

## ارزیابی اثر ژئولیت بر گیاه دارویی صبرزد (*Aloe barbadensis* Miller.) رشد کرده در شرایط تنش کم آبی

سعید حضرتی<sup>۱\*</sup>، زین العابدین طهماسبی سروسنانی<sup>۲</sup> و امیررضا صادقی بختوری<sup>۳</sup>

\*۱- نویسنده مسئول، استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان شرقی، تبریز، ایران

پست الکترونیک: saeid.hazrati@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان شرقی، تبریز، ایران

تاریخ پذیرش: اردیبهشت ۱۳۹۶

تاریخ اصلاح نهایی: اردیبهشت ۱۳۹۶

تاریخ دریافت: آبان ۱۳۹۵

### چکیده

صبرزد (*Aloe barbadensis* Miller.) یکی از مهمترین و اقتصادی ترین گیاهان دارویی، در بسیاری از کشورهای دنیا می باشد. به منظور بررسی تأثیر تنش کم آبی و کاربرد ژئولیت بر کاهش اثرات تنش کم آبی گیاه صبرزد آزمایشی در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. گیاهان در سه مرحله ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ روز پس از اعمال تیمارها برداشت شدند. در شدت های بالای تنش کم آبی وزن تر برگ، وزن تر ریشه و رشد گیاه کاهش یافت، اما ترکیب های بیوشیمیایی افزایش پیدا کردند. نتایج آزمایش نشان داد بیشترین تعداد برگ و پاجوش تولید شده توسط هر گیاه به ترتیب در رژیم آبیاری ۲۰٪ و ۴۰٪ تخلیه رطوبت با کاربرد ۸ گرم ژئولیت بدست آمد. به طوری که بیشترین مقدار وزن تر برگ و ریشه در رژیم آبیاری ۶۰٪ ظرفیت زراعی با کاربرد ۸ گرم ژئولیت به ترتیب ۶۲۴/۱۳ و ۳۹۷/۱۷ گرم، ۲۷۰ روز پس از اعمال تیمارها بدست آمد. بیشترین میزان کارایی مصرف آب در تیمار ۴۰٪ ظرفیت آبیاری با کاربرد ۸ گرم ژئولیت و حداقل کارایی مصرف آب در تیمار ۸۰٪ ظرفیت آبیاری بدون کاربرد ژئولیت حاصل شد. بیشترین و کمترین درصد آلوئین به ترتیب ۲۳/۴۸٪ و ۱۰/۸۰٪ در رژیم آبیاری ۸۰٪ تخلیه ظرفیت زراعی و عدم کاربرد ژئولیت ۹۰ روز بعد از اعمال تیمارها و ۴۰٪ تخلیه رطوبت ظرفیت زراعی با کاربرد ۴ گرم ژئولیت ۱۸۰ روز پس از اعمال تیمارها بدست آمد. همچنین بیشترین میزان فروکتوز ۲۳۴/۷۱ و گلوکز ۷۹/۸۳ میلی گرم در هر گرم وزن خشک در تیمار ۲۰٪ ظرفیت آبیاری بدون کاربرد ژئولیت بدست آمد. با افزایش شدت تنش کم آبی تجمع پرولین در برگ های گیاه در مقایسه با تیمار بدون تنش افزایش پیدا کرد و بیشترین میزان در تیمار ۴۰٪ رطوبت ظرفیت زراعی بدون کاربرد ژئولیت ۹۰ روز پس از اعمال تیمارها بدست آمد. بنابراین از نتایج این آزمایش می توان استنباط کرد که استفاده از ژئولیت می تواند با افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک باعث بهبود رشد و عملکرد گیاه شده و اثرات منفی تنش کم آبی را در گیاه صبرزد کاهش دهد. همچنین تحت تنش کم آبی در سطوح معین با تنظیم فشار اسمزی، منجر به افزایش کارایی مصرف آب و ترکیب های بیوشیمیایی در این گیاه شد.

واژه های کلیدی: آلوئین، صبرزد (*Aloe barbadensis* Miller.)، ژئولیت، تنش کم آبی، عملکرد، ترکیب های بیوشیمیایی.

## مقدمه

(2013). محققان گزارش کردند که تحت تأثیر تنش کمبود آب محتوی قند کل، قندهای محلول و همچنین مقدار پرولین، متابولیت‌های ثانویه در گیاه صبرزرد افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند (Joyce؛ Moreira & Filho, 2008). همچنین در بیشتر موارد تنش‌های محیطی باعث افزایش غلظت آلوئین شده است. تنش شوری (Rahimi-Dehghan et al., 2012)، شدت نور بالا (Lucini et al., 2013) و تنش سدیمی (Rahi et al., 2013) باعث افزایش غلظت آلوئین در گیاه صبرزرد شد.

مدیریت زراعی مناسب می‌تواند برای گیاهانی که در مناطق نامساعد به صورت تجاری مورد کشت قرار می‌گیرد مفید واقع شود (Silva et al., 2010). گیاه دارویی صبرزرد به دلیل مقاومت به خشکی و دارا بودن سیستم فتوسنتزی کراسولاسه قابلیت کشت در مناطق خشک (کم‌آب) با مدیریت صحیح آب را دارد. مطالعات مختلفی در زمینه سازگاری صبرزرد به کم‌آبی انجام شده اما عواملی که بتواند میزان آسیب شدت تنش را کاهش دهد بررسی‌های محدودی انجام شده است. افزودن مواد اصلاحی برای بهبود خواص فیزیکی خاک به منظور افزایش کارایی مصرف آب یکی از مهمترین راهکارهای مقابله با کمبود آب به شمار می‌رود (Polat et al., 2004). زئولیت یکی از مهمترین کانی‌ها است که در سراسر مناطق ایران به صورت پراکنده وجود دارد (Sepaskhah & Barzegar, 2010). از خصوصیات مهم آن توانایی آبیگری و پسابیدگی می‌باشد که می‌توان از آن برای بهبود تعادل آب در خاک در شرایط کمبود رطوبت، به‌ویژه در مراحل رشدی حساس به کاهش رطوبت استفاده کرد (Sepaskhah & Gholamhoseini et al., 2012; Barzegar, 2010; Al-Busaidi et al., 2011).

مطالعات مختلفی روی تأثیر زئولیت بر کاهش اثرات خشکی گیاهان انجام شده است. در تحقیقی روی گیاه دارویی صبرزرد زئولیت نقش مؤثری در بهبود رشد رویشی و افزایش متابولیت‌های ثانویه گیاه داشت (Yari et al., 2013). در مطالعه‌ای به منظور کاربرد زئولیت روی گیاه دارویی بادرسبی، نتیجه گرفتند که مصرف ۲۵ گرم زئولیت در

صبرزرد گیاهی گوشتی و چندساله که متعلق به خانواده Xanthorrhoeaceae است که منشأ آن آفریقا می‌باشد و به‌طور گسترده در مناطق گرم و خشک دنیا کشت می‌شود (Ray & Gupta, 2013; Cousins & Witkowski, 2012). حدود ۵۴۸ گونه آلوئه شناسایی شده که در صنعت داروسازی، پزشکی و غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما مهمترین گونه آن صبرزرد با نام علمی *Aloe barbadensis* Miller. می‌باشد (Ray et al., 2013; Cousins & Witkowski, 2012). در میان عوامل محیطی آب یکی از مهمترین و محدودکننده‌ترین عامل در تولید محصولات کشاورزی است که استفاده بهینه از آن ضروری می‌باشد (Sankar et al., 2007; Al-Busaidi et al., 2011). میزان عملکرد در گونه‌های گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک رابطه مستقیم و بالایی با قابلیت دسترسی به آب و تغییرات فصلی دارد، هر چند گیاه صبرزرد مقاوم به خشکی است، اما نیاز آبی آن با توجه به ظرفیت نگهداری رطوبت توسط خاک متفاوت می‌باشد (Cousins & Witkowski, 2012; Delatorre-Herrera et al., 2010). گزارش شده که با کاهش محتوای رطوبت خاک، رشد و عملکرد گیاه صبرزرد کاهش پیدا می‌کند (Rodríguez-García et al., 2007).

کارایی مصرف آب بالا یکی از مهمترین عوامل اکوفیزیولوژیکی دخیل در رشد و نمو است که باعث توسعه گیاهان کراسولاسه در مناطق خشک و کم‌آب شده است (Geerts & Raes, 2007; Rodríguez-García et al., 2009; Lüttge, 2004). گیاه صبرزرد در طول روز روزنه‌های خود را بسته و در شب باز و عمل جذب دی‌اکسید کربن را انجام می‌دهد، و از دست دادن آب در طول دوره روز به حداقل می‌رسد و این عامل باعث افزایش مقاومت به خشکی و کارایی مصرف آب این گیاه می‌گردد (Winter et al., 2005). ترکیب عمده ژل صبرزرد را پلی‌ساکاریدها تشکیل می‌دهند (Hamman, 2008) که محتوی آن با توجه به شرایط محیطی و دوره‌های مختلف رشد متفاوت می‌باشد (Ray et al., 2013; Lucini et al., 2013).

سطح ( $Z_1=0, Z_2=4, Z_3=8$  گرم در هر کیلوگرم خاک) در چهار تکرار اجرا شد.

