



کاربرد مدل‌های دمایی، رطوبتی و رطوبتی-دمایی در مدل‌سازی جوانه‌زنی رقم مانکن گندم سیاه (*Fagopyrum esculentum* Moench.)

علی عبادی^{۱*}، فاطمه احمد نیا^۲ و قاسم پرمون^۳

۱. استاد گروه مهندسی ژنتیک و تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران
۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ژنتیک و تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران
۳. بخش تحقیقات چغندرقد، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۵)

چکیده

به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی و دما بر جوانه‌زنی بذرهای گندم سیاه با استفاده از مدل‌های مختلف رطوبتی و دمایی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل تنش خشکی (۰، -۰/۲، -۰/۴، -۰/۶، -۰/۸ و -۱/۰ مگاپاسکال) و دماهای مختلف (۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد) بود. نتایج نشان داد که هر سه مدل دمایی، رطوبتی و رطوبتی-دمایی توانستند که جوانه‌زنی این گیاه را به خوبی پیش‌بینی نمایند. دمای پایه این گیاه از ۰/۹۸- تا ۱۱ درجه سانتی‌گراد، دمای بهینه از ۲۱/۷ تا ۲۴/۷ درجه سانتی‌گراد و دمای بیشینه از ۳۰ تا ۴۱/۵ درجه سانتی‌گراد تخمین زده شد که پتانسیل اسمزی سبب افزایش دمای پایه و کاهش دمای بهینه و بیشینه شد. افزایش دما سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی (کاهش ضریب رطوبتی (θ_{HT}) از ۱۸ مگاپاسکال روز در دمای ۸ درجه به ۳ مگاپاسکال در روز در دمای ۳۵ درجه شد) و کاهش تحمل به تنش در اثر افزایش پتانسیل پایه (افزایش پتانسیل پایه (ψ₅₀) از ۰/۹۲۷- تا ۰/۴۳- مگاپاسکال) شد. طبق خروجی مدل رطوبتی-دمایی نیز دمای پایه این گیاه ۱/۹۳ سانتی‌گراد بوده و در این گیاه بالاترین سرعت جوانه‌زنی در ۹۲ مگاپاسکال درجه روز قابل مشاهده است و پتانسیل پایه این گیاه در دمای پایه در حدود ۱/۳۱- مگاپاسکال می‌باشد. به طور کلی مشخص شد که هر سه مدل به خوبی توانستند جوانه‌زنی بذرهای گیاه را در دما و پتانسیل‌های مختلف پیش‌بینی نمایند ولی با توجه به این که مدل رطوبتی-دمایی یک مدل جامع‌تری می‌باشد، می‌توان این مدل را توصیه نمود.

کلمات کلیدی: جوانه‌زنی، گندم سیاه، پل اتیلن گلایکول، مدل‌سازی

Using of thermal time, hydrotime and hydrothermal time on germination modeling of Mancan variety of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench.)

A. Ebadi^{1*}, F. Ahmadnia², Gh. Parmoon³

1. Professor, Department of Genetic Engineering and Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, university of Mohaghegh Ardabili, Iran.
2. PhD Student, Department of Genetic Engineer and Plant Product, Faculty of Agriculture and Natural Resources, university of Mohaghegh Ardabili, Iran.
3. Sugar Beet Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Education and Extension Organization (AREEO), Kermanshah, Iran.

(Received: Jul. 21, 2022 – Accepted: Oct. 07, 2022)

Abstract

In order to study the effect of different levels of temperature and drought stress on seed germination of buckwheat, a factorial experiment was conducted as completely randomized design with three replications. Experimental treatments were included different levels of drought stress (0, -0.2, -0.4, -0.6 and -0.8 MPa) and different temperatures (8, 12, 16, 20, 25, 30, 35 and 40 °C). Results indicated that all models of thermal time, hydro time, and hydrothermal time could predict the germination of buckwheat. Basic temperature (T_b) was estimated from -0.98 to 11 °C, optimum temperature (T_o) from 21.7 to 24.7 °C, and maximum temperature (T_c) from 30 to 41.5 °C, which increasing osmotic potential T_b and decreased T_o and T_c in Buckwheat. Also, increasing temperature enhanced germination rate (decrease θ_{HT} from 18 MPa day at 8 °C to 3 MPa day at 35 °C), and decreased stress tolerance due to increasing basic potential (increase ψ₅₀ from -0.927 MPa to 0.043 MPa). According to the hydrothermal time model output, T_b in this plant was about 1.93 °C and at 92 MPa °C day, highest germination rate was recorded and ψ_{T_b} in this plant in T_b was about -1.31 MPa. Also, it was defined that, each of these three models predicted buckwheat seed germination under different temperature and water potential, but hydrothermal time was a general model and we can have suggested it.

Keywords: Germination, Buckwheat, PEG, Modeling

* Email: ebadi@uma.ac.ir

مقدمه

گندم سیاه (*Fagopyrum esculentum* Moench.) گیاهی یک‌ساله متعلق به تیره علف هفت‌بند (*Polygonaceae*)، بومی آمریکاست و در مزارع شمال شرقی و شمال ایالات متحده کشت آن رایج است. این گیاه دارای پروتئین غیر گلوتم با ترکیب متعادل اسید آمینه و حاوی مقدار زیادی چربی خام است که در آن اسیدهای چرب غیر اشباع غالبند. ارزش غذایی گندم سیاه به دلیل وجود پروتئین‌های خاص بسیار بیشتر از دیگر محصولات دانه‌ای است (Lim *et al.*, 2012). گندم سیاه به دلیل وجود طیف گسترده‌ای از فلاونوئیدها دارای خاصیت درمانی بوده و تأثیر این گیاه در کاهش کلسترول خون، مهار تومور، تنظیم فشار خون بالا، کنترل التهاب، سرطان و دیابت توجه پژوهشگران به این گیاه را جلب کرده است (Syta, 2015; Ishii *et al.*, 2008). گزارش‌ها نشان می‌دهند که گندم سیاه یک گیاه متحمل به شرایط محدود محیطی بوده ولی واکنش آن به تنش‌های غیرزیستی خصوصاً تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی به طور کامل مشخص نمی‌باشد (Aubert and Quinet, 2022).

یکی از مشکلات عمده در زراعت برخی از محصولات کشاورزی ظهور کند و غیر یکنواخت گیاهچه می‌باشد و بذرهایی که دارای درصد جوانه‌زنی کمتر، سرعت کند و غیر یکنواخت باشند، بوته‌های حاصل از آن‌ها نیز رشد اولیه کندتری خواهند داشت (Farzaneh *et al.*, 2014). رشد اولیه آهسته و استقرار کندتر از یک سو باعث تأخیر در بسته شدن کانوی، کاهش دریافت تشعشع خورشیدی و کاهش عملکرد می‌شود و از سوی دیگر عدم یکنواختی در سبز شدن و ایجاد اختلاف در اندازه بوته‌ها موجب بروز مشکلاتی در مدیریت مزرعه می‌شود (Farzaneh *et al.*, 2014)؛ بنابراین بررسی عوامل مؤثر بر جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه از ضرورت‌های اولیه زراعت هر محصول به شمار می‌آید.

جوانه‌زنی فرآیند فیزیولوژیکی است که با رشد

گیاهچه آغاز و با نفوذ ریشه‌چه به داخل بافت‌های پوششی بذر کامل می‌شود (Bradford, 2002). بذرهایی دارای قوه‌نامه و فاقد خواب، در صورتی که در بستر بذر مطلوب، دمای مناسب، رطوبت و اکسیژن کافی قرار گیرند، آب جذب نموده، تنفس و سوخت‌وساز افزایش یافته و ریشه‌چه از بذر خارج می‌شود (Bewley and Black, 2013). دما دو اثر متفاوت روی بذر دارد، به طوری که بر خواب بذر و جوانه‌زنی در بذرهایی فاقد خواب تأثیر می‌گذارد. دما نه تنها بر درصد جوانه‌زنی بلکه بر سرعت جوانه‌زنی بذر نیز تأثیرگذار است (Batlla and Benech-Arnold, 2015). اثر دما بر جوانه‌زنی برحسب دمای کاردینال (دمای حداقل، مطلوب و حداکثر) بیان می‌شوند و جوانه‌زنی در این محدوده دمایی رخ می‌دهد و این پاسخ گیاهان را با استفاده از مدل دمایی مورد بررسی قرار می‌دهند. واکنش به دما وابسته به گونه، رقم، منطقه رشد و مدت‌زمان بعد از برداشت است. به طور کلی بذرهایی مناطق معتدله در مقایسه با مناطق گرمسیری به درجه حرارت‌های کمتری نیاز داشته و گونه‌های وحشی نیاز به دما کمتری از گونه‌های اهلی دارند (Savaedi *et al.*, 2019). در تعیین ضریب دمایی دو گونه ماریتغال (*Silybum marianum*) و شکر تیغال (*Calendula officinalis*) مشخص شد که ضریب دمایی لازم برای جوانه‌زنی این دو گیاه به ترتیب حدود ۹۸۰ و ۲۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ساعت بوده و تنش شوری ۲۰۰ میلی‌مولار موجب افزایش مقادیر آن‌ها به ۲۱۵۰ و ۲۵۶۹ درجه سانتی‌گراد ساعت شد (Parmoon *et al.*, 2018).

