

The effect of silicon spraying and nitrogen fertilizer in reducing the drought stress damage on growth, grain yield and phenologic stages of nigella (*Nigella sativa* L.)

Fereshteh Kashkooli¹, Mokhtar Ghobadi^{*2}, Saeid Jalali Honarmand²

1. PhD student of Crop Physiology, Department of Plant Production and Genetics, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran.

2. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran

Introduction: *Nigella* (*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 phenologic 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 urea ha⁻¹) 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%.

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 nitrogen × 6 mM silicon was found as the superior treatment. Under drought stress conditions and without silicon spraying, 125 kg.ha⁻¹ nitrogen was more suitable than 250 kg.ha⁻¹ nitrogen 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 nitrogen × 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, foliar application, 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^۱، مختار قبادی^{۲*}، سعید جلالی هنرمند^۲

۱- دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲- دانشیار، عضو هیئت علمی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

ghobadi.m@razi.ac.ir

چکیده

کود نیتروژن، عملکرد دانه را افزایش می‌دهد، اما در شرایط تنش خشکی، حساسیت گیاه به خشکی را تشدید می‌نماید. این آزمایش برای ارزیابی محلول‌پاشی سیلیکون به همراه کود نیتروژن بر رشد و عملکرد دانه سیاه‌دانه 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. فاکتورها شامل مقادیر نیتروژن به‌عنوان فاکتور اصلی (صفر، ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار) و محلول‌پاشی سیلیکون در چهار غلظت (صفر، ۳، ۶ و ۹ میلی‌مولار) به‌عنوان فاکتور 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 پرشدن دانه اثر معنی‌دار نداشت. اثر متقابل نیتروژن و سیلیکون در شرایط تنش بر روی اکثر صفات معنی‌دار شد. بالاترین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش، از تیمار اثر متقابل ۲۵۰ کیلوگرم اوره و محلول‌پاشی سیلیکون ۶ میلی‌مولار (۸/۶ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) بدست آمد. در حالی که در شرایط تنش خشکی، تیمار ۲۵۰ کیلوگرم اوره و محلول‌پاشی سیلیکون ۹ میلی‌مولار، از بالاترین عملکرد دانه (۱۹/۴۱ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) برخوردار بود. در شرایط تنش، کود نیتروژن ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار برای صفت تعداد دانه در کپسول مناسب‌تر بود. اما با محلول‌پاشی سیلیکون، امکان افزایش مقدار کود نیتروژن تا ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار وجود داشت. محلول‌پاشی سیلیکون با غلظت ۶ میلی‌مولار برای شرایط عدم تنش و ۹ میلی‌مولار برای شرایط تنش خشکی به همراه مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن برای سیاه‌دانه قابل توصیه است.

کلمات کلیدی: اوره، تعداد دانه، عملکرد زیستی، کود، محلول‌پاشی.

مقدمه

سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) یک گیاه دارویی از خانواده Ranunculaceae، گیاهی دو لپه، علفی و یکساله 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 سیاه‌دانه حاوی حدود ۴۰ درصد روغن و ۱/۴ درصد اسانس است. اسیدهای چرب عمده روغن سیاه‌دانه، اسیدهای اولئیک، لینولئیک و پالمیتیک است. افزون بر آن، عناصر کانی در آن به وفور وجود دارد (Majnoon Hosseini & Davazdeh Imami, 2013). محققان برای سیاه‌دانه خواصی مانند ضدسرطان، ضد نفخ، ضد انگل، مسهل، ضد مالاریا، ضد ویروس، ضد صرع، ضد باکتری، مسکن، کاهش دهنده قند خون، شل‌کننده عضلات و محرک ایمنی را برشمرده‌اند (Bassim Atta, 2003). از روغن فرار سیاه‌دانه موادی از جمله تیموکینون، دی‌تیموکینون و تیمول بدست می‌آید که بخش عمده‌ای از اثرات دارویی و خاصیت ضدسرطانی آن مربوط به ترکیبات تیموکینون است (Akhondian, Parsa & R akhshandeh, 2007).

