

## تعیین دماهای مهم گیاه دارویی بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) در واکنش به دما و پتانسیل‌های مختلف آب

الهام نوذریپور<sup>۱</sup>، رضا توکل افشاری<sup>۲\*</sup>، الیاس سلطانی<sup>۳</sup> و ناصر مجنون حسینی<sup>۴</sup>

۱ و ۴. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد علوم و تکنولوژی بذر و استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس کشاورزی

و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

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

۳. استادیار، علوم و تکنولوژی بذر، گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۷/۲۰ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۹)

### چکیده

به منظور ارزیابی تأثیر خشکی و دما بر سرعت جوانه‌زنی بذرهای بادرنجبویه آزمایشی در دماهای ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۳۰ و ۳۲ درجه سلسیوس و پتانسیل‌های خشکی ۰، -۰/۲، -۰/۴، -۰/۶، -۰/۸ و -۱/۰ مگاپاسکال در سه تکرار در آزمایشگاه بذر پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۹ دقیقه شرقی) در سال ۱۳۹۳ به صورت تجزیه مرکب در قالب طرح کامل تصادفی در چند مکان انجام گرفت. بنا بر نتایج جوانه‌زنی بادرنجبویه در دامنه گسترده‌ای صورت نمی‌گیرد، به طوری که جوانه‌زنی آن در گستره دمایی ۲۳-۳۲ درجه سلسیوس صورت گرفت. برای به دست آوردن دماهای مهم (کاردینال) از مدل‌های دندان مانند، دوتکه‌ای و بنا استفاده شد. بنا بر آماره‌های RMSE، ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ضریب همبستگی ( $r$ ) مدل دندان مانند نسبت به مدل‌های دیگر واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما و پتانسیل آب را بهتر توصیف می‌کند. دمای کمینه، دمای بهینه کم، بهینه بیش و دمای بیشینه (سقف) برای جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه در شرایط نداشتن تنش به ترتیب ۱۷/۳۱، ۳۰/۲۶، ۳۱/۱۵ و ۳۵ درجه سلسیوس به دست آمدند. شمار ساعات‌های زیستی برای جوانه‌زنی در پتانسیل‌های مختلف آب بین ۴۱ تا ۱۳۷ ساعت بود. شمار ساعات‌های زیستی به ازای یک واحد افزایش پتانسیل آب (مگاپاسکال) حدود ۹۶ ساعت کاهش یافت. از این فراسنجه‌ها و رابطه‌های به دست آمده می‌توان برای پیش‌بینی زمان تا جوانه‌زنی و یا سبز شدن بادرنجبویه در شرایط عادی و دامنه گسترده‌ای از تنش خشکی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: بادرنجبویه، تنش خشکی، دماهای مهم، جوانه‌زنی، مدل‌های رگرسیونی غیرخطی.

## Determination of cardinal temperatures of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) seeds in response to temperatures and water potentials

Elham Nozarpour<sup>1</sup>, Reza Tavakkol Afshari<sup>2\*</sup>, Elias Soltani<sup>3</sup> and Naser Majnoun Hosseini<sup>4</sup>

1, 4. Former M. Sc. Student, Seed Science and Technology and Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Professor, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3. Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Aboureihan Campus University of Tehran, Pakdasht, Iran

(Received: Oct. 12, 2015 - Accepted: Jan. 9, 2016)

### ABSTRACT

Germination is series of biochemical reactions that depends mainly on temperature and moisture. Therefore, seed germination rate of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) were evaluated in temperatures of 20, 23, 25, 27, 30 and 32°C and water potentials of 0, -0.2, -0.4, -0.6 and -0.8MPa. According to the results, germination temperature window was not very wide in a way that germination temperature range was 23-32°C. Three non-linear regression models (Dent-like, Segmented and Beta) were used to evaluate cardinal temperatures. According to the indices including RMSE, the coefficient of determination ( $R^2$ ) and correlation coefficient ( $r$ ), the best model was Dent-like which can better estimate germination rate in response to temperature and water potential. The base, the lower and the upper and the ceiling temperatures of lemon balm were 17.31, 30.26, 31.15 and 35°C in the optimum conditions of water potential, respectively. Biological time for germination ranged from 41 to 137 h in different water potentials. Biological time decreased about 96 h by increasing 1 MPa in water potential. Estimated parameters and the relations can be used to predict time to germination or emergence in lemon balm under wide environmental conditions from normal to drought stress.

**Keywords:** cardinal temperature, drought stress, germination, *Melissa officinalis* L., non-linear regression models.

## مقدمه

دما و رطوبت از عوامل مهم در جوانه‌زنی بذرهای بدون دوره خواب (کمون) هستند. دما روی سرعت جوانه‌زنی این بذرها تأثیر می‌گذارد اما در مزرعه اغلب تنش آب محدودکننده جوانه‌زنی است (Bradford, 2002). جذب آب در بیشتر بذرها در یک دمای بهینه که آب و اکسیژن به اندازه کافی در دسترس باشد، سه مرحله (فاز) دارد (Shayanfar et al., 2014). در طول مرحله اول بذرهای خشک به سرعت آب را جذب می‌کنند، این مرحله از آبنوشی در بذرهای زنده و مرده رخ می‌دهد. در طول مرحله دوم بسیاری از فرآیندهای سوخت‌وسازی (متابولیکی) مانند فعال شدن آنزیم‌ها در بذرهای زنده رخ می‌دهد. در این مرحله افزایش تنفس و تراوش عناصر از بذرهای آبیگری شده منجر به کاهش وزن خشک می‌شود. در این مرحله جذب آب به کندی صورت می‌گیرد. در طول مرحله سوم دراز شدن ریشه مشاهده می‌شود. ریشه‌ها در این مرحله کارکرد خود را به دست آورده و مسئول افزایش جذب آب در این مرحله هستند. آبنوشی در پتانسیل‌های پایین، سبب کاهش سرعت جذب آب می‌شود و ورود به مرحله آخر جوانه‌زنی به تأخیر می‌افتد (Bradford, 2002). دما تأثیر اولیه روی خواب و جوانه‌زنی بذرها دارد. پاسخ جوانه‌زنی بذرها به دما از راه دماهای مهم (کاردینال) مشخص می‌شود که به شرح زیر هستند (Alvarado & Bradford, 2002): الف) دمای کمینه ( $T_b$ )، که در آن سرعت جوانه‌زنی صفر است. ب) دمای بهینه ( $T_o$ )، که در آن بالاترین سرعت جوانه‌زنی مشاهده می‌شود و ج) دمای بیشینه (سقف) ( $T_c$ )، که در آن سرعت جوانه‌زنی صفر است. محدوده دمایی بین  $T_b$  تا  $T_o$  حساس به وضعیت خواب است و اغلب در بذرهای دارای خواب محدوده باریک‌تری دارد درحالی‌که در بذرهای بدون خواب این محدوده دمایی گسترده‌تر است. دماهای مهم جوانه‌زنی، برابری زمان جوانه‌زنی با شرایط بهینه برای مرحله‌های بعدی رشد و نمو گیاهچه را تضمین می‌کند (Alvarado & Bradford, 2002). برخی از محققان برای توصیف رابطه بین دما و سرعت جوانه‌زنی در برخی گونه‌های گیاهی از رگرسیون خطی استفاده کردند. با افزایش دما در یک محدوده معین سرعت جوانه‌زنی خطی افزایش یافته و در دماهای