پتانسیل آب خاک نیز یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی می‌باشد که بر جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه تأثیر می‌گذارد (Gurvich *et al.*, 2017). پاسخ جوانه‌زنی بذرها به پتانسیل‌های مختلف را با استفاده از مدل رطوبتی^۵

¹ Base temperature (Tb)

² Optimum temperature (To)

³ Maximum temperature (Tc)

⁴ Thermal time

⁵ Hydrotime

ارزیابی می‌کنند. توانایی جوانه‌زنی بذرها تحت شرایط رطوبتی، شانس استقرار بیشتر گیاه و تراکم بالاتر را به همراه دارد که موجب افزایش عملکرد می‌شود (Mirsky *et al.*, 2013). گزارش شده است در بسیاری از گیاهان درصد و سرعت جوانه‌زنی با کاهش پتانسیل آب کاهش می‌یابد (Ullah *et al.*, 2022; Kiani *et al.*, 2020). تیلکا و همکاران (Tilki *et al.*, 2007) در مطالعه سه گونه کاج (*Pinus brutia*) مشاهده کردند، جوانه‌زنی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد بود و همچنین با کاهش در پتانسیل اسمزی جوانه‌زنی روندی نزولی پیدا کرد.

مدل رطوبتی-دمایی^۱ که ترکیبی از دو مدل دمایی و رطوبتی می‌باشد، به‌طور موفقیت‌آمیزی برای کمی‌سازی همزمان اثر دما و پتانسیل آب بر جوانه‌زنی توسط بسیاری از محققین پیشنهاد شده است (Bewley *et al.*, 2013). این مدل بطور دقیق پاسخ جوانه‌زنی توده‌های بذر را در کلیه دماها و پتانسیل‌های آب برآورد نمود. پارامترهای این مدل در واقع نشان دهنده شاخص‌های وضعیت فیزیولوژیکی و اکولوژیکی توده‌های بذر می‌باشند (Bradford and Still, 2004). بخشنده و همکاران (Bakhshandeh *et al.*, 2011) نیز در مدل‌سازی جوانه‌زنی دو رقم سویا و گاوپنبه در ترکیب اثر دما و رطوبت با استفاده از مدل رطوبتی-دمایی، مقدار دمای پایه برای جوانه‌زنی گیاه گاوپنبه، ارقام ویلامز و دیپایکس را به ترتیب ۳/۴، ۳/۳ و ۵/۲ درجه سانتی‌گراد، پتانسیل پایه برای هر سه گیاه ۰/۹- مگاپاسکال و مقدار ضریب رطوبتی-دمایی را به ترتیب ۲۶/۷، ۲۶/۵ و ۲۷/۳ مگاپاسکال در درجه سانتی‌گراد در روز بیان کردند. اکبری و همکاران (Akbari *et al.*, 2015) نیز گزارش کردند، مدل رطوبتی-دمایی ویبول، برازش بیشتری در مقایسه با مدل رطوبتی-دمایی نرمال به داده‌های جوانه‌زنی بذرهای کرچک داشته و دمای پایه برای جوانه‌زنی بذرهای کرچک معادل ۸/۸۶ درجه سانتی‌گراد و ثابت

ضریب رطوبتی-دمایی معادل ۸۳۳/۱ مگاپاسکال درجه سانتی‌گراد ساعت، پتانسیل آب پایه برای شروع جوانه‌زنی معادل ۱/۷۱- مگاپاسکال برآورد شد.

با توجه به مطالب بیان شده، هدف از این مطالعه بررسی مدل‌های دمایی، رطوبتی و رطوبتی-دمایی جهت برازش روند تغییرات جوانه‌زنی گندم سیاه به دما و پتانسیل‌های اسمزی مختلف جهت تعیین نیازهای جوانه‌زنی این گیاه و توسعه کاشت آن می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در آزمایشگاه دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ اجرا شد. برای بررسی قابلیت جوانه‌زنی بذرهای گندم سیاه تحت تأثیر پتانسیل اسمزی و دماهای مختلف، بذرهای در سطوح مختلف پتانسیل اسمزی (۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸- مگاپاسکال) و دماهای مختلف شامل ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد آزمون شدند. به‌منظور تهیه پتانسیل‌های اسمزی مختلف از پلی‌اتیلن گلایکول ۶۰۰۰ استفاده شد و سپس مدل‌ها ارزیابی شدند.

در این مطالعه از بذرهای رقم مانکن تولید شده سال ۲۰۱۹ در ایالت ماساچوست آمریکا استفاده شد. برای آزمون جوانه‌زنی، ابتدا بذرهای گندم سیاه با هیپوکلریت سدیم یک درصد به مدت یک دقیقه ضدعفونی، سپس به‌منظور بررسی تأثیر تیمارهای مورد استفاده، تعداد ۵۰ عدد بذر به‌صورت تصادفی انتخاب و در پتری دیش‌های شیشه‌ای استریل به قطر ۹ سانتی‌متر قرار گرفت. به هر پتری دیش در حدود ۷ میلی‌لیتر محلول پلی‌اتیلن گلایکول بر اساس غلظت مربوطه افزوده شد و سپس در دماهای مختلف در داخل ژرمیناتور قرار داده شد. در تمام مراحل

¹ Hydrothermal time

² Mancan

$$\text{Probit} = \{\psi - \Theta_{HT} / t_{50}\} - \psi_{b(50)} / \sigma_{\psi_{b(50)}} \quad (۴)$$

این معادله به عنوان معادله کلیدی و کاربردی برای تخمین ضرایب رطوبتی محسوب می‌شود که با داشتن مقدار پتانسیل آب (ψ)، زمان جوانه‌زنی (t) برای هر صدک و درصد تجمعی جوانه‌زنی در زمان t به راحتی از طریق مدل غیرخطی بالا ضرایب رطوبتی را برای داده‌های جوانه‌زنی برآورد شد (Bradford and Still, 2004).

مدل ضریب دمایی

مدل ضریب دمایی نیز برای کمی‌سازی تأثیر دما بر جوانه‌زنی استفاده می‌شود؛ که این مدل از دو قسمت تشکیل شده است. برای تخمین دماهای کاردینال از رابطه ۵ و برای تعیین ضرایب دمایی زیر دمای بهینه نیز از رابطه ۶ استفاده شد (Hu et al., 2015).

رابطه (۵)

$$F_t = (T - T_b) / (T_o - T_b) \quad \text{if } T_b < T < T_o$$

$$F_t = 1 - ((T - T_o) / (T_c - T_o)) \quad \text{if } T_o < T < T_c$$

$$\theta_{TT(50)} = (T - T_b) \times t_{50} \quad (۶)$$

که در آن $\theta_{TT(50)}$: ثابت ضریب دمایی (درجه سانتی‌گراد در روز) یعنی مقدار دماهای بالاتر از دمای پایه، که برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی، T : دمای محیط و T_b : دمای پایه (درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. T_o : دمایی بهینه و T_c : دمای بیشینه است.