جهان در چند دهه اخیر با چالش‌های متعدد و مهمی از جمله تغییر اقلیم و همچنین تنش‌های محیطی از جمله خشکی روبرو بوده است (Tardieu, 2005). ایران بدلیل داشتن اقلیم خشک و نیمه خشک در معرض تنش خشکی شدیدتری است. مرادزاده و همکاران (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 ذخیره شده 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 سیاه دانه 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 تاثیر کم‌آبی قرار نگرفته است (Ghamarnia, Khosravy & Sepehri, 2010; Rezaei-Chiyaneh, Seyyedi, Ebrahimian, Moghaddam & Ghamarnia, Miri, Jafarizadeh & Ghobadi, 2013). رضایی چپانه و همکاران (Rezaei-Chiyaneh, Seyyedi, Ebrahimian, Moghaddam & Ghamarnia, Miri, Jafarizadeh & Ghobadi, 2013) در پژوهشی بر روی گیاه سیاه‌دانه، کاهش ۵/۵ و ۳۴/۶ درصدی ارتفاع بوته به ترتیب در تنش شدید و ملایم خشکی در مقایسه با شاهد (بدون تنش) را 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 انجام شده بر 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 وابسته‌اند. در بین عناصر غذایی، نیتروژن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا نیتروژن در تشکیل آمینو اسیدها، 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 جدایی ناپذیر 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 محققین قرار گرفته است (Torabi, Majd, Enteshari & Irian, 2013; Kamenidou, 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, Uchida, Agata, Kubota & Kaufman, 1998)، فعال‌سازی سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی گیاه (Gong et al., 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 (Gong & 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 سیاه دانه 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 سیاه دانه 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

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 آورده شده است. قبل از انجام آزمایش، از خاک مربوطه در چند نقطه به صورت تصادفی نمونه خاک 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 اسپلینت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار پیاده شد. فاکتورها شامل مقادیر کود نیتروژن به عنوان فاکتور اصلی در سه سطح (عدم کاربرد، نصف مقدار توصیه شده و معادل مقدار توصیه شده به ترتیب معادل صفر، ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره) و فاکتور فرعی شامل چهار مقدار سیلیکون (صفر، ۳، ۶ و ۹ میلی مولار) بودند. در آزمایش مربوط به شرایط نرمال رطوبتی، آبیاری بر اساس نیاز گیاه انجام شد. در طی مدت انجام تحقیق داده‌های هواشناسی از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرمانشاه به صورت روزانه دریافت سپس تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن-مانیت-فائو محاسبه گردید (Sabzevari, Nasrollahi, Sharifipour & Shahinejad, 2022). سپس از تقسیم تبخیر-تعرق به دست آمده برای گیاه سیاه‌دانه (ET_c) در منطقه مورد مطالعه بر تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0)، مقادیر ضریب گیاهی در طی فصل رشد این گیاه و نهایتاً نیاز آبی گیاه محاسبه شد. در آزمایش تنش خشکی، از اواسط رشد طولی ساقه، آبیاری قطع شد. در شرایط اقلیمی غرب ایران، بارندگی معمولاً از اواسط اردیبهشت به بعد قطع می‌شود که مطابق با رشد طولی ساقه این گیاه می‌باشد.

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 (میلی متر) Rainfall (mm)	۱۳۹۹-۱۴۰۰	21.7	3.8	8	0	0	0
	2021						
	۱۴۰۰-۱۴۰۱	60.9	10.4	81.5	0	0	0
	2022						
متوسط دما (درجه سانتی گراد) Mean temperature (°C)	۱۳۹۹-۱۴۰۰	8.5	14.3	21.3	25.9	30.4	29.5
	2021						
	۱۴۰۰-۱۴۰۱	8.7	14.6	17.5	25.9	29.9	31.1
	2022						

جدول ۲- تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک.