بالاتر به سرعت کاهش می‌یابد (Kamkar et al., 2005). با استفاده از تابع دو تکه‌ای به کمی‌سازی رابطه سرعت جوانه‌زنی و دما روی بذر بادرنجبویه پرداخته شد و دمای کمینه، بهینه و بیشینه برای این بذر به ترتیب ۷/۲، ۲۸/۹ و ۴۰/۱ درجه سلسیوس گزارش شد (Atashi et al., 2014). با استفاده از مدل دو تکه‌ای، دمای پایه خردل وحشی (*Sinapis arvensis* L.) در پتانسیل آب صفر حدود ۲/۹- درجه سلسیوس بود و با کاهش پتانسیل آب دمای کمینه به تدریج افزایش یافت و در پتانسیل آب ۰/۶- مگاپاسکال به حدود ۲ درجه سلسیوس رسید. دماهای بهینه و بیشینه برای جوانه‌زنی خردل وحشی به ترتیب حدود ۲۲ و ۳۵ درجه سلسیوس بود (Soltani et al., 2013a). برخی از محققان برای به دست آوردن دماهای مهم از مدل‌های ریاضی استفاده کردند (Jame & Cutforth, 2004; Hardegree, 2006; Soltani et al., 2008). دمای کمینه جوانه‌زنی گل جالیز مصری (*Orobancha aegyptiaca*) ۳/۵۵ درجه سلسیوس است (Kebreab & Murdoch, 1999). سه تابع دمایی دندان مانند، دو تکه‌ای و بتا برای تعیین دماهای مهم گندم (*Triticum aestivum* L.) استفاده شد و مدل دو تکه‌ای بهترین مدل گزارش شد (Soltani et al., 2008). با استفاده از مدل دو تکه‌ای، دمای کمینه، بهینه و بیشینه برای گیاه کلزای خودرو (*Brassica napus* L.) به ترتیب برابر ۲/۷، ۲۶ و ۴۱ درجه سلسیوس به دست آمد (Soltani et al., 2014). دماهای مهم جوانه‌زنی گونه *Kochia scopari* شامل دماهای کمینه، بهینه و بیشینه به ترتیب برابر ۳/۵، ۲۴ و ۵۰ درجه سلسیوس گزارش شد (Jami Al-Ahmadi & Kafi, 2007). برای توصیف سرعت جوانه‌زنی گندم در برابر دما و پتانسیل آب از مدل‌های دندان مانند، دو تکه‌ای، بتا (اصلی) و بتا (تغییریافته) استفاده شد و مدل دندان مانند نسبت به مدل‌های دیگر واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما و پتانسیل آب را بهتر توصیف کرد (Nozari-Nejad et al., 2013). برای به دست آوردن دماهای مهم جوانه‌زنی گیاه دارویی ماریتیغال (*Silybum marianum*) از هشت مدل رگرسیونی غیرخطی استفاده شد که مدل دو تکه‌ای برازش بهتری داشت (Dorri et al., 2014).

دستگاه کابین رشد (انکوباتور) است. بنابراین همه تیمارهای دمایی همزمان و در اسفند ۱۳۹۳ آغاز شدند. سه تکرار پنجاه بذری از بذر بادرنجبویه در دامنه دمایی ۵ تا ۳۵ درجه سلسیوس در ترکیب با پتانسیل آب ۰ (شاهد)، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، و ۰/۸ - مگاپاسگال آزمون جوانه زنی شدند. طرح آماری به صورت تجزیه مرکب در قالب طرح کامل تصادفی در چند مکان بود که در آن هر دما به عنوان یک مکان در نظر گرفته شد. سطوح مختلف تنش خشکی از راه حل کردن مقادیر مشخصی پلی اتیلن گلیکول (۶۰۰۰) در آب مقطر برای ایجاد پتانسیل بر پایه رابطه ارائه شده توسط Michel & Kaufmann (1973) ایجاد شدند. میزان پودر پلی اتیلن گلیکول مورد نیاز (برحسب گرم بر لیتر آب) برای تهیه پتانسیل های اسمزی مختلف از جدول ۱ استخراج شد.

گیاه بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) از تیره نعناعیان است و سرزمین اصلی آن نواحی مدیترانه است. این گونه گیاهی علفی چند ساله و ویژگی پاداکسندگی (آنتی اکسیدانی) دارد و ترکیب های معطر خاص موجود در اسانس آن در صنایع دارویی، بهداشتی و غذایی کاربرد فراوانی دارد. بادرنجبویه سازگاری خوبی با شرایط آب و هوایی ایران دارد. هدف از این آزمایش ارزیابی مدل های مختلف رگرسیونی برای کم کردن واکنش سرعت جوانه زنی به دما در پتانسیل های مختلف آب است.

### مواد و روش ها

این آزمایش در آزمایشگاه بذر گروه زراعت و اصلاح نباتات پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در کرج انجام شد. این آزمایشگاه مجهز به ۹

جدول ۱. مقادیر مورد نیاز برای ایجاد پتانسیل های محلول اسمزی پلی اتیلن گلیکول (برحسب گرم در لیتر)

Table 1. Amounts needed to make osmotic potential of PEG solution (gr/L)

| Water Potential | Temperature (°C) |        |        |        |     |     |     |     |     |       |
|-----------------|------------------|--------|--------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
|                 | 5                | 10     | 15     | 20     | 23  | 25  | 27  | 30  | 32  | 35    |
| -2              | 94.33            | 99.7   | 105.63 | 112.23 | 116 | 119 | 122 | 128 | 131 | 137   |
| -4              | 147.05           | 153.87 | 161.3  | 169.49 | 174 | 178 | 182 | 188 | 192 | 179.1 |
| -6              | 188.15           | 195.99 | 204.45 | 213.64 | 219 | 224 | 228 | 235 | 239 | 222.3 |
| -8              | 223.11           | 231.7  | 240.9  | 251.02 | 257 | 262 | 267 | 274 | 279 | 258.3 |
| -10             | 254              | 263.25 | 273.23 | 284.02 | 291 | 296 | 301 | 209 | 314 | 289.3 |
| -12             | 281.98           | 291.03 | 302.42 | 313.88 | 321 | 326 | 322 | 340 | 346 | 319.5 |

(Michel & Kaufmann, 1973)

شمارش تا ۲۱ روز پس از کشت ادامه داشت. و ملاک جوانه زنی، خروج ریشه چته دست کم ۲ میلی متری بود (ISTA, 2009).

