University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 16, No. 3, pp. 587-601 (Fall 2023)

https://dx.doi.org/10.22077/escs.2023.4822.2077

Original article

Evaluation of growth, yield and yield components responses of black cumin (*Nigella sativa* L.) to nitrogen and methanol under drought stress

M. Soltanieh[1], D. Talei[2*], P. Nejatkhah[3]

1.PhD Student, Faculty of Marine Science and Technology, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Iran
2. Associate professor, Medicinal Plants Research Center, Shahed University, Tehran, Iran
3. Associate professor, Faculty of Marine Science and Technology, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Iran

Received 31 October 2021; Accepted 11 January 2022

Extended abstract

Introduction

Drought stress is one of the environmental factors that affects the growth, yield and yield components of plants. Nitrogen and methanol play a key role in plant structure and metabolism. Black cumin (*Nigella sativa* L.) is one of the medicinal plants in the family of Ranunculaceae. The seed of *Nigella sativa* plant has been used since long to protect health and combat different diseases and its frequent application in the pharmaceutical industry. The plant is cultivated in different parts of Europe and Asia including Iran. The purpose of this study was to investigate the responses of growth indices and yield of the black cumin to nitrogen and methanol under water stress conditions.

Materials and methods

Healthy seeds of black cumin were provided from Medicinal Plants Research Center, Shahed University. The experiment was a split split-plots study based on randomized complete block design with three factors and three replicates. The experiments were conducted in the farm of Zanjan University, Faculty of Agriculture (36° 41' N latitude, 48°27' E longitude, and altitude of 1620 m) during the year farming in 2019-2020. The factors were drought stress with 4 levels (control irrigation, irrigation at 80% soil capacity, irrigation at 60% soil capacity, irrigation at 40% soil capacity) as the main plots, nitrogen with 4 levels (control, 30, 60 and 90 kg per hectare) as the sub-plots and methanol with 3 levels (0, 10 and 30%) as the sub-sub-plots. In fact, for each level of methanol, two g l^{-1} glycine and one g l^{-1} tetrahydrofolate as catalysts and one g l^{-1} tween80 were added to increase the adhesion of methanol solution. In both areas, soil preparation, including plowing, leveling and paving was performed before planting. Black cumin seeds were weighed in the amount of 4 g and the seed was evenly distributed.
At the time of complete ripening, after removing the marginal effects, a random sample was selected from each plot and the plant height, root length crop growth rate (CGR) were measured.
Also, after the final ripening, sampling was done to determine the grain yield after removing the marginal effects and one square meter was taken from each experimental unit and the number of plants per square meter was counted and then the seeds were separated from the plants and weighed and then reported in kg ha^{-1}. To measure yield components (number of capsules per plant, number of seeds per capsule and 1000-seed weight) at the time of harvest, 5 plants were randomly selected from each experimental unit and the number of capsules was counted and then the seeds were taken out of the

* Corresponding author: Daryush Talei; E-Mail: d.talei@shahed.ac.ir

© 2023, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

capsules. To measure the weight of 1000 seeds from the harvested seeds related to grain yield, three thousand samples of seeds were counted and then weighed and their mean as 1000 seeds weight and were used for data analysis.

Results and discussion

The results showed that with increasing irrigation stress, plant growth indices and yield decreased, while with increasing nitrogen and methanol concentrations, growth indices and yield increased. In total, application of 10% methanol and 30 kg ha^{-1} nitrogen increased root length plant height by 9 and 16% compared to the control treatment. The results showed that the triple interaction of control irrigation, application of 30 kg ha^{-1} nitrogen and 10% methanol increased crop growth rate by 17.44% compared to control treatment. The highest grain yield by interaction of without irrigation stress and application of 90 kg ha^{-1} nitrogen and application of 10 percent methanol in the amount of 715.40 g were observed. Application of high levels of nitrogen and methanol under severe stress reduced grain yield, while application of lower levels of nitrogen (30 kg ha^{-1}) and methanol (10%) increased grain yield, and the triple interaction of non-stress irrigation, application of 90 kg ha^{-1} nitrogen and 10% methanol caused a significant increase in grain yield (3.6%).

Conclusion

The results showed that severe drought stress by reducing plant height, root length, crop growth rate, number of seeds per capsule and number of capsules per plant could reduce grain yield in black cumin and methanol application, especially at the level of 30%, with a positive effect on source strength (leaf area index) and reservoir strength (number and size of seeds) as well as root length, was able to increase black seed grain yield under water stress. The maximum crop growth length was obtained by triple interaction of control irrigation, application of 30 kg ha^{-1} nitrogen and 10% methanol foliar application at 35.31 g m^{-2} day and according to the importance and economic value of black cumin plant in the pharmaceutical industry The use of this treatment is recommended for producers of this plant.

***Keywords*:** Crop growth rate, Environmental stress, Grain yield, Morphological traits

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد شانزدهم، شماره سوم، پائیز ۱۴۰۲

https://dx.doi.org/10.22077/escs.2023.4822.2077

مقاله پژوهشی

بررسی تأثیر نیتروژن و متانول بر شاخص‌های رشد، عملکرد و اجزاء عملکرد گیاه سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) تحت تنش خشکی

میلاد سلطانیه[۱]، داریوش طالعی[۲*]، پریسا نجات خواه[۳]

۱. دانشجوی دکتری زراعت، گروه کشاورزی، دانشکده علوم و فنون دریایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران
۲. دانشیار، مرکز تحقیقات گیاهان دارویی دانشگاه شاهد، تهران، ایران
۳. دانشیار، گروه زیست‌شناسی دریایی، دانشکده علوم و فنون دریایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
تنش محیطی
سرعت رشد محصول
صفات مورفولوژیک
عملکرد دانه

تاریخ دریافت:
۱۴۰۰/۰۸/۰۹

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۰/۱۰/۲۱

تاریخ انتشار:
پائیز ۱۴۰۲

۱۶(۳): ۵۸۷-۶۰۱

چکیده

برای بررسی واکنش‌های رشدی و عملکرد گیاه به نیتروژن و متانول تحت تنش خشکی آزمایش کرت‌های دو بار خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل تنش آبیاری با ۴ سطح (شاهد بدون تنش، آبیاری در زمان ۸۰ درصد، ۶۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی خاک) در کرت‌های اصلی، نیتروژن با ۴ سطح (شاهد، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ کیلوگرم در هکتار) در کرت‌های فرعی و متانول با ۳ سطح (صفر، ۱۰ و ۳۰ درصد) در کرت‌های فرعی فرعی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش تنش آبیاری شاخص‌های رشد و عملکرد گیاه کاهش یافت، درحالی‌که با افزایش غلظت نیتروژن و متانول شاخص‌های رشد و عملکرد افزایش پیدا کرد. برهم‌کنش کاربرد ۱۰ درصد متانول و ۳۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، ارتفاع و طول ریشه را به میزان ۹ و ۱۶ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. همچنین برهم‌کنش سه‌گانه تیمارهای آبیاری شاهد، کاربرد ۳۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و ۱۰ درصد متانول، سرعت رشد محصول را ۱۷/۴۴ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. کاربرد سطوح بالای نیتروژن و متانول تحت تنش شدید باعث کاهش میزان عملکرد دانه گردید. به‌طورکلی نتایج نشان داد که برهم‌کنش سه‌گانه تیمارهای بدون تنش آبیاری، کاربرد ۹۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و کاربرد ۱۰ درصد متانول سبب افزایش معنی‌دار (۳/۶ درصد) عملکرد دانه شد که با توجه به اهمیت و ارزش اقتصادی گیاه سیاه‌دانه در صنایع دارویی کاربرد این تیمار برای تولیدکنندگان این گیاه توصیه می‌گردد.

