

کمی سازی واکنش جوانه زنی کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) تحت تأثیر رژیم های مختلف دمایی و تنش خشکی

آرش مامدی^۱، رضا توکل افشاری^{۲*} و نیاز علی سپهوند^۳

۱. دانشجوی دکتری علوم و تکنولوژی بذر، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

۲. استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. استادیار، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۴/۲۷ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۴/۱۹)

چکیده

کینوا (*Chenopodium quinoa*) یک گیاه شبه غله ای با ارزش غذایی بالا و متحمل به تنش های غیرزنده مانند گرما، سرما و تنش خشکی است. به منظور بررسی تأثیر دما بر جوانه زنی بذر کینوا در شرایط تنش خشکی آزمایشی به صورت فاکتوریل با هفت سطح دما (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سلسیوس) و چهار سطح تنش خشکی شامل (۰، -۴، -۸ و -۱۲ بار) انجام شد. نتایج نشان داد، با کاهش پتانسیل اسمزی به ۱۲- بار درصد جوانه زنی در دماهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سلسیوس به ۰ کاهش یافت ولی به تدریج با افزایش دما به ۳۰ درجه سلسیوس، درصد جوانه زنی به ۸۵ درصد افزایش یافت. در همه سطوح دمایی با کاهش پتانسیل اسمزی، سرعت جوانه زنی کاهش یافت. با کمی کردن سرعت جوانه زنی با استفاده از برازش دو مدل دندان-مانند و بتا، پنجره مجاز دمایی برای جوانه زنی (دماهای کاردینال) با کاهش پتانسیل اسمزی، محدودتر شد. به طوری که، در پتانسیل های ۰، -۴، -۸ و -۱۲ بار میزان دمای کمینه (پایه) به ترتیب به ۱، ۱، ۲ و ۱۵ درجه سلسیوس افزایش یافت و دمای بیشینه (سقف) به ترتیب به ۵۴، ۴۱، ۴۱ و ۳۶ درجه سلسیوس کاهش یافت ولی دمای بهینه بذر در شرایط مختلف اسمزی کمتر تحت تأثیر قرار گرفت.

واژه های کلیدی: پتانسیل اسمزی، تنش غیرزنده، دمای مهم، سرعت جوانه زنی و کینوا.

Quantifying seed germination response of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) under temperature and drought stress regimes

Arash Mamedi¹, Reza Tavakkol Afshari^{2*} and Niaz Ali Sepahvand³

1. Ph.D. Student, Department of Agronomy and Plant Breeding, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3. Assistant Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Ministry of Agriculture, Karaj, Iran

(Received: Jul. 18, 2015 - Accepted: Jul. 9, 2016)

ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) is a grain-like crop with high nutritional values and resistant to abiotic stresses such as salinity, drought, cold and heat. In order to study germination characteristics of quinoa seeds under drought stress conditions at different temperatures, an experiment was conducted. Seeds were incubated on four water potential levels (0, -4, -8 and -12 bar) of PEG and germinated at constant temperatures ranging from 5 to 35°C (5, 10, 15, 20, 25, 30, and 35 °C) in Petridishes. Results showed that germination didn't occur with decreasing water potential to -12 Bar at low temperatures, but germination percentage achieved to %85 in -12 Bar with gradual increase in temperature from 5 to 30°C. Seed germination rate decreased with decreasing water potential at all levels of temperature. Cardinal temperatures at all levels of water potential were calculated by using two nonlinear regression models (beta and dent-like), and then their accurate predictions and performances were compared by root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R²). With decreasing water potential, the permissive temperature range for germination was limited. To sum up, base temperature at (0, -4, -8 & -12) Bar increased to (1, 1, 2.5 & 15°C) and regarding for ceiling temperature decreased to (54, 41, 41 and 36°C), respectively.

Keywords: Abiotic stresses, cardinal temperatures, germination rate, Quinoa and osmotic potential.

* Corresponding author E-mail: tavakolafshari@um.ac.ir

مقدمه

کینوا با نام علمی (*Chenopodium quinoa* Willd) از خانوادهٔ Chenopodiaceae است. این گیاه بومی کوه‌های آند در بولیوی، شیلی و پرو است که سازگاری گسترده‌ای دارد و مهم‌ترین تولیدکنندگان این گیاه بولیوی، پرو و اکوادور است (Vega-Gálvez *et al.*, 2010). کینوا به‌عنوان محصولی مستعد برای سامانهٔ حمایتی زندگی بوم‌شناختی (اکولوژیکی) مهارشده در NASA مورد توجه قرار گرفته است که هدف آن تولید گیاهانی است که CO₂ را از اتمسفر زدوده و غذا، اکسیژن و آب مورد نیاز برای مأموران در سفرهای درازمدت فضایی را فراهم کند (James, 2009). با توجه به اینکه سرشار از پروتئین است یک جایگزین عالی برای برنج به شمار می‌آید و پروتئین موجود در کینوا از معدود پروتئین‌های غیر حیوانی است که از نظر کمی و کیفی بهتر از دانهٔ دیگر غلات است و میزان پروتئین آن ۲ برابر گندم است (Ruales *et al.*, 1993).