برای محاسبه درصد و سرعت جوانه زنی بذرها از برنامه Germin (Soltani et al., 2013a) استفاده شد، این برنامه D10 (یعنی مدت زمانی که طول می کشد تا جوانه زنی به ۱۰ درصد برسد)، D20 (یعنی مدت زمانی که طول می کشد تا جوانه زنی به ۲۰ درصد برسد) را محاسبه می کند. در برخی از تیمارهای مورد آزمایش درصد جوانه زنی مشاهده شده کمتر از ۵۰ درصد و حتی کمتر از ۳۰ درصد بود. بنابراین برای به دست آوردن درصد و سرعت جوانه زنی به ترتیب از D20 و R20 استفاده شد (Soltani et al., 2014). این برنامه فراسنجه های یاد شده را برای هر تکرار و هر تیمار بذری از روش درون یابی منحنی افزایش جوانه زنی در

در این آزمایش از آب مقطر برای ایجاد شرایط بدون تنش (شاهد) استفاده شد. ۲۴ ساعت پیش از آغاز آزمایش کاغذهای صافی در محلول های مختلف تولید شده قرار داده شدند. پیش از آغاز آزمایش بستر بذر (کاغذ واتمن) در اتوکلاو در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به مدت دو ساعت سترون (استریل) شد. آنگاه شمار پنجاه عدد بذر به مدت یک دقیقه با محلول هیپوکلریت سدیم ۱۰ درصد ضد عفونی شده و پس از شستشو با آب مقطر، بذرها روی کاغذ صافی درون پتری دیش ها منتقل شدند. سپس برای تیمارهای خشکی مقادیر ۹ میلی لیتر از هر محلول به هر ظرف پتری اضافه شد. ظرف های پتری به ژرminatور با دماهای ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۳۰ و ۳۲ درجه سلسیوس و شرایط کامل روشنایی منتقل شدند. شمارش بذرها جوانه زده از ۲۴ ساعت پس از کشت تا ۲۱ روز پس از آن در یک ساعت مشخص انجام شد و

معیارهای زیر برای انتخاب مدل برتر از میان مدل‌های مختلف استفاده شد:

۱- میزان ضریب تبیین رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده، با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شد. که در آن SSG و SSE به ترتیب مجموع خطا و مجموع مربعات کل هستند.

$$R^2 = 1 - \text{SSE}/\text{SSG} \quad (۶)$$

۲- RMSE (جذر میانگین مربعات خطا)

۳- میزان ضریب همبستگی خطی بین شمار روز تا جوانه‌زنی مشاهده‌شده با جوانه‌زنی پیش‌بینی‌شده. هر چه میزان آن بیشتر باشد نشان‌دهنده این است که مدل پیش‌بینی دقیق‌تری دارد.

۴- استفاده از ضریب‌های رگرسیون خطی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده به این صورت که: در صورتی که هر یک از ضریب‌های a یا b در رگرسیون بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده معنی‌دار باشد گویای بالا بودن خطای مدل در پیش‌بینی آن است. شایان یادآوری است که برای تعیین معنی‌دار بودن ضریب، از حاصل‌ضرب t جدول و میزان اشتباه استاندارد استفاده می‌شود. نزدیک بودن نقاط به خط ۱:۱ در رگرسیون گفته‌شده گویای کارایی بالاتر مدل است. معنی‌داری ضریب a به این معناست که عرض از مبدأ خط رگرسیون با عرض از مبدأ خط ۱:۱ همخوانی ندارد. معنی‌داری ضریب b این معناست که شیب خط رگرسیون با خط ۱:۱ همخوانی ندارد و خط رگرسیون نسبت به خط ۱:۱ اریب معنی‌دار دارد. ساعت زیستی، بیشترین سرعت ذاتی جوانه‌زنی در دمای بهینه که بیانگر کوتاه‌ترین زمان تا جوانه‌زنی است از رابطه ۷ محاسبه می‌شود (Soltani, 2007). در این رابطه GO ساعت زیستی و  $R_{\max}$  بیشترین سرعت ذاتی جوانه‌زنی (بر ساعت) است.

$$GO = 1/R_{\max} \quad (۷)$$

### نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس آزمایش نشان داد تأثیر دما و پتانسیل آب و اثر متقابل این دو بر درصد و سرعت جوانه‌زنی بذرهای بادرنجوبیه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

مقابل زمان محاسبه می‌کند. سرعت جوانه‌زنی (در ساعت) از رابطه ۱ محاسبه شد (Soltani *et al.*, 2013a). از مدل ۲ برای کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی به دما استفاده شد (Soltani *et al.*, 2008).

$$R20 = 1/D20 \quad (۱)$$

$$R20 = f(T) R_{\max} \quad (۲)$$

در این رابطه  $f(T)$  تابع دماست که از ۰ در دمای کمینه و بیشینه تا ۱ در دمای بهینه تغییر می‌کند،  $R_{\max}$  بیشترین سرعت ذاتی جوانه‌زنی در دمای بهینه است. بنابراین  $1/R_{\max}$  کمترین ساعت تا جوانه‌زنی را در دمای بهینه نشان می‌دهد. تابع دمایی دندان مانند، دو تکه‌ای و بتا برای بررسی واکنش جوانه‌زنی بذرهای بادرنجوبیه به دما در پتانسیل‌های مختلف به داده‌ها برازش داده شده است (Soltani *et al.*, 2006; Soltani *et al.*, 2008). رابطه‌های این توابع به صورت زیر است: تابع دندان مانند:

$$f(T) = (T - T_b) / (T_{o1} - T_b) \quad \text{if } T_b < T < T_{o1} \quad (۳)$$

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

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

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

تابع دو تکه‌ای:

$$f(T) = (T - T_b) / (T_o - T_b) \quad \text{if } T_b < T \leq T_o \quad (۴)$$

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

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

تابع بتا:

$$f(T) = \left\{ \left[ \left( \frac{T - T_b}{T_o - T_b} \right) \left( \frac{T_c - T}{T_c - T_o} \right) \right] \left( \frac{T_c - T_o}{T_o - T_b} \right) \right\}^\alpha \quad (۵)$$

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

در این رابطه‌ها، T دما،  $T_b$  دمای کمینه،  $T_o$  دمای بهینه،  $T_{o2}$  دمای بهینه کم (برای تابع دندان مانند)،  $T_c$  دمای بهینه بیش (برای تابع دندان مانند)،  $T_o$  دمای بیشینه و  $\alpha$  فراسنجه شکل برای تابع بتا است که انحنای تابع را تعیین می‌کند. از روش بهینه‌سازی تکراری به کمک رویه nlin در نرم‌افزار SAS برای برآورد فراسنجه‌های هر مدل استفاده شد (Soltani, 2007). در روش بهینه‌سازی تکراری با هر بار وارد کردن مقادیر اولیه فراسنجه‌ها، مقادیر نهایی آن‌ها با روش کمترین توان‌های دوم برآورد زده می‌شود. از

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس (مقادیر F) برای سرعت جوانه‌زنی (برای ۲۰ درصد جمعیت، R20) و بیشترین جوانه‌زنی ( $G_{max}$ ) بذر بادرنجبویه

Table 2. Analysis of variance of the germination rate (for 20% of population, R20) and maximum germination value ( $G_{max}$ ) of lemon balm seeds

| Source of variation | df | F value            |                    |
|---------------------|----|--------------------|--------------------|
|                     |    | $G_{max}$          | R <sub>20</sub>    |
| T                   | 5  | 287.7**            | 450.6**            |
| R(T)                | 12 | 1.29 <sup>ns</sup> | 0.45 <sup>ns</sup> |
| WP                  | 4  | 228.4**            | 641.9**            |
| T*WP                | 20 | 7.6**              | 28**               |

\*\*، ns: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و عدم وجود اختلاف معنی‌دار.

\*\*، ns: Significant at 1% level and non-significant, respectively.