Table 2. Physical and chemical analysis of the soil.

مس Cu (mg/kg)	روی Zn (mg/kg)	آهن Fe (mg/kg)	منگنز Mn (mg/kg)	پتاسیم K (mg/kg)	فسفر P (mg/kg)	نیتروژن N (%)	کربن آلی (%)	اسیدیته خاک PH	هدایت الکتریکی EC (ds.m-1)	کربنات کلسیم CaCO ₃ (%)	بافت خاک
1.6	0.39	4.2	13	340	15	0.09	0.93	7.7	1.77	28	رسی سیلتی

آماده سازی اولیه زمین شامل شخم، دیسک و تسطیح قبل از کشت انجام شد. هر کرت آزمایشی شامل شش ردیف کاشت به طول پنج متر بود. بذر سیاه دانه (توده سمیرم) از شرکت هالیوکوک 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 به صورت خاک کاربرد و در فاصله حدود دو تا پنج سانتی متری بوته ها و بر اساس تیمار مربوطه در سه نوبت (زمان کاشت، مرحله چهار برگی، و مرحله ابتدای رشد ساقه) در اختیار گیاه قرار گرفت. تیمار سیلیکون در طی سه مرحله (ابتدای رشد طولی ساقه، ابتدای گلدهی و ابتدای پرشدن دانه) اعمال شد. سیلیکون از منبع سیلیکات سدیم (ساخت شرکت سیگما، آمریکا) تأمین شد. برای تهیه محلول سیلیکون با غلظت های تعیین شده، ابتدا با توجه به وزن 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. مراقبت های لازم از گیاه برای کاهش خسارت آفات، بیماری ها و علف های هرز در مزرعه انجام گرفت. آفت و بیماری در مزرعه مشاهده نگردید. لذا، سموم شیمیایی مصرف نشد. برای مبارزه با علف های هرز، از وجین دستی در تمام طول دوره رشد (قبل از ساقه رفتن، اواسط رشد طولی ساقه و گلدهی) استفاده شد. در هر دو آزمایش، صفات گیاهی مربوط به عملکرد دانه، اجزای عملکرد دانه و صفات فنولوژیک به شرح زیر اندازه گیری گردید. اندازه گیری عملکرد دانه، اجزای عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و

شاخص برداشت: عملیات برداشت به هنگام زرد شدن بوته‌ها و قبل از شکاف برداشتن کپسول‌ها انجام شد. پس از حذف اثر حاشیه، یک متر مربع از هر کرت برداشت شد و تمام ماده خشک اندام هوایی گیاه توزین و به عنوان عملکرد بیولوژیک لحاظ شد. سپس، دانه‌ها جدا شد و عملکرد دانه بدست آمد. شاخص برداشت با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید (Mahdavi, Esmaeili, Falah & Pirdashti, 2006):

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

که در آن HI = شاخص برداشت، GY = عملکرد دانه، BY = عملکرد بیولوژیک 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 شد. سپس، دانه از کپسول‌ها جدا شد و تعداد دانه‌ها شمارش گردید و همچنین توزین شد. با تقسیم تعداد دانه بر تعداد کپسول، تعداد دانه در کپسول محاسبه شد. همچنین با تقسیم وزن دانه‌ها بر تعداد آنها و تعمیم آنها به هزار، وزن هزار دانه بدست آمد. همچنین با ورود ۵۰ درصد گیاهان هر کرت به هر یک از مراحل فنولوژی مدنظر از جمله (روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک) مرحله نمودی 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 نرم افزار 9.4 SAS, استفاده شد. همچنین نرم افزار 2016 Excel, برای رسم نمودارها به کار گرفته شد. جهت اطمینان از یکنواخت بودن واریانس‌ها از آزمون بارتلت استفاده شد. 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 بدست 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 ۶ 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).

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.

