



The Effect of Silicon Spraying and Nitrogen Fertilizer in Reducing the Drought Stress Damage on Growth, Grain Yield and Phenologic Stages of Black Cumin (*Nigella sativa* L.)

F. Kashkooli¹, M. Ghobadi^{1*}, S. Jalali Honarmand¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran

(*- Corresponding author's Email: ghobadi.m@razi.ac.ir)

How to cite this article:

Received: 22 November 2024

Revised: 09 February 2025

Accepted: 18 February 2025

Available Online: 13 April 2025

Kashkooli, F., Ghobadi, M., & Jalali Honarmand, S. (2025). The Effect of Silicon Spraying and Nitrogen Fertilizer in Reducing the Drought Stress Damage on Growth, Grain Yield and Phenologic Stages of Black Cumin (*Nigella sativa* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(4), 375-397. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.90916.1360>

Introduction

Black cumin (*Nigella sativa* L.) is a medicinal crop in the Ranunculaceae family, a dicotyledonous, herbaceous and annual plant. *Nigella sativa* is one of the eight species of this genus that can be cultivated naturally in different parts of Iran. Grains of nigella contains about 40% oil and 1.4% essential oil. The main fatty acids in nigella grain are oleic acid, linoleic acid and palmitic acid. In dry and semi-dry regions, such as west of Iran, water deficit is the most important factor that reduce the growth and production of crops. Plant's growth depends on the adequate amount of nutrients in the rhizosphere. Among nutrients, nitrogen has a particular importance. Because nitrogen plays a role in the formation of amino acids, proteins, nucleic acids and other cell compounds. Using the correct methods of mineral nutrition in plants reduces the effects of drought stress. Silicon is one of these elements. Although silicon is not an essential element for plant growth, it plays an important role in reducing the harmful effects of drought stress. The aim of this experiment was to investigate the effects of silicon foliar application and nitrogen fertilizer in modulating the negative impacts of drought stress on growth, grain yield and phonologic stages of nigella.

Materials and Methods

This experiment was carried out in the research farm of Razi University during two crop years, 2020-21 and 2021-22. The research was done in the form of two separate experiments, one under non-drought conditions and the other under drought stress conditions. Each experiment was laid out as a split plot in the form of a randomized complete blocks design (RCBD) in three replications. The main factor was the amount of nitrogen fertilizer in three levels (0, half, and equivalent to the recommended amount, respectively contain 0, 125 and 250 kg ha⁻¹ urea) and the sub-factor including silicon foliar spraying in four concentrations (0, 3, 6 and 9 mM). The measured traits were included grain yield, HI, biomass, capsules per plant, grains per capsule, 1000 grain weigh, grains per plant, days to flowering, days to physiologic ripening, grain filling period and grain filling rate. To analysis of variance of the data, the combined analysis model was used with SAS, 9.4 software. The Bartlett test was used to confirm the homogeneity of variances. In combined analysis, year was considered as a random effect and nitrogen and silicon as fixed effects. The means comparison was performed by LSD test at the probability level of 5%.



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.90916.1360>

Results and Discussion

In normal moisture conditions and without silicon spraying, the application of 250 kg ha⁻¹ urea was more suitable for the investigated traits. So that the highest values of grain yield (1453 kg ha⁻¹), number of capsules per plant (33.6 capsules), number of grains per capsule (73.8 grains), number of grains per plant (2514 grains), days to physiological maturity (106.6 days) and grain filling rate (125.7 mg day⁻¹) were obtained at 250 kg ha⁻¹ urea. In the absence of nitrogen, silicon was not effective. But with nitrogen application, 6 and 9 mM silicon foliar spraying were effective. In general, under without drought stress conditions, the interaction effect of 250 kg ha⁻¹ urea × 6 mM silicon was found as the superior treatment. Under drought stress conditions and without silicon spraying, 125 kg ha⁻¹ urea was more suitable than 250 kg ha⁻¹ urea and also the no-nitrogen treatment. But in silicon spraying treatments, the use of 250 kg ha⁻¹ nitrogen achieved better results. At 125 kg ha⁻¹ nitrogen, foliar spraying of silicon 6 mM was more suitable. But at 250 kg ha⁻¹ nitrogen, foliar spraying of 9 mM silicon was better. According to the obtained results, under drought stress conditions, the consumption of 250 kg ha⁻¹ urea × silicon foliar application of 9 mM was determined as the best treatment.

Conclusion

In general, the results of this experiment showed that silicon foliar spraying was able to significantly reduce the negative effects of water deficiency in *nigella sativa*. Therefore, in order to increase the yield of *nigella*, along with the application of nitrogen fertilizer as much as the recommended amount, it is recommended to foliar spraying of 6 mM silicon under normal moisture conditions and 9 mM under drought stress conditions.

Keywords: Biologic yield, Fertilizer, Grain number, Urea

تأثیر محلول پاشی سیلیکون و کود نیتروژن در کاهش خسارت تنش خشکی بر رشد، عملکرد

دانه و مراحل فنولوژی سیاه دانه (*Nigella sativa* L.)فرشته کشکولی^{۱b}، مختار قبادی^{۱b*}، سعید جلالی هنرمند^{۱b}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

چکیده

کود نیتروژن، عملکرد دانه را افزایش می‌دهد، اما در شرایط تنش خشکی، حساسیت گیاه به خشکی را تشدید می‌نماید. این آزمایش برای ارزیابی محلول پاشی سیلیکون به همراه کود نیتروژن بر رشد و عملکرد دانه سیاه دانه (*Nigella sativa* L.) انجام گرفت. این تحقیق در دانشگاه رازی طی دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۳۹۹ به صورت دو آزمایش جداگانه (در شرایط عدم تنش و در شرایط تنش خشکی) و هر آزمایش به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی پیاده شد. عوامل آزمایشی شامل مقادیر نیتروژن به عنوان عامل اصلی (صفر، ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار) و محلول پاشی سیلیکون در چهار غلظت (صفر، سه، شش و نه میلی‌مولار) به عنوان عامل فرعی بودند. نتایج نشان داد که در شرایط تنش خشکی، اثر ساده نیتروژن و سیلیکون بر صفات مورد بررسی معنی‌دار بود. اما در شرایط عدم تنش، سیلیکون بر صفات شاخص برداشت، وزن هزار دانه، روز تا گل‌دهی و طول دوره پر شدن دانه اثر معنی‌دار نداشت. اثر متقابل نیتروژن و سیلیکون در شرایط تنش بر اکثر صفات معنی‌دار شد. بالاترین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش، از تیمار اثر متقابل ۲۵۰ کیلوگرم اوره و محلول پاشی سیلیکون شش میلی‌مولار (۸/۶ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) به دست آمد. در حالی که در شرایط تنش خشکی، تیمار ۲۵۰ کیلوگرم اوره و محلول پاشی سیلیکون نه میلی‌مولار، از بالاترین عملکرد دانه (۱۹/۴۱ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) برخوردار بود. در شرایط تنش، کود اوره ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار برای صفت تعداد دانه در کپسول مناسب‌تر بود، اما با محلول پاشی سیلیکون، امکان افزایش مقدار کود اوره تا ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار وجود داشت. محلول پاشی سیلیکون با غلظت شش میلی‌مولار برای شرایط عدم تنش و نه میلی‌مولار برای شرایط تنش خشکی به همراه مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن برای سیاه دانه قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: اوره، تعداد دانه، عملکرد زیستی، کود

مقدمه

وجود دارد (Majnoon Hosseini & Davazdeh Imami, 2013). محققان برای سیاه دانه خواصی مانند ضد سرطان، ضد نفخ، ضد انگل، مسهل، ضد مالاریا، ضد ویروس، ضد صرع، ضد باکتری، مسکن، کاهش دهنده قند خون، شل کننده عضلات و محرک ایمنی را بر شمرده‌اند (Bassim Atta, 2003). از روغن فرار سیاه دانه موادی از جمله تیموکینون، دی تیموکینون و تیمول به دست می‌آید که بخش عمده‌ای از اثرات دارویی و خاصیت ضد سرطانی آن مربوط به ترکیبات تیموکینون است (Akhondian, Parsa, & Rakhshandeh, 2007).

جهان در چند دهه اخیر با چالش‌های متعدد و مهمی از جمله تغییر اقلیم و همچنین تنش‌های محیطی از جمله خشکی روبه‌رو بوده است (Tardieu, 2005). ایران به دلیل داشتن اقلیم خشک و نیمه خشک در معرض تنش خشکی شدیدتری قرار دارد

سیاه دانه (*Nigella sativa* L.) یک گیاه دارویی از خانواده Ranunculaceae، گیاهی دولپه، علفی و یک ساله است. گونه *sativa* یکی از هشت گونه این جنس است که به طور طبیعی در نقاط مختلف ایران قابل کشت است (Heidari & Jahantighi, 2014). دانه‌های سیاه دانه حاوی حدود ۴۰ درصد روغن و ۱/۴ درصد اسانس است. اسیدهای چرب عمده روغن سیاه دانه، اسیدهای اولئیک، لینولئیک و پالمیتیک است. افزون بر آن، عناصر کانی در آن به وفور

۱- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

(Email: ghobadi.m@razi.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.90916.1360>

(Cavins, & Marek, 2008). اگرچه سیلیکون عنصری ضروری برای رشد گیاهان زراعی نیست، اما تحقیقات اخیر نشان داده که برای رشد گیاهان در غلظت‌های کم، مفید بوده است. این مسأله در تنش‌های محیطی بارزتر است (Al-Aghabary, Zhu & Shi, 2005; Sanglard et al., 2014; Adrees et al., 2015; Kleiber, Calomme, & Borowiak, 2015). سازوکارهای مختلفی برای تحمل به خشکی توسط سیلیکون ارائه شده است. این موارد شامل جلوگیری از اتلاف آب از طریق تعرق (Agarie, 1998), فعال‌سازی سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی گیاه (Gong, Zhu, Chen, Wang, & Zhang, 2005; Gunes, Pilbeam, Inal & Coban, 2008), حفظ تعادل مواد معدنی (Kaya, Tuna, & Higgs, 2006), افزایش جذب آب توسط ریشه‌ها (Sonobe et al., 2010; Liu et al., 2014), تحریک تجمع اسمولیت‌ها (Ming, Pei, Naeem, Gong, & Zhou, 2012), افزایش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی (Chen, 2012) و تنظیم اسمزی (Zhu & Gong, 2014) است. این اثرات مفید به رسوب سیلیکون در دیواره سلولی، از طریق تغییرات آناتومیکی نسبت داده شده است (Ma & Takahashi, 2002).

تحقیقات پیشین نشان داده که مصرف کود نیتروژن سبب افزایش عملکرد محصول در گیاه سیاهدانه در شرایط نرمال رطوبتی شده است. با این حال، در شرایط تنش خشکی، کود نیتروژن باید کمتر از شرایط نرمال رطوبتی مصرف شود، زیرا حساسیت گیاه به تنش خشکی را تشدید می‌نماید. لذا آزمایش حاضر با هدف مطالعه تأثیر محلول‌پاشی سیلیکون در کاهش خسارت تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد سیاهدانه انجام شد. همچنین امکان مصرف کود نیتروژن در شرایط تنش خشکی در حد و اندازه شرایط نرمال رطوبتی، با وجود محلول‌پاشی سیلیکون، هدف دیگر این تحقیق بود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در دو سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی واقع در شهر کرمانشاه اجرا شد. مکان مورد نظر دارای مختصات طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۹ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی، و ۱۳۱۹ متر ارتفاع از سطح دریا می‌باشد. وضعیت بارندگی و دما در زمان آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. قبل از انجام آزمایش، از خاک مربوطه در چند نقطه نمونه خاک به صورت تصادفی تهیه شد. نمونه‌های خاک با هم ترکیب شدند و یک نمونه خاک مرکب به آزمایشگاه خاک‌شناسی منتقل شد. نتایج آزمون خاک در جدول ۲ ارائه شده است. تحقیق به صورت دو آزمایش جداگانه، یکی برای شرایط عدم تنش و دیگری برای تنش خشکی بود. هر آزمایش به صورت

(Moradzadeh et al., 2021). بروز تنش کم‌آبی طی مراحل مختلف رشد، به خصوص در مرحله رشد زایشی، به دلیل کاهش طول دوره فتوسنتزی و انتقال مواد حاصل از فتوسنتز جاری به دانه و کاهش میزان انتقال مجدد مواد ذخیره‌شده در ساقه به دانه باعث کاهش عملکرد دانه می‌گردد (Göksoy, Demir, Turan, & Dağüstü, 2004). وقوع تنش خشکی باعث فعال شدن فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی در گیاهان می‌شود که توانایی آن‌ها را برای مقابله با کم‌آبی افزایش می‌دهد. برخی پژوهشگران، تحمل نسبی سیاهدانه نسبت به کم‌آبی را گزارش نموده‌اند و نیاز آبی سیاهدانه در طول فصل رشد را به طور متوسط ۷۲۴ میلی‌متر گزارش کرده و اعلام داشته‌اند که بسیاری از خصوصیات گیاهی تحت تأثیر کم‌آبی قرار نگرفته است (Ghamarnia, Khosravy, & Sepehri, 2010; Ghamarnia, Miri, Jafarizadeh, & Ghobadi, 2013). چپانه و همکاران (Rezaei-Chiyaneh, Seyyedi, Ebrahimian, Moghaddam, & Damalas, 2018) در پژوهشی روی گیاه سیاهدانه، کاهش ۵۵/۵ و ۳۴/۶ درصدی ارتفاع بوته به ترتیب در تنش شدید و ملایم خشکی را در مقایسه با شاهد (بدون تنش) گزارش کردند. رشد و عملکرد سیاهدانه در شرایط تنش خشکی به دلیل تخریب مسیرهای متابولیکی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Haj Seyed Hadi, Darzi, & Riazi, 2016). در پژوهش انجام‌شده روی سیاهدانه در شرایط تنش خشکی مشخص گردید که میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و اسمولیت‌های محافظتی افزایش یافته است (Hayati, Rahimi, Kelidari, & Hosseini, 2021).

