

کمی سازی پاسخ جوانه زنی بذر گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) به پتانسیل اسمزی و پرایمینگ: مدل زمان-رطوبتی با توزیع نرمال، ویبول و گامبل

سید علی طباطبایی^۱، امید انصاری^{۲*}

۱. دانشیار، بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

۲. دانشجوی دکتری علوم و تکنولوژی بذر دانشگاه گرگان

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۸/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۲

چکیده

پتانسیل آب یکی از عوامل کنترل کننده اولیه جوانه زنی است. با استفاده از مدل زمان-رطوبتی می توان پاسخ جوانه زنی بذر به پتانسیل آب را کمی سازی کرد. در این پژوهش با استفاده از مدل زمان-رطوبتی بر پایه توزیع نرمال، گامبل و ویبول پاسخ جوانه زنی بذر گلرنگ به سطوح مختلف پتانسیل آب و تیمار پرایمینگ مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل سطوح مختلف پتانسیل اسمزی ایجاد شده با پلی اتیلن گلیکول (۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶- و ۰/۸- مگاپاسکال) و پرایمینگ (با استفاده از جیبرلیک اسید ۵۰ پی پی ام به مدت ۱۵ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد و بدون پرایمینگ) بود. پاسخ جوانه زنی تجمعی بذرها به سطوح مختلف پتانسیل آب با استفاده از مدل سیگموئیدی ۳ پارامتره کمی سازی شد، سپس جهت محاسبه ضرایب زمان-رطوبتی برای هر تیمار بذری از مدل زمان-رطوبتی با توزیع نرمال، گامبل و ویبول استفاده شد. نتایج نشان داد با افزایش پتانسیل آب، درصد و سرعت جوانه زنی کاهش یافت اما پرایمینگ درصد و سرعت جوانه زنی را افزایش داد. ضرایب زمان-رطوبتی برآورد شده توسط مدل با توزیع نرمال (AICc) برای بذر بدون پرایم و پرایم به ترتیب ۲۴۰/۷۶- و ۲۴۱/۵۰- و ویبول (AICc) برای بذر بدون پرایم و پرایم به ترتیب ۲۳۲/۳۴- و ۲۴۰/۵۳- در مقایسه با توزیع گامبل (AICc) برای بذر بدون پرایم و پرایم به ترتیب ۲۵۴/۱۰- و ۲۴۷/۴۰- از دقت بالاتری برخوردار بود. ضریب زمان-رطوبتی برآورد شده توسط مدل با توزیع نرمال، گامبل و ویبول برای بذر بدون پرایم به ترتیب ۱/۱۱، ۱/۰۱ و ۱/۱۱ مگاپاسکال در روز و برای بذر پرایم به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۹۱ و ۰/۹۴ مگاپاسکال در روز بود. پتانسیل پایه برآورد شده توسط مدل با توزیع نرمال، گامبل و ویبول برای بذر بدون پرایم به ترتیب ۰/۷۹، ۰/۹۳- و ۰/۸۶- مگاپاسکال و برای بذر پرایم شده ۰/۸۷، ۰/۹۹- و ۰/۹۳- مگاپاسکال بود، پارامتر λ برآورد شده توسط مدل ویبول برای بذر بدون پرایم و پرایم شده به ترتیب برابر ۱/۶۵ و ۱/۴۵ بود که نشان دهنده این است که توزیع پتانسیل پایه آب برای جمعیت چوله به راست بود. استفاده از مدل زمان-رطوبتی جهت کمی سازی پاسخ جوانه زنی بذر گلرنگ به سطوح مختلف پتانسیل آب و پرایمینگ با استفاده از مدل با توزیع نرمال و ویبول دارای نتایج قابل قبولی بود؛ اما با توجه به انعطاف پذیری توزیع ویبول، این مدل پیش بینی مناسب تری از جوانه زنی دارد.

واژه های کلیدی: تنش اسمزی، درصد جوانه زنی، سرعت جوانه زنی، مدل زمان-رطوبتی.

مقدمه

جوانه زنی فرآیندی فیزیولوژیکی است که از جذب آب توسط بذر آغاز شده و با خروج ریشه چه از پوشش بذر کامل می شود، بنابراین زمان جوانه زنی حداقل بین ورود آب به داخل بذر تا خروج ریشه چه از پوشش بذر می باشند

جوانه زنی بذر یک فرآیند زیستی پیچیده بوده که تحت تأثیر عوامل زیست محیطی و ژنتیکی گوناگونی قرار می گیرد (Shafii and Price, 2001) و به عنوان یکی از حیاتی ترین دوره ها در چرخه زندگی گیاهان در نظر گرفته می شود.

نرمال جهت کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی بذرها به شرایط تنش رطوبتی استفاده کرده‌اند (Windauer et al., 2007; Schellenberg et al. 2013; Huarte, 2006; Alimagham and Ghaderi-Far, 2014)؛ اما به‌تازگی از توزیع‌های دیگری شبیه ویبول، گامبل، لوگ نرمال، لجستیک، لوگ-لجستیک، نرمال معکوس و گاما در مدل زمان-رطوبتی-دمایی استفاده (Wat et al., 2010) و بیان شده است که توزیع نرمال مناسب‌ترین تابع در مدل‌های زمان-رطوبتی نبوده و سایر توابع ممکن است پیش‌بینی‌های دقیق‌تری نسبت به توزیع نرمال داشته باشند (Mesgaran et al., 2013). بلومبرگ و همکاران (Bloomberg et al., 2009) با استفاده از مدل‌های با توزیع نرمال و ویبول پاسخ جوانه‌زنی بذر *Pinus radiata* را به پتانسیل و دما کمی سازی نمودند و بیان داشتند که مدل با توزیع ویبول از دقت بالاتری برخوردار بود و همچنین این مدل پیش‌بینی مناسب‌تری از توزیع پتانسیل پایه برای جمعیت داشت. درخشان و همکاران (Derakhshan et al., 2014) در مطالعه‌ای بر روی بذر علف‌های هرز فالاریس (*Phalaris minor*)، تاج‌خروس ریشه‌قرمز (*Amaranthus retroflexus*) و تاج‌خروس خوابیده (*A. blitoides*) بیان داشتند، با توجه به انعطاف‌پذیری توزیع ویبول، این مدل امکان پیش‌بینی دقیق جوانه‌زنی و نیز تعیین توزیع پتانسیل آب پایه را فراهم می‌سازد و بیان داشتند که مدل ویبول در مجموع برای پیش‌بینی جوانه‌زنی این بذرها در مقایسه با مدل با توزیع نرمال مناسب‌تر است.

بنابراین این پژوهش به‌منظور مقایسه مدل‌های مختلف زمان-رطوبتی جهت پیش‌بینی و توصیف جوانه‌زنی بذر پرایم شده و پرایم نشده گلرنگ تحت شرایط مختلف پتانسیل اسمزی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۳۹۳ در آزمایشگاه مرکز تحقیقات یزد بر روی بذر گلرنگ رقم صفه به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل سطوح مختلف پتانسیل اسمزی ایجادشده با پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ با پتانسیل‌های ۰، -۰/۲، -۰/۴، -۰/۶ و -۰/۸ - مگاپاسکال (Michel and Kaufmann, 1973) و پرایمینگ (با استفاده از جیبرلیک اسید ۵۰ پی‌پی‌ام به مدت ۱۵ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در شرایط تاریکی

(Bradford, 2002). از آنجاکه زمان جوانه‌زنی عامل مهمی در علوم زراعی محسوب می‌شود لذا دانستن زمان جوانه‌زنی و سبز شدن گیاهچه در مزرعه بسیار مفید خواهد بود. توانایی جوانه‌زنی بذرها تحت شرایط مطلوب رطوبتی، شانس استقرار بیشتر گیاه و تراکم بالاتر گیاه را در پی دارد که در نتیجه باعث افزایش عملکرد گیاه می‌شود (Balbaki et al., 1999). به‌طورمعمول سرعت جوانه‌زنی به‌صورت خطی با قابلیت دسترسی به آب افزایش (Guerke et al., 2004) و با کاهش پتانسیل آب کاهش می‌یابد (Grundy et al., 2000, Ansari et al., 2012, Ahmed et al., 2015). نشان دادند که جوانه‌زنی بذر *Murdannia nudiflora* به‌شدت تحت تأثیر پتانسیل اسمزی قرار گرفته و با منفی‌تر شدن پتانسیل اسمزی درصد جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت.