برای کاشت از گونه *A. barbadensis* که دارای عمر سه ساله بود پاجوش‌هایی به اندازه ۲۰-۱۸ سانتی‌متر و به وزن تقریباً ۱۵۰ گرم از گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی تهیه و گلدان‌هایی با ظرفیت ۱۸ کیلوگرم خاک با ارتفاع ۳۲ و قطر ۳۰ سانتی‌متری که دارای زهکش مناسب بودند انتخاب و بعد درون هر گلدان یک عدد پاجوش کشت شد. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۱ گزارش شده است. به منظور سازگاری و یکسان‌سازی ۲ ماه قبل از اعمال تیمارها پاجوش‌ها در ۳۱ فروردین سال ۱۳۹۲ کشت و تحت آبیاری یکسان قرار گرفتند. سپس گیاهان به مدت ۹ ماه تحت تیمار آبیاری قرار گرفتند. درجه حرارت گلخانه برای رشد گیاه صبرزد ۲۸ درجه سانتی‌گراد در روز و ۲۲ درجه سانتی‌گراد برای شب و همچنین میزان رطوبت نسبی ۷۰٪ در طول دوره آزمایش تنظیم شده بود.

اولین، دومین و سومین نمونه‌گیری و اندازه‌گیری براساس سن گیاه به ترتیب در ۳۱ شهریور ماه ۱۳۹۲ (پایان تابستان یا ۹۰ روز پس از کاشت)، ۳۰ آذر ماه ۱۳۹۲ (پایان پاییز یا ۱۸۰ روز پس از کاشت) و ۳۰ اسفندماه ۱۳۹۲ (پایان زمستان یا ۲۷۰ روز پس از کاشت) انجام شد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

بافت خاک	رطوبت زراعی	پژمردگی دائم	pH (۱:۲)	هدایت الکتریکی (dS/m)	فسفر قابل دسترس	پتاسیم قابل تبادل	نیتروژن کل	کربن آلی
	%	%			(mg g <sup>-1</sup> )		%	%
لومی شنی	۲۹/۴	۵	۷/۵	۱/۶۸	۱۷	۴۳۳	۰/۰۹	۱/۰۹

رطوبت خاک در پتانسیل‌های مختلف تعیین شد. مقدار آب مورد نیاز برای هر تیمار براساس فرمول‌های زیر محاسبه و در اختیار گیاه قرار گرفت.

حداکثر تخلیه آب مجاز قابل دسترس از طریق فرمول ۱ محاسبه گردید (Mokhtassi-Bidgoli et al., 2013).

$$\text{MAD} = (\text{FC} - ) / (\text{FC} - \text{PWP}) \quad \text{فرمول (۱)}$$

۱۲ کیلوگرم خاک همزمان با ۵۰٪ تخلیه رطوبت خاک بالاترین عملکرد و اسانس در گیاه بدست آمد (Gholizadeh et al., 2010). براساس مطالعات انجام شده با استفاده از ژئولیت در شرایط تنش خشکی تا حدودی می‌توان از کاهش عملکرد با استفاده از راهکارهای مدیریتی کاست (Szerement et al., 2014).

با توجه به اهمیت و طیف گسترده مصرف گیاه صبرزد در صنایع دارویی و آرایشی بهداشتی و همچنین مطالعات محدود پیرامون بهبود مدیریت آب و کاهش اثرات مخرب تنش خشکی در این گیاه، این پژوهش به منظور ارزیابی کاربرد ژئولیت در شرایط تنش کم‌آبی بر کاهش اثرات منفی تنش کم‌آبی روی این گیاه و بررسی میزان تغییر قندهای محلول و متابولیت‌های ثانویه در شرایط تنش کم‌آبی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

این تحقیق به صورت آزمایش فاکتوریل در زمان در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس ایران در سالهای ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار سطح تنش کم‌آبی (۲۰، ۴۰، ۸۰، ۶۰ درصد تخلیه ظرفیت زراعی در کل دوره رشد) و ژئولیت طبیعی در سه

برای اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک از دستگاه رطوبت‌سنج (TDR Time Domain Reflectometry) با مارک TRIME-FM مدل ۱۰۷۷۶ ساخت کشور آلمان، با حسگر سه‌شاخه‌ای تدفینی به طول ۲۰ سانتی‌متر که ۱۵ سانتی‌متر آن در خاک فرو می‌رفت، استفاده گردید. به منظور برآورد رطوبت خاک و تعیین منحنی رطوبتی، از خاک نمونه‌برداری شده و در آزمایشگاه به وسیله دستگاه صفحات فشاری میزان

۳ میلی لیتر اسید سولفوسالیسیلیک ۳٪ به خوبی ساییده شد و پس از جداسازی ذرات معلق به وسیله سانتریفیوژ با دور ۱۲۰۰۰ به مدت ۲۰ دقیقه، ۱ میلی لیتر از عصاره صاف شده را به لوله‌های در دار حاوی ۲ میلی لیتر معرف نین‌هیدرین (حاصل ترکیب ۱/۲۵ گرم نین‌هیدرین در ۳۰ میلی لیتر اسید استیک گلاسیال و ۲۰ میلی لیتر اسید فسفریک ۶ مولار) و ۲ میلی لیتر اسید استیک گلاسیال اضافه و پس از بستن در لوله‌ها به مدت یک ساعت در آب  $100^{\circ}\text{C}$  قرار داده شدند. پس از سرد شدن، به نمونه آزمایشی مقدار ۴ میلی لیتر تولوئن اضافه و با استفاده از دستگاه ورتکس به مدت ۲۰ ثانیه لوله‌ها تکان داده شد. فاز رویی را که به رنگ قرمز و حاوی پرولین محلول در تولوئن بوده برداشته و همزمان با نمونه‌های استاندارد در دستگاه اسپکتروفوتومتر قرار گرفت و اعداد در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت گردید.

#### اندازه‌گیری قندهای محلول

قندهای محلول در پایان دوره رشد یعنی ۲۷۰ روز پس از اعمال تیمارها مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. برای اندازه‌گیری آنها از روش Sturm و همکاران (۲۰۰۳) با کمی تغییرات با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (High Performance Liquid Chromatography) (HPLC) (Agilent Technologies 1200 series) با ستون Zorbax Carbohydrate 5Micron,  $4.6 \times 250$  mm و دتکتور RID استفاده شد. استانداردهای قندهای (فروکتوز، گلوکز، زایلوز، ساکارز، مالتوز) را در آب دو بار تقطیر شده در غلظت‌های ۲۰۰۰ ppm، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۲۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ ساخته و منحنی کالیبراسیون با استفاده از غلظت‌های ساخته شده رسم گردید.

#### آماده‌سازی نمونه

۲۰ گرم از نمونه پودر ژل خشک را در ۲ میلی لیتر آب دوبار تقطیر شده حل و بعد نمونه‌ها به مدت ۱۸ دقیقه در دور ۶۰۰۰ سانتریفیوژ شدند. عصاره بدست آمده از فیلتر ۰/۴۵ عبور و ۲۰ میکرولیتر از نمونه فیلتر شده به دستگاه HPLC تزریق گردید.

که در این فرمول، MAD: حداکثر مقدار مجاز تخلیه رطوبت در منطقه فعال ریشه، FC: درصد رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی خاک، درصد رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR و PWP درصد رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی دائم است. براساس این فرمول، حداکثر مقدار مجاز تخلیه رطوبت برای چهار تیمار آبیاری ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه ظرفیت زراعی به ترتیب برابر ۰/۲۶۳، ۰/۱۹۷، ۰/۱۳۱ و ۰/۰۶۶ بود. حجم آب مورد نیاز برای هر تیمار از طریق فرمول‌های ۲ و ۳ برآورد شد.

$$\text{فرمول (۲)} \quad \text{ASW} = \text{FC} - \text{PWP}$$

$$\text{فرمول (۳)} \quad V_d = \text{MAD} \times \text{ASW} \times R_z \times 10$$

که در فرمول‌های ۲ و ۳، ASW آب قابل دسترس خاک می‌باشد که مقدار آن  $13/26$  سانتی‌متر بر متر بود،  $V_d =$  حجم آب آبیاری (میلی‌متر)،  $R_z =$  عمق گلدان (۰/۳۲ متر) و عدد ۱۰ تبدیل سانتی‌متر به میلی‌متر می‌باشد.

برای اندازه‌گیری صفات از هر ۵ گیاه کشت شده برای هر تیمار در هر تکرار چهار گیاه انتخاب و ارتفاع، تعداد برگ و پاجوش هر گیاه مورد اندازه‌گیری و شمارش قرار گرفت. در مرحله بعد برگ‌هایی بالغ‌تر که در قسمت بیرونی و پایین ساقه قرار گرفته بودند برای اندازه‌گیری صفات مورد نظر برداشت و به آزمایشگاه منتقل شدند و با استفاده از ترازوی دیجیتال وزن و بعد پارانشیم رویی و زیری برگ از هم جدا و وزن تر ژل و پوست برگ اندازه‌گیری شد.

#### محاسبه کارآیی مصرف آب

مقدار کارآیی مصرف آب در پایان دوره رشد از طریق مقدار عملکرد به آب مصرف شده محاسبه گردید (Silva et al., 2010). واحد محاسبه بر حسب مقدار محصول تولید شده بر حسب گرم به‌ازاء هر لیتر آب مصرفی ( $\text{g L}^{-1}$ ) بدست آمد.