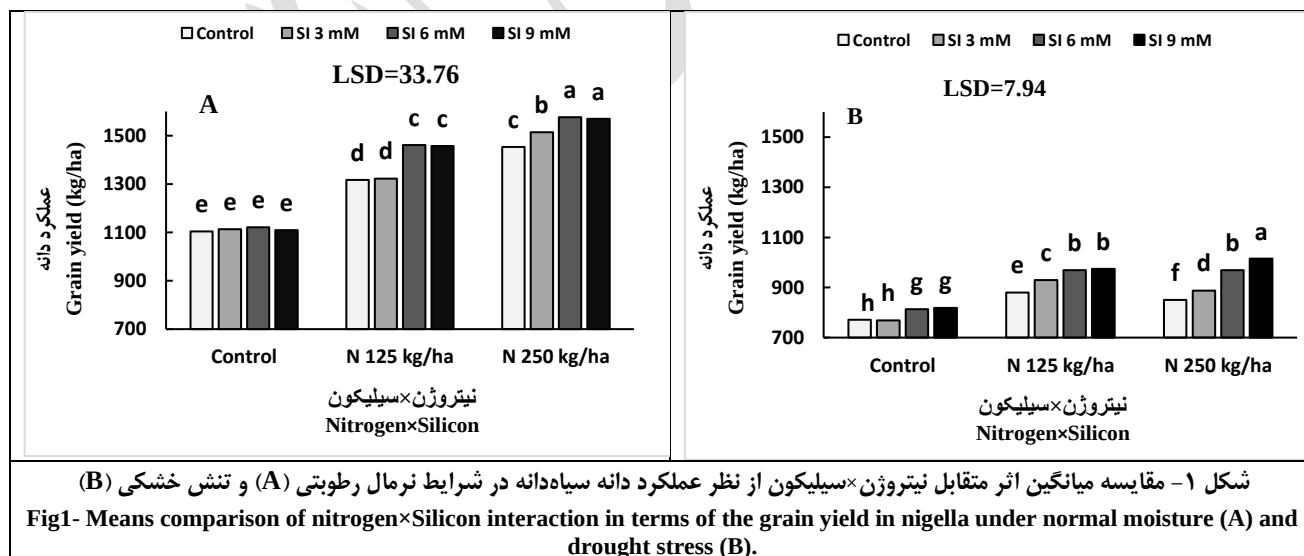
میانگین مربعات Mean squares									
منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	تنش خشکی Drought stress				عدم تنش خشکی No drought stress			
		عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت HI	بیوماس Biomass	درصد نیتروژن دانه Grain nitrogen percentage	عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت HI	بیوماس Biomass	درصد نیتروژن دانه Grain nitrogen percentage
سال (Y)	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 (درصد) CV (%)		9.07	6.16	11.10	4.05	9.21	6.18	11.53	5.57

ns, * و ** به ترتیب: بدون اختلاف معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