از جمله تیمارهای افزایش‌دهنده قدرت بذر، پرایمینگ بذر است، این روش بسته به نوع تیمار استفاده‌شده برای پیش‌تیمار کردن بذر به انواع مختلفی از جمله هیدروپرایمینگ، هورمون‌پرایمینگ، اسموپرایمینگ، هالوپرایمینگ، ترموپرایمینگ و بیوپرایمینگ تقسیم می‌شود (Ashraf and Foolad, 2005). به‌طورکلی، پرایمینگ سبب افزایش سرعت و درصد جوانه‌زنی، بنیه بذر و سایر شاخص‌های جوانه‌زنی در بسیاری از گیاهان می‌شود (Ansari et al., 2012; Patade et al., 2011).

پیش‌بینی جوانه‌زنی و سبز شدن می‌تواند راهبرد مناسبی برای مدیریت فراهم سازد (Meyer et al., 2000; Masin et al., 2005; Schutt et al., 2008). تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که جوانه‌زنی، سبز شدن گیاهچه و استقرار گونه‌های گیاهی مختلف می‌توانند با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی پیش‌بینی شوند (Colbach et al., 2005; Ansari et al., 2016). محققین با استفاده از دو روش مکانیستیک و تجربی جوانه‌زنی گیاهان مختلف را پیش‌بینی می‌کنند. دانستن و پیشگویی الگوهای جوانه‌زنی در برنامه‌های مدیریتی از قبیل تاریخ مناسب کشت، مبارزه با علف‌های هرز و غیره بسیار سودمند است (Bradford, 2002)؛ بنابراین انتخاب مدل مناسب برای کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی نسبت به دما و رطوبت دارای اهمیت است. مدل زمان-رطوبتی، جوانه‌زنی بذر را در پاسخ به پتانسیل آب توصیف می‌کند (Ansari et al., 2016). بسیاری از محققین از مدل زمان-رطوبتی بر پایه توزیع

مدل زمان-رطوبتی بر پایه توزیع نرمال، جوانه‌زنی بذر را در پاسخ به پتانسیل آب با استفاده از مدل زیر توصیف می‌کند:

$$\theta_H = (\psi - \psi_{b(g)}) \times t_g \quad [۲]$$

که در این معادله θ_H ثابت زمان-رطوبتی برحسب مگاپاسکال ساعت، ψ پتانسیل آب برحسب مگاپاسکال، $\psi_{b(g)}$ پتانسیل آب پایه برای صدک g جوانه‌زنی برحسب مگاپاسکال و t_g زمان جوانه‌زنی g درصد از بذرها برحسب ساعت را نشان می‌دهند.

در این مدل فرض بر این است که ψ_b در یک جمعیت بذری متفاوت بوده و از یک توزیع نرمال با میانگین $\psi_{b(50)}$ انحراف معیار σ_{ψ_b} و ضریب θ_H پیروی می‌کند (Bradford, 1990). با توجه به فرضیات ذکرشده منحنی جوانه‌زنی در مقابل زمان به‌صورت معادله زیر استفاده شد:

$$\text{probit}(g) = \left(\frac{\left(\psi - \left(\frac{\theta_H}{t_g} \right) - \psi_{b(50)} \right)}{\sigma_{\psi_b}} \right) \quad [۳]$$

علاوه بر توزیع نرمال، از توزیع‌های ویبول و گامبل نیز با هدف مقایسه کارایی این توابع در توصیف تنوع نسبی $\psi_{b(50)}$ استفاده شد. در توزیع ویبول توزیع تجمعی معکوس^۱ برای پیش‌بینی $\psi_{b(g)}$ و تابع توزیع تجمعی^۲ برای پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی (g) به شرح رابطه ۴ و ۵ است (Mesgaran et al., 2013).

$$\psi_{b(g)} = \mu + \sigma \cdot [-\ln(1 - g)]^{\frac{1}{\lambda}} \quad [۴]$$

$$g = 1 - \left[\exp \left(- \left(\frac{\left(\psi - \left(\frac{\theta_H}{t_g} \right) - \mu \right)^\lambda}{\sigma} \right) \right) \right] \quad [۵]$$

که μ ، σ و g به ترتیب پارامترهای مکان، مقیاس و کسر جوانه‌زنی می‌باشند. λ پارامتر شکل است که چولگی و کشیدگی توزیع را تعیین می‌کند.

توزیع گامبل را می‌توان به شرح رابطه ۶ و ۷ در مدل زمان-رطوبتی به کار برد (Mesgaran et al., 2013):

$$\Psi_{b(g)} = \mu - \sigma \cdot \left[\ln \left(\ln \left(\frac{1}{g} \right) \right) \right] \quad [۶]$$

و بذر بدون پرایم) بود. بعد از اعمال تیمار پرایمینگ بذرها شستشوی سطحی شده و برای مدت‌زمان ۲۴ ساعت در دمای پرایمینگ قرار گرفتند تا به رطوبت اولیه خود (۸/۵ درصد) برسند. پس از آماده‌سازی محلول‌های مختلف، جهت اعمال سطوح مختلف پتانسیل اسمزی ابتدا محلول‌ها جهت هم‌دم شدن با دماهای مختلف به مدت ۲۴ ساعت در دمای تست جوانه‌زنی (۲۵ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفت و سپس تیمارهای پتانسیل اسمزی در ۳ تکرار ۲۵ بذری اعمال شد. شمارش بذرهای جوانه‌زده با فاصله زمانی ۲۴ ساعت یک‌بار انجام و تعداد بذرهای جوانه‌زده ثبت شد. شمارش و ثبت بذرهای جوانه‌زده به مدت ۱۴ روز ادامه یافت. معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه به طول ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

جهت کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی بذرها به پتانسیل‌های مختلف و نشان دادن روند تجمعی جوانه‌زنی، مدل لجستیک ۳ پارامتره به جوانه‌زنی تجمعی به‌صورت رابطه ۱ برازش داده شد.

$$Y = G_{\max} / (1 + \exp(a * (t - b))) \quad [۱]$$

که در این رابطه Y درصد جوانه‌زنی تجمعی در زمان t ، G_{\max} حداکثر درصد جوانه‌زنی، b زمان لازم برای ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی و a شیب معادله است.

جهت برآورد ضرایب زمان-رطوبتی از توزیع‌های نرمال، گامبل و ویبول استفاده شد. برای استفاده از این معادله‌ها برای هر تیمار رطوبتی، نسبت تجمعی جوانه‌زنی (g) در هر دفعه شمارش (t_g) از روی نتایج حاصل از شمارش روزانه بذرهای جوانه‌زده به دست آمد. با استفاده از معادله ۳، ۵ و ۷ و برنامه غیرخطی (proc nlin) در نرم‌افزار SAS، ضرایب زمان-رطوبتی برای هر تیمار بذری تخمین زده شد. درنهایت با استفاده از ضرایب به‌دست‌آمده نمودار زنگوله‌ای شکل پراکنش مقادیر پتانسیل پایه در جمعیت برای هر تیمار بذری با استفاده از معادله توزیع نرمال، ویبول و گامبل به‌صورت جداگانه رسم شد. سپس با رسم نمودار یک‌به‌یک برای مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده جوانه‌زنی حاصل از مدل زمان-رطوبتی، مدل‌ها از لحاظ پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی مورد ارزیابی قرار گرفتند (Alimaghani and Ghaderi-Far, 2014).