مدل رطوبتی - دمایی

برای کمی‌سازی سرعت جوانه‌زنی نسبت به دما و پتانسیل آب به‌طور همزمان نیز از مدل رطوبتی - دمایی استفاده شد (رابطه ۷). این مدل قادر است جوانه‌زنی را در دامنه‌ای از دماها و پتانسیل‌های آب توصیف نماید (Bradford, 2002).

$$\theta_{HTT} = (\psi - \psi_b) \times (T - T_b) \times t_{50} \quad (۷)$$

که در این رابطه، θ_{HTT} : ثابت رطوبتی - دمایی

آزمایش برای جلوگیری از ایجاد خطا در پتانسیل اسمزی از کاغذهای جوانه‌زنی استفاده نشد. به‌منظور حفظ رطوبت، پتری‌دیش‌ها در داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شدند. شمارش بذره‌های جوانه‌زده به‌صورت روزانه تا ۱۴ روز انجام شد و خروج ریشه‌چه (به طول ۲ میلی‌متر) به منزله جوانه‌زنی بذر محسوب شد (Perry, 1991).

برای محاسبه درصد و سرعت جوانه‌زنی از برنامه Germin استفاده شد که این برنامه D_{50} (یعنی مدت زمان لازم تا جوانه‌زنی ۵۰ درصد حداکثر) را محاسبه می‌کند (Soltani et al., 2002).

$$R_{50} = 1 / D_{50} \quad (۱)$$

مدت زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی نیز بر اساس فرمول زیر محاسبه شد. در این رابطه N جوانه‌زنی نهایی و n_i و n_j نیز تعداد بذور جوانه‌زده در مدت زمان بین $t_i - t_j$ می‌باشد (Coolbear, 1984).

$$D_{50} = t_i + [(N/2 - n_i) (t_j - t_i)] / (n_j - n_i) \quad (۲)$$

مدل رطوبتی

یکی از مدل‌هایی که حساسیت جوانه‌زنی بذور به تنش خشکی را تعیین می‌کند، مدل رطوبتی می‌باشد (Gummerson, 1986). استفاده از این مدل پس از مطالعات برادفورد و سوماسکو (Bradford and Somasco, 1994) گسترش پیدا کرد:

$$\Theta_{HT} = (\psi - \psi_{b(50)}) \times t_{50} \quad (۳)$$

در این رابطه Θ_{HT} ضریب رطوبتی برحسب مگاپاسکال روز، ψ : پتانسیل آب برحسب مگاپاسکال، $\psi_{b(50)}$: پتانسیل آب پایه برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی برحسب مگاپاسکال، t_{50} : زمان جوانه‌زنی ۵۰ درصد از بذور برحسب روز را نشان می‌دهند. با توسعه معادله بالا، در نهایت به معادله زیر برای مدل رطوبتی رسیدند.

$$BIC = -2 \log L_i + p_i \log n \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن L_i و P_i احتمال و تعداد پارامترها برای هر مدل و n تعداد مشاهدات است.

$$RMSE = 1 - \sqrt{\frac{SS_{residual}}{n - p - 1}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

برای تجزیه و تحلیل تمام مدل‌های آماری از نرم‌افزار R نسخه 4.2.1 و پکیج‌های tidyverse، Devtools، ggplot2، cowplot، drcSeedGerm، gridExtra، drc استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس درصد و سرعت جوانه‌زنی بذرهای گندم سیاه نشان داد که این دو پارامتر تحت تاثیر پتانسیل‌های مختلف دما و اثر متقابل دما در پتانسیل در سطح ۱ درصد قرار گرفتند (جدول ۱).

جدول ۱- نتایج آنالیز واریانس درصد و سرعت جوانه‌زنی گندم سیاه در پتانسیل‌های اسمزی و مختلف دما

Table 1- Analysis of variance of germination percentage and germination rate of buckwheat seeds under several water potential and temperature

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Means square	
		درصد جوانه زنی Germination percentage	سرعت جوانه زنی Germination rate
		پتانسیل اسمزی Water potential (WP)	4
دما Temperature (T)	8	2549.43**	0.294**
اثر متقابل WP×T	32	258.79**	0.025**
خطا Error	90	20.59	0.003
ضریب تغییرات CV (%)	-	22.17	17.99

** Significant at 1 %

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

(مگا پاسکال در درجه سانتی‌گراد در روز)، T : دمای محیط و T_b : دمای پایه (درجه سانتی‌گراد)، ψ : پتانسیل آب و ψ_b : پتانسیل آب پایه (مگا پاسکال) می‌باشد. این تابع واکنش جوانه‌زنی در دماهای زیر مطلوب و در پتانسیل‌های آب مختلف را به خوبی توصیف می‌کند (Larsen et al., 2004).

تعیین دقت مدل

برای ارزیابی برازش مدل‌ها از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا^۱، شاخص آکاییک تصحیح شده^۲ و معیار اطلاعات بیسین^۳ برای تعیین دقت مدل مورد استفاده قرار گرفت که روابط آن‌ها (۸ تا ۱۰) در ادامه بیان شده است (Anderson and Burnham, 2002).

$$AICc = n \ln \left(\frac{RSS}{n} \right) + 2K + \frac{2K(K+1)}{n-K-1} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که RSS مجموع مربعات باقی‌مانده؛ n تعداد نمونه و K ، تعداد پارامترهای مدل مورد نظر می‌باشد.

¹ Root Mean Square Error (RMSE)

² Akaike Information Criterion corrected (AICc)

³ Bayesian information criterion (BIC)

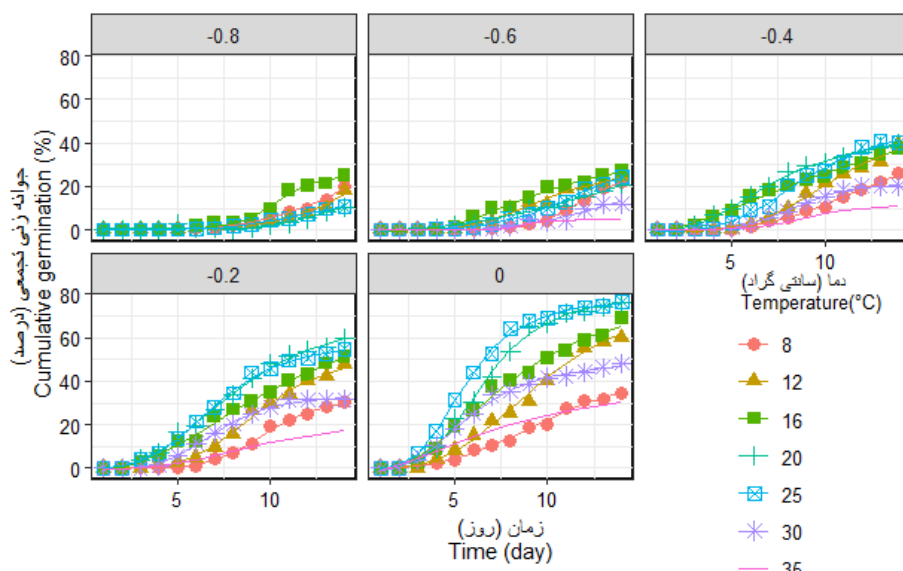
⁴ Residual Sum of Squares

مدل دمایی

سانتی گراد در پتانسیل اسمزی ۰/۸- مگاپاسکال کاهش یافتند (شکل ۲). نتایج ضریب مدل دمایی ($\theta_{TT(50)}$) نیز مشخص نمود، این ضریب ۱۲۴/۸ درجه سانتی گراد در روز و ضریب یکنواختی ($\sigma_{TT(50)}$) آن نیز ۶۰ درجه سانتی گراد روز بود. پتانسیل اسمزی موجب افزایش ضریب دمایی به ۲۸۳/۳ درجه سانتی گراد در روز شده، ولی تغییرات ضریب یکنواختی غیرمعنی دار و بدون روند مشخص بود (جدول ۲).

دمای کاردینال جهت امکان ارزیابی محدودیت‌های جغرافیایی گونه‌ها و زمان کشت آن‌ها و همچنین برای پیش‌بینی مراحل رشد و نمو گیاهان زراعی شاخص‌های مناسبی به حساب می‌آید (Nazari et al., 2018). طبق گزارش‌های صورت گرفته، ژنتیک گیاه و شرایط اقلیمی رشد و نمو گیاه از عوامل مؤثر بر دمای کاردینال و میزان ضریب دمایی جوانه‌زنی بذر هستند. مشخص شده است که اکثر گونه‌های گیاهی در محدوده دمای بین ۱۵ تا ۳۰ درجه سانتی گراد بهترین جوانه‌زنی را دارند (Pourreza and Bahrani, 2012).