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

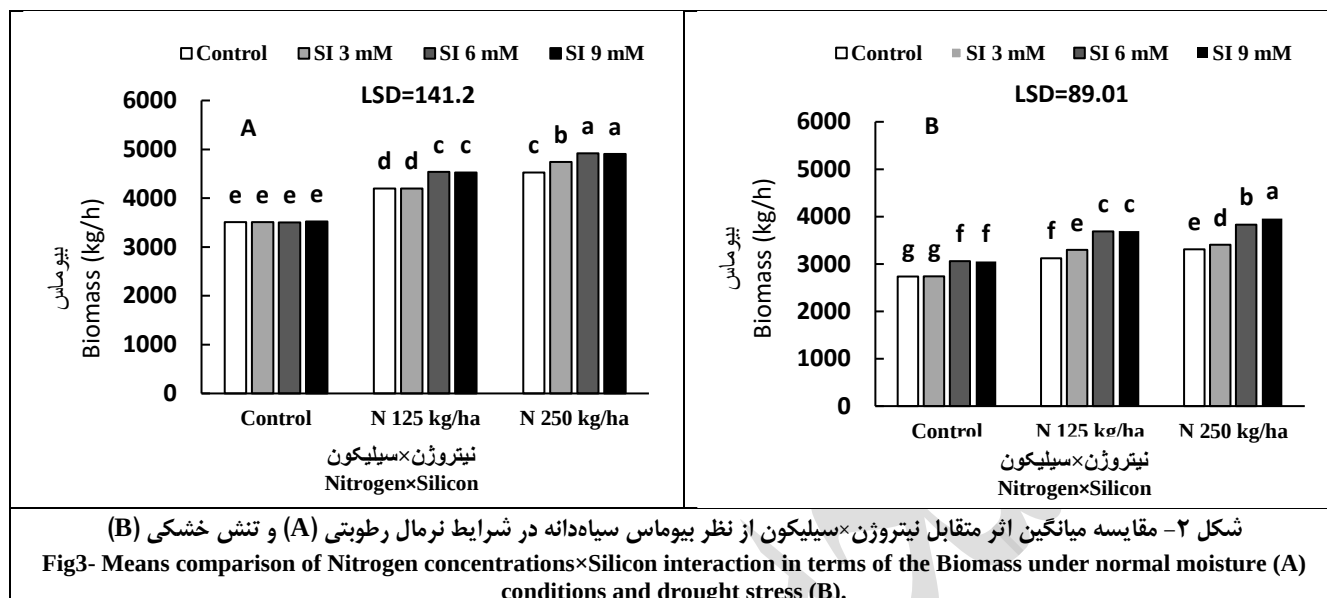
در شرایط تنش خشکی و بدون مصرف نیتروژن، محلول‌پاشی سیلیکون ۳ میلی‌مولار تأثیری در افزایش عملکرد دانه نداشت، اما محلول‌پاشی سیلیکون ۶ و ۹ میلی‌مولار (بدون اختلاف معنی‌دار با هم) سبب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه شدند. در شرایط تنش خشکی و مصرف نیتروژن، افزایش غلظت سیلیکون سبب افزایش عملکرد دانه گردید هر چند که به هنگام مصرف ۱۲۵ کیلوگرم اوره، تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد دانه بین محلول‌پاشی سیلیکون ۶ و ۹

میلی مولار وجود نداشت. این در حالی بود که به هنگام مصرف ۲۵۰ کیلوگرم اوره، افزایش غلظت سیلیکون در افزایش عملکرد دانه مؤثر بود و سیلیکون ۹ میلی مولار از عملکرد دانه (۱۰۱۵ کیلوگرم در هکتار) بالاتری (۴/۷ بیشتر) نسبت به سیلیکون ۶ میلی مولار (۹۶۹ کیلوگرم در هکتار) برخوردار بود (شکل ۱B). بنابراین، در شرایط تنش خشکی می توان از مقدار معادل نیتروژن توصیه شده به همراه محلول پاشی سیلیکون ۹ میلی مولار به منظور افزایش عملکرد دانه استفاده کرد. عملکرد دانه در سیاه دانه حاصل برهمکنش اجزایی است که در مراحل مختلف رویشی و زایشی شکل می گیرند. وزن هزار دانه، تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول از مهم ترین اجزای عملکرد دانه در گیاه سیاه دانه به شمار می آیند (Misra & Srivastava, 2000). تنش خشکی سبب کاهش طول دوره رویشی و تسریع ورود به فاز زایشی می شود که در نهایت با تأثیر بر اجزای عملکرد دانه، سبب کاهش عملکرد می گردد (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 می گردد که در نهایت سبب کاهش رشد و عملکرد می شود (Kiami, Khalesro, Sharifi & Mokhtassi-Bidgoli, 2024). نتایج آزمایش نشان داد 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. بر اساس نتایج حاصل از تحقیقی که توسط امیری و همکاران (Amiri, Bagheri, Khajeh, Najafabadipour & Yadalhi, 2013) صورت گرفت مشخص شد کاربرد ۲ میلی مولار سیلیکون باعث افزایش ۸/۳ درصدی عملکرد دانه در گیاه گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) شده است. نتایج حاصل از این گزارش با یافته های ما مطابقت داشت. استفاده از سیلیکون باعث افزایش پایداری غشای 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 (بیوماس)