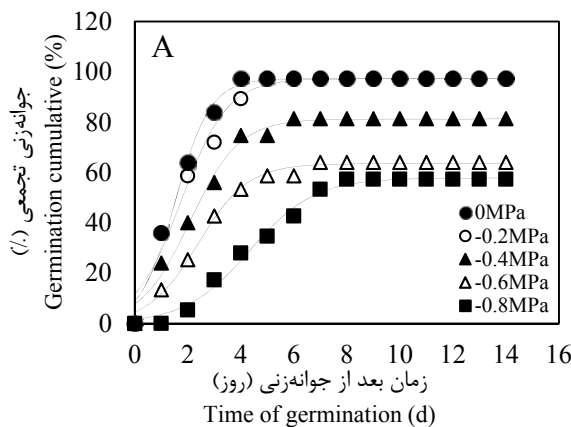
¹ Inverse cumulative distribution

² Cumulative distribution function

مدل در مقایسه مدل‌ها، مدلی است که کمترین میزان AICc محاسبه شده را داشته باشد.

نتایج و بحث

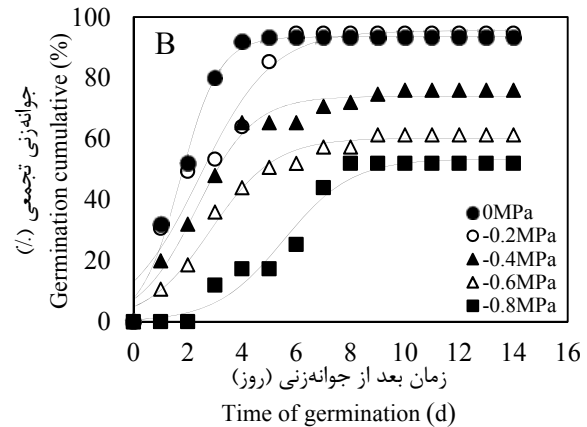
جهت بررسی روند تجمعی جوانه‌زنی بذر پرایم شده و بدون پرایم گلرنگ در سطوح مختلف پتانسیل اسمزی از مدل سیگموئیدی ۳ پارامتره استفاده شد (شکل ۱). ضرایب برآورد شده توسط مدل در جدول ۱ قابل مشاهده است. نتایج نشان داد که در شرایط بدون پرایم و پرایم بالاترین درصد جوانه‌زنی مربوط به شرایط بدون تنش و تنش ۰/۲- مگاپاسکال بود. با افزایش شدت تنش پتانسیل اسمزی زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی افزایش یافت به عبارتی دیگر سرعت جوانه‌زنی کاهش یافت.



$$g = \exp \left[- \exp \left(- \left(\frac{\Psi - \left(\frac{\theta_H}{t_g} \right) - \mu}{\sigma} \right) \right) \right] \quad [7]$$

چنانچه $\Psi_{b(g)}$ از توزیع گامبل پیروی کند، در $\Psi_{b(g)} = \mu$ ، کسر بذره‌های جوانه‌زده تقریباً معادل ۰/۳۶۶ خواهد بود (در توزیع نرمال، $\Psi_{b(g)} = \mu$ برابر با میانه و معادل ۰/۵ است) (Mesgaran et al., 2013).

تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و با رویه PROCNLMIXED انجام شد. برای انتخاب بهترین تابع توزیع از ضریب تبیین نمودارهای یک‌به‌یک و همچنین مدل و شاخص آکائیک تصحیح شده (AICc) استفاده شد. بهترین



شکل ۱. برازش مدل سیگموئیدی ۳ پارامتره به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی بذر گلرنگ در مقابل زمان (روز) برای بذر بدون پرایم (A) و پرایم شده (B) در پتانسیل‌های مختلف آب.

Fig. 1. Fitting 3 parameters sigmoidal model to cumulative germination percentage of *Carthamus tinctorius* for controlled and primed seeds in different osmotic potentials.

اصلی‌ترین عوامل محیطی است که درصد و سرعت جوانه‌زنی را کنترل می‌کند که توسط بسیاری از محققین نیز تأیید شده است (Cardoso et al., 2013; Bradford, 2002; Ansari et al., 2012).

مدل‌های مختلف سیگموئیدی جهت کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی تجمعی به عوامل محیطی و محاسبه سرعت جوانه‌زنی توسط سایر محققین نیز استفاده شده است (Dumur et al., 1990; Derakhshan et al., 2013; Ansari et al., 2016). به‌طور کلی رطوبت یکی از

جدول ۱. ضرایب به‌دست‌آمده از مدل سیگموئیدی ۳ پارامتره برازش داده‌شده به درصد جوانه‌زنی تجمعی بذر گلرنگ در مقابل زمان (روز) برای بذر بدون پرایم و پرایم شده در پتانسیل‌های مختلف آب.

Table 1. Estimated parameters by fitting sigmoidal 3 parameters model to cumulative germination percentage of *Carthamus tinctorius* for controlled and primed seeds in different osmotic potentials. Numbers in parentheses represent standard error.

تیمار Treatment	پتانسیل اسمزی Osmotic potential (Mpa)	پارامترها Parameters			
		a (G _{max})	b (d)	X ₅₀ (d)	R ²
پرایمینگ (Priming)	0	97.32(1.03)	0.66(0.06)	1.53(0.07)	0.99
	-0.2	97.30(1.46)	0.87(0.10)	1.75(0.11)	0.99
	-0.4	81.27(1.03)	0.92(0.09)	2.08(0.09)	0.99
	-0.6	63.54(0.63)	0.94(0.07)	2.39(0.07)	0.99
	-0.8	57.84(0.94)	1.22(0.10)	4.33(0.12)	0.99
بدون پرایم (Control)	0	92.58(1.07)	0.71(0.08)	1.75(0.07)	0.99
	-0.2	93.52(1.29)	1.33(0.19)	2.44(0.20)	0.97
	-0.4	74.02(1.29)	1.06(0.12)	2.11(0.11)	0.98
	-0.6	59.24(0.93)	1.18(0.11)	2.85(0.12)	0.99
	-0.8	52.13(1.49)	1.12(0.12)	5.43(0.22)	0.98

شرایط مختلف استفاده نموده‌اند (Dahal and Bradford, 1990; Windauer et al., 2007; Bradford and Still, 2004). با توجه به کمتر بودن ثابت زمان-رطوبتی برای بذر پرایم شده می‌توان بیان داشت که قدرت بذر پرایم شده نسبت به بذر بدون پرایم بیشتر بود.

پتانسیل پایه برآورد شده (μ) توسط مدل با توزیع نرمال برای بذر بدون پرایم -0.79 - مگاپاسکال و برای بذر پرایم شده -0.87 - بود، ضریب انحراف توزیع پتانسیل پایه (σ) در جمعیت توسط مدل توزیع نرمال برای بذر بدون پرایم 0.30 و برای بذر پرایم شده 0.25 بود.

پارامتر μ در توزیع ویبول نشان‌دهنده پتانسیل اسمزی است که در آن پتانسیل جوانه‌زنی به صفر خواهد رسید. دقت این پارامتر برآورد شده توسط مدل ویبول در مقایسه با مدل نرمال و گامبل بیشتر است و برآورد واقع‌بینانه‌تری از این پارامتر دارد. گزارش شده است که پارامتر μ در توزیع نرمال برابر با میانه (پتانسیل آب پایه)، میانگین و مد است اما $\Psi_{b(50)}$ (میانه پتانسیل پایه آب) در توزیع ویبول برابر با $\lambda \sigma (\ln(2))^{1/2} + \mu$ و برای توزیع گامبل برابر با $\mu - \sigma \ln(\ln(2))$ است. میانه برای توزیع گامبل و ویبول نشان‌دهنده حداکثر فراوانی نسبی جمعیت است به‌عبارت‌دیگر دیگر نشان‌دهنده پتانسیل پایه آب است (Bloomberg et al., 2009; Derakhshan et al.,)

