

بهبود پاسخ دما-رطوبتی بذر ذرت تحت تنش خشکی با استفاده از آبسیزیک اسید، جبرلیک اسید و سالیسیلیک اسید

الهام بحرآبادی^۱، رضا توکل افشاری^{۲*}، مهدی نصیری محلاتی^۲

۱. کارشناسی ارشد، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استاد(ان) گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳)

چکیده

به منظور ارزیابی تاثیر دما، خشکی و پرایمینگ بر شاخص های درصد و سرعت جوانه زنی بذر ذرت، آزمایشی به صورت فاکتوریل بر پایه طرح آماری کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. تیمارهای مورد مطالعه شامل هشت سطح دمایی (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۵ درجه سلسیوس)، چهار پتانسیل خشکی (۰/۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ مگاپاسکال) و پنج اعمال پرایمینگ (شاهد، هیدروپرایمینگ، آبسیزیک اسید، جبرلیک اسید و سالیسیلیک اسید) بودند. بنا بر نتایج این پژوهش، افزایش دما و خشکی سبب کاهش پارامترهای درصد و سرعت جوانه زنی شد؛ به طوری که در پتانسیل های کمتر از ۰/۸ مگاپاسکال در تمامی سطوح دما و خشکی، کاهش معناداری در شاخص های ذکر شده مشاهده گردید. در دمای ۳۵ درجه سلسیوس، درصد جوانه زنی در شرایط بدون اعمال پرایمینگ از ۹۴ به ۳۶ درصد (خشکی ۱/۲ مگاپاسکال) کاهش یافت. تحت این شرایط، تیمار جبرلیک اسید سبب بهبود جوانه زنی شد. برای تعیین دماهای کاردینال ذرت از مدل های رگرسیونی (دندان-مانند، دو تکه ای و بتا) استفاده شد. طبق نتایج آزمایش، مدل دندان-مانند، به عنوان بهترین مدل ارزیابی شد و بر اساس آن، دمای پایه، مطلوب ۱، مطلوب ۲ و حداکثر به ترتیب ۹/۵۱، ۲۴/۱۲، ۳۵ و ۴۴/۶ درجه سلسیوس برآورد گردید. به منظور بررسی تاثیر دما و پتانسیل آب بر جوانه زنی بذر تحت شرایط خشکی از مدل رگرسیونی غیر خطی هیدروترمال تایم استفاده شد. با توجه به آن که افزایش مقدار انحراف معیار از دمای پایه نشان دهنده توانایی جوانه زنی بذر در پتانسیل های متفاوت اسمزی است، هیدروپرایمینگ، جبرلیک اسید و سالیسیلیک اسید سبب افزایش این مقدار نسبت به تیمار بدون پرایمینگ شدند.

کلمات کلیدی: پرایمینگ، تنش خشکی، جوانه زنی، دماهای کاردینال، مدل هیدروترمال تایم.

Improvement of hydrothermal response of corn seed under drought stress using abscisic acid, gibberellic acid, and salicylic acid

E. Bahr Abadi¹, R. Tavakkol Afshari^{2*}, M. Nassiri Mahallati²

1. MSc. Student, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

2. Professor(s), Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

(Received: Jan. 05, 2022 – Accepted: Mar. 14, 2022)

Abstract

In order to evaluate the effect of temperature, drought and priming on the percentage and rate germination of corn seeds, a factorial experiment based on a completely randomized design with four replicates was conducted. Treatments included eight temperature (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 and 45 °C), four drought potential (0, -0.4, -0.8 and -1.2 MPa), and five priming (control, hydroprimin, GA priming, ABA priming and, SA ptiming). Both percentage and rate of germination were inhibited at osmotic potentials ≤ -0.8 MPa PEG. At 35 °C temperature, germination percentage of unprimed seeds was reduced from 94 to 36% in -1.2 MPa. Under these conditions, gibberellic acid treatment improved seed germination. The effect of temperature on germination can be defined in terms of cardinal temperatures. We compared three non-linear regression models (Dent-like, segmented and beta). The outcome revealed that the Dent-like function was suitable for use in describing seed germination response to temperature. The base, optimum 1, optimum 2 and ceiling temperature were estimated to be 9.51, 24.12, 35 and 44.62 °C, respectively. The response of germination rate to both temperature and water potential can be described as a non-linear function of the hydrothermal model. According to the results of this study, hydropriming, gibberellic acid, and salicylic acid increased the mean deviation of the base temperature compared to non-priming treatment, increasing the standard deviation of the base temperature indicates the ability of seed germination in different osmotic potentials.

Keywords: Priming, drought stress, Germination, Cardinal temperatures, Hydrothermal time models.

* Email: tavakolafshari@um.ac.ir

مقدمه

پدیده خشکی از تنش های غیر زنده مهمی است که اثرهای زیانباری بر عملکرد و کیفیت محصولات زراعی دارد (Jumrani et al., 2018). جوانه زنی یکی از حساس ترین مراحل زندگی گیاهان که به شدت تحت تاثیر تنش رطوبتی قرار می گیرد (Llanes et al., 2016). مبتنی بر افزایش شدت خشکی، بروز تنش اکسیداتیو از دیگر عواملی است که منجر به کاهش قدرت جوانه زنی بذر خواهد شد (Shi et al., 2014; Zhang et al., 2017). یکی از بارزترین پیامدهای مرتبط با تغییرات اقلیمی، افزایش میانگین دما بوده (Gabaldon-Leal et al., 2016) که می تواند تولید محصولات کشاورزی را تحت تاثیر قرار دهد (Zhang et al., 2017; Jumrani et al., 2018). نتایج بسیاری از پژوهش ها نشان داده است که افزایش دما به همراه کاهش پتانسیل آب اثر نامطلوبی بر عملکرد و کاهش کیفیت بذر دارد؛ ضمن آنکه کاهش پتانسیل آب در مقایسه با دما می تواند اثرات شدیدتری بر عملکرد و کیفیت بذرهای تولیدی تحمیل نماید (Jumrani et al., 2018).

ذرت (*Zea Mays L.*) مانند بسیاری از محصولات زراعی نسبت به تغییرهای اقلیمی آسیب پذیر می باشد (Farooq et al., 2015; Forieri et al., 2016; Ouda et al., 2018; Hatfield et al., 2018; Carter et al., 2018). وجود سازگاری نسبی ذرت به بروز خشکی، تنش دمایی می تواند به طور قابل توجهی مراحل رشدی به ویژه استقرار گیاهچه های ذرت را تحت تاثیر قرار دهد (Radić et al., 2007; Bijanzadeh et al., 2019). بر طبق پیش بینی های انجام شده میانگین سالانه حداکثر دما در سال ۲۰۳۰ به میزان ۱/۸-۱/۴ درجه سلسیوس و در سال ۲۰۵۰ در حدود ۲/۶-۲/۱ درجه سلسیوس در ناحیه جنوب آسیا افزایش پیدا خواهد کرد و این افزایش دما بر تولید ذرت تاثیر گذار خواهد بود (Tesfaye et al., 2017).

جوانه زنی فرآیندی پیچیده است و تحت تاثیر

سیگنال های محیطی متفاوتی از جمله درجه حرارت (T) و پتانسیل آب (ψ) قرار می گیرد (Ordonez-Salanueva et al., 2017; Ouda et al., 2018). جهت ارزیابی شدت تاثیر پیامدهای محیطی بر فرایند جوانه زنی و استقرار گیاهچه، مدل سازی به عنوان یک ابزار مفید شناخته شده است (Cochrane et al., 2017; Duarte et al., 2018; Wang et al., 2018). به عنوان مثال، مدل سازی می تواند پاسخ جوانه زنی بذر به تغییرات درجه حرارت را با دقت بالایی پیش بینی کند (Bradford, 2002). در مدل های هیدروترمال تایم (HTT) از ترکیب دو فاکتور دما (T) و پتانسیل آب (ψ) برای پیش بینی زمان جوانه زنی بذرها استفاده می شود که در مورد بسیاری از گونه ها کمی سازی شده است (Atashi et al., 2014).

به منظور تعیین بهترین تاریخ کاشت در محصولات زراعی، تعیین دماهای کاردینال ضروری می باشد (Hardegree, 2006; Bidgoly et al., 2018). کاردینال شامل دمای پایه (T_b ، دمایی که نرخ جوانه زنی معادل صفر درصد است)، دمای مطلوب (T_o ، دمایی که نرخ جوانه زنی حداکثر است و بیشترین میزان جوانه زنی در کمترین زمان ممکن صورت می گیرد) و دمای سقف (T_c ، دمایی که نرخ جوانه زنی صفر درصد است) می باشد (Soltani et al., 2012; Ouda et al., 2018). به عنوان مثال، با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیونی، مدل های ریاضی دو تکه ای و نیز چند جمله ای درجه دو، دمای پایه، مطلوب و حداکثر جوانه زنی مارگریت (*Chrysanthemum maximum Ramond*) به ترتیب ۱ تا ۳ درجه سلسیوس، ۱۹ تا ۲۳ درجه سلسیوس و ۴۳ تا ۵۹ درجه سلسیوس تخمین زده شد. بر اساس مقادیر ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا، مدل دو تکه ای دقیق تر از مدل دو جمله ای درجه دو دماهای کاردینال بذر را پیش بینی نموده است (Hashemi et al., 2017). گیلبرتسون و همکاران (Gilbertson et al., 2014) ضمن تعیین دماهای کاردینال بذر گل گاو زبان (*Borago officinalis L.*),

مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقات بذر دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۹۷-۱۳۹۶ انجام شد. بذره‌های ذرت مورد مطالعه (*Zea Mays L. var. SC704-hybrid*) از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی وزارت جهاد کشاورزی واحد مشهد (تولید شده در سال ۱۳۹۶) تهیه شدند.