گسترهٔ مناطق خشک و نیمه‌خشک در ایران که بیش از ۱/۵ میلیون کیلومترمربع است (Aboulhasani *et al.*, 2006)، نشان می‌دهد خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیر زیستی در این منطقه است. اصلاح برای تحمل به تنش خشکی همواره با تنگناهای خاص خود روبه‌رو بوده است. بنابراین در مرحلهٔ اول، کشت گیاهان مقاوم به خشکی مانند کینوا بهترین راهکار برای جلوگیری از کاهش عملکرد گیاهان زراعی است به‌طوری‌که در شرایط یکسان افت عملکرد کمتری داشته باشند (Vega-Gálvez *et al.*, 2010). حساس‌ترین مرحلهٔ زندگی گیاه، جوانه‌زنی است و موفقیت در گذراندن این دوره نقش مهمی در مرحله‌های دیگر استقرار گیاه خواهد داشت (Bewley, 1997). کاهش پتانسیل اسمزی و مادهٔ جامد نمگیر (ماتریک) سبب کاهش دسترسی بذر به رطوبت می‌شود. بنابراین پتانسیل آب محیط بر سرعت جذب آب و جوانه‌زنی بذر تأثیر مستقیم دارد (Rahimian *et al.*, 1991). نتایج بسیاری از تحقیقات نشان داده است، کشت رقم‌های مختلف کینوا به طیف گسترده‌ای از شرایط اقلیمی مانند ناحیه‌های با

بارندگی بالا یا خشک، نواحی سرد یا گرم، ناحیه‌های با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر از سطح دریا، بیشتر نواحی آمریکا، آسیا و اروپا قابلیت سازگاری بالایی دارد (Jacobsen, 2003). این گیاه مقاومت فراوانی در برابر طیف گسترده‌ای از تنش‌های غیرزنده مانند سرما، شوری و خشکی از خود نشان می‌دهد و همچنین به‌خوبی قابلیت رشد در خاک‌های حاشیه‌ای دارد (Jacobsen *et al.*, 2009). امروزه به دلیل کیفیت بالای محصولات دانهٔ گیاه کینوا و ظرفیت تولیدی بالای آن در شرایط سخت، در بیشتر مناطق جهان کشت می‌شود (Sanchez *et al.*, 2003). در نتایج بررسی تنش خشکی روی عملکرد دانهٔ کینوا گزارش شده است، عملکرد کینوا با ۲۰۸ میلی‌متر آب (آب آبیاری و بارندگی)، ۱۴۳۹ کیلوگرم در هکتار بوده است (Oelke *et al.*, 1992). گزارش شده است که گیاه کینوا در شرایط تنش خشکی با افزایش بتائین و پلی‌آمین‌ها موجب حفاظت پتانسیل اسمزی شده و در نتیجه عملکرد کینوا کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Carrasco *et al.*, 2011). گزارش شده که در بررسی مقاومت کینوا به دمای پایین ۴- درجهٔ سلسیوس در مرحلهٔ دو برگی، عملکرد نهایی در مقایسه با شاهد ۹ درصد کاهش یافت (Jacobsen *et al.*, 2005).

هرگاه پتانسیل اسمزی منفی‌تر از حد بحرانی باشد، بذر با تنش آب روبه‌رو خواهد شد و بسته به شدت کاهش پتانسیل اسمزی، جوانه‌زنی به تأخیر افتاده یا متوقف می‌شود. هر چه سرعت جوانه‌زنی بذر بیشتر باشد شانس استقرار گیاه در شرایط تنش نیز بیشتر خواهد شد (Fernandez, 1995). آغاز خروج ریشه‌چه، نسبت به مرحله‌های بعدی رشد گیاهچه، اغلب بیشترین حساسیت را به تنش آب دارد. اگر فرآیند جذب آب توسط بذر دچار اختلال شود، سرعت فعالیت‌های سوخت‌وسازی (متابولیکی) جوانه‌زنی درون بذر کند شده، در نتیجه مدت‌زمان خروج ریشه‌چه از بذر افزایش و از این‌رو سرعت جوانه‌زنی کاهش خواهد یافت (Nonogak *et al.*, 2010).

با توجه با این مطالب، می‌توان با کشت گیاهان متحمل به خشکی، سرما و گرما شاهد افزایش عملکرد گیاهان زراعی باشیم. هدف از این بررسی تأثیر تنش

به ۵۰ درصد جوانه‌زنی را محاسبه می‌کند. داده‌ها بر پایه آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی، تجزیه و میانگین‌ها با استفاده از روش دانکن در سطح ۵ درصد با یکدیگر مقایسه شدند. سرعت جوانه‌زنی (در ساعت) به روش زیر محاسبه شد (Soltani *et al.*, 2013):

$$R_{50} = \frac{1}{D_{50}}$$

در این رابطه، R_{50} (سرعت جوانه‌زنی برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی) و D_{50} (زمان مورد نیاز بر حسب ساعت برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی) است.