گیاهان برای رشد به میزان مناسبی از عناصر غذایی در محیط ریشه وابسته هستند. در بین عناصر غذایی، نیتروژن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا نیتروژن در تشکیل آمینواسیدها، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و دیگر ترکیبات سلولی نقش دارد (Salas, Hickman, Huber, & Schreiber, 1997). در شرایط کم‌آبی، تنظیم مصرف نیتروژن با توجه به تأثیری که در توسعه رشد رویشی دارد با اهمیت است (Heidari & Jahantighi, 2014). اغلب خاک‌های کشاورزی دارای کمبود نیتروژن هستند. از بین عناصر ضروری برای گیاهان، نیتروژن بیشترین تأثیر را بر فیزیولوژی و رشد گیاه زراعی دارد (Ali, Hasan, & Islam, 2015). در گیاهان، تمام فرآیندهای اساسی به پروتئین نیاز دارند که نیتروژن بخشی جدایی‌ناپذیر از آن است. بنابراین برای بهبود تولید، استفاده از نیتروژن بسیار مهم بوده و کاربرد مناسب آن باعث افزایش رشد رویشی، عملکرد و کیفیت دانه می‌شود (İzgi, 2020).

یکی از راهکارهای کاهش اثرات زیان‌بار تنش خشکی، استفاده از روش‌های صحیح تغذیه معدنی گیاهان است. در همین رابطه، نقش برخی عناصر مانند سیلیکون مورد توجه محققان قرار گرفته است (Torabi, Majd, Enteshari, & Irian, 2013; Kamenidou,

اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار پیاده شد. عوامل آزمایشی شامل مقادیر کود نیتروژن به‌عنوان عامل اصلی در سه سطح (عدم کاربرد، نصف مقدار توصیه‌شده و معادل مقدار توصیه‌شده به‌ترتیب معادل صفر، ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره) و عامل فرعی شامل چهار مقدار سیلیکون (صفر، سه، شش و نه میلی‌مولار) بودند. در آزمایش مربوط به شرایط نرمال رطوبتی، آبیاری براساس نیاز گیاه انجام شد. در طی مدت انجام تحقیق، داده‌های هواشناسی از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرمانشاه به‌صورت روزانه دریافت و سپس تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن-مانیت-فائو محاسبه گردید (Sabzevari, Nasrollahi, 2022).

جدول ۱- بارندگی و متوسط درجه حرارت طی دوره اجرای آزمایش

Table 1- Rainfall and mean temperature during the experiment period

اطلاعات هواشناسی Weather information	سال Year	اسفند March	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد Jun	تیر July	مرداد August
بارندگی Rainfall (mm)	۱۳۹۹-۱۴۰۰ 2021	21.7	3.8	8	0	0	0
	۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2022	60.9	10.4	81.5	0	0	0
متوسط دما Mean temperature (°C)	۱۳۹۹-۱۴۰۰ 2021	8.5	14.3	21.3	25.9	30.4	29.5
	۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2022	8.7	14.6	17.5	25.9	29.9	31.1

جدول ۲- تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر)

Table 2- Physical and chemical analysis of the soil (0-30 cm)

مس Cu (mg kg ⁻¹)	روی Zn (mg kg ⁻¹)	آهن Fe (mg kg ⁻¹)	منگنز Mn (mg kg ⁻¹)	پتاسیم K (mg kg ⁻¹)	فسفر P (mg kg ⁻¹)	نیتروژن N (%)	کربن آلی Organic C (%)	اسیدیته PH	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	کلسیم کربنات CaCO ₃ (%)	بافت Texture
1.6	0.39	4.2	13	340	15	0.09	0.93	7.7	1.77	28	رسی سیلty Silty clay

مولکولی سیلیکون (Na₂SiO₃)، مقدار مورد نظر توزین و در مقدار کمی آب حل شد و سپس به حجم نهایی رسیده و غلظت مورد نظر تهیه گردید. مراقبت‌های لازم از گیاه برای کاهش خسارت آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز در مزرعه انجام گرفت. آفت و بیماری در مزرعه مشاهده نگردید. لذا سموم شیمیایی مصرف نشد. برای مبارزه با علف‌های هرز، از وجین دستی در تمام طول دوره رشد (قبل از ساقه رفتن، اواسط رشد طولی ساقه و گل‌دهی) استفاده گردید. در هر دو آزمایش، صفات گیاهی مربوط به عملکرد دانه، اجزای عملکرد دانه و صفات فنولوژیک به شرح زیر اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری عملکرد دانه، اجزای عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت به صورت زیر انجام شد: عملیات برداشت به هنگام زرد شدن بوته‌ها و قبل از شکاف برداشتن کپسول‌ها انجام شد. پس از حذف اثر حاشیه، یک مترمربع از هر کرت برداشت شد و تمام ماده خشک اندام هوایی

آماده‌سازی اولیه زمین شامل شخم، دیسک و تسطیح قبل از کشت انجام شد. هر کرت آزمایشی شامل شش ردیف کاشت به‌طول پنج متر بود. بذر سیاهدانه (توده سمیرم) از شرکت هالیکوک کرمانشاه تهیه شد. کشت در مزرعه در اولین زمان مناسب در اسفند ماه و از طریق کاشت بذر در زمین اصلی و با تراکم ۲۰۰ بوته در مترمربع انجام گرفت. نیتروژن از منبع کود اوره (حاوی ۴۶ درصد نیتروژن) تأمین شد. کود نیتروژن به‌صورت خاک‌کاربرد و در فاصله حدود دو تا پنج سانتی‌متری بوته‌ها و براساس تیمار مربوطه در سه نوبت (زمان کاشت، مرحله چهار برگگی و مرحله ابتدای رشد ساقه) در اختیار گیاه قرار گرفت. تیمار سیلیکون در طی سه مرحله (ابتدای رشد طولی ساقه، ابتدای گل‌دهی و ابتدای پر شدن دانه) اعمال شد. سیلیکون از منبع سدیم سیلیکات (ساخت شرکت سیگما، آمریکا) تأمین شد. برای تهیه محلول سیلیکون با غلظت‌های تعیین‌شده، ابتدا با توجه به وزن

گیاه توزین و به عنوان عملکرد بیولوژیک لحاظ شد. سپس دانه‌ها جدا شد و عملکرد دانه به دست آمد. شاخص برداشت با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید (Mahdavi, Esmaeili, Falah, & Pirdashti, 2006).

$$HI = (GY/BY) \times 100 \quad (1)$$

که در آن، HI: شاخص برداشت، GY: عملکرد دانه و BY: عملکرد بیولوژیکی است.

تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، تعداد دانه در گیاه، وزن هزار دانه: بعد از رسیدگی فیزیولوژیک دانه، تعداد ۱۰ بوته از هر کرت برداشت شد. ابتدا تعداد کپسول‌ها شمارش گردید. سپس دانه از کپسول‌ها جدا شد و تعداد دانه‌ها شمارش و همچنین توزین شد. با تقسیم تعداد دانه بر تعداد کپسول، تعداد دانه در کپسول محاسبه گردید. همچنین با تقسیم وزن دانه‌ها بر تعداد آن‌ها و تعمیم آن‌ها به هزار، وزن هزار دانه به دست آمد. همچنین با ورود ۵۰ درصد گیاهان هر کرت به هر یک از مراحل فنولوژی مدنظر از جمله (روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک) مرحله نموی برای تیمار مورد بررسی ثبت شد. پس از حصول اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها، برای تجزیه واریانس داده‌ها از مدل آماری طرح تجزیه مرکب در دو سال با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 استفاده گردید. همچنین نرم‌افزار Excel 2016 برای رسم نمودارها به کار گرفته شد. جهت اطمینان از یکنواخت بودن واریانس‌ها از آزمون بارلت استفاده گردید. در تجزیه واریانس مرکب، سال به عنوان اثر تصادفی و نیتروژن و سیلیکون به عنوان اثرهای ثابت در نظر گرفته شدند. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

عملکرد دانه

تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که هم در شرایط نرمال رطوبتی و هم در شرایط تنش خشکی، اثرهای ساده سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر عملکرد دانه معنی‌دار ($p \leq 0.01$) بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون نشان داد که بدون مصرف سیلیکون، بالاترین عملکرد دانه در شرایط رطوبتی نرمال و شرایط تنش خشکی (به ترتیب معادل ۱۴۵۳ و ۸۸۰ کیلوگرم در هکتار) به ترتیب با مصرف ۲۵۰ و ۱۲۵ کیلوگرم اوره در هکتار به دست آمد (شکل ۱). این نتیجه حاکی از آن است که در شرایط تنش خشکی، مصرف نیتروژن باید کمتر از شرایط نرمال رطوبتی باشد و مصرف نیتروژن به مقدار بیشتر سبب کاهش عملکرد دانه می‌گردد. در شرایط مطلوب رطوبتی و عدم مصرف کود نیتروژن، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای مصرف و عدم کاربرد سیلیکون از نظر عملکرد دانه وجود نداشت، اما با مصرف کود

نیتروژن، عملکرد دانه به محلول‌پاشی سیلیکون واکنش نشان داد، به طوری که با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار، محلول‌پاشی سیلیکون شش میلی‌مولار بیشترین عملکرد دانه (۸/۶ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) را تولید نمود. این مطلب نشان می‌دهد که در شرایط رطوبتی نرمال، تأثیر نیتروژن بیشتر از سیلیکون بوده است و در صورت تأمین نیتروژن، عملکرد دانه به محلول‌پاشی سیلیکون پاسخ مثبت نشان داده است (شکل ۱A).

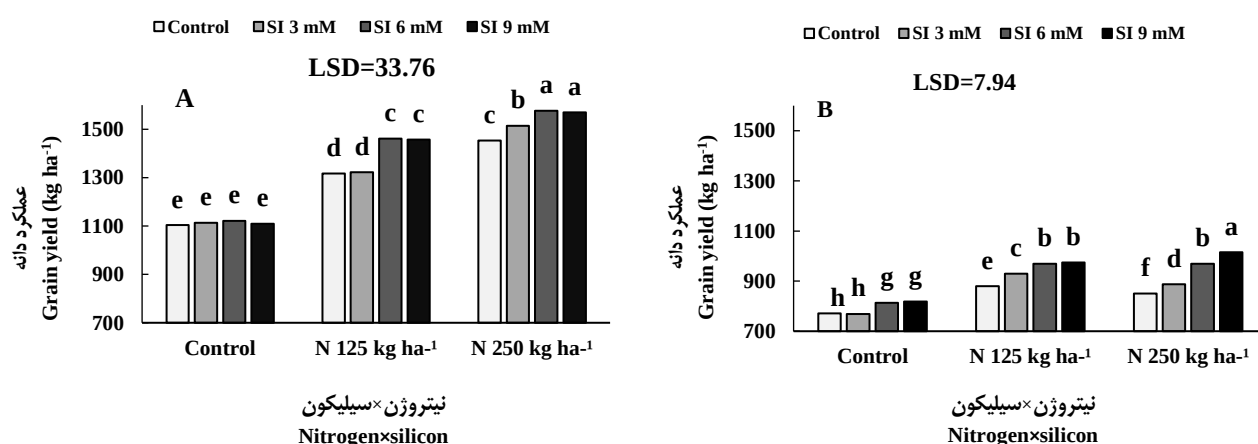
در شرایط تنش خشکی و بدون مصرف نیتروژن، محلول‌پاشی سیلیکون سه میلی‌مولار تأثیری در افزایش عملکرد دانه نداشت، اما محلول‌پاشی سیلیکون شش و نه میلی‌مولار (بدون اختلاف معنی‌دار با هم) سبب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه شدند. در شرایط تنش خشکی و مصرف نیتروژن، افزایش غلظت سیلیکون سبب افزایش عملکرد دانه گردید، هرچند که به هنگام مصرف ۱۲۵ کیلوگرم اوره، تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد دانه بین محلول‌پاشی سیلیکون شش و نه میلی‌مولار وجود نداشت. این در حالی بود که به هنگام مصرف ۲۵۰ کیلوگرم اوره، افزایش غلظت سیلیکون در افزایش عملکرد دانه مؤثر بود و سیلیکون نه میلی‌مولار از عملکرد دانه (۱۰۱۵ کیلوگرم در هکتار) بالاتری (۴/۷ بیشتر) نسبت به سیلیکون شش میلی‌مولار (۹۶۹ کیلوگرم در هکتار) برخوردار بود (شکل ۱B). بنابراین در شرایط تنش خشکی می‌توان از مقدار معادل نیتروژن توصیه‌شده به همراه محلول‌پاشی سیلیکون نه میلی‌مولار به منظور افزایش عملکرد دانه استفاده کرد. عملکرد دانه در سیاه‌دانه حاصل برهم‌کنش اجزایی است که در مراحل مختلف رویشی و زایشی شکل می‌گیرند. وزن هزار دانه، تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول از مهم‌ترین اجزای عملکرد دانه در گیاه سیاه‌دانه به شمار می‌آیند (Misra & Srivastava, 2000). تنش خشکی سبب کاهش طول دوره رویشی و تسریع ورود به فاز زایشی می‌شود که در نهایت با تأثیر بر اجزای عملکرد دانه سبب کاهش عملکرد می‌گردد (Mozaffari, Ghorbanli, Babai, & Sepehr, 2000). وقوع یک توالی از اتفاقات از جمله کاهش محتوای نسبی آب برگ، تجزیه کلروفیل در شرایط تنش خشکی منجر به کاهش فتوسنتز می‌گردد که در نهایت سبب کاهش رشد و عملکرد می‌شود (Kiami, Khalesro, Sharifi, & Mokhtassi-Bidgoli, 2024). نتایج آزمایش نشان داد که کاربرد سیلیکون در شرایط تنش خشکی توانسته اثر منفی ناشی از تنش خشکی را تعدیل کند و از شدت کاهش عملکرد در شرایط تنش جلوگیری کند. براساس نتایج حاصل از تحقیقی که توسط امیری و همکاران (Amiri, Bagheri, Khajeh, Najafabadipour & Yadali, 2013) صورت گرفت، مشخص شد که کاربرد دو میلی‌مولار سیلیکون باعث افزایش ۸/۳ درصدی عملکرد دانه در گیاه گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) شده است. نتایج حاصل از این گزارش با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت داشت.