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. سطوح مختلف دما (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۵ درجه سلسیوس)، پتانسیل‌های رطوبتی (۰/۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲- مگاپاسکال) و پرایمینگ بذر (شاهد، هیدروپرایمینگ، آبسیزیک اسید، جبرلیک اسید و سالیسیلیک اسید) به عنوان تیمارهای آزمایش در نظر گرفته شدند.

به منظور اعمال تیمار هیدروپرایمینگ و تیمارهای هورمونی آبسیزیک اسید، جبرلیک اسید و سالیسیلیک اسید، بذرها به ترتیب درون آب مقطر دوبار تقطیر، محلول‌های آبسیزیک اسید، جبرلیک اسید و سالیسیلیک اسید با غلظت ۰/۵ میلی مولار قرار داده شدند. بذره‌های پرایم نشده نیز به عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شدند. بر اساس رابطه پیشنهاد شده توسط مایکل و کافمن (Michel and M.R Kaufmann, 1973)، سطوح مختلف تنش خشکی با حل کردن مقادیر مشخصی از ماده جامد (پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰۰) در آب مقطر تهیه شد.

دوره پرایمینگ به مدت ۱۲ ساعت در ژرمیتاتور (دمای ۲۰ درجه سلسیوس و تحت شرایط تاریکی) انجام گرفت. در ادامه، تعداد ۲۵ بذر درون هر پتری دیش با قطر ۱۲ سانتی‌متری قرار گرفت و ۲۰ میلی‌لیتر از محلول‌های اسمزی تهیه شده به پتری دیش‌ها اضافه شد. در طول آزمایش در صورت کاهش محتوای رطوبتی درون پتری دیش‌ها به طور مجدد تزریق محلول انجام گرفت.

شمارش بذره‌های جوانه‌زده پس از ۲۴ ساعت از شروع آزمایش به طور روزانه انجام شد؛ به طوری که خروج

اظهار داشتند که عملیات کاشت این گیاه نباید پیش از رسیدن دمای خاک به ۹ درجه سلسیوس انجام شود. دماهای پایه، مطلوب و حداکثر جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه (*Melissa officinalis L.*) بر اساس مدل دو تکه‌ای به ترتیب ۷/۲، ۲۸/۹ و ۴۰/۱ درجه سلسیوس ارزیابی شده است (Nozarpour et al., 2017). در پژوهشی دیگر، دماهای پایه، مطلوب و حداکثر در علف هرز مهاجم ارشته خطایی (*Lepyrodictis holosteoides*) به ترتیب ۴/۲۹، ۱۹/۷۶ و ۳۷/۵۵ درجه سلسیوس تعیین گردید (Deihimfard et al., 2018). همچنین دماهای کاردینال شاهدانه (*Cannabis sativa*) به ترتیب معادل ۱، ۳۹/۳- و ۲۶ و ۴۸ درجه سلسیوس برآورد شده است (Barooti et al., 2019).

به طور کلی، پرایمینگ یک تکنیک مفید و قابل اجرا جهت بهبود فرایند جوانه‌زنی و بنیه بذرها، بویژه در شرایط نامساعد محیطی است (Ibrahim et al., 2016). در این ارتباط، استفاده از ترکیبات فعال بیولوژیکی نظیر آبسیزیک اسید، جبرلیک اسید و سالیسیلیک اسید به عنوان رهیافتی موثر جهت کاهش اثرات منفی تنش اکسیداتیو و در نتیجه بهبود متابولیسم جوانه‌زنی شناخته شده است (Szalai et al., 2016; Wei et al., 2015; Tsegay and Andargie, 2018). این تاثیرات مبتنی بر القای سیستم دفاعی جهت حفظ ساختار غشا (Tigabu and Oden, 2001)، تعدیل پتانسیل اسمزی و فعال کردن متابولیسم آنتی اکسیدان (Dražić and Mihailović, 2009) حاصل می‌گردد.

بر طبق موارد ذکر شده، این آزمایش با هدف کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی بذر ذرت به دما و پتانسیل آب و بهبود پاسخ‌های دما-رطوبتی بذر ذرت با استفاده از تیمارهای متفاوت پرایمینگ انجام شد. همچنین تعیین دماهای کاردینال بذر ذرت در شرایط تنش خشکی و یافتن بهترین پاسخ تیمار هورمونی مورد مطالعه قرار گرفت.

شرایط تاریکی به مدت یک هفته درون ژرمیناتور در معرض هشت سطح دمایی ثابت (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۵ درجه سلسیوس) قرار گرفتند (Parmoon *et al.*, 2015). دماهای کاردینال با استفاده از رابطه دما - سرعت جوانه زنی پیش‌بینی شد. محور X به عنوان متغیر مستقل (درجه حرارت) و محور Y به عنوان متغیر وابسته (مدت زمان رسیدن به سرعت جوانه‌زنی ۵۰ درصد) در نظر گرفته شد. به منظور تعیین سرعت جوانه‌زنی ۵۰ درصد، نمودار درصد جوانه‌زنی برای هر دما ترسیم و از طریق درون‌یابی، مدت زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی محاسبه گردید.

به منظور تعیین دماهای کاردینال از طریق آنالیزهای رگرسیونی غیر خطی سرعت جوانه‌زنی و دما (بر اساس جدول ۱) از مدل‌های رگرسیونی دندان - مانند (رابطه ۳)، دو تکه‌ای (رابطه ۴) و بتا (رابطه ۵) استفاده شد (Alvarado and Bradford, 2002).

ریشه‌چه (معادل ۲ میلی‌متر یا بیشتر) به عنوان معیار جوانه‌زنی در نظر گرفته شد (Parmoon *et al.*, 2015; Hashemi *et al.*, 2017). درصد جوانه‌زنی بذرهای پس از گذشت هفت روز از شروع آزمایش، بر اساس رابطه ۱ محاسبه شد (Ellis and Roberts, 1981).

$$\text{Germination Percentage (GP)} = \frac{\sum ni}{N} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در این رابطه ni: تعداد بذرهای جوانه‌زده و N: تعداد کل بذرهای هر تیمار است.

$$\text{Germination Rate (GR)} = \sum \left(\frac{n1}{t1} + \frac{n2}{t2} + \frac{ni}{ti} \right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در این معادله ni: تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر روز و ti: روز جوانه‌زنی بذرهای مورد نظر اشاره دارد.

سرعت جوانه‌زنی بذرهای نیز با استفاده از (رابطه ۲) محاسبه شد (Ellis and Roberts, 1981).

به منظور تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی، بذرهای

جدول ۱- توابع سه مدل رگرسیون غیر خطی (دندان - مانند، دو تکه‌ای و بتا) برازش داده شده به داده‌ها به منظور بررسی ارتباط میان دما و سرعت جوانه‌زنی. T_b ، T_{O1} ، T_{O2} و T_m به ترتیب دما پایه، دما مطلوب، دما مطلوب ۱، دما مطلوب ۲ و دما حداکثر

Table 1- Dent-like, segmented and Beta models that were fitted to germination rate versus the range of temperatures (T). T_b is the base temperature, T_o is the optimum temperature, T_{O1} is the lower optimum temperature, T_{O2} denotes the upper optimum temperature, T_m denotes the maximum temperature

Function	Formula
Dent - like	$f(T) = \frac{(T-T_b)}{(T_{O1}-T_b)} \quad \text{if } T_b < T < T_{O1}$ $f(T) = \frac{T_m-T}{T_m-T_{O2}} \quad \text{if } T_{O2} < T < T_m$ $f(T) = 1 \quad \text{if } T_{O1} \leq T \leq T_{O2}$ $f(T) = 0 \quad \text{if } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_m$ (رابطه ۳)
Segmented	$f(T) = \frac{T-T_b}{T_o-T_b} \quad \text{if } T_b < T < T_o$ $f(T) = 1 - \left(\frac{T-T_o}{T_m-T_o} \right) \quad \text{if } T_o \leq T < T_m$ $f(T) = 0 \quad \text{if } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_m$ (رابطه ۴)
Beta	$f(T) = \left(\left(\frac{(T-T_b)}{(T_o-T_b)} \right) \times \left(\frac{(T_m-T)}{(T_m-T_o)} \right) \right)^{((T_m-T_o)/(T_o-T_b))^{a^*}}$ (رابطه ۵)

(۱) RMSE = جذر میانگین مربعات خطا، که به منظور ارزیابی تفاوت میان مقادیر مشاهده شده و مقادیر پیش‌بینی شده از این پارامتر استفاده شد و بر اساس (رابطه ۶) تعیین

ملاک انتخاب بهترین و دقیق‌ترین مدل برازش داده شده (پیش‌بینی شده) با مقدار مشاهده شده بر اساس پارامترهای (۱) و (۲) بود:

شد (Alvarado and Bradford, 2002).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum (Y_{\text{obs}} - Y_{\text{pred}})^2} \quad (\text{رابطه ۶})$$

در این معادله، Y_{obs} = (مقادیر مشاهده شده)،
 Y_{pred} = (مقادیر پیش‌بینی شده)، n = (تعداد نمونه‌ها)
 است.