برای کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما در پتانسیل‌های اسمزی مختلف و تعیین دماهای مهم برای جوانه‌زنی بذرها کینوا در همه سطوح ثابت دمایی، از مدل دندان-مانند و بتا استفاده شد که معادله تابع آن در زیر آورده شده است. در این رابطه‌ها T دمای میانگین روزانه (دمای آزمایش)، T_b (دمای کمینه)، T_{o1} (دمای بهینه پایین)، T_{o2} (دمای بهینه بالا)، T_o (دمای بهینه)، T_c (دمای بیشینه) بر حسب درجه سلسیوس و c (فراسنجه یا پارامتر انحنای شکل تابع بتا) است. تابع بتا (Yin *et al.*, 1995):

$$f(T) = \left(\frac{(T - T_b)}{(T_o - T_b)} \right) \left(\frac{(T_c - T)}{(T_c - T_o)} \right)^c$$

تابع دندان-مانند (Piper *et al.*, 1996):

$$\text{if } T \leq T_b \text{ or } T_c \leq T \text{ then } f(T) = 0$$

$$f(T) = (T_c - T) / (T_c - T_{o2}) \text{ if } T_{o2} < T < T_c$$

$$f(T) = 1 \text{ if } T_{o1} \leq T \leq T_{o2}$$

همچنین برای انتخاب بهترین و دقیق‌ترین مدل‌های برازش داده شده در سطح پتانسیل‌های اسمزی مختلف از فراسنجه‌های زیر استفاده شد:

۱. RMSE: جذر میانگین مربعات خطا است که

میزان آن با روش زیر به دست می‌آید (Timmermans, 2007):

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

خشکی در دماهای مختلف بر ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر گیاه کینوا و تعیین دماهای مهم (کاردینال) (دمای کمینه یا پایه، دمای بهینه و دمای بیشینه یا سقف) در سطوح مختلف خشکی است. به دست آوردن دقیق‌ترین و بهترین مدل برای برازش دقیق میزان واقعی با میزان پیش‌بینی، از دیگر هدف‌های این بررسی است.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی واکنش جوانه‌زنی بذر گیاه کینوا از رقم (Titicaca) به تنش خشکی در سطوح مختلف دمایی و نیز تعیین دماهای مهم جوانه‌زنی، آزمایشی طراحی شد. بذر از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر و نهال تهیه شد. این آزمایش در آزمایشگاه بذر پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران اجرا شد. آزمایش در شرایط آزمایشگاهی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی انجام شد. عامل‌های مورد بررسی، شامل خشکی در چهار سطح (۰، -۴، -۸، -۱۲ بار) و دما در هفت سطح (۳۵، ۳۰، ۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵ درجه سلسیوس) بودند که در ژرمیناتورها و در شرایط تاریکی اعمال شدند. به منظور ایجاد تنش خشکی بر پایه روش Michel & Kaufman (1973) با استفاده از PEG 6000 اعمال شد.

به این منظور ۲۵ عدد بذر سالم و خالص کینوا شمارش و درون پتری سترون (استریل) ۹ سانتی‌متر قرار داده شدند و به هر پتری ۵ میلی‌لیتر محلول‌های مربوطه اضافه شد. در این آزمایش هر یک از تیمارها در سه تکرار انجام شد. نخستین شمارش شمار بذرهاى جوانه زده ۲۴ ساعت پس از انتقال آنها به ژرمیناتور صورت گرفت و بذرهایی را که ریشه‌چه آنها قابل‌رؤیت بود، به‌عنوان جوانه‌زده شمارش و از پتری خارج می‌شدند. این کار در هر ۲۴ ساعت تا پایان هفت روز که جوانه‌زنی کامل می‌شد، به‌طور مرتب انجام گرفت. برای محاسبه سرعت و درصد جوانه‌زنی بذرهاى از برنامه Germin (Soltani, 2013) استفاده شد که این برنامه ویژگی‌های جوانه‌زنی مانند درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و زمان لازم برای رسیدن

جدول ۲. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل دما و تنش خشکی بر صفات اندازه‌گیری شده در مرحله جوانه‌زنی.
Table 2. Mean interaction effects of temperature and drought stress levels on germination characteristics of quinoa seed.

Temperature (C°)	Drought (bar)	Germination (%)	Germination rate (R50)
5	0	100a	0.023i-k
	-4	100a	0.01k-m
	-8	96ab	0.01m
	-12	0f	0n
10	0	100a	0.024h-k
	-4	97.3ab	0.016k-m
	-8	97.3ab	0.011lm
	-12	0f	0n
15	0	98.6ab	0.057e
	-4	100a	0.027g-z
	-8	100a	0.022i-k
	-12	0f	0n
20	0	98.6ab	0.073bc
	-4	100a	0.033fg
	-8	97.3ab	0.023i-k
	-12	76e	0.019j-l
25	0	100a	0.082a
	-4	100a	0.065d
	-8	96ab	0.028f-i
	-12	89.3cd	0.020i-k
30	0	100a	0.081ab
	-4	100a	0.069cd
	-8	92bc	0.036f
	-12	85.3d	0.019j-l
35	0	97.3ab	0.083a
	-4	100a	0.068cd
	-8	78.6e	0.032fgh
	-12	4f	0.009m

سرعت جوانه‌زنی تنها در شرایط بدون تنش ۰/۰۲۳ بود ولی با افزایش پتانسیل اسمزی سرعت جوانه‌زنی در همه پتانسیل‌های رطوبتی در دمای ۵ درجه سلسیوس به‌طور شایان‌ملاحظه‌ای کاهش یافت. در دمای ۱۰ درجه سلسیوس، درصد جوانه‌زنی در شرایط بدون تنش با سطوح ۴- و ۸- بار همانند دمای ۵ درجه سلسیوس تفاوت معنی‌داری نداشتند ولی در شرایط تنش ۱۲- بار درصد جوانه‌زنی به ۰ کاهش یافت. در حقیقت پلی‌اتیلن گلایکول باعث کاهش آبکافت (هیدرولیز) ماده اندوخته‌ای دانه و در نتیجه کاهش درصد جوانه‌زنی می‌شود. (Everitt *et al.*, 1983) گزارش کردند، جوانه‌زنی بذر کوشیا تا هنگامی‌که پتانسیل اسمزی محیط به ۸- بار رسید، کاهش نیافت. اما با کاهش بیشتر پتانسیل اسمزی محیط، درصد جوانه‌زنی کاهش بیشتری یافت و بیان