#### اندازه‌گیری پرولین

برای اندازه‌گیری پرولین محتوای بافت برگ از روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) استفاده شد. مقدار ۰/۲ گرم برگ در

## سنجش غلظت آلوتین

کم‌آبی با کاربرد ۸ گرم زئولیت افزایش پیدا کردند. به‌طوری که ۲۷۰ روز بعد از اعمال تیمارها تعداد ۲۲/۸۶ در تیمار ۲۰٪ تخلیه رطوبت و ۲۱/۹۱ در تیمار ۴۰٪ تخلیه رطوبت، ۲۱ در تیمار ۶۰٪ و ۲۰/۷۵ در ۸۰٪ تخلیه رطوبت بدون کاربرد زئولیت بدست آمد (جدول ۳). همچنین کاربرد زئولیت منجر به افزایش تعداد برگ در مقایسه با تیمار بدون کاربرد زئولیت شد، به‌نحوی که بیشترین تعداد برگ ۲۲/۲۵ عدد در تیمار ۸ گرم زئولیت ۲۷۰ روز بعد بدست آمد. نتایج آزمایش نشان داد که کاربرد همزمان تنش کم‌آبی و زئولیت بر تعداد پاجوش تأثیر معنی‌داری دارد (جدول ۲)، به‌طوری که بیشترین تعداد پاجوش در تیمار ۴۰٪ تخلیه رطوبت با کاربرد ۸ گرم زئولیت بدست آمد (شکل ۱). همچنین زمان‌های مختلف بر تعداد پاجوش تأثیر گذاشته بودند، به‌طوری که به‌ترتیب ۳/۸۵، ۲/۹۶ و ۳/۰۴۸ عدد پاجوش در ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ روز پس از اعمال تیمارها حاصل شد.

## وزن تر برگ و ژل

براساس نتایج تحقیق وزن تر برگ و ژل تحت تأثیر تیمار کم‌آبی و زئولیت در مراحل مختلف رشد قرار گرفت (جدول ۲). مقایسه میانگین تیمارها نشان داد با افزایش قابلیت دسترسی به آب بر وزن تر برگ و ژل افزوده شد، به‌طوری که در هر سه زمان بیشترین وزن تر برگ و ژل در آبیاری ۶۰٪ ظرفیت زراعی بدست آمد، که در برداشت اول با تیمار ۲۰٪ ظرفیت زراعی وزن برگ ۳۸/۷ و وزن ژل ۳۵٪ بیشتر بود، در مقایسه با ۴۰٪ ظرفیت آبیاری وزن تر برگ و ژل به‌ترتیب ۲۶٪ و ۲۲٪ بیشتر بودند اما با تیمار ۸۰٪ ظرفیت آبیاری تفاوتی از لحاظ آماری در وزن تر برگ و ژل مشاهده نشد.

در برداشت دوم در مقایسه با ۲۰٪ ظرفیت آبیاری وزن تر برگ ۳۵٪ و وزن تر ژل ۳۳٪ و با تیمار ۴۰٪ ظرفیت زراعی وزن تر برگ و ژل به‌ترتیب ۱۸ و ۱۹٪ بیشتر بود. همچنین در برداشت مرحله سوم وزن تر برگ و ژل به‌ترتیب ۳۸٪ و ۳۴٪ نسبت به سطح ۸۰٪ تخلیه رطوبت، ۲۰٪ و ۱۶٪ نسبت به سطح ۶۰٪ تخلیه رطوبت بیشتر بود (جدول ۳).

برای سنجش غلظت آلوتین از روش Waller و همکاران (۲۰۰۴) استفاده شد. غلظت آلوتین با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) شرکت واترز (Waters, USA) مجهز به آشکارساز (Waters UV-Vis model 2487) جداسازی و تعیین مقدار شدند. برای جداسازی این ترکیب از ستون  $\mu\text{Bondapak}^{\text{TM}} \text{C}_{18}$  (4.6×250mm, dp) استفاده گردید. (10μm)

محلول استوک آلوتین با غلظت ۵۰۰۰ ppm در حلال‌های آب و متانول به نسبت ۱:۱ تهیه و محلول‌های استاندارد با غلظت‌های ۲۵، ۵۰، ۸۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ تهیه و منحنی استاندارد با استفاده از این غلظت‌ها رسم شد.

به‌منظور خالص‌سازی ترکیب‌های فنولیک از کارتریج (Cartridge) (Sep-Pak C18, 100 mg) عبور داده شد و ۲۰ میکرولیتر از نمونه با استفاده از سرنگ به سیستم HPLC تزریق شد. دتکتور UV در دو طول موج کانال A ۲۷۵ و کانال B ۳۶۵ نانومتر تنظیم شدند و غلظت آلوتین نمونه‌ها با استفاده از کالیبراسیون منحنی‌ها بدست آمد.

## تجزیه و تحلیل آماری

بعد از اطمینان از توزیع نرمال باقیمانده‌ها، تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار (SAS9.2) و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵٪ انجام شد.

## نتایج

## رشد و عملکرد گیاه

## تعداد برگ و پاجوش

براساس نتایج جدول ۲ تنش کم‌آبی و زئولیت در زمان‌های مختلف رشد، تأثیر معنی‌داری بر تعداد برگ و پاجوش گیاه صبرزرد داشتند. بیشترین و کمترین تعداد برگ در هر سه زمان به‌ترتیب در تیمار ۲۰٪ و ۸۰٪ تخلیه رطوبت زراعی بدست آمد. تعداد برگ‌ها از ۸ برگی در مرحله کاشت تا ۲۴/۲۵ برگی در زمان برداشت نهایی در شرایط بدون تنش

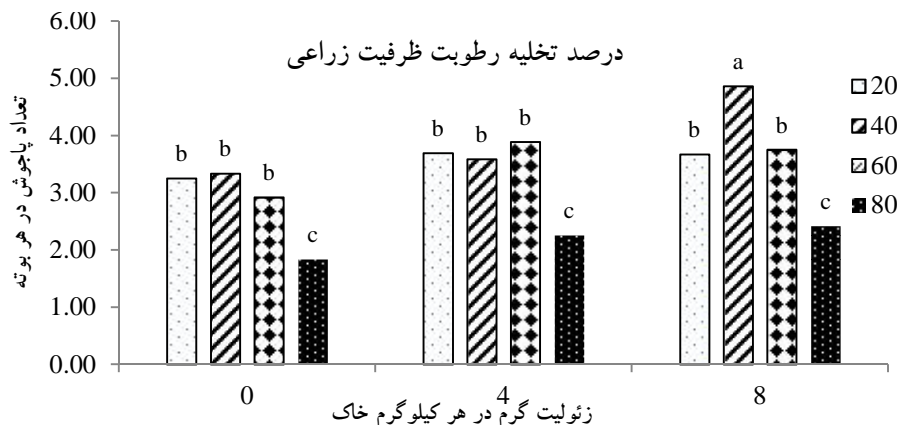
جدول ۲- تجزیه واریانس صفات عملکردی با مصرف زئولیت تحت تأثیر تنش کم آبی در دوره‌های مختلف رشد گیاه صبرزرد

منابع تغییرات	درجه آزادی	تعداد برگ	وزن برگ	وزن ژل	تعداد پاجوش
بلوک	۳	۰/۱۶۷	۷۹۱۵/۰۹۴	۶۴۶۱/۵۴	۱/۸۲۷ **
آبیاری	۳	۵۷/۶۹ **	۱۳۹۳۶۹/۳۸ **	۵۰۵۴۳/۱۴ *	۲۱/۳۳۴ **
زئولیت	۲	۹/۵۶ **	۶۰۹۵۱/۱۴ **	۲۶۳۷۱/۵۸ *	۸/۶۲۰ **
آبیاری×زئولیت	۶	۰/۵۶	۷۰۷۸/۱۴۶ **	۴۱۱۲/۰۳	۱/۵۱۶ *
خطای اصلی	۳۳	۰/۶۵	۲۷۴۵/۸۸	۱۸۲۴/۳۷	۰/۵۱۲
زمان	۲	۱۰۰۲/۲۹ *	۶۰۸۵۱۶/۶۳ **	۲۳۱۹۰۶/۹۳ *	۱۱/۴۰ *
زمان×آبیاری	۶	۱/۸۸ **	۵۹۳۳/۷۹ **	۴۷۰۷/۷۱ *	۰/۹۴۴
زمان×زئولیت	۴	۲/۶۸ **	۹۲۹۱/۳۸ **	۵۹۶۲/۵۱ *	۱/۱۴۱
زمان×آبیاری×زئولیت	۱۲	۰/۷۹ *	۳۲۱۰/۵۵ *	۲۵۶۳/۶۴ *	۰/۷۳۸
خطای فرعی	۷۲	۰/۴۶	۱۸۲۱/۱۴	۱۲۶۷/۸۳	۰/۵۲۶
ضریب تغییرات (%)	-	۴/۰۱	۱۳/۳۹	۱۶/۹۹	۲۲/۰۷

\*\* و \* : به ترتیب نشانگر معنی دار بودن در سطح آماری ۱٪ و ۵٪ و بدون علامت نشانگر عدم معنی دار بودن است.

به طوری که بیشترین مقدار در تیمار ۲۰٪ تخلیه رطوبت با کاربرد ۸ گرم زئولیت بدست آمد، همچنین در تیمارهایی که شدت تنش کم آبی بالا بود کاربرد زئولیت نسبت به عدم کاربرد آن باعث افزایش عملکرد وزن تر برگ و ژل گردید (جدول ۳).

همچنین نتایج آزمایش نشان داد که کاربرد زئولیت باعث افزایش وزن تر برگ و ژل شد. در هر سه مرحله برداشت بیشترین میزان وزن تر برگ و ژل در کاربرد ۸ گرم زئولیت بدست آمد (جدول ۳). همچنین کاربرد همزمان تنش کم آبی و زئولیت بر وزن تر برگ و ژل تأثیر معنی داری داشت،



شکل ۱- تأثیر برهم کنش تنش کم آبی و زئولیت بر تعداد پاجوش

حروف مشابه در هر ستون نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ می باشد.