R^2 = ضریب تبیین رگرسیون، بین مقادیر پیش‌بینی
 شده و مقادیر مشاهده شده این پارامتر بر اساس (رابطه ۷)
 تعیین شد (Alvarado and Bradford, 2002).

$$R^2 = \text{SSR} / \text{SST} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در این معادله SSR = (میانگین مربعات برای
 رگرسیون)^۱ و SST = (میانگین مربعات کل)^۲ است.
 با استفاده از مدل هیدروترمال تایم، الگوی جوانه‌زنی
 بذر در شرایط نامطلوب دمایی و کاهش پتانسیل اسمزی به
 خوبی تخمین زده می‌شود و با استفاده از ترکیب
 معادله‌های هیدروتایم (رابطه ۸) و ترمال تایم (رابطه ۹)
 مدل هیدروترمال تایم به دست آمد (رابطه ۱۰)
 (Alvarado and Bradford, 2002).

$$\theta_H = \theta_{HT} / T - T_b \quad (\text{رابطه ۸})$$

مدل هیدروتایم به توصیف رابطه میان سرعت جوانه‌زنی
 و پتانسیل آب می‌پردازد. در (رابطه ۸)، پارامتر θ_H ثابت
 هیدروتایم است (Alvarado and Bradford, 2002).

$$\theta_{HT} = (\psi - \psi_b(g))(T - T_b)t_g \quad (\text{رابطه ۹})$$

برای پیش‌بینی زمان جوانه‌زنی در دماها و پتانسیل‌های
 مختلف رطوبتی به چهار پارامتر، T_b : دمای پایه، ψ_b
 پتانسیل رطوبتی پایه، θ_{HT} : ثابت هیدروترمال تایم و مقدار

σ : انحراف معیار هیدروترمال تایم نیاز است که با استفاده از
 آنالیز پروبیت قابل تخمین است (به منظور به دست آوردن
 پارامترهای هیدروترمال تایم و تبدیل رگرسیون غیر خطی به
 رگرسیون خطی برای راحتی تفسیر از آنالیز پروبیت استفاده
 می‌شود (Alvarado and Bradford, 2005).

(رابطه ۱۰)

$$\text{Probit}(g) = \{[\psi - \theta_{HT} / (T - T_b)t_g] - \psi_b(50)\} / \sigma_{\psi_b}$$

پتانسیل پایه جوانه‌زنی (ψ_b) بیانگر حداقل رطوبت مورد
 نیاز بذر برای خروج ریشه‌چه است.

به منظور بررسی اثر دماهای مختلف، تیمارهای
 مختلف پرایمینگ و غلظت‌های متفاوت شوری و خشکی
 بر شاخص‌های درصد و سرعت جوانه‌زنی، آنالیز واریانس
 داده‌ها بر اساس آنالیز GLM به کمک نرم‌افزار
 Minitab 17 و SAS 9.4 انجام شد و همچنین جهت
 برآزش مدل‌ها با استفاده از روش‌های رگرسیونی از
 نرم‌افزار Excel 2016 استفاده شد و مقایسه‌های میانگین بر
 اساس آزمون دانکن در سطح احتمال خطای آزمایشی ۵
 درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج آنالیز واریانس نشان داد، میان تیمارهای دما،
 خشکی و پرایمینگ از نظر شاخص درصد جوانه‌زنی تفاوت
 معناداری وجود داشت، کلیه اثرهای متقابل دو گانه و سه گانه
 به جز اثر متقابل دو گانه خشکی و پرایمینگ، در سطح
 احتمال خطای آزمایشی ۵ درصد تفاوت معناداری داشت.
 در رابطه با شاخص سرعت جوانه‌زنی میان تیمارهای دما،
 خشکی و تیمار پرایمینگ و اثرهای متقابل دو گانه و سه گانه
 تفاوت معناداری وجود داشت (جدول ۲).

¹ Sum of squares (SS)

² Total sum of squares (SST)

جدول ۲- نتایج آنالیز واریانس درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر ذرت تحت سطوح متفاوت دما، خشکی و پرایمینگ

Table 2- Analysis of variance (ANOVA) for germination percentage and germination rate under difference levels of temperature, drought and priming of corn seed

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی DF	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate
دما Temperature (T)	7	104286*	1164.93*
خشکی Drought (D)	3	76499*	1098.96*
پرایمینگ Priming (P)	4	421*	11.85*
T × D	21	6915*	104.18*
T × P	28	104*	1.68*
D × P	12	65	2.14*
T × D × P	84	93*	0.75*
خطا Error	480	34	0.4
ضریب تغییرات CV (%)	c.v	12.87	23.81

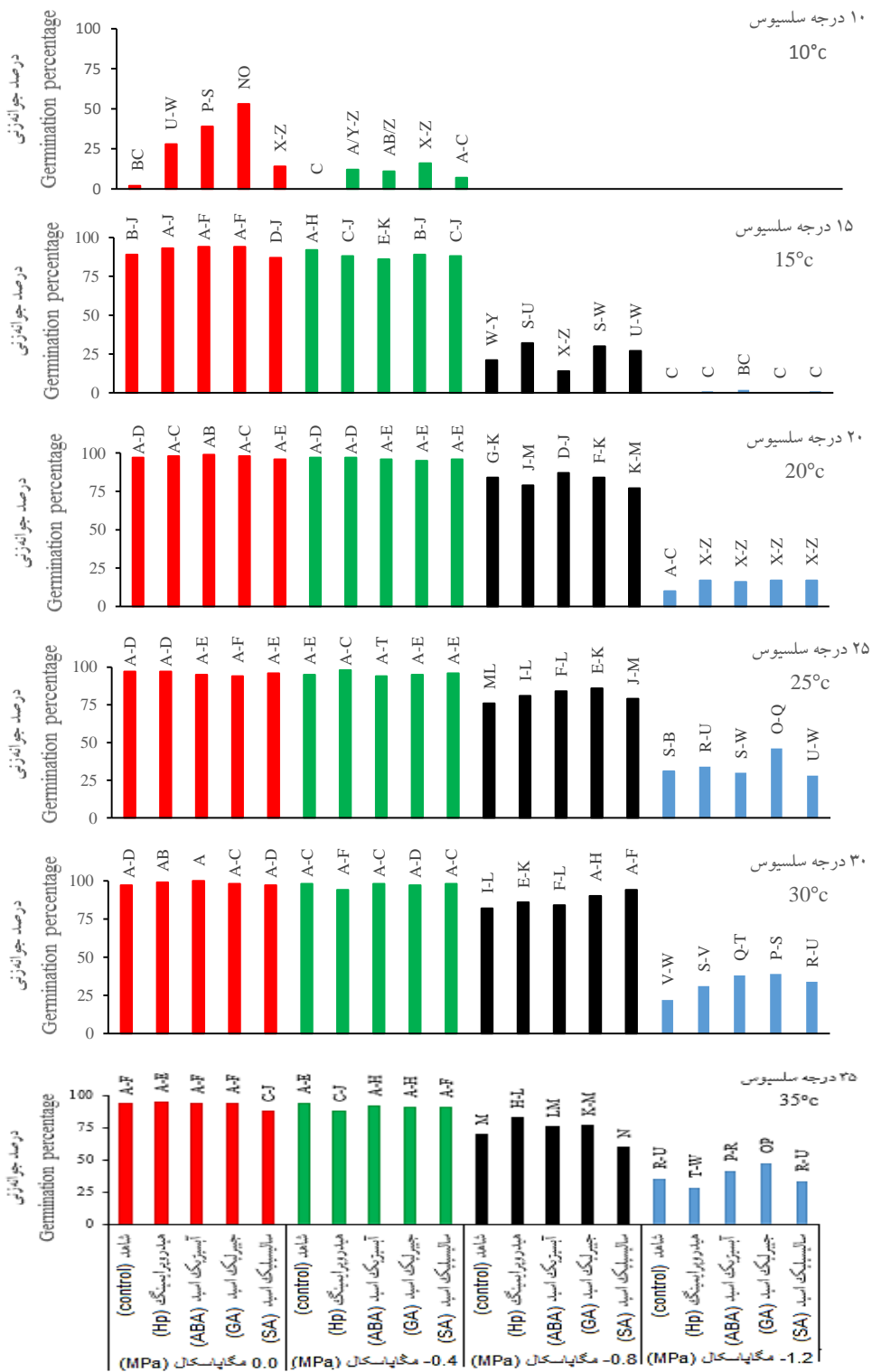
*- Significant different at P= 0.05

*معنادر در سطح احتمال ۵ درصد.

درصد جوانه‌زنی

در دما ۱۰ درجه سلسیوس و خشکی ۰/۰ مگاپاسکال، کلیه تیمارهای پرایمینگ تاثیر مثبتی بر شاخص درصد جوانه‌زنی داشت، در خشکی ۰/۴- مگاپاسکال پرایمینگ اثر مثبتی بر این شاخص داشت. (شکل ۱). در دما ۱۵ درجه سلسیوس و خشکی ۰/۸- مگاپاسکال از میان کلیه تیمارهای پرایمینگ تیمار هیدروپرایمینگ در شاخص درصد جوانه‌زنی اثر مطلوبی داشت (شکل ۱). در دما ۲۰ درجه سلسیوس و خشکی ۰/۸- مگاپاسکال درصد جوانه‌زنی بذر به طور معناداری نسبت به شرایط بدون تنش خشکی کاهش پیدا کرد (۱۳٪)، در خشکی ۱/۲- مگاپاسکال کلیه تیمارهای پرایمینگ با تیمار بدون پرایمینگ تفاوت معناداری وجود داشت (شکل ۱). در دما ۲۵ درجه سلسیوس و خشکی ۰/۸- مگاپاسکال پرایم‌های هورمونی جیبرلیک اسید با درصد جوانه‌زنی به ترتیب (۸۶٪) نسبت به تیمار بدون پرایمینگ با درصد جوانه‌زنی (۷۶٪) سبب بهبود درصد جوانه‌زنی شدند (شکل ۱) در خشکی ۱/۲- مگاپاسکال، پرایم هورمونی جیبرلیک اسید نسبت به تیمار بدون پرایمینگ و سایر تیمارهای