پاسخ جوانه‌زنی بذر گلرنگ با استفاده از مدل‌های مختلف زمان-رطوبتی اعم از مدل زمان-رطوبتی بر پایه توزیع نرمال، ویبول و گامبل مورد ارزیابی قرار گرفت و پارامترهای مدل‌های ذکرشده با استفاده از برخی از شاخص‌های آماری با هم مقایسه شدند که نتایج در جدول ۲ قابل‌مشاهده است. نتایج نشان داد که استفاده از تیمار پرایمینگ سبب کاهش در ضریب زمان-رطوبتی شد، ضریب زمان-رطوبتی برآورد شده توسط مدل بر پایه توزیع نرمال، گامبل و ویبول برای بذر بدون پرایم به ترتیب $1/11$ ، $1/01$ و $1/11$ مگاپاسکال در روز و برای بذر پرایم شده به ترتیب 0.92 ، 0.91 و 0.94 مگاپاسکال در روز بود (جدول ۱). به‌طورکلی ضریب زمان-رطوبتی شاخصی از سرعت جوانه‌زنی در سطوح مختلف پتانسیل اسمزی است و هر چه این ضریب کمتر باشد نشان‌دهنده بیشتر بودن سرعت جوانه‌زنی است (Ansari et al., 2016; Cardoso and Bianconi, 2013; Alimaghani and Ghaderifar, 2014)؛ بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده توسط هر ۳ مدل، مشخص شد که تیمار پرایمینگ سبب کاهش در ضریب زمان-رطوبتی و در نتیجه افزایش سرعت جوانه‌زنی می‌شود. ضریب زمان-رطوبتی می‌تواند مهم‌ترین شاخص در تعیین قدرت بذر در شرایط تنش باشد به‌طوری‌که بسیاری از محققین از این ضریب برای تعیین قدرت بذر تحت

ویبول برای بذر بدون پرایم به ترتیب $1/81$ ، $-0/86$ و $0/81$ - مگاپاسکال و برای بذر پرایم شده به ترتیب $1/89$ ، $0/92$ و $-0/89$ مگاپاسکال بود. بین مدل‌های مختلف از لحاظ برآورد ضرایب به دست آمده برای ثابت زمان-رطوبتی، میانگین، میانه و مد اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. پتانسیل پایه ($\Psi_{b(50)}$) نشان‌دهنده سطحی از پتانسیل است که در پتانسیل‌های کمتر از آن میزان جوانه‌زنی به کمتر از ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی می‌رسد (Bradford, 2002). ضریب انحراف توزیع پتانسیل پایه در جمعیت نشان‌دهنده میزان یکنواختی جوانه‌زنی در جمعیت است (Bradford, and Still, 2004). هر چه مقدار عددی این ضریب کوچک‌تر باشد نشان‌دهنده یکنواختی بیشتر است (Alimagham and Ghaderi-Far, 2014; Ansari et al., 2016)؛ بنابراین استفاده از تیمار پرایمینگ سبب یکنواختی بیشتر در جوانه‌زنی شد. ویندور و همکاران (Windauer et al., 2007) اظهار داشتند که استفاده از تیمار پرایمینگ سبب یکنواختی بیشتر جوانه‌زنی می‌شود.

پارامتر λ برآورد شده توسط مدل ویبول برای بذر بدون پرایم و پرایم شده به ترتیب برابر $1/65$ و $1/45$ بود. گزارش شده است که وقتی پارامتر شکل (λ) برآورد شده توسط مدل ویبول کمتر از $2/6$ باشد توزیع ویبول چوله به راست بوده و اگر بیشتر از $3/7$ باشد چوله به چپ است که با توجه به پارامتر شکل به دست آمده برای بذر بدون پرایم و پرایم شده گلرنگ مشخص شد که توزیع ویبول تقریباً چوله به راست است، همچنین گزارش شده است که اگر پارامتر شکل بین $2/6$ تا $3/7$ باشد توزیع ویبول متقارن بوده و تقریباً شبیه به توزیع نرمال است (Mesgaran et al., 2013). میانگین، میانه و مد پیش‌بینی شده توسط مدل با توزیع نرمال یکسان بوده و برابر با پتانسیل آب پایه ($0/79$ - مگاپاسکال برای بذر بدون پرایم و بذر پرایم شده) بود. برای مدل گامبل و بذر بدون پرایم میانگین میانه و مد به ترتیب $1/32$ ، $-0/93$ و $-0/77$ و برای بذر پرایم شده به ترتیب $1/77$ ، $-0/99$ و $-0/85$ مگاپاسکال بود. میانگین، میانه و مد برآورد شده توسط مدل

جدول ۲. ضرایب برآورد شده مدل زمان-رطوبتی بذر گلرنگ. اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده SE است.

Table 2. Estimated parameters for hydro-time model of safflower seed. Numbers in parentheses represent standard error.

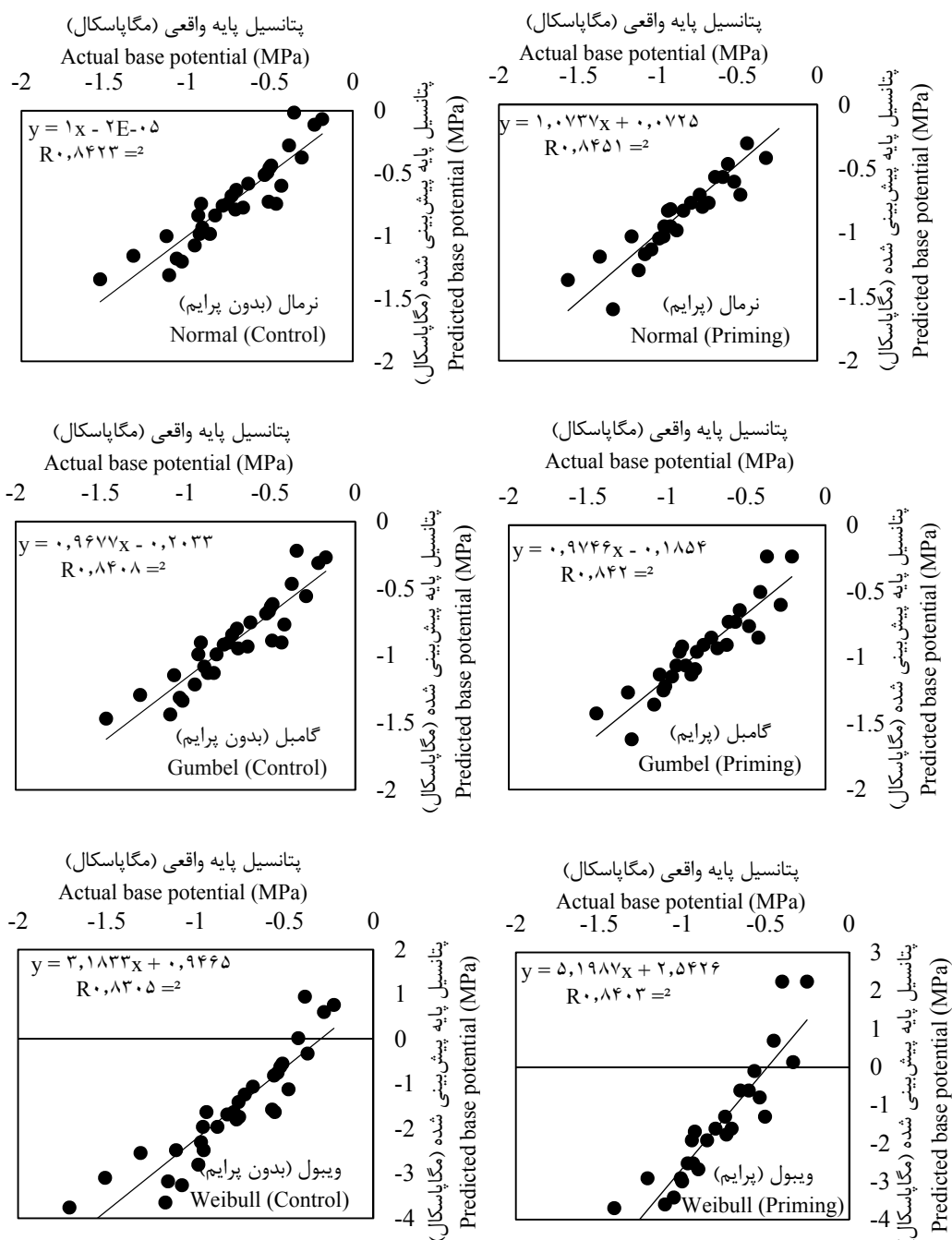
		ثابت زمان -						
Distribution	Treatment	رطوبتی θ_H	مکان Location (μ)	شکل Shape (λ)	مقیاس Scale (σ)	میانگین Mean	میانه Median	مد Mode
Normal	بدون پرایم (Control)	1.11(0.05)	-0.79(0.07)	-	0.30(0.02)	-0.79(0.12)	-0.79(0.12)	-0.79(0.12)
	پرایم (Priming)	0.92(0.05)	-0.87(0.02)	-	0.25(0.02)	-0.87(0.02)	-0.87(0.02)	-0.87(0.02)
Gumbel	بدون پرایم (Control)	1.01(0.04)	-0.93(0.11)	-	0.44(0.10)	-1.32(0.02)	-0.93(0.03)	-0.77(0.02)
	پرایم (Priming)	0.91(0.02)	-0.99(0.02)	-	0.39(0.02)	-1.77(0.02)	-0.99(0.02)	-0.85(0.02)
Weibull	بدون پرایم (Control)	1.11(0.33)	-1.71(0.13)	1.65(0.09)	1.99(0.21)	-1.81(0.03)	-0.86(0.05)	-0.81(0.12)
	پرایم (Priming)	0.94(0.11)	-1.95(0.04)	1.45(0.83)	2.25(0.12)	-1.89(0.12)	-0.92(0.08)	-0.89(0.31)