جدول ۳- مقایسه میانگین کاربرد همزمان زئولیت و تنش کم آبی در مراحل مختلف برداشت بر تعداد برگ و عملکرد صبرزرد

روزهای بعد از اعمال تیمار (تاریخ)										
۲۷۰ روز یا پایان زمستان			۱۸۰ روز یا پایان پاییز			۹۰ روز یا پایان تابستان			تیمار	
تعداد برگ	وزن ژل	وزن برگ	تعداد برگ	وزن ژل	وزن برگ	تعداد برگ	وزن ژل	وزن برگ	سطوح زئولیت	تخلیه رطوبت
در بوته	(g)	(g)	در بوته	(g)	(g)	در بوته	(g)	(g)	(g kg <sup>-1</sup> soil)	(درصد ظرفیت زراعی)
۲۲bc	۲۳۲/۹۹cd	۳۹۹/۴۱def	۱۷/۷۵ab	۱۸۰cd	۳۱۷/۸۰cd	۱۳bc	۱۱۷/۶۳a	۱۹۵/۲۰ cdef	۰	
۲۳/۳۰bc	۲۵۶/۵۳cde	۴۳۶/۵۰cde	۱۸/۷۵a	۱۸۰/۲۸cd	۳۰۳/۱۷cd	۱۳/۷۵ab	۱۳۲/۷۰a	۲۲۲/۶۰bcd	۴	۲۰
۲۴/۲۵a	۳۵۳/۸۸ab	۵۶۶/۱۲ab	۱۸ab	۱۴۱/۳۰ab	۴۰۵/۸۰a	۱۴/۲۵a	۱۸۵/۱۷a	۲۹۶/۴۶a	۸	
۲۱/۵۰cde	۲۹۴/۴۵bc	۴۹۰/۸۷bc	۱۸/۲۵ab	۲۴۵/۱۵a	۳۹۹/۲۵a	۱۳bc	۱۴۴/۰۸a	۲۴۰/۱۵bc	۰	
۲۱/۷۵bcd	۲۷۱/۵۸cd	۴۵۶/۱۵cd	۱۷/۷۵ab	۲۰۸/۸۵abc	۳۴۰/۰۵bc	۱۴a	۱۵۹/۶۰a	۲۶۶/۵۷ab	۴	۴۰
۲۲/۵۰b	۳۹۷/۱۷a	۶۲۴/۱۳a	۱۷/۵۰bc	۲۱۹/۲۳ab	۳۸۱/۶۲ab	۱۴a	۱۳۴/۵۸ab	۲۴۸/۱۵b	۸	
۲۰/۵۰f	۲۰۳/۲۰def	۳۴۸/۵۷efg	۱۵/۷۵de	۱۶۱de	۲۷۱/۵۲de	۱۰/۵۰f	۱۱۲/۴۰ab	۱۷۸/۶۲defg	۰	
۲۱def	۳۰۷/۳۰bc	۴۲۴/۲۷cde	۱۶/۵۰cd	۱۷۸/۱۰cd	۳۰۵/۸۲cd	۱۲/۲۵cd	۱۰۳/۲۵a	۱۷۹/۵۷defg	۴	۶۰
۲۱/۵۰cde	۲۹۹/۸۰bc	۴۸۰/۸۷bcd	۱۵/۷۵de	۲۰۶/۱۸bc	۳۳۳/۳۲bc	۱۲/۵۰c	۱۲۳/۷۸a	۲۰۰/۰۵cde	۸	
۲۰/۷۵ef	۱۵۴/۵۵f	۲۸۲/۰۵g	۱۴/۲۵f	۱۳۹e	۲۲۱/۵۰e	۱۰/۲۵f	۹۰/۸۵ab	۱۵۰/۴۲fg	۰	
۲۰/۷۵ef	۲۰۳/۵۳def	۳۵۰/۶۵efg	۱۵/۵۰de	۱۴۴/۲۰de	۲۳۴/۷۲e	۱۱ef	۹۰/۶۸ab	۱۴۵/۵۷g	۴	۸۰
۲۰/۷۵ef	۱۹۱/۲۵def	۳۳۲/۰۵fg	۱۵/۲۵ef	۱۶۵/۳۸de	۲۷۰/۹۷de	۱۱/۵۰de	۱۰۴/۹۸ab	۱۶۶/۷۷efg	۸	

حروف مشابه در هر ستون نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ می باشد.



کارآیی مصرف آب

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که تنش کم آبی و زئولیت و همچنین اثر متقابل تنش کم آبی با زئولیت بر کارآیی مصرف آب تأثیر معنی داری داشت (جدول ۴). براساس شکل‌های ۲ و ۳ کارآیی مصرف آب تحت تأثیر تنش کم آبی و زئولیت قرار گرفت، به طوری که بیشترین میزان کارآیی مصرف آب وزن تر برگ و ژل در تیمار تخلیه

۶۰٪ رطوبت زراعی با کاربرد ۸ گرم زئولیت به ترتیب ۲۰/۸۱ و ۱۳/۳ گرم به ازاء هر لیتر آب مصرفی و کمترین میزان آن در آبیاری ۸۰٪ ظرفیت زراعی (شاهد) به ترتیب ۱۳/۲۷ و ۸/۰۱ گرم بر لیتر بدست آمد و با افزایش شدت تنش کم آبی بر کارآیی مصرف آب افزوده شد. البته میزان کارآیی مصرف آب در همه تیمارهای تحت تنش نسبت به شاهد بیشتر بود.

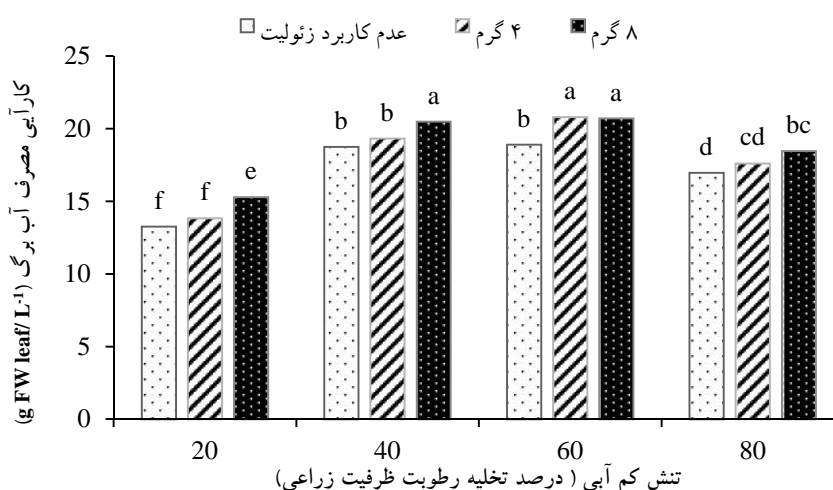
جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر عامل‌های آزمایشی بر کارآیی مصرف آب و قندهای محلول در گیاه صبرزرد

منابع تغییرات	درجه آزادی	کارآیی مصرف آب برگ	کارآیی مصرف آب ژل	فروکتور	گلوکز
بلوک	۲	۰/۳۱۰	۲/۶۳	۴۹/۶۳	۱۵/۰۵
آبیاری	۳	۶/۹۲ **	۱/۴۰ **	۴۶۷۳۶/۹۹ **	۲/۳۶ **
زئولیت	۲	۵۸/۴۵ **	۱۸/۴۷	۱۳۶۶/۷۵ **	۴۲۶۵/۸۱ **
آبیاری×زئولیت	۶	۰/۷۲ **	۱/۷۷ *	۱۰۲۹/۸۵ **	۵۶/۷۳ **
خطای آزمایش	۲۲	۰/۴۶	۰/۹۵	۲۸/۹۶	۶/۳۶
ضریب تغییرات (%)	-	۳/۸۰	۹/۱۹	۴/۷۷	۵/۹۷

\* و \*\*: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪

کرده بود، بیشترین میزان کارآیی مصرف آب برگ و ژل در کاربرد همزمان تیمار ۶۰٪ تخلیه رطوبتی با ۸ گرم زئولیت بدست آمد که نسبت به تیمار ۲۰٪ تخلیه رطوبتی بدون کاربرد، به ترتیب ۳۶٪ و ۴۰٪ بیشتر بود.

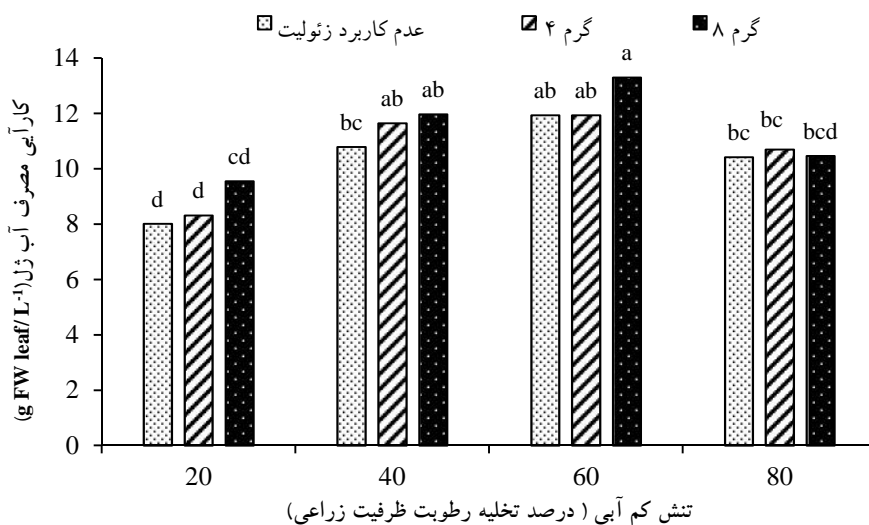
در این آزمایش کانی زئولیت باعث افزایش کارآیی مصرف آب گردید، به طوری که با کاربرد ۸ گرم زئولیت بیشترین میزان کارآیی مصرف آب بدست آمد و کاربرد زئولیت از کاهش عملکرد در مواجهه تنش کم آبی جلوگیری



شکل ۲- کارآیی مصرف آب برگ در گیاه صبرزرد تحت رژیم‌های مختلف آبیاری با کاربرد زئولیت

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ می‌باشد.





