

اثر تنش کم‌آبی بر شاخص‌های فلورسانس کلروفیل، رنگدانه‌های فتوسنتزی، تریگونلین و عملکرد دانه شنبلیله در واکنش به زئولیت و نیتروژن

ابوالفضل باغبانی آرانی^۱، سید علی محمد مدرس ثانوی^۲، مسعود مشهدی اکبر بوجار^۳، ظهرا ادای^۱ و حمید دهقان‌زاده جزی^۱

^۱بخش کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران؛ ^۲گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران؛ ^۳گروه علوم سلولی و مولکولی، دانشگاه

خوارزمی، تهران، ایران

مسئول مکاتبات: سید علی محمد مدرس ثانوی، modaresa@modares.ac.ir

چکیده. به منظور بررسی اثرات تنش کم‌آبی، کود نیتروژن و زئولیت بر شاخص‌های فلورسانس کلروفیل، رنگدانه‌ها، محتوای تریگونلین و عملکرد دانه شنبلیله، آزمایشی به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل پنج رژیم آبیاری به عنوان عامل اصلی و ترکیب فاکتوریلی از سه تیمار کودی بر اساس نیتروژن مورد نیاز گیاه (شاهد، ورمی کمپوست به میزان ۲/۷ تن در هکتار و اوره به میزان ۱۱ کیلوگرم در هکتار) و دو مقدار زئولیت (صفر و نه تن در هکتار) به عنوان عامل فرعی بودند. نتایج نشان دادند که تنش کم‌آبی به طور معنی‌داری، ماکزیمم فلورسانس (F_m)، فلورسانس متغیر (F_v)، کارایی فتوسیستم II (F_v/F_m)، محتوای کلروفیل a ، b و کل ($a+b$) و عملکرد دانه را کاهش داد ولی فلورسانس حداقل (F_0)، کارتنوئید و غلظت تریگونلین را افزایش داد. به علاوه، بیشترین میزان (F_v/F_m)، محتوای کلروفیل کل، کمترین میزان (F_0) و کارتنوئید در تیمار بدون تنش کم‌آبی دیده شد و با افزایش شدت تنش کم‌آبی از غلظت تریگونلین و عملکرد دانه کاسته شد. نتایج نشان داد که تنش کم‌آبی منجر به بازدارندگی نوری فتوسیستم II شد. در اکثر تیمارها کاربرد کود ورمی کمپوست باعث افزایش عملکرد (به ترتیب در سال اول و دوم ۲۵/۵ درصد و ۳۲/۹۸ درصد) و غلظت تریگونلین دانه شنبلیله (۷/۴۶ درصد در سال اول) شد. بنابراین توصیه می‌شود اگر هدف کاشت، تولید تریگونلین از دانه شنبلیله باشد، تنش کم‌آبی خفیف به همراه ورمی کمپوست می‌تواند تیمار مناسبی بدین منظور باشد.

واژه‌های کلیدی. تنش خشکی، زئولیت، کارایی فتوسیستم، کود شیمیایی، ورمی کمپوست

The effect of water deficit stress on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, trigonelline and grain yield in fenugreek in response to zeolite and nitrogen

Abolfazl Baghbani-Arani¹, Sayed Ali Mohammad Modares-Sanavi², Masoud Mashhadi Akbar Boojar³, Zahrab Adavi¹ & Hamid Deghanzade-Jezi¹

¹Department of Agronomy Science, Faculty of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran; ²Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran; ³Department of Cell and Molecular Sciences, Faculty of Biological Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

Correspondent author: Sayed Ali Mohammad Modares-Sanavi, modaresa@modares.ac.ir

Abstract. In order to determine the effects of water deficit stress, nitrogen fertilization and zeolite on chlorophyll fluorescence, pigments, trigonelline content and seed yield in, a split factorial experiment was laid out in a randomized complete block design with three replications. Five irrigation regimes were randomly applied to the main plots. Subplots included six treatments and consisted of a factorial combination of three nitrogen fertilization (untreated plots, vermicompost at a rate of 2.7 ton ha⁻¹ and nitrogen chemical fertilizer at a rate of 11 kg.ha⁻¹) and two zeolite rates (0 and 9 ton.ha⁻¹). The results demonstrated that (F_m), (F_v), (F_v/F_m), chl a , b , total chl content and also seed yield were significantly

reduced by water deficit stress, whereas minimum fluorescence (F_0), carotenoid and trigonelline concentrations were increased. In addition, the highest F_v/F_m , chl $a+b$ content and the lowest F_0 and carotenoids were observed when irrigation was done after unloading 40% of ASW. In most treatments vermicompost increased the yield (by 25.51% and 98.32% in 2014 and 2015, respectively) and grain trigonelline concentration (7.46% in 2014) in Fenugreek. Mild water stress with vermicompost treatment is recommended for the production of trigonelline from Fenugreek seeds.

Keywords. chemical fertilizer, drought stress, F_v/F_m , vermicompost, zeolite

مقدمه

شنبلیله با نام علمی *Trigonella foenum-graecum* L. گیاهی است یک ساله که به عنوان گیاهی دارویی و علوفه‌ای با کیفیت بالا و گیاه پوششی تثبیت کننده نیتروژن به طور وسیعی کشت می شود. شنبلیله به عنوان گیاهی دارویی در درمان برخی بیماری‌ها از قبیل دیابت و کاهش تب استفاده می شود (Dadrasan *et al.*, 2015). این گیاه به عنوان یک محصول زمین خشک، آب مورد نیاز آن کم است و استفاده از آن می تواند هزینه های آبیاری را کاهش دهد و باعث صرفه جویی در آب و کاهش اتروفیکاسیون آب های سطحی شده و آلودگی منابع آب زمین را محدود می کند (Acharya *et al.*, 2008; Basu, 2006). تقریباً در تمام نقاط ایران، شنبلیله به عنوان سبزی و محصول ادویه ای برای یک مدت طولانی کشت می شده و سطح زیر کشت آن در ایران در حدود ۴۰۰ هکتار با تولید سالانه علوفه ۸۰۰ تن و عملکرد دانه ۰/۸ تن در هکتار است (Dadrasan *et al.*, 2015). شنبلیله به طور وحشی در استان های اصفهان، اردبیل، لرستان، فارس، کرمان، بلوچستان، خراسان، سمنان، غرب و شرق آذربایجان وجود دارد (Mehrafarin *et al.*, 2011).

در مناطق خشک و نیمه خشک، کمبود آب مانع اصلی تولید محصولات زراعی است. گیاهان در معرض تنش های محیطی گوناگون از جمله تنش کم آبی قرار دارند که منجر به اثرات مستقیم و غیر مستقیم بر عمل کرد دستگاه فتوسنتز کننده می شود (Hazrati *et al.*, 2016). یکی از عوامل تنش کم آبی بر فتوسنتز، کاهش میزان کارایی فتوسنتز از طریق افزایش فلورسانس کلروفیل است. به منظور تعیین وضعیت فیزیولوژی گیاه و میزان آسیب وارده به دستگاه فتوسنتزی از سنجش فلورسانس کلروفیل استفاده می شود. کارکرد دستگاه فتوسنتزی را می توان از طریق اندازه گیری (F_v/F_m) مورد بررسی قرار داد که نشان دهنده عملکرد کوآنزیمی مراکز واکنش فتوسیستم II است (Hazrati *et al.*, 2016; Paknejad *et al.*, 2007; Ranjbar-Fordoei

2013). مطالعات نشان می دهد که محتوی کلروفیل با افزایش تنش کم آبی به علت تخریب آنزیمی (آنزیم کلروفیلاز) کاهش یافته و در مقابل بر میزان کاروتنوئیدها که خاصیت آنتی اکسیدانی دارند افزوده می شود (Hazrati *et al.*, 2016). استرس آبیاری یا خشک سالی اثر قابل توجهی بر فیزیولوژی گیاه، جذب مواد غذایی و تغییرات بیوشیمیایی در مراحل مختلف رشد شنبلیله دارد (Dadrasan *et al.*, 2015). همچنین کمبود نیتروژن از مهمترین عوامل محدود کننده تولید محصولات زراعی است. نیتروژن علاوه بر ایفای نقش اصلی در تشکیل پروتئین ها، یک جزء لازم مولکول کلروفیل نیز است. نتایج محققان نشان می دهد که کاهش دسترسی به نیتروژن، عملکرد کوانتومی انتقال الکترون فتوسیستم II و حداکثر کارایی آن را کاهش می دهد و همچنین باعث تخریب فتوسیستم II نیز می شود. افزایش میزان نیتروژن در گیاه، باعث افزایش میزان کلروفیل ها و کاروتنوئیدها (به دلیل افزایش سطح برگ گیاه) شده که به دنبال آن سبزینگی، توانایی جذب نور خورشید و در نهایت رشد و عمل کرد گیاه افزایش می یابد (Conming & Zang, 2000).