در این رابطه، Y_{obs} (میزان مشاهده‌شده)، Y_{pred} (میزان پیش‌بینی شده) و n (شمار فراسنجه‌ها) است.
۲. R^2 : ضریب تبیین رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی و مقادیر مشاهده شده است که میزان این فراسنجه به روش زیر به‌دست می‌آید (Tolyat & Afshari, 2014):

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

در این رابطه، SSR (مجموع مربعات رگرسیون) و SST (مجموع مربعات کل) است.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر دما، تنش خشکی و اثر متقابل تنش خشکی و دما بر همه ویژگی‌های جوانه‌زنی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین درصد نهایی جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی در رژیم‌های مختلف دمایی و رطوبتی در جدول (۲) آورده شده است. در این تحقیق مشخص شد که به‌طور کلی که کاهش پتانسیل آب و خارج شدن از محدوده دمای بهینه باعث کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی می‌شود. دمای بهینه پایین‌ترین دمای مورد بررسی دمای ۵ درجه سلسیوس بود که درصد جوانه‌زنی در شرایط بدون تنش (شاهد) با تنش‌های ۴- و ۸- بار تفاوت معنی‌داری نداشت ولی با افزایش پتانسیل اسمزی از ۸- به ۱۲- بار، درصد جوانه‌زنی از ۹۶ درصد به ۰ کاهش یافت.

جدول ۱. تجزیه واریانس ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر کینوا تحت تیمار تنش خشکی و دماهای مختلف.

Table 1. Analysis variance of characteristic germination affected by temperature and drought stress in quinoa seeds

S.O.V	DF	(MS)	
		Germination (%)	Germination Rate (R50)
Temperature (T)	6	1618.41**	0.003**
Drought (D)	3	59431.61**	0.01**
T*D	18	26611.04**	0.00**
Error	56	12.57	0.00
(CV%)		4.3	13.92

علامت ** معنی‌دار بودن در سطح ۰/۰۱ را نشان می‌دهد.
** Significant at 1% level.

و دمایی بررسی کرده بود، همخوانی دارد. سرعت جوانه‌زنی د دمای ۲۵ درجه در شرایط بدون تنش ۰/۰۸۳ بود ولی در شرایط تنش ۴-، ۸- و ۱۲- به ترتیب به ۰/۰۶۵، ۰/۰۲۸ و ۰/۰۲ کاهش یافت (جدول ۲). پس نتیجه می‌گیریم که سرعت جوانه‌زنی نسبت به درصد جوانه‌زنی حساسیت بالایی دارد به طوری که در دماهای پایین و غلظت بالای اسمزی میزان آن بیشتر از درصد جوانه‌زنی تحت تأثیر قرار گرفت. همچنین Gill et al. (2002) در نتایج بررسی خود بیان کردند، با افزایش تنش خشکی توان جذب آب توسط بذرها کاهش یافته و مدت زمان مورد نیاز برای جذب آب افزایش می‌یابد و در نتیجه آغاز فرآیندهای جوانه‌زنی با تأخیر رخ می‌دهد. گزارش شده است که سرعت جوانه‌زنی نسبت به درصد جوانه‌زنی حساس‌ترین شاخص است که می‌تواند جوانه‌زنی بذر را تحت تأثیر قرار دهد (Tabrizi, 2004). همچنین بیشترین سرعت جوانه‌زنی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس مبین آن است که در دمای بهینه فرآیند جذب آب توسط بذر سریع‌تر صورت گرفته و زمان خروج ریشه‌چه کاهش می‌یابد. Floris & Bronis (2001) با بررسی جوانه‌زنی بذر روی شش گونه بیابانی در دماهای مختلف مشاهده کردند که با افزایش دما، سرعت جوانه‌زنی و درصد جوانه‌زنی افزایش می‌یابد. در ادامه این آزمایش، با افزایش دما از ۲۵ به ۳۰ درجه سلسیوس تغییرپذیری‌های معنی‌داری در هر دو صفت درصد جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی مشاهده نشد. گزارش شده است که بذرها گل جالیز مصری می‌توانند در دماهای بهینه در سطوح بالاتری از تنش آب نیز درصد جوانه‌زنی بالایی داشته باشند (Kebreab & Murdoch, 1998)، به طوری که این نتایج در این آزمایش هم مشاهده شد و بذرها حتی در پتانسیل ۱۲- بار در دو دمای ۲۵ و ۳۰ درجه سلسیوس قادر به جوانه‌زنی بودند. اما با افزایش دما به ۳۵ درجه سلسیوس درصد و سرعت جوانه‌زنی در پتانسیل‌های بالای رطوبتی ۸- و ۱۲- کاهش یافت به طوری که میزان کاهش در پتانسیل ۱۲- شایان ملاحظه بود. درصد و سرعت جوانه‌زنی در این پتانسیل ۱۲- بار و دمای ۳۵ درجه سلسیوس به