شکل ۳- کارآیی مصرف آب ژل در گیاه صبرزرد تحت رژیم‌های مختلف آبیاری با کاربرد زئولیت

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ می‌باشد.

تنش آبیاری بدون کاربرد زئولیت به ترتیب ۲۳۴/۷۱ و ۷۹/۸۳ میلی‌گرم در هر گرم بدست آمد و با کاهش میزان شدت تنش از مقدار این دو قند در ژل کاسته شد. بیشترین میزان قند فروکتوز و گلوکز که قند غالب ژل صبرزرد است در تیمار ۸۰٪ تخلیه رطوبت بدست آمد که با تیمار ۲۰٪ تخلیه رطوبت زراعی با و بدون کاربرد زئولیت به ترتیب ۸۲/۹٪ و ۷۱٪ بیشتر بود.

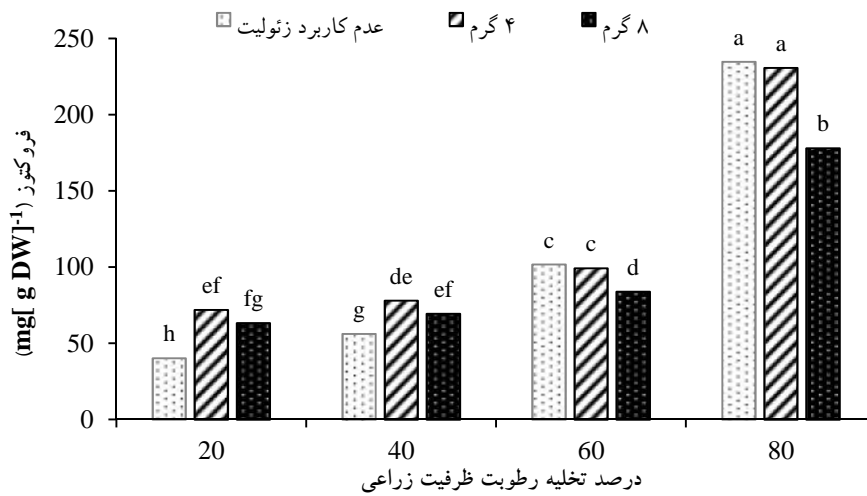
#### پرولین

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که تنش کم آبی، زئولیت، زمان برداشت و همچنین اثر متقابل تنش کم آبی با زئولیت در دوره‌های مختلف برداشت بر میزان پرولین تأثیر معنی‌داری داشت (جدول ۵). نتایج آزمایش نشان داد که گیاه صبرزرد تحت تنش کم آبی تجمع پرولین را در برگ‌های خود افزایش می‌دهد. بیشترین تجمع در تیمار ۴۰٪ رطوبت زراعی بدون کاربرد زئولیت ۲۷۰ روز پس از اعمال تیمارها بدست آمد که در مقایسه با تیمار آبیاری ۶۰٪ رطوبت زراعی با کاربرد ۸ گرم زئولیت ۷۸٪ بیشتر بود (جدول ۶).

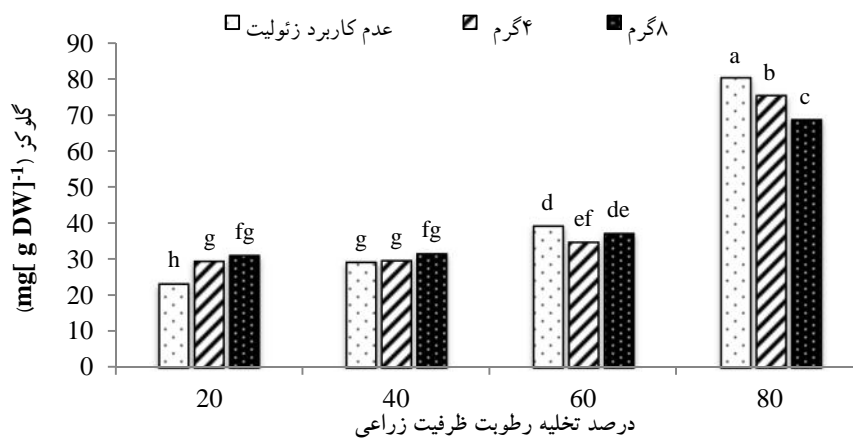
#### ترکیب‌های بیوشیمیایی

##### قندهای محلول

در این آزمایش میزان قندهای محلول موجود در پودر ژل خشک مورد سنجش قرار گرفت و براساس نتایج بدست آمده فقط قندهای محلول گلوکز و فروکتوز در ژل خشک صبرزرد در بین قندهای فروکتوز، گلوکز، زایلوز، ساکارز و مالتوز براساس استاندارد تزریق شده مشاهده گردید. محققان دیگری همچنین گزارش کردند که قندهای اصلی ذخیره‌ای در صبرزرد گلوکز و فرکتور می‌باشد (Christopher & Holtum, 1996; Paez et al., 2000). نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که تنش کم آبی و زئولیت و همچنین اثر متقابل تنش کم آبی با زئولیت بر میزان قندهای محلول تأثیر معنی‌داری داشت (جدول ۴). براساس شکل‌های ۴ و ۵ میزان قند فروکتوز نسبت به گلوکز در ژل بیشتر مشاهده شد. به‌طور کلی، مقدار هر دو قند موجود در ژل با افزایش شدت تنش کم آبی افزایش معنی‌داری پیدا کرده بودند. اگرچه این افزایش در بین تیمارهای مختلف متفاوت بود. بیشترین مقدار فروکتوز و گلوکز در رژیم آبیاری ۲۰٪ ظرفیت زراعی یا سطح ۴



شکل ۴- میانگین غلظت فروکتوز صبرزرد رشد کرده تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری با کاربرد ژئولیت ۹ ماه بعد از اعمال تیمارها حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ می‌باشد.



شکل ۵- میانگین غلظت گلوکز صبرزرد رشد کرده تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری با کاربرد ژئولیت ۹ ماه بعد از اعمال تیمارها حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ می‌باشد.

### غلظت آلونین

و کمترین غلظت آلونین (۱۰/۸۰٪) رژیم آبیاری ۲۰٪ ظرفیت زراعی + کاربرد ۴ گرم ژئولیت در مرحله دوم حاصل شد (جدول ۶)، همچنین یک رابطه معکوس بین عملکرد و غلظت آلونین مشاهده گردید. البته کاربرد ژئولیت در شرایط تنش کم‌آبی در مقایسه با تیمار عدم کاربرد ژئولیت از شدت تنش آبی کاسته و از افزایش غلظت آلونین جلوگیری کرده بود.

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که تنش کم‌آبی، ژئولیت، زمان برداشت و همچنین اثر متقابل تنش کم‌آبی با ژئولیت در دوره‌های مختلف برداشت بر میزان غلظت آلونین تأثیر معنی‌داری داشت (جدول ۵). با افزایش شدت تنش کم‌آبی بر میزان غلظت آلونین افزوده شد. در بین تیمارها بیشترین غلظت آلونین (۲۳/۴۸٪) در رژیم آبیاری ۸۰٪ تخلیه رطوبت زراعی + بدون کاربرد ژئولیت در برداشت اول

جدول ۵- تجزیه واریانس پرولین و آلوتین گیاه صبرزرد تحت تأثیر تنش کم آبی و زئولیت

منابع تغییرات	درجه آزادی	پرولین	آلوتین
بلوک	۲	۰/۰۰۲۶	۱/۰۲۳
آبیاری	۳	۱/۸۲ **	۳۱/۴۷ **
زئولیت	۲	۰/۴۱ **	۱۴۲/۹۱ **
آبیاری×زئولیت	۶	۰/۱۰۵ **	۲/۷۷ **
خطای اصلی	۲۲	۰/۰۱۳۰	۰/۳۹۲
زمان	۲	۰/۲۰۱ **	۱۰۸/۷۱ **
زمان×آبیاری	۶	۰/۰۲۴ *	۲/۶۰ **
زمان×زئولیت	۴	۰/۰۴۸ **	۱۹/۸۵ **
زمان×آبیاری×زئولیت	۱۲	۰/۰۲۷ **	۶/۱۸ **
خطای فرعی	۴۸	۰/۰۰۹۶	۰/۳۶۷
ضریب تغییرات (%)	-	۱۱/۰۷	۳/۶۶

\* و \*\*: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪ براساس آزمون LSD

جدول ۶- مقایسه میانگین پرولین و درصد آلوتین تحت تأثیر کاربرد همزمان تیمارها در زمان‌های مختلف برداشت