علاوه بر این استفاده از تکنیک های زراعی از جمله کاربرد کودهای آلی، زئولیت یا تقویت شرایط بیولوژیک خاک ممکن است در کاهش اثرات تنش کم آبی مؤثر باشند. اثر مثبت کودهای شیمیایی نیتروژنی بر عملکرد شنبلیله توسط محققین گزارش شده است (Tunctürk *et al.*, 2011). یکی از ارکان اصلی در کشاورزی پایدار استفاده از کودهای آلی از جمله ورمی کمپوست است. این ماده دارای تخلخل زیاد، قدرت جذب و نگهداری بالای عناصر معدنی، تهویه و زهکش مناسب، ظرفیت زیاد نگهداری آب و بدون بوی نامطبوع و عوامل بیماری زا بوده و امروزه استفاده از آن در کشاورزی پایدار، جهت بهبود رشد و کیفیت محصولات زراعی و باغی متداول است (Arancon *et al.*, 2005). همچنین زئولیت ها گروهی از کانی های متخلخل طبیعی هستند که با ساختمان کریستالی خود باعث افزایش فراهمی

طولانی مدت آب و عناصر غذایی شده که به بهبود رشد گیاه کمک می‌کند (Karimi et al., 2013). محققان مختلف نشان داده‌اند که شنبلیله در آبیاری مناسب و تغذیه کافی بیشترین عملکرد دانه و تریرگونلین را دارد (Mehrafarin et al., 2011; Dadrasan et al., 2015). بنابراین هدف از اجرای این پژوهش ارزیابی اثرات کم‌آبی و راهکارهای کاهش اثرات منفی آن بر عمل کرد دستگاه فتوسنتز کننده، محتوی رنگدانه برگ‌ها و غلظت تریرگونلین و عملکرد دانه شنبلیله بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت مزرعه‌ای طی سال‌های زراعی ۱۳۹۲-۹۳ و ۱۳۹۳-۹۴ در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس واقع در کیلومتر ۱۶ اتوبان تهران - کرج و ارتفاع ۱۲۱۵ متر اجرا شد. بر اساس آمار هواشناسی نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی (چیتگر)، این منطقه با ۲۴۲ میلی‌متر بارندگی سالانه دارای رژیم آب و هوایی نیمه‌خشک بوده و میانگین درجه حرارت سالیانه آن ۲۲ درجه سانتی‌گراد است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است. آزمایش به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. پنج رژیم آبیاری (I_1 = بدون تنش در مرحله رویشی و زایشی؛ آبیاری پس از تخلیه ۲۰ درصد رطوبت قابل استفاده خاک، I_2 = آبیاری پس از تخلیه ۴۰ درصد رطوبت قابل استفاده خاک در مرحله رویشی، I_3 = آبیاری پس از تخلیه ۴۰ درصد رطوبت قابل استفاده خاک، I_4 = آبیاری پس از تخلیه ۶۰ درصد رطوبت قابل استفاده خاک در مرحله رویشی و I_5 = آبیاری پس از تخلیه ۶۰ درصد رطوبت قابل استفاده خاک در مرحله زایشی) به عنوان عامل اصلی و ترکیب فاکتوریلی از سه تیمار کودی بر اساس نیاز نیتروژنی گیاه (F_1 = بدون کوددهی، F_2 = ورمی کمپوست به میزان ۲/۷ تن در هکتار و F_3 = اوره به میزان ۱۱ کیلوگرم در هکتار) و دو مقدار ژئولیت (Z_1 = صفر و Z_2 = نه تن در هکتار) به عنوان عامل فرعی بودند. جهت اعمال تیمارهای تنش کم‌آبی، قبل از اجرای آزمایش با نمونه‌گیری از خاک در زمان‌های متفاوت، از طریق روش وزنی درصد حجمی رطوبت خاک تعیین شد و درصد حجمی رطوبت خاک به وسیله دستگاه TDR (Time Domain Reflectometry) اندازه‌گیری شد و سپس یک معادله

رگرسیون بین دو سری از داده‌ها محاسبه شده که برای کالیبره کردن دستگاه TDR مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های دستگاه TDR به طور روزانه در طول دوره رشد گیاه ثبت شد. این روش با استفاده از روش وزنی چک و به رطوبت حجمی تبدیل شد. مقدار آب مورد نیاز برای هر تیمار بر اساس فرمول‌های روش مختصی و همکاران محاسبه و در اختیار گیاه قرار گرفت (Mokhtassi-Bidgoli et al., 2013). تیمارهای تنش کم‌آبی در مرحله رویشی پس از استقرار کامل گیاه در زمین اصلی تا مرحله گلدهی و تیمار تنش کم‌آبی در مرحله زایشی نیز، هنگام گلدهی تا انتهای سیکل حیات گیاه بر اساس ظرفیت زراعی خاک منطقه اعمال شد. مبنای تعیین مقدار مورد نیاز کود ورمی کمپوست عبارت از درصد نیتروژن خاک و کود (جدول ۱)، مقدار کود نیتروژن لازم برای شنبلیله برابر با ۴۰ کیلوگرم در هکتار و مقدار آزادسازی نیتروژن کود ورمی کمپوست (۳۰ درصد) بود (Mehrafarin et al., 2011). بر این اساس مقدار مورد نیاز کود ورمی کمپوست ۲/۷ تن در هکتار تعیین شد. ژئولیت مصرفی از نوع کلینوپتیلولیت بوده و ویژگی‌های شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس تیمارها، ژئولیت و ورمی کمپوست قبل از کاشت با خاک هر کرت به طور کامل مخلوط شدند. کشت در تاریخ ۲۰ اردیبهشت در زمین اصلی با تراکم حدود ۲۷ بوته در مترمربع (فاصله بین ردیف‌ها ۳۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها ۱۲/۵ سانتی‌متر انجام شد. مبارزه با علف‌های هرز به صورت دستی انجام شد. بذرها از اکوتیپ بومی منطقه اصفهان (توده اردستانی) بود. پارامترهای فلورسانس کلروفیل در برگ‌های سازگار شده به تاریکی با استفاده از دستگاه فلورومتر مدل (Walz, Germany PAM 2000) اندازه‌گیری شدند که عبارتند از F_0 : حداقل فلورسانس زمانی که تمامی مراکز واکنش فتوسیستم II باز است؛ F_m : حداکثر فلورسانس زمانی که تمامی مراکز واکنش فتوسیستم II بسته هستند؛ و F_v/F_m : حداکثر عملکرد کوانتومی فتوشیمیایی فتوسیستم II بودند (Hazrati et al., 2016; Paknejad et al., 2007; Ranjbar-Fordoei et al., 2013). برای اندازه‌گیری میزان کلروفیل کل (a+b) و کاروتنوئیدها از روش آرنون استفاده شد (Arnon, 1949). به همین منظور ۰/۲ گرم نمونه‌ی برگ‌گی در استون ۸۰ درصد عصاره‌گیری شد. سپس عصاره‌ی حاصل از کاغذ صافی عبور داده و تا رسیدن به حجم ۲۵ میلی‌لیتر و استخراج کامل کلروفیل به آن استون اضافه گشت. جذب نوری کلروفیل a و b به ترتیب در طول موج‌های

۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر خوانده شد و با استفاده از فرمول مربوطه، غلظت کلروفیل a و b و کلروفیل کل و کارتنوئید بر حسب میلی گرم بر گرم برگ تازه به دست آمد.

$$a = [12.7(D_{663}) - 2.69(D_{645})] \times \frac{V}{1000 W} \text{ کلروفیل}$$

$$b = [22.9(D_{645}) - 4.68(D_{663})] \times \frac{V}{1000 W} \text{ کلروفیل}$$

$$= [20.2(D_{465}) - 8.02(D_{663})] \times \frac{V}{1000 W} \text{ کلروفیل کل}$$

= کارتنوئید

$$[1000(D_{470}) - 1.82 Cl a - 85.02 Cl b]. 198W$$

W: وزن نمونه بر حسب گرم، V: حجم نمونه قرار گرفته در دستگاه اسپکتروفوتومتر، D: میزان جذب صورت گرفته در طول موج خاص برای سنجش تریگونلین، سه گرم از نمونه خشک شده با آب گرم ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت ریفلاکس شده، سپس عصاره صاف شده و با آب مقطر به حجم ۲۵۰ میلی لیتر رسید. محلول حاصل به صورت ۱:۵ حجمی: حجمی رقیق شده و ۳ میلی لیتر از آن پس از عبور از صافی با قطر ۰/۴۵ میکرومتر با ستون C₁₈ به دستگاه HPLC مدل Unicrom cristal-200 ساخت انگلستان تزریق شد. ابعاد ستون به طول ۲۰ سانتی متر با قطر داخلی ۴ میلی متر بود. قابل ذکر است که فاز متحرک شامل اسید کلریدریک ۲ میلی مول بر لیتر (pH=2) و سرعت جریان ۲ میلی لیتر بر دقیقه بود. دتکتور از نوع ماورا بنفش و در طول موج ۲۶۵ نانومتر تنظیم شد. برای تهیه محلول استاندارد آن از روش حسن زاده و همکاران (Hassanzadeh et al., 2011) استفاده شد. جهت اندازه گیری عملکرد دانه، ۱۰ بوته تصادفی از هر کرت از دو ردیف میانی با رعایت حذف اثر حاشیه برداشت شد (Hassanzadeh et al., 2011).

در این آزمایش آزمون بارتلت برای اکثر صفات اندازه گیری شده معنی دار شد به همین دلیل سال ها به طور جداگانه تحلیل شدند. تمامی تجزیه های آماری صورت گرفته با استفاده از نرم افزار آماری SAS انجام پذیرفت. مقایسه ی میانگین تیمارهای آزمایشی به روش آزمون چند دامنه ای دانکن انجام گرفت.

نتایج و بحث

پارامترهای عملکرد کوانتومی (F_v/F_m)، فلورسانس کمینه (F_0)، فلورسانس بیشینه (F_m) و فلورسانس متغیر (F_v)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که در سال ۱۳۹۳ نسبت F_v/F_m تنها تحت تأثیر اثر اصلی رژیم آبیاری قرار گرفت ولی در سال ۱۳۹۴ این نسبت تحت تأثیر اثرات برهمکنش رژیم آبیاری $\times$ زئولیت، رژیم آبیاری $\times$ کود و زئولیت $\times$ کود بود (جدول ۳). نسبت F_v/F_m به طور معنی داری با افزایش تنش کم آبی در هر دو سال کاهش پیدا کرد (جدول های ۵، ۶ و شکل ۲). در سال ۱۳۹۳ بیشترین مقدار نسبت F_v/F_m در تیمار بدون تنش آبی و کمترین به ترتیب در تیمارهای تنش شدید آبی در مرحله رویشی و تنش شدید آبی در مرحله زایشی به دست آمدند (شکل ۲). جدول مقایسه میانگین داده ها نشان داد که در سال ۱۳۹۴، به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار اثر برهمکنش رژیم آبیاری و زئولیت برای نسبت F_v/F_m در تیمارهای بدون تنش کم آبی و کاربرد زئولیت و تنش شدید کم آبی در مرحله رویشی بدون مصرف زئولیت به دست آمد و برای اثر برهمکنش رژیم آبیاری و کود در تیمارهای بدون تنش کم آبی با مصرف کود و تنش خفیف کم آبی در مرحله زایشی بدون مصرف کود و اثر برهمکنش زئولیت و کود بر صفت عملکرد کوانتومی در تیمارهای با کاربرد زئولیت و کود اوره اندازه گیری شدند که اختلاف معنی داری با تیمار بدون زئولیت همراه با کود ورمی کمپوست نداشت (جدول های ۵، ۶ و شکل ۱). همچنین تجزیه واریانس نشان داد که در هر دو سال اثر اصلی رژیم آبیاری و کود و اثر برهمکنش بین آن ها و علاوه بر آن در سال ۱۳۹۴ اثر اصلی زئولیت نیز بر مقدار (F_0) معنی دار شد. مطابق با جدول مقایسه میانگین در سال ۱۳۹۳، بیشترین مقدار (F_0) در گیاهانی که در معرض تنش شدید کم آبی در مرحله زایشی همراه با کاربرد شیمیایی نیتروژن قرار داشتند، مشاهده شد ولی در سال ۱۳۹۴، بیشترین مقدار (F_0) در گیاهانی که در معرض صفت F_m در تیمار تنش کم آبی خفیف در مرحله زایشی بدون زئولیت و بدون تنش آبی و زئولیت به دست آمد (جدول های ۵ و ۶). در سال ۱۳۹۳، بیشترین مقدار F_v مربوط به گیاهانی بود که در تیمار تنش شدید کم آبی در مرحله زایشی با کاربرد زئولیت و کود اوره ($I_5Z_2F_3$) قرار داشتند و در سال ۱۳۹۴، بیشترین مقدار F_v در تیمار بدون تنش کم آبی با زئولیت و بدون کود نیتروژن ($I_1Z_2F_1$) مشاهده شد (جدول ۴).