کردند که تنش خشکی با محدود کردن جذب آب توسط بذر، موجب کاهش حرکت و انتقال ذخایر بذر می‌شود. با افزایش دما از ۵ به ۱۰ درجه، سرعت جوانه‌زنی در شرایط تنش (به جز ۱۲- بار) و بدون تنش بهبود یافت. با افزایش دما به ۱۵ درجه سلسیوس، درصد جوانه‌زنی در هر دو شرایط بدون تنش و تنش‌های ۴- و ۸- بار تفاوت معنی‌دار نداشتند به طوری که درصد جوانه‌زنی در شرایط بدون تنش برابر ۹۸ درصد بود ولی در هر دو پتانسیل ۴- و ۸- بار برابر ۱۰۰ درصد بود ولی در این دما جوانه‌زنی در پتانسیل ۱۲- بار رخ نداد. سرعت جوانه‌زنی با افزایش دما از ۵ به ۱۵ درجه سلسیوس در شرایط تنش ۴- و ۸- بار به ترتیب به ۰/۰۲۷ و ۰/۰۲۲ افزایش یافت و همچنین میزان سرعت جوانه‌زنی در شرایط بدون تنش به ۰/۰۵۷ افزایش یافت (جدول ۲).

حال با افزایش دما از ۱۵ به ۲۰ درجه سلسیوس تغییر شایان ملاحظه‌ای برای هر دو صفت جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی در همه تیمارهای تنش و بدون تنش، مشاهده شد. به طوری که سرعت جوانه‌زنی در شاهد از ۰/۰۵۷ (در دمای ۱۵ درجه) به ۰/۰۷۳ (در دمای ۲۰ درجه) افزایش پیدا کرد و یک تغییر مهم دیگر مربوط به توانایی ۷۶ درصد جوانه‌زنی بذر کینوا در پتانسیل ۱۲- بار بود که سرعت جوانه‌زنی آن در این پتانسیل ۰/۰۱۹ بود. در دما ۲۵ درجه سلسیوس، جوانه‌زنی بذر کینوا در پتانسیل ۱۲- به ۸۹ درصد افزایش پیدا کرد. پس با افزایش تدریجی دما به ۲۵ درجه سلسیوس، جوانه‌زنی بذر در این پتانسیل اسمزی بالا که درصد جوانه‌زنی بذر در سه دمای پایین ۵ و ۱۰ و ۱۵ درجه سلسیوس، ۰ بود، بهبود یافت. در این دما همانند دماهای ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ درجه تفاوت زیادی در درصد جوانه‌زنی در شرایط تنش‌های ۴- و ۸- بار با شرایط بدون تنش مشاهده نشد. بالاترین درصد و سرعت جوانه‌زنی در دمای ۲۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد که بذرها کینوا در این دامنه دمایی می‌تواند بهترین قابلیت خود را از لحاظ دیگر صفات بذری نیز نشان دهد و این نتایج ما با نتایج Ajma Khan et al. (2001) که روی جوانه‌زنی بذر کوشیا در پتانسیل‌های مختلف رطوبتی

و سرعت جوانه‌زنی تأثیر دارند (Kebreab & Murdoch, 2000).

تعیین دماهای کاردینال در سطوح مختلف پتانسیل اسمزی

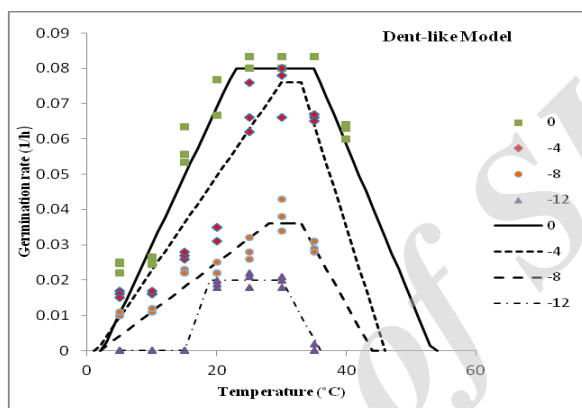
کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی بذرها کینوا در دماها و سطوح مختلف خشکی با کمک مدل دندان مانند (شکل ۱) و بتا (شکل ۲) برازش داده شد. مقادیر RMSE (جذر میانگین مربعات خطا)، R^2 (ضریب تبیین)، T_b (دمای کمینه)، T_{O1} (دمای بهینه پایین)، T_{O2} (دمای بهینه بالا)، T_o (دمای بهینه) و T_c (دمای بیشینه) مربوط به زمان لازم تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی پیش‌بینی‌شده در پتانسیل‌های مختلف خشکی در جدول ۳ نشان داده شده است. در سطح تیمار شاهد (صفر بار) مدل دندان-مانند با توجه به میزان پایین RMSE (۰/۱۵) و میزان بالای R^2 (۰/۹۴)، توانست با دقت بیشتر دماهای کاردینال را نسبت به مدل بتا پیش‌بینی کند (جدول ۳). در پتانسیل اسمزی ۴- بار با توجه به فراسنجه‌های RMSE و R^2 ، مدل بتا دماهای کاردینال را با دقت بالاتری پیش‌بینی کرد که دماهای کاردینال (کمینه، بهینه و بیشینه) در این تیمار به ترتیب برابر (۱، ۳۱/۹۷ و ۴۱ درجه سلسیوس) پیش‌بینی شد. در پتانسیل ۸- بار، مدل دندان-مانند نسبت به مدل بتا با دقت بالاتری فراسنجه‌های دماهای مهم را برآورد کرد. مقادیر دماهای کاردینال و فراسنجه‌های دقت مدل (RMSE و R^2) در این پتانسیل ۸- بار در (جدول ۳) آورده شده است. اما در سطوح آخر پتانسیل اسمزی (۱۲-)، با توجه به ضریب‌های تبیین (R^2) و میزان (RMSE)، مدل دندان‌مانند با دقت بیشتری دماهای مهم را پیش‌بینی کرد که مقادیر آن در (جدول ۳) آورده شده است. کمترین دمای کمینه و بیشترین دمای بیشینه پیش‌بینی‌شده به کمک مدل دندان-مانند در شاهد به ترتیب برابر با ۱ و ۵۴ درجه سلسیوس بودند. در پتانسیل ۴- (مدل بتا) دمای بیشینه به ۴۱ درجه سلسیوس کاهش یافت. در پتانسیل ۸- بار همانند پتانسیل ۴- بار دمای بیشینه برابر ۴۱ درجه سلسیوس بود اما دمای کمینه به ۲ درجه سلسیوس