پتانسیل پایه از معادله $\Psi_{b(g)} = \Psi - \theta_H / tg$ استفاده شد و در نهایت مقادیر واقعی پتانسیل پایه در هر پتانسیل برای زمان‌های مختلف جوانه‌زنی برآورد شد. عالیمقام و قادری فر

برای ارزیابی مدل‌ها از نمودار یک‌به‌یک استفاده شد که برای به‌کارگیری این نمودار نیاز به مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده است. برای به دست آوردن مقادیر واقعی

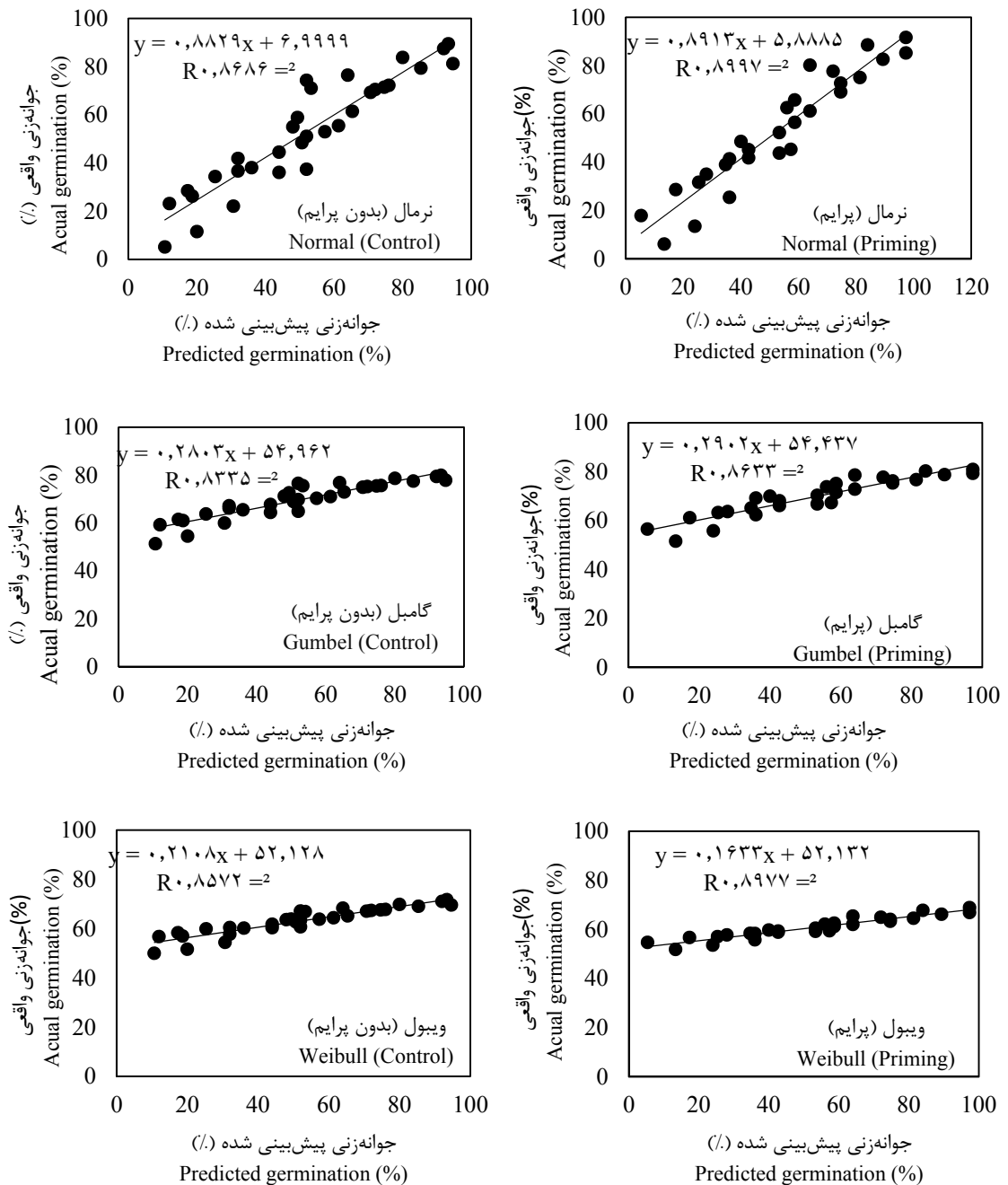
گامبل و ویبول برای بذر بدون پرایم و پرایم، نمودار یک‌به‌یک برای درصد جوانه‌زنی مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده و پتانسیل پایه واقعی و پیش‌بینی‌شده رسم شد (شکل‌های ۲ و ۳).

(Alimagham and Ghaderi-Far, 2014) از معادله فوق جهت محاسبه مقادیر واقعی و رسم نمودار یک و یک‌جهت ارزیابی مدل زمان-رطوبتی استفاده نمودند. در این پژوهش جهت ارزیابی و مقایسه مدل زمان-رطوبتی با توزیع نرمال،



شکل ۲. مقادیر پیش‌بینی‌شده درصد جوانه‌زنی از مدل زمان-رطوبتی در مقابل درصد جوانه‌زنی مشاهده‌شده بذر گلرنگ.

Fig. 2. Injective function of observed germination percentage values versus predicted values of safflower from hydro time model.