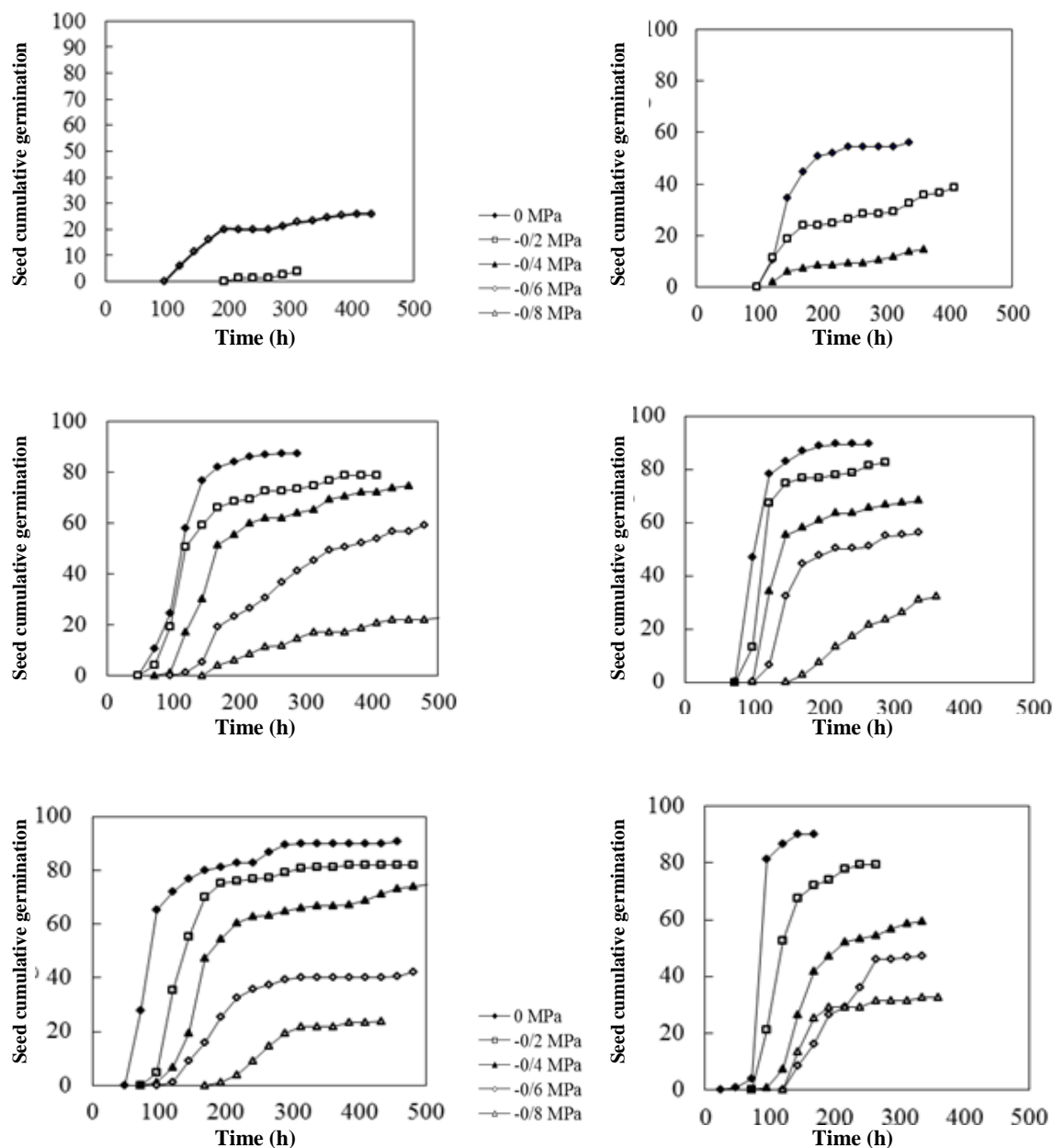
معنی‌دار بود. اما این ضریب در مدل دوتکه‌ای و بتا در بیشتر پتانسیل‌های آب (به‌جز پتانسیل ۰) معنی‌دار بود. ضریب همبستگی برای مدل دندان مانند بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۷ متغیر بود. این دامنه برای دو تابع دوتکه‌ای و بتا به‌ترتیب ۰/۹۲ تا ۰/۹۵ و ۰/۸۶ تا ۰/۹۴ بود. با توجه به معنی‌دار بودن ضریب‌های b در چند پتانسیل آب که در توابع دوتکه‌ای و بتا مشاهده شد، این دو تابع دقت کمتری در توصیف رابطه سرعت جوانه‌زنی با دما داشته‌اند. شایان یادآوری است که در مدل دوتکه‌ای پراکندگی نقاط در اطراف خط ۱:۱ بیشتر از مدل دندان مانند بوده است (جدول ۳؛ شکل ۳). بنابراین، نتایج نشان می‌دهند که دقت مدل‌های دوتکه‌ای و بتا در پیش‌بینی سرعت جوانه‌زنی در واکنش به دما، نسبت به مدل دندان مانند کمتر است. در نهایت، مدل دندان مانند با توجه به برتری فراسنجه‌های مورد ارزیابی یادشده به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد.

برخی از محققان برای کمی کردن واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما و تعیین دماهای مهم از مدل‌های رگرسیون غیرخطی استفاده کردند. در پژوهشی برای مدل‌سازی جوانه‌زنی و سبز شدن گیاه نخود (*Cicer arietinum* L.) در دماها و عمق‌های مختلف از مدل‌های دندان مانند، دوتکه‌ای و بتا استفاده شد و مدل دندان مانند به‌عنوان مدل برتر در پیش‌بینی سبز شدن این گیاه در دماها و عمق‌های مختلف معرفی شد (Soltani et al., 2006). در پژوهشی دیگر برای توصیف واکنش سرعت جوانه‌زنی کلزای خودرو تحت تأثیر دما و پتانسیل آب از تابع دو تکه‌ای استفاده شد (Soltani et al., 2014). برای توصیف سرعت جوانه‌زنی در برابر دما و پتانسیل آب از مدل‌های دندان مانند،

با کاهش پتانسیل آب جوانه‌زنی تجمعی بذرها کاهش یافت و در دماهای پایین‌تر جوانه‌زنی دیرتر آغاز شد و دیرتر به پایان رسید (شکل ۱). اما در دماهای ۳۰ و ۳۲ درجه سلسیوس بذره‌ای بادرنجبویه زودتر جوانه‌زنی خود را آغاز و زودتر هم به پایان رساندند (شکل ۱). شایان یادآوری است که در دماهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۵ درجه سلسیوس هیچ‌یک از بذرها در هیچ سطح رطوبتی جوانه نزدند. دماهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سلسیوس کمتر از دمای پایه بادرنجبویه بوده و بنابراین هیچ جوانه‌زنی در این دماها مشاهده نشد. درواقع بذرها در دماهای کمتر از دمای کمینه و یا بیشتر از دمای بیشینه هیچ جوانه‌زنی نخواهند داشت (Bradford, 2002). کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی بذره‌ای بادرنجبویه در دماها و پتانسیل‌های مختلف یادشده انجام شد. مدل‌های برازش داده شده (دندان مانند، دو تکه‌ای و بتا) برای هر پتانسیل آب به‌طور جداگانه در شکل ۲ آورده شده است. مقادیر RMSE (جذر میانگین مربعات خطا)، ( $R^2$ ) ضریب تبیین، (a) و (b) ضرایب رگرسیون و ( $r$ ) ضریب همبستگی مربوط به مقادیر ساعت تا ۲۰ درصد جوانه‌زنی مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده هر مدل در پتانسیل‌های مختلف آب در جدول ۳ نشان داده شده است. بنا بر نتایج کمترین مقادیر RMSE (جذر میانگین مربعات خطا) برای مدل‌های دندان مانند، دو تکه‌ای و بتا به ترتیب ۰/۰۰۰۹۲۴، ۰/۰۰۰۹۲۴ و ۰/۰۰۱۰۱ بود. ضریب  $R^2$  برای مدل دندان مانند بین ۰/۸۲ تا ۰/۹۸، برای مدل دوتکه‌ای بین ۰/۸۰ تا ۰/۹۸ و برای مدل بتا بین ۰/۵۶ تا ۰/۹۴ بود. نتایج نشان داد که ضریب (b) در مدل دندان مانند تنها در پتانسیل آب ۰/۶ - مگاپاسکال

دوتکه‌ای، بتا (اصلی)، بتا (تغییر یافته) استفاده شد و نتایج نشان داد مدل دندان مانند نسبت به مدل‌های دیگر واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما و پتانسیل آب را بهتر توصیف می‌کند (Nozari-Nejad *et al.*, 2013). برای توصیف واکنش سرعت جوانه‌زنی خردل وحشی همخوانی دارد.