مقادیر F_0 ، F_v ، F_m ، F_v/F_m پارامترهای بسیار مهم کلروفیل فلورسانس هستند که در بررسی و مطالعات فیزیولوژیکی تنش

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه‌ی اجرای آزمایش و ویژگی‌های شیمیایی ورمی کمپوست مورد استفاده.

Table 1. Physico-chemical specifications of soil in the experimental site and chemical specifications of vermicompost.

آهن Fe (mg/kg)	پتاسیم (mg/kg) K	فسفر P (mg/kg)	کربن : نیتروژن C/N	نیتروژن کل (%) N (%)	مواد آلی (%) Organic mater(%)	pH	EC (dS/m)	بافت Texture	خاک Soil
۳/۸۶	۳۲۰	۳۵	۰/۰۹۹	۰/۰۶	۱/۳۴	۷/۳۵	۱/۸۲	لوم شنی	
۱۴۰۰۰	۷۲	۴۸	۱۶/۵	۰/۸۴	-	۷/۶۵	۹/۲۵	-	ورمی کمپوست Vermicompost

جدول ۲- درصد ترکیبات شیمیایی موجود در زئولیت مورد استفاده (%).

Table 2. Chemical composition of the used zeolite (%).

CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂
۲/۳	۰/۱	۱/۰۸	۳	۱۲/۰۲	۶۵	۰/۰۱	-	-	۱/۵	۰/۰۴	۰/۰۳

CEC = ۲۰۰ meq/۱۰۰g

آزادسازی انرژی به صورت دما می‌شود. در این مطالعه کاهش نسبت F_v/F_m در شرایط تنش کم آبی، به طور عمده به خاطر وجود آشفستگی در کلروپلاست بوده و نشان‌دهنده بازدارندگی نوری و کاهش کارایی فتوسیستم II و نیز کاهش میزان کلروفیل است که به علت کاهش انتقال الکترون از فتوسیستم II به I است (Paknejad et al., 2007; Ranjbar-Fordoei et al., 2013). فلورسانس کلروفیل به طور مستقیم به فعالیت کلروفیل در مراکز واکنش فتوسیستم‌ها ارتباط دارد و وجود هرگونه آشفستگی، مانند جلوگیری از تولید تعدادی از پروتئین‌های تیلاکوئید رمز شده توسط کلروپلاست، در مقایسه با پروتئین‌های رمز شده توسط هسته سلول و یا دگرگونی ساختار و تغییر در رنگدانه‌های فتوسیستم II، منجر به کاهش حداکثر عملکرد کوآنتومی فتوسیستم در شرایط سازگار با تاریکی (F_v/F_m) می‌شود (Francheboud & Leipner, 2003). در این راستا زئولیت و ورمی کمپوست به دلیل نقش آنها در جذب و نگهداری و افزایش تبادلات یونی باعث افزایش نسبت F_v/F_m و کارایی فتوسیستم II شده است. همچنین معنی‌دار بودن اثر برهمکنش کود و زئولیت بر نسبت F_v/F_m می‌تواند به دلیل نقش مهم زئولیت در کاهش آبهشویی نیتروژن در خاک و تأثیر آن در کاهش تنش کم آبی باشد (Ippolito et al., 2011).

محتوای رنگدانه‌ها (کلروفیل a، b و کل (a+b) و کارتنوئید)

گیاهی ارزیابی می‌شوند. اکثر محققان گزارش کرده‌اند که مقدار F_0 تحت شرایط کم آبی افزایش اما مقادیر F_v ، F_m و نسبت F_v/F_m کاهش خواهد می‌یابد (Hazrati et al., 2016; Paknejad et al., 2007). اصولاً میزان فلورسانس کلروفیل a در زمانی که پذیرنده الکترون کوئینون Q، در حالت احیا باشد، زیاد است و به این دلیل مقدار F_v نیز در این حالت زیاد می‌شود، ولی در شرایطی که فلورسانس کلروفیل a کم باشد، کوئینون Q در حالت اکسیداسیون است. در این پژوهش F_v در تیمار تنش کاهش یافت، بنابراین می‌توان پی برد که تنش کم آبی ممکن است در جریان انتقال الکترون در واکنش مربوط به تجزیه آب فتوسیستم II (واکنش هیل) اختلال ایجاد کرده باشد و اثرات تنش در جریان انتقال الکترون بعد از اولین پذیرنده الکترون کوئینون (QA) ناچیز بوده و از این راه کارآیی کوآنتومی فتوستتر خالص، کاهش یافته‌است (Paknejad et al., 2007; Ranjbar-Fordoei et al., 2013). بازدارندگی نوری با کاهش کارآیی مصرف فوتون‌ها به وسیله‌ی فتوسیستم II مشخص می‌شود. کاهش کارآیی فتوسیستم II در دو وضعیت رخ می‌دهد: اول زمانی که برگ‌ها به طور ناگهانی در معرض نور شدید قرار می‌گیرند که به مرکز فتوسیستم II صدمه می‌زند و دوم وقتی که در معرض محدودیت آبی واقع شوند. در این حالت، کاهش مربوط به افزایش شدید انرژی برانگیختگی غیر تابشی می‌شود که منجر به

خاک است) خنثی شد (Arancon et al., 2005). تحت شرایط کم آبی، بازیابی مواد غذایی به ویژه نیتروژن از کلروپلاست ها که برای ساختن کلروفیل مورد نیاز هستند کاهش می یابد و سرعت تولید کلروفیل کند و کندتر می شود نتایج این پژوهش مطابق با نتایج سایر محققین بود (Khaleghi et al., 2012; Hazrati et al., 2016). مطابق با یافته های این تحقیق، تنش کم آبی نسبت F_v/F_m را کاهش داده علاوه بر آن، باعث کاهش محتوای کل کلروفیل $(a+b)$ نیز شده است. یکی از دلایل کاهش محتوای کلروفیل، تخریب آن ها به وسیله گونه های اکسیژن فعال (ROS) است. کم آبی باعث ایجاد اختلال در سیستم های آنزیمی کاهش دهنده فعالیت اکسیژن فعال، افزایش پراکسیداسیون چربی ها و در نتیجه خسارت به غشای سلولی و تخریب رنگدانه ها می شود (Khaleghi et al., 2012; Hazrati et al., 2016).

مطابق نتایج موجود در جدول ۴، تیمارهای بدون تنش همراه با کود ورمی کمپوست ($I_1Z_1F_2$ و $I_1Z_2F_2$) بیشترین مقدار کلروفیل a را دارند و در هر دو سال افزایش ۱۶ درصد در مقایسه با تیمار شاهد ($I_1Z_1F_1$) را نشان دادند. گزارش کردند که مقدار کلروفیل a ، b و نسبت کلروفیل a/b به طور معنی داری تحت تنش کم آبی کاهش می یابد (Khaleghi et al., 2012). تحت شرایط تنش، کم آبی و شوری، کلروفیل a حساسیت بیشتری به تنش کم آبی و شوری دارد و مقدار آن نسبت به کلروفیل b بیشتر کاهش می یابد (Jaleel et al., 2009). در مطالعه حاضر، در سال های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ محتوای کارتنوئید در تیمار آبیاری در ۶۰ درصد رطوبت قابل استفاده در مرحله رویشی و بدون زئولیت و کود ($I_4Z_1F_1$) در مقایسه با تیمار شاهد ($I_1Z_1F_1$) به ترتیب بیش از ۴۳ و ۵۵ درصد افزایش یافت (جدول ۴). در تنش های شدید، میزان کاروتنوئید که به عنوان یک عامل حمایت کننده برای کلروفیل ها در برابر اکسیداسیون نوری به شمار می روند افزوده می شود تا مانع تخریب بیشتر کلروفیل ها شود. این نتایج با یافته های سایر محققان مطابقت دارد (Abdalla & El-Khoshiban, 2007; Khaleghi et al., 2012).

تریگونلین

تجزیه واریانس نشان داد که در سال ۱۳۹۳ مقدار تریگونلین تحت تأثیر اثرات برهمکنش رژیم آبیاری $\times$ زئولیت $\times$ کود و در سال ۱۳۹۴ تحت تأثیر اثرات اصلی آبیاری و کود نیتروژن قرار گرفت (جدول ۳). حداکثر مقدار محتوای تریگونلین در سال ۱۳۹۳، در تیمار تنش خفیف کم آبی در مرحله رویشی با کاربرد زئولیت

مقدار کلروفیل a با افزایش تنش کم آبی در هر دو سال کاهش معنی داری یافت. بیشترین مقدار کلروفیل a در هر دو سال در تیمارهای بدون تنش کم آبی و بدون زئولیت با ورمی کمپوست ($I_1Z_1F_2$) مشاهده شد و کمترین مقدار کلروفیل a در هر دو سال در تیمار تنش شدید کم آبی در مرحله رویشی بدون مصرف کود و زئولیت ($I_4Z_1F_1$) به دست آمد (جدول ۴). همچنین در سال ۱۳۹۳، مقدار کلروفیل b به طور معنی داری تحت تأثیر اثرات برهمکنش سه گانه رژیم آبیاری $\times$ زئولیت $\times$ کود نیتروژن قرار گرفت (جدول ۴). اما در سال ۱۳۹۴، اثرات برهمکنش دو گانه رژیم آبیاری $\times$ کود نیتروژن بر مقدار کلروفیل b معنی دار شد که بیشترین مقدار کلروفیل b در تیمار (I_1F_2) و کمترین مقدار آن در تیمارهای (I_4F_2 و I_2F_1) مشاهده شد (جدول ۵).