در هر دو شرایط تنش و عدم تنش خشکی، اثرهای ساده نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن×سیلیکون روی بیوماس سیاهدانه معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن×سیلیکون (شکل ۳) نشان داد که بدون مصرف سیلیکون، بالاترین بیوماس در شرایط رطوبتی نرمال (۴۵۲۸ کیلوگرم در هکتار) و تنش خشکی (۳۳۰۸ کیلوگرم در هکتار) با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره بدست آمد. در شرایط مطلوب رطوبتی و عدم مصرف نیتروژن، تفاوت معنی‌داری بین مصرف و عدم مصرف سیلیکون مشاهده نشد. اما با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره در شرایط مطلوب رطوبتی، بالاترین عملکرد بیوماس به میزان ۴۹۱۷ کیلوگرم در هکتار از محلول‌پاشی ۶ میلی‌مولار سیلیکون (بدون تفاوت معنی‌دار با محلول‌پاشی ۹ میلی‌مولار سیلیکون) بدست آمد که نشان دهنده تأثیر مثبت مصرف اوره بر این صفت است (شکل ۲A). مقایسه میانگین همچنین نشان می‌دهد که در شرایط تنش خشکی و عدم مصرف نیتروژن، محلول‌پاشی ۶ میلی‌مولار سیلیکون به میزان (۳۰۵۹ کیلوگرم در هکتار) تفاوت معنی‌داری با دو سطح عدم کاربرد (شاهد) و ۳ میلی‌مولار سیلیکون دارد که این شرایط نشان می‌دهد افزایش غلظت سیلیکون توانسته شرایط تنش رطوبتی را تا حدی تعدیل کند. با مصرف نیترون تا سطح معادل توصیه شده، با افزایش غلظت سیلیکون روند افزایشی در عملکرد بیوماس مشاهده گردید که بهترین عملکرد به مقدار ۳۹۷۵ کیلوگرم در هکتار از غلظت ۹ میلی‌مولار سیلیکون بدست آمد که ۱۹/۶۱ درصد افزایش را نسبت به شاهد نشان داد (شکل ۲B). محققین، کاهش بیوماس در گیاه رازیانه در شرایط تنش خشکی را گزارش کردند (Jamshidi, Ghalavand, Sefidkon & Goltaph, 2013). در بررسی برهمکنش رژیم آبیاری×سیلیکون و همچنین برهمکنش رژیم آبیاری×نیتروژن در گیاه تریتیکاله (*Triticale sp*) مشخص شد که تنش آبی سبب کاهش عملکرد بیوماس 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 بیوماس در شرایط بدون تنش خشکی و مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (به میزان ۱۷۲۲۸ کیلوگرم در هکتار) بدست آمد (Barati & Bijanzadeh, 2020). افزایش بیوماس 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, 1999). Brugnoli & Navari-Izzo (1999) در تحقیقی دیگر، کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در سیاهدانه سبب افزایش بیوماس گردید (Abdul-zadeh et al., 2017). بنظر می‌رسد کاربرد نیتروژن با افزایش سطح برگ و سطح سبز، افزایش فتوسنتز، و تولید آسیمیلات بیشتر، سبب افزایش تولید ماده خشک و بیوماس شده است.