دوتکه‌ای، بتا (اصلی)، بتا (تغییر یافته) استفاده شد و نتایج نشان داد مدل دندان مانند نسبت به مدل‌های دیگر واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما و پتانسیل آب را بهتر توصیف می‌کند (Nozari-Nejad *et al.*, 2013). برای توصیف واکنش سرعت جوانه‌زنی خردل وحشی همخوانی دارد.



شکل ۱. روند جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان در پتانسیل‌های آب مختلف (۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ - مگاپاسکال) تحت تیمارهای دمایی مختلف بذر بادرنجیویه. هر شکل مربوط به یک تیمار دمایی است که دمای تیمار، درون پرانتز در شکل نشان داده شده است.

Figure 1. Cumulative germination percentage at various osmotic potentials of (0, 0.2, -0.4, -0.6, -0.8 MPa) under different temperature treatments of lemon balm seeds. Each figure is related to a thermal treatment and temperature treatment, is shown in brackets.

جدول ۳. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) برای مدل‌های مختلف توصیف‌کننده رابطه سرعت جوانه‌زنی با دما و پتانسیل آب بذر بادرنجبویه. ضریب‌های رگرسیون (a و b) و ضریب همبستگی (r) مربوط به مقادیر ساعت تا جوانه‌زنی مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده نیز برآورد شده است.

Table 3. Root Mean Square Error (RMSE) and coefficient of determination (R<sup>2</sup>) for models describing the relationship between germination rate, temperature and water potential of lemon balm seeds. Regression coefficients (a and b), correlation coefficient (r) of the observed and predicted values to germination time is also estimated.

|           | WP (Mpa) | RMSE     | R <sup>2</sup> | a±SE                | b±SE             | r    |
|-----------|----------|----------|----------------|---------------------|------------------|------|
| Dent like | 0        | 0.00113  | 0.98           | 0.000251±0.0004789  | 0.98061±0.03163  | 0.92 |
|           | -0.2     | 0.00098  | 0.97           | 0.0002285±0.0003782 | 0.96834±0.03599  | 0.97 |
|           | -0.4     | 0.00191  | 0.83           | 0.0009245±0.0006275 | 0.83077±0.08602  | 0.95 |
|           | -0.6     | 0.00146  | 0.82           | 0.000698±0.0004722  | 0.81361±0.08612* | 0.94 |
|           | -0.8     | 0.000924 | 0.86           | 0.0003341±0.0002811 | 0.86703±0.07790  | 0.95 |
| Segmented | 0        | 0.00113  | 0.98           | 0.0002517±0.000478  | 0.9806±0.0316    | 0.92 |
|           | -0.2     | 0.00247  | 0.8            | 0.00169±0.000954    | 0.80530±0.09084* | 0.93 |
|           | -0.4     | 0.00202  | 0.8            | 0.00108±0.0004946   | 0.8026±0.09131*  | 0.94 |
|           | -0.6     | 0.00153  | 0.8            | 0.000773±0.0004946  | 0.80887±0.09020* | 0.94 |
|           | -0.8     | 0.000924 | 0.86           | 0.000334±0.000281   | 0.86703±0.07790  | 0.95 |
| Beta      | 0        | 0.0014   | 0.94           | 0.0006708±0.0008754 | 0.92408±0.05353  | 0.92 |
|           | -0.2     | 0.00186  | 0.86           | 0.0013±0.000719     | 0.7422±0.06841*  | 0.93 |
|           | -0.4     | 0.00173  | 0.84           | 0.00184±0.0005684   | 0.78026±0.07792* | 0.94 |
|           | -0.6     | 0.00123  | 0.86           | 0.00119±0.0003969   | 0.8121±0.0723*   | 0.93 |
|           | -0.8     | 0.00101  | 0.56           | 0.00121±0.0003081   | 0.4201±0.08538*  | 0.86 |