روزهای بعد از اعمال تیمار (تاریخ)							تیمار
۲۷۰ روز یا پایان زمستان		۱۸۰ روز یا پایان پاییز		۹۰ روز یا پایان تابستان			
غلظت آلوتین (%)	پرولین (mg [g FW] <sup>-1</sup> )	غلظت آلوتین (%)	پرولین (mg [g FW] <sup>-1</sup> )	غلظت آلوتین (%)	پرولین (mg [g FW] <sup>-1</sup> )	سطوح زئولیت (g kg <sup>-1</sup> soil)	تنش کم آبی (تخلیه رطوبت ظرفیت زراعی)
۱۲/۴۵gh	۰/۷۴c	۱۴/۶۷abc	۰/۷۷bcd	۱۹/۶۵b	۰/۷۵de	۰	
۱۱/۲۲i	۰/۷۹c	۱۰/۸۰bc	۰/۵۴e	۱۷/۱۴fg	۰/۷۱de	۴	۲۰
۱۲/۲۱h	۰/۵۴d	۱۵/۲۸ab	۰/۶۰de	۱۱/۵۸h	۰/۶۲ef	۸	
۱۳/۶۳f	۰/۸۰c	۱۵/۶۶a	۰/۸۵bc	۱۹/۱۸c	۰/۸۲d	۰	
۱۲/۶۰gh	۰/۷۸c	۱۵/۶۷a	۰/۶۱cde	۱۷/۲۸efg	۰/۸۴d	۴	۴۰
۱۳/۲۲fg	۰/۴۰d	۱۵/۹۹a	۰/۳۱f	۱۵/۹۹g	۰/۵۵f	۸	
۱۵/۱۹e	۱/۲۴a	۱۸/۳۴a	۱/۳۵a	۲۰/۷۱b	۱/۴۵a	۰	
۱۷/۷۸b	۱/۰۴b	۱۶/۷۵a	۱/۲۵a	۱۷/۷۸def	۱/۱۸b	۴	۶۰
۱۵/۷۱de	۱/۰۳b	۱۷/۸۸a	۰/۸۶bc	۱۸/۴۲cdef	۱/۲۱b	۸	
۱۸/۸۳a	۱/۰۴b	۱۹/۲۲a	۰/۹۸b	۲۳/۴۸a	۱/۱۵b	۰	
۱۸/۴۲ab	۰/۹۷b	۱۸/۷۷a	۰/۹۲b	۱۹/۴۷bc	۱c	۴	۸۰
۱۶/۷۵c	۰/۹۹b	۱۷/۹۶a	۰/۸۷b	۱۹cd	۱/۳۸a	۸	

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ می‌باشد.

## بحث

این آزمایش نشان داد که میزان عملکرد برگ و ژل در گیاه صبرزرد در طول دوره رشد تحت تأثیر شدت‌های بالای تنش کم‌آبی کاهش یافت که با نتایج Rodríguez-García و همکاران (۲۰۰۷) و Hernandez و همکاران (۲۰۰۲) مطابقت دارد. Rodríguez-García و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که توان آب خاک پایین عملکرد تر برگ و ژل، میزان رشد گیاه و تولید برگ را در گیاه صبرزرد کاهش می‌دهد. در این تحقیق مشاهده شد که آبیاری ۲۰٪ تخلیه رطوبت زراعی در مقایسه با تیمار ۴۰٪ تخلیه رطوبت زراعی تفاوت معنی‌داری بر میزان عملکرد ندارد، همچنین در بعضی مواقع میزان عملکرد در تیمار ۴۰٪ بیشتر بود. در کل میزان کاهش رشد و عملکرد در شدت‌های بالای تنش کم‌آبی بیشتر بود. همچنین محققان متعددی گزارش کردند که گیاه صبرزرد روزه‌های خود را در شرایط تنش کم‌آبی باز نگه‌داشته و عمل فتوسنتز را به خوبی انجام می‌دهد و از کاهش زیاد عملکرد جلوگیری می‌کند (Rodríguez-García؛ Lüttge, 2004). نتایج Cousins & Witkowski, 2012؛ *et al.*, 2007 نشان داد که کاربرد کانی ژئولیت توانسته بود از اثرات تنش کم‌آبی بکاهد، به طوری که کاربرد ۸ گرم ژئولیت تفاوت قابل ملاحظه‌ای را با تیمار بدون کاربرد ژئولیت در رشد و عملکرد صبرزرد داشت که می‌تواند به دلیل ذخیره آب و عناصر غذایی در کانال‌های ژئولیت و همچنین جلوگیری از آب‌شویی عناصر باشد. همچنین در شرایط تنش آبی ژئولیت مانند یک مخزن آب عمل کرده و در طی خشکی مدت زمان نگهداری آب را در خاک افزایش می‌دهد. مطالعات دیگر محققان این نتایج را تأیید می‌کند. در مطالعه‌ای Gholamhoseini و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که کاربرد ژئولیت باعث افزایش عملکرد در گیاه ذرت می‌گردد. همچنین در مطالعه دیگری توسط قلی‌زاده و همکاران (۲۰۱۰) کاربرد ژئولیت میزان عملکرد تر و خشک را در گیاه دارویی بادرسبی در شرایط بدون و با تنش کم‌آبی افزایش داد.

تعداد برگ یکی از مهمترین فاکتورهای تعیین‌کننده در رشد و عملکرد گیاه صبرزرد می‌باشد، همانطور که نتایج این تحقیق نشان داد شدت بالای تنش کم‌آبی باعث کاهش تعداد برگ تولیدی در گیاه صبرزرد شد. در مطالعه‌ای کاهش تبخیر تا حد ۲۰ میلی‌متر از سطح تشتک تبخیر تعداد برگ را تا ۸/۶ کاهش داد، همچنین بیشترین تعداد برگ در طول دوره تابستان به دلیل درجه حرارت بالا در این فصل بدست آمد (Silva *et al.*, 2010). در این آزمایش میزان افزایش تعداد برگ در ۹۰ روز بعد از اعمال تیمار که همزمان با فصل تابستان بود نسبت به زمان‌های دیگر بیشتر بود. براساس گزارش محققان دیگر میزان افزایش تعداد برگ تولیدی به طور نرمال در هر ماه برای گیاه صبرزرد ۱/۸ بود که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد (Hernandez *et al.*, 2002).

روش اصلی تکثیر صبرزرد، از طریق پاجوش می‌باشد. پاجوش‌ها از انتهای استولون‌های کوتاه گیاه مادری تولید می‌شوند (Hazrati-Yadkori & Tahmasebi-Sarvestani, 2012). براساس نتایج محققان تنش‌های محیطی روی تولید پاجوش تأثیر می‌گذارند. در مطالعه‌ای تعداد پاجوش تولیدی در گیاه صبرزرد با کاهش محتوی رطوبت خاک کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرد (Silva *et al.*, 2010). همان‌طور که نتایج این آزمایش نشان داد با افزایش شدت تنش کم‌آبی تعداد پاجوش روند نزولی داشته است، در برداشت اول که مصادف بود با فصل تابستان بیشترین تعداد پاجوش بدست آمد، دلیل افزایش تعداد پاجوش در فصل تابستان در مقایسه با فصل‌های دیگر سال ممکن است به دلیل شدت تابش بیشتر نور در این دوره باشد که محققان دیگر هم افزایش تعداد پاجوش در شدت تابش بیشتر نور را گزارش کردند (Paez *et al.*, 2000). همچنین کاربرد ژئولیت باعث افزایش تعداد پاجوش و برگ تولیدی در گیاه صبرزرد در دوره‌های مختلف رشد شد، به طوری که در تیمار ۸۰٪ تخلیه رطوبت کاربرد ژئولیت باعث افزایش تعداد قابل توجهی در پاجوش و برگ در مقایسه با بدون کاربرد ژئولیت گردید.

فقط قندهای محلول موجود در ژل خشک مورد سنجش قرار گرفت. کمیت و کیفیت ترکیب‌های موجود در ژل صبرزد در شرایط تنش کم‌آبی تغییر می‌کند. قندهای محلول یکی از مهمترین و ترکیب غالب ژل صبرزد می‌باشد (Hamman, 2008) که در مقاومت به تنش خشکی نقش داشته و به تقسیم سلولی و رشد برگ‌ها کمک می‌کنند (Delatorre-Herrera et al., 2010). در مطالعه‌ای، غالب کربوهیدرات‌های محلول موجود در ژل صبرزد دو قند گلوکز و فروکتوز بود که در تابش ۱۰۰٪ نور کامل خورشید مقدار این دو قند محلول افزایش پیدا کرد (Paez et al., 2000). همچنین در مطالعه‌ای دیگر مواد جامد محلول موجود در ژل صبرزد فصل تابستان نسبت به بقیه فصل‌های سال افزایش پیدا کرد (Zapata et al., 2013).

در این پژوهش میزان قندهای محلول با افزایش شدت تنش کم‌آبی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشت. به طوری که محققان دیگر گزارش کردند با افزایش شدت تنش خشکی میزان قند کل، الیگو و پلی فروکتوان‌ها در ژل صبرزد افزایش پیدا می‌کند. در گیاهان کراسولاسه، ساکارز محصول نهایی چرخه کلونین و برای سنتز کربوهیدرات‌ها استفاده می‌شود که به گیاه کمک کرده تا آب از دست رفته را از طریق تنظیم اسمزی بازیابی کند (Delatorre-Herrera et al., 2010). البته مقاومت به تنش کم‌آبی و کارایی مصرف آب بالای این گیاه بیشتر به دلیل سیستم فتوسنتزی کراسولاسه بوده که قادر به تنظیم اسمزی از طریق سنتز ترکیب‌های اسمولیت می‌باشد (Delatorre-Herrera et al., 2010). همانطور که نتایج آزمایش نشان داد میزان قندهای محلول در این گیاه تحت تأثیر تنش کم‌آبی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافت و باعث تنظیم فشار اسمزی گردید. همچنین کاربرد کانی زئولیت بر میزان قندهای محلول تأثیر داشت، به طوری که کاربرد زئولیت در شرایط تنش خشکی از افزایش غلظت قندهای محلول جلوگیری کرده و توانسته بود شدت تنش کم‌آبی را کاهش و گیاه کمتر با تنش خشکی مواجه شود. البته