پرایمینگ به طور معناداری سبب بهبود درصد جوانه‌زنی بذر شد (شاهد با درصد جوانه‌زنی ۳۱٪ در مقایسه با پرایم هورمونی جیبرلیک اسید با درصد جوانه‌زنی ۴۶٪) (شکل ۱). در دما ۳۰ درجه سلسیوس و خشکی ۰/۸- مگاپاسکال تیمارهای جیبرلیک اسید و سالیسیلیک اسید سبب بهبود شاخص درصد جوانه‌زنی شد با کاربرد تیمار سالیسیلیک اسید درصد جوانه‌زنی (۹۴٪) مشاهده شد در حالی که درصد جوانه‌زنی تیمار بدون پرایمینگ (۸۲٪) مشاهده شد (شکل ۱). در خشکی ۱/۲- مگاپاسکال به طور معناداری تیمار بدون پرایمینگ نسبت به سایر تیمارها اثر کاهشی درصد جوانه‌زنی را نشان داد (شکل ۱). در خشکی ۱/۲- مگاپاسکال، پرایم‌های هورمونی آبسزیک اسید، جیبرلیک اسید و سالیسیلیک اسید به ترتیب با (۱۶، ۱۷ و ۱۲٪) افزایش میزان درصد جوانه‌زنی، نسبت به تیمار شاهد با ۲۲٪ جوانه‌زنی، سبب بهبود درصد جوانه‌زنی بذر ذرت شدند (شکل ۱). در دما ۳۵ درجه سلسیوس و خشکی ۰/۸- مگاپاسکال، تیمار هیدروپرایمینگ به طور معناداری سبب بهبود سرعت جوانه‌زنی شد.



شکل ۱- درصد جوانه‌زنی بذر ذرت در سطح دما (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی گراد) و سطوح مختلف خشکی و پرایمینگ در شرایط آزمایشگاهی. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

Figure 1- Germination percentage of corn seeds at temperature levels (10, 15, 20, 25, 30 and 35 °C) and different levels of drought and priming in laboratory conditions.

The average of at least one common letter based on the Duncan test is not significant at 5% probability level.

Hp: Hydropriming, ABA: Abscisic Acid, GA: Gibberellic Acid, SA: Salicylic acid

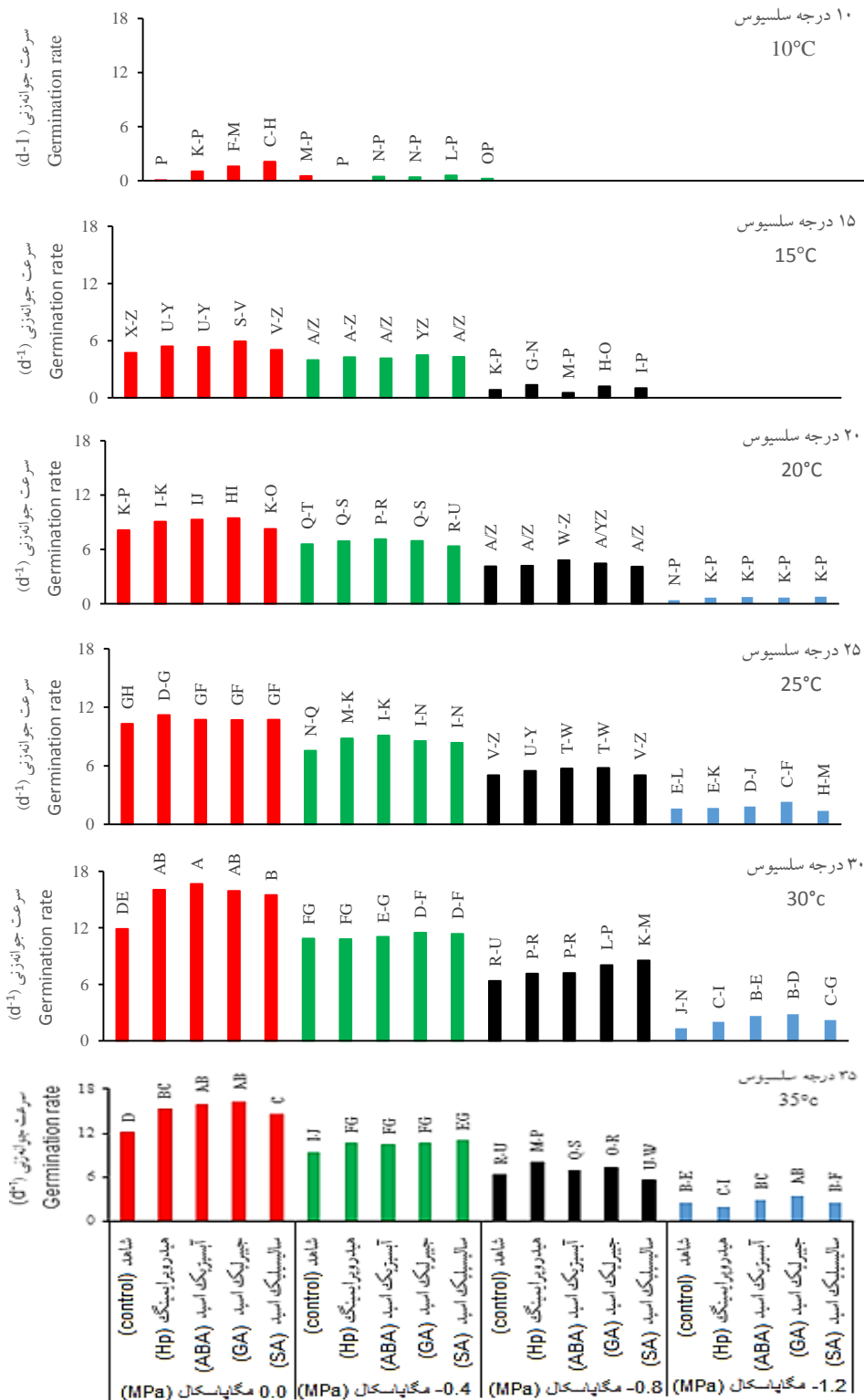
سرعت جوانه‌زنی

در دمای ۱۰ درجه سلسیوس و خشکی ۰/۰ مگاپاسکال (تیمار بدون تنش) پرایمینگ با آبسیزیک اسید و جیبرلیک اسید تاثیر مثبتی بر شاخص سرعت جوانه‌زنی داشت (شکل ۲). در دما ۱۵ درجه سلسیوس و بدون تنش خشکی تیمار هورمونی جیبرلیک اسید اثر مثبتی بر سرعت جوانه‌زنی داشت (شکل ۲). در دما ۲۰ درجه سلسیوس و شرایط بدون تنش خشکی تیمار آبسیزیک اسید و جیبرلیک اسید اثر مثبتی بر سرعت جوانه‌زنی داشت (شکل ۲). در دما ۲۵ درجه سلسیوس و خشکی ۰/۰، ۰/۸- و ۱/۲- مگاپاسکال، تفاوت معناداری میان تیمارها مشاهده نشد. در خشکی ۰/۴- مگاپاسکال تیمارهای هیدروپرایمینگ و اسید آبسیزیک سبب بهبود سرعت جوانه‌زنی نسبت به تیمار بدون پرایم شدند (شکل ۲). در دما ۳۰ درجه سلسیوس و خشکی ۱/۲- مگاپاسکال، تیمارهای آبسیزیک اسید و جیبرلیک اسید اثر معناداری بر سرعت جوانه‌زنی داشت. در خشکی ۰/۸- مگاپاسکال تیمار جیبرلیک اسید تفاوت معناداری با تیمار بدون پرایم نشان داد (شکل ۲). در تیمار بدون تنش، کلیه تیمارهای پرایمینگ تفاوت معناداری با تیمار بدون پرایمینگ داشتند (شکل ۲). در دما ۳۵ درجه سلسیوس و خشکی ۱/۲- مگاپاسکال، تفاوت معناداری میان تیمار بدون پرایمینگ و سایر تیمارهای پرایمینگ مشاهده نشد. در خشکی ۰/۸- مگاپاسکال تیمار هیدروپرایمینگ تفاوت معناداری با تیمار بدون پرایمینگ داشت و اثر مثبتی نیز بر سرعت جوانه‌زنی داشت (شکل ۲). در خشکی ۰/۴- مگاپاسکال، تمامی تیمارهای پرایمینگ اثر مثبتی بر سرعت جوانه‌زنی نشان دادند. در شرایط بدون تنش خشکی تیمارهای اسید آبسیزیک، جیبرلیک و هیدروپرایمینگ اثر مثبتی بر سرعت جوانه‌زنی داشتند و با تیمار بدون پرایمینگ تفاوت معناداری داشتند (شکل ۲).