ترتیب به ۴ درصد و ۰/۰۰۹ کاهش یافت. نتایج بالا نشان‌دهنده این است که دماهای بالا و پایین هر دو در شرایط تنش خشکی نسبت به شرایط بدون تنش، تأثیر محدودکنندگی بیشتری بر سرعت جوانه‌زنی دارند. ولی درصد جوانه‌زنی در دماهای بالا و پایین تنها در پتانسیل ۱۲- بار بیشتر تحت تأثیر قرار گرفت. (Kebreab & Murdoch, 2000) نیز گزارش کردند که بیشترین جوانه‌زنی در پتانسیل‌های اسمزی مختلف با افزایش دما تا دمای بهینه جوانه‌زنی افزایش یافت و یک‌باره پس از دمای بهینه کاهش یافت. کاهش گرانروی (ویسکوزیته) آب در دماهای پایین به‌ویژه در شرایط تنش خشکی که بذرها با محدودیت جذب آب روبه‌رو است، شاید یکی از دلایل کاهش درصد جوانه‌زنی باشد (Dodd *et al.*, 1986). پتانسیل اسمزی و ماده جامد‌نگیر، دامنه دمایی مؤثر برای جوانه‌زنی نمک‌رست (هالوفیت)‌های منطقه‌های معتدله را محدود می‌سازد (Ajma Khan *et al.*, 2001). بنابراین با انتخاب زمان کشت مناسب برای این گیاه نمک‌رست، حتی در شرایط محدودیت رطوبتی انتظار جوانه‌زدن و در نتیجه استقرار بهینه گیاهچه وجود دارد.

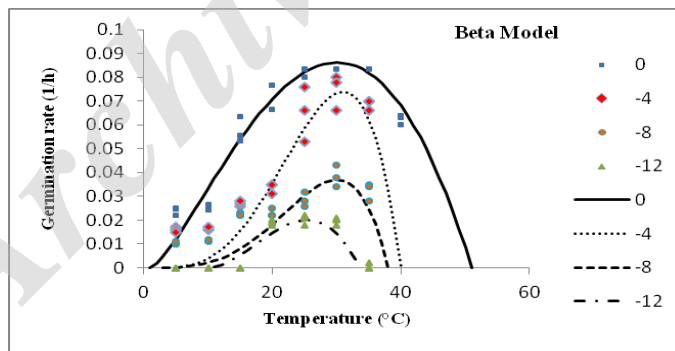
در بررسی‌های Kaboli *et al.* (2001)، کاهش جوانه‌زنی تحت تأثیر تنش خشکی به کاهش رطوبت یاخته و تأثیر آن بر ساخت پروتئین‌ها و ترشح هورمون‌ها نسبت داده شد. همچنین در نتایج بررسی‌های دیگر گزارش شده است که تأثیر کاهشی تنش خشکی در دماهای پایین بیشتر از دماهای بالا است، که با نتایج ما همخوانی داشت (Kebreab & Murdoch, 2000). Hucl (1993) در نتایج بررسی خود گزارش کرد، سرعت و درصد جوانه‌زنی رقم‌های لوبیا با افزایش تنش خشکی کاهش می‌یابد به‌طوری‌که میزان کاهش سرعت جوانه‌زنی نسبت به درصد جوانه‌زنی بیشتر بود. Balbaki *et al.* (1999) گزارش کردند که با افزایش تنش خشکی درصد و سرعت جوانه‌زنی رقم‌های گندم کاهش یافت و حساسیت سرعت جوانه‌زنی به تغییرپذیری‌های تنش خشکی بیشتر از درصد جوانه‌زنی بود. بیان شده است که پتانسیل اسمزی و دما هر دو بر درصد جوانه‌زنی نهایی

(Soltani *et al.*, 2006). (Jam & Cutforth, 2004) برای کمی‌سازی جوانه‌زنی و سبز شدن گندم بهاره از مدل بتا استفاده کردند. Soltani *et al.* (2013) با بررسی روی جوانه‌زنی زنی بذر خردل وحشی تحت تیمارهای مختلف دمایی و خشکی بیان کردند که با افزایش تنش خشکی دمای کمینه به‌تدریج افزایش یافت و دمای بیشینه به‌تدریج کاهش یافت ولی تغییرپذیری‌های دمای بهینه نسبت به دماهای کمینه و بیشینه، کمتر بود.