مقدمه

گیاه سیاه‌دانه دارای ارزش غذایی و خواص دارویی متعددی است و به دلیل وجود اسیدهای آمینه ضروری مانند آرژنین و لوسین و همچنین اسیدهای چرب ضروری و غیراشباعی مانند اسید لینولنیک استفاده می‌گردد (Hussain and Hussain, 2016). گیاه سیاه‌دانه بومی اروپای جنوبی، آفریقای شمالی و آسیاست و در کشورهای هند، مصر، پاکستان، سوریه، خاورمیانه و اکثر نقاط ایران کشت می‌شود. پرورش و تولید گیاهان دارویی مانند سیاه‌دانه علاوه بر این‌که به سلامت جامعه کمک شایانی می‌کند در اشتغال‌زایی و همچنین صادرات غیرنفتی نقش مهمی را ایفا می‌کند. این گیاه یکی از انواع گیاهان دارویی است که به‌طور طبیعی در نقاط مختلف ایران رشد کرده و در بعضی نقاط به‌صورت گسترده کشت می‌شود (Hosseini et al., 2018). طبق گزارش‌های وزارت جهاد کشاورزی سطح زیر این گیاه دارویی در ایران در سال ۱۴۰۰ به حدود ۲ هزار هکتار رسیده به‌طوری‌که سطح زیر کشت این محصول نسبت به دو سال گذشته ۱۰ برابر افزایش یافته است. استان زنجان نیز شرایط اقلیمی مساعد و مناسبی در زمینه کشت و تولید گیاهان

* نگارنده پاسخگو: داریوش طالعی. پست الکترونیک: d.talei@shahed.ac.ir

دارویی دارد و کشت گیاهان دارویی ازجمله سیاه‌دانه جزو برنامه‌های مهم جهاد کشاورزی استان زنجان است. سیاه‌دانه معمولاً در مناطقی با میانگین بارندگی سالیانه حدوداً ۴۰۰ میلی‌متر به‌طور طبیعی رشد می‌کند. در خاک‌های سبک شنی به دلیل قابلیت جذب کم، دوره آبیاری کوتاه و هر ۴ روز یک‌بار صورت می‌گیرد. در خاک‌های سنگین دوره‌های آبیاری طولانی‌تر و بنا به فصول متغیر است (Majnoon Hosseini and Davazdahemami. 2007).

خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد گیاهان در سراسر جهان است که تقریباً ۲۵ درصد از اراضی جهان را محدود می‌کند. تنش طولانی‌مدت خشکی در تمام فرآیندهای متابولیکی اثر می‌گذارد و درنتیجه باعث کاهش محصولات می‌شود (Khan et al., 2010). یکی از مهم‌ترین تأثیرات تنش خشکی، کاهش دسترسی و جذب عناصر غذایی مختلف برای گیاه است؛ بنابراین شناخت بهتر نقش عناصر غذایی در مقاومت گیاهان به خشکی، با مدیریت کودی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در ارتباط است (Sahi et al., 2006). عنصر نیتروژن یکی از مهم‌ترین عناصر برای رشد و تولید گیاهان است و از اجزای مهم ترکیبات آلی مانند پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و کلروفیل است. همچنین محققان بر این باورند که افزایش غلظت دی‌اکسید کربن می‌تواند اثرات منفی ناشی از تنش خشکی را کاهش دهد (Ramadant and Omran, 2005). یکی از راهکارهای افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در گیاهان، استفاده از ترکیباتی نظیر متانول است. کاربرد این ماده به‌عنوان یک منبع کربن در گیاهان رواج پیدا کرده است؛ زیرا گیاهان می‌توانند متانول محلول-پاشی شده بر روی برگ‌ها را به‌راحتی جذب کرده و آن را به‌عنوان منبع کربن اضافه بر کربن اتمسفر مورداستفاده قرار دهند (Mirakhori et al., 2009).

کمبود آب به‌واسطه پیری تدریجی و از دست رفتن برگ-ها سبب کاهش شاخص سطح برگ می‌گردد و پایین بودن دوام و شاخص سطح برگ در شرایط خشکی شدید سبب کاهش تولید ماده خشک و درنتیجه کاهش سرعت رشد محصول می‌گردد (Zhao et al., 2020). کاربرد نیتروژن باعث افزایش تقسیم سلولی و تورژسانس سلول‌های مریستمی گردیده و با افزایش رشد رویشی و شاخه و برگ گیاه سطح فتوسنتز کننده افزایش‌یافته و در نتیجه فرآیند فتوسنتز و ماده سازی تحت تأثیر این تغییر قرار می‌گیرد (Peng et al., 2006). پژوهش‌ها نشان داد که کاربرد ۵۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار برای آفتابگردان کافی به نظر می‌رسد و با افزایش نیتروژن تا میزان معینی قطر طبق، تعداد دانه در طبق، وزن دانه و عملکرد دانه افزایش می‌یابد (Ozer et al., 2004). استفاده از متانول سبب افزایش سطح و دوام برگ، سرعت رشد، تثبیت CO_2، وزن خشک، تعداد دانه در بوته، وزن دانه و عملکرد دانه، کاهش تنفس نوری و درنهایت منجر به مقاومت به تنش خشکی می‌گردد (Mirakhori et al., 2009). همچنین مشاهده شده است که محلول‌پاشی متانول روی بوته‌های توتون در شرایطی که آن‌ها در شرایط کمبود آب قرار داشتند، باعث افزایش وزن تر بوته‌های توتون شد و مقدار افزایش ماده خشک تولیدشده توسط گیاه توتون به مقدار متانول مصرف‌شده بستگی داشت (Nonomura and Benson 1992).

ارزیابی تحمل به خشکی گیاهان دارویی به‌منظور کشت در مناطق خشک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اهمیت و ارزش اقتصادی گیاه سیاه‌دانه در صنایع دارویی و توسعه کشت آن در چند سال اخیر در استان زنجان و از آنجائی که تحقیقات قابل‌توجهی در رابطه با نقش نیتروژن و متانول تحت تنش خشکی در گیاه سیاه‌دانه انجام نشده است، هدف از این تحقیق بررسی واکنش‌های رشدی، عملکرد و اجزای عملکرد گیاه سیاه‌دانه به سطوح مختلف نیتروژن و متانول تحت تنش خشکی و تعیین مناسب‌ترین میزان نیتروژن و متانول موردنیاز گیاه است.

مواد و روش‌ها

ماده گیاهی و شرایط جوانه‌زنی

بذور سالم و عاری از علف هرز سیاه‌دانه از مرکز تحقیقات گیاهان دارویی دانشگاه شاهد تهران تهیه شدند. پس از آماده‌سازی زمین، بذور در سطح خاک پاشیده شدند و سپس با لایه بسیار نازک خاک (نیم سانتی‌متر) پوشانده و آبیاری اولیه جهت جوانه‌زنی انجام گردید.

این تحقیق به‌صورت کرت‌های خردشده با ۳ فاکتور بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان (واقع در عرض ۳۶ درجه و ۴۱ دقیقه شمالی، طول ۴۸ درجه و ۲۷ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۶۲۰ متر از سطح دریا با میانگین بارش سالیانه ۲۹۵ میلی‌متر متوسط دمای سالیانه ۱۱/۵ درجه سانتی‌گراد) در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ انجام شد که در آن تنش آبیاری (خشکی) با ۴ سطح (بدون تنش، آبیاری در زمان

۸۰ درصد ظرفیت زراعی خاک (تنش ملایم)، آبیاری در زمان ۶۰ درصد ظرفیت زراعی خاک (تنش متوسط)، آبیاری در زمان ۴۰ درصد ظرفیت زراعی خاک (تنش شدید) در کرت-های اصلی و نیتروژن با ۴ غلظت (شاهد، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ کیلوگرم در هکتار) در کرت‌های فرعی و متانول با ۳ غلظت (۰، ۱۰ و ۳۰ درصد) در کرت‌های فرعی فرعی موردبررسی قرار گرفتند. برای افزایش میزان چسبندگی محلول متانول، به هر یک از غلظت‌های متانول، مقدار دو گرم بر لیتر گلایسین، یک گرم بر لیتر تتراهیدروفولات به عنوان کاتالیزور و یک گرم بر لیتر توئین ۸۰ اضافه شد.

آماده‌سازی زمین، کاشت، داشت و برداشت

زمینی به مساحت ۳۳۰ مترمربع انتخاب و آماده‌سازی زمین شامل شخم، تسطیح و خط‌کشی انجام گردید. نمونه خاک محل آزمایش از عمق ۳۰ سانتی‌متری تهیه و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری شد (جدول ۱). برای کاشت بذور سیاه‌دانه کرت‌هایی به ابعاد ۱/۲×۱ متر (به مساحت ۱/۲ مترمربع) آماده و مقدار ۴ گرم بذر سیاه‌دانه توزین شدند (معادل ۲۰۰۰ بذر در هر کرت) و بذور با ۳ مشت ماسه‌بادی به‌منظور پخش یکنواخت بذر مخلوط شدند و به-صورت خشکه‌کاری و دست‌پاش در عمق ۳-۲ سانتی‌متری در هر کرت کاشته شدند. تراکم کاشت ۳۵۰ بوته در مترمربع بود. فاصله بین کرت‌ها ۰/۵ متر و فاصله بین بلوک‌ها یک متر بود. گیاهچه‌های سیاه‌دانه در مرحله ۴ برگی برای دست‌یابی به فاصله بوته مناسب (۲ سانتی‌متر) تنک شدند. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت انجام شد و آبیاری‌های بعدی به فاصله هر ۳ روز یک‌بار بر اساس شرایط جوی بودند. تیمارهای خشکی ۱۵ روز پس از سبز شدن بذور اعمال شدند. رطوبت خاک با استفاده از تشتک تبخیر کنترل شد و پس‌ازاینکه رطوبت خاک به میزان موردنظر رسید، تیمارهای خشکی اعمال گردیدند. شاهد: آبیاری روزی با ۱۰ میلی‌متر آب تبخیر شده از تشتک تبخیر انجام شد. تنش ملایم: آبیاری هر ۴ روز یک‌بار، تقریباً با ۴۰ میلی‌متر آب تبخیر شده از تشتک تبخیر که معادل ۷۵ درصد ظرفیت زراعی خاک است، اعمال شد. تنش متوسط: آبیاری هر ۸ روز یک‌بار، تقریباً با ۸۰ میلی‌متر آب تبخیر شده از تشتک تبخیر که معادل ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک است، انجام شد. عملیات زراعی شامل کنترل علف‌های هرز، مبارزه با آفات و بیماری‌ها در طول فصل رشد انجام گرفت. کنترل علف‌های هرز به‌صورت وجین دستی و در سه مرحله (دو مرحله قبل از تنک و یک مرحله در ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری بوته‌های سیاه‌دانه) صورت گرفت

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورداستفاده در آزمایش.