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب اثرهای سال، نیتروژن، سیلیکون و اثرهای متقابل آنها از نظر عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت در شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی

Table 3- Combined analysis of variance for the effects of year, nitrogen, silicon and their interactions in terms of grain yield, biological yield, and harvest index under normal moisture and drought stress conditions

میانگین مربعات Mean of squares									
منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	تنش خشکی Drought stress				عدم تنش خشکی No drought stress			
		عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت HI	زیست توده Biomass	درصد نیتروژن دانه Grain nitrogen percentage	عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت HI	زیست توده Biomass	درصد نیتروژن دانه Grain nitrogen percentage
سال (Y) Year	1	87640.8**	23.977**	262691 ^{ns}	0.004 ^{ns}	106.68**	44.048*	25117 ^{ns}	0.0001 ^{ns}
بلوک (سال) Block (Y)	4	1840.7	8.763	215987	0.016	845	3.965	51153	0.010
نیتروژن Nitrogen (N)	2	161074.5**	21.235**	3483218**	1.286**	1078411**	0/429 ^{ns}	10009732**	1.002**
Y×N	2	61.4 ^{ns}	0.112 ^{ns}	1031 ^{ns}	0.009 ^{ns}	1982 ^{ns}	0.823 ^{ns}	12453 ^{ns}	0.001 ^{ns}
خطا ۱ Error 1	8	11069.8	2.899	153609	0.018	26349	5.325	389152	0.012
سیلیکون Silicon (S)	3	40292.5**	9.815**	1224730**	0.104**	39030**	0.634 ^{ns}	257026**	0.011**
Y×S	3	113.1 ^{ns}	0.330 ^{ns}	4251 ^{ns}	0.001 ^{ns}	1282 ^{ns}	0.304 ^{ns}	4208 ^{ns}	0.0001 ^{ns}
N×S	6	4442.5**	1.364 ^{ns}	38226**	0.031**	9887**	0.383 ^{ns}	73151*	0.003**
N×S×Y	6	31.3 ^{ns}	0.391 ^{ns}	3970 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	571 ^{ns}	1.285 ^{ns}	9991 ^{ns}	0.0001 ^{ns}
خطا ۲ Error 2	36	6473.2	2.737	136323	0.007	15318	3.889	236870	0.009
ضریب تغییرات CV (%)		9.1	6.2	11.1	4.1	9.2	6.18	11.5	5.6

ns: no significant; **, *: Significant at 1 and 5% probability levels, respectively.



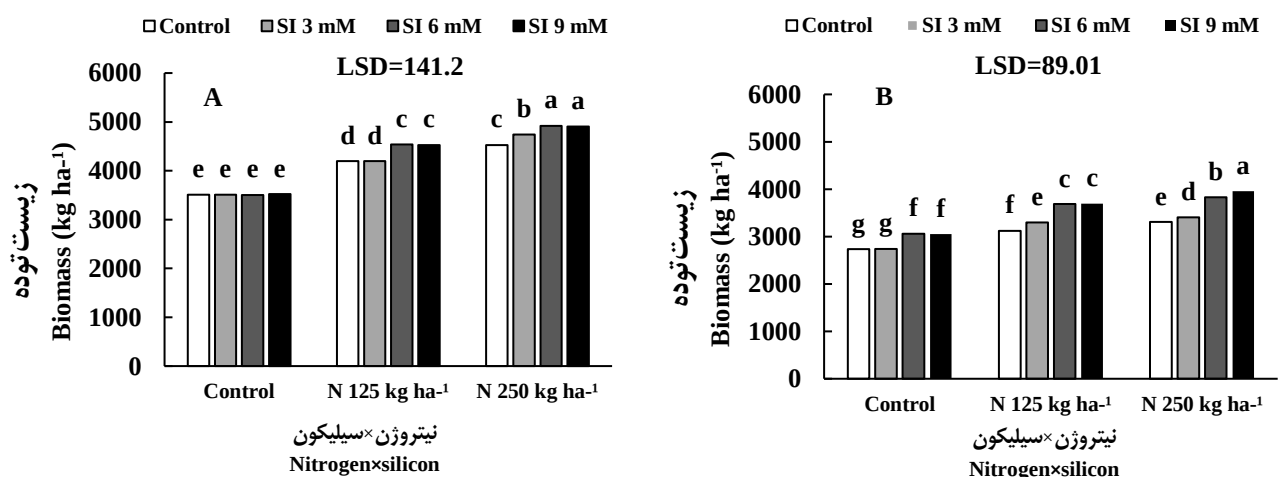
شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن×سیلیکون از نظر عملکرد دانه سیاه دانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 1- Means comparison of nitrogen×Silicon interaction in terms of the grain yield in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05)

تعدیل کند. با مصرف نیتروژن تا سطح معادل توصیه شده و افزایش غلظت سیلیکون، روند افزایشی در عملکرد زیست توده مشاهده گردید که بهترین عملکرد به مقدار ۳۹۷۵ کیلوگرم در هکتار از غلظت نه میلی مولار سیلیکون به دست آمد که ۱۹/۶۱ درصد افزایش را نسبت به شاهد نشان داد (شکل ۲B). محققان، کاهش زیست توده در گیاه رازیانه (*Foeniculum vulgare* L.) در شرایط تنش خشکی را گزارش کردند (Jamshidi, Ghalavand, Sefidkon & Goltaph, 2013). در بررسی برهم کنش رژیم آبیاری × سیلیکون و همچنین برهم کنش رژیم آبیاری × نیتروژن در گیاه تریتیکاله (*Triticale* sp) مشخص شد که تنش آبی سبب کاهش عملکرد زیست توده در گیاه تریتیکاله شده، اما این کاهش در شرایط مصرف سیلیکون در مقایسه با عدم مصرف سیلیکون کمتر بود. این در حالی است که بیشترین عملکرد زیست توده در شرایط بدون تنش خشکی و مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (به میزان ۱۷۲۲۸ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد (Barati & Bijanzadeh, 2020). افزایش زیست توده گیاه در حضور سیلیکون، از طریق افزایش ظرفیت فتوسنتزی و همچنین توانایی مکانیکی ساقه و برگ برای جذب بهتر نور گزارش شده است (Loggini, Scartazza, Brugnoli & Navari-Izzo, 1999) در تحقیقی دیگر، کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در سیاه دانه سبب افزایش زیست توده گردید (Abdul-Zadeh, Vali-Pour Chahardeh Cheriki, & Qadrifar, 2017). به نظر می رسد که کاربرد نیتروژن با افزایش سطح برگ و سطح سبز، افزایش فتوسنتز و تولید آسیمیلات بیشتر سبب افزایش تولید ماده خشک و زیست توده شده است.

استفاده از سیلیکون باعث افزایش پایداری غشاء سلولی می شود. در اثر محلول پاشی سیلیکون، افزایش شاخص سطح برگ، دوام سطح برگ و افزایش جذب عناصر سبب بهبود فتوسنتز می گردد که در نهایت به افزایش تعداد دانه، افزایش وزن هزار دانه و عملکرد دانه منتهی می شود (Epstein, 1994).

عملکرد بیولوژیک (زیست توده)

در هر دو شرایط تنش و عدم تنش خشکی، اثرهای ساده نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون بر زیست توده سیاه دانه معنی دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون (شکل ۲) نشان داد که بدون مصرف سیلیکون، بالاترین زیست توده در شرایط رطوبتی نرمال (۴۵۲۸ کیلوگرم در هکتار) و تنش خشکی (۳۳۰۸ کیلوگرم در هکتار) با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره به دست آمد. در شرایط مطلوب رطوبتی و عدم مصرف نیتروژن، تفاوت معنی داری بین مصرف و عدم مصرف سیلیکون مشاهده نشد. اما با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره در شرایط مطلوب رطوبتی، بالاترین عملکرد زیست توده به میزان ۴۹۱۷ کیلوگرم در هکتار از محلول پاشی شش میلی مولار سیلیکون (بدون تفاوت معنی دار با محلول پاشی نه میلی مولار سیلیکون) به دست آمد که نشان دهنده تأثیر مثبت مصرف اوره بر این صفت است (شکل ۲A). مقایسه میانگین همچنین نشان می دهد که در شرایط تنش خشکی و عدم مصرف نیتروژن، محلول پاشی شش میلی مولار سیلیکون به میزان ۳۰۵۹ کیلوگرم در هکتار تفاوت معنی داری با دو سطح عدم کاربرد (شاهد) و ۳ میلی مولار سیلیکون داشت که این شرایط نشان می دهد افزایش غلظت سیلیکون توانسته شرایط تنش رطوبتی را تا حدی



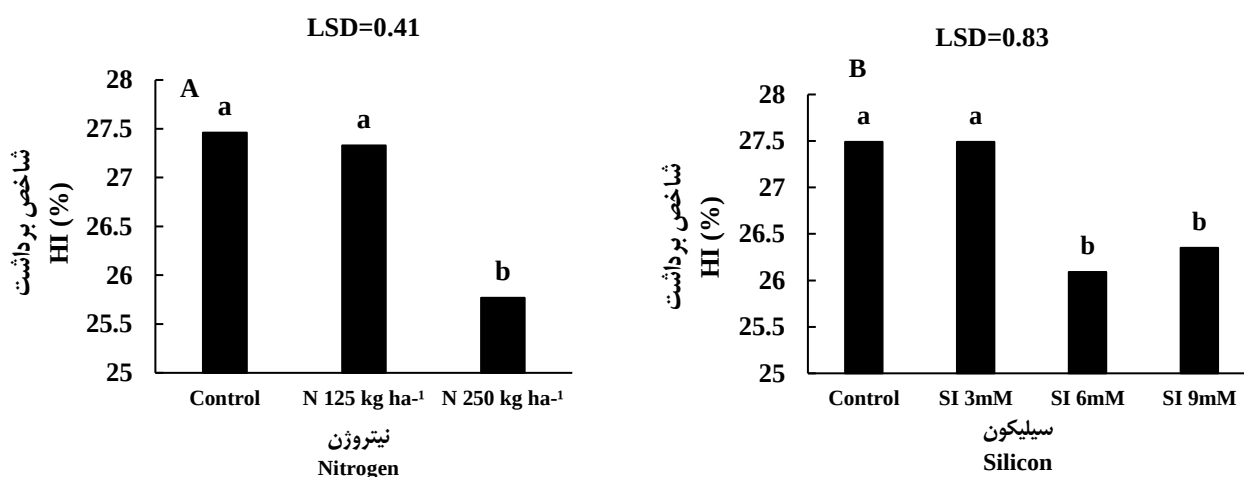
شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر زیست توده سیاه دانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)

Figure 2- Means comparison of nitrogen concentrations × silicon interaction in terms of the biomass under normal moisture (A) conditions and drought stress (B), (LSD 0.05)

شاخص برداشت

در تجزیه مرکب مشخص شد که در شرایط نرمال رطوبتی، به غیر از اثر سال، سایر اثرهای ساده و متقابل بر شاخص برداشت معنی دار نبودند (جدول ۳). در شرایط تنش خشکی، اثرهای ساده سال، نیتروژن و سیلیکون از نظر شاخص برداشت معنی دار شدند ($p \leq 0.01$)، اما اثرهای متقابل آن‌ها معنی دار نبودند. مقایسه میانگین سطوح نیتروژن در شرایط تنش خشکی نشان داد که ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار از شاخص برداشت پایین تری در مقایسه با ۱۲۵ کیلوگرم اوره و همچنین شاهد (بدون کود نیتروژن) برخوردار بود (شکل ۳A). مقایسه میانگین سطوح سیلیکون از نظر شاخص برداشت دانه در شرایط تنش خشکی نشان داد که بالاترین شاخص برداشت مربوط به شاهد (بدون سیلیکون) و سیلیکون سه میلی مولار بود (شکل ۳B). این نتیجه نشان می‌دهد که تأثیر سیلیکون بر بخش رویشی گیاه بیشتر از بخش زایشی (دانه) بوده است. شاخص برداشت، معیاری از کارایی توزیع

مواد فتوسنتزی به دانه است که نسبت بین عملکرد اقتصادی به عملکرد بیولوژیک را بیان می‌کند. طی بررسی عبدالزاده و همکاران (Abdul-Zadeh et al., 2017)، شاخص برداشت در گیاه سیاه دانه با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره معنی دار شد. قمرنیا و همکاران (Ghamarnia et al., 2010) کاهش شاخص برداشت در گیاه سیاه دانه را در شرایط تنش رطوبتی گزارش کردند. باین حال، یافته‌های پژوهش رضاییگی و همکاران (Rezabeigi, Bijanzadeh, Behpour, & Barati, 2020) روی گندم (*Triticum aestivum*) نشان داد که کاربرد سه میلی مولار سیلیکون، شاخص برداشت را به میزان ۱۲/۲ درصد افزایش داد. محمدی و همکاران (Mohammadi, Sepehri, Abutalebian, & Hamzai, 2011) همچنین گزارش کردند که استفاده از سیلیکون در گندم سبب افزایش شاخص برداشت گردید.