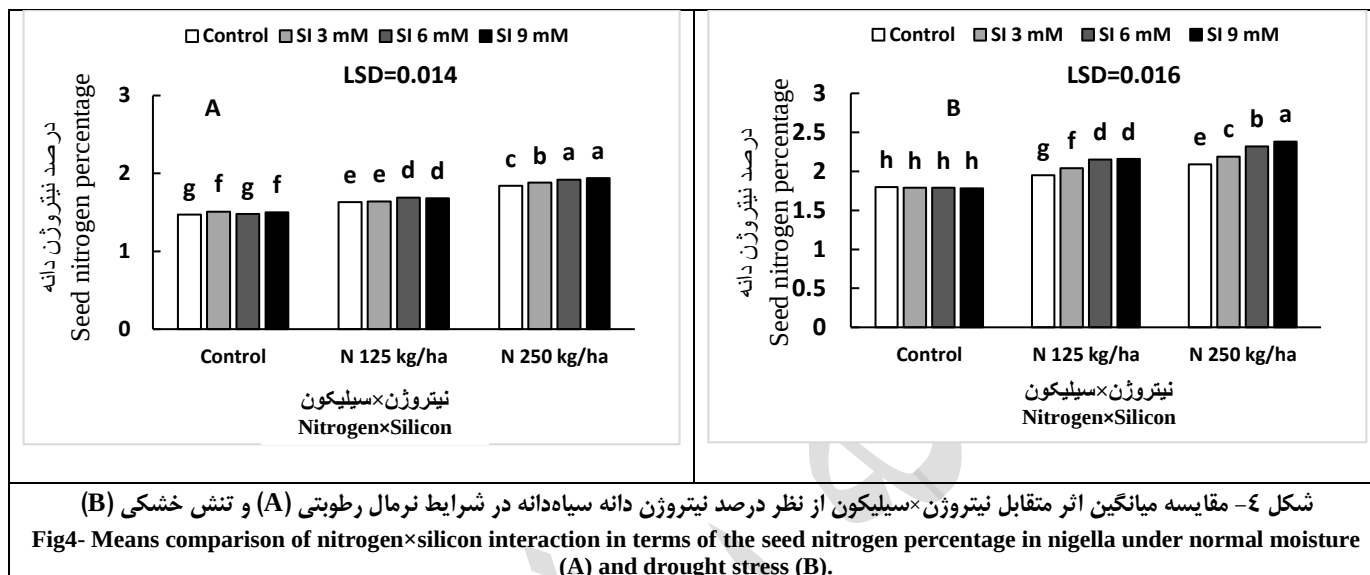


شاخص برداشت

در تجزیه مرکب مشخص شد که در شرایط نرمال رطوبتی، به غیر از اثر سال، سایر اثرهای ساده و متقابل بر روی 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 بالاترین شاخص برداشت مربوط به تیمار شاهد (بدون سیلیکون) و سیلیکون ۳ میلی مولار بود (شکل ۳B). این نتیجه نشان می دهد که تأثیر سیلیکون بر بخش رویشی گیاه بیشتر از بخش زایشی (دانه) بوده است. شاخص برداشت، نسبت بین عملکرد اقتصادی به عملکرد بیولوژیک را بیان می کند که معیاری از کارایی توزیع مواد فتوسنتزی به دانه است که بخش اقتصادی گیاه سیاهدانه است را تشکیل می دهد. طی بررسی عبدالزاده و همکاران (Abdul-zadeh, Vali-pour Chahardeh Cheriki & Qadrifar, 2017)، شاخص برداشت در گیاه سیاهدانه با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره معنی دار شد. قمرنیا و همکاران (Ghamarnia et al., 2010) کاهش شاخص برداشت در گیاه سیاهدانه را در شرایط تنش رطوبتی گزارش کردند. با این حال، یافته های پژوهش رضاییگی و همکاران (Rezabeigi, Bijanzadeh, Behpouri & Barati, 2020) بر روی گندم (*Triticum aestivum*) نشان داد کاربرد ۳ 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.

(Kebede& Dejene, 2010). در تحقیق انجام شده توسط دیرن (Deren, 1997)، مشخص گردید که میزان نیتروژن در بافت‌های مختلف گیاه با مصرف

سیلیکون افزایش یافت.



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) بدست آمد. این نتیجه نشان داد 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 ۹ میلی‌مولار سیلیکون حداکثر تعداد دانه در کپسول (۲۴/۸۱) بدست 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 بیشترین تعداد کپسول