تجزیه واریانس نشان داد که در هر دو سال مقدار کلروفیل کل $(a+b)$ و کارتنوئید تحت تأثیر اثرات برهمکنش رژیم آبیاری $\times$ زئولیت $\times$ کود نیتروژن قرار گرفت (جدول ۳). بیشترین مقدار کلروفیل کل $(a+b)$ در سال ۱۳۹۳ مربوط به گیاهانی بود که در تیمارهای بدون تنش کم آبی با کود ورمی کمپوست با یا بدون زئولیت ($I_1Z_1F_2$ و $I_1Z_2F_2$) با (۷ میلی گرم برگرم وزن تازه برگ) قرار داشتند و در سال ۱۳۹۴، بیشترین مقدار کلروفیل کل در تیمارهای ($I_3Z_2F_2$ و $I_1Z_2F_3$ ، $I_3Z_1F_2$ ، $I_1Z_2F_2$ ، $I_1Z_1F_3$ ، $I_1Z_1F_2$) مشاهده شدند. کمترین مقدار کلروفیل کل در سال ۱۳۹۳ تیمارهای تنش کم آبی در مرحله رویشی ($I_2Z_2F_1$ ، $I_2Z_1F_1$)، تیمارهای ($I_4Z_2F_2$ و $I_4Z_2F_1$ ، $I_4Z_1F_2$ ، $I_4Z_1F_1$) با (۳ میلی گرم برگرم وزن تازه برگ) به دست آمد و کمترین مقدار کلروفیل کل در سال ۱۳۹۴ در تیمار آبیاری پس از تخلیه ۴۰ درصد رطوبت قابل استفاده خاک در مرحله رویشی و همراه با زئولیت و بدون کود با (۳/۳۳ میلی گرم برگرم وزن تازه برگ) مشاهده شد (جدول ۴). همچنین بیشترین مقدار کاروتنوئید در هر دو سال در تیمار تنش شدید کم آبی در مرحله رویشی بدون کاربرد زئولیت و کود مشاهده شد. مطابق جدول (۴)، تنش شدید کم آبی در مرحله رویشی، منجر به افزایش محتوای کارتنوئید در برگ شنبلیله شده است.

در سال ۱۳۹۴، اثر تنش کم آبی خفیف بر محتوای کلروفیل به وسیله ورمی کمپوست به دلیل نقش آن در کاهش نیاز آبی گیاهان (۳۰ تا ۴۰ درصد) و افزایش فراهمی مواد غذایی قابل دسترس خاک (مقدار نیتروژن و فسفر در ورمی کمپوست اغلب ۵ تا ۱۱ برابر بیشتر از

جدول ۳- تحلیل واریانس (میانگین مربعات) اثرات رژیم‌های آبیاری، کود و ژئولیت بر فلورسانس کلروفیل، رنگدانه‌ها، تریگونلین و عملکرد دانه شنبلیله

Table 3. Analysis of variance for the main and interactive effects of irrigation (I), fertilizer (F) and zeolite (Z) on Chl fluorescence, pigments, trigonelline and seed yield in fenugreek.

منابع تغییرات (سال ۱۳۹۳)	درجه آزادی	F_m	F_v	F_v/F_m	F_0	کاروتنوئید	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	تریگونلین	عملکرد دانه
تکرار	۲	۰/۰۰۸۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۲۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۳۶۹۵ ^{ns}	۰/۰۰۳۴ ^{ns}	۰/۰۰۷۷ ^{ns}	۰/۰۱۱۱ ^{ns}	۱۵۰۳/۵۳ ^{ns}	۳۱۰۱/۶۱ ^{ns}
(I) آبیاری	۴	۰/۰۱۴۵ ^{**}	۰/۰۱۵۷ ^{**}	۰/۰۲۱۱ [*]	۰/۰۱۲۶ ^{**}	۴۲۷/۵۱ ^{**}	۱۳/۷۷۸ ^{**}	۳/۵۹۴۴ ^{**}	۲۸/۶۲۷ ^{**}	۵۳۰۱۵۷/۳ ^{**}	۷۴۰۰۹۳/۷ ^{**}
خطای a	۸	۰/۰۰۲۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۱۱۶ ^{ns}	۰/۰۰۱۸ ^{ns}	۰/۴۱۱۷ ^{ns}	۰/۰۰۳۴ ^{ns}	۰/۰۰۳۶۱ ^{ns}	۰/۰۱۱۱ ^{ns}	۴۹۶/۱۱ ^{ns}	۸۱۶۹/۶۳ ^{ns}
(Z) ژئولیت	۱	۰/۰۰۴۵ ^{ns}	۰/۰۲۰۵ ^{**}	۰/۱۲۷۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۷ ^{ns}	۰/۰۹۶۰ ^{ns}	۰/۱۸۰۴ ^{**}	۰/۱۰۰ ^{ns}	۰/۵۴۴۴ ^{**}	۶۵۱۹/۵۱ [*]	۱۲۴۶۶۷/۴ ^{**}
(F) کود	۲	۰/۰۰۴۳ ^{ns}	۰/۰۲۴۸ ^{**}	۰/۰۱۹۹ ^{ns}	۰/۰۱۴۴ ^{**}	۶۷/۷۱۸ ^{**}	۲/۶۰۸۱ ^{**}	۰/۵۷۷۷ ^{**}	۶/۱۷۷۷ ^{**}	۷۹۹۶۹/۲۳ ^{**}	۲۶۵۸۲۵/۱ ^{**}
I*Z	۴	۰/۰۰۱۰ ^{ns}	۰/۰۰۱۸ ^{**}	۰/۰۰۲۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۶ ^{ns}	۳/۷۴۱۷ ^{**}	۰/۰۴۴۰ ^{**}	۰/۱۲۷۷ ^{**}	۰/۱۲۷۷ ^{**}	۲۵۰۶/۵۱ ^{ns}	۴۸۷۳/۶۵ ^{ns}
I*F	۸	۰/۰۱۵۸ ^{**}	۰/۰۰۸۴ ^{**}	۰/۰۱۳۱ ^{ns}	۰/۰۰۲۲ ^{**}	۱۱/۵۵۸ ^{**}	۰/۱۸۵۰ ^{**}	۰/۳۶۹۴ ^{**}	۱/۰۵۲۷ ^{**}	۸۲۹۸/۶۵ ^{**}	۳۲۵۰۸/۱۷ ^{**}
Z*F	۲	۰/۰۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۵ ^{ns}	۰/۰۱۳۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۷ ^{ns}	۰/۱۰۳۴ ^{ns}	۰/۰۱۰۱ [*]	۰/۱۳۳۳ [*]	۰/۰۴۴۴ [*]	۲۱۷۲۹/۸۷ ^{**}	۹۶۵۱/۴۹ ^{ns}
I*Z*F	۸	۰/۰۰۵۳ ^{ns}	۰/۰۰۳۴ ^{**}	۰/۰۰۴۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۴ ^{ns}	۱/۲۸۰۹ [*]	۰/۰۴۱۱ ^{**}	۰/۱۱۹۴ ^{**}	۰/۲۵۲۷ ^{**}	۳۶۷۶/۲۱ ^{**}	۱۰۸۴/۵۷ ^{ns}
خطای b	۵۰	۰/۰۰۳۳ [*]	۰/۰۰۰۲ [*]	۰/۰۰۷۹ [*]	۰/۰۰۰۸ [*]	۰/۴۶۹۰ [*]	۰/۰۰۲۰ [*]	۰/۰۳۱۱ [*]	۰/۰۱۱۱ [*]	۱۱۴۶/۶۸ [*]	۸۶۲۰/۰۷ [*]
(C.V)		۲۰/۰۵	۱۰/۸۶	۲۴/۴۵	۱۸/۳۳	۳/۶۸	۱/۴۴	۱۱/۴۲	۲/۲۲	۴/۹۰	۲۲/۶۶
تکرار (سال ۱۳۹۴)	۲	۰/۰۰۰۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۲۲ ^{ns}	۰/۰۰۴۱ ^{ns}	۰/۰۲۲۰ ^{ns}	۰/۰۴۳۵ ^{ns}	۰/۰۳۳۳ ^{ns}	۰/۰۳۳۳ ^{ns}	۱۷۸۲۷/۸۷ ^{ns}	۱۰۹۶۹/۱۲ ^{ns}
(I) آبیاری	۴	۰/۰۰۳۱ ^{**}	۰/۰۰۷۳ ^{**}	۰/۰۱۱۹ [*]	۰/۰۱۴۲ ^{**}	۴۲۲/۱۶ ^{**}	۱۳/۰۱۰۵ ^{**}	۲/۵۲۷۷ ^{**}	۲۸/۶۲۷ ^{**}	۸۱۰۱۸۹/۸۴ ^{**}	۸۱۴۳۵۱/۳ ^{**}
خطای a	۸	۰/۰۰۰۷ ^{ns}	۰/۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۳۵ ^{ns}	۰/۰۰۲۷ ^{ns}	۰/۴۴۳۳ ^{ns}	۰/۰۲۲۵ ^{ns}	۰/۰۶۱۱ ^{ns}	۰/۰۶۱۱ ^{ns}	۹۴۱۱/۰۰ ^{ns}	۳۱۱۶/۸۵ ^{ns}
(Z) ژئولیت	۱	۰/۰۱۷۰ [*]	۰/۰۰۷۸ ^{**}	۰/۰۶۳۷ ^{**}	۰/۰۱۱۱ [*]	۰/۱۳۹۲ ^{ns}	۰/۱۷۵۱ [*]	۰/۲۷۷۷ ^{ns}	۰/۵۴۴۴ ^{**}	۳۲۸۸/۱ ^{ns}	۱۳۹۶۴۸/۸ ^{**}
(F) کود	۲	۰/۰۱۰۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۷ ^{ns}	۰/۰۱۴۹ [*]	۰/۰۰۶۴ [*]	۶۹/۲۲۵ ^{**}	۳/۳۴۶۷ ^{**}	۰/۱۳۳۳ ^{ns}	۴/۱۳۳۳ ^{**}	۶۹۳۱۹/۸۱ ^{**}	۱۴۳۰۶۲/۹ ^{**}
I*Z	۴	۰/۰۲۵۴ ^{**}	۰/۰۱۱۴ ^{**}	۰/۰۱۶۵ [*]	۰/۰۰۲۸ ^{ns}	۳/۷۷۶ ^{**}	۰/۰۷۵۰ [*]	۰/۰۸۳۳ ^{ns}	۰/۳۲۲۲ ^{**}	۳۲۱۰/۷۱ ^{ns}	۳۶۳/۲۳ ^{ns}
I*F	۸	۰/۰۱۸۵ ^{**}	۰/۰۱۱۲ ^{**}	۰/۰۴۳۱ ^{**}	۰/۰۰۱۵ ^{**}	۱۲/۱۸۷ ^{**}	۰/۰۹۰۶ ^{**}	۰/۸۶۹۴ ^{**}	۰/۷۰۲۷ ^{**}	۷۹۵۵/۶۴ ^{ns}	۲۹۶۶۷/۵۴ ^{**}
Z*F	۲	۰/۰۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۴۵ ^{**}	۰/۰۵۱۳ ^{**}	۰/۰۰۰۵ ^{ns}	۰/۱۰۸۲ ^{**}	۰/۰۱۳۴ ^{ns}	۰/۰۴۴۴ ^{ns}	۰/۳۱۱۱ ^{**}	۱۰۸۳۶/۸۷ ^{ns}	۲۸۹۷۰/۴۷ [*]
I*Z*F	۸	۰/۰۰۲۴ ^{ns}	۰/۰۰۳۹ ^{**}	۰/۰۰۵۱ ^{ns}	۰/۰۰۲۷ ^{ns}	۱/۲۹۱۲ [*]	۰/۰۹۴۱ ^{**}	۰/۰۵۸۳ ^{ns}	۰/۳۸۰۵ ^{**}	۳۶۷۶/۲۱ ^{ns}	۱۱۰۹۰/۳۵ ^{ns}
خطای b	۵۰	۰/۰۰۴۱ [*]	۰/۰۰۰۲ [*]	۰/۰۰۳۶ [*]	۰/۰۰۱۷ [*]	۰/۴۸۳۳ [*]	۰/۰۲۸۲ [*]	۰/۰۶۸۸ [*]	۰/۰۴۲۲ [*]	۶۲۲۱/۲۹ [*]	۹۰۹۵/۷۴ [*]
(C.V)		۲۳/۷۱	۱۶/۷۱	۲۱/۳۸	۲۳/۲۷	۳/۹۷	۵/۲۷	۱۴/۳۱	۳/۹۲	۷/۳۱	۱/۴۷