شکل ۳- مقایسه میانگین اثرات ساده نیتروژن (A) و سیلیکون (B) از نظر شاخص برداشت سیاه دانه در شرایط تنش خشکی

Figure 3- Means comparison of simple effects of nitrogen (A) and silicon (B) in nigella in terms of harvest index under drought stress. (LSD 0.05)

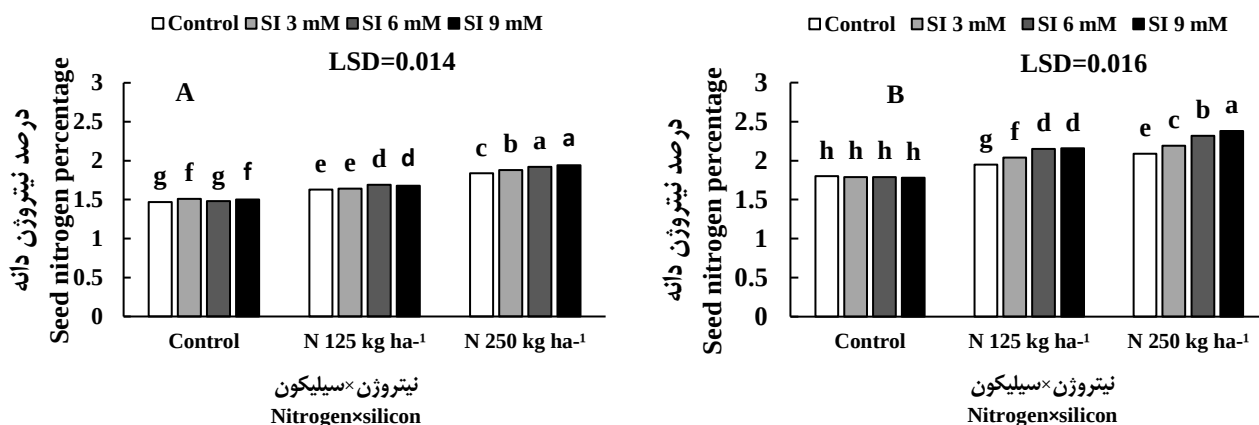
درصد نیتروژن دانه

تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرات ساده نیتروژن و سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون بر درصد نیتروژن دانه در شرایط مطلوب رطوبتی و همچنین در شرایط تنش خشکی معنی دار بودند (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون (شکل ۴، A و B) نشان داد که بدون مصرف سیلیکون، بالاترین درصد نیتروژن دانه در شرایط رطوبتی نرمال (۱/۸۴ درصد) و تنش خشکی (۲/۰۹ درصد) با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره به دست آمد. بدون مصرف کود نیتروژن هم در شرایط نرمال رطوبتی و

هم در شرایط تنش خشکی، محلول پاشی سیلیکون تأثیر چندانی در افزایش درصد نیتروژن دانه نداشت، اما با افزایش مصرف کود نیتروژن، تأثیر محلول پاشی سیلیکون بیشتر شد. مقایسه میانگین نشان داد که در شرایط مطلوب رطوبتی، بیشترین درصد نیتروژن دانه (به ترتیب با ۱/۹۲ و ۱/۹۴ درصد) در شرایط کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، از غلظت‌های شش و نه میلی مولار سیلیکون به دست آمد که با سایر تیمارها تفاوت معنی دار داشتند (شکل ۴A). در شرایط تنش رطوبتی، با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره، بالاترین درصد نیتروژن دانه به میزان ۲/۳۸ درصد از محلول پاشی نه میلی مولار سیلیکون به دست آمد که با سایر تیمارها تفاوت معنی داری داشت

خاک را افزایش می‌دهد و از این طریق بر مراحل فنولوژی گیاه اثر می‌گذارد (Lin, Sattelmacher, Kutzmutz, Mühling, & Dittert, 2004). ظرفیت جذب نیتروژن و همچنین فعالیت آنزیم‌های تثبیت‌کننده نیتروژن در شرایط تنش خشکی کاهش می‌یابد (Araya, Habtu, Hadgu, Kebede, & Dejene, 2010). در تحقیق انجام‌شده توسط دیرن (Deren, 1997)، مشخص گردید که میزان نیتروژن در بافت‌های مختلف گیاه با مصرف سیلیکون افزایش یافت.

(شکل ۴B). یکی از عوامل کاهش عملکرد در شرایط تنش خشکی، عدم دسترسی کافی به نیتروژن است (Bista, Heckathorn, Jayawardena, Mishra, & Boldt, 2018). نیتروژن به دلیل نقش مهمی که در ساختار پروتئین‌ها، آنزیم‌ها، کوآنزیم‌ها و اسیدهای نوکلئیک دارد از اهمیت خاصی در ساختار گیاه برخوردار است (Hassegawa et al., 2008). نیتروژن از طریق تغییر در ترکیبات شیمیایی گیاه و خاک، توانایی جذب مواد آلی و غیرآلی از محلول



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر درصد نیتروژن دانه سیاهدانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 4- Means comparison of nitrogen x silicon interaction in terms of the seed nitrogen percentage in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05)

سیلیکون تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۵A).

در شرایط تنش خشکی و عدم مصرف نیتروژن، با افزایش غلظت سیلیکون، تعداد دانه در کپسول افزایش یافت، به طوری که بیشترین تعداد کپسول در بوته از محلول‌پاشی ۸ میلی‌مولار سیلیکون به دست آمد که با بقیه سطوح سیلیکون به جز شش میلی‌مولار تفاوت معنی‌دار داشت. با مصرف نیتروژن در شرایط تنش رطوبتی، روند افزایشی در تعداد کپسول در بوته مشاهده شد و بیشترین تعداد کپسول در بوته از محلول‌پاشی ۸ میلی‌مولار سیلیکون (۲۴/۸۱ کپسول در بوته) به دست آمد که با سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۵B). تنش خشکی از طریق تغییر در ویژگی‌های فیزیولوژیکی از جمله کاهش ظرفیت فتوسنتزی، بسته شدن روزنه، کاهش مقدار کربوهیدرات و اختلال در تقسیم ماده خشک به اندام‌های زایشی و رویشی سبب کاهش تعداد کپسول در بوته در گیاه سیاهدانه و در نهایت عملکرد می‌شود (Ozer, Coban, Sahin, & Ors, 2020). رانا و همکاران (Rana, Singh, Naruka, & Rathore, 2012) نیز افزایش تعداد کپسول در بوته در گیاه سیاهدانه با کاربرد نیتروژن را گزارش کردند. این در حالی است که در تحقیق سلطانی و همکاران (Soltanieh, Talei, & Nejatkah, 2023)، کاربرد نیتروژن سبب کاهش تعداد کپسول در بوته شد که با نتایج این پژوهش مغایرت داشت.

تعداد کپسول در بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که هم در شرایط نرمال رطوبتی و هم در شرایط تنش خشکی، اثرات ساده سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر تعداد کپسول در بوته معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون (شکل ۵) در صفت تعداد کپسول در دانه نشان داد که در شرایط نرمال رطوبتی و عدم مصرف سیلیکون، بیشترین تعداد کپسول در بوته از مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره (۳۳/۶ کپسول در بوته) و در شرایط تنش خشکی از کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار کود اوره (۲۱/۱۶ کپسول در بوته) به دست آمد. این نتیجه نشان داد که مصرف کود اوره بیشتر از ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار سبب کاهش در این صفت گردید، اما با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به همراه محلول‌پاشی ۸ میلی‌مولار سیلیکون حداکثر تعداد دانه در کپسول (۲۴/۸۱) به دست آمد. در شرایط مطلوب و عدم مصرف نیتروژن، بین مصرف و عدم مصرف سیلیکون تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. مقایسه میانگین همچنین در شرایط مطلوب و مصرف نیتروژن نشان داد که بیشترین تعداد کپسول در بوته در شرایط کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، از غلظت شش میلی‌مولار سیلیکون (۳۵/۵ کپسول در بوته) به دست آمد که با سایر تیمارها به جز غلظت ۸ میلی‌مولار

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب اثرات سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل آن‌ها از نظر تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، وزن هزار دانه و تعداد دانه در گیاه در شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی

Table 4- Combined analysis of variance for the effects of year, nitrogen, silicon and their interactions in terms of the number of capsules per plant, the number of seeds per capsule, 1000-grain weight, and the number of grains per plant under normal moisture and drought stress

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares							
		تنش خشکی Drought stress				عدم تنش خشکی No drought stress			
		تعداد کپسول در بوته Capsules per plant	تعداد دانه در کپسول Grains per capsule	وزن هزار دانه 1000-grain weight	تعداد دانه در گیاه grains per plant	تعداد کپسول در بوته Capsules per plant	تعداد دانه در کپسول Grains per capsule	وزن هزار دانه 1000-grain weight	تعداد دانه در گیاه Grains per plant
سال (Y) Year	1	165.31*	760.50**	0.562**	2039896**	1202.95**	1760.22**	1.55**	1463138**
بلوک (سال) Block (Y)	4	8.50	3.77	0.008	36427	1.72	9.55	0.24	24595
نیتروژن Nitrogen (N)	2	93.63**	416.09*	0.083*	1104987**	504.70*	1053.43*	0.348*	6767143*
Y×N	2	0.144 ^{ns}	15.87 ^{ns}	0.001 ^{ns}	3475 ^{ns}	13.60 ^{ns}	126.09*	0.008 ^{ns}	263553 ^{ns}
خطا ۱ Error 1	8	3.16	10.23	0.008	26147	4.49	25.66	0.011	79406
سیلیکون Silicon (S)	3	22.32**	77.09**	0.034**	255049**	13.40**	27.37**	0.006 ^{ns}	198080*
Y×S	3	0.482 ^{ns}	0.056 ^{ns}	0.001 ^{ns}	5137 ^{ns}	0.40 ^{ns}	0.63 ^{ns}	0.001 ^{ns}	12509 ^{ns}
N×S	6	3.43**	5.46**	0.005**	28603**	4.80*	4.80*	0.002 ^{ns}	46497*
N×S×Y	6	0.119 ^{ns}	0.319 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	1226 ^{ns}	0.65 ^{ns}	0.94 ^{ns}	0.001 ^{ns}	5738 ^{ns}
خطا ۲ Error 2	36	2.88	8.56	0.006	20233	6.12	19.23	0.010	50615
ضریب تغییرات CV (%)		7.8	4.5	4.4	10.0	8.1	6.2	5.2	10.2

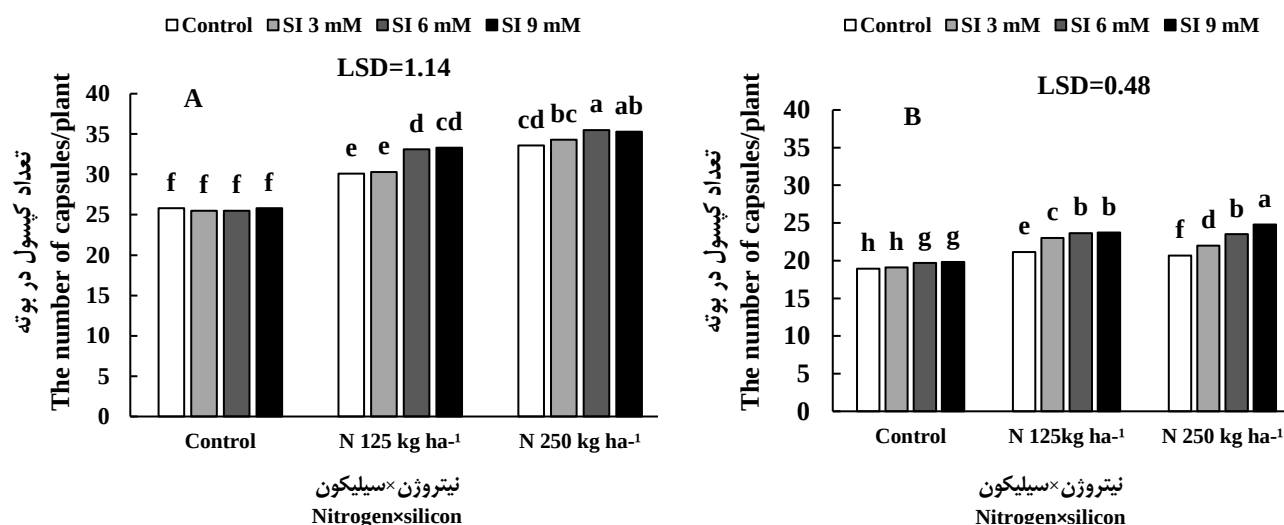
ns, * و **: به ترتیب بدون اختلاف معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns: no significant; **, *: Significant at 1 and 5% probability levels, respectively.

تعداد دانه در کپسول

تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرات ساده سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون بر تعداد دانه در کپسول در شرایط مطلوب رطوبتی و همچنین در شرایط تنش خشکی معنی‌دار بودند (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون نشان داد که در شرایط عدم حضور نیتروژن، افزایش غلظت سیلیکون در شرایط مطلوب رطوبتی نتوانست بر تعداد دانه در کپسول مؤثر باشد. با کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم اوره در هکتار، روند افزایشی در تعداد دانه در کپسول مشاهده شد. بهترین تیمار در شرایط مطلوب رطوبتی از کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار × محلول پاشی سیلیکون ۲۵۰ میلی‌مولار به تعداد ۷۷/۸ دانه در کپسول به دست آمد که افزایش

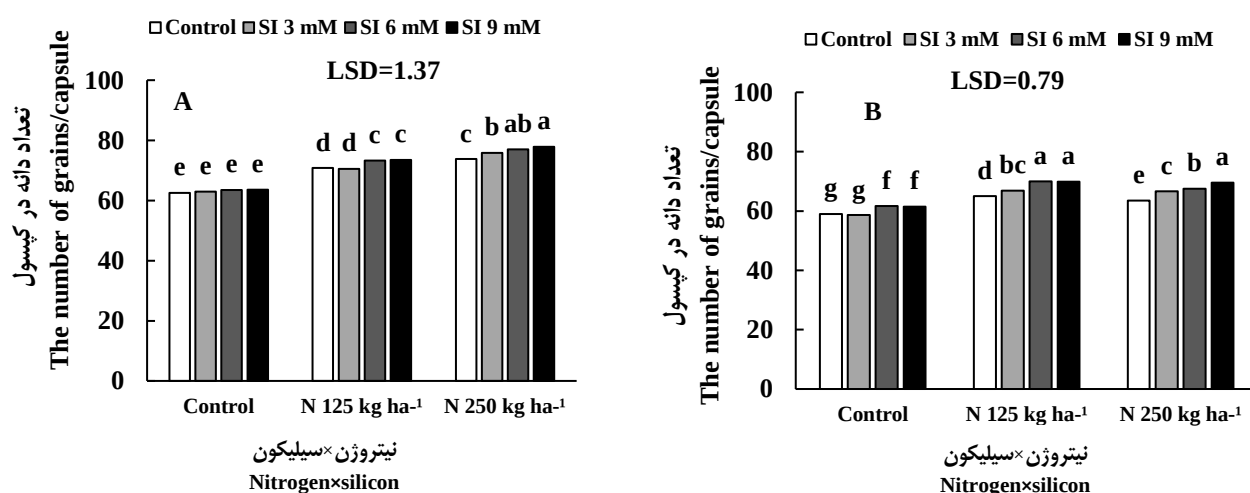
۲۴/۴۸ درصدی را نسبت به شاهد (بدون نیتروژن و سیلیکون) نشان داد (شکل ۶A). در مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون در شرایط تنش خشکی مشخص شد که در کلیه سطوح نیتروژن مورد مطالعه افزایش غلظت سیلیکون، روند افزایشی در تعداد دانه در کپسول را نشان داد. در شرایط تنش خشکی، بیشترین تعداد دانه در کپسول از تیمار اثر متقابل ۱۲۵ کیلوگرم اوره × شش میلی‌مولار سیلیکون با ۷۰/۰۰ دانه در کپسول (افزایش ۱۸/۶۴ درصدی نسبت به شاهد) به دست آمد که با تیمارهای ۱۲۵ کیلوگرم اوره × محلول پاشی سیلیکون ۲۵۰ میلی‌مولار و همچنین اثر متقابل ۲۵۰ کیلوگرم اوره × محلول پاشی سیلیکون ۲۵۰ میلی‌مولار (به ترتیب با ۶۹/۸۳ و ۶۹/۵۰ دانه در کپسول) تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۶B).