نتایج بدست آمده از این آزمایش نشان‌دهنده کارایی مصرف آب بالا در گیاه صبرزد می‌باشد. محققان دیگری هم نتایج مشابهی را برای کارایی مصرف آب گیاه صبرزد در شرایط مختلف گزارش کرده‌اند (Winter et al., 2005; Delatorre-Herrera et al., 2010; Silva et al., 2010; Silva et al., 2014). یکی از مهمترین دلیل کارایی مصرف آب زیاد گیاه صبرزد، وجود سیستم فتوسنتزی کراسولاسه است (Herrera, 2009)، همچنین سنتز پلی‌ساکاریدهایی است که با اسمولیت باعث مقاومت به کم‌آبی و افزایش کارایی مصرف آب در گیاه صبرزد می‌گردد (Delatorre-Herrera et al., 2010). در مطالعه‌ای که توسط Silva و همکاران (۲۰۱۴) انجام شد، نشان داده شد که یک رابطه نزدیکی بین کارایی مصرف و مقاومت به خشکی در گیاه صبرزد وجود دارد. این آزمایش به ما نشان داد که با افزایش تخلیه رطوبتی میزان کارایی مصرف آب افزایش یافته است و کمترین میزان کارایی مربوط به تیمار تخلیه ۲۰٪ رطوبت می‌باشد. همچنین کاربرد زئولیت بر کارایی مصرف آب تأثیر مثبتی داشت. با کاربرد زئولیت در شرایط تنش آبی میزان کارایی مصرف آب در گیاه صبرزد افزایش قابل توجهی یافت که محققان دیگر هم نتایج مشابهی را روی دیگر گیاهان گزارش کردند (Gholamhoseini et al., 2013). استفاده از زئولیت باعث افزایش رشد، عملکرد و کارایی مصرف آب از طریق نگهداری آب و تأمین نیتروژن خاک و افزایش ظرفیت تبادل خاک (از طریق قابلیت دسترسی عناصر غذایی) در گیاهان می‌گردد (Najafinezhad et al., 2014; Gholamhoseini et al., 2013; Sepaskhah & Barzegar, 2010). بنابراین با توجه به سیستم فتوسنتزی گیاه صبرزد و کاربرد زئولیت می‌توان میزان نیاز آبی گیاه صبرزد را برای تولید حداکثر محصول کاهش داد.

بر اساس نتیجه آزمایش Paez و همکاران (۲۰۰۰)، به دلیل ناچیز بودن میزان قندهای محلول موجود در شیرابه و بافت سبز (فتوسنتزی برگ)، در این آزمایش

متابولیت‌های ثانویه شود (Beppu *et al.*, 2004). محققان علت افزایش غلظت آلونین در فصل تابستان را شدت و میزان بیشتر تشعشع تابش نور خورشید دانسته‌اند که در این آزمایش به میزان ۳۴۳/۹ ساعت (که وات بر مترمربع در روز در فصل تابستان) بود که نسبت به بقیه فصل‌ها براساس مؤسسه هواشناسی برای سال ۱۳۹۲ بیشتر می‌باشد. در بیشتر موارد تنش باعث افزایش غلظت آلونین شده است، به طوری که در مطالعه‌ای تنش شوری (Rahimi-Dehghan *et al.*, 2012) و شدت نور بالا (Lucini *et al.*, 2013) باعث افزایش غلظت آلونین در گیاه صبرزرد شد. تجمع اسمولیت‌ها مانند کربوهیدرات‌های محلول، پرولین و متابولیت‌های ثانویه یکی از راهکارهای گیاهان خانواده کراسولاسه در افزایش مقاومت به تنش کم‌آبی می‌باشد (Rontein *et al.*, 2002؛ Delatorre-Herrera *et al.*, 2010) که در این آزمایش مشاهده شد که گیاه صبرزرد توانست در مواجهه با تنش کم‌آبی این میزان را افزایش دهد. همچنین کاربرد زئولیت به دلیل کاهش اثرات تنش کم‌آبی روی گیاه صبرزرد توانسته بود از افزایش غلظت آلونین جلوگیری کند.

به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که در این آزمایش تنش کم‌آبی رشد و عملکرد گیاه صبرزرد را تحت تأثیر قرار داد. براساس نتایج بدست آمده از این آزمایش، مشاهده شد که با کاربرد کنترل شده زئولیت در خاک‌های لومی شنی تا حدودی از اثرات تنش کم‌آبی کاسته شد. نتایج نشان داد که در شرایط تنش خشکی گیاه صبرزرد با افزایش میزان پرولین، کربوهیدرات محلول و آلونین میزان فشار اسمزی را افزایش و از کاهش عملکرد جلوگیری می‌کند. همچنین میزان کارایی مصرف آب در تیمار کاربرد زئولیت افزایش معنی‌داری داشت، به طوری که کاربرد زئولیت تحت تنش کم‌آبی منجر به جلوگیری از کاهش عملکرد شد؛ همچنین نسبت به عدم کاربرد آن در تیمار بدون تنش کم‌آبی، باعث افزایش عملکرد شد. علاوه بر این مشاهده شد که اثرات مثبت زئولیت با گذشت زمان بیشتر می‌شود.

میزان قندهای محلول برای تنظیم اسمزی مورد نیاز کمتر افزایش یافته بود. همچنین کاربرد زئولیت در شرایط تنش کم‌آبی باعث کاهش قندهای محلول شد، بیشترین میزان در شرایط بدون کاربرد زئولیت بدست آمد. گیاه صبرزرد تحت شرایط کم‌آبی تجمع میزان پرولین را در برگ‌های خود افزایش داد. محققان گزارش کردند که پرولین یکی از مهمترین اسیدآمین‌ها پایدار در شرایط تنش‌های محیطی می‌باشد (Balibrea *et al.*, 1999). البته نقش فیزیولوژیک پرولین در همه گیاهان مشابه است، که احتمالاً در شرایط تنش کم‌آبی در گیاه صبرزرد تجمع پیدا می‌کند. پرولین یکی از ترکیب‌هایی است که در شرایط تنش کم‌آبی تجمع و از خسارت تنش به گیاه جلوگیری کرده و اثرات تنش را خنثی می‌کند (Joyce *et al.*, 1992). در مطالعه‌ای گیاه صبرزرد مقدار تجمع پرولین را به طور معنی‌داری در شدت‌های بالای تنش کم‌آبی در برگ خود افزایش داد (Delatorre-Herrera *et al.*, 2010).

تغییر در سنتز متابولیت‌های ثانویه یک سازگاری بسیار مهم گیاهان دارویی نسبت به شرایط نامطلوب محیطی می‌باشد. آلونین یکی از مهمترین ترکیب‌های مؤثره صبرزرد است که مقدار آن از ۰/۳ تا ۱۵ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تر و از ۳٪ تا ۳۵٪ وزن خشک شیرابه متفاوت گزارش شده است (Zapata *et al.*, 2013). غلظت آلونین در گیاه صبرزرد با توجه به گونه و فصل متفاوت گزارش شده، به طوری که بیشترین غلظت در فصل تابستان و کمترین در فصل زمستان بدست آمد (Zapata *et al.*, 2013). همان‌طور که در این آزمایش مشاهده گردید با افزایش تنش کم‌آبی بر غلظت آلونین افزوده شد و در بین زمان‌های برداشت ۹۰ روز بعد از اعمال تیمارها که مصادف با فصل تابستان بود بیشترین درصد آلونین مشاهده شد. براساس نتایج محققان دیگر غلظت آلونین در فصل گرم نسبت به سرد افزایش می‌یابد که دلیل آن را افزایش میزان درجه حرارت و شدت تابش در فصل تابستان دانسته‌اند که ممکن است باعث تغییر در سنتز