Table 1. Some physiochemical characteristics of soil used in the experiment.

نیتروژن	فسفر	پتاسیم	ماده آلی	اسیدیته	بافت خاک
N	P	K	Organic matter	pH	Soil texture
%	----------mg kg^{-1}----------		%		
0.09	10.5	185.3	<0.1	7.8	loam

اندازه‌گیری صفات

در زمان رسیدگی کامل پس از حذف اثرات حاشیه‌ای، از هر کرت نمونه تصادفی انتخاب شد و ارتفاع و تعداد شاخه‌های جانبی در هر بوته شمارش گردید. به‌منظور بررسی طول ریشه، نمونه‌گیری به‌صورت تصادفی در زمان رسیدگی کامل انجام گردید. بعد از آبیاری زمین، بوته‌ها توسط بیلچه (به‌طوری‌که ریشه آسیب نبیند) برداشت و طول ریشه (از محل اتصال ریشه به ساقه گیاه تا انتهای ریشه اصلی) اندازه-گیری شد. شاخص رشد مورد ارزیابی در این تحقیق سرعت رشد محصول (CGR) بود. اولین نمونه‌برداری تخریبی از هر کرت ۱۴ روز پس از سبز شدن صورت گرفت و در ادامه سایر نمونه‌برداری‌ها هر ۱۴ روز یک‌بار (به ترتیب ۲۸، ۴۲، ۵۶ و ۷۰ روز پس از سبز شدن) انجام شدند. سرعت رشد محصول توسط معادلات زیر محاسبه شدند (Javadi et al., 2007).

$$CGR=\left(\frac{1}{GA}\right)(W2-W1)(T2-T1) \qquad [۱]$$

در معادله فوق، W1 وزن خشک اولیه‌ی بوته، W2 وزن خشک ثانویه‌ی بوته، t1 زمان اولیه برداشت بوته و t2 زمان ثانویه برداشت بوته است. CGR بر اساس واحد گرم بر مترمربع در روز گزارش شدند. همچنین پس از رسیدگی نهایی، نمونه‌برداری جهت تعیین عملکرد دانه بعد از حذف

اثرات حاشیه صورت گرفت و یک مترمربع از هر واحد آزمایشی برداشت و تعداد بوته در مترمربع شمارش شد و سپس بذور از بوته‌ها جداسازی و وزن شدند و عملکرد دانه بر اساس واحد کیلوگرم در هکتار گزارش شد. برای اندازه‌گیری اجزای عملکرد (تعداد کپسول در بوته، تعداد بذر در کپسول و وزن هزار دانه) در زمان برداشت ۵ بوته به‌صورت تصادفی از هر واحد آزمایشی انتخاب شدند و تعداد کپسول آن‌ها شمارش شدند و سپس بذور از کپسول‌ها خارج، شمارش و توزین شدند. برای اندازه‌گیری وزن هزار دانه از بین بذور برداشت‌شده مربوط به عملکرد دانه، سه نمونه هزارتایی از بذور توسط دستگاه بذر شمار شمارش و سپس توسط ترازوی آزمایشگاهی با حساسیت یک‌هزارم وزن شدند و میانگین آن-ها به عنوان وزن هزار دانه مورداستفاده قرار گرفت.

تجزیه آماری

داده‌های حاصل از آزمایش ابتدا به روش کلموگراف اسمیرنوف تست نرمالیته شدند و پس از اطمینان از نرمال بودن، داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم افزار SAS (نسخه ۹,۱) تجزیه‌وتحلیل شد. مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح یک درصد انجام شد.

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات متقابل دوگانه آبیاری و متانول، آبیاری و نیتروژن، نیتروژن و متانول شاخص سطح برگ را تحت تأثیر قرار دادند و اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری و نیتروژن و متانول در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار گردیدند (جدول ۲).

نتایج مقایسات میانگین نشان داد که برهم‌کنش سه‌گانه تیمارهای بدون تنش آبیاری، کاربرد ۶۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۳۰ درصد محلول‌پاشی متانول، شاخص سطح برگ را نسبت به تیمار شاهد ۸ درصد افزایش داد (جدول ۳). شاخص سطح برگ منبع مهمی در تولید فتواسیمیلات‌ها برای تعیین میزان تجمع ماده خشک و عملکرد محصول است. افزایش LAI منجر به استفاده بهتر از انرژی خورشیدی می شود؛ بنابراین، باعث تجمع ماده خشک بیشتر و عملکرد بیشتر از طریق فتوسنتز می‌شود (Kuttimani et al., 2013). که کاهش سطح برگ در گیاه، یک تکنیک برای بهبود تحمل به خشکی است و این کاهش به علت کاهش محتوای نسبی آب و در پی آن کوچک شدن اندازه سلول‌ها، کاهش تقسیم سلول‌های مریستمی و در نتیجه کند شدن رشد برگ، توقف تولید برگ، تسریع پیری و به دنبال آن ریزش برگ‌ها است (Osuagwu et al., 2010). کاهش شاخص سطح برگ در تحقیقات دیگر بر روی گیاهانی مثل آفتابگردان (Hussain et al., 2009) و ذرت (Azarpanah et al., 2013) نیز مشاهده شده است که نتیجه مطالعه ما مبنی بر کاهش شاخص سطح برگ در اثر خشکی نیز با تحقیقات فوق مطابقت داشت.

سرعت رشد محصول

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات متقابل دوگانه و سه-گانه نیتروژن، متانول و آبیاری اثر معنی‌داری در سطح یک درصد بر سرعت رشد محصول داشت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که با افزایش تنش آبیاری میزان سرعت رشد محصول کاهش یافت، به‌طوری‌که در تنش شدید آبیاری میزان سرعت رشد محصول ۷۴/۵ درصد نسبت به کنترل کاهش پیدا کرد، درحالی‌که با افزایش غلظت نیتروژن و متانول میزان سرعت رشد محصول افزایش پیدا کرد، به‌طوری‌که در بالاترین غلظت نیتروژن (۹۰ کیلوگرم در هکتار) و متانول (۳۰ درصد) میزان سرعت رشد محصول به ترتیب ۲۸/۲ و ۱۰/۸ درصد نسبت به کنترل افزایش پیدا کرد. نتایج نشان داد که برهم‌کنش سه‌گانه تیمارهای آبیاری شاهد، کاربرد ۳۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و ۱۰ درصد محلول-پاشی متانول، سرعت رشد محصول را ۱۷/۴۴ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد و کمترین مقدار سرعت رشد محصول در اثر متقابل سه‌گانه تنش شدید، کاربرد ۹۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۳۰ درصد محلول‌پاشی متانول به مقدار ۲۴/۹۰ گرم بر مترمربع بر روز به دست آمد (جدول ۳). در شرایط خشکی با کاهش پتانسیل آبی گیاه، سرعت رشد گیاه به علت افزایش شدت تنفس و کاهش فتوسنتز، کاهش می-یابد (Goldani and Rezvani, 2007). سرعت رشد محصول نشان‌دهنده برهم‌کنش فتوسنتز و تنفس است. اسپری متانول سبب تغییر مسیر تنفس نوری از کاتابولیسم به سمت آنابولیسم و افزایش سرعت رشد محصول می‌شود و همچنین افزایش سرعت رشد محصول در اثر متانول به دلیل افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در برگ‌ها است و سرعت رشد محصول زمانی به حداکثر می‌رسد که شاخص سطح برگ نیز به حداکثر رسیده باشد و افزایش شاخص سطح برگ و سرعت

رشد محصول باعث بهبود روند رشد و افزایش عملکرد می‌شود (Ntanos and Koutroubas, 2002). در تحقیقی بیشترین شاخص سطح برگ در گیاه سرخارگل با محلول‌پاشی متانول ۳۰ درصد به دست آمد (Khosravi et al., 2011). اثر محلول‌پاشی متانول در شرایط تنش خشکی بر افزایش نسبی سرعت رشد محصول سویا معنی‌دار شد (Amrayi et al., 2017). یکی از مؤثرترین عوامل بر توسعه سطح برگ، میزان نیتروژن است که با تأثیر بر اندازه و طول عمر برگ موجب افزایش شاخص سطح برگ می‌شود. شاخص سطح برگ و سرعت رشد محصول در گیاه دارویی خرفه با افزایش کاربرد نیتروژن افزایش یافت (Soltaninejad, et al., 2013). افزایش شاخص سطح برگ و سرعت رشد محصول در سطوح بالای کود نیتروژن مصرفی به‌احتمال‌زیاد می‌تواند به دلیل بهبود شرایط جذب عناصر غذایی در خاک و تأثیر این عناصر به‌ویژه نیتروژن بر افزایش رشد رویشی گیاه بوده است (Tahami et al., 2010).