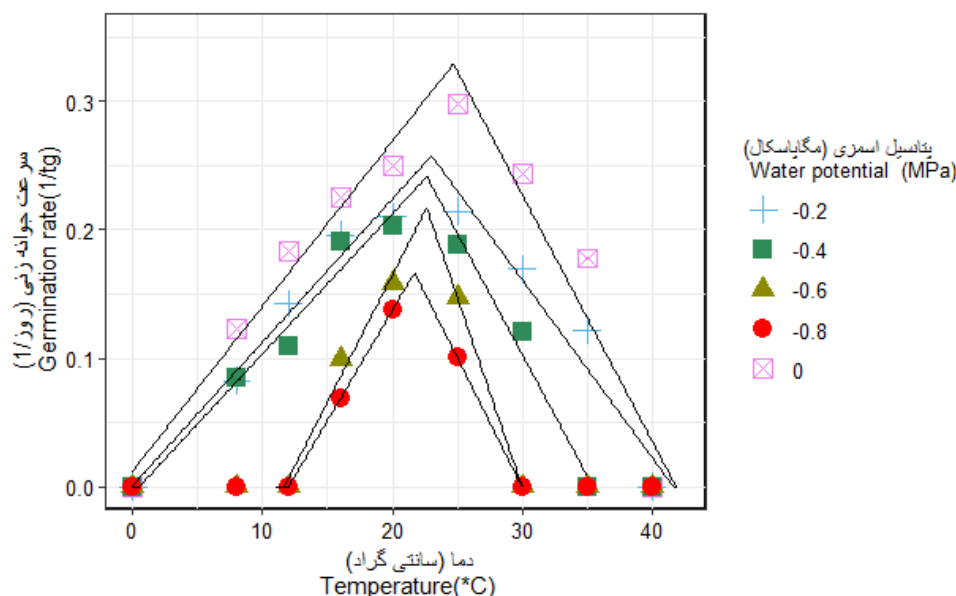
نتایج برازش مدل دمایی به‌منظور بررسی روند تغییرات جوانه‌زنی بذرهای گندم سیاه در دماهای مختلف نشان داد، این مدل توانست در پتانسیل‌های اسمزی بالا (صفر مگاپاسکال) بهتر از پتانسیل‌های اسمزی پایین (منفی‌تر) جوانه‌زنی در دماهای مختلف را پیش‌بینی نماید، به‌طوری که RMSE این مدل از محدوده ۰/۰۰۷ تا ۰/۰۳۲ و AICc و BIC نیز در محدوده ۳۱/۵- تا ۱۲۱- و ۳۰/۶- تا ۱۲۰/۶- متغیر بود و مقادیر پیش‌بینی شده بر مقادیر مشاهده شده از انطباق قابل قبولی برخوردار بودند (جدول ۲ و شکل ۱). طبق پارامترهای تخمین شده از این مدل، دمای پایه جوانه‌زنی (T_b) این گیاه در پتانسیل اسمزی آب مقطر در حدود ۰/۹۸- درجه سانتی گراد بوده که در اثر کاهش پتانسیل اسمزی این دما افزایش یافته و در پتانسیل‌های اسمزی ۰/۶- و ۰/۸- مگاپاسکال به ۱۱/۶ و ۱۲ درجه سانتی گراد رسید. دمای بهینه (T_o) و بیشینه (T_c) این گیاه نیز از ۲۴/۷ و ۴۱/۹ درجه سانتی گراد در پتانسیل آب مقطر (پتانسیل اسمزی صفر) به ۲۱/۷ و ۳۰ درجه



شکل ۱- روند تغییرات جوانه‌زنی جمعیتی بذرهای گندم سیاه در پتانسیل اسمزی و دماهای مختلف با استفاده از مدل دمایی نقاط مقادیر مشاهده شده و خطوط مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد.

Figure 1- Trend of cumulative germination of buckwheat seeds under water potential and temperature by using of thermal time model.

Circle is observed and lines is predicted values



شکل ۲- روند تغییرات سرعت جوانه‌زنی بذرهای گندم سیاه در پتانسیل اسمزی و دماهای مختلف با استفاده از مدل سیگمنند نقاط مقادیر مشاهده شده و خطوط مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد.

Figure 2- Trend of germination rate of buckwheat seeds under different water potential and temperature by using of segmented model. Circles are observed and lines predicted values

جدول ۲- پارامترهای تخمین شده مدل دمایی جهت پیش‌بینی جوانه‌زنی تجمعی بذرهای گندم سیاه در پتانسیل اسمزی و دماهای مختلف.

Table 2- Estimated parameters of thermal time model to predict germination of buckwheat seeds under several water potential and temperature

پتانسیل اسمزی (مگاپاسکال) Water Potential (MPa)	پارامترهای مدل Parameters of model					ضرایب تخمین Estimated Coefficient		
	T_b (°C)	T_o (°C)	T_c (°C)	$\theta_{TT(50)}$ (°C day)	$\sigma_{TT(50)}$ (°C day)	RMSE	AICc	BIC
0	-0.98±2.29	24.7±1.32	41.9±1.64	124.8±2.8	60.0±2.4	0.032	-31.5	-30.6
-0.2	-0.12±1.66	23.0±1.14	41.6±1.49	128.2±3.1	79.8±0.8	0.022	-38.9	-37.9
-0.4	0.47±2.36	22.7±0.88	35.5±0.83	130.0±5.0	62.9±2.4	0.016	-44.0	-43.0
-0.6	11.6±0.36	22.6±0.30	30.0±0.25	264.8±4.1	78.7±4.0	0.007	-58.2	-57.3
-0.8	12.0±0.01	21.7±0.01	30.0±0.01	283.3±9.9	68.7±1.5	0.000	-121.5	-120.6

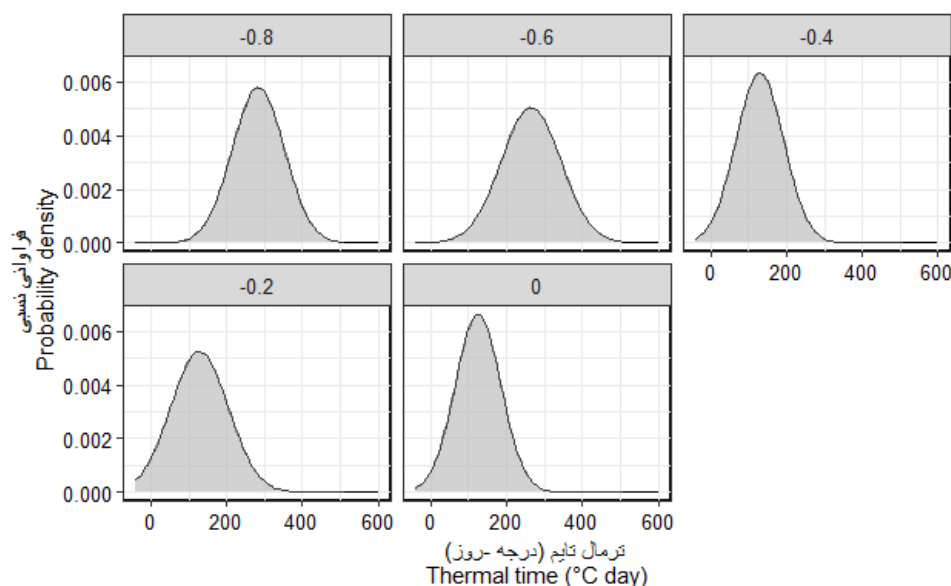
در مطالعه ما نیز دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد، مناسب‌ترین دماها برای گندم سیاه بود (شکل ۱). با توجه به اینکه دما اثر قابل توجهی در آغاز جوانه‌زنی دارد، همواره از مهم‌ترین عامل‌های تعیین‌کننده موفقیت یا شکست استقرار گیاهچه به شمار می‌رود

همچنین کاهش پتانسیل آب در اثر تنش‌های اسمزی و تنش شوری باعث اختلال در جذب آب و کند شدن فعالیت‌های متابولیکی داخل بذر شده و در نهایت زمان جوانه‌زنی را افزایش می‌دهد که این امر سبب افزایش ضریب دمایی گیاه

کاهش پتانسیل اسمزی میزان چولگی به سمت راست متمایل شد. همچنین میزان کشیدگی نمودار بیشتر شده که این امر افزایش دامنه تغییرات ضریب دمایی جمعیت بذری را نشان می‌دهد، به طوری که در پتانسیل اسمزی $0/8-$ مگاپاسکال در ضریب دمایی ۲۸۵ درجه سانتی‌گراد در روز ۵۰ درصد جمعیت بذر قادر به جوانه‌زنی می‌باشد (شکل ۳).