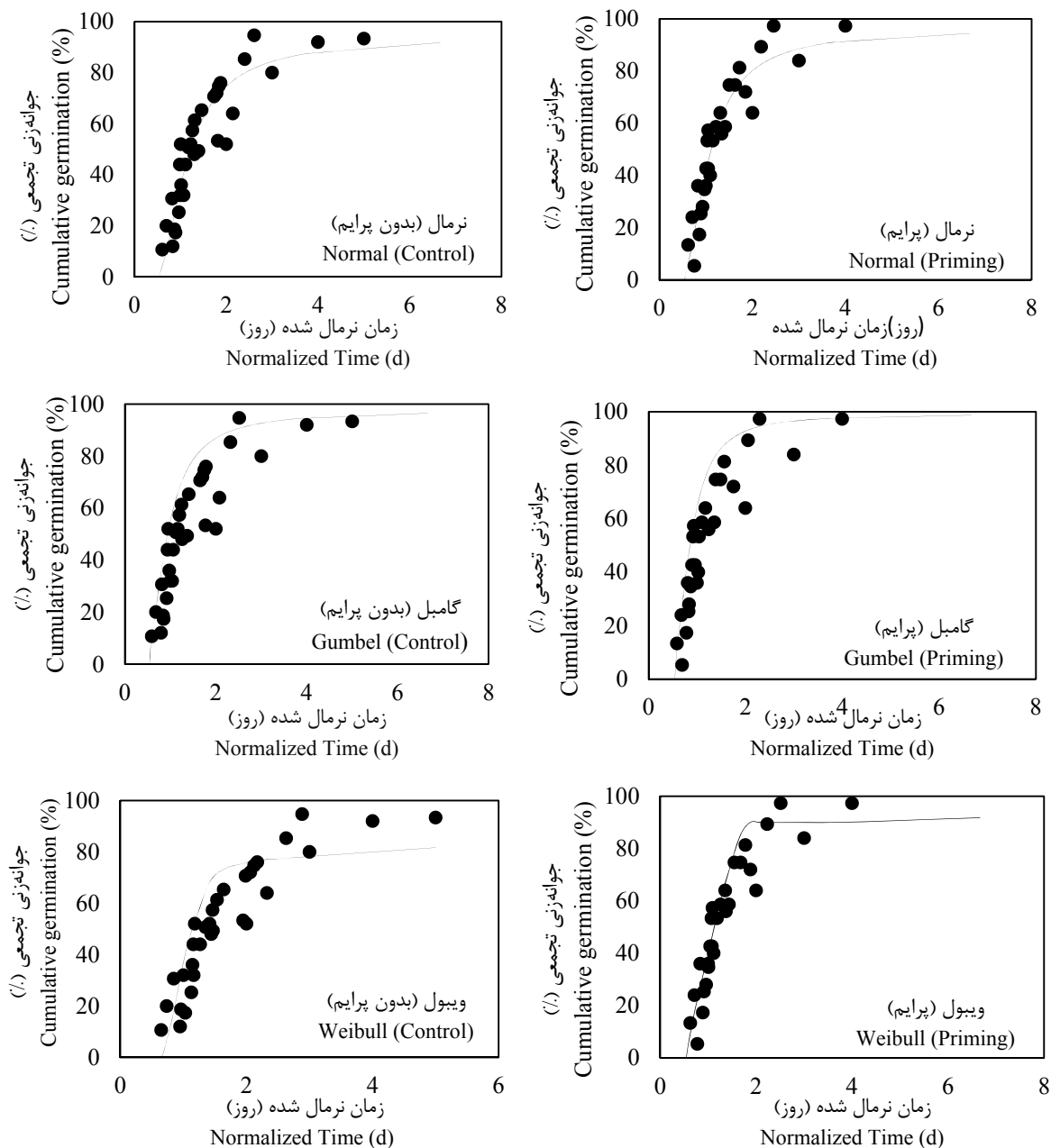


شکل ۳. مقادیر پتانسیل پایه پیش‌بینی‌شده توسط مدل زمان-رطوبتی در مقابل پتانسیل پایه واقعی بذر گلرنگ.

Fig. 3. Injective function of observed base water potential values against predicted values of safflower seed from hydro time model.

جوانه‌زنی در مقابل زمان می‌توان از مدل زمان-رطوبتی در پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی تجمعی گیاهان در سطوح مختلف پتانسیل اسمزی استفاده نمود (Ansari et al., 2016; Alimagham and Ghaderi-Far, 2014). نتایج به‌خوبی نشان داد که با بیشتر شدن پتانسیل پایه آب درصد جوانه‌زنی کاهش یافت (داده‌ها نشان داده نشد).

در شکل ۴ روند درصد جوانه‌زنی تجمعی برای پتانسیل‌های مختلف در برابر زمان نرمال شده قابل‌مشاهده است که در این حالت زمان جوانه‌زنی در سطوح مختلف پتانسیل اسمزی برای هر مدل و تیمار بذری مشابه جوانه‌زنی در آب مقطر (شاهد) نرمال شد. در این راستا گزارش شده است که با بررسی روند درصد تجمعی



شکل ۴. درصد جوانه‌زنی تجمعی در سطوح مختلف پتانسیل اسمزی (مگاپاسکال) در برابر زمان نرمال شده برای بذر گلرنگ.

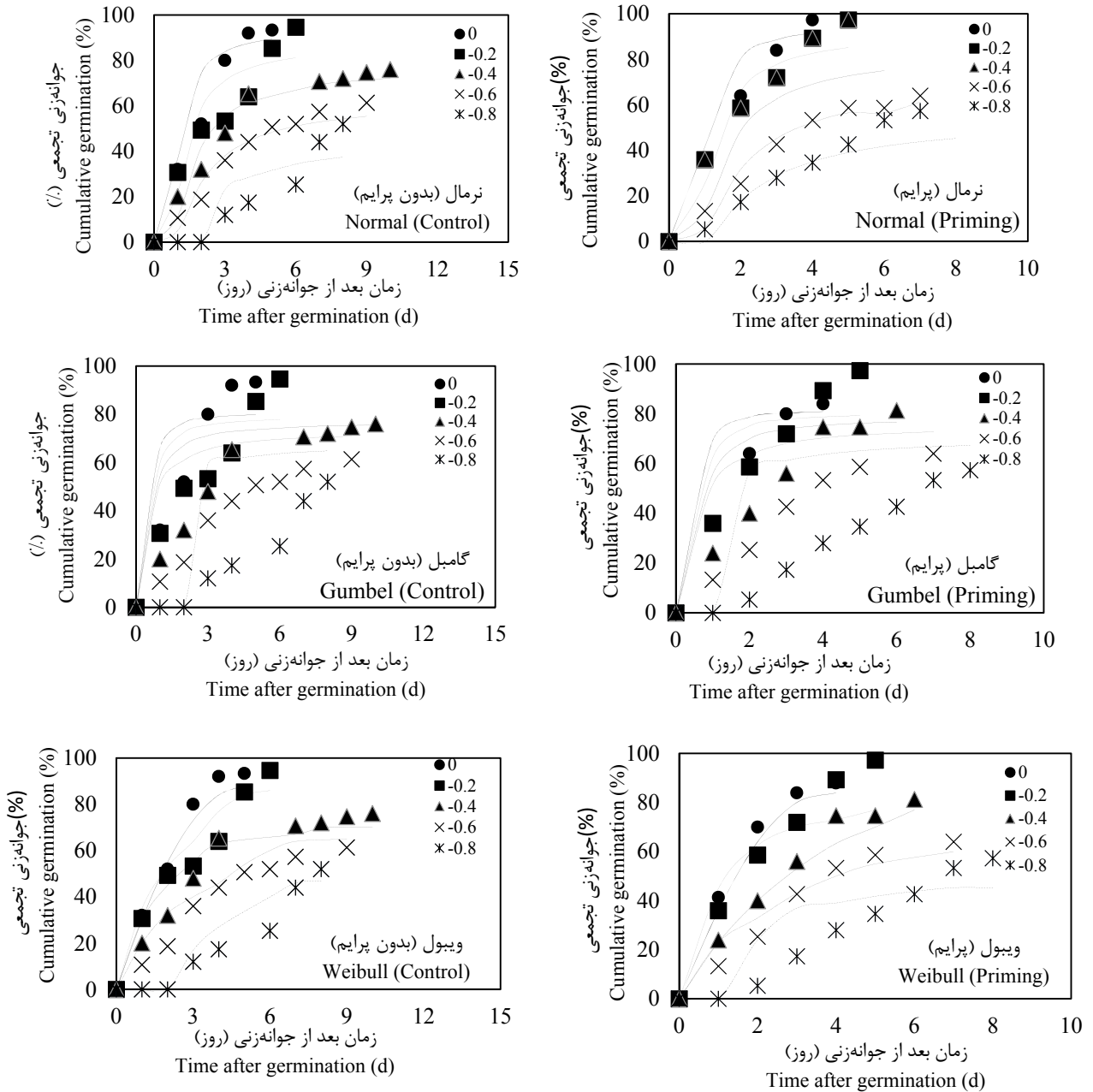
Fig. 4. Cumulative germination percentage at different osmotic potentials (Mpa) against normalized time for safflower seeds.