جدول ۲. تجزیه واریانس اثرات نیتروژن و متانول بر شاخص‌های رشد، عملکرد و اجزاء عملکرد گیاه سیاه‌دانه (*Nigella sativa*) تحت تنش خشکی

Table 2. Analysis of variance of nitrogen and methanol effects on growth, yield and yield components of black cumin (*Nigella sativa* L.) under drought stress.

Source of variable	منابع تغییر	درجه آزادی df	ارتفاع گیاه Plant height	طول ریشه Root length	تعداد کپسول در بوته Number of capsules per plant	تعداد بذر در کپسول Number of seeds per capsul
Replicate	تکرار	2	158.31^{ns}	65.84^{ns}	190.92*	2072.88*
Irrigation (I)	آبیاری	3	115.00**	0.51*	141.43**	473.73^{ns}
Ea	خطای اصلی	6	1.15	0.11	2.27	135.97
Nitrogen (N)	نیتروژن	3	17.42**	4.38**	24.02**	157.96**
I × N	آبیاری×نیتروژن	9	19.26**	1.27**	74.90**	105.25**
Eb	خطای فرعی	24	0.43	0.06	0.82	28.10
Methanol (M)	متانول	2	10.34**	3.20**	12.30**	25.78^{ns}
I × M	آبیاری×متانول	6	21.88**	0.68**	12.39**	59.01^{ns}
M × N	نیتروژن×متانول	6	18.15**	3.45*	31.28**	25.24^{ns}
I × N × M	آبیاری×نیتروژن×متانول	18	24.01**	0.99**	34.74**	86.90**
Ec	خطای فرعی فرعی	48	0.32	0.05	0.80	30.93
CV%	ضریب تغییرات		*2.62*	*5.89*	*9.35*	*24.79*

Table 2. Continued **جدول ۲. ادامه**

Source of variable	منابع تغییر	درجه آزادی df	وزن هزار دانه The weight of 1,000 seeds	عملکرد دانه Seed yield	شاخص سطح برگ LAI	سرعت رشد محصول CGR
Replicate	تکرار	2	0.036^{ns}	3357.36*	0.059^{ns}	129.93*
Irrigation (I)	آبیاری	3	0.184**	656.01*	22.31**	113.57**
Ea	خطای اصلی	6	0.003	142.28	0.078	2.19
Nitrogen (N)	نیتروژن	3	0.343**	109.08*	0.152*	18.11**
I × N	آبیاری×نیتروژن	9	0.115**	217.94**	0.210**	17.34**
Eb	خطای فرعی	24	0.004	32.44	0.051	0.77
Methanol (M)	متانول	2	0.086**	17.00^{ns}	0.240**	11.07**
I × M	آبیاری×متانول	6	0.331**	71.17*	0.833**	20.21**
M × N	نیتروژن×متانول	6	0.113**	46.61^{ns}	0.113*	20.60**
I × N × M	آبیاری×نیتروژن×متانول	18	0.135**	102.75**	0.136**	23.32**
Ec	خطای فرعی فرعی	48	0.003	31.98	0.050	0.58
CV%	ضریب تغییرات		*2.58*	*1.69*	*5.53*	*5.21*

ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and **: Not significant, significant at 5% and 1% probability levels, respectively

ارتفاع گیاه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف فاکتورهای نیتروژن، متانول و آبیاری و اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه نیتروژن، متانول و آبیاری بر اساس ارتفاع گیاه وجود دارد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که با افزایش تنش آبیاری ارتفاع گیاه کاهش یافت، به‌طوری‌که در تنش شدید آبیاری ارتفاع گیاه ۴/۷ درصد نسبت به کنترل کاهش پیدا کرد، درحالی‌که با افزایش غلظت نیتروژن و غلظت متانول ارتفاع گیاه افزایش پیدا کرد، به‌طوری‌که در بالاترین غلظت نیتروژن (۹۰ کیلوگرم در هکتار) و متانول (۳۰ درصد) ارتفاع گیاه به ترتیب ۱/۷ و ۰/۵ درصد نسبت به کنترل افزایش پیدا کرد. نتایج نشان داد که برهم‌کنش سه‌گانه تیمارهای بدون تنش آبیاری، کاربرد ۳۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و ۱۰ درصد محلول-پاشی متانول، ارتفاع گیاه سیاه‌دانه را ۱۲/۷۶ درصد نسبت به تیمار شاهد بهبود بخشید، درحالی‌که کمترین ارتفاع گیاه تحت شرایط تنش شدید آبیاری و عدم کاربرد نیتروژن و متانول به مقدار ۳۷/۱ سانتی‌متر به دست آمد (جدول ۳). کاهش ارتفاع گیاه در شرایط تنش کم‌آبی از طریق کاهش محتوای نسبی آب و به دنبال آن بسته شدن روزنه‌ها و کاهش رشد و اندازه سلول، منجر به کاهش اندازه برگ‌ها و کوتاه ماندن گیاه می‌شود (Amrayi et al., 2017). کاهش میزان ارتفاع گیاه با افزایش تنش کم‌آبی در تحقیقاتی که روی گیاه آویشن (Babaei et al., 2010)، گیاه همیشه‌بهار (Shubhra et al., 2004) و گیاه انیسون گزارش شده است (Mohammadi Alborzi et al., 2012).

افزایش ارتفاع با کاربرد نیتروژن در این مطالعه با تحقیقات دیگر در گیاهان مرزه و سیاه‌دانه (Rana et al., 2012) مطابقت دارد. افزایش ارتفاع ناشی از مصرف نیتروژن می‌تواند به دلیل افزایش طول میانگره و افزایش شاخ و برگ در گیاه باشد. افزایش میزان ارتفاع گیاه با افزایش محلول‌پاشی ۴۰ درصد متانول در تحقیقی که روی گیاه دارویی سرخارگل گزارش شده است (Khosravi et al., 2011).

طول ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که طول ریشه به‌طور معنی-داری تحت تأثیر اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه نیتروژن، متانول و آبیاری قرار گرفت (جدول ۲). نتایج نشان داد که بیشترین میزان طول ریشه در تنش شدید آبیاری به دست آمد (۶/۳ سانتی‌متر). با افزایش غلظت نیتروژن و متانول میزان طول ریشه افزایش پیدا کرد، به‌طوری‌که در بالاترین غلظت نیتروژن (۹۰ کیلوگرم در هکتار) و متانول (۳۰ درصد) طول ریشه به ترتیب ۱۰/۱ و ۲/۷ درصد نسبت به کنترل افزایش پیدا کرد. نتایج نشان داد که برهم‌کنش سه‌گانه تیمارهای تنش ملایم آبیاری، کاربرد ۹۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۱۰ درصد محلول‌پاشی متانول، طول ریشه را به میزان ۱۲ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد، درحالی‌که کمترین مقدار طول ریشه در شرایط کنترل آبیاری و عدم کاربرد نیتروژن و متانول به مقدار ۴/۲ سانتی‌متر به دست آمد (جدول ۳). یکی از مکانیسم‌های سازگاری با خشکی، توسعه سیستم‌های ریشه‌ای است که می‌توانند جذب آب را برای حمایت از رشد گیاهان افزایش دهند. نتایج کاهش طول ریشه با افزایش کم‌آبی در این مطالعه با تحقیقات دیگر بر روی گیاهانی همچون مریم‌گلی آتشین (Asadi et al., 2012) و آویشن (Babaei et al., 2010) مطابقت داشت. متانول نقش مؤثری را در رشد و نمو سلول‌های جدید دارد که می‌تواند در افزایش طول ریشه گیاه نقش داشته باشد و افزایش طول ریشه با کاربرد متانول در دیگر گیاهان همچون لوبیا (Armand et al., 2016)، نخود (Hosseinzadeh et al., 2013) و سرخارگل (Khosravi et al., 2011) نیز گزارش شده است. افزایش طول ریشه با کاربرد متانول احتمالاً با تنظیم سنتز هورمون‌هایی مانند اکسین و جیبرلین، برای توسعه تقسیم سلولی و کشیدگی و افزایش طول در ارتباط است (Wu et al., 2013).