می‌شود (Patane *et al.*, 2013, Parmoon *et al.*, 2018) که با نتایج مشاهده شده در این مطالعه مطابقت دارد.

نتایج توزیع فراوانی جمعیت بذری در ضریب دمایی مختلف در شکل ۳ نمایش داده شده است، در پتانسیل اسمزی صفر مگاپاسکال در ضریب دمایی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد در روز بیشتر جمعیت بذری جوانه‌زده و با



شکل ۳- فراوانی نسبی جمعیت بذری گندم سیاه بر اساس ضریب دمایی در پتانسیل‌های مختلف اسمزی

Figure 3- probability density of buckwheat seed population as thermal time under various osmotic potential.

۵۰ درصدی جوانه‌زنی شد به طوری که در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد این مقادیر به $3/02$ مگاپاسکال در روز، $0/43$ مگاپاسکال و $0/49$ مگاپاسکال رسید (جدول ۳).

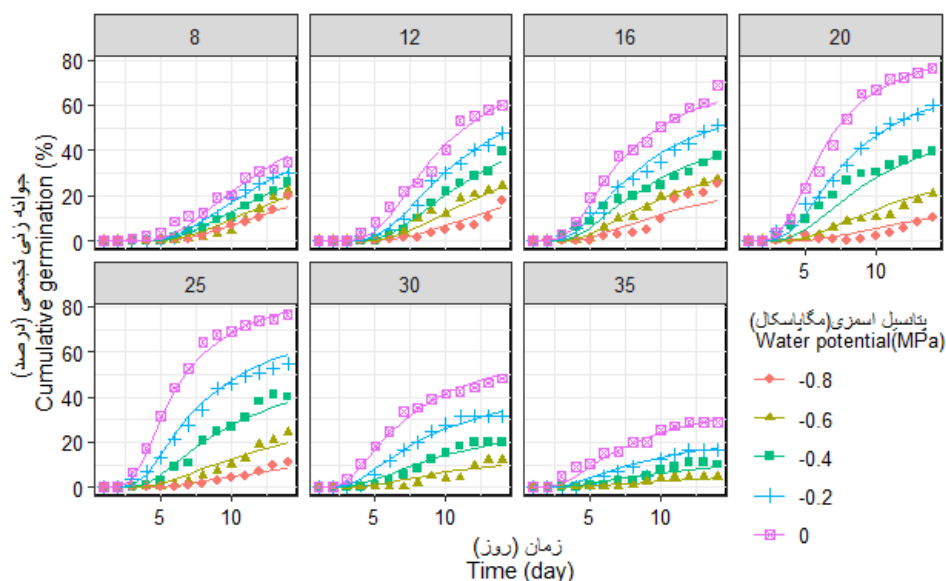
مشخص شده است که ضریب رطوبتی شاخصی از سرعت جوانه‌زنی در سطوح مختلف تنش خشکی است و هر چه این ضریب کمتر باشد، نشان دهنده بیشتر بودن سرعت جوانه‌زنی است (Cardoso and Bianconi, 2013) بنابراین با افزایش دما سرعت جوانه‌زنی در پتانسیل‌های مختلف افزایش یافت که با نتایج دیگر مطالعات صورت گرفته مطابقت دارد (Akbari *et al.*, 2015; Bakhshandeh *et al.*, 2011; Tabatabaei *et al.*, 2020). همچنین بر اساس سایر پارامترها این مدل، ψ_{50} نشان دهنده

مدل رطوبتی

نتایج نشان داد، مدل رطوبتی توانست تغییرات جوانه‌زنی گندم سیاه را در پتانسیل‌های مختلف به صورت مناسب پیش‌بینی نماید و با افزایش دما از دقت مدل کاسته شد. تغییرات RMSE از $0/17$ تا $0/28$ و AICc در محدوده ۲۸۴- تا ۳۶۴- و تغییرات BIC نیز از ۲۷۵- تا ۳۵۵- محاسبه شد (جدول ۳ و شکل ۴). طبق پارامترهای این مدل، در دمای ۸ درجه سانتی‌گراد، ضریب رطوبتی (θ_{HT}) این گیاه ۱۸ مگاپاسکال در روز با پتانسیل پایه ۵۰ درصد جوانه‌زنی (ψ_{50}) $0/927-$ مگاپاسکال و انحراف ($\sigma_{\psi_{50}}$) $0/91$ مگاپاسکال بوده و افزایش دما موجب کاهش ضریب رطوبتی و انحراف و افزایش پتانسیل پایه

توزیع پتانسیل پایه در جمعیت ($\sigma_{\psi 50}$) نشان دهنده میزان یکنواختی جوانه‌زنی در جمعیت است و هر چه میزان عددی این ضریب کوچکتر باشد نشان دهنده یکنواختی بیشتر است. در این گیاه تغییرات یکنواختی با افزایش دما افزایش یافته است که نشان دهنده افزایش سرعت جوانه‌زنی در اثر دما می‌باشد (Bradford, 2002).

سطحی از پتانسیل است که در کمتر از آن میزان جوانه‌زنی به کمتر از ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی خواهد رسید و هر چه این پارامتر منفی‌تر باشد بیانگر تحمل بیشتر گیاه به تنش آبی است. مشاهده شد، گندم سیاه در دماهای بالا بیشتر تحت تأثیر تنش آبی قرار می‌گیرد و تحمل گیاه نیز کاهش پیدا می‌کند (جدول ۲). همچنین ضریب انحراف



شکل ۴- روند تغییرات جوانه‌زنی تجمعی بذرهای گندم سیاه در پتانسیل اسمزی و دماهای مختلف با استفاده از مدل رطوبتی نقاط مقادیر مشاهده شده و خطوط مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد.

Figure 4- Trend of cumulative germination of buckwheat seeds under several water potential and temperature by using hydrotime model. Circles are observed and lines are predicted values

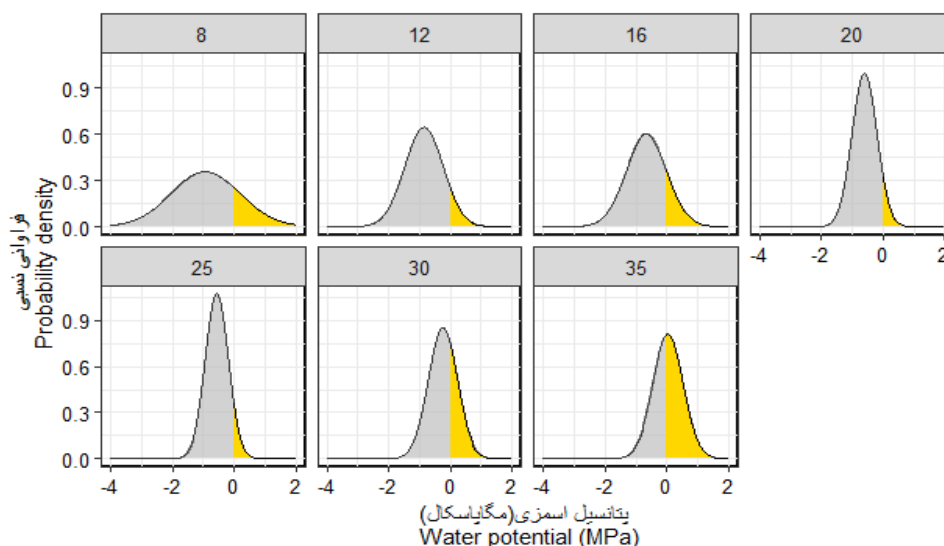
جدول ۳- پارامترهای تخمین شده مدل رطوبتی جهت پیش‌بینی جوانه‌زنی تجمعی بذرهای گندم سیاه در پتانسیل اسمزی و دماهای مختلف.