در سال ۱۳۹۳، تیمارهای تنش کم آبی خفیف در مرحله رویشی همراه با کود ورمی کمپوست و کود شیمیایی نیتروژن بیشترین تجمع تریگونلین را به خود اختصاص داده است. مطابق با نتایج این تحقیق، محققان بسیاری گزارش کرده‌اند که درصد اسانس و متابولیت‌های ثانویه (به‌خصوص غلظت تریگونلین) با تنش خفیف کم آبی افزایش می‌یابد (Cho *et al.*, 2011). به‌طور کلی نقش تعیین کننده ترکیبات نیتروژنه در افزایش آلکالوئیدها، ناشی از این موضوع است که نیتروژن مولکول اصلی در ترکیب اسیدهای آمینه و متابولیت‌های حاصل از آلکالوئیدها است (Facchini, 2001). نتایج نشان داد که تفاوت آماری معنی‌داری بین انواع مختلف کودی نیتروژن (کود ورمی کمپوست و اوره) در سال ۱۳۹۴ وجود نداشت. در توافق با نتایج مطالعه حاضر، دادرسان و همکاران (Dadrasan *et al.*, 2015) گزارش کردند که استفاده از انواع مختلف کود نیتروژن (کود بیولوژیکی، شیمیایی و تلفیقی از آن‌ها) اثر معنی‌داری بر غلظت تریگونلین در شنبلیله نداشت (Dadrasan *et al.*, 2015).

و ورمی کمپوست ($I_2Z_2F_2$) به مقدار $1056/6$ میکروگرم بر میلی گرم وزن دانه مشاهده شد و کمترین آن در تیمار تنش شدید کم آبی در مرحله رویشی با ژئولیت و بدون کود نیتروژن ($I_4Z_2F_1$) با 419 میکروگرم بر میلی گرم وزن دانه) به‌دست آمد. اما در سال ۱۳۹۴، به‌ترتیب بیشترین و کمترین محتوای تریگونلین مربوط به تیمار آبیاری پس از تخلیه 40 درصد رطوبت قابل استفاده خاک در مرحله رویشی و تیمار آبیاری کامل مشاهده شد (شکل ۲). همچنین به‌ترتیب بیشترین و کمترین محتوای تریگونلین مربوط به اثر اصلی کود در تیمار کاربرد کود ورمی کمپوست و در تیمار بدون کاربرد کود $734/77$ و $648/57$ میکروگرم بر میلی گرم وزن دانه) به‌دست آمد. مطابق با نتایج، اختلاف آماری معنی‌داری بین کاربرد کود ورمی کمپوست و کود شیمیایی نیتروژن در رابطه با تجمع تریگونلین در دانه شنبلیله وجود نداشت. تریگونلین یک ترکیب آلکالوئیدی است که در پاسخ به تنش‌های اکسیداتیو، تنظیم فشار اسمزی در واکنش به تنش شوری و خشکی نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند (Shimizu & Mazzafera, 2000).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات برهمکنش رژیم‌های آبیاری، ژئولیت و کود بر F_v ، رنگدانه‌ها و تریگونلین دانه شنبلیله.

Table 4. Irrigation regime (I) $\times$ zeolite (Z) $\times$ fertilizer (F) interaction on Chl fluorescence, pigments and trigonelline in fenugreek.