تعداد کپسول در بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات متقابل دوگانه و سه-گانه نیتروژن، متانول و آبیاری بر تعداد کپسول در بوته تأثیر معنی‌داری داشت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که با افزایش تنش آبیاری تعداد کپسول در بوته به میزان ۲۴/۸ درصد کاهش یافت و تعداد کپسول در بوته با افزایش غلظت نیتروژن و غلظت متانول به ترتیب ۶/۵ درصد افزایش و ۱۰/۱ درصد کاهش پیدا کرد. نتایج مقایسه میانگین همچنین نشان داد که بیشترین تعداد کپسول در بوته در اثر متقابل سه‌گانه بدون تنش آبیاری و عدم کاربرد نیتروژن و متانول به مقدار ۲۲/۰۰ گرم مشاهده شد، درحالی‌که کمترین تعداد کپسول در بوته تحت شرایط تنش ملایم آبیاری و

کاربرد ۳۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و عدم کاربرد متانول به مقدار ۵/۶۷ به دست آمد (جدول ۳). مرحله گل‌دهی و تشکیل کپسول در گیاه حساس‌ترین مراحل آبیاری هستند زیرا کم‌آبی در این مراحل باعث ریزش کپسول‌ها می‌شود همچنین کم‌آبی باعث کاهش مواد فتوسنتزی لازم برای رشد و باروری گل‌ها و در نتیجه سقط جوانه‌های گل می‌شود. با توجه به اینکه در شرایط خشکی گیاه زودتر می‌رسد و طول دوره رشد گیاه کاهش می‌یابد، لذا در این فرصت کم، تعداد غلاف کمتری تشکیل می‌شود. کاهش تعداد کپسول در بوته در شرایط تنش خشکی در گشنیز شده است (Nourzad et al., 2014) که با نتایج مطالعه ما مطابقت داشت. افزایش تعداد کپسول در بوته با کاربرد نیتروژن در گیاه سیاه‌دانه گزارش شده است (Rana et al., 2012). بااین‌حال نتایج مطالعه ما نشان داد که کاربرد نیتروژن باعث کاهش تعداد کپسول در بوته سیاه‌دانه شد. این حالت می‌تواند به دلیل افزایش میزان شاخص سطح برگ و سرعت فتوسنتز خالص با کاربرد نیتروژن باشد که با عمل کردن به عنوان یک مخزن قوی می‌تواند از هدایت اسیمیلات‌های فتوسنتزی برای تولید کپسول جلوگیری کند.

تعداد بذر در کپسول

نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف فاکتور نیتروژن و اثرات متقابل آبیاری با نیتروژن و اثرات متقابل سه‌گانه (نیتروژن، متانول و آبیاری) بر اساس تعداد بذر در کپسول وجود داشت، درحالی‌که سطوح مختلف متانول، آبیاری و اثرات متقابل آبیاری با متانول، نیتروژن با متانول اختلاف معنی‌داری روی تعداد بذر در کپسول نشان نداد. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تنش آبیاری باعث افزایش تعداد بذر در کپسول شد و بیشترین تعداد بذر در کپسول در تنش متوسط به میزان ۵۶/۷ به دست آمد. با افزایش غلظت نیتروژن، تعداد بذر در کپسول کاهش پیدا کرد، به‌طوری‌که در بالاترین غلظت نیتروژن (۹۰ کیلوگرم در هکتار) تعداد بذر در کپسول ۴/۱ درصد کاهش نسبت به کنترل پیدا کرد (جدول ۳). نتایج نشان داد که برهم‌کنش سه‌گانه تیمارهای تنش متوسط آبیاری و کاربرد ۶۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و کاربرد ۱۰ درصد متانول، تعداد بذر در کپسول را به میزان ۵ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. درحالی‌که کمترین تعداد بذر در کپسول تحت شرایط بدون تنش آبیاری و عدم کاربرد نیتروژن و کاربرد متانول به مقدار ۴۷/۰۳ به دست آمد. در شرایط کم‌آبی به دلیل کمبود مواد قابل‌انتقال در مرحله رویشی و خالی ماندن ظرفیت تعدادی از مخازن به علت کاهش منبع، سقط دانه در غلاف رخ می‌دهد و باعث کاهش تعداد دانه در بوته و عملکرد دانه می‌شود، درواقع کلروفیل بیشتر باعث افزایش واحدهای فتوسنتز کننده شده و مدت استفاده از تابش خورشیدی و فتوسنتز و رشد گیاه را افزایش داده و منجر به افزایش وزن دانه، تعداد دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه می‌شود (Fazeli Rostampour et al., 2010). بیشتر شدن تعداد دانه در کپسول با مصرف نیتروژن در سایر گیاهان مانند جو بهاره (Tariq Alislami et al., 2012) و سیاه‌دانه (Rana et al., 2012) نیز گزارش شده است که می‌تواند ناشی از افزایش محتوای کلروفیل، شاخص سطح برگ و سرعت رشد محصول باشد.

وزن هزار دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که وزن هزار دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه نیتروژن، متانول و آبیاری قرار گرفت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که با افزایش تنش آبیاری تا تنش متوسط وزن هزار دانه به میزان ۶/۵ درصد افزایش یافت، درحالی‌که وزن هزار دانه در تنش شدید کاهش یافت، اما با افزایش غلظت نیتروژن و غلظت متانول وزن هزار دانه به ترتیب افزایش و کاهش پیدا کرد، به‌طوری‌که در بالاترین غلظت نیتروژن (۹۰ کیلوگرم در هکتار) و متانول (۳۰ درصد) وزن هزار دانه به ترتیب ۴/۳ افزایش و ۲/۶ درصد کاهش نسبت به کنترل پیدا کرد. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه در اثر متقابل سه‌گانه تنش متوسط آبیاری، کاربرد ۶۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و ۱۰ درصد محلول‌پاشی متانول به مقدار ۲/۴۷ گرم مشاهده شد. درحالی‌که برهم‌کنش سه‌گانه تیمارهای تنش ملایم آبیاری و عدم کاربرد نیتروژن و کاربرد ۳۰ درصد متانول، وزن هزار دانه را ۱۲/۹۳ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد (جدول ۳). وزن هزار دانه نشان‌دهنده وضعیت و طول دوره زایشی هر گیاه است (Karami et al., 2011). با محدود شدن آبیاری در مرحله زایشی به دلیل اینکه طول دوره پر شدن دانه کاهش می‌یابد. گیاه با محدودیت منبع مواجه شده و مواد کمتری به دانه‌ها منتقل می‌شود؛ بنابراین هرگونه تنش کم‌آبی در طول این مراحل می‌تواند بر روابط منبع و مخزن تأثیر منفی گذاشته و باعث

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن، متانول و آبیاری بر خصوصیات اگرونومیکی گیاه سیاه‌دانه

Table 1. Mean comparison interaction effect of nitrogen, methanol an irrigation d on agronomic characteristics of black cumin.