Table 3- Estimated parameters of hydrotime model to predict germination of buckwheat seeds under various water potential and temperature.

دما (سانتی‌گراد) Temperature (°C)	پارامترهای مدل Parameters of model			ضرایب تخمین Estimated Coefficient		
	θ_{HT} (MPa day)	ψ_{50} (MPa)	$\sigma_{\psi 50}$ (MPa)	RMSE	AICc	BIC
8	18.06±1.14	-0.927±0.07	0.91±0.06	0.017	-364.0	-355.0
12	9.73±0.38	-0.860±0.03	0.62±0.02	0.020	-342.1	-333.1
16	6.50±0.30	-0.660±0.03	0.66±0.02	0.026	-306.9	-297.9
20	4.38±0.16	-0.602±0.02	0.40±0.01	0.028	-298.8	-289.8
25	3.71±0.11	-0.548±0.01	0.37±0.01	0.023	-326.9	-318.0
30	3.51±0.16	-0.252±0.02	0.47±0.01	0.018	-284.0	-275.9
35	3.02±0.23	0.043±0.02	0.49±0.02	0.017	-295.1	-287.0

مثبت تری بوده و از این رو حتی تحت شرایط مطلوب بستر بذر نیز قادر به جوانه زنی نخواهد بود (Watt et al., 2011). نمودار زمان نرمال شده جوانه زنی بر اساس پتانسیل پایه نیز مشخص نمود، در دماهایی کمتر و بالاتر از زمان بهینه جوانه زنی طولانی تر (کشیده تر شدن خط استاندارد زمان نرمال شده) و افزایش متوسط زمان جوانه زنی را به همراه دارد. به طوری که در محدوده ۱۵ روز جوانه زنی در دمای ۲۰ و ۲۵ درجه سانتی گراد جوانه زنی به بالاتر از ۷۵ درصد رسیده و بعد از این زمان جوانه زنی در این دو دما انجام نمی شود. این در حالی است در دمای ۸ درجه سانتی گراد محدوده جوانه زنی در حدود ۳۰ درصد و در دماهای ۱۲ و ۱۶ درجه سانتی گراد به ۵۰ و ۵۵ درصد رسید. در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد نیز محدوده جوانه زنی این گیاه به کمتر از ۵۰ و در دمای ۳۵ درجه به کمتر از ۳۰ درصد رسید. به طور کلی مشخص شد که کاهش پتانسیل اسمزی علاوه بر کاهش جوانه زنی موجب افزایش مدت زمان لازم برای جوانه زنی شده و خروج از محدوده دمای بهینه نیز موجب شدت بخشیدن به این اثرات شد (شکل ۶).

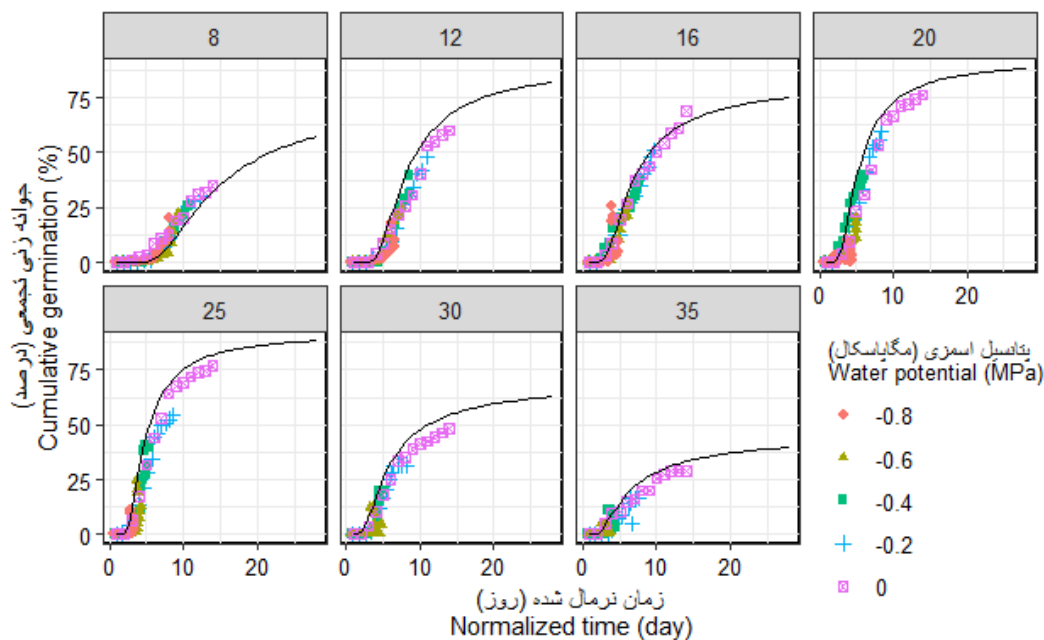
نمودار توزیع فراوانی جمعیت بذری مورد مطالعه نیز نشان داد در دماهایی بهینه (۲۰ و ۲۵ درجه سانتی گراد) این گیاه کمترین میزان پراکندگی پتانسیل پایه جوانه زنی را داشته و نمودار کمترین میزان کشیدگی را داشت. همچنین با افزایش و کاهش دما از محدوده بهینه، میزان پراکندگی و کشیده تر شدن توزیع آن‌ها افزایش یافت (شکل ۵). مشخص شد که در دماهای ۲۰ و ۲۵ درجه سانتی گراد، جمعیت کمتری از بذرها دارای پتانسیل پایه بالاتر از پتانسیل آب مقطر بوده ولی با افزایش دما تا ۳۰ و ۳۵ درجه این فراوانی بیشتر شده به طوری که در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد در حدود ۵۰ درصد جمعیت بذری قادر نبوده در پتانسیل آب مقطر و کمتر از آن جوانه زنی داشته باشند. همچنین نتایج در مورد دماهای زیر بهینه نیز همانند دماهایی بالاتر از بهینه بوده ولی شدت تغییرات کمتری مشاهده شد (شکل ۵). گزارش شده است، چولگی توزیع پتانسیل آب پایه دارای پیامدهای اکولوژیکی مهمی است و بیانگر این مفهوم است که بخش اعظم بذرها یک جمعیت بذری در دماهای بالا دارای مقادیر پتانسیل آب پایه



شکل ۵- فراوانی نسبی جمعیت بذری گندم سیاه بر اساس پتانسیل پایه در دماهای مختلف ناحیه نارنجی فراوانی جمعیت با پتانسیل پایه بالاتر از پتانسیل آب مقطر می باشد.

Figure 5- probability density of buckwheat seed population based on water potential under different temperatures.

The orange zone is the population frequency based on potentials higher than the distilled water potential



شکل ۶- روند تغییرات جوانه‌زنی بذرهای گندم سیاه در پتانسیل اسمزی و دماهای مختلف بر اساس زمان نرمال شده دایره مقادیر مشاهده شده و خطوط مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد.

Figure 6- Cumulative germination trend of buckwheat seeds under water potential and temperature based on normalized time. Circle and lines are observed and predicted values