تریگونلین (میکرو گرم بر گرم)	کلروفیل <i>b</i> Chl <i>b</i>	کلروفیل کل Total Chl		کلروفیل <i>a</i> Chl <i>a</i>		کارتنوئید (میکرو گرم بر گرم)		<i>F_v</i> (فلورسانس متغیر)		کود	مقدار	رژیم
Trigonelin		(میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) (mg.g)				وزن تر برگ				نیتروژن	زنولیت	آبیاری
						Carteniod				F	Z	I
۱۳۹۳	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۳			
۶۲۴/۶۷ ^{kl}	۲/۰. ^a	۶/۰. ^b	۶/۰. ^b	۳/۸۸ ^{de}	۳/۸۲ ^e	۱۳/۸۲ ^l	۱۴/۸۵ ^l	۰/۱۰. ^{fgh}	۰/۱۳۶ ^{hij}	F ₁	۰	I ₁
۶۷۵/۰. ^{jk}	۲/۰. ^a	۷/۰. ^a	۷/۰. ^a	۴/۶۱ ^a	۴/۵۹ ^a	۱۲/۵ ^{mn}	۱۳/۵۱ ^{mn}	۰/۰۳۰. ^m	۰/۱۰۶ ^{klm}	F ₂		
۷۳۴/۰. ^{ghi}	۲/۰. ^a	۷/۰. ^a	۶/۰. ^b	۴/۲۱ ^b	۴/۲۶ ^b	۹/۷۲ ^{pq}	۱۰/۷۵ ^{op}	۰/۰۲۶ ^m	۰/۱۰۶ ^{klm}	F ₃		
۶۵۱/۶۶ ^{kl}	۲/۰. ^a	۶/۰. ^b	۶/۰. ^b	۳/۹۰. ^{cde}	۳/۹۳ ^d	۱۳/۷۶ ^l	۱۴/۷۹ ^l	۰/۲۸۳ ^a	۰/۱۲۶ ^{jk}	F ₁	۹	
۷۳۴/۰. ^{ghi}	۲/۰. ^a	۷/۰. ^a	۷/۰. ^a	۴/۶۰. ^a	۴/۵۸ ^a	۱۱/۸۹ ^o	۱۲/۹۲ ⁿ	۰/۰۹ ^{ghi}	۰/۱۰۳ ^{klm}	F ₂		
۷۲۱/۶۶ ^{hij}	۲/۰. ^a	۷/۰. ^a	۶/۰. ^b	۴/۱۶ ^{bc}	۴/۱ ^c	۸/۸۲ ^q	۹/۸۵ ^p	۰/۰۸ ^{hijk}	۰/۱۹۳ ^{cde}	F ₃		
۸۰۱/۶۶ ^{def}	۱/۰. ^d	۴/۰. ^{ef}	۳/۰. ^f	۲/۰۶ ^{op}	۲/۰۸ ^{pq}	۲۳/۵۶ ^{cd}	۲۴/۵۹ ^{cd}	۰/۰۵۶ ^{kl}	۰/۱۸۰. ^{def}	F ₁	۰	I ₂
۸۶۸/۰. ^c	۱/۰. ^d	۴/۰. ^{ef}	۴/۰. ^e	۲/۶۷ ^{lm}	۲/۶۳ ^m	۱۹/۳۰. ^{gh}	۲۰/۳۳ ^{gh}	۰/۰۸ ^{hijk}	۰/۲۰۶ ^{bc}	F ₂		
۱۰۰۸/۳ ^a	۱/۰. ^d	۴/۰. ^{ef}	۴/۰. ^e	۲/۵. ^{mn}	۲/۵۲ ⁿ	۲۰/۸۳ ^{ef}	۲۱/۸۶ ^{ef}	۰/۰۹ ^{fgh}	۰/۱۶۳ ^{fgh}	F ₃		
۷۸۸/۶۶ ^{efg}	۱/۰. ^d	۳/۳۳ ^g	۳/۰. ^f	۲/۰۸ ^{op}	۲/۰۳ ^q	۲۲/۹۶ ^d	۲۳/۹۹ ^d	۰/۰۹ ^{ghi}	۰/۱۷۰. ^{efg}	F ₁	۹	
۱۰۵۶/۶ ^a	۲/۰. ^a	۵/۰. ^e	۵/۰. ^d	۳/۱۲ ^{hi}	۳/۰۶ ⁱ	۱۸/۵۲ ^{hi}	۱۹/۵۵ ^{hi}	۰/۱۰۳ ^{fg}	۰/۲۰۰. ^{cd}	F ₂		
۹۵۱/۰. ^b	۱/۰. ^d	۵/۰. ^e	۴/۰. ^e	۲/۸۱ ^{jkl}	۲/۸۰. ^k	۱۹/۸۳ ^{fg}	۲۰/۸۶ ^{fg}	۰/۱۵ ^{bcd}	۰/۲۱۶ ^{bc}	F ₃		
۷۱۱/۰. ^{ij}	۲/۰. ^a	۶/۰. ^b	۵/۰. ^d	۳/۴۷ ^{fg}	۳/۵۵ ^g	۱۴/۱۷ ^l	۱۵/۲۰. ^l	۰/۱۴ ^{cde}	۰/۱۴۶ ^{ghij}	F ₁	۰	I ₃
۷۷۰/۶ ^{fgh}	۲/۰. ^a	۷/۰. ^a	۶/۰. ^b	۴/۱۶. ^{bc}	۴/۱۰۳ ^c	۱۰/۱۷ ^p	۱۱/۲۰ ^o	۰/۱۶۶ ^b	۰/۱۰۰. ^{lm}	F ₂		
۸۵۲/۰. ^{cd}	۲/۰. ^a	۶/۰. ^b	۶/۰. ^b	۳/۸۴ ^{de}	۳/۸۸ ^{de}	۱۴/۲۳ ^l	۱۵/۲۶ ^l	۰/۰۹ ^{ghi}	۰/۱۴۰. ^{hij}	F ₃		
۷۲۵/۶۶ ^{hij}	۲/۰. ^a	۶/۰. ^b	۵/۳۳ ^c	۳/۶۶ ^{ef}	۳/۶۴ ^f	۱۵/۳۶ ^k	۱۶/۳۹ ^k	۰/۰۶. ^{jkl}	۰/۲۰۶ ^{bc}	F ₁	۹	
۸۵۵/۰. ^{cd}	۲/۰. ^a	۷/۰. ^a	۶/۰. ^b	۴/۱۲ ^{bcd}	۴/۰۷ ^c	۱۳/۳۳ ^{lm}	۱۴/۳۶ ^{lm}	۰/۱۳. ^{de}	۰/۱۲۳ ^{ijkl}	F ₂		
۸۲۷/۶۶ ^{cde}	۲/۰. ^a	۶/۰. ^b	۶/۰. ^b	۳/۹۷ ^{bcd}	۳/۹۵ ^d	۱۴/۴۰. ^{kl}	۱۵/۴۳ ^{kl}	۰/۱۶۰. ^{bc}	۰/۱۹ ^{cde}	F ₃		
۴۲۸/۶۶ ^{qr}	۱/۰. ^d	۴/۰. ^{ef}	۳/۰. ^f	۱/۸۴ ^p	۱/۸۵ ^s	۲۵/۱۲ ^a	۲۶/۱۵ ^a	۰/۰۸ ^{ghik}	۰/۱۳۳ ^{ij}	F ₁	۰	I ₄
۴۷۲/۰. ^{pqr}	۱/۰. ^d	۴/۰. ^{ef}	۳/۰. ^f	۲/۶۷ ^{lm}	۲/۱۱ ^p	۲۴/۲ ^{abc}	۲۵/۲ ^{abc}	۰/۱۶ ^{ef}	۰/۰۶۳ ⁿ	F ₂		
۴۸۹/۶۶ ^p	۱/۰. ^d	۴/۰. ^{ef}	۴/۰. ^e	۲/۳۳ ^{no}	۲/۳۹ ^o	۲۱/۰۲ ^e	۲۲/۳۰ ^e	۰/۰۵۶ ^{kl}	۰/۱۵ ^{ghi}	F ₃		
۴۱۹/۰. ^r	۱/۳۳ ^c	۴/۰. ^{ef}	۳/۰. ^f	۱/۹۷ ^p	۱/۹۴ ^r	۲۴/۷۱ ^{ab}	۲۵/۷۴ ^{ab}	۰/۰۵۰. ^{lm}	۰/۱۰۰. ^{lm}	F ₁	۹	
۵۴۸/۶۶ ^o	۱/۰. ^d	۳/۶۶ ^{fg}	۳/۰. ^f	۲/۱ ^{op}	۲/۰۴ ^{pq}	۲۳/۸ ^{bcd}	۲۴/۸ ^{bcd}	۰/۰۵۰. ^{lm}	۰/۱۶ ^{fgh}	F ₂		
۴۸۰/۳۳ ^{pq}	۱/۰. ^d	۴/۰. ^{ef}	۴/۰. ^e	۲/۵۵ ^{lmn}	۲/۵۲ ⁿ	۲۱/۳۴ ^e	۲۲/۷۱ ^e	۰/۰۸ ^{hijk}	۰/۱۴ ^{hij}	F ₃		
۵۹۸/۰. ^{lmno}	۱/۰. ^d	۴/۳۳ ^{de}	۴/۰. ^e	۲/۶۸ ^{klm}	۲/۶۹ ^{lm}	۱۹/۶۷ ^g	۲۰/۷۰ ^g	۰/۰۷ ^{ijkl}	۰/۰۶۰. ^{no}	F ₁	۰	I ₅
۶۱۱/۳۳ ^{lmn}	۲/۰. ^a	۵/۰. ^e	۵/۰. ^d	۳/۲۷ ^{gh}	۳/۲۲ ^h	۱۶/۸۲ ^j	۱۷/۸۵ ^j	۰/۰۹ ^{fghi}	۰/۱۲۶ ^{jk}	F ₂		
۵۷۷/۳ ^{mno}	۱/۶۶ ^b	۵/۰. ^e	۴/۰. ^e	۲/۹۵ ^{ijk}	۲/۹۵ ^j	۱۸/۱۵ ⁱ	۱۹/۱۸ ⁱ	۰/۰۸ ^{ghij}	۰/۲۳۰. ^{ab}	F ₃		
۵۵۵/۰. ^o	۱/۰. ^d	۵/۰. ^e	۴/۰. ^e	۲/۷۵ ^{klm}	۲/۷۴ ^{kl}	۱۹/۴۷ ^{gh}	۲۰/۵۴ ^{gh}	۰/۰۸ ^{hijk}	۰/۰۹۳ ^m	F ₁	۹	
۵۹۴/۳ ^{mno}	۲/۰. ^a	۶/۰. ^b	۵/۰. ^d	۳/۶۳ ^{ef}	۳/۵۶ ^g	۱۵/۳۹ ^k	۱۶/۵۰. ^k	۰/۰۷ ^{ijkl}	۰/۱۳۳ ^{ij}	F ₂		
۵۶۸/۳۳ ^{no}	۱/۳۳ ^c	۵/۰. ^e	۵/۰. ^d	۳/۰. ^{hij}	۳/۰۵ ⁱ	۱۸/۴۷ ^{hi}	۱۹/۵۰. ^{hi}	۰/۰۹ ^{ghi}	۰/۲۴۶ ^a	F ₃		

I₁=آبیاری پس از تخلیه ۲۰ درصد ASW؛ I₂ و I₃=آبیاری پس از تخلیه ۴۰ درصد ASW در مرحله رویشی و زایشی؛ I₄ و I₅=آبیاری پس از تخلیه ۶۰ درصد ASW در مرحله رویشی و زایشی. F₁ و F₂ و F₃(بدون کود نیتروژن، ۲/۷ تن در هکتار ورمی کمپوست، ۱۱ کیلوگرم در هکتار اوره). در هر ستون میانگین‌هایی که با حروف مشترک نشان داده شده‌اند، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

I₁: Irrigation at 20% of ASW; I₂, I₃: irrigation at 40% of ASW during the vegetative and reproductive stages respectively; I₄, I₅: irrigation at 60% of ASW during the vegetative and reproductive stages respectively; F₁, F₂, F₃: (Zero nitrogen, 2.7 ton.ha⁻¹ vermicompost, 11 kg.ha⁻¹ Urea). Means within a column followed by the same letter are not significantly different at the level of 5%.

جدول ۵- اثرات برهمکنش رژیم آبیاری و کود نیتروژن بر F_v/F_m ، F_0 ، F_m ، کلروفیل b و عملکرد دانه در شنبلیله.

Table 5. Irrigation regime (I) $\times$ fertilizer (F) interaction on Chl fluorescence, pigments and seed yield in fenugreek.

(2015) ۱۳۹۴					(2014) ۱۳۹۳				
عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Seed yield (Kg ha ⁻¹)	کلروفیل b (میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) Chl b (mg.g)	F_v/F_m	F_0	F_m	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Seed yield (Kg ha ⁻¹)	F_0	F_m	کود Fertilizer	رژیم آبیاری I
۷۱۴/۸b	۲/۱۶b	۰/۴۶a	۰/۲bcde	۰/۳۸a	۶۰۵/۲ b	۰/۱۶cd	۰/۲۵def	F ₁	I ₁
۹۵۹/۶a	۲/۶۶a	۰/۲۷ef	۰/۱۵ef	۰/۲۱fg	۹۰۳/۱a	۰/۱۵d	۰/۲۶def	F ₂	
۶۰۱/۲c	۲/۰۰bc	۰/۲۹def	۰/۱۱f	۰/۱۶g	۵۵۴/۶ b	۰/۱۹abc	۰/۳۱bcd	F ₃	
۴۸۱/۰۶d	۱/۰۰e	۰/۲۹cdef	۰/۱۹bcde	۰/۲۶cdef	۵۰۲/۴ bc	۰/۱e	۰/۲۷def	F ₁	I ₂
۴۹۵/۶ cd	۱/۸۳cd	۰/۳۱cde	۰/۱۷bcde	۰/۲۵def	۶۰۴/۹ b	۰/۰۹e	۰/۲۵cde	F ₂	
۴۱۵/۴ de	۱/۶۶d	۰/۳۵bcd	۰/۱۷cde	۰/۲۵def	۴۴۲/۱ c	۰/۱۶cd	۰/۲۶def	F ₃	
۳۲۹/۶efg	۲/۰۰bc	۰/۱۹g	۰/۲۱abc	۰/۳۲abcd	۱۲۴/۲ f	۰/۲۱a	۰/۳۹a	F ₁	I ₃
۴۲۰/۱de	۲/۰۰bc	۰/۴۳ab	۰/۱۸bcde	۰/۳۳abc	۳۰۱/۸ d	۰/۱۵d	۰/۲۶def	F ₂	
۲۷۸/۲fgh	۲/۰۰bc	۰/۳۷bc	۰/۲abcd	۰/۳۳abc	۲۷۳/۲ de	۰/۲ab	۰/۳۶ab	F ₃	
۳۳۰/۲efg	۲/۰۰bc	۰/۲۲fg	۰/۱۶cde	۰/۲۲efg	۴۱۶/۲ c	۰/۱۷bcd	۰/۳bcd	F ₁	I ₄
۳۹۴/۹de	۱/۰۰e	۰/۳۳cde	۰/۱۶def	۰/۲۴ef	۵۱۵/۴ bc	۰/۱۷cd	۰/۲۱def	F ₂	
۳۴۰/۵ef	۱/۶۶d	۰/۲۸def	۰/۱۷bcde	۰/۲۴ef	۳۰۶/۵ d	۰/۱۶cd	۰/۲۲f	F ₃	
۱۴۱/۱i	۲/۰۰bc	۰/۳۲cde	۰/۲۴a	۰/۳bcde	۱۴۷/۵ f	۰/۱۵d	۰/۲۳ef	F ₁	I ₅
۲۲۴/۴ghi	۲/۰۰bc	۰/۳۳cde	۰/۲۲ab	۰/۲۹bcdef	۲۶۶/۳ de	۰/۱۵d	۰/۲۹cde	F ₂	
۱۹۵/۵hi	۲/۰۰bc	۰/۳۶bcd	۰/۲abcd	۰/۳۴ab	۱۸۱/۷ ef	۰/۲۱a	۰/۳۵abc	F ₃	