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر تعداد کپسول در بوته سیاهدانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 5- Means comparison of nitrogen × silicon interaction in terms of the capsules per plant in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05)

(Ali, 2019). گزارش شده است که افزایش تعداد دانه در کپسول در گیاه سیاهدانه (Rana et al., 2012) و جو بهاره (Hordeum vulgare L., Tariq Alislami, Zarghami, MashhadiAkbar) ناشی از افزایش در محتوای کلروفیل، افزایش سرعت رشد محصول و شاخص سطح برگ بود. در تحقیق رضاییگی و همکاران (Rezabeigi et al., 2020) مشخص شد که تعداد دانه در سنبله گندم با کاربرد دو میلی-مولار برگی سیلیکون، ۲۵/۴ درصد نسبت به زمان عدم مصرف سیلیکون افزایش یافت.

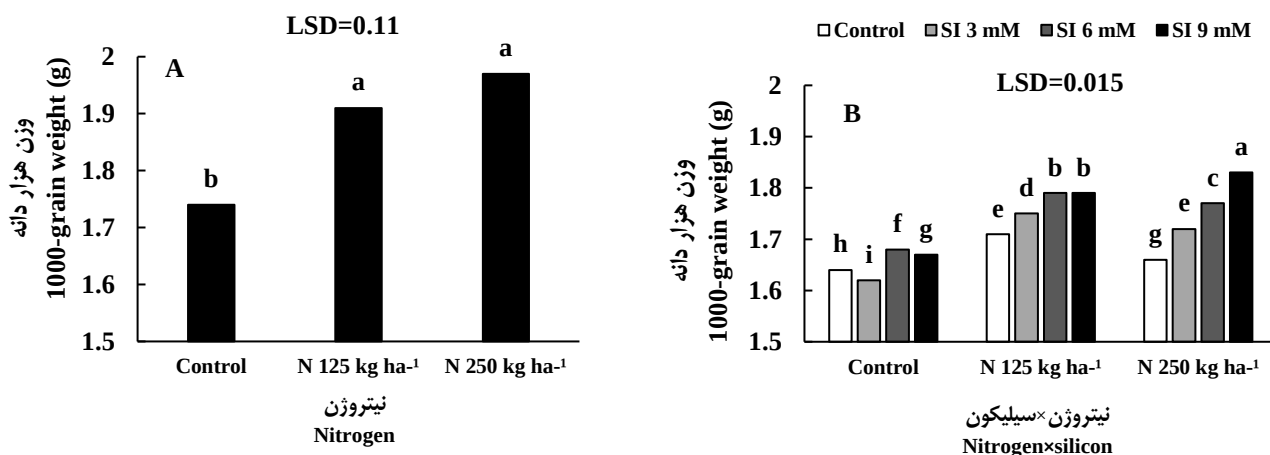
براساس نتایج حاصل از پژوهشی که توسط عبدالزاده و همکاران (Abdul-Zadeh et al., 2017) روی سیاهدانه انجام شد، مشخص گردید که کاربرد کود نیتروژن بر صفت تعداد دانه در کپسول اثر معنی‌دار داشت. دیتا و همکاران (Datta, Rai, & Ashutosh, 2022) در پژوهشی که روی سیاهدانه انجام دادند، بیان کردند که با مصرف ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، بیشترین تعداد دانه در کپسول در مقایسه با شاهد (عدم مصرف نیتروژن) به دست آمد که با نتایج تحقیق حاضر در رابطه با افزایش تعداد دانه در کپسول با افزایش میزان نیتروژن مطابقت داشت (El-Leithy, Abdallah, &)



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر تعداد دانه در کپسول سیاهدانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 6- Means comparison of nitrogen × silicon interaction in terms of the number of grains per capsule in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05)

وزن هزار دانه

مطابق با نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها، در شرایط رطوبتی نرمال فقط سال و نیتروژن بر وزن هزار دانه اثر معنی‌دار داشتند. در شرایط تنش خشکی، اثرهای سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون بر وزن هزار دانه معنی‌دار بودند (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر ساده نیتروژن در شرایط نرمال رطوبتی نشان داد که وزن هزار دانه با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن ۱۳/۲۱ درصد افزایش نسبت به شاهد (عدم مصرف نیتروژن) داشت، اما تفاوت معنی‌داری با تیمار ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن نداشت (شکل ۷A). در شرایط تنش خشکی، مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون نشان داد که بدون مصرف سیلیکون، افزودن کود نیتروژن سبب افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه شد. باین‌حال، کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم اوره از وزن هزار دانه بالاتری نسبت به ۲۵۰ کیلوگرم اوره برخوردار بود. هنگامی که ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار اوره مصرف شد، غلظت‌های سه، شش و نه میلی‌مولار سیلیکون، وزن هزار دانه را افزایش دادند، هر چند که غلظت‌های شش و نه میلی‌مولار تفاوت آماری معنی‌دار با هم نداشتند. با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم اوره، غلظت نه میلی‌مولار سیلیکون، بالاترین وزن هزار دانه (۱/۸۳ گرم) را تولید نمود (شکل ۷B). تنش خشکی با سرعت بخشیدن به پیری برگ،



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر ساده نیتروژن از نظر وزن هزار دانه سیاه‌دانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون از نظر وزن هزار دانه سیاه‌دانه در شرایط تنش خشکی (B)

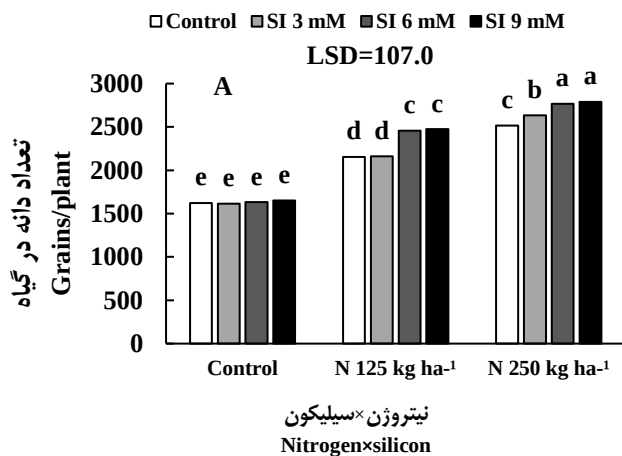
Figure 7- Means comparison of nitrogen $\times$ silicon interaction in nigella in terms of the 1000-grain weight under drought stress (B) and Means comparison of simple effect of nitrogen in terms of the 1000-grain weight in nigella under normal moisture (A), (LSD 0.05)

شرایط نرمال رطوبتی، مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون نشان داد هنگامی که از سیلیکون استفاده نشد، افزودن کود نیتروژن سبب افزایش معنی‌دار تعداد دانه در گیاه شد. در نبود نیتروژن، بین غلظت‌های سیلیکون و شاهد تفاوت آماری معنی‌دار مشاهده نگردید.

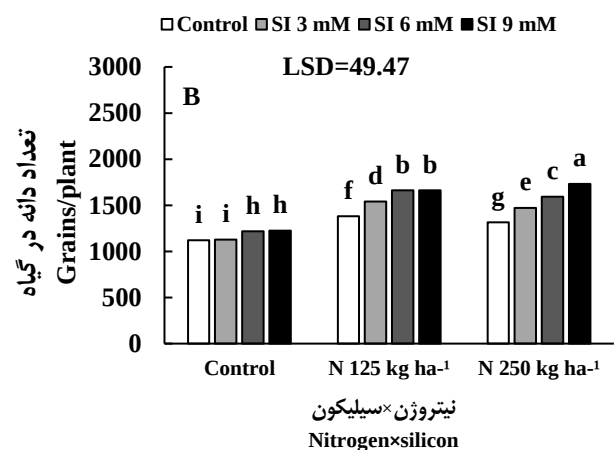
تعداد دانه در گیاه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تعداد دانه در گیاه در شرایط تنش و عدم تنش خشکی، تحت تأثیر اثرات ساده سال، سیلیکون و نیتروژن و اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون معنی‌دار شد (جدول ۴). در

سیلیکون تفاوت معنی‌دار وجود داشت و بیشترین تعداد دانه در گیاه با محلول پاشی سیلیکون نه میلی‌مولار (به تعداد ۱۷۳۱ دانه) به دست آمد که نسبت به شاهد مربوطه (۲۵۰ کیلوگرم اوره × بدون مصرف سیلیکون) ۳۱/۶ درصد افزایش یافت (شکل ۸B). اثرات ناشی از تنش خشکی در مرحله گل‌دهی، گرده‌افشانی و پر شدن دانه سبب کاهش تعداد دانه در کپسول و تعداد دانه در گیاه می‌گردد و این روند کاهش مداوم در تعداد دانه در گیاه، با افزایش شدت تنش خشکی سبب کاهش بیشتر تعداد دانه در کپسول می‌شود (Ozer et al., 2020).



بیشترین تعداد دانه در گیاه از تیمار اثر متقابل ۲۵۰ کیلوگرم اوره × سیلیکون شش میلی‌مولار و همچنین اثر متقابل ۲۵۰ کیلوگرم اوره × سیلیکون نه میلی‌مولار (به ترتیب به تعداد ۲۷۶۷ و ۲۷۸۹ دانه) به دست آمد (شکل ۸A). در شرایط تنش خشکی، سیلیکون سبب افزایش تعداد دانه در گیاه شد. به هنگام عدم کاربرد نیتروژن و همچنین ۱۲۵ کیلوگرم اوره، غلظت‌های شش و نه میلی‌مولار از تعداد دانه در بوته بیشتری برخوردار بودند، هر چند نسبت به هم تفاوت آماری معنی‌دار نداشتند. با کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم اوره، بین غلظت‌های



شکل ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر تعداد دانه در گیاه سیاه‌دانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 8- Means comparison of nitrogen×silicon interaction in terms of the number of grains per capsule in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05).

تحقیق حاضر مطابقت داشت. در گیاه نرگس (*Narsicuss tazetta*)، با افزایش شدت تنش خشکی، فاصله زمانی بین کاشت تا گل‌دهی افزایش یافت و بیشترین تعداد روز تا گل‌دهی در تنش خشکی ۳۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد (Naseri, Moghadam, Bayat, Aminifard, & Moradinezhad, 2019).

روز تا رسیدگی فیزیولوژیک دانه

در تجزیه مرکب داده‌های مربوط به صفت روز تا رسیدگی فیزیولوژیک مشخص شد که در شرایط نرمال رطوبتی، اثرهای ساده نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون معنی‌دار شد. در شرایط تنش خشکی، علاوه بر اثرات ذکر شده، اثر سال نیز معنی‌دار شد (جدول ۵). در شرایط مطلوب رطوبتی و تنش خشکی، مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون نشان داد که بدون مصرف سیلیکون، بیشترین تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک (به ترتیب معادل ۱۰۶/۶ و ۹۴/۱۶ روز تا رسیدگی فیزیولوژیک) با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به دست آمد (شکل ۱۰، A و B).