مدل رطوبتی-دمایی

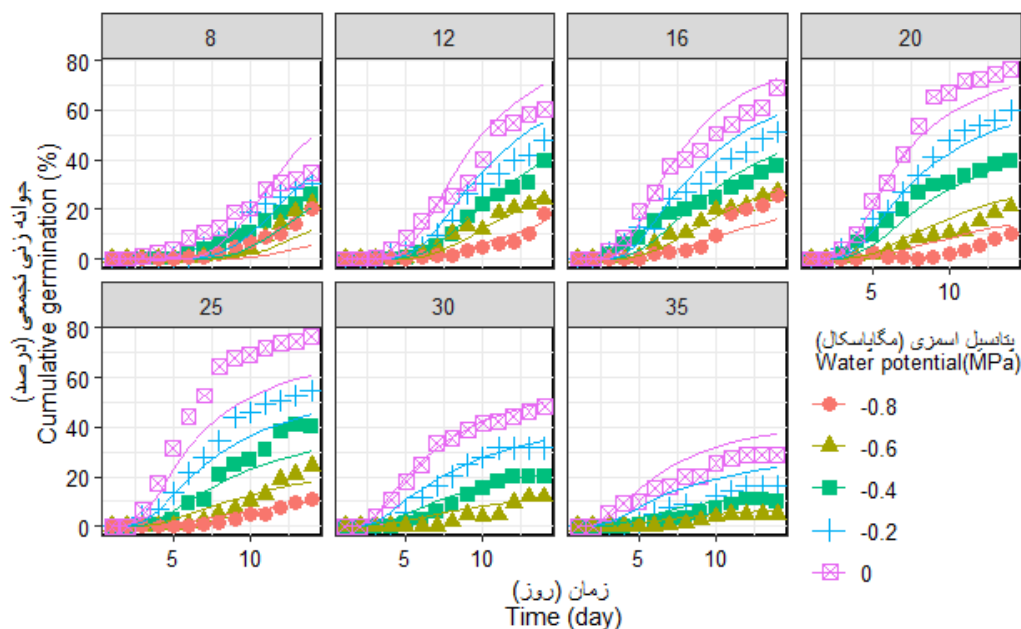
نتایج برازش مدل رطوبتی-دمایی نشان داد که این مدل نیز توانست روند تغییرات جوانه‌زنی گندم سیاه در پتانسیل و دماهای مختلف را به‌طور ترکیبی تخمین بزند به‌عنوان مثال، میزان RMSE در حدود ۰/۰۴۹، AICc و BIC در حدود ۱۴۶۳- و ۱۴۳۸- محاسبه شد (جدول ۴ و شکل ۷). طبق پارامترهای تخمین شده مدل مشخص شد، دمای پایه جوانه‌زنی این گیاه ۱/۹۳ درجه سانتی‌گراد بوده و ضریب مدل رطوبتی-دمایی (θ_{HTT}) ۹۲/۱۹ درجه سانتی‌گراد روز تخمین زده شد که در پتانسیل اسمزی (ψ_{Tb}) ۱/۳۱- مگاپاسکال جوانه‌زنی به ۵۰ درصد می‌رسد. همچنین مشخص شد، یکنواختی جوانه‌زنی (σ_{wb}) این گیاه در حدود ۰/۵۰۳ مگاپاسکال است (جدول ۴).

در مدل رطوبتی-دمایی فرض بر این است که زمان، سرعت و درصد جوانه‌زنی بذر در یک دمای ثابت

طبق گزارش‌های صورت گرفته کاهش مقدار پتانسیل آب پایه، نیاز به دسترسی بیشتر به آب برای جوانه‌زنی در دماهای پایین‌تر و کاهش ثابت رطوبتی، افزایش سرعت جوانه‌زنی با افزایش دما را نشان می‌دهد (Tabatabaei *et al.*, 2020; Bakhshandeh *et al.*, 2011) به‌طوری که در این مطالعه نیز از ۱۸ مگاپاسکال در روز به ۳ مگاپاسکال در روز کاهش یافت (جدول ۲). سرعت جوانه‌زنی در دمای بهینه بیشترین بوده و با افزایش/کاهش دما کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، چنانچه شرایط بستر بذر به‌سوی مقادیر آستانه $(\psi_b$ و T_b) نزدیک شود، بذرهای خیلی آهسته جوانه می‌زنند. کاهش سرعت جوانه‌زنی با کاهش دما تا حدی مرتبط با کاهش سرعت آبنوشتی و کاهش فعل و انفعالات آنزیمی بذرها در دماهای پایین است (Akbari *et al.*, 2015).

انحراف معیار پتانسیل پایه آب در پاسخ به تغییرات دمایی بسیار کمتر بود، در نتیجه برای رسیدن به یک رابطه ساده‌تر اما کارآمد مناسبتر است، به همین دلیل از این مدل می‌توان به جای مدل‌های دمایی و رطوبتی استفاده نمود. تغییرات این ضرایب در پژوهش‌های مختلف برای گیاهان مختلف به اثبات رسیده است (Wang *et al.*, 2005).

توسط بزرگی اختلاف بین پتانسیل آب بستر بذر و پتانسیل آب پایه درصد معینی از جمعیت بذری کنترل می‌شود (Bloomberg *et al.*, 2009). در بیشتر مطالعات پیشین توزیع پتانسیل آب پایه در جمعیت بذری نرمال فرض شده است و بیشتر جمعیت بذری در پتانسیل پایه قادر به جوانه‌زنی هستند (Akbari *et al.*, 2015; Bakhshandeh *et al.*, 2011). ضریب رطوبتی-دمایی و



شکل ۷- روند جوانه‌زنی تجمعی بذره‌های گندم سیاه در پتانسیل اسمزی و دماهای مختلف با استفاده از مدل رطوبتی-دمایی نقاط مقادیر مشاهده شده و خطوط مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد.

Figure 7- Trend of buckwheat seeds cumulative germination under various water potential and temperature by using of hydrothermal time model.

Circle are observed and lines are predicted values

جدول ۴- پارامترهای تخمین شده مدل رطوبتی-دمایی جهت پیش‌بینی جوانه‌زنی تجمعی بذره‌های گندم سیاه در پتانسیل اسمزی و دماهای مختلف.
Table 4- Estimated parameters of hydrothermal time model to predict germination of buckwheat seeds under water potential and temperature.

پارامترهای مدل Parameter model				ضرایب تخمین Estimated Coefficient		
θ_{HTT} (MPa °C day)	T_b (°C)	Ψ_{Tb} (MPa)	σ_{wb} (MPa)	RMSE	AICc	BIC
92.19±4.12	1.93±0.244	-1.31±0.038	0.503±0.012	0.049	-1463.1	-1438.3

نتیجه گیری

خارج از این محدوده دمایی نیز ضریب دمایی گیاه افزایش پیدا می‌کند. افزایش دما نیز سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی و کاهش ضریب رطوبتی این گیاه شده است ولی پتانسیل پایه ۵۰ درصد جوانه‌زنی گیاه را کاهش داده که این امر نشان دهنده کاهش تحمل به تنش این گیاه در اثر افزایش دمای جوانه‌زنی است. به‌طور کلی و طبق خروجی مدل رطوبتی-دمایی این گیاه در ۹۲ مگاپاسکال درجه - روز بالاترین سرعت جوانه‌زنی داشته و در دمای پایه پتانسیل اسمزی این گیاه نیز ۱/۳- مگاپاسکال می‌باشد.

نتایج این مطالعه نشان داد که هر سه مدل دمایی، رطوبتی و رطوبتی-دمایی توانستند جوانه‌زنی بذرهای گندم سیاه در دماها و پتانسیل‌های اسمزی مختلف را به‌خوبی پیش‌بینی نمایند. طبق خروجی‌های این مدل‌ها دمای پایه جوانه‌زنی گیاه در محدوده ۰/۹۸- تا ۱۱ درجه سانتی‌گراد با توجه به پتانسیل اسمزی متغیر بوده ولی به‌طور متوسط دمای پایه این گیاه ۱/۹۳ درجه سانتی‌گراد است. دمای بهینه جوانه‌زنی این گیاه نیز ۲۱/۷ تا ۲۴/۷ درجه سانتی‌گراد و در