پایه برای بذر بدون پرایم و پرایم در شکل ۶ قابل مشاهده است. با توجه به شکل قابل درک است که برای مدل با توزیع نرمال و ویبول توزیع متقارن است ولی برای توزیع ویبول توزیع تقریباً نامتقارن بود و با توجه به توزیع فراوانی نسبی برای بذر بدون پرایم در پتانسیل $-1/71$ مگاپاسکال و برای بذر پرایم در پتانسیل $-1/95$ مگاپاسکال به صفر رسید. به‌طورکلی نتایج نشان داد که ضرایب مدل زمان-رطوبتی

در شکل ۵ برازش مدل‌های مختلف به درصد جوانه‌زنی تجمعی بذر گلرنگ در سطوح مختلف پتانسیل اسمزی برای مدل‌های مختلف و بذر بدون پرایم و پرایم قابل مشاهده است. با توجه به برازش مدل‌ها به داده‌های تجمعی به‌وضوح قابل مشاهده است که مدل زمان-رطوبتی با توزیع نرمال و ویبول در مقایسه با مدل گامبل پیش‌بینی مناسب‌تری دارد. نمودار توزیع نرمال، گامبل و ویبول برای مقادیر پتانسیل

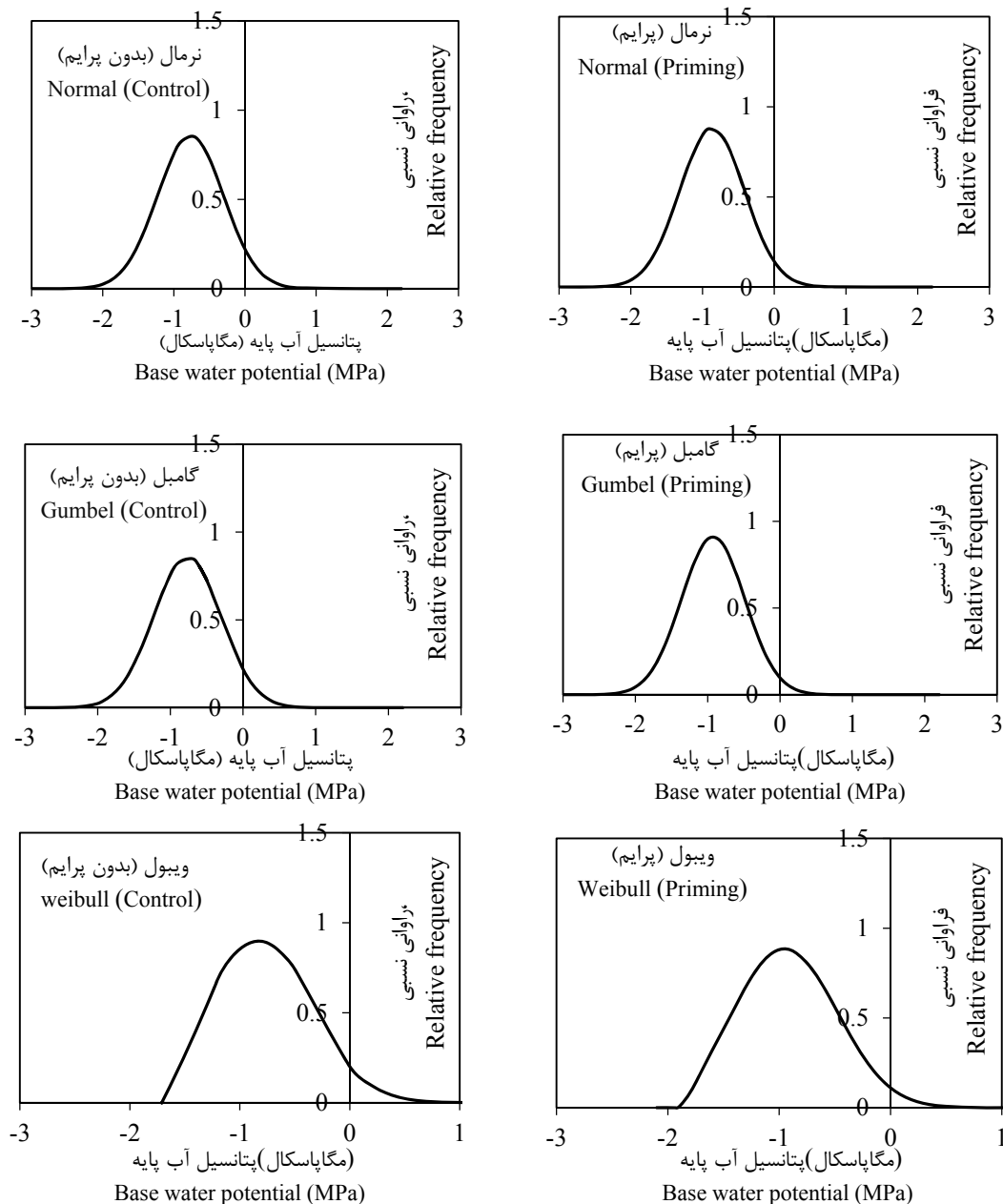
تحت تأثیر تیمار پرایمینگ قرار گرفت و در بذره‌های پرایم شده ثابت زمان-رطوبتی کمتر و پتانسیل پایه منفی‌تر بود که نشان‌دهنده مثبت بودن اثر پرایمینگ بر جوانه‌زنی تحت شرایط تنش پتانسیل اسمزی بود (Windauer et al., 2007).

چنین نتایجی نیز توسط سایر محققین گزارش شده است (Chenge and Bradford, 1999; Windauer et al., 2004).



شکل ۵. جوانه‌زنی تجمعی بذر گلرنگ در سطوح مختلف پتانسیل اسمزی در مقابل زمان بر مبنای مدل‌های نرمال، گامبل و ویبول.

Fig. 5. Cumulative germination of safflower seed at various potential levels against time based on normal, gumbel and weibull models.



شکل ۶. نمودار توزیع احتمال پتانسیل پایه آب (مگاپاسکال) برای جمعیت بذر گلرنگ.

Fig. 6. Probability distribution of base water potential (MPa) for safflower seed population

ترتیب ۲۴۰/۷۶، ۲۵۴/۱۰، و ۲۳۲/۳۴ بود (جدول ۲). ضریب آکائیک تصحیح‌شده (AICc) برای مدل با توزیع نرمال، ویبول و گامبل برای بذرهای پرایم شده به ترتیب ۲۴۱/۵۰، ۲۴۷/۴۰، و ۲۴۰/۵۳ بود (جدول ۲). مقایسه ضریب تبیین مدل‌های مختلف نشان داد که R^2 مدل با توزیع ویبول در شرایط بدون پرایم و پرایم از سایر مدل‌ها بالاتر است (جدول ۳). در ادامه نتایج نشان داد که در

با استفاده از نمودارهای یک‌به‌یک مشخص شد که از لحاظ پیش‌بینی اختلاف زیادی بین مدل‌های مختلف وجود ندارد و ضریب تبیین مدل‌های مختلف تقریباً شبیه هم بودند؛ اما بین توزیع‌های مختلف به‌کاررفته از لحاظ دقت در برآورد پارامترها اختلاف وجود داشت، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده ضریب آکائیک تصحیح‌شده (AICc) برای مدل با توزیع نرمال، ویبول و گامبل برای بذرهای بدون پرایم به

جدول ۳). به‌طور کلی هرچه ضریب آکائیک تصحیح‌شده (AICc) و میزان RMSE کمتر و میزان R^2 بیشتر باشد نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل است.

شرایط بدون پرایم میزان RMSE برای مدل با توزیع نرمال، گامبل و ویبول به ترتیب ۰/۱۱۴، ۰/۱۲۱ و ۰/۱۱۳ و برای بذر بدون پرایم به ترتیب ۰/۱۱۱، ۰/۱۱۸ و ۰/۱۱۰ بود

جدول ۳. جذر میانگین مربعات (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) برای مدل‌های نرمال، گامبل و ویبول.

Table 3. RMSE and R^2 for normal, weibull and gumbel models.