افزایش یافت. در پتانسیل ۱۲- بار، پنجره دمایی مجاز برای جوانه‌زنی بذر کینوا، به‌طور شایان‌ملاحظه‌ای محدود شد به‌طوری‌که دمای کمینه به ۱۵ درجه سلسیوس افزایش یافت و دمای بیشینه به ۳۶ درجه سلسیوس کاهش یافت. از مدل‌های بتا، دوتکه‌ای و دندان- مانند برای مدل‌سازی سبز شدن گیاه نخود در دماها و عمق‌های مختلف استفاده شده و مدل دندان- مانند را به‌عنوان مدل برتر در پیش‌بینی سبز شدن این گیاه در دماها و عمق‌های مختلف معرفی کردند



شکل ۱. مدل دندان- مانند برازش داده شده برای محاسبه دماهای مهم سرعت جوانه‌زنی بذر کینوا در چهار سطح خشکی.
Figure 1. Germination rate of quinoa seeds as affected by increasing temperature described by dent-like model in variase drought levels



شکل ۲. مدل بتا برازش داده شده برای محاسبه دماهای مهم سرعت جوانه‌زنی بذر کینوا در چهار سطح خشکی.
Figure 2. Germination rate of quinoa seeds as affected by increasing temperature described by beta model in variase drought levels

جدول ۳. دماهای کاردینال سرعت جوانه‌زنی بذر کینوا (Titicaca) در سطوح مختلف خشکی با استفاده از مدل دندان-مانند و بتا.

Table 3. Estimated parameters of fitting the Beta and Dent-like models to the germination rate of quinoa seed against increasing temperature

Drought levels	Dent-Like model						Beta model				
	T _b	T _{o1}	T _{o2}	T _c	R ²	RMSE	T _b	T _o	T _c	R ²	RMSE
0	1	22.82	35.09	54	0.94	0.15	1	30	51	0.93	0.16
-4	1.5	30	33	46	0.88	0.20	1	31.97	41	0.94	0.26
-8	2	30	33	41	0.91	0.09	1	31	39	0.88	0.21
-12	15	19	30	36	0.98	0.03	12	27.42	35.58	0.90	0.08

نتیجه‌گیری کلی

نشان‌دهنده پنجره گسترده مجاز دمایی برای جوانه‌زنی بذر کینوا است. بالاترین مقاومت به تنش خشکی در دماهای ۲۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس به دست آمد. شاید این گیاه بتواند با ارزیابی‌های بیشتر با توجه به توانایی جوانه‌زنی در دماهای بالا (۳۵ درجه سلسیوس)، دماهای پایین (۵ درجه سلسیوس) و پتانسیل اسمزی (۱۲- بار) به یک محصول ارزشمند در کشاورزی کشور قرار گرفته و در آینده نزدیک به‌عنوان یک گیاه جدید در ایران معرفی شود.

جوانه‌زنی بذر یکی از حساس‌ترین مرحله‌های رشد گیاه است. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که بذر کینوا در تنش خشکی و دماهای بالا و پایین قابلیت جوانه‌زنی بالایی دارد. دمای کمینه جوانه‌زنی بذر در سطح شاهد کمتر از ۲ درجه سلسیوس بود که این نشان‌دهنده مقاومت بالای این گیاه به سرما است و دمای بهینه سرعت جوانه‌زنی بذر ۳۰ درجه سلسیوس و دمای بیشینه ۵۴ درجه سلسیوس به دست آمد که