دمای کاردینال

به منظور کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی بذر ذرت در سطوح دمایی متفاوت، سه معادله رگرسیونی غیر

خطی (دندان- مانند، دو تکه‌ای و بتا) استفاده شد. با برآزش سه مدل در برابر سرعت جوانه‌زنی نتایج نشان داد که دماهای کاردینال بذرهای ذرت پرایم شده با هورمون با هم تفاوت داشت (جدول ۳). دمای کاردینال بذر ذرت (دمای پایه، دمای مطلوب ۱، دما مطلوب ۲ و دمای حداکثر) به ترتیب ۹/۰۴، ۷۱/۲۶، ۳۵ و ۴۴/۶۲ درجه سلسیوس تخمین زده شد (جدول ۳). بر طبق نتایج حاضر با برآزش سه مدل در برابر سرعت جوانه‌زنی در شرایط بدون تنش و بدون تیمار پرایمینگ مدل دندان - مانند با دارا بودن بیشترین میزان R^2 و کمترین میزان RMSE به ترتیب با اعداد ۰/۹۹ و ۰/۱۵ نسبت به سایر مدل‌ها با بیشترین دقت تخمین زد (جدول ۳)، (شکل ۳). از میان تیمارهای متفاوت پرایمینگ جیبرلیک اسید به میزان بیشتری سبب کاهش دما پایه شد و بر اساس مدل دندان - مانند با $RMSE = ۰/۱۸$ و $R^2 = ۰/۹۹$ (= دماهای پایه، دما مطلوب ۱، دما مطلوب ۲ و دما حداکثر بذر ذرت را به ترتیب ۶/۴۳، ۳۱/۳۲، ۷۷/۳۴ و ۴۵ درجه سلسیوس پیش‌بینی شد (جدول ۳). در شرایط خشکی ۰/۴- مگاپاسکال، تیمار بدون پرایمینگ بر اساس مدل دو تکه‌ای، دما پایه، دما مطلوب و دما حداکثر به ترتیب ۸/۵۴، ۳۳/۰۸ و ۴۳/۹۹ درجه سلسیوس ارزیابی شد (شکل ۳). در سطح خشکی ۰/۴- مگاپاسکال تیمار جیبرلیک اسید سبب کاهش دما پایه به میزان بیشتری نسبت به سایر تیمارها شد، بر اساس مدل دندان - مانند ($RMSE = ۰/۱۴$ و $R^2 = ۰/۹۹$) دما پایه، دما مطلوب ۱، دما مطلوب ۲ و دما حداکثر به ترتیب ۷/۵۲، ۳۱/۱۹، ۳۴/۰۵ و ۴۱/۱۶ درجه سلسیوس ارزیابی شد. در شرایط خشکی ۰/۸- مگاپاسکال، دما پایه، دما مطلوب ۱، دما مطلوب ۲ و دما حداکثر تیمار بدون پرایمینگ به ترتیب ۱۱/۹۴، ۲۷/۴۵، ۳۵/۰۳ و ۴۲/۶۲ درجه سلسیوس ارزیابی شد (جدول ۳). در این سطح تنش، تیمار هیدروپرایمینگ نسبت به سایر تیمارها سبب کاهش بیشتر دما پایه شد (جدول ۳)، بر اساس مدل دو تکه‌ای، دما پایه، دما مطلوب و دما حداکثر بذر ذرت به ترتیب ۹/۹۹، ۳۳/۳۷ و ۴۴/۰۷ درجه سلسیوس ارزیابی شد (جدول ۳).



شکل ۲- سرعت جوانه‌زنی بذر ذرت در سطح دما (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سلسیوس) و سطوح مختلف خشکی و پرایمینگ در شرایط آزمایشگاهی. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

Figure 2- Germination rate of corn seeds at temperature levels (10, 15, 20, 25, 30 and °C) and different levels of drought and priming in laboratory conditions.

The average of at least one common letter based on the Duncan test is not significant at 5% probability level.

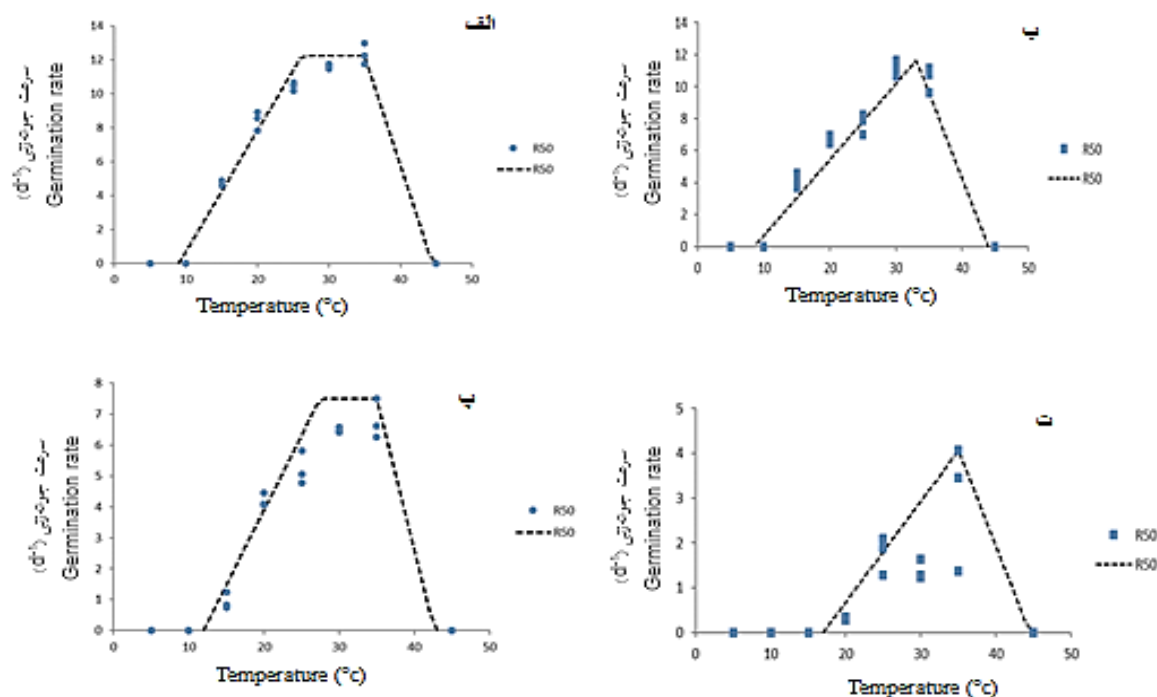
Hp: Hydropriming, ABA: Abscisic Acid, GA: Gibberellic Acid, SA: Salicylic acid

جدول ۳- پارامترهای برآورد شده با استفاده از بهترین مدل رگرسیون غیر خطی برای ۵۰٪ جوانه‌زنی بذر ذرت تحت تاثیر تیمارهای متفاوت پرایمینگ در شرایط تنش خشکی (۰/۰، ۰/۴، ۰/۸، ۱/۲ - مگاپاسکال)

Table 3- Estimated parameters using the best nonlinear regression model for 50% germination of corn seeds under different priming treatments and drought stress conditions (0.0,-0.4,-0.8 and -1.2 MPa)

Drought خشکی	Treatment تیمار	Model مدل	T _b (°C)	T _o (°C)	T _c (°C)	T _{o1} (°C)	T _{o2} (°C)	R ²	RMSE
0.0 (Mpa)	Control شاهد	Dent-like model مدل دندان - مانند	9.04	-	44.44	26.16	35	0.99	0.15
	Hydropriming هیدرو پرایمینگ	Segmented model مدل دو تکه ای	8.15	32.61	44.86	-	-	0.99	0.17
	Abscisic Acid آبسزیک اسید	Segmented model مدل دو تکه ای	7.69	33.65	44.99	-	-	0.98	0.25
	Gibberellic Acid جیبرلیک اسید	Dent-like model مدل دندان - مانند	6.43	-	45	31.32	37.77	0.99	0.18
	Salicylic acid سالیسیلیک اسید	Dent-like model مدل دندان - مانند	8.75	44.81	31.25	33.19	33.79	0.99	0.18
-0.4 (Mpa)	Control شاهد	Segmented model مدل دو تکه ای	8.54	33.08	43.99	-	-	0.98	0.21
	Hydropriming هیدرو پرایمینگ	Segmented model مدل دو تکه ای	7.69	33.65	44.99	-	-	0.98	0.25
	Abscisic Acid آبسزیک اسید	Dent-like model مدل دندان - مانند	6.43	-	45	31.32	37.77	0.99	0.18
	Gibberellic Acid جیبرلیک اسید	Dent-like model مدل دندان - مانند	8.75	44.81	31.25	33.19	33.79	0.99	0.18
	Salicylic acid سالیسیلیک اسید	Dent-like model مدل دندان - مانند	8.44	-	44.99	30.39	34.67	0.99	0.12
-0.8 (Mpa)	Control شاهد	Dent-like model مدل دندان - مانند	11.94	-	42.62	27.45	35.03	0.98	0.17
	Hydropriming هیدرو پرایمینگ	Segmented model مدل دو تکه ای	9.99	33.37	44.07	-	-	0.98	0.12
	Abscisic Acid آبسزیک اسید	Dent-like model مدل دندان - مانند	12.97	-	42.97	26.88	35.02	0.96	0.19
	Gibberellic Acid جیبرلیک اسید	Beta model مدل بتا	10.13	35.03	45	-	-	0.97	0.17
	Salicylic acid سالیسیلیک اسید	Segmented model مدل دو تکه ای	12.87	32.09	44.34	-	-	0.77	0.38
-1.2 (Mpa)	Control شاهد	Segmented model مدل دو تکه ای	16.98	35.03	44.5	-	-	0.78	0.19
	Hydropriming هیدرو پرایمینگ	Segmented model مدل دو تکه ای	16.3	28.04	44.44	-	-	0.94	0.06
	Abscisic Acid آبسزیک اسید	Dent-like model مدل دندان - مانند	14.98	-	43.62	32.02	35.5	0.95	0.1
	Gibberellic Acid جیبرلیک اسید	Dent-like model مدل دندان - مانند	17.74	-	44.79	27	35.47	0.98	0.05
	Salicylic acid سالیسیلیک اسید	Dent-like model مدل دندان - مانند	14.93	-	44.48	30.14	33.32	0.9	0.12

(RMSE و R² به ترتیب دما پایه، دما مطلوب، دما مطلوب ۱، دما مطلوب ۲، دما سقف (درجه سانتی گراد)، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا T_b، T_o، T_c، T_{o1}، T_{o2}، R² و RMSE are base temperature, optimum temperature, maximum temperature, lower optimum temperature, upper optimum temperature, Coefficients of determination and Root mean square error, respectively.