توزیع Distribution	تیمار Treatment	RMSE	AICc	R^2
نرمال (Normal)	بدون پرایم (Control)	0.114	-240.76	0.88
	پرایم (Priming)	0.111	-241.50	0.89
گامبل (Gumbel)	بدون پرایم (Control)	0.121	-254.10	0.86
	پرایم (Priming)	0.118	-247.40	0.87
ویبول (Weibull)	بدون پرایم (Control)	0.113	-232.34	0.89
	پرایم (Priming)	0.110	-240.53	0.90

و وجود چولگی به راست و نامتقارن بودن داده‌ها و همچنین تعیین پارامتر μ به نظر می‌رسد مدل با توزیع ویبول مناسب‌تر باشد؛ اما باید در نظر گرفت که استفاده از مدل با توزیع ویبول پیچیده بوده و در برخی موارد به‌سختی قادر به ارائه خروجی است و ممکن است برای به دست آوردن خروجی مناسب محققین نیازمند زمان بیشتری برای برآورد مناسبی از مدل باشند ولی در توزیع نرمال چنین مشکلاتی وجود ندارد و در بیشتر موارد تنها بین دقت مدل‌ها از لحاظ برآورد پارامترها اختلاف وجود دارد؛ بنابراین می‌توان اظهار داشت که استفاده از هر مدل معایب و مزایای خود را دارا است بنابراین نمی‌توان با قطعیت در ارتباط با مناسب بودن مدلی صحبت نمود.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج نشان داد که استفاده از تیمار پرایمینگ بر ضرایب برآورد شده توسط مدل‌های زمان-رطوبتی تأثیرگذار بود به‌طوری‌که ثابت زمان-رطوبتی در بذرهای پرایم شده کمتر از بذرهای بدون پرایم بود که این موضوع نشان‌دهنده افزایش سرعت جوانه‌زنی در بذرهای پرایم شده است و همچنین نشان‌دهنده قدرت بیشتر بذرهای پرایم شده در مقایسه با بذرهای پرایم نشده بود. استفاده از تیمار پرایمینگ سبب منفی‌تر شدن پتانسیل پایه شد. مدل‌هایی با توزیع ویبول و نرمال نسبت به توزیع گامبل از دقت بالاتری برخوردار بود و در مجموع توزیع ویبول و نرمال تفاوت زیادی با هم نداشتند اما با توجه به پارامتر شکل λ

منابع

- Ahmed, S., Opena, J.L., Chauhan, B.S. 2015. Seed Germination Ecology of Doveweed (*Murdannia nudiflora*) and Its Implication for Management in Dry-Seeded Rice. Weed Science. 63, 491-501.
- Alimagham, S.M., Ghaderi-Far, F., 2014. Hydrotime model: Introduction and application of this model in seed researches. Environmental Stresses in Crop Sciences. 7(1), 41-52. [In Persian with English Summary].
- Ansari, O., Choghazardi, H.R., Sharif Zadeh, F., Nazarli, H., 2012. Seed reserve utilization and seedling growth of treated seeds of mountain rye (*Secale montanum*) as affected by drought stress. Cercetări Agronomice în Moldova. 2(150), 43-48.
- Ansari, O., Gherekhloo, J., Kamkar, B., Ghaderi-Far, F., 2016. Breaking seed

- dormancy and determining cardinal temperatures for *Malva sylvestris* using nonlinear regression. *Seed Science and Technology*. 44(3), 1-14.
- Ansari, O., Gherekhloo, J., Ghaderi-Far, F., Kamkar, B., 2016. Application of hydro time model for quantification of *Malva sylvestris* L. germination response to water potential. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 11(3), 341-352. [In Persian with English Summary].
- Ashraf, M., Foolad, M.R., 2005. Presowing seed treatment, a shot gun approach to improve germination, plant growth, and crop yield under saline and non-saline conditions. *Advances in Agronomy*. 88, 223-271.
- Balbaki, R.Z., Zurayk, R.A., Blek, M.M., Tahouk, S.N., 1999. Germination and seedling development of drought tolerant and susceptible wheat under moisture stress. *Seed Science and Technology*. 27, 291-302.
- Bloomberg M., Sedcole J.R., Mason E.G., Buchan, G., 2009. Hydrothermal time germination models for radiata pine (*Pinus radiata* D.Don). *Seed Science Research*. 19, 171-182.
- Bradford, K.J., 1990. A water relation analysis of seed germination rates. *Plant Physiology*. 94, 840-849.
- Bradford, K.J., 2002. Application of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science*. 50, 248-260.
- Bradford, K.J., Still, D.W., 2004. Application of hydrotime analysis in seed testing. *Seed Technology*. 26, 74-85.
- Cardoso, V.J.M., Bianconi, A., 2013. Hydrotime model can describe the response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds to temperature and reduced water potential. *Acta Scientiarum*. 35(2), 255-261.
- Cheng, Z., Bradford, K., 1999. Hydrothermal time analysis of tomato seed germination responses to priming treatments. *Journal of Experimental Botany*. 330, 89-99.
- Dahal, P., Bradford, K.J., 1990. Effects of priming and endosperm integrity on seed germination rates of tomato genotypes. II. Germination at reduced water potential. *Journal of Experimental Botany*. 41, 1441-1453.
- Derakhshan, A., Akbari, H., Gherekhloo, J., 2014. Hydrotime modeling of *Phalaris minor*, *Amaranthus retrofractus* and *A. Blitoides*. *Iranian Journal of Seed Science and Research*. 1(1): 93-97. [In Persian with English Summary].
- Derakhshan, A., Gherekhloo, J., Vidal, R.B., De Prado, R., 2013. Quantitative description of the germination of littleseed canarygrass (*Phalaris minor*) in response to temperature. *Weed Science*. 62, 250-257.
- Dumur, D., Pilbeam, C.J., Craighon, J., 1990. Use of the weibull function to calculate cardinal temperatures in fababean. *Journal of Experimental Botany*. 41, 1423-1430.
- Grundy, A.C., Phelps, K., Reader, R.J., Burston, S., 2000. Modelling the germination of *Stellaria media* using the concept of hydrothermal time. *New Phytology*. 148, 433-444.
- Guerke, W.R., Gutormson, T., Meyer, D., McDonald, M., Mesa, D., Robinson, J.C., TeKrony, D., 2004. Application of hydrotime analysis in seed testing. *Seed Technology*. 26 (1), 75- 85.
- Huarte, R., 2006. Hydrotime analysis of the effect of fluctuating temperatures on seed germination in several non-cultivated species. *Seed Science and Technology*. 34, 533-547.
- Masin, R., Zuin, M.C., Archer, D.W., Forcella, F., Zanin, G., 2005. Weed Turf: a predictive model to aid control of annual summer weeds in turf. *Weed Science*. 53, 193-201.
- Mesgaran, M.B., Mashhadi, H.R., Alizadeh, H., Hunt, J., Young, K.R., Cousens, R.D., 2013. Importance of distribution function selection for hydrothermal time models of seed germination. *Weed Research*. 53, 89-101.
- Meyer, S.E., Debaene-Gill, S.B., Allen, P.S., 2000. Using hydrothermal time concepts to model seed germination response to temperature, dormancy loss, and priming effects in *Elymus elymoides*. *Seed Science Research*. 10, 213-223.
- Michel, B.E., Kaufmann, M.R., 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*. 51, 914-916.
- Patade V. Y., Maya, K., Zakwan A. 2011. Seed priming mediated germination improvement

- and tolerance to subsequent exposure to cold and salt stress in capsicum. *Research Journal of Seed Science*, 4(3), 125-136.
- Schellenberg, M.P., Biliget, B., Wei, Y. Predicting seed germination of slender wheatgrass [*Elymus trachycaulus* (Link) Gould subsp. *trachycaulus*] using thermal and hydro time models. *Canadian Journal of Plant Science*. 93, 793-798.
- Schutte, B.J., Regnier, E.E., Harrison, S.K., Schmoll, J.T., Spokas, K., Forcella, F., 2008. A hydrothermal seedling emergence model for giant ragweed (*Ambrosia trifida*). *Weed Science*. 56, 555-560.
- Shafii, B., Price, W.J., 2001. Estimation of cardinal temperatures in germination data analysis. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*. 6, 356-366.
- Watt, M.S., Xu, V., Bloomberg, M., 2010. Development of a hydrothermal time seed germination model which uses the Weibull distribution to describe base water potential. *Ecology Model*. 221, 1267-1272.
- Windauer, L., Altuna, A., Benech-Arnold, R., 2007. Hydrotime analysis of *Lesquerella fendleri* seed germination responses to priming treatments. *Industrial Crops Products*. 25, 70-74.
- Windauer, L., Nieto, C., Benech-Arnold, R.L., 2004. Análisis de hidrotiempo en semillas de *Lesquerella fendleri* sometidas a diferentes tratamientos de "priming". In: Golberg, A.D., Taleisnik, E. (Eds.), *Actas XXV Reunión Argentina de Fisiología Vegetal*, p. 183.