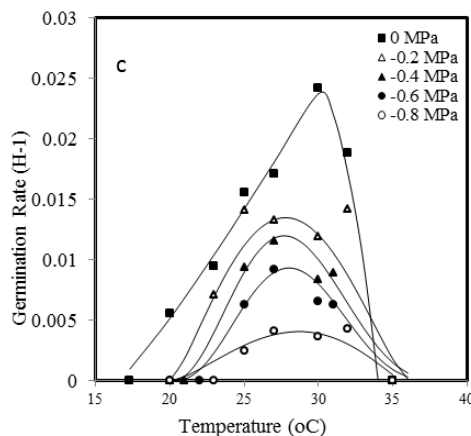
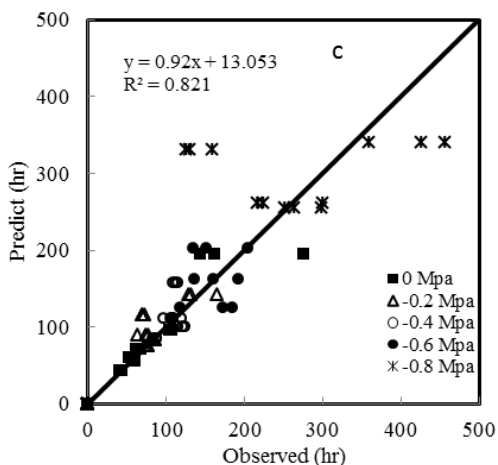
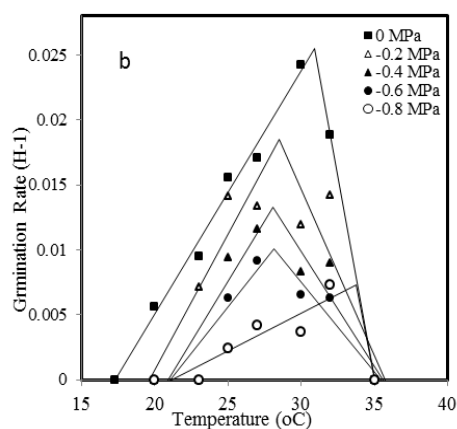
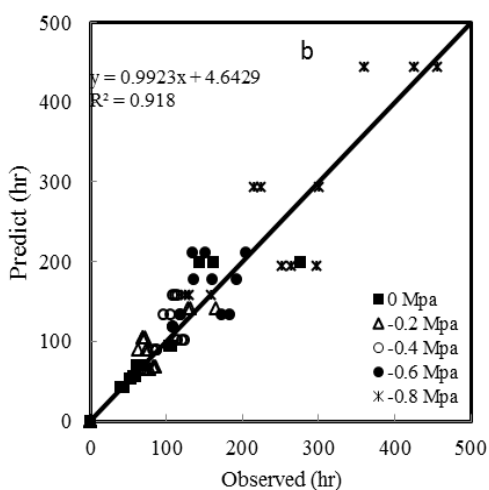
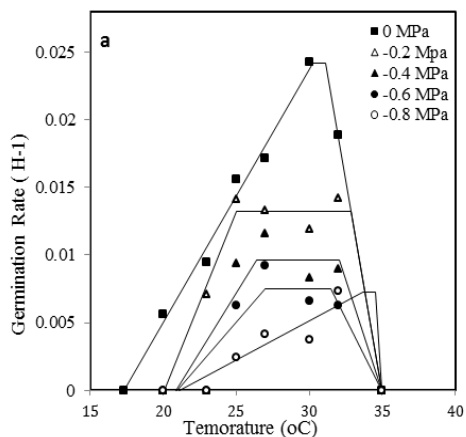
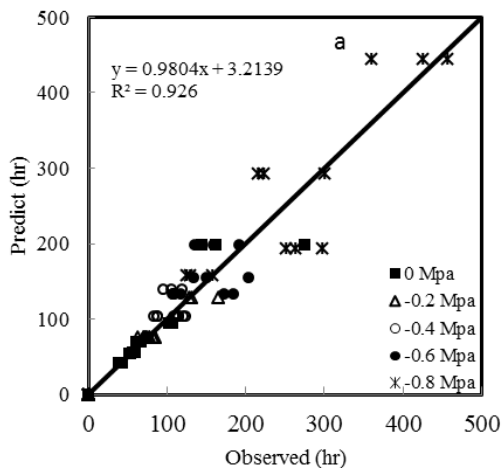
کمینه، بهینه و بیشینه برای این بذر ۲/۷، ۲۸/۹ و ۴۰/۱ درجه سلسیوس گزارش شد (Atashi et al., 2014). دمای کمینه، بهینه و بیشینه برای گیاه دارویی ماریتغال (*Silybum marianum*) به ترتیب ۲/۷، ۳۱/۵۱ و ۳۸ درجه سلسیوس بود (Dorri et al., 2014). دمای کمینه، دمای بهینه بیش، دمای بهینه کم و دمای بیشینه برای بذر مریم‌گلی گونه (*Salvia hypoleuca*) به ترتیب ۱/۷، ۱۸/۶، ۲۷/۷ و ۳۲ درجه سلسیوس بود (Tahmasebi-Gojegi et al., 2014). دماهای کمینه، بهینه و بیشینه برای بذر پنبه ۹/۴، ۳۷/۹ و ۴۸/۳ درجه سلسیوس گزارش شد (Akram-Ghaderi et al., 2008). تأثیر پتانسیل آب بر دمای کمینه، دمای بهینه کم، دمای بهینه بیش، دمای بیشینه و شمار ساعت زیستی برآوردشده با مدل دندان مانند (مدل برتر برای پیش‌بینی جوانه‌زنی) در شکل ۴ ارائه شده است.

دماهای مهم تعیین‌شده توسط مدل دندان مانند و شمار ساعت زیستی برای جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه تحت تأثیر پتانسیل‌های خشکی در جدول (۴) نشان داده شده است. بنا بر نتایج دمای کمینه، دمای بهینه کم، دمای بهینه بیش و دمای بیشینه برای جوانه‌زنی در دامنه‌ای از پتانسیل‌های آب به ترتیب بین ۱۷/۳۱ تا ۲۱/۱۲، ۲۵ تا ۳۳/۶۶، ۳۱/۱۵ تا ۳۴/۵۶ و ۳۵ درجه سلسیوس متغیر بود. شمار ساعت زیستی برای جوانه‌زنی بادرنجبویه نیز در پتانسیل‌های مختلف آب بین ۴۱/۳۲ تا ۱۳۷/۳۶ ساعت بود (شکل ۴؛ جدول ۴). دمای کمینه، دمای بهینه کم، بهینه بیش و دمای بیشینه پیشنهادی برای جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه در شرایط بدون تنش به ترتیب ۱۷/۳۱، ۳۰/۲۶، ۳۱/۱۵ و ۳۵ درجه سلسیوس است. در تحقیقی از تابع دو تکه‌ای برای کمی‌سازی رابطه سرعت جوانه‌زنی و دما روی بذر بادرنجبویه استفاده شد و دمای

جدول ۴. برآورد دمای کمینه (T<sub>b</sub>)، دمای بهینه کم (T<sub>O1</sub>)، دمای بهینه بیش (T<sub>O2</sub>)، دمای بیشینه (T<sub>C</sub>)، شمار ساعت‌های زیستی (G<sub>0</sub>) برای جوانه‌زنی (۵۰ درصد جمعیت) با مدل دندان مانند در پتانسیل‌های آب مختلف بذر بادرنجبویه.

Table 4. Estimating base temperature (T<sub>b</sub>), the lower optimum temperature (T<sub>O1</sub>), the upper optimum temperature (T<sub>O2</sub>), the ceiling temperature (T<sub>C</sub>), number of hours of biological (G<sub>0</sub>) for germination of lemon balm (50%) using Dent like model under different water potentials

| WP (Mpa) | T <sub>b</sub> | T <sub>O1</sub> | T <sub>O2</sub> | T <sub>c</sub> | G <sub>0</sub> |
|----------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 0        | 17.31          | 30.26           | 31.15           | 35             | 41.32          |
| -0.2     | 20.10          | 25              | 32.87           | 35             | 75.76          |
| -0.4     | 20.87          | 26.42           | 32.08           | 35             | 103.95         |
| -0.6     | 20.94          | 27              | 31.50           | 35             | 132.8          |
| -0.8     | 21.12          | 33.66           | 34.56           | 35             | 137.36         |



شکل ۲. رابطه سرعت جوانه‌زنی توصیف‌شده تحت تأثیر دما

(۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۳۰ و ۳۲ درجه سلسیوس) و

پتانسیل‌های مختلف آب (۰، -۰/۲، -۰/۴، -۰/۶ و -۰/۸

مگاپاسکال) با مدل‌های مختلف بذر بادرنجبویه مدل‌ها

عبارت‌اند از دندان مانند (a)، دو تکه‌ای (b) و بتا (c).

Figure 2. The relationship between germination rate and water potentials (0, 0. 2, -0. 4, -0. 6, -0.8- MPa) under different temperatures (20, 23, 25, 27, 30 and 32 ° C) in lemon balm seeds using non-linear models including Dent like (a), Segmented (b) and Beta (c).