I₁ = آبیاری پس از تخلیه ۲۰ درصد ASW؛ I₂ و I₃ = آبیاری پس از تخلیه ۴۰ درصد ASW در مرحله رویشی و زایشی؛ I₄ و I₅ = آبیاری پس از تخلیه ۶۰ درصد ASW در مرحله رویشی و زایشی. F₁ و F₂ (بدون کود نیتروژن، ۲/۷ تن در هکتار ورمی کمپوست، ۱۱ کیلوگرم در هکتار اوره). در هر ستون میانگین‌هایی که با حروف مشترک نشان داده شده‌اند، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

I₁: Irrigation at 20% of ASW; I₂, I₃: irrigation at 40% of ASW during the vegetative and reproductive stages respectively; I₄, I₅: irrigation at 60% of ASW during the vegetative and reproductive stages respectively; F₁, F₂, F₃: (Zero nitrogen, 2.7 ton.ha⁻¹ vermicompost, 11 kg.ha⁻¹ Urea). Means within a column followed by the same letter are not significantly different at the level of 5%.

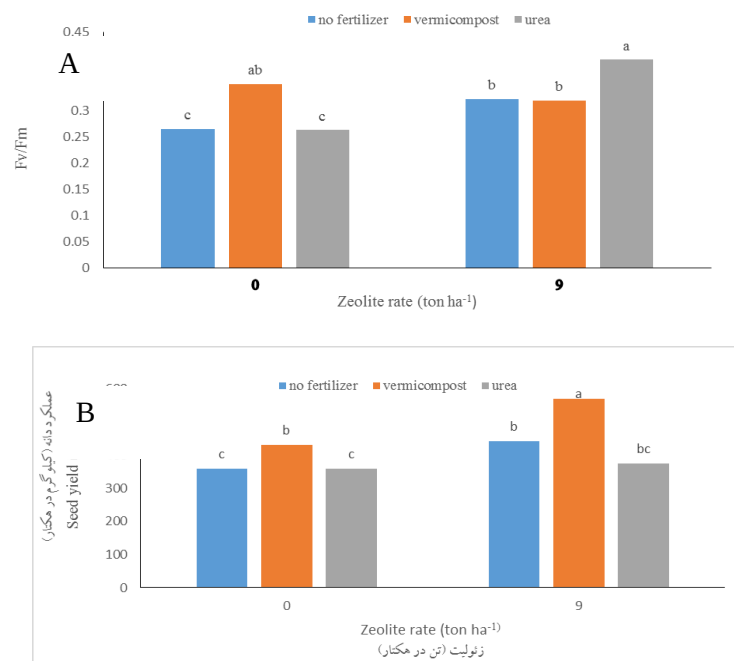
جدول ۶- اثرات برهمکنش رژیم آبیاری و زئولیت بر F_v/F_m و F_m در شنبلیله در سال ۱۳۹۴.

Table 6. Irrigation regime (I) $\times$ zeolite (Z) interaction on Chl fluorescence in fenugreek in 2015.

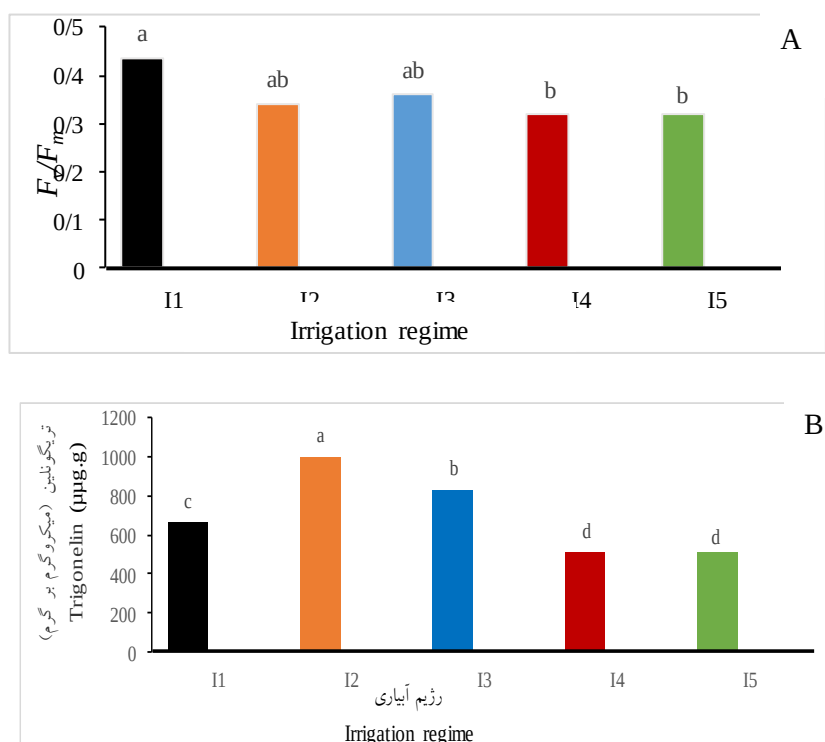
F_v/F_m	F_m	مقدار زئولیت (تن در هکتار)	رژیم آبیاری
		Zeolite rate (ton ha ⁻¹)	Irrigation regime
۰/۲۷d	۰/۱۷e	۰	I ₁
۰/۴۱a	۰/۳۲ab	۹	
۰/۲۸d	۰/۲۳de	۰	I ₂
۰/۳۶ab	۰/۲۷bcd	۹	
۰/۳۱bcd	۰/۳۴a	۰	I ₃
۰/۳۵ab	۰/۳۱abc	۹	
۰/۲۷d	۰/۲۵cd	۰	I ₄
۰/۲۸cd	۰/۲۱de	۹	
۰/۳۴abc	۰/۳abc	۰	I ₅
۰/۳۲bcd	۰/۳۲ab	۹	

I₁ = آبیاری پس از تخلیه ۲۰ درصد ASW؛ I₂ و I₃ = آبیاری پس از تخلیه ۴۰ درصد ASW در مرحله رویشی و زایشی؛ I₄ و I₅ = آبیاری پس از تخلیه ۶۰ درصد ASW در مرحله رویشی و زایشی. در هر ستون میانگین‌هایی که با حروف مشترک نشان داده شده‌اند، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

I₁: Irrigation at 20% of ASW; I₂, I₃: irrigation at 40% of ASW during the vegetative and reproductive stages respectively; I₄, I₅: irrigation at 60% of ASW during the vegetative and reproductive stages respectively. Means within a column followed by the same letter are not significantly different at the level of 5%.



شکل ۱- اثر بر همکنش زئولیت و کود بر F_v/F_m . A. عملکرد دانه شنبلیله در سال ۱۳۹۴
Fig. 1. A. Zeolite $\times$ Fertilizer interaction on F_v/F_m . **B.** seed yield in 2015.



شکل ۲- اثر رژیم آبیاری بر F_v/F_m در سال ۱۳۹۳. A. ترینگونلین دانه شنبلیله در سال ۱۳۹۴.

Fig. 2. A. Irrigation regime effect on F_v/F_m in 2014. **B.** and trigonelline in 2015.

I1. آبیاری پس از تخلیه ۲۰ درصد ASW؛ I2 و I3 آبیاری پس از تخلیه ۴۰ درصد ASW در مرحله رویشی و زایشی؛ I4 و I5 آبیاری پس از تخلیه ۶۰ درصد ASW در مرحله رویشی و زایشی.

در هر ستون میانگین‌هایی که با حروف مشترک نشان داده شده‌اند، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

I1. Irrigation at 20% of ASW; I2, I3. irrigation at 40% of ASW during the vegetative and reproductive stages, respectively; I4, I5. irrigation at 60% of ASW during the vegetative and reproductive stages, respectively.

Means within a column followed by the same letter are not significantly different at the level of 5%.

عملکرد دانه

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش کم‌آبی ماکزیمم فلورسانس (F_m)، فلورسانس متغیر (F_v)، کارایی فتوسیستم II (F_v/F_m)، محتوای کلروفیل a ، b و کل ($a+b$) و عملکرد دانه را کاهش داد ولی فلورسانس حداقل (F_0)، کاروتنوئید و غلظت تریگونلین را افزایش داد به گونه‌ای که تجمع بیشترین تریگونلین در گیاهانی به‌دست آمد که در شرایط تنش خفیف کم‌آبی (آبیاری پس از تخلیه ۴۰ درصد رطوبت قابل استفاده گیاه در مرحله رویشی و زایشی) قرار داشتند اما از طرفی دیگر، با کاهش معنی‌دار عملکرد دانه مواجه شد. در حقیقت، اثر منفی تنش خفیف کم‌آبی بر عملکرد دانه به‌طور کامل با اثر مثبت آن در افزایش غلظت تریگونلین جبران شد. در نتیجه غلظت بیشتر متابولیت‌های ثانویه در گیاهان تحت تنش خفیف کم‌آبی ممکن است از نظر اقتصادی باصرفه نباشد زیرا غلظت بیشتر متابولیت‌های ثانویه اغلب با کاهش عملکرد دانه یا بیولوژیک همراه است. سرانجام تنش خفیف کم‌آبی در مرحله رویشی با ورمی کمپوست توانست اثرات منفی تنش کمبود آب را به حداقل برساند و ممکن است از نظر عملکرد اقتصادی و شرایط اکولوژیکی نیز مفید واقع شود.