آبیاری Irrigation	نیتروژن Nitrogen	متانول Methanol	ارتفاع Height	طول ریشه Root length	شاخص سطح برگ LAI	سرعت رشد محصول CGR
	kg	%	cm	cm	$m^2.m^{-2}$	$g.cm^{-2}day$
Control شاهد	0	0	40.1^{o-q}	4.2^{t}	5.05^{c-h}	28.42^{i-k}
		10	40.2^{o-q}	5.1^{o-q}	5.328^{a-c}	28.34^{i-k}
		30	40.7^{l-o}	6.0^{c-e}	5.37^{ab}	28.82^{f-j}
	30	0	41.1^{k-m}	5.7^{f-j}	5.16^{b-f}	29.15^{f-i}
		10	47.0^{a}	5.8^{e-h}	5.31^{a-d}	35.31^{a}
		30	41.9^{g-j}	5.5^{i-m}	5.22^{a-e}	30.50^{de}
	60	0	46.4^{a}	5.5^{g-l}	5.04^{c-i}	34.03^{b}
		10	39.3^{r}	5.5^{i-m}	4.82^{g-n}	27.44^{k}
		30	42.4^{e-h}	5.9^{d-f}	5.47^{a}	29.77^{e-h}
	90	0	41.5^{i-k}	6.1^{b-d}	5.39^{ab}	29.67^{e-h}
		10	39.9^{p-r}	6.4^{ab}	5.01^{d-j}	28.32^{i-k}
		30	41.9^{g-j}	5.9^{d-f}	5.40^{ab}	29.74^{e-h}
Mild water stress تنش ملایم	0	0	37.7^{uv}	4.9^{qr}	4.57^{m-r}	25.58^{lm}
		10	40.7^{l-o}	5.6^{g-k}	5.00^{e-k}	28.61^{ij}
		30	41.3^{i-l}	5.4^{k-o}	4.48^{o-s}	29.13^{f-i}
	30	0	38.0^{s-u}	5.2^{n-q}	4.64^{l-q}	26.32^{l}
		10	42.6^{e-g}	5.3^{l-p}	5.08^{c-h}	31.21^{cd}
		30	39.6^{qr}	6.3^{a-c}	4.79^{h-n}	27.48^{k}
	60	0	38.3^{s-u}	6.3^{a-c}	4.70^{k-p}	26.46^{l}
		10	$42.3f-^{h}$	5.8^{e-g}	5.10^{b-g}	30.66^{de}
		30	40.8^{k-o}	5.7^{f-i}	4.66^{l-q}	28.71^{h-j}
	90	0	41.3^{i-l}	5.1^{o-q}	4.62^{m-r}	29.21^{f-i}
		10	41.8^{h-j}	6.5^{a}	4.92^{f-l}	29.68^{e-h}
		30	40.9^{k-n}	5.4^{j-n}	4.74^{i-o}	28.81^{g-j}
moderate water stress تنش متوسط	0	0	40.2^{n-q}	4.5^{s}	4.44^{o-s}	28.36^{i-k}
		10	42.8^{ef}	5.2^{m-p}	4.52^{m-r}	30.68^{de}
		30	43.6^{cd}	6.0^{d-f}	4.12^{t-w}	31.46^{cd}
	30	0	41.0^{k-n}	5.3^{k-o}	4.51^{n-r}	28.83^{f-j}
		10	42.4^{e-h}	4.9^{qr}	4.72^{j-p}	29.77^{e-h}
		30	44.1^{bc}	5.8^{e-h}	4.37^{q-t}	31.96^{c}
	60	0	42.0^{g-j}	5.9^{d-f}	4.81^{g-n}	29.83^{e-g}
		10	41.9^{g-j}	5.9^{d-f}	4.82^{g-m}	29.76^{e-h}
		30	37.9^{s-v}	6.3^{a-c}	4.42^{p-s}	25.45^{lm}
	90	0	43.1^{de}	5.5^{h-m}	4.59^{m-r}	30.96^{d}
		10	44.3^{b}	5.0^{pq}	4.71^{j-p}	31.22^{cd}
		30	42.0^{g-i}	5.3^{k-p}	4.31^{r-u}	29.88^{ef}
severe water stress تنش شدید	0	0	37.1^{v}	4.7^{rs}	3.94^{v-x}	27.38^{k}
		10	37.7^{t-v}	5.4^{k-o}	3.83^{w-y}	25.79^{lm}
		30	39.3^{r}	5.5^{h-m}	4.02^{u-w}	27.58^{k}
	30	0	41.2^{j-l}	5.1^{o-q}	3.69^{xy}	29.11^{f-i}
		10	38.5^{s}	5.8^{e-h}	3.66^{xy}	26.38^{l}
		30	40.8^{k-o}	6.5^{a}	4.21^{s-v}	28.72^{h-j}
	60	0	38.5^{st}	6.0^{d-f}	4.03^{u-w}	26.30^{l}
		10	41.3^{i-l}	5.5^{g-l}	4.10^{t-w}	29.16^{f-i}
		30	40.4^{m-p}	4.9^{qr}	3.93^{v-x}	27.97^{jk}
	90	0	40.4^{m-p}	5.7^{f-i}	3.89^{wx}	28.28^{i-k}
		10	38.0^{s-u}	5.7^{f-i}	3.58^{y}	26.09^{l}
		30	37.2^{v}	5.1^{o-q}	3.70^{xy}	24.90^{m}
Mean			*40.90*	*5.63*	*5.05*	*28.42*

Table 3. Continued **جدول ۳. ادامه**

آبیاری Irrigation	نیتروژن Nitrogen	متانول Methanol	وزن هزار دانه weight of 1,000 seeds	عملکرد دانه Seed yield	تعداد کپسول در بوته Number of capsules per plant	تعداد بذر در کپسول Number of seeds per capsule
	kg	%	gr	gr		
Control شاهد	0	0	1.78^{w}	697.29^{n-q}	22.00^{a}	47.03^{o}
		10	2.32^{e-g}	709.24^{a-g}	18.16^{b}	58.98^{b-k}
		30	2.12^{n-q}	707.54^{b-k}	8.17^{m-p}	55.62^{c-n}
	30	0	2.22^{i-l}	710.82^{a-d}	7.17^{pq}	60.00^{b-j}
		10	2.05^{q-t}	708.30^{a-i}	8.67^{k-o}	56.65^{b-m}
		30	1.98^{uv}	703.99^{d-o}	10.50^{d-h}	53.73^{f-o}
	60	0	2.28^{g-i}	708.90^{a-h}	10.67^{d-g}	55.23^{d-n}
		10	2.07^{p-t}	701.87^{e-q}	12.50^{c}	55.68^{c-n}
		30	2.23^{i-k}	699.70^{j-q}	11.67^{cd}	53.50^{g-o}
	90	0	2.13^{m-p}	709.70^{a-e}	8.67^{k-o}	55.61^{c-n}
		10	2.11^{n-r}	715.40^{a}	9.67^{f-k}	58.98^{b-k}
		30	2.14^{m-o}	705.40^{c-m}	10.50^{d-h}	51.30^{k-o}
Mild water stress تنش ملایم	0	0	2.01^{t-v}	712.20^{a-c}	9.17^{i-n}	62.88^{a-d}
		10	2.14^{m-o}	708.41^{a-i}	8.00^{n-q}	60.43^{b-i}
		30	1.75^{w}	710.82^{a-d}	6.80^{qr}	61.53^{a-g}
	30	0	2.13^{m-p}	702.95^{d-p}	5.67^{s}	56.93^{b-m}
		10	2.35^{d-f}	703.57^{d-o}	5.80^{rs}	57.55^{b-l}
		30	2.15^{m-o}	704.94^{c-n}	9.50^{g-l}	58.92^{b-k}
	60	0	1.97^{uv}	707.98^{a-i}	9.50^{g-l}	61.96^{a-e}
		10	2.38^{c-e}	700.61^{i-q}	11.30^{de}	54.59^{e-o}
		30	2.03^{s-u}	707.72^{a-j}	9.17^{i-n}	61.70^{a-f}
	90	0	2.16^{l-n}	695.23^{pq}	9.17^{i-n}	49.21^{m-o}
		10	2.19^{j-m}	702.75^{d-p}	9.67^{f-k}	56.73^{b-m}
		30	2.27^{g-i}	704.08^{d-o}	9.92^{f-j}	58.06^{b-l}
moderate water stress تنش متوسط	0	0	2.09^{o-s}	704.37^{c-n}	7.80^{o-q}	58.35^{b-k}
		10	2.23^{i-k}	701.12^{h-q}	8.67^{k-o}	55.10^{d-n}
		30	2.02^{s-u}	704.23^{c-o}	8.30^{l-p}	58.21^{b-k}
	30	0	2.16^{m-o}	709.77^{a-e}	11.67^{cd}	63.75^{ab}
		10	2.36^{c-f}	713.97^{ab}	8.00^{n-q}	67.95^{a}
		30	2.40^{b-d}	709.45^{a-f}	9.67^{f-k}	63.43^{a-c}
	60	0	2.46^{ab}	704.33^{c-n}	8.30^{l-p}	58.31^{b-k}
		10	2.47^{a}	707.27^{b-k}	10.80^{d-f}	61.25^{a-h}
		30	2.07^{p-t}	699.48^{k-q}	9.67^{f-k}	53.46^{h-o}
	90	0	2.24^{ij}	697.98^{m-q}	8.00^{n-q}	51.96^{j-o}
		10	2.31^{f-h}	703.82^{d-o}	9.30^{h-m}	57.80^{b-l}
		30	1.96^{v}	706.45^{b-l}	9.67^{f-k}	60.43^{b-i}
severe water stress تنش شدید	0	0	2.16^{m-o}	700.35^{i-q}	7.30^{pq}	54.33^{e-o}
		10	2.05^{r-t}	702.03^{e-q}	8.17^{m-p}	56.01^{b-n}
		30	2.24^{ij}	696.15^{opq}	8.31^{m-p}	50.13^{l-o}
	30	0	2.09^{o-s}	700.67^{i-q}	10.67^{d-g}	54.65^{e-o}
		10	1.95^{v}	699.12^{l-q}	10.30^{e-i}	53.10^{i-o}
		30	2.43^{a-c}	700.95^{h-q}	8.00^{n-q}	54.93^{d-n}
	60	0	2.25^{h-j}	699.10^{l-q}	8.80^{j-o}	53.08^{i-o}
		10	2.32^{e-g}	701.80^{e-q}	7.17^{pq}	55.78^{c-n}
		30	2.32^{e-g}	701.22^{g-q}	7.80^{o-q}	55.20^{d-n}
	90	0	2.14^{m-o}	701.43^{f-q}	10.80^{d-f}	55.41^{d-n}
		10	1.80^{w}	694.45^{q}	7.67^{o-q}	48.43^{no}
		30	2.17^{k-n}	699.17^{l-q}	7.17^{pq}	54.15^{e-o}
Mean			*2.12*	*706.20*	*16.11*	*47.03*