Reference

منابع

- Akbari, H., A. Derakhshan, B. Kamkar, and S. S. Modares. 2015.** Modeling seed germination of *Ricinus communis* using hydrothermal time model developed on the basis of Weibull distribution. *Iranian J. Field Crops Res.* 13(3): 543-552. Doi: 10.22067/gsc.v13i3.27092. (In Persian)
- Anderson, D.R., and K. P. Burnham. 2002.** Avoiding pitfalls when using information-theoretic methods. *J. Wildlife Manage.* 912-918. Doi: 10.2307/3803155.
- Aubert, L., and M. Quinet. 2022.** Comparison of Heat and Drought Stress Responses among Twelve Tartary Buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) Varieties. *Plants.* 11(11):1-21. Doi:10.3390/plants11111517.
- Bakhshandeh, E., R. Ghadiryan, S. Gaeshi, and E. Soltani. 2011.** Modelling the effects water stress and temperature on seed germination of Soybean (*Glycine max* L.) and Velvetleaf (*Abutilion thephrasti med.*). *J. Plant Prod.* 18(1): 29-47.
- Batlla, D., and R. L. Benceh-Arnold. 2015.** A framework for the interpretation of temperature effects on dormancy and germination in seed populations showing dormancy. *Seed Sci. Res.* 25(2):147-158. Doi:10.1017/S0960258514000452
- Bewley, J. D., and M. Black. 2013.** Seeds: physiology of development and germination. Springer, N.Y., U.S.
- Bewley, J.D., K. Bradford, and H. Hilhorst. 2013.** Seeds: physiology of development, germination and dormancy. 3rd ed. Springer, New York. Doi:10.1007/978-1-4614-4693-4.
- Bloomberg, M., J. R., Sedcole, E.G., Mason, and G. Buchan. 2009.** Hydrothermal time germination models for Radiata pine (*Pinus radiata* D. Don). *Seed Sci. Res.* 19: 171-182. Doi:10.1017/S0960258509990031.
- Bradford, K. J. and O. A. Somasco. 1994.** Water relations of lettuce seed thermoinhibition. I. Priming and endosperm effects on base water potential. *Seed Sci. Res.* 4: 1-10. Doi: 10.1017/S0960258500001938.
- Bradford, K. J. 2002.** Application of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Sci.* 50:248-260. Doi: 10.1614/0043-1745(2002)050[0248: AOHTTQ] 2.0.CO;2.
- Bradford, K.J. and D.W. Still. 2004.** Applications of hydrottime analysis in seed testing. *Seed Technol.* 26: 74-85.
- Brodford, K.J. 2002.** Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Sci.* 50: 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)

- Coolbear, P. 1984.** The effect of low temperature pre-sowing treatment on the germination performance and membrane integrity of artificially aged tomato seeds. *J. Exp. Bot.* 35:1609-1617. Doi:10.1093/jxb/35.11.1609.
- Farzaneh, S. 2014.** Study of the relationships among phenological, morphological and physiological characters of sugar beet parents on seed quality and quantity. Ph.D. Dissertation, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. (In Persian)
- Gummerson, R.J. 1986.** The effect of constant temperature and osmotic potentials on the germination of sugar beet. *J. Exp. Bot.* 37: 729-741. Doi:10.1093/jxb/37.6.729.
- Gurvich, D. E., R. Pérez-Sánchez, K. Bauk, E. Jurado, M. C. Ferrero, G. Funes, and J. Flores. 2017.** Combined effect of water potential and temperature on seed germination and seedling development of cacti from a mesic Argentine ecosystem. *Flora.* 227: 18-24. Doi: 10.1016/j. flora. 2016.12.003.
- Hu, X. W., Y. Fan, C. C. Baskin, J. M. Baskin, and Y. R. Wang. 2015.** Comparison of the effects of temperature and water potential on seed germination of Fabaceae species from desert and subalpine grassland. *Am. J. Bot.* 102: 649-660. Doi:10.3732/ajb.1400507.
- Ishii, S., T. Katsumura, C. Shiozuka, K. Ooyachi, K. Kawasaki, S. Takigawa, T. Fukushima, Y. Tokuji, M. Kinoshita, M. Ohnishi, M. Kawahara, and K. Ohba. 2008.** Anti-inflammatory effect of buckwheat sprouts in lipopolysaccharide-activated human colon cancer cells and mice. *Biosci. Bioethanol. Biochem.* 72: 3148-3157. Doi:10.1271/bbb.80324
- Jami Al-Ahmadi, M., and M. Kafi. 2007.** Cardinal temperatures for germination of *Kochia scoparia* (L.). *J. Arid Environ.* 68: 308-314. Doi: 10.1016/j.jaridenv.2006.05.006.
- Kiani, S., G. Parmoon, S. A. Moosavi, and S. A. Siadat. 2020.** Quantification of the seed germination of fennel ecotypes to osmotic stress using different statistical distributions. *Iranian J. Seed Sci. Technol.* 9(3): 99-112. Doi: 10.22034/ijst.2019.123683.1238. (In Persian)
- Larsen, S.U., C. Bailly, D. Come, and F. Corbineau. 2004.** Use of the hydrothermal time model to analysis interacting effects of water and temperature on germination of three grass species. *Seed Sci. Res.* 14: 35-50. Doi: 10.1079/SSR2003153.
- Lim, J. H., K. J. Park, B. K. Kim, J. W. Jeong, and H. J. Kim. 2012.** Effect of salinity stress on phenolic compounds and carotenoids in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) sprout. *Food Chem.* 135:1065- 1070. Doi: 10.1016/j.foodchem.2012.05.068.
- Mirsky, S. B., M. R. Ryan, J. R. Teasdale, W. S. Curran, C. S. Reberg-Horton, J. T. Spargo, and J. W. Moyer. 2013.** Overcoming weed management challenges in cover crop-based organic rotational no-till soybean production in the eastern United States. *Weed Technol.* 27(1): 193-203. Doi:10.1614/WT-D-12-00078.1
- Nazari, M. A. H. T. A. B., A. R. A. S. H. Mamedi, and S. M. B. Hoseine. 2018.** The evaluation response of onion (*Allium cepa*) seed germination to temperature by thermal-time analysis and determine cardinal temperatures by using nonlinear regression. *Iranian J. Field Crop Sci.* 48(4)-23-37. (In Persian)
- Parmoon, G., S. A. Moosavi, and S. A. Siadat. 2018.** How salinity stress influences the thermal time requirements of seed germination in *Silybum marianum* and *Calendula officinalis*. *Acta Physiol. Plant.* 40(9):1-13. Doi:10.1007/s11738-018-2750-4.
- Patanè, C., A., Saita, and O. Sortino. 2013.** Comparative effects of salt and water stress on seed germination and early embryo growth in two cultivars of sweet sorghum. *J. Agron. Crop Sci.* 199(1): 30-37. Doi:10.1111/j.1439-037X.2012.00531.x.
- Perry, D.A., 1991.** Methodology and application of vigour tests. International Seed Testing Association, Zurich, Switzerland. 275p.
- Pourreza, J., and A. Bahrani. 2012.** Estimating cardinal temperatures of milk thistle (*Silybum marianum*) seed germination. *Am. Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 12:1485-1489. Doi:10.5829/idosi.ajeaes.2012.12.11.1839
- Savaedi, Z., G. Parmoon, S. A. Moosavi, and A. Bakhshande, 2019.** The role of light and Gibberellic Acid on cardinal temperatures and thermal time required for germination of Charnushka (*Nigella sativa*) seed. *Ind. Crops Prod.* 132: 140-149. Doi:10.1016/j.indcrop.2019.02.025.

- Soltani, A., S. Galeshi, E. Zainali, and N. Latifi, 2002.** Germination, seed reserve utilization and seedling growth of chickpea as affected by salinity and seed size. *Seed Sci. Technol.* 30: 51-60.
- Sytar, O. 2015.** Phenolic acids in the inflorescences of different varieties of buckwheat and their antioxidant activity. *J. King Saud Univ. Sci.* 27: 136-142. Doi:10.1016/j.jksus.2014.07.001.
- Tabatabaei, S. A., S. Nikoumaram, and O. Ansari. 2020.** Application of hydro-time model for quantification of *Brassica napus* L. germination response to water potential and temperature. *Environ. Stresses Crop Sci.* 13(2):559-570. Doi:10.22077/escs.2019.2152.1538.
- Tilki, F., and H. Dirik, 2007.** Seed germination of three provenances of *Pinus brutia* (Ten.) as influenced by stratification, temperature and water stress. *J. Environ. Biol.* 28(1): 133-146. Doi: 10.1371/journal.pone.17718000.e
- Ullah, A., S. Sadaf, S. Ullah, H. Alshaya, M.K. Okla, Y.A. Alwasel, and A. Tariq. 2022.** Using Halothermal Time Model to Describe Barley (*Hordeum vulgare* L.) Seed Germination Response to Water Potential and Temperature. *Life*, 12(2): 209-215. Doi: 10.3390/life12020209.
- Wang, R., Y. Bai, and K. Tanino, 2005.** Germination of winter fat (*Eurotia lanata* Moq.) seeds at reduced water potentials: testing assumptions of hydrothermal time model. *Environ. Exp. Bot.* 53(1): 49-63
- Watt, M. S., M. Bloomberg, and W. E. Finch-savage. 2011.** Development of a hydrothermal time model that accurately characterizes how thermoinhibition regulates seed germination. *Plant Cell Environ.* 34: 870-876. Doi:10.1111/j.1365-3040.2011.02292.x.