REFERENCES

1. Aboulhasani, M., Lakzian, A., Haghnia, G. H. & Sarcheshmehpoor, M. (2006). The study of salinity and drought tolerance of *Sinorhizobium meliloti* isolated from province of Kerman in vivo condition. *Journal of Field Crops Research*, 4(2), 183-193. (in Farsi)
2. Ajmal Khan, M., Gul, B. & Weber, D. J. (2001). Influence of salinity and temperature on germination of *Kochia scoparia*. *Wetlands Ecological Management*, 9(1), 483-489.
3. Balbaki, R. Z., Zurayk, R. A., Bleik, M. M. & Tahouk, S. N. (1999). Germination and seedling development of drought tolerant and susceptible wheat under moisture stress. *Seed Science and Technology*, 27(1), 291-302.
4. Bewley, J. D. (1997). Seed germination and dormancy. *The plant cell*, 9(7), 1055.
5. Dodd, G. L. & Donovan, L. A. (1999). Water potential and ionic effects on germination and seedling growth of two cold desert shrubs. *American Journal of Botany*, 86(1), 1146-1153.
6. Everitt, J. H., Alaniz, A. & Lee, J. B. (1983). Seed germination characteristic of *Kochia scoparia*. *Journal of Range Management*, 36(1), 646-648.
7. Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L. & Martínez, E. A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(15), 2541-2547.
8. Fernandez, G. & Johnston M. (1995). Seed vigor testing in lentil, bean, and chickpea. *Seed Science and Technology*, 23(1), 617-627.
9. Flores, J. & Briones, O. (2001). Plant life-form and germination in a Mexican inter-tropical desert: effects of soil water potential and temperature. *Journal of Arid Environments*, 47(2), 485-497.
10. Gill, P. K., Shama, A. D., Singh, P. & Singh Behullar, S. (2002). Osmotic stress induced changes in germination, growth and soluble sugar content of *Sorghum bicolor* L. seeds. *Bulgarian Journal of Plant*, 28, 12-25.
11. Hucl, P. (1993). Effect of temperature and moisture stress on the germination of diverse common bean genotypes. *Canadian Journal of Plant Science*, 73(3), 697-702.
12. Jame, Y. W. & Cutforth, H. W. (2004). Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(3), 207-218.
13. James, L. E. A. (2009). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): composition, chemistry, nutritional, and functional properties. *Advances in food and nutrition research*, 58(1), 1-31.
14. Jacobsen, S. E. (2003). The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food reviews international*, 19(1), 167-177.
15. Jacobsen, S. E., Liu, F. & Jensen, C. R. (2009). Does root-sourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Scientia Horticulturae*, 122(2), 281-287.
16. Kaboli, M. & Sadeghi, M. (2001). Effect of drought stress on germination of three *Onobrochis* species. *Pajohesh and Sazandegi*, 64(2), 51-57. (in Farsi)
17. Jacobsen, S. E., Monteros, C., Christiansen, J. L., Bravo, L. A., Corcuera, L. J. & Mujica, A. (2005). Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at various phenological stages. *European Journal of Agronomy*, 22(2), 131-139.
18. Kebreab, E. & Murdoch, A. J. (1999). Modelling the effects of water stress and temperature on germination rate of *Orobanche aegyptiaca* seeds. *Journal of Experimental Botany*, 50(334), 655-664.
19. Kebreab, E. & Murdoch, A. J. (2000). The effect of water stress on the temperature range for germination of *Orobanche aegyptiaca* seeds. *Seed Science Research*, 10(2), 127-133.

20. Michel, B. E. & Kaufman, M. R. (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 51, 914-916.
21. Nonogaki, H., Bassel, G. W. & Bewley, J. D. (2010). Germination- Still a mystery. *Plant Science*, 179(6), 574-581.
22. Oelke, E. A., Putnam, D. H., Teynor, T. M. & Oplinger, E. S. (1992). *Alternative field crops manual*. University of Wisconsin Cooperative Extension Service, University of Minnesota Extension Service, Centre for Alternative Plant and Animal Products.
23. Ruales, J. & Nair, B. M. (1993). Content of fat, vitamins and minerals in quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd) seeds. *Food Chemistry*, 48(2), 131-136.
24. Piper, E. L., Boote, K. J., Jones, J. W. & Grimm, S. S. (1996). Comparison of two phenology models for predicting flowering and maturity date of soybean. *Crop Science*, 36(3), 1606-1614.
25. Rahimian-Mashhadi, H., Bagheri Kazemabad, A. & Paryab, A. (1991). Effect of PEG and NaCl induced water potential at different temperatures on germination and seedling vigor of several wheat populations. *Agriculture Science and Technology*, 5(4), 35-42. (in Farsi)
26. Ruiz-Carrasco, K., Antognoni, F., Coulibaly, A. K., Lizardi, S., Covarrubias, A., Martínez, E. A., ... & Zurita-Silva, A. (2011). Variation in salinity tolerance of four lowland genotypes of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as assessed by growth, physiological traits, and sodium transporter gene expression. *Plant Physiology and Biochemistry*, 49(11), 1333-1341.
27. Sanchez, H. B., Lemeur, R., Damme, P. V. & Jacobsen, S. E. (2003). Ecophysiological analysis of drought and salinity stress of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19(1), 111-119.
28. Soltani, A., Robertson, M.J., Torabi, B., Yousefi-Daz, M., and Sarparast, R. (2006). Modeling seedling emergence in chickpea as affected by temperature and sowing depth. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138(1), 156-167.
29. Soltani, E., Soltani, A., Galeshi, S., Ghaderi-Far, F. & Zeinali, E. (2013). Seed germination modeling of wild mustard (*Sinapis arvensis* L.) as affected by temperature and water potential: hydrothermal time model. *Journal of Plant Production*, 20(1), 1-16
30. Tabrizi, L., Nasiri Mahalati, M. & Kochaki, A. (2004). Investigation on the cardinal temperature for germination of *Plantago ovate* and *Plantago psyllium*. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 2(4), 143-151. (in Farsi)
31. Timmermans, B. G. H., Vos, J., Van Nieuwburg, J., Stomph, T. J. & Van der Putten, P. E. L. (2007). Germination rates of *Solanum sisymbriifolium*: temperature response models, effects of temperature fluctuations and soil water potential. *Seed Science Research*, 17(1), 221-231.
32. Tolyat, M. A., Afshari, R. T., Jahansoz, M. R., Nadjafi, F., & Naghdibadi, H. A. (2014). Determination of cardinal germination temperatures of two ecotypes of *Thymus daenensis* subsp. *Daenensis*. *Seed Science and Technology*, 42(1), 28-35.
33. Yin, X., Krop, M. J., McLaren, G. & Visperas, R. M. (1995). A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3), 1-16.