روز تا گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر نیتروژن روی صفت روز تا گل‌دهی در هر دو شرایط تنش و عدم تنش رطوبتی معنی‌دار (p ≤ ۰/۰۵) شد، اما اثر سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون معنی‌دار نبود (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر ساده نیتروژن در شرایط نرمال رطوبتی نشان داد که کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن سبب افزایش تعداد روز تا گل‌دهی (۶۸ روز) شد که با شاهد (عدم مصرف نیتروژن) تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۹A). در شرایط تنش خشکی، بین تیمارهای ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (۶۲/۰۴ روز تا گل‌دهی) با شاهد تفاوت معنی‌دار وجود داشت (شکل ۹B). با افزایش مصرف کود نیتروژن در مرحله گل‌دهی، سرعت پیری برگ کاهش پیدا می‌کند و باعث افزایش انتقال مجدد مواد فتوسنتزی، افزایش سرعت پر شدن دانه و در نهایت عملکرد دانه می‌گردد (Luo, Li, Mo, 2021). براساس تحقیقی که توسط سرداری و همکاران (Sardari, Asghari Zakaria, Zare, Ghafarzadeh, 2020) صورت گرفت، تعداد روز تا گل‌دهی در سیاه‌دانه تحت تنش خشکی کاهش یافت که با نتایج

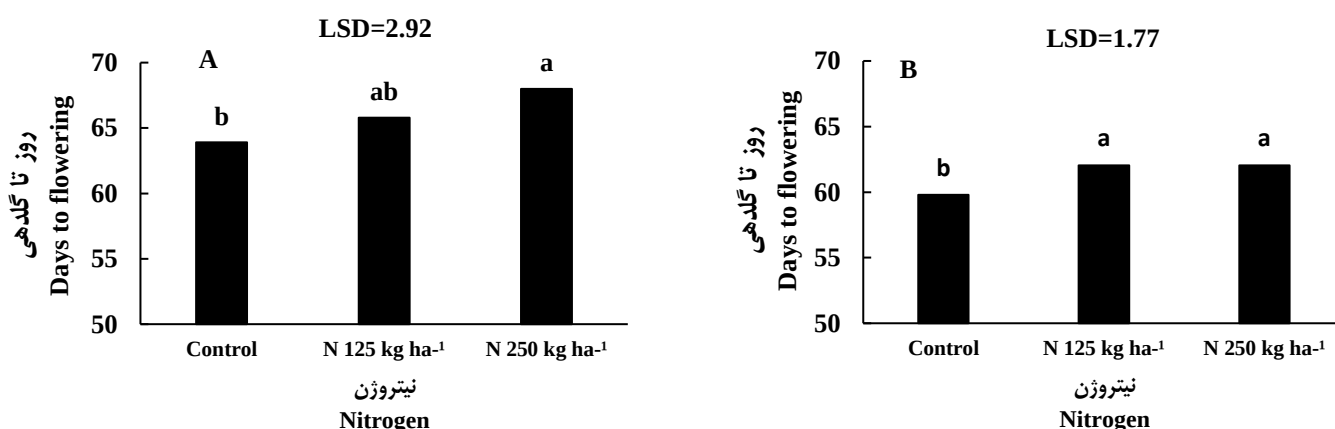
جدول ۵- تجزیه واریانس مرکب اثرات سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل آن‌ها از نظر روز تا گل‌دهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، طول دوره پر شدن دانه و سرعت پر شدن دانه در شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی

Table 5- Combined analysis of variance for the effects of year, nitrogen, silicon and their interactions in terms of days to flowering, days to physiological ripening, grain filling period and grain filling rate under normal moisture and drought stress

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares							
		تنش خشکی Drought stress				عدم تنش خشکی No drought stress			
		روز تا گل‌دهی Days to flowering	روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to physiological ripening	طول دوره پر شدن دانه Grain filling period	سرعت پر شدن دانه Grain filling rate	روز تا گل‌دهی Days to flowering	روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to physiological ripening	طول دوره پر شدن دانه Grain filling period	سرعت پر شدن دانه Grain filling rate
سال (Y) Year	1	11.68**	80.22 ^{ns}	30.68**	8982.20**	91.12**	122.72**	6.12 ^{ns}	62502.9**
بلوک (سال) Block (Y)	4	23.81	29.88	1.18	98.45	2.33	0.61	1.40	183.5
نیتروژن Nitrogen (N)	2	40.50*	218.38*	77.38*	2666.86**	104.29*	753.87**	302.59*	12815.7*
Y×N	2	2.05 ^{ns}	7.72 ^{ns}	2.38*	22.32 ^{ns}	5.54 ^{ns}	7.76 ^{ns}	18.04*	449.8 ^{ns}
خطا ۱ Error 1	8	3.38	5.97	0.51	79.44	2.12	8.13	3.59	159.5
سیلیکون Silicon (S)	3	1.34 ^{ns}	26.22**	16.60*		3.01 ^{ns}	21.37*	10.49 ^{ns}	262.5**
Y×S	3	0.45 ^{ns}	0.66 ^{ns}	0.79 ^{ns}	18.60 ^{ns}	0.60 ^{ns}	0.98 ^{ns}	1.68 ^{ns}	6.7 ^{ns}
N×S	6	1.61 ^{ns}	7.22*	2.75	63.88**	1.29 ^{ns}	8.02*	3.80**	90.6*
N×S×Y	6	0.61 ^{ns}	1.11 ^{ns}	0.54 ^{ns}	2.62 ^{ns}	1.46 ^{ns}	2.46 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.31 ^{ns}
خطا ۲ Error 2	36	1.41	4.64	0.38	64.88	1.84	5.95	1.63	96.4
ضریب تغییرات CV (%)		1.9	2.3	1.9	10.9	2.1	2.3	3.3	9.0

ns, * و **: به ترتیب: بدون اختلاف معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

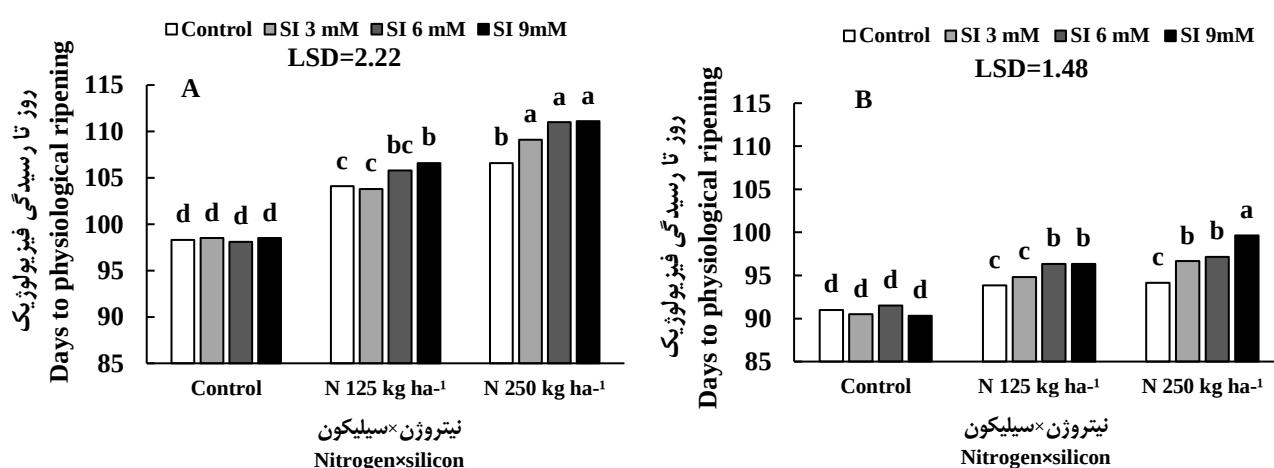
ns: no significant; **, *: Significant at 1 and 5% probability levels, respectively.



شکل ۹- مقایسه میانگین اثر ساده نیتروژن از نظر تعداد روز از سبز شدن گیاهچه تا گل‌دهی سیاهدانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 9- Means comparison of simple effect of nitrogen in terms of days to flowering under normal moisture (A) and drought stress (B) in nigella, (LSD 0.05)

شرایط تنش خشکی و مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به همراه محلول پاشی نه میلی مولار سیلیکون، تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک نسبت به شاهد سیلیکون ۵/۸ درصد افزایش یافت. در مراحل پایانی رشد، گیاه با کمبود آب مواجه می شود، بنابراین مصرف سیلیکون با تعدیل شرایط ناشی از تنش تا حدی از فرآیند اجتناب (فرار) گیاه جلوگیری کرد و مانع از کاهش طول دوره رسیدگی دانه شد. در پژوهش انجام شده روی لاین های امیدبخش جو (*Hordeum vulgare* L.) در شرایط تنش آخر فصل مشخص شد که تنش خشکی منجر به کاهش تعداد روز تا رسیدگی دانه گردید (Qhavidel et al., 2023). تنش خشکی آخر فصل، صفت تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک را در کلزای زمستانه (*Brassica napus* L.) نیز کاهش داد (Shadan, Najafi Zarini, Alizadeh, Kiani, & Ranjbar, 2023).

در شرایط عدم مصرف نیتروژن در هر دو شرایط مطلوب رطوبتی و تنش خشکی، بین تیمارهای سیلیکون تفاوت معنی داری مشاهده نشد. این در حالی است که در شرایط مطلوب رطوبتی و با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن، بیشترین تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک از محلول پاشی نه میلی مولار سیلیکون (۱۱۱/۱ روز تا رسیدگی فیزیولوژیک) حاصل شد که با تمامی تیمارها به جز تیمارهای مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و سه و شش میلی مولار سیلیکون از نظر آماری تفاوت معنی دار داشت (شکل A ۱۰). در شرایط تنش خشکی، مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به همراه محلول پاشی نه میلی مولار سیلیکون (۹۹/۶۶ روز تا رسیدگی فیزیولوژیک) تفاوت معنی داری با سایر تیمارها ایجاد کرد (شکل B ۱۰). در شرایط تنش خشکی، گیاهان به منظور فرار از شرایط تنش، سیکل زندگی خود را سریع تر تکمیل می کنند و همین امر سبب کاهش عملکرد دانه می شود. نتایج این پژوهش نشان می دهد که در



شکل ۱۰- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر تعداد روز از سبز شدن گیاهچه تا رسیدگی فیزیولوژیک در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)

Figure 10- Means comparison of nitrogen x silicon interaction in terms of days to physiological ripening under normal moisture (A) and drought stress (B) in nigella, (LSD 0.05)

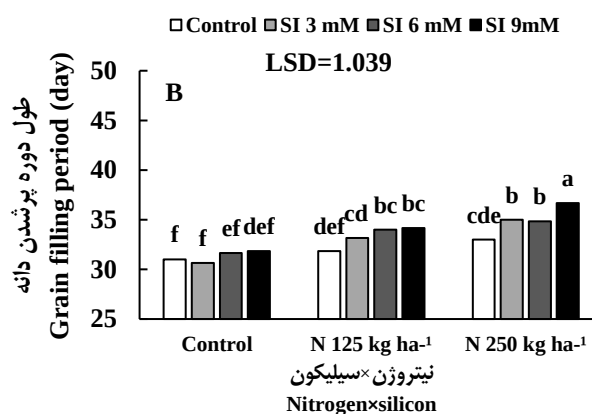
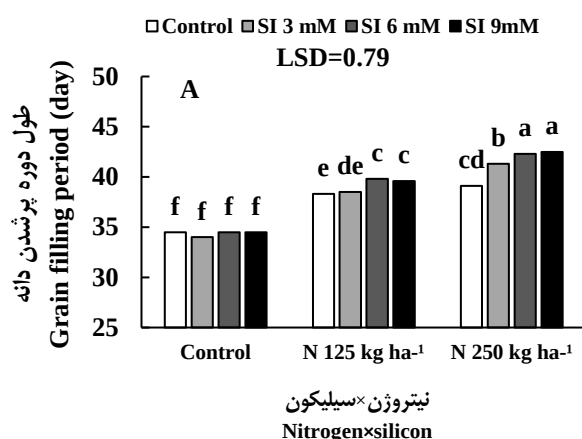
شدن دانه شد. بیشترین طول دوره پر شدن دانه در هر دو شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی، از مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار دوره (به ترتیب معادل ۴۲/۵ و ۳۶/۶۶ روز) به دست آمد (شکل A ۱۱ و B). همچنین به هنگام عدم مصرف نیتروژن، بین هیچ یک از تیمارهای سیلیکون در هردو شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی تفاوتی از نظر آماری وجود نداشت. با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در شرایط مطلوب رطوبتی، محلول پاشی نه میلی مولار سیلیکون (۴۲/۵ روز) بیشترین طول دوره پر شدن دانه را به خود اختصاص داد که با محلول پاشی شش میلی مولار سیلیکون تفاوت

طول دوره پر شدن دانه

براساس نتایج تجزیه واریانس، در شرایط تنش رطوبتی، اثرات سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون بر طول دوره پر شدن دانه معنی دار شدند. در شرایط عدم تنش خشکی، اثر نیتروژن و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون بر این صفت معنی دار شد (جدول ۵). در شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی، مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون نشان داد هنگامی که از سیلیکون استفاده نشد، افزایش نیتروژن سبب افزایش معنی دار طول دوره پر

این در شرایطی است که با افزایش مصرف نیتروژن (کاربرد ۱۴۰ درصد نیاز نیتروژن) رسیدگی فیزیولوژیک دیرتر حادث شد (Ghobadi, Ghobadi, Mondani, Jalali Honarmand & Farhadi Bansooleh, 2017). محدودیت آبی سبب کوتاه شدن طول دوره پر شدن دانه می شود و به طور معنی داری وزن دانه و مؤلفه های پر شدن دانه را کاهش می دهد (Nouraldin & Sharifi, Siadat, & Khalilzadeh, 2021). به نظر می رسد که محدودیت آبی تعادل تغذیه ای در گیاه را به هم می ریزد، بنابراین محلول پاشی عناصر ریزمغذی می تواند به سهولت این کمبود را جبران کند و با بهبود فتوسنتز و کارایی آن به واسطه افزایش طول دوره پر شدن دانه، میزان انتقال مواد به سمت دانه را بهبود بخشد (Babaei, Seyedsharifi, & Pirzad, 2018). محلول پاشی سیلیکون با افزایش شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ و هدایت روزنه ای سبب بهبود در طول دوره پر شدن دانه می گردد (Seyed Sharifi, Seifamiri, & Narimani, 2023). در بررسی انجام شده روی آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) مشخص شد که مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن از طریق افزایش طول دوره رشد و دوره مؤثر پر شدن دانه منجر به افزایش عملکرد دانه شده است (Sharifi & Abassi, 2014).

معنی دار نداشت (شکل ۱۱A). در شرایط تنش خشکی، با مصرف ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن روند افزایشی با مصرف سیلیکون مشاهده شد، با این حال بیشترین طول دوره پر شدن دانه با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن $\times$ محلول پاشی ۱ میلی مولار سیلیکون (۳۶/۶۶ روز) به دست آمد که با سایر تیمارها از نظر آماری تفاوت معنی دار نداشت (شکل ۱۱B). طول دوره پر شدن دانه، فاصله بین شروع گل دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک دانه است که می تواند تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله تنش خشکی تغییر کند. از بین صفات فنولوژیکی، طول دوره پر شدن دانه نقش مهمی در حفظ وزن دانه دارد (Qhavidel et al., 2023). طبق نتایج طباطبایی و همکاران (Tabatabaei, Shakeri, & Shahedi, 2013)، تنش خشکی منجر به تسریع در رسیدگی دانه می گردد، زیرا گیاه برای تکمیل سیکل رسیدگی خود از سازوکار فرار استفاده می کند که در نهایت کاهش عملکرد دانه را به دنبال دارد. کاهش زمان تا رسیدگی فیزیولوژیک بر طول دوره پر شدن دانه تأثیر داشته و منجر به کوتاهی این دوره می گردد که با نتایج جباری و همکاران (Jabari, Daneshian, & Aliabadi Farahani, 2011) مطابقت دارد. در ذرت (*Zea mays* L.) نتایج مشابهی به دست آمده است که نشان می دهد در شرایط کم آبی، رسیدگی فیزیولوژیک زودتر اتفاق می افتد و طول پر شدن دانه (فاصله گرده افشانی تا رسیدگی فیزیولوژیک دانه) کوتاه شده است.