شکل ۳. مقادیر ساعت تا جوانه‌زنی پیش‌بینی‌شده در مقابل

مقادیر مشاهده‌شده در پتانسیل‌های مختلف آب

(مگاپاسکال) بذر بادرنجبویه با مدل‌های مختلف. مدل‌ها

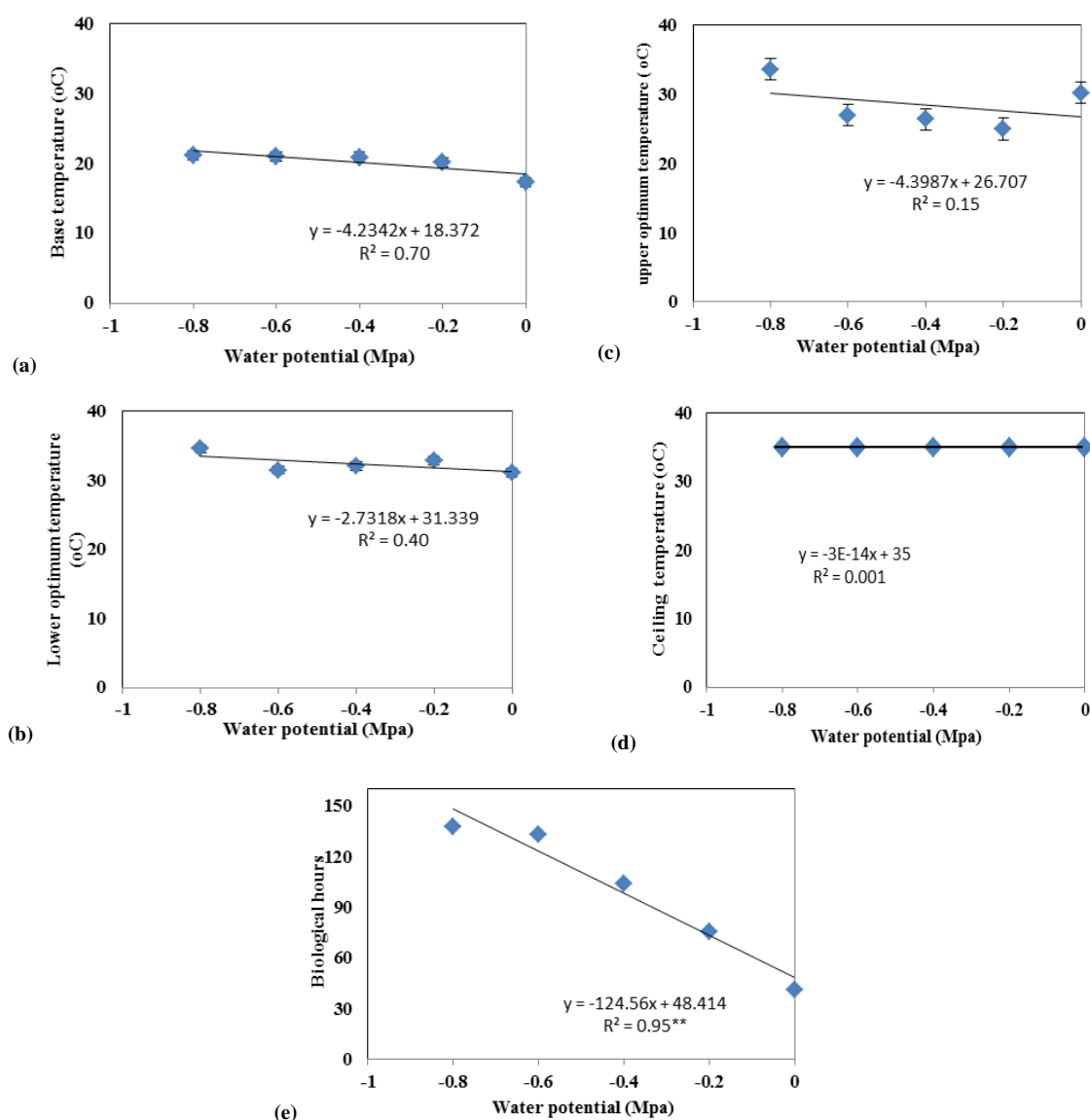
عبارت‌اند از دندان مانند (a)، دو تکه‌ای (b) و بتا (c).

Figure 3. Prediction of germination time values to the observed values under different water potentials (MPa) in lemon balm seeds using different models. Models including Dent like (a), Segmented (b) and Beta (c).



کردند، به طوری که دمای بهینه بیش بین ۳۱ تا ۳۴ و دمای بیشینه ۳۵ درجه سلسیوس برآورد شد و تحت تأثیر تغییر پتانسیل آب تغییر معنی داری نداشت (شکل ۴). شمار ساعات های زیستی تحت تأثیر پتانسیل آب در سطح ۱ درصد ( $R^2=0.95^{**}$ ) قرار گرفت به طوری که با مثبت تر شدن پتانسیل آب شمار ساعات های زیستی برای جوانه زنی کاهش یافت و با افزایش هر واحد پتانسیل آب (مگاپاسکال) شمار ساعات های زیستی برای جوانه زنی حدود ۹۶ ساعت کاهش یافت.

منحنی واکنش دمای کمینه در برابر پتانسیل آب روند خطی افزایشی نشان داد، به طوری که از میزان ۱۷/۳۱ درجه سلسیوس در پتانسیل ۰ مگاپاسکال به حدود ۲۰ درجه سلسیوس در پتانسیل ۰/۸- مگاپاسکال رسید. اما این تغییرها در دمای کمینه تحت تأثیر تغییر پتانسیل آب تغییر معنی داری نداشت و لب مرز معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد قرار گرفت. دیگر دماهای مهم جوانه زنی (دمای بهینه کم، دمای بهینه بیش و دمای بیشینه) تحت تأثیر پتانسیل آب قرار نگرفتند و تا حدودی از یک روند ثابتی تبعیت



شکل ۴. تأثیر پتانسیل آب بر دمای کمینه (a)، دمای بهینه کم (b)، دمای بهینه بیش (c)، دمای بیشینه (d) و شمار ساعات های زیستی (e) برای جوانه زنی بذر بادرنجبویه برآورد شده با مدل دندان مانند.

Figure 4. The effect of water potential on the base temperature (a), lower optimum temperature (b), upper optimum temperature (c), ceiling temperature (d) and the number of biological hours (e) estimated for germination in lemon balm seeds using Dent like model.

جوانه‌زنی، پتانسیل آب همچنان باعث کاهش محدوده دمایی می‌شود که در آن بیشترین درصد جوانه‌زنی رخ می‌دهد (Kebreab & Murdoch, 2000).

#### نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج این تحقیق بیانگر این است که با استفاده از مدل‌های رگرسیونی غیرخطی می‌توان جوانه‌زنی و سبز شدن بادرنجبویه را پیش‌بینی کرد. در بین مدل‌های رگرسیونی غیرخطی، مدل دندان مانند با توجه به کمترین RMSE و بیشترین ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ضریب همبستگی ( $r$ ) بهترین برازش جوانه‌زنی بذرهای بادرنجبویه را نشان دادند و به‌خوبی سرعت جوانه‌زنی این گیاهان را نسبت به دما توصیف کردند. در این تحقیق با کمک تابع دندان مانند دماهای مهم برای جوانه‌زنی تعیین شدند. دمای کمینه، دمای بهینه کم، بهینه بیش و دمای بیشینه برای جوانه‌زنی بادرنجبویه در شرایط نبودن تنش به ترتیب  $17/31$ ،  $30/26$ ،  $31/15$  و  $35$  درجه سلسیوس به دست آمدند. نتایج نشان داد که دماهای مهم تحت تأثیر پتانسیل آب تغییر معنی‌داری نداشتند (شکل ۴). از سوی دیگر شمار ساعات‌های زیستی مورد نیاز برای جوانه‌زنی نیز به‌صورت خطی با مثبت‌تر شدن پتانسیل آب کاهش یافت، یعنی بذرهای در شرایط تنش خشکی در مدت‌زمان درازتری جوانه خواهند زد. بنابراین از این مدل‌ها و فراسنجه‌های برآورد شده از آن‌ها، می‌توان در پیش‌بینی زمان جوانه‌زنی استفاده کرد. به‌طور کلی تعیین دمای مهم می‌تواند در تعیین تاریخ کاشت گونه‌های گیاهی و حتی در معرفی گونه‌های جدید به یک منطقه و همچنین در پیش‌بینی دیگر مراحل بعدی رشد و توسعه سودمند واقع شود.