شکل ۳- جوانه‌زنی پیش‌بینی شده (خطوط) در مقابل مشاهده شده (نمادها) بذر ذرت بدون پرایم در شرایط خشکی ۰/۰ مگاپاسکال برای ۵۰٪ جوانه‌زنی (مدل دندان - مانند) (شکل الف)، خشکی ۰/۴- مگاپاسکال برای ۵۰٪ جوانه‌زنی (مدل دوتکه‌ای) (شکل ب)، خشکی ۰/۸- مگاپاسکال برای ۵۰٪ جوانه‌زنی (مدل دندان - مانند) (شکل پ) و خشکی ۱/۲- مگاپاسکال برای ۵۰٪ جوانه‌زنی (مدل دوتکه‌ای) (شکل ت).

Figure 3- Predicted germination (lines) versus observed (symbols) Seeds of maize without prime in salt stress 0.0 MPa for 50% germination (dental-like model) (Fig. A), drought -0.4 MPa for 50% Gramination (Fig. B), drought -0.8 MPa for 50% germination (dental-like model) (Fig. C), and drought of 1.2 MPa for 50% germination (segmented model) (Fig. D).

جوانه‌زنی بذرها استفاده می‌شود و در مورد بسیاری از گونه‌ها کمی‌سازی شده است (Atashi *et al.*, 2014,) (Yasari *et al.*, 2014). درصد نهایی جوانه‌زنی بذر بیشتر تحت تاثیر تغییرات پتانسیل اسمزی قرار گرفت و نسبت به پتانسیل اسمزی، فاکتور دما تاثیر کمتری بر میزان درصد جوانه‌زنی داشت. بیشترین درصد جوانه‌زنی در دمای ۳۵- ۲۰ درجه سلسیوس برای تمام پتانسیل‌های اسمزی مشاهده شد (جدول ۴). در پژوهش حاضر مدل هیدروترمال تایم به خوبی اثر دما و پتانسیل آب بر پاسخ جوانه‌زنی بذر تحت تیمارهای متفاوت پرایمینگ را پیش‌بینی کرد، میزان R^2 و میزان پایین مقادیر RMSE نشان دهنده برازش مناسب مدل به داده‌ها می‌باشد (جدول ۴)، نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج حاصل از پژوهش

در سطح خشکی ۱/۲- مگاپاسکال، بر اساس مدل دوتکه‌ای ($R^2=0.78$ و $RMSE = 0.19$) دما پایه، دما مطلوب و دما حداکثر به ترتیب ۱۶/۹۸، ۳۵/۰۳ و ۴۴/۵ درجه سلسیوس ارزیابی شد (جدول ۳) و (شکل ۳)، از میان تیمارهای متفاوت پرایمینگ تیمار سالیسیلیک اسید سبب کاهش دما پایه به میزان بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها شد، بر اساس مدل دندان - مانند ($R^2 = 0.9$ و $RMSE = 0.12$)، دما پایه، دما مطلوب ۱، دما مطلوب ۲ و دما حداکثر به ترتیب ۱۴/۹۳، ۳۰/۱۴ و ۳۳/۳۲ درجه سلسیوس ارزیابی شد (جدول ۳).

مدل هیدروترمال تایم

در مدل‌های هیدروترمال تایم (HTT) از ترکیب دو فاکتور دما (T) و پتانسیل آب (ψ) برای پیش‌بینی زمان

(Abdellaoui *et al.*, 2018) همخوانی داشت. کلیه پارامترهای هیدروترمال تایم که به منظور توصیف جوانه‌زنی بذر ذرت در شرایط مطلوب و نامطلوب دمایی تخمین زده شد در (جدول ۴) نشان داده شد. بر اساس نتایج این پژوهش تیمارهای هیدروپرایمینگ، آبسزیک اسید و سالیسیلیک اسید سبب کاهش ثابت هیدروترمال تایم شدند. بر طبق نتایج پژوهش حاضر تیمارهای

پرایمینگ هیدروپرایمینگ، جبرلیک اسید و سالیسیلیک اسید سبب افزایش مقدار انحراف میانگین از دما پایه نسبت به تیمار بدون پرایمینگ شدند، افزایش مقدار انحراف معیار از دمای پایه نشان دهنده توانایی جوانه‌زنی بذر در پتانسیل‌های متفاوت اسمزی است، نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش (Patane *et al.*, 2016) همخوانی داشت.

جدول ۴- تخمین پارامترهای مدل هیدروترمال تایم به منظور توصیف جوانه‌زنی بذر ذرت در دماها و چهار پتانسیل رطوبتی متفاوت (۰/۰، -۰/۴، -۰/۸ و -۱/۲ مگاپاسکال).

Table 4- Estimation of the parameters of the Hydrothermal Time Model in order to describe corn seed germination at temperatures and four different moisture content (0.0, -0.4, -0.8 and -1.2 MPa)

Priming پرایمینگ	T(°C)	θ_{HT} (Mpa°Cd)	$\psi_{b(g)}$ (Mpa)	$\sigma_{\psi b}$ (Mpa)	T _b (°C)	T _o (°C)	R ²
Cotrol شاهد	10-35	1076.27	-1.5	0.25	7.65	26.1	0.9
Hydropriming هیدروپرایمینگ	10-35	890.1184	-1.41	0.26	7.83	31.94	0.99
Abscisic Acid آبسزیک اسید	10-35	865.04	-1.48	0.22	8.41	33.27	0.86
Gibberellic Acid جبرلیک اسید	10-35	1094.28	-1.48	0.27	5.62	32.32	0.98
Salicylic acid سالیسیلیک اسید	10-35	917.1415	-1.44	0.28	8.01	32.69	0.97

T_b: Base temperature

T_b دمای پایه:

T_o: Optimum temperature

T_o دمای مطلوب:

R²: Coefficients of determination

R² ضریب تبیین:

ψ_b : Base water potential

ψ_b پتانسیل رطوبتی پایه:

θ_{HT} : hydrothermal time constant

θ_{HT} ثابت هیدروترمال تایم:

$\sigma_{\psi b}$: Standard deviation of ψ_b

$\sigma_{\psi b}$ انحراف معیار هیدروترمال تایم

معداری شاخص‌های درصد سرعت جوانه‌زنی کاهش یافت، این نتایج با پژوهش‌های (Bidgoly *et al.*, 2018) مطابقت داشت. تنش خشکی سبب کاهش جذب آب، توسط بذر می‌شود (Patane *et al.*, 2016).

نتایج پژوهش (Nozarpour *et al.*, 1395) در رابطه با گیاه بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) نشان داد بذرهای تحت تیمار سطوح مختلف تنش خشکی برای جوانه‌زنی به مدت زمان بیشتری نیاز داشتند. بر اساس نتایج

بحث

طبق این پژوهش پتانسیل‌های متفاوت اسمزی، دما و اثر متقابل آنها به طور معناداری بر درصد جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی بذر ذرت در سطح احتمال پنج درصد تاثیر داشت، نتایج این پژوهش با نتایج حاصل از پژوهش (Abdellaoui *et al.*, 2018) مطابقت داشت. بر اساس نتایج این پژوهش با افزایش دما و پتانسیل آب به طور

همخوانی داشت.

طی فرآیند پرایمینگ به علت افزایش فعالیت آنزیم‌های آلفا آمیلاز و بتا آمیلاز، فرآیند تجزیه نشاسته موجود در بذر بیشتر انجام خواهد شد و با افزایش تجمع قند سرعت جوانه‌زنی و درصد جوانه‌زنی بذر بیشتر خواهد شد (Savvides *et al.*, 2016). پرایم هورمونی یکی از رایج‌ترین نوع تکنیک پرایمینگ است و سبب بهبود جوانه‌زنی بذر در شرایط تنش خشکی می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد کاهش پتانسیل آب (Ψ)، پاسخ جوانه‌زنی بذر به دما (T) را از طریق تغییر در سرعت جوانه‌زنی (GR) و دماهای کاردینال کاهش داد. دما پایه (T_b) در صورت کاهش پتانسیل آب (Ψ) افزایش می‌یابد، همچنین در صورت کاهش پتانسیل آب (Ψ) میزان سرعت جوانه‌زنی بذر به طور چشمگیری کاهش پیدا خواهد کرد. در شرایط تنش خشکی، انتقال نشاسته از لپه به گیاهچه در حال رشد کاهش می‌یابد و سبب تجمع بیش از حد نشاسته در لپه می‌شود و سبب کاهش فعالیت آنزیم آمیلاز می‌شود، به نظر می‌رسد کاربرد هورمون جیبرلیک اسید به دلیل تغییر در فعالیت برخی از آنزیم‌های تجزیه‌کننده نشاسته مانند افزایش فعالیت آنزیم ساکارز سنتتاز و آنزیم ساکارز فسفات سنتتاز درون لپه سبب بهبود فرآیند جوانه‌زنی خواهد شد (Kaur *et al.*, 2000).