سپاسگزاری

از گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران که در طول اجرای آزمایش همکاری نموده‌اند تشکر می‌شود.

REFERENCES

- Abdalla, M.M. and El-Khoshiban, N.H. 2007. Metabolic and hormonal contents of two *Triticum aestivum* cultivars. – J. Appl. Sci. Res. 3: 2062-2074.
- Acharya, S.N., Thomas, J.E. and Basu, S.K. 2008. Fenugreek, an alternative crop for semiarid regions of North America. – Crop Sci. 48: 841-53.
- Arancon, N.Q., Edwards, C.A., Bierman, P., Metzger, J.D. and Lucht, C. 2005. Effects of vermicomposts produced from cattle manure, food waste and paper waste on the growth and yield of peppers in the field. – Pedobiol. 49: 297-306.
- Arnon, D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. – Plant Physiol. 24: 1-150.
- Basu, S.K. 2006. Seed production technology for fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) in the Canadian. Master of Science Thesis. Department of Biological Sciences University of Lethbridge, Alberta, Canada pp: 202.

تجزیه واریانس نشان داد که عملکرد دانه در سال ۱۳۹۳ تحت تأثیر اثرات برهمکنش رژیم آبیاری $\times$ کود و نیز اثر اصلی زئولیت و در سال ۱۳۹۴ تحت تأثیر اثرات برهمکنش رژیم آبیاری $\times$ کود و زئولیت $\times$ کود و اثرات اصلی رژیم آبیاری، زئولیت و کود قرار گرفته‌است. در هر دو سال بیشترین مقدار اثر برهمکنش رژیم آبیاری $\times$ کود برای عملکرد دانه در تیمار بدون تنش کم‌آبی همراه با کاربرد کود ورمی کمپوست مشاهده شد و کمترین مقدار آن در سال ۱۳۹۳ در تیمار تنش خفیف کم‌آبی بدون کود نیتروژن (I_3F_1) به‌دست آمد که از نظر آماری به‌ترتیب با تیمارهای تنش شدید کم‌آبی در مرحله زایشی بدون کود نیتروژن و یا با مصرف کود اوره (I_5F_3 و I_5F_1) تفاوت معنی‌داری نداشت و همچنین در سال ۱۳۹۴ در تیمار تنش شدید کم‌آبی در مرحله زایشی بدون کود نیتروژن (I_5F_1) به‌دست آمد (جدول ۴). نتایج نشان داد که در سال ۱۳۹۴، به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقدار برهمکنش اثر زئولیت و کود برای عملکرد دانه در تیمار دارای زئولیت و ورمی کمپوست (Z_2F_2) به مقدار (۵۶۹/۰۹ و ۳۵۷/۶۶ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد (شکل ۱). همچنین مطابق با نتایج، در سال ۱۳۹۳ بیشترین عملکرد دانه مربوط به تیمار کاربرد زئولیت به میزان (۴۴۶/۹ کیلوگرم در هکتار) بود. عملکرد دانه شنبلیله با افزایش شدت تنش کم‌آبی در هر دو سال کاهش یافت. این نتایج مشابه با نتایج سایر محققینی است که گزارش کردند ارتباط قوی بین تنش کم‌آبی و عملکرد دانه و بیولوژیک وجود دارد (Movahhedy-Dehnavy et al., 2009; Mokhtassi-Bidgoli et al., 2013). گزارش شده‌است که مرحله زایشی حساسیت بیشتری به تنش کم‌آبی دارد. کم‌آبی در این مرحله، سبب کاهش در اجزای عملکرد دانه و کاهش طول دوره رسیدن دانه در آفتابگردان می‌شود. در نتیجه کاهش ظرفیت مخزن و کوتاه‌تر شدن طول دوره رشد منجر به کاهش عملکرد دانه می‌شود (Movahhedy-Dehnavy et al., 2009). همچنین در هر دو سال، تیمار بدون تنش کم‌آبی با کود ورمی کمپوست در مقایسه با تیمار شاهد (I_1F_1) به‌ترتیب افزایش ۳۲/۹۸ و ۲۵/۵ درصد در عملکرد دانه را نشان داد. گزارش کردند که کود ورمی کمپوست با بهبود فعالیت میکروارگانیزم‌های مفید خاک و تهیه مداوم و پایدار عناصر معدنی به‌ویژه نیتروژن سبب افزایش عملکرد دانه و بیولوژیک می‌شود (Roy et al., 2010).

- Cho, Y., Kodjoe, E., Puppala, N. and Wood, A.J. 2011. Reduced trigonelline accumulation due to rhizobial activity improves grain yield in peanut (*Arachis hypogaea* L.). – Acta Agri. Scand. B 61: 395-403.
- Conming, L. and Zang, J. 2000. Photosynthetic CO₂ assimilation chlorophyll fluorescence and photoinhibition as affected by nitrogen deficiency in maize plants. – J. Plant Sci. 151: 135-143.
- Dadrasan, M., Chaichi, M. R., Pourbabae, A. A., Yazdani, D. and Keshavarz-Afshar, R. 2015. Deficit irrigation and biological fertilizer influence on yield and trigonelline production of Fenugreek. – Indust. Crops Prod. 77: 156-162.
- Facchini, P.J. 2001. Alkaloid biosynthesis in plants: biochemistry, cell biology, molecular regulation, and metabolic engineering applications. – Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 52: 29-66.
- Francheboud, Y. and Leipner, J. 2003. The application of chlorophyll fluorescence to study light, temperature and drought stress. In: De-Ell, J.R., P.M.A. Tiovonon (Eds.). Practical applications of chlorophyll fluorescence in plant biology. – Boston: Kluwer Academic Publishers. pp: 125-150.
- Hassanzadeh, E., Chaichi, M.R., Mazaheri, D., Rezazadeh, S. and Badi, H.A.N. 2011. Physical and chemical variabilities among domestic Iranian fenugreek (*Trigonella foenum-graceum*) seeds. – Asi. J. Plant Sci. 10: 323-330.
- Hazrati, S., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Modarres-Sanavy, S. A. M., Mokhtassi-Bidgoli, A. and Nicola, S. 2016. Effects of water stress and light intensity on chlorophyll fluorescence parameters and pigments of *Aloe vera* L. – Plant Physiol. Biochem. 106: 141-148.
- Ippolito, A.J., Tarkalson, D.D. and Lehrsch, G.A. 2011. Zeolite soil application method affects inorganic nitrogen, moisture, and Corn growth. – Soil Sci. 176: 136-142.
- Jaleel, C.A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Jasim, H., Somasundaram, R. and Pannarselvam, R. 2009. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. – Inter. J. Agricul. Biol. 11: 100-105.
- Karimi, S., Nasri, M. and Ghoshchi, F. 2013. Investigation of drought stress on agro-physiological indices of sunflower (*Helianthus annuus* L.) with Zeolite application tested in the region of Varamin. – Inter. J. Agricul. Sci. 3: 894-903.
- Khaleghi, E., Arzani, K., Moallemi, N. and Barzegar, M. 2012. Evaluation of chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters and relationships between chlorophyll a, b and chlorophyll content index under water stress in *Olea europaea* cv. Dezful. – World Acad. Sci. Engin.Tech. 68: 1154-1157.
- Mehrfarin, A., Rezazadeh, Sh., Naghdi Badi, H., Noormohammadi, G.H., Zand, E. and Qaderi, A. 2011. A review on biology, cultivation and biotechnology of Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) as a valuable medicinal plant and multipurpose. – J. Med. Plants. 10: 6-24.
- Mokhtassi-Bidgoli, A., Agha Alikhani, M., Nassiri-Mahallati, M., Zand, E., Gonzalez-Andujard, J. L. and Azarie, A. 2013. Agronomic performance, seed quality and nitrogen uptake of *Descurainia Sophia* in response to different nitrogen rates and water regimes. – Indust. Crops Prod. 44: 583-592.
- Movahhedy-Dehnavy, M., Modarres-Sanavy, S.A.M. and Mokhtassi-Bidgoli, A. 2009. Foliar application of zinc and manganese improves seed yield and quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) grown under water deficit stress. – Indust. Crops Prod. 30: 82-92.
- Paknejad, F., Majidi heravan, E., Noor mohammadi, Q., Siyadat, A. and Vazan, S. 2007. Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters, chlorophyll content and grain yield of wheat cultivars. – Amer. J. Bioch. Biotech. 5: 162-169.
- Ranjbar- Fordoei, A., Samson, R. and Van Damme, P. 2013. Some ecophysiological characteristics of artà (*Calligonum comosum* Hérit) in response to drought stress. – Forest Sci. Pract. 15: 114-120.
- Roy, S., Arunachalam, K., Kumar Dutta, B. and Arunachalam, A. 2010. Effect of organic amendments of soil on growth and productivity of three common crops viz. *Zea mays*, *Phaseolus vulgaris* and *Abelmoschus esculentus*. – Appl. Soil. Eco. 7: 39-46.
- Shimizu, M.M. and Mazzafera, P.A. 2000. Role for trigonelline during imbibition and germination of coffee seeds. – Plant Bio. 605: 2-11.
- Tunctürk, R., Celen, A.E. and Tunctürk, M. 2011. The effects of nitrogen and sulphur fertilizers on the yield and quality of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). – Turk J. Fie. Crops. 16: 69-75.

How to cite this article:

Baghbani-Arani, A., Modares- Sanavi, S.A.M., Mashhadi Akbar Boojar, M., Adavi, Z. and Deghanzade-Jezi, H. 2019. The effect of water deficit stress on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, trigonelline and grain yield in fenugreek in response to zeolite and nitrogen. – Nova Biologica Rep. 6: 229-240.

باغبانی آرانی، ا.، مدرّس ثانوی، س.ع.م.، مهدی اکبر بوجار، م.، اداوی، ظ. و دهقانزاده جزی، ح. ۱۳۹۸. اثر تنش کم آبی بر شاخص‌های فلورسانس کلروفیل، رنگدانه‌های فتوسنتزی، تریگونلین و عملکرد دانه شنبلیله در واکنش به زئولیت و نیتروژن. – یافته‌های نوین در علوم زیستی ۶: ۲۴۰-۲۲۹.