شمار ساعات‌های زیستی برای جوانه‌زنی گندم با منفی‌تر شدن پتانسیل آب به‌طور خطی افزایش یافت (Nozari-Nejad *et al.*, 2013). بررسی‌های زیادی نشان داد که پتانسیل آب پایه تحت تأثیر دما قرار می‌گیرد (Alvarado & Bradford, 2002; Larsen *et al.*, 2004) و همچنین دمای کمینه می‌تواند با کاهش پتانسیل آب افزایش یابد (Fyfield & Gregory, 1989; Kebreab & Murdoch, 1999). نتایج نشان داد که دمای کمینه با کاهش پتانسیل آب، افزایش یافت (جدول ۴ و شکل ۴). برخی محققان گزارش کردند که دما و پتانسیل آب مستقل از یکدیگر هستند. دمای پایه بذرهای ماش (*Vigna radiata* L.) با کاهش پتانسیل آب، افزایش یافت (Fyfield & Gregory, 1989). دمای پایه تحت تأثیر پتانسیل آب قرار می‌گیرد و با کاهش پتانسیل آب افزایش می‌یابد (Kebreab & Murdoch, 1999).

افزایش دمای کمینه باعث می‌شود که بذر جوانه‌زنی خود را دیرتر آغاز کند و در رقابت با علف‌های هرز ضعیف‌تر باشد. به‌عبارت‌دیگر، بذرهای جوانه‌زنی‌شان را دیرتر آغاز کرده و در نتیجه تحت تنش‌های محیطی این بذرهای دیرتر استقرار یافته و دیرتر از خاک بیرون خواهند شد. در شرایط تنش خشکی، کاهش درصد جوانه‌زنی، بیانگر تأثیر منفی محدودیت جذب آب توسط بذر برای آغاز فرآیندهای سوخت‌وسازی جوانه‌زنی است. درصد جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه با کاهش پتانسیل آب (۰ تا  $-0/8$  مگاپاسکال) از ۷۴ درصد به ۱۹ درصد کاهش یافت. که این کاهش نشان‌دهنده حساسیت بذر بادرنجبویه به تنش خشکی است. صرف‌نظر از کاهش درصد

#### REFERENCES

1. Akram-Ghaderi, F., Soltani, E., Soltani, A. & Miri, A. A. (2008). Effect of priming on response of germination to temperature in cotton. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 15, 44-51. (in Farsi)
2. Alvarado, V. & Bradford, K. J. (2002). A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. *Plant, Cell & Environment*, 25, 1061-1069.
3. Atashi, S., Bakhshandeh, E., Zeinali, Z., Yassari, E. & Teixeira da Silva, J. A. (2014). Modeling seed germination in *Melissa officinalis* L. in response to temperature and water potential. *Acta Physiologiae Plantarum*, 36, 605-611.
4. Bewley, J. D., Bradford, K., Hilhorst, H. & Nonogaki, H. (2013). *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy*. (Tavakkol- Afshari, R. & Shayan-Far, A., translated). Springer-Verlag New York.

5. Bradford, K. J. (2002). Application of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science*, 50, 248-260.
6. Dorri, M. A., Kamkar, B., Aghdasi, M. & Komshi-Kamar, E. (2014). Determine the best model to evaluate the germination characteristics and cardinal temperatures of milk thistle. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 3, 189-200. (in Farsi)
7. Fyfield, T. P. & Gregory, P. J. (1989). Effects of temperature and water potential on germination, radicle elongation and emergence of mungbean. *Journal of Experimental Botany*, 40, 667-674.
8. Hardegee, S. P. & Winstral, A.H. (2006). Predicting germination response to temperature. II. Threedimensional regression, statistical gridding and iterative-probit optimization using measured and interpolated-subpopulation data. *Annals of Botany*, 98, 403-410.
9. ISTA. (2009). *International rules for seed testing*. International Seed Testing Association (ISTA). Edition 2009.
10. 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, 207-218.
11. Jami Al-Ahmadi, M. & Kafi, M. (2007). Cardinal temperatures for germination of *Kochia scoparia* (L.). *Journal of Arid Environment*, 68, 308-314.
12. Kamkar, B., Koocheki, A., Nasiri Mahallati, M. & Rezvani Moghdam, M. P. (2005). Cardinal temperatures for germination in three millet species (*Panicum miliaceum*, *Pennisetum glaucum* and *Setaria italica*). *Asian Journal of Plant Science*, 5, 316-319.
13. Kebreab, E. & Murdoch, A. J. (1999). Modelling the effect of water stress and temperature on germination rate of *Orobanche aegyptiaca* seeds. *Journal of Experimental Botany*, 50, 655-664.
14. 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, 127-133.
15. Larsen, S. U., Bailly, C., Come, D. & Corbineau, F. (2004). Use of the hydrothermal time model to analysis interacting effects of water and temperature on germination of three grass species. *Seed Science Research*, 14, 35-50.
16. Michel, B. E. & Kaufmann, M. R. (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 51, 914-916.
17. Nozari-nejad, M., Zeinali, E., Soltani, A., Soltani, E. & Kamkar, B. (2013). Quantify wheat germination rate response to temperature and water potential. *Electronic Journal of Crop Production*, 6(4), 117-135. (in Farsi)
18. Shayanfar, A. Tavakkol Afshari, R., Alizadeh, H., Rasoulnia, A. 2014. Proteome analysis of wheat seed embryo (*Triticum aestivum*) in tolerant and susceptible cultivars under drought stress during early germination phase. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 46:207-215. (in Farsi)
19. Soltani, A., Robertson, M. J., Torabi, B., Yousefi-Daz, M. & Sarparast, R. (2006). Modeling seedling emergence in chickpea as affected by temperature and sowing depth. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138, 156-167.
20. Soltani, A. (2007). *Application of SAS in statistical analysis*. (2<sup>nd</sup> ed.). Jahad Daneshgahi Mashhad. (in Farsi)
21. Soltani, E., Galeshi, S., Kamkar, B. & Akram-Ghaderi, F. (2008). Modeling seed aging effects on the response of germination to temperature in wheat. *Seed Science and Biotechnology*, 2, 32-36.
22. Soltani, E., Soltani, A. & Oveisi, M. (2013a). Modeling the effect of deterioration on germination of wheat in drought stress: Germin program optimization to predict the emergence model. *Agricultural Crop Management*, 15, 147-160. (in Farsi)
23. Soltani, E., Soltani, A., Galeshi, S., Ghaderi-Far, F. & Zeinali, E. (2013b). Seed germination modeling of wild mustard (*Sinapis arvensis* L.) as affected by temperature and water potential: hydrothermal time model. *Journal of Plant Production*, 20, 19-34. (in Farsi)
24. Soltani, E., Oveisi, M., Soltani, A., Galeshi, S., Ghaderi-Far, F. & Zeinali, E. (2014). Seed germination modeling of volunteer canola as affected by temperature and water potential: hydrothermal time model. *Weed Research Journal*, 6, 23-38. (in Farsi)
25. Tahmasebi-Gojegi, S., Naghadi-Badi, H. A., Mehr-Afarin, A., Abdousi, V. & Labafi, M. R. (2014). Germination characteristics and cardinal temperatures of *Salvia spp* species. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 3, 233-239. (in Farsi)