شکل ۱۱- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون از نظر طول دوره پر شدن دانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 11- Means comparison of nitrogen $\times$ silicon interaction in terms grain filling period in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05)

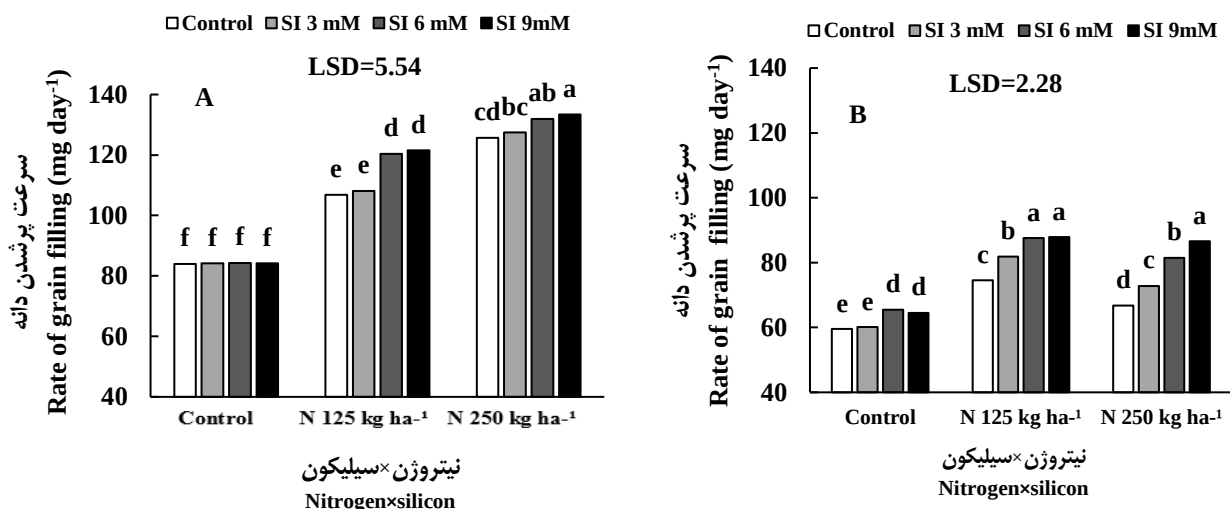
سیلیکون نشان داد که با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، بالاترین سرعت پر شدن دانه (۱۲۵/۷ میلی گرم در روز) حاصل شد (شکل ۱۲A). این در حالی است که در شرایط تنش خشکی و عدم مصرف سیلیکون، با مصرف ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن بیشترین سرعت پر شدن دانه (۷۴/۵۱ میلی گرم در روز) به دست آمد (شکل ۱۲B). در شرایط مطلوب و عدم استفاده از نیتروژن، تفاوت معنی داری

سرعت پر شدن دانه

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس داده ها در شرایط مطلوب رطوبتی و تنش خشکی، نشان دهنده اثر معنی دار سال، نیتروژن، سیلیکون و همچنین اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون بر سرعت پر شدن دانه بود (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون بر سرعت پر شدن دانه در شرایط مطلوب و عدم مصرف

همکاران (Forooghi, Biyabani, Rahemi Karizaki, & Rassam, 2017) در تحقیقی گزارش کردند که در تعیین وزن دانه، سرعت پر شدن دانه از طول دوره پر شدن دانه مهم‌تر است و با کاهش طول دوره پر شدن دانه، سرعت پر شدن دانه افزایش می‌یابد. بررسی اثر برهم‌کنش آبیاری و سطوح مختلف نیتروژن بر روی آفتابگردان نشان داد که افزایش شدت تنش خشکی، سرعت پر شدن دانه را بیشتر کرده است. این در حالی است که با افزایش مصرف نیتروژن، سرعت پر شدن دانه کاهش پیدا کرد و مصرف ۲۲۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص در مقایسه با مصرف ۱۶۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص، سرعت پر شدن دانه را به ترتیب هشت و پنج درصد کاهش داد. بنابراین نیتروژن با افزایش ساخت پروتئین، افزایش تجمع نیتروژن در دانه و افزایش طول دوره پر شدن دانه سبب کاهش سرعت پر شدن دانه گردید (Gholinezhad et al., 2012). در پژوهش انجام شده توسط دستور و همکاران (Dastoor & Asghari-Zakaria, 2014) روی گندم مشخص شد که سرعت پر شدن دانه تحت شرایط خشکی کاهش یافت، به‌طوری‌که در شرایط تنش خشکی با ۰/۹۱ میلی‌گرم در روز کمترین و در شرایط عدم تنش (۱/۳۳ میلی‌گرم در روز) بیشترین سرعت پر شدن دانه حاصل شد.

بین سطوح مختلف سیلیکون از نظر سرعت پر شدن دانه وجود نداشت، اما در شرایط تنش خشکی در عدم حضور نیتروژن، محلول‌پاشی شش و نه میلی‌مولار سیلیکون سبب افزایش سرعت پر شدن دانه شدند که با شاهد (عدم مصرف سیلیکون) و سه میلی‌مولار سیلیکون تفاوت معنی‌دار داشتند. همچنین مقایسه میانگین‌ها در شرایط مطلوب رطوبتی با مصرف نیتروژن نشان داد که مصرف ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن روند افزایشی در سرعت پر شدن دانه داشت، به‌طوری‌که بیشترین سرعت پر شدن دانه به هنگام مصرف ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن × محلول‌پاشی نه میلی‌مولار سیلیکون (۱۲۳/۴ میلی‌گرم در روز) به دست آمد. در شرایط تنش خشکی و مصرف نیتروژن، افزایش غلظت سیلیکون تا شش میلی‌مولار برای ۱۲۵ کیلوگرم نیتروژن و تا نه میلی‌مولار برای ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن سبب افزایش سرعت پر شدن دانه شد. پر شدن دانه تحت تأثیر دو عامل سرعت و طول دوره پر شدن قرار دارد (Brdar, Kraljevic, Balalic, & Kobiljski, 2008). عوامل محیطی از جمله دما، آب و نیتروژن و همچنین عوامل گیاهی (رابطه بین منبع و مخزن) بر سرعت پر شدن دانه مؤثر هستند (Samarzadeh Vazhdehfar, Paknejad, Shirani Rad, & Ebrahimi, 2022) فروغی و



شکل ۱۲- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر سرعت پر شدن دانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 12- Means comparison of nitrogen×silicon interaction in terms days to grain filling rate in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05)

کپسول)، تعداد دانه در کپسول (۷۳/۸ دانه)، تعداد دانه در گیاه (۲۵۱۴ دانه)، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک (۱۰۶/۶ روز) و سرعت پر شدن دانه (۱۲۵/۷ میلی‌گرم در روز) در این سطح از نیتروژن به دست آمد. در صورت عدم مصرف نیتروژن، سیلیکون مؤثر نبود، اما با مصرف نیتروژن، محلول‌پاشی سیلیکون شش و نه میلی‌مولار، به‌طور مشابهی مؤثر واقع شدند. به‌طور کلی، در شرایط بدون تنش خشکی، اثر متقابل

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در شرایط نرمال رطوبتی و بدون مصرف سیلیکون، کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن بر صفات مورد بررسی مناسب‌تر بود، به‌طوری‌که بیشترین مقادیر عملکرد دانه (۱۴۵۳ کیلوگرم در هکتار)، تعداد کپسول در بوته (۳۳/۶)

۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن $\times$ محلول پاشی نه میلی مولار سیلیکون به عنوان بهترین تیمار تعیین شد. به طور کلی، نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که محلول پاشی سیلیکون قادر بود که آثار منفی ناشی از کمبود آب در گیاه سیاه دانه را تا حد قابل توجهی کاهش دهد. لذا در زراعت سیاه دانه به همراه مصرف کود نیتروژن به مقدار توصیه شده، محلول پاشی سیلیکون شش میلی مولار برای شرایط بدون تنش خشکی، و محلول پاشی سیلیکون نه میلی مولار برای شرایط تنش خشکی پیشنهاد می گردد.

۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن $\times$ سیلیکون شش میلی مولار تیمار برتر مشخص شد. در شرایط تنش خشکی و بدون مصرف سیلیکون، مصرف ۱۲۵ کیلوگرم نیتروژن مناسب تر از ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و همچنین عدم مصرف نیتروژن بود، اما با مصرف سیلیکون، مصرف ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن نتایج بهتری را حاصل نمود. در شرایط مصرف ۱۲۵ کیلوگرم نیتروژن، محلول پاشی سیلیکون شش و نه میلی مولار به طور مشابهی مناسب تر بودند، اما در شرایط مصرف ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن، محلول پاشی سیلیکون نه میلی مولار بهتر عمل نمود. با توجه به نتایج به دست آمده، در شرایط تنش خشکی، مصرف

References

1. Abdul-Zadeh, A., Vali-Pour Chahardahcheriki, Y., & Ghadrifar, F. (2017). The effects of nitrogen source and amount on growth, chlorophyll, oil, and essence contents of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Journal of Plant Environmental Physiology*, 12(45), 68-80. (In Persian)
2. Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Zia-Ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, F., & Irshad, M. K. (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 119, 186-197. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.011>
3. Agarie, S., Uchida, H., Agata, W., Kubota, F., & Kaufman, P. B. (1998). Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*, 1(2), 89-95. <https://doi.org/10.1626/pps.1.89>
4. Akhondian, J., Parsa, A., & Rakhshandeh, H. (2007). The effect of *Nigella sativa* (black cumin seed) on intractable pediatric seizures. *Medical of Science Monit*, 13, 555-559.
5. Al-aghaby, K., Zhu, Z. J., Shi, Q. H. (2005). Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 27, 2101-2115. <https://doi.org/10.1081/PLN-200034641>
6. Ali, M. M. K., Hasan, M. A., & Islam, M. R. (2015). Influence of fertilizer levels on the growth and yield of black cumin (*Nigella sativa* L.). *The Agriculturists*, 13(2), 97-104.
7. Amiri, A., Bagheri, A. A., Khajeh, M., Najafabadipour, F., & Yadollahi, P. (2013). Effect of silicon foliar application on yield and antioxidant enzymes activity of safflower under deficit irrigation conditions. *Journal of Crop Production Research*, 5(4), 361-372.
8. Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K. M., Kebede, A., & Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97(11), 1838-1846. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.021>
9. Babaei, Kh., Seyedsharifi, R., & Pirzad, A. R. (2018). Effect of bio fertilizers and foliar application of nano zinc oxide on chlorophyll content, grain filling period and grain yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water limitation. *Journal of Plant Ecophysiology*, 9(31), 68-75.
10. Barati, V., & Bijanzadeh, E. (2020). Grain yield and its components of triticale as affected by silicon foliar application, nitrogen fertilizer and water stress in reproductive phase. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 18(4), 435-449. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2020.88386>
11. Bassim Atta, A. (2003). Some characteristics of nigella *Withania somnifera*. *Plant Omics Journal*, 2(2), 85-90.
12. Bista, D. R., Heckathorn, S. A., Jayawardena, D. M., Mishra, S., & Boldt, J. K. (2018). Effects of drought on nutrient uptake and the levels of nutrient-uptake proteins in roots of drought-sensitive and-tolerant grasses. *Plants*, 7(2), 28. <https://doi.org/10.3390/plants7020028>
13. Brdar, M. D., Kraljevic-Balalic, M. M., & Kobiljski, B. (2008). The parameters of grain filling and yield components in common wheat (*Triticum aestivum* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum* L. Var. Durum.). *Central European Journal of Biology*, 3(1), 75-82. <https://doi.org/10.2478/s11535-007-0050-x>
14. Dastoor, A., & Asghari-Zakaria, R. (2014). Evaluation of wheat genotypes for yield and grain-filling rate of wheat genotypes under non stress and post anthesis drought stress conditions. *Journal of Agroecology*, 6(3), 561-570. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JAG.V6I3.23874>
15. Datta, S., Rai, U., & Ashutosh, S. (2022). Effect of nitrogen and phosphorus on growth and yield of cumin black (*Nigella sativa* L.) under Terai zone of West Bengal. *Journal of Environment and Ecology*, 40(3D), 1811-1816.
16. Deren, C. W. (1997). Changes in nitrogen and phosphorus concentrations of silicon-fertilized rice grown on organic soil. *Journal of Plant Nutrition*, 20(6), 765-771. <https://doi.org/10.1080/01904169709365292>
17. El-Leithy, A. S., Abdallah, S. A., & Ali, M. A. (2019). Effect of soil application with nitrogen levels and