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حرف مشابه هستند، بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Means with the same letter(s) in each column are not significantly different at 5% probability level using Duncan's multiple range test.

کاهش وزن دانه خواهد شد (Modhej and Behdarvandi, 2006). کاهش وزن هزار دانه در تنش ملایم آبیاری به علت کاهش دوره رشد رویشی و زایشی، کوتاهی طول دوره مؤثر پر شدن دانه، کاهش تولید و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها است (Emadi et al., 2012) و در گیاهانی مثل گشنیز (Nourzad et al., 2014) و شنبلیله (Bazazi et al., 2013) نیز گزارش شده است. در شرایط خشکی شدید و متوسط، افزایش وزن هزار دانه و کاهش تعداد دانه در بوته مشاهده شده که این افزایش وزن هزار دانه می‌تواند به علت اثر جبرانی اجزای عملکرد بر روی یکدیگر باشد. افزایش وزن هزار دانه با کاربرد متانول در مطالعه ما با دیگر مطالعات در گیاهان سویا و سرخارگل (Khosravi et al., 2011) مطابقت داشت که می‌تواند ناشی از تأثیر متانول بر افزایش محتوای کلروفیل و شاخص سطح برگ و درنهایت تولید بیشتر مواد فتوسنتزی در گیاه باشد و همچنین افزایش وزن هزار دانه با کاربرد نیتروژن در گیاه سیاه‌دانه (Rana et al., 2012) گزارش شده است.

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه نیتروژن، متانول و آبیاری قرار گرفت، درحالی‌که اثر متقابل نیتروژن با متانول اختلاف معنی‌داری روی عملکرد دانه نشان نداد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تنش آبیاری باعث افزایش میزان عملکرد دانه شد، درحالی‌که کاربرد سطح بالای نیتروژن و متانول باعث کاهش میزان عملکرد دانه گردید اما کاربرد سطح کمتر نیتروژن (۳۰ کیلوگرم در هکتار) و متانول (۱۰ درصد) باعث افزایش میزان عملکرد دانه گردید. به‌طوری‌که برهم‌کنش دوگانه کاربرد ۳۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۱۰ درصد متانول عملکرد دانه را به میزان ۱۰/۹ درصد نسبت به سطوح بالای نیتروژن و متانول بهبود بخشید. (جدول ۳). نتایج نشان داد که بیشترین میزان عملکرد دانه در اثر متقابل سه‌گانه بدون تنش آبیاری و کاربرد ۹۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و کاربرد ۱۰ درصد متانول به مقدار ۷۱۵/۴۰ گرم مشاهده شد، درحالی‌که کمترین میزان عملکرد دانه تحت شرایط تنش شدید آبیاری و کاربرد ۹۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و کاربرد ۱۰ درصد متانول به مقدار ۶۹۴/۴۵ گرم به دست آمد. کاهش عملکرد دانه با افزایش کمبود آب در مطالعه ما با سایر مطالعات در گیاهانی همچون کدوی تخم کاغذی (Aghaei and Ehsanzadeh, 2011) و گشنیز (Nourzad et al., 2014) مطابقت داشت. اثر کاهنده کمبود آب بر عملکرد دانه به دلایل اثرات منفی آن بر سطح برگ، فتوسنتز، سرعت رشد گیاه، دوره گل‌دهی، اجزای عملکرد مانند تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در بوته و وزن دانه و شاخص برداشت است. کاربرد متانول، غلظت CO_2 را در یک گیاه افزایش داده و عملکرد را تحت شرایط کمبود آب بهبود می‌دهد (Armand et al., 2016). گزارش شده است که در شرایط خشکی، کاربرد متانول به‌طور معنی‌داری باعث افزایش عملکرد دانه در سویا (Mirakhori et al., 2009) و نخود (Hosseinzadeh et al., 2013) شد. افزایش عملکرد دانه با کاربرد سطوح کمتر نیتروژن در این مطالعه با تحقیقاتی که روی سیاه‌دانه (Rana et al., 2012) و کدوی تخم کاغذی (Aghaei and Ehsanzadeh, 2011) مطابقت داشت.

نتایج حاصل از برهم‌کنش بین کاربرد نیتروژن و متانول نشان داد که در سطوح عدم کاربرد نیتروژن و مصرف ۳۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار، سطح ۳۰ درصد متانول و بعدازآن سطح ۱۰ درصد متانول بیشترین تأثیر مثبت را بر صفات ارتفاع گیاه، طول ریشه، سرعت رشد محصول وزن هزار دانه و تعداد کپسول در بوته داشتند. کاربرد نیتروژن در سطوح ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار به‌ویژه ۶۰ کیلوگرم باعث افزایش ارتفاع گیاه، طول ریشه، شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول و تعداد بذر در کپسول، وزن هزار دانه و عملکرد دانه شد. افزایش ارتفاع ناشی از مصرف نیتروژن می‌تواند به دلیل افزایش طول میانگره و افزایش شاخ و برگ در گیاه باشد (Moghaddam et al., 1997). بااین‌حال نتایج مطالعه ما نشان داد که کاربرد نیتروژن باعث کاهش تعداد کپسول در بوته سیاه‌دانه شد. این حالت می‌تواند به دلیل افزایش میزان شاخص سطح برگ و سرعت فتوسنتز خالص با کاربرد نیتروژن باشد که با عمل کردن به عنوان یک مخزن قوی می‌تواند از هدایت اسیمیلات‌های فتوسنتزی برای تولید کپسول جلوگیری کند.

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج پژوهش نشان داد که تنش خشکی شدید از طریق کاهش ارتفاع گیاه، طول ریشه سرعت رشد محصول، تعداد بذر در کپسول و تعداد کپسول در بوته توانست باعث افت عملکرد دانه در گیاه سیاه‌دانه شود و کاربرد متانول به‌ویژه در سطح ۳۰ درصد، با تأثیر مثبت بر قدرت منبع (شاخص سطح

برگ) و قدرت مخزن (تعداد و اندازه دانه‌ها) و همچنین طول ریشه توانست در شرایط تنش کمبود آب عملکرد دانه سیاه دانه را افزایش دهد. حداکثر مقدار سرعت رشد محصول در اثر متقابل سه‌گانه آبیاری شاهد، کاربرد ۳۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۱۰ درصد محلول‌پاشی متانول به مقدار ۳۵/۳۱ گرم بر مترمربع بر روز به دست آمد و با توجه به اهمیت و ارزش اقتصادی گیاه سیاه‌دانه در صنایع دارویی کاربرد این تیمار برای تولیدکنندگان این گیاه توصیه می‌گردد.

منابع

Aghaei, A.H., Ehsanzadeh, P., 2011. The effect of irrigation and nitrogen regime on yield and some physiological parameters of squash. Iranian Journal of Horticultural Sciences. 42, 291-299. [In Persian with English Summary].

Amrayi, B., Pakenjad, F., Ebrahimi, M.A., Sobhanian, H., 2017. The effect of methanol foliar application and drought stress on grain yield and growth indices of soybean (*Glycine max* L.). Journal of Physiology Crops. 9, 111-129.

Armand, N., Amiri, H., Ismaili, A., 2016. Interaction of methanol spray and water-deficit stress on photosynthesis and biochemical characteristics of Phaseolus vulgaris L. cv. Sadry. Photochemistry and Photobiology. 92, 102–110.