- منابع مورد استفاده**
- Hamman, J.H., 2008. Composition and applications of *Aloe vera* leaf gel. *Molecules*, 13: 1599-1616.
  - Hazrati-Yadekori, S. and Tahmasebi-Sarvestani, Z., 2012. Effects of different nitrogen fertilizer levels and hormone benzyl adenine (BA) on growth and ramet production of *Aloe vera* L. Iran. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants, 28(2): 210-223.
  - Hernández Cruz, L.R., Rodríguez-García, R., Jasso de Rodríguez, D. and Angulo-Sánchez. J.L., 2002. *Aloe vera* response to plastic mulch and nitrogen. 570-574. In: Janick, J. and Whipkey, A., (Eds.). Trends in new crops and new uses. ASHS Press, Alexandria, 599p.
  - Herrera, A., 2009. Crassulacean acid metabolism and fitness under water deficit stress: If not for carbon gain, what is facultative CAM good for? *Annals of Botany*, 103: 645-653.
  - Joyce, P., Aspinall, D. and Paley, L., 1992. Photosynthesis and the accumulation of proline in response to water deficit. *Australian Journal of Plant Physiology*, 19: 249-261.
  - Lucini, L., Pellizzoni, M. and Molinari, G.P., 2013. Anthraquinones and -polysaccharides content and distribution in *Aloe* plants grown under different light intensities. *Biochemical Systematics and Ecology*, 51: 264-268.
  - Lüttge, U., 2004. Ecophysiology of crassulacean acid metabolism (CAM). *Annals of Botany*, 93: 629-652.
  - Mokhtassi-Bidgoli, A., AghaAlikhani, M., Nassiri-Mahallati, M., Zand, E., Gonzalez-Andujar, J.L. and Azari, A., 2013. Agronomic performance, seed quality and nitrogen uptake of *Descurainia sophia* in response to different nitrogen rates and water regimes. *Industrial Crops & Products*, 44: 583-592.
  - Moreira, L.R.S. and Filho, E.X.F., 2008. An overview of mannan structure and mannan-degrading enzyme systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79: 165-178.
  - Najafinezhad, H., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Modarres Sanavy, S.A.M. and Naghavi, H., 2014. Evaluation of yield and some physiological changes in corn and sorghum under irrigation regimes and application of barley residue, zeolite and superabsorbent polymer. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61: 891-906.
  - Paez, A., Michael Gebre, G., Gonzalez, M.E. and Tschaplinski, T.J., 2000. Growth, soluble carbohydrates, and aloin concentration of *Aloe vera* plants exposed to three irradiance levels. *Environmental and Experimental Botany*, 44: 133-139.
  - Polat, E., Karaca, M., Demir, H. and Onus, A.N., 2004. Use of natural zeolite (clinoptilolite) in
  - Al-Busaidi, A., Yamamoto, T., Tanigawa, T. and Rahman, H.A., 2011. Use of zeolite to alleviate water stress on subsurface drip irrigated barley under hot environments. *Irrigation and Drainage*, 60: 473-480.
  - Balibrea, M.E., Parra, M., Bolarin, M.C. and Perez-Alfocea, F., 1999. PEG-osmotic treatment in tomato seedlings induces salt-adaptation in adult plants. *Australian Journal of Plant Physiology*, 26: 781-786.
  - Bates, L.S., Waldren, R.P. and Tear, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil*, 39(1): 205-207.
  - Beppu, H., Kawai, K., Shimpo, K., Chihara, T., Tamai, I., Ida, C., Ueda, M. and Kuzuya, H., 2004. Studies on the components of *Aloe arborescens* from Japan-Monthly variation and differences due to part and position of the leaf. *Biochemical Systematics and Ecology*, 32(9): 783-795.
  - Christopher, J.T. and Holtum, J.A.M., 1996. Patterns of carbon partitioning in leaves of crassulacean acid metabolism species during deacidification. *Plant Physiology*, 112: 393-399.
  - Cousins, S.R. and Witkowski, E.T.F., 2012. African aloes ecology: A review. *Journal of Arid Environments*, 85: 1-17.
  - Delatorre-Herrera, J., Delfino, I., Salinas, C., Silva, H. and Cardemil, L., 2010. Irrigation restriction effects on water use efficiency and osmotic adjustment in *Aloe vera* plants (*Aloe barbadensis* Miller). *Agricultural Water Management*, 97: 1564-1570.
  - Geerts, S. and Raes, D., 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96: 1275-1284.
  - Gholamhoseini, M., AghaAlikhani, M., Dolatabadian, A., Khodaei-Joghan, A. and Zakikhani, H., 2012. Decreasing nitrogen leaching and increasing canola forage yield in a sandy soil by application of natural zeolite. *Agronomy Journal*, 104(5): 1467-1475.
  - Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Dolatabadian, A., Jamshidi, E. and Khodaei-Joghan, A., 2013. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on growth, yield, nutrient uptake and irrigation water productivity of sunflowers grown under drought stress. *Agricultural Water Management*, 117: 106-114.
  - Gholizadeh, A., Amin, M.S.M., Anuar, A.R. and Saberioon, M.M., 2010. Water stress and natural zeolite impacts on phisiomorphological characteristics of moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4: 5184-5190.



- Sepaskhah, A.R. and Barzegar, M., 2010. Yield, water and nitrogen-use response of rice to zeolite and nitrogen fertilization in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 98: 38-44.
- Silva, H., Sagardia, S., Ortiz, M., Franck, N., Opazo, M., Quiroz, M., Baginsky, C. and Tapia, C., 2014. Relationships between leaf anatomy, morphology, and water use efficiency in *Aloe vera* (L.) Burm f. as a function of water availability. *Revista Chilena de Historia Natural*, 87: 1-13.
- Silva, H., Sagardia, S., Seguel, O., Torres, C., Tapia, C., Franck, N. and Cardemil, L., 2010. Effect of water availability on growth and water use efficiency for biomass and gel production in *Aloe vera* (*Aloe barbadensis* M.). *Industrial Crops and Products*, 31: 20-27.
- Sturm, K., Koron, D. and Stampar, F., 2003. The composition of fruit of different strawberry varieties depending on maturity stage. *Food Chemistry*, 83: 417-422.
- Szerement, J., Ambro, A. and Piasek, K.K.J., 2014. Use of zeolite in agriculture and environmental protection. *A Short Review*, 172-177.
- Waller, T.A., Pelley, R.P. and Strickland, F.M., 2004. Industrial processing and quality control of *Aloe barbadensis* (*Aloe vera*) gel: 139-206. Reynolds, T., (Ed.). *Aloes: The Genus Aloe*. CRC Press, 408p.
- Winter, K., Aranda, J. and Holtum, J.A.M., 2005. Carbon isotope composition and water-use efficiency in plants with crassulacean acid metabolism. *Functional Plant Biology*, 32: 381-388.
- Yari, S., Khalighi-Sigaroodi, F. and Moradi, P., 2013. Effects of different levels of zeolite on plant growth and amount of gel production in *Aloe vera* L. under different irrigation. *Journal of Medicinal Plants*, 4 (48):72-81.
- Zapata, P.J., Navarro, D., Guillén, F., Castillo, S., Martínez-romero, D., Valero, D. and Serrano, M., 2013. Characterisation of gels from different *Aloe* spp. as antifungal treatment: Potential crops for industrial applications. *Industrial Crops & Products*, 42: 223-230.
- agriculture. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Reserarch*, 12: 183-189.
- Rahi, T.S., Singh, K. and Singh, B., 2013. Screening of sodicity tolerance in *Aloe vera*: An industrial crop for utilization of sodic lands. *Industrial Crops and Products*, 44: 528-533.
- Rahimi-Dehgolan, R., Tahmasebi Sarvestani, Z., Rezazadeh, S.A. and Dolatabadian, A., 2012. Morphological and physiological characters of *Aloe vera* subjected to saline water irrigation. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 18: 222-230.
- Ray, A. and Gupta, S.D., 2013. A panoptic study of antioxidant potential of foliar gel at different harvesting regimens of *Aloe vera* L. *Industrial Crops and Products*, 51: 130-137.
- Ray, A., Gupta, S.D., Ghosh, S., Aswatha, S.M. and Kabi, B., 2013. Chemometric studies on mineral distribution and microstructure analysis of freeze-dried *Aloe vera* L. gel at different harvesting regimens. *Industrial Crops and Products*, 51: 194-201.
- Rodríguez-García, R., Rodríguez, D.J. De Gil-Marín, J.A., Angulo-Sánchez, J.L. and Lira-Saldivar, R.H., 2007. Growth, stomatal resistance, and transpiration of *Aloe vera* under different soil water potentials. *Industrial Crops and Products*, 25: 123-128.
- Rodríguez-González, V.M., Femenia, A., Minjares-Fuentes, R. and González-Laredo, R.F., 2012. Functional properties of pasteurized samples of *Aloe barbadensis* Miller: Optimization using response surface methodology. *LWT-Food Science and Technology*, 47: 225-232.
- Rontein, D., Basset, G. and Hanson, A.D., 2002. Metabolic engineering of osmoprotectant accumulation in plants. *Metabolic Engineering*, 4: 49-56.
- Sankar, B., Jaleel, C.A., Manivannan, P., Kishorekumar, A., Somasundaram, R. and Panneerselvam, R., 2007. Drought-induced biochemical modifications and proline metabolism in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench. *Acta Botanica Croatica*, 66: 43-56.

## Effects of zeolite on *Aloe barbadensis* Miller. grown under water stress conditions

S. Hazrati<sup>1\*</sup>, Z. Tahmasebi Sarvestani<sup>2</sup> and A.R. Sadeghi Bakhtoori<sup>3</sup>

1\*- Corresponding author, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Shahid Madani University of East Azarbayjan, Tabriz, Iran, E-mail: saeid.hazrati@gmail.com

2- Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Shahid Madani University of East Azarbayjan, Tabriz, Iran

Received: November 2016

Revised: April 2017

Accepted: April 2017

### Abstract

*Aloe barbadensis* Miller. is one of the most economically important medicinal plants in many countries of the world. This investigation aimed at evaluating the effects of water stress and zeolite on growth, yield and chemical compositions of *A. barbadensis*. The study was conducted in the research greenhouse of Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University. The plants were harvested 90, 180 and 270 days after imposing the treatments. Water deficit stress decreased growth, leaf fresh and gel fresh weight and increased biochemical compounds. The results showed that the greatest number of new leaves and pup were produced by the plants irrigated 20% and 40% FC with 8 g zeolite, respectively. Generally, the highest leaf fresh and gel fresh weight were observed 270 days after imposing the treatments when plants were irrigated after depleting 40% of the FC and amendment with 8 g zeolite (624.13 and 397.17 g), respectively. The water use efficiency increased with less water and more zeolite availability. The highest water use efficiency of leaf and gel was obtained from the plants irrigated after depleting 60% of field capacity and treated with 8 g zeolite. In addition, the results indicated that the maximum aloin concentration (23.48%) and proline accumulation (0.85 (mg [g FW]<sup>-1</sup>)) were obtained 90 days after imposing the treatments when the plants were irrigated after depleting 80% and 60% of FC where no zeolite was applied, respectively. Irrigation after 80% depletion of FC without zeolite application resulted in the highest fructose and glucose content, respectively (234.71 and 79.83 mg g DW<sup>-1</sup>). In general, application of zeolite could alleviate water stress adverse effects, and improved plant growth and yield. Severe water stress decreased leaf yield and plant growth, while caused an increase in biochemical compounds.

**Keywords:** Aloin, *Aloe barbadensis* Miller., zeolite, water deficit, yield, biochemical compounds.