- potassium silicate foliar spray on growth and yield of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Sinai Journal of Applied Sciences*, 8(2), 185-198. <https://doi.org/10.21608/sinjas.2019.79096>
18. Emam, Y., Ranjbar, A. M., & Bahrani, M. J. (2007). Evaluation of yield and yield components in wheat genotypes under post-anthesis drought stress. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 11(1), 317-328.
19. Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Science*, 91, 11-17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>
20. Forooghi, A., Biyabani, A., Rahemi Karizaki, A., & Rassam, G. (2017). Relationships of phenology and physiological traits with the yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) in northern Khorasan. *Journal of Crop Ecophysiology*, 10(4), 1007-1024. (In Persian with English abstract).
21. Ghamarnia, H., Khosravy, H., & Sepehri, S. (2010). Yield and water use efficiency of (*Nigella sativa* L.) under different irrigation treatments in a semi-arid region in the West of Iran. *Journal of Medicinal Plants Research*, 4(16), 1612-1616.
22. Ghamarnia, H., Miri, E., Jafarizadeh, M., & Ghobadi, M. (2013). Determination of *Nigella sativa* L. water requirement by lysimetric method in an arid and semi-arid climate. *Scientific Journal of Agriculture*, 35(4), 75-82. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.25885952.1391.35.4.8.8>
23. Ghobadi, R., Ghobadi, M., Mondani, F., Jalali Honarmand, S., & Farhadi Bansooleh, B. (2017). Effect of irrigation and nitrogen interactions on phenologic characteristics and growth indices of seed corn. *Journal of Plant Process and Function*, 6(21), 349-368. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222727.1396.6.21.13.5>
24. Gholinezhad, E., Aynaband, A., Hassanzade Ghorthapeh, A., Noormohamadi, G., & Bernousi, I. (2012). Effects of drought stress, nitrogen amounts and plant densities on grain yield, rapidity and period of grain filing in sunflower. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 22(2), 129-143.
25. Göksoy, A. T., Demir, A. O., Turan, Z. M., & Dağüstü, N. (2004). Responses of sunflower (*Helianthus annuus* L.) to full and limited irrigation at different growth stages. *Field Crops Research*, 87(2-3), 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.11.004>
26. Gong, H. J., & Chen, K. M. (2012). The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34, 1589-1594.
27. Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S., & Zhang, C. (2005). Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*, 169(2), 313-321. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.02.023>
28. Gunes, A., Pilbeam, D. J., Inal, A., & Coban, S. (2008). Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(13-14), 1885-1903. <https://doi.org/10.1080/00103620802134651>
29. Haj Seyed Hadi, M. R., Darzi, M. T., & Riazi, G. (2016). Black cumin yield affected by irrigation and plant growth promoting bacteria. *Journal of Medicinal Plants and By-product*, 5(2), 125-133. <https://doi.org/10.22092/jmpb.2016.109388>
30. Hassegawa, R. H., Fonseca, H., Fancelli, A. L., da Silva, V. N., Schammass, E. A., Reis, T. A., & Corrêa, B. (2008). Influence of macro-and micronutrient fertilization on fungal contamination and fumonisin production in corn grains. *Food Control*, 19(1), 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2007.01.006>
31. Hayati, A., Rahimi, M. M., Kelidari, A., & Hosseini, S. M. (2021). Effects of humic acid and iron nanochelate on osmolytes content of black cumin (*Nigella sativa* L.) under drought stress conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 37(5), 809-821. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.354715.2995>
32. Heidari, M., & Jahantighi, H. (2014). Evaluate effect of water stress and different amounts of nitrogen fertilizer on seed quality of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Journal of Field Crops Research*, 11(4), 640-647. <https://doi.org/10.22067/gsc.v11i4.32892>
33. İzgi, M. N. (2020). Effects of different nitrogen dose applications on black cumin (*Nigella sativa* L.): Some vegetative parameters and oil ratio. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG)*, 37(1), 38-43.
34. Jabari, H., Daneshian, J., & Aliabadi Farahani, H. (2011). The use of productivity effort, quantity and quality features for recognizing of drought tolerance in sunflower hybrids. *Journal of Crop Ecophysiology*, 3(1), 9-23. (In Persian)
35. Jamshidi, E., Ghalavand, A., Sefidkon, F., & Goltaph, E. (2013). Effects of different nutrition systems on quantity characteristics of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill) under different irrigation regimes. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*, 97, 47-54. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2012.3048>
36. Kamenidou, S., Cavins, T. J., & Marek, S. (2008). Silicon supplements affect horticultural traits of greenhouse-produced ornamental sunflowers. *HortScience*, 43(1), 236-239. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.1.236>
37. Kaya, C., Tuna, L., & Higgs, D. (2006). Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 29(8), 1469-1480. <https://doi.org/10.1080/01904160600837238>
38. Khodabandehloo, S., Sepehri, A., Ahmadvand, G., & Keshtkar, A. H. (2014). The effect of silicon application on

- grain yield of millet and water use efficiency under drought stress. *Journal of Crops Improvement*, 16(2), 399-416. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jci.2014.53051>
39. Kiami, H., Khalesro, S., Sharifi, Z., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2024). Morphological and physiological responses of black cumin to biochar and different irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 17(1), 73-86. <https://doi.org/10.22077/escs.2023.5430.2148>
40. Kleiber, T., Calomme, M., & Borowiak, K. (2015). The effect of choline-stabilized orthosilicic acid on microelements and silicon concentration, photosynthesis activity and yield of tomato grown under Mn stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 96, 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.07.033>
41. Lin, S., Sattelmacher, B., Kutzmutz, E., Mühling, K. H., & Dittert, K. (2004). Influence of nitrogen nutrition on tuber quality of potato with special reference to the pathway of nitrate transport into tubers. *Journal of Plant Nutrition*, 27(2), 341-350. <https://doi.org/10.1081/PLN-120027658>
42. Liu, P., Yin, L., Deng, X., Wang, S., Tanaka, K., & Zhang, S. (2014). Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *Journal of Experimental Botany*, 65(17), 4747-4756. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru220>
43. Loggini, B., Scartazza, A., Brugnoli, E., & Navari-Izzo, F. (1999). Antioxidative defense system, pigment composition, and photosynthetic efficiency in two wheat cultivars subjected to drought. *Plant Physiology*, 119(3), 1091-1100. <https://doi.org/10.1104/pp.119.3.1091>
44. Ma, J. F., & Takahashi, E. (2002). Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan. Elsevier Science. 275 pp.
45. Mahdavi, F., Esmaili, M. A., Falah, E. Y., & Pirdashti, H. A. (2006). Study of morphological characteristics, physiological indices, grain yield and its components in rice (*Oryza sativa* L.) landraces and improved cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 7(4), 280-297. (In Persian with English abstract).
46. Majnoon Hosseini, N., & Davazdeh Imami, S. (2013). Cultivation and Production of some Medicinal and Spice Crops. Tehran University Press, Tehran, Iran. 310 pp.
47. Ming, D. F., Pei, Z. F., Naeem, M. S., Gong, H. J., & Zhou, W. J. (2012). Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 198(1), 14-26. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00486.x>
48. Misra, A., & Srivastava, N.K. (2000). Influence of water stress on Japanese mint. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 7(1), 51-58. https://doi.org/10.1300/J044v07n01_07
49. Mohammadi, P., Sepehri, A., Abutalebian, M., & Hamzai, C. (2011). *Effect of silicon on wheat yield under drought stress conditions*. The 6th National Conference on New Ideas in Agriculture, 11th and 12th March 2011, Islamic Azad University, Khorasgan Branch. 1, 17-119. (In Persian)
50. Moradzadeh, S., Siavash Moghaddam, S., Rahimi, A., Pourakbar, L., El Enshasy, H. A., & Sayyed, R. Z. (2021). Bio-chemical fertilizer improves the oil yield, fatty acid compositions, and macro-nutrient contents in *Nigella sativa* L. *Horticulturae*, 7(10), 345. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100345>
51. Mozaffari, F. S., Ghorbanli, M., Babai, A., & Sepehr, M. F. (2000). The effect of water stress on the seed oil of *Nigella sativa* L. *Journal of Essential Oil Research*, 12(1), 36-38. <https://doi.org/10.1080/10412905.2000.9712036>
52. Naseri Moghadam, A., Bayat, H., Aminifard, M. H., & Moradinezhad, F. (2019). Effect of drought and salinity stress on growth, flowering and biochemical characteristics of *Narsicuss tazetta* L. *Journal of Horticultural Science*, 33(3), 451-466. (in Persian with Engilsh abstract). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.76772>
53. Nouraldinvand, F. A., Sharifi, R. S., Siadat, S. A., & Khalilzadeh, R. (2021). Effects of nano silicon concentrations and bio-fertilizer on yield and grain filling components of wheat in different irrigation regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 19(1), 91-105. <https://doi.org/10.22067/jcesc.2021.67258.0>
54. Ozer, H., Coban, F., Sahin, U., & Ors, S. (2020). Response of black cumin (*Nigella sativa* L.) to deficit irrigation in a semi-arid region: Growth, yield, quality, and water productivity. *Industrial Crops and Products*, 144, 112048. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112048>
55. Paknejad, F., Mjid, E., Nourmohamadi, G., & Vazan, S. (2007). Evaluation of drought Stress on effective traits ataccumulative assimilate of grain in different cultivars of wheat. *Journal of Agricultural Science, Islamic Azad University*, 13(1), 1-12. (In Persian with English Summary)
56. Qhavidel, S., Mostafavi, K., & Pour-Aboughadareh, A. (2023). Investigation of terminal season drought stress effects on grain yield and some agronomic and physiological traits in promising barley (*Hordeum Vulgare* L.) genotypes. *Journal of Crop Breeding*, 15(46), 93-103. <http://doi.org/10.61186/jcb.15.46.93>
57. Rana, S., Singh, P. P., Naruka, I. S., & Rathore, S. S. (2012). Effect of nitrogen and phosphorus on growth, yield and quality of black cumin (*Nigella sativa* L.). *International Journal of Seed Spices*, 2(2), 5-8.
58. Rezabeigi, S., Bijanzadeh, E., Behpouri, A., & Barati, V. (2020). Effect of foliar application of silicone on biochemical traits and yield of two wheat cultivars under late season drought stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(3), 829-843. (in Persian with Engilsh abstract). <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2251.1572>
59. Rezaei-Chiyaneh, E., Seyyedi, S. M., Ebrahimian, E., Moghaddam, S. S., & Damalas, C. A. (2018). Exogenous application of gamma-aminobutyric acid (GABA) alleviates the effect of water deficit stress in black cumin

- (*Nigella sativa* L.). *Industrial Crops and Products*, 112, 741-748. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.067>
60. Rezavani-Bidokhti, Sh., Dashtiyani, A., Snjani, S., & Anvrkhvav, S. (2010). Influence of low irrigation and plant density on yield and yield components of black cumin (*Nigella sativa*) as a medicinal plant in Damghan conditions. Proceeding of the First National Conference of Environmental Stress in Agricultural Sciences, 28-29 June 2010. The University of Birjand, Birjand, Iran.
 61. Sabzevari, Y., Nasrollahi, A., Sharifipour, M., & Shahinejad, B. (2022). Application of multivariate regression and gene expression programming in modeling reference evapotranspiration (case study: Khorramabad station). *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(1), 35-48. <https://doi.org/10.22055/jise.2020.31583.1890>
 62. Salas, M. L., Hickman, M. V., Huber, D. M., & Schreiber, M. M. (1997). Influence of nitrate and ammonium nutrition on the growth of giant foxtail (*Setaria faberi*). *Weed Science*, 45(5), 664-669.
 63. Samarzadeh Vazhdehfar, T., Paknejad, F., Shirani Rad, A. H., & Ebrahimi, H. (2022). Relationship between duration and rate of seed filling of rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes at three layers of upper, middle and bottom of plant affected by fall and winter sowing dates. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53(4), 63-76. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2021.333028.654871>
 64. Sanglard, L. M., Martins, S. C., Detmann, K. C., Silva, P. E., Lavinsky, A. O., Silva, M. M., Detmann, E., Wagner, L. A., & DaMatta, F. M. (2014). Silicon nutrition alleviates the negative impacts of arsenic on the photosynthetic apparatus of rice leaves: An analysis of the key limitations of photosynthesis. *Physiologia Plantarum*, 152(2), 355-366. <https://doi.org/10.1111/ppl.12178>
 65. Sardari, H., Asghari Zakaria, R., Zare, N., Ghafarzadeh Namazi, L., & Moghaddaszadeh, M. (2020). Evaluation of black cumin (*Nigella sativa* L.) ecotypes under drought stress conditions at flowering stage. *Journal Crop Breed.* 12(34), 138-150. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/jcb.12.34.138>
 66. Sehgal, A., Sita, K., Siddique, K. H., Kumar, R., Bhogireddy, S., Varshney, R. K., Hanumantha Rao, B., Vara Prasad, P. V & Nayyar, H. (2018). Drought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1705. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01705>
 67. Seyed Sharifi, R., Seifamiri, S., & Narimani, H. (2023). Effects of nanoparticles foliar application (iron and silicon) on yield, grain filling components and some physiological traits of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under rainfed and supplementary irrigation conditions. *Journal of Crop Physiology*, 14(55), 75-91.
 68. Shadan, E., Najafi Zarini, H., Alizadeh, B., Kiani, G., & Ranjbar, G. (2023). Evaluation of the effects of terminal drought stress on yield and some traits of winter oilseed rape genotypes. *Applied Field Crops Research*, 35(3), 66-46. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/aj.2023.355332.1555>
 69. Sharifi, R., & Abassi, H. (2014). Study of various levels of nitrogen fertilizer and plant density on grain yield, rate and effective grain filling period sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars in Ardabil region. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 27(2), 228-242. (in Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23832592.1393.27.2.7.7>
 70. Soltanieh, M., Talei, D., & Nejatkhah, P. (2023). Evaluation of growth, yield and yield components responses of black cumin (*Nigella sativa* L.) to nitrogen and methanol under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 16(3), 587-601. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22077/escs.2023.4822.2077>
 71. Sonobe, K., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., Eneji, A. E., Kobayashi, S., Kawamura, Y., Tanaka, K., & Inanaga, S. (2010). Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. *Journal of Plant Nutrition*, 34(1), 71-82. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.531360>
 72. Tabatabaei, S. A., Shakeri, E., & Shahedi, M. (2013). Investigation of yield, yield components changes and some physiological characteristics of barley genotypes under irrigation tension conditions. *Crop Physiology Journal*, 5(18), 101-114.
 73. Tardieu, F. (2005). Plant tolerance to water deficit: Physical limits and possibilities for progress. *Comptes rendus. Géoscience*, 337(1-2), 57-67.
 74. 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)
 75. Torabi, F., Majd, A., Enteshari, S., & Irian, S. (2013). Study of effect of silicon on some anatomical and physiological characteristics of borage (*Borago officinalis* L.) in hydroponic conditions. *Journal of Cell and Tissue*, 4(3), 275-285. (in Persian). <https://sid.ir/paper/189030/en>
 76. Zhu, Y., & Gong, H. (2014). Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 455-472. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1>