Asadi, S., Lebaschy, M.H., Khourgami, A., Shirani Rad, A.M., 2012. Effect of drought stress on the morphology of three Salvia sclarea populations. Annals of Biological Research. 3, 4503-4507.

Azarpanah, A., Alizadeh, O., Dehghanzadeh, H., Zare, M., 2013, The effect of irrigation levels in various growth stages on morphological characteristics and yield components of *Zea mays* L. Journal of Engineering Technology and Applied Sciences. 3, 1447-1459.

Babaei, K., Amini Dehghi, M., Modarres sanavi, E.M., Jabbari, R., 2010. The effect of drought stress on morphological traits, proline content and thymol content in thyme (*Thymus vulgaris* L.). Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research. 26, 239-251. [In Persian with English Summary].

Bazazi, N, Khodambashi, M., Mohammadi, Sh., 2013. The effect of drought stress on morphological characteristics and yield components of fenugreek. Journal of Crop Production and Processing. 3, 11-23. [In Persian with English Summary].

Emadi, N., Baluchi, H.R., Jahanbin, Sh., 2012. The effect of drought stress and plant density on yield, yield components and some morphological characteristics of pinto beans C.O.S.16 cultivar in Yasuj region. Electronic Journal of Crop Production. 5. 1-17. [In Persian with English Summary].

Fazeli Rostampour, M., Saghe Al-eslami, M. J., Mousavi, G., 2010. Investigation of the effect of drought stress and superabsorbent on the relative water content and leaf chlorophyll index and their relationship with grain yield in maize. Journal of Crop Physiology. 6, 19-29. [In Persian with English Summary].

Goldani, M., Rezvani, P., 2007. The effects of different irrigation regimes and planting dates on phenology and growth indices of three chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars in Mashhad. Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources. 14, 229-242. [In Persian with English Summary].

Hosseinzadeh, S.R.S., Ganjeali, A., Ahmadpour, R., 2013. Effects of foliar application of methanol on photosynthetic characteristics chlorophyll fluorescence and chlorophyll content of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. Iranian Journal of Plant Biology. 5, 116–129. [In Persian with English Summary].

Hussain, D.A.S., Hussain, M.M., 2016. *Nigella sativa* (black seed) is an effective herbal remedy for every disease except death – a Prophetic statement which modern scientists confirm unanimously: A review. Advancement in Medicinal Plant Research. 4, 27-57.

Hosseini, S.S., Nadjafi, F., Asareh, M.H., Rezadoost, H., 2118. Morphological and yield related traits, essential oil and oil production of different landraces of black cumin (*Nigella sativ*a) in Iran. Scientia Horticulturae. 233, 1-8.

Hussain, M., Malik, M.A., Farooq, M., Khan, M.B., Akram, M., Saleem, M.F., 2009, Exogenous glycinebetaine and salicylic acid application improves water relations, allometry and quality of hybrid sunflower under water

deficit conditions. Journal of Agronomy and Crop Science. 195, 98–109.

Javadi, H., Rashed Mohasel, M.H., Zamani, G.R., Azari Nasr Abadi, E., Musavi, Gh. R., 2007. Effect of plant density on growth indices in four grain sorghum cultivars. Iranian Journal of Field Crops Research. 4, 265–253. [In Persian with English Summary].

Khan, A. S., Ul-Allah, S., Sadique, S., 2010. Genetic variability and correlation among seedling traits of Wheat (*Triticum sativum*) under water stress. International Journal of Agriculture and Biology. 12, 247-250.

Karami, A., Sepehri, A., Hamzeii, J., Ghobad, S., 2011. Effect of nitrogen and phosphorous biofertilizers on quantitative and qualitative traits of borage (*Borago officinalis* L.) under water deficit stress. Journal of Plant Production Technology. 11, 37-50. [In Persian with English Summary].

Khosravi, M.T., Mehrafarin, E., Naqdibadi, H.E., Hajieghaei, R., Khosravi, A., 2011. The effect of methanol and ethanol application on the yield of *Echinacea purpurea* L in Karaj region. Herbal Medicine Quarterly. 2, 121-128. [In Persian with English Summary].

Kuttimani, R., Velayudham, K., Somasundaram, E., Jothi, N.J., 2013. Effect of integrated nutrient management on corm and root growth and physiological parameters of banana. International Journal of Advanced Research. 1, 46-55.

Majnoonhosseini, N., Davazdahemami, S., 2007. Cultivation and production of certain herbs and spices. University of Tehran Press, 300pp. [In Persian].

Mirakhori, M., Paknejad, F., Moradi, F., Ardakani, M.r., Zahedi, H., Nazeri, P., 2009. Effect of drought stress and methanol on yield and yield components of soybean max (L17). American Journal of Biochemistry and Biotechnology. 5, 162-169.

Modhej, A. Behdarvandi, B., 2006. Study of the effect of terminal heat stress on source limitation and grain yield in Bread wheat (*Triticum aestivum* L.). Iranian Journal of Field Crop Science. 39, 89-97. [In Persian with English Summary].

Moghaddam, M., Ehdaie, B., Waines, J.D.G., 1997, Genetic variation and interrelationships of agronomic characters in landraces of bread wheat from southeastern Iran. Euphytica. 95, 361-369.

Mohammadi Alborzi, M., Safikhani, F.A, Masoud Sinki, J., Abbaszadeh, B., 2012. The effect of drought on morphological characteristics of anisum (Pimpinella anisum L.). Journal of Plant Ecophysiology. 4, 14-25.

Nonomura, A. M., Benson, A. A., 1992. The path of carbon in photosynthesis: Improved crop yield with methanol. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 89, 9794-9798.

Nourzad, S., Ahmadian, A., Moghadam, M., Daneshfar, A., 2014. Effect of drought stress on yield, yield components and essential oil in coriander treated with organic and inorganic fertilizers. Journal of Crops Improvement. 16, 289-302.

Ntanos, D.A., Koutroubas, S.D., 2002. Dry matter and N accumulation and translocation for Indica and Japonica rice under Mediterranean conditions. Field Crops Research. 74, 93-101.

Osuagwu, G.G.E., Edeoga, H.O., Osuagwu, A.N., 2010. The influence of water stress (drought) on the mineral and vitamin potential of the leaves *Ocimum gratissimum* L., Recent Research in Science and Technology. 2, 27-33.

Ozer, H., Polat, T., Ozturk, E, M., 2004. Response of irrigated sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids to nitrogen fertilization: growth, yield and yield components. Plant, Soil and Environment. 50, 205-211.

Peng, S., Buresh, R.J., Huang, J., Yang, J., Zou, Y., Zhong, X., Wang, G., Zhang, F., 2006. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice system in China. Field Crops Research. 96, 37-47.

Ramadant, T., Omran, Y., 2005. The effects of foliar application of methanol on productivity and fruit quality of grapevine cv. flame seedlees. Vitis Journal. 44, 11-16.

Rana, S., Singh, P., Naruka, I. Rathore, S., 2012. Effect of nitrogen and phosphorus on growth, yield and quality of black cumin (*Nigella sativa* L.). International Journal of Seed Spices. 2, 5-8.

Sahi, C., Singh, A., Blumwald, E., Grover, A. 2006. Beyond osmolytes and transporters: novel plant salt-stress tolerance-related genes from transcriptional profiling data. Physiologia Plantarum. 127, 1-9.

Shubhra, K., Dayal, J., Goswami, C.L., Munjal, R., 2004. Effects of water deficit on oil of

Calendula aerial parts. Biologia Plantarum. 48, 445-448.

Soltaninejad, F., Fallah, S., Heidari, M., 2013. The effect of different sources and amounts of nitrogen on the growth and biomass production of *Portulaca oleracea*. Journal of Crop Production. 6, 125-143.

Tahami, S.M.K., Rezvani Moghaddam, P., Jahan, M., 2010. Comparison the effect of organic and chemical fertilizers on yield and essential oil percentage of basil (*Ocimum basilicum* L.). Agroecology. 2, 70-82. [In Persian with English Summary].

Tariq Alislami, M., Zarghami, R., Mashhadi Akbar Bojar, M., Oveysi, M., 2012. The effect of drought stress and nitrogen fertilizer amounts on physiological parameters of grain corn. Journal of Agriculture and Plant Breeding. 8, 161-174. [In Persian with English Summary].

Wu, K., Chen, Q., Xiao, S., Tan, H., Wang, Q., Zhao, Y., Wu, W., Li, K., Yu, Y., Chen, L., 2013. CDNA microarray analysis of transcriptional responses to foliar methanol application on tamba black soybean plants grown on acidic soil. Plant Molecular Biology Reporter. 31, 862–876.

Zhao, W., Liu, L., Shen, Q., Yang, J., Han, X., Tian, F., Wu, J., 2020. Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. Water. 12, 21-27