بر طبق نتایج این پژوهش کاربرد جیبرلیک اسید در دماهای و پتانسیل‌های خشکی بالا اثر مطلوب‌تری بر شاخص درصد جوانه‌زنی داشت، اما در رابطه با شاخص سرعت جوانه‌زنی تنها در دما ۳۰ درجه سلسیوس اثر مطلوبی داشت. بر طبق نتایج این پژوهش در دمای ۳۰ درجه سلسیوس، کاربرد سالیسیلیک اسید سبب بهبود جوانه‌زنی بذر شد. نتایج این پژوهش نشان داد در دما ۳۵ درجه سلسیوس در سطوح خشکی ۰/۴- و ۰/۸- مگاپاسکال تیمار هیدروپرایمینگ سبب بهبود جوانه‌زنی بذر شد. نتایج این پژوهش با پژوهش‌های (Zheng *et al.*, 2015) همخوانی داشت. بر طبق نتایج این پژوهش در دما ۳۰ درجه

این پژوهش دما بر پارامترهای جوانه‌زنی بذر ذرت تاثیر معناداری داشت، نتایج این پژوهش با نتایج حاصل از پژوهش (Fallahi *et al.*, 2017) مطابقت داشت. بر اساس نتایج پژوهش حاضر به نظر می‌رسد، ذرت در دماهای بالاتر سرعت و درصد جوانه‌زنی بالاتری (دما پایه و دما مطلوب جوانه‌زنی بذر بر اساس مدل دندان-مانند به ترتیب ۹/۵۱ و ۳۵-۲۴/۱۲ درجه سلسیوس و دامنه دمایی ۳۵/۱ درجه سلسیوس) دارد، نتایج پژوهش (Zhang *et al.*, 2016) در رابطه با گیاه کلزا (*Brassica napus L.*) نشان داد، در شرایط دما بالا میزان فعالیت گونه‌های فعال اکسیژن سوپراکسیددیسموتاز و پراکسیداز کاهش یافت و در مقابل فعالیت آنتی‌اکسیدان کاتالاز افزایش یافت، به نظر می‌رسد این عامل می‌تواند سبب افزایش تحمل کلزا به دما بالا شود اما در شرایط دما پایین فعالیت سوپراکسیددیسموتاز افزایش یافت و فعالیت پراکسیداز کاهش یافت در حالی که تغییری در فعالیت آنتی‌اکسیدان کاتالاز گزارش نشد.

مطابق با نتایج این پژوهش دماهای بالا بر شاخص‌های درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر ذرت اثر مطلوبی داشتند، نتایج این پژوهش با پژوهش (Fallahi *et al.*, 2015) که اثر مطلوب دما بالا بر جوانه‌زنی بذر گیاه ریحان (*Ocimum basilicum L.*) را نشان داد مطابقت داشت، در این پژوهش دماهای پایه، مطلوب و حداکثر بذر ریحان به ترتیب ۶/۱۱، ۲۸/۹۷ و ۴۳/۵۷ درجه سلسیوس گزارش شد. بر اساس نتایج پژوهش حاضر جوانه‌زنی بذر ذرت در معرض دماهای بالا (۴۵ درجه سلسیوس) صفر بود، در رابطه با گیاه (*Calendula officinalis L.*) در دما بالا (دماهای بالاتر از دما حداکثر جوانه‌زنی) به علت مرگ جنین و یا خروج جنین از درون دانه فرآیند جوانه‌زنی انجام نشد (Eberle *et al.*, 2014). بر طبق نتایج این پژوهش، تنش خشکی به میزان زیادی سبب کاهش درصد جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی بذر شد اما روش پرایمینگ سبب بهبود اثرات نامطلوب تنش خشکی شد، این نتیجه با نتایج حاصل از پژوهش (Sadeghi and Robati, 2015)

نرمال استفاده شد. با کاهش ثابت هیدروترمال تایم سرعت جوانه زنی بذر بیشتر خواهد شد (Alvarado and Bradford, 2005., Durr et al., 2014). در رابطه با گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) پرایمینگ سبب کاهش ضریب هیدروترمال تایم شد (Patana et al., 2016).

نتیجه گیری کلی

جوانه زنی بذر فرآیند بیولوژیکی است که به میزان زیادی تحت تاثیر فاکتورهای دما (T) و پتانسیل آب (Ψ) قرار دارد، این دو عامل تا حد زیادی سرعت جوانه زنی بذر در مزرعه (GR) را تعیین می نماید. بر طبق این پژوهش به منظور تعیین دماهای کاردینال بذر ذرت مدل دندان - مانند به علت دارا بودن بیشترین R^2 و کمترین RMSE بهترین مدل انتخاب شد. بر طبق این مدل، دما پایه، دما مطلوب ۱، دما مطلوب ۲ و دما حداکثر به ترتیب ۹/۵۱، ۲۴/۱۲، ۳۵ و ۴۴/۶۲ درجه سلسیوس ارزیابی شد. تنش خشکی به طور معناداری سبب کاهش پارامترهای جوانه زنی بذر ذرت شد. در غلظت های بالا خشکی پرایمینگ سبب بهبود جوانه زنی بذر شد، به نظر می رسد پرایم هورمونی جیبرلیک اسید در دماهای بالا و غلظت های بالا خشکی در بهبود پارامترهای سرعت و درصد جوانه زنی موثرتر بود. همچنین بر طبق نتایج پژوهش حاضر، تیمارهای پرایمینگ هیدروپرایمینگ، جیبرلیک اسید و سالیسیلیک اسید سبب افزایش مقدار انحراف میانگین از دمای پایه نسبت به تیمار بدون پرایمینگ شدند که نشان دهنده توانایی بالاتر جوانه زنی بذر در پتانسیل های متفاوت اسمزی می باشد.

سلسیوس و سطح خشکی ۱/۲- مگاپاسکال، در رابطه با تیمار بدون پرایمینگ کاهش معنادار شاخص درصد جوانه زنی (درصد جوانه زنی ۴۹٪) مشاهده شد در حالی که تیمار آبسزیک اسید سبب بهبود این شاخص شد (درصد جوانه زنی ۶۹٪) اما در سطح دما ۳۰ درجه سلسیوس و خشکی ۱/۲- مگاپاسکال (درصد جوانه زنی ۲۲٪) مشاهده شد.

نتایج این پژوهش نشان داد زمانی که از غلظت برابر (۰/۵ میلی مولار) سه هورمون آبسزیک اسید، جیبرلیک اسید و سالیسیلیک اسید استفاده شد تاثیر هورمون جیبرلیک اسید بر بهبود فرآیندهای جوانه زنی بذر مشاهده شد. بر طبق نتایج این پژوهش نشان داده شد در دما ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سلسیوس در شرایط خشکی ۱/۲- مگاپاسکال غلظت ۰/۵ میلی مولار جیبرلیک اسید در هر ۴ دما سبب بهبود درصد جوانه زنی شد، اما غلظت ۰/۵ میلی مولار آبسزیک اسید تنها در دما ۲۰ و ۳۰ درجه سلسیوس موثر بود، در رابطه با هورمون سالیسیلیک اسید تنها در دما ۲۰ و ۳۰ درجه سلسیوس سبب بهبود شاخص درصد جوانه زنی شد. بر اساس پژوهش حاضر دمای کاردینال بذر ذرت (دمای پایه، دمای مطلوب ۱، دما مطلوب ۲ و دمای حداکثر) به ترتیب ۹/۵۱، ۲۴/۱۲، ۳۵ و ۴۴/۶۲ درجه سلسیوس تخمین زده شد. بر طبق گزارش (Edalat et al., 2014) دما پایه، دما مطلوب و دما حداکثر استقرار گیاه ذرت به ترتیب ۹/۴-۹/۹، ۳۰-۲۸/۹ و ۴۰-۳۹/۱ درجه سلسیوس ارزیابی شد. بر طبق گزارش (Wang et al., 2018) دما پایه، دما مطلوب و دما حداکثر رشد ذرت به ترتیب ۵، ۳۰ و ۴۱ درجه سلسیوس ارزیابی شد.

در این پژوهش مدل هیدروترمال تایم بر اساس توزیع

Reference

Abdellaoui, R., F. Boughalleb, D. Zayoud, M. Neffati, and E. Bakhshandeh, 2019. Quantification of *Retama raetam* seed germination response to temperature and water potential using hydrothermal time concept. Environ. Exp. Bot. 157: 211-216.

منابع

- Alvarado, V., and K. J. Bradford, 2002.** A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. *Plant Cell Environ.* 25: 1061-1069.
- Alvarado, V., and K. J. Bradford, 2005.** Hydrothermal time analysis of seed dormancy in true (botanical) potato seeds. *Seed Sci. Res.* 15: 77-88.
- Atashi, S., E. Bakhshandeh, Z. Zeinali, E. Yassari., and J. A. Teixeira da Silva, 2014.** Modeling seed germination in *Melisa officinalis* L. in response to temperature and water potential. *Acta Physiol. Plant.* 36: 605-611.
- Barooti, S., R. Tavakkol Afshari, N. Majnon Hoseini, and A. Hashemi, 2019.** Evaluation of germination and determination of cardinal temperatures of *Cannabis sativa* by using regression models. *Seed Sci. Technol.* 7: 127-136. (In Persian, with English Abstract)
- Bidgoly, R.O., H. Balouchi, E. Soltani, and A. Moradi, 2018.** Effect of temperature and water potential on *Carthamus tinctorius* L. seed germination: Quantification of the cardinal temperatures and modeling using hydrothermal time. *Ind. Crop. Prod.* 113: 121-127.
- Bijanzadeh, E., R. Naderi, and T.P. Egan, 2019.** Exogenous application of humic acid and salicylic acid to alleviate seedling drought stress in two corn (*Zea mays* L.) hybrids. *J. Plant Nutr.* 42: 1483-1495.
- Bradford, K.J. 2002.** Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Sci.* 50: 248-260.
- Carter, E.K., J. Melkonian, S. Steinschneider., and S.J. Riha, 2018.** Rainfed maize yield response to management and climate covariability at large spatial scales. *Agric. Forest Meteorol.* 256: 242-252.
- Cochrane, A. 2016.** Can sensitivity to temperature during germination help predict global warming vulnerability? *Seed Sci. Res.* 26: 14-29.
- Deihimfard, R., S. Nazari, and Y. Qorani, 2018.** Estimation of cardinal temperatures of *Lepyrodielis holosteoides* using regression models. *Seed Sci. Technol.* 6: 107-117. (In Persian, with English Abstract)
- Dianat, M., M.J. Saharkhiz, and I. Tavassolian, 2016.** Salicylic acid mitigates drought stress in *Lippia citriodora* L.: Effects on biochemical traits and essential oil yield. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 8: 286-293.
- Dražić, G., and N. Mihailović. 2009.** Salicylic acid modulates accumulation of Cd in seedlings of Cd-tolerant and Cd-susceptible soybean genotypes. *Arch. Biol. Sci.* 61: 431-439.
- Eberle, C.A., F. Forcella, R. Gesch, D. Peterson, and J. Eklund. 2014.** Seed germination of calendula in response to temperature. *Ind. Crop. Prod.* 52: 199-204.
- Edalat, M., and S.A. Kazemeini, 2014.** Estimation of cardinal temperatures for seedling emergence in corn. *Aust. J. Crop Sci.* 8: 1072-1078.
- Ellis, R.H., and E.H. Roberts, 1981.** The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. *Seed Sci. Technol.* 9: 373-409.
- Fallahi, H.R., M. Aghhavani-Shajari, M. Mohammadi, R. Kadkhodaei-Barkook., and E. Zareei, 2017.** Predicting of flixweed (*Descurainia sophia* L.) Webb ex Prantl) germination response to temperature using regression models. *J. Appl. Res. Med. Aromat. Plant.* 6: 131-134.
- Fallahi, H.R., M. Mohammadi, M. Aghhavani-Shajari., and F. Ranjbar, 2015.** Determination of germination cardinal temperatures in two basil (*Ocimum basilicum* L.) cultivars using non-linear regression models. *J. Appl. Res. Med. Aromat. Plant.* 2: 140-145.
- Farooq, M., M. Hussain, A. Wakeel., and K.H. Siddique, 2015.** Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35: 461-481.
- Forieri, I., U. Hildebrandt, and M. Rostas, 2016.** Salinity stress effects on direct and indirect defence metabolites in maize. *Environ. Exp. Bot.* 122: 68-77.
- Gabaldon-Leal, C., H. Webber, M.E. Otegui, G.A. Slafer, R.A. Ordonez, T. Gaiser, I.J. Lorite, M. Ruiz-Ramos., and F. Ewert, 2016.** Modelling the impact of heat stress on maize yield formation. *Field Crop. Res.* 198: 226-237.
- Hardegee, S.P. 2006.** Predicting germination response to temperature. I. Cardinal-temperature models and subpopulation-specific regression. *Ann. Bot.* 97: 1115-1125.

- Hashemi, A., R. Tavakkol Afshari., and L. Tabrizi, 2017.** Investigation of germination characteristics and determining the important temperatures of seedlings (*Plantago ovate*). *Field Crop Sci.* 47: 1-7. (In Persian, with English Abstract)
- Hatfield, J.L., L. Wright-Morton, and B. Hall, 2018.** Vulnerability of grain crops and croplands in the Midwest to climatic variability and adaptation strategies. *Clim. Change.* 146: 263-275.
- Ibrahim, E.A. 2016.** Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds. *J. Plant Physiol.* 192: 38-46.
- Iqbal, M., and M. Ashraf. 2013.** Gibberellic acid mediated induction of salt tolerance in wheat plants: growth, ionic partitioning, photosynthesis, yield and hormonal homeostasis. *Environ. Exp. Bot.* 86: 76-85.
- Jumrani, K., and V.S. Bhatia, 2018.** Combined effect of high temperature and water-deficit stress imposed at vegetative and reproductive stages on seed quality in soybean. *Indian J. Plant Physiol.* 23: 227-244.
- Kaur, S., A.K. Gupta, and N. Kaur. 2000.** Effect of GA₃, kinetin and indole acetic acid on carbohydrate metabolism in chickpea seedlings germinating under water stress. *Plant Growth Regul.* 30: 61-70.
- Llanes, A., A. Andrade, O. Masciarelli, S. Alemano, and V. Luna. 2016.** Drought and salinity alter endogenous hormonal profiles at the seed germination phase. *Seed Sci. Res.* 26: 1-13.
- Michel, B.E., and M.R Kaufmann. 1973.** The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiol.* 51: 914-916.
- Nozarpour, E., R. Tavakkol Afshari, E. Soltani., and N. Majnoun Hosseini. 2017.** Determination of cardinal temperatures of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) seeds in response to temperatures and water potentials. *Field Crop Sci.* 47: 341-351. (In Persian, with English Abstract)
- Ordenez-Salanueva, C.A., C.E. Seal, H.W. Pritchard, A. Orozco-Segovia, M. Canales-Martínez, and C.M. Flores-Ortiz, 2015.** Cardinal temperatures and thermal time in *Polaskia Backeb* (Cactaceae) species: effect of projected soil temperature increase and nurse interaction on germination timing. *J. Arid Environ.* 115: 73-80.
- Ouda, S.A., and A.E.H. Zohry, 2018.** Cropping Pattern to Face Climate Change Stress. In *Cropping Pattern Modification to Overcome Abiotic Stresses*. Springer, Cham. 89-102.
- Parmoon, G., S.A. Moosavi, H. Akbari., and A. Ebadi, 2015.** Quantifying cardinal temperatures and thermal time required for germination of *Silybum marianum* seed. *Crop J.* 3: 145-51.
- Patane, C., A. Saita, A. Tubeileh, S.L. Cosentino., and V. Cavallaro, 2016.** Modeling seed germination of unprimed and primed seeds of sweet sorghum under PEG-induced water stress through the hydrotime analysis. *Acta physiol. Plant.* 38: 115.
- Radić, V., M. Vujaković, and A. Marjanović-Jeromela, 2007.** Influence of drought on seedling development in different corn genotypes (*Zea mays* L.). *J. Agric. Sci.* 52: 131-136.
- Sadeghi, H., and Z. Robati, 2015.** Response of *Cichorium intybus* L. to eight seed priming methods under osmotic stress conditions. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 4: 443-448.
- Savvides, A., S. Ali, M. Tester, and V. Fotopoulos, 2016.** Chemical priming of plants against multiple abiotic stresses: mission possible? *Trend. Plant Sci.* 21: 329-340.
- Shi, Y., Y. Zhang, H. Yao, J. Wu, H. Sun, and H. Gong, 2014.** Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress. *Plant Physiol. Biochem.* 78: 27-36.
- Soltani A., and T.R. Sinclair. 2012.** Modeling physiology of crop development, growth and yield. CABI, Cambridge, UK.
- Szalai, G., M. Pál, T. Árendás, and T. Janda. 2016.** Priming seed with salicylic acid increases grain yield and modifies polyamine levels in maize. *Cereal Res. Commun.* 44: 537-548.
- Tesfaye, K., P.H. Zaidi, S. Gbegbelegbe, C. Boeber, F. Getaneh, K. Seetharam, O. Erenstein, and C. Stirling, 2017.** Climate change impacts and potential benefits of heat-tolerant maize in South Asia. *Theor. Appl. Climatol.* 130: 959-70.

- Tigabu, M., and P.C. Oden, 2001.** Effect of scarification, gibberellic acid and temperature on seed germination of two multipurpose Albizia species from Ethiopia. *Seed Sci. Technol.* 29: 11-20.
- Tsegay, B.A. and M. Andargie, 2018.** Seed Priming with Gibberellic Acid (GA₃) Alleviates salinity induced inhibition of germination and seedling growth of *Zea mays* L., *Pisum sativum* Var. abyssinicum A. Braun and *Lathyrus sativus* L. *J. Crop Sci. Biotechnol.* 21: 261-267.
- Wang, N., E. Wang, J. Wang, , J. Zhang, B. Zheng, Y. Huang., and M. Tan, 2018.** Modelling maize phenology, biomass growth and yield under contrasting temperature conditions. *Agric. Forest Meteorol.* 250: 319-329.
- Wei, L.X., B.S. Lv, M.M. Wang, H.Y. Ma, H.Y. Yang, X.L. Liu, C.J. Jiang, and Z.W. Liang, 2015.** Priming effect of abscisic acid on alkaline stress tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Plant Physiol. Biochem.* 90: 50-57.
- Yasari, E, M. Miri, S. Atashi., and M. Jamali, 2019.** Application of hydrothermal time model to determine the cardinal temperatures for seed germination in crops (A case study; velvetleaf (*Abutilon theophrasti* med.)). *Seed Sci. Technol.* 7: 85-94. (In Persian, with English Abstract)
- Zhang, J., F. Jiang, P. Yang, J. Li, G. Yan., and L. Hu, 2015.** Responses of canola (*Brassica napus* L.) cultivars under contrasting temperature regimes during early seedling growth stage as revealed by multiple physiological criteria. *Acta Physiol. Plant.* 37: 7.
- Zhang, P., J. Zhang., and M. Chen, 2017.** Economic impacts of climate change on agriculture: The importance of additional climatic variables other than temperature and precipitation. *J. Environ. Econ. Manag.* 83:8-31.
- Zheng, M., Y. Tao, S. Hussain, Q. Jiang, S. Peng, J. Huang, K. Cui, and L. Nie, 2016.** Seed priming in dry direct-seeded rice: consequences for emergence, seedling growth and associated metabolic events under drought stress. *J. Plant Growth Regul.* 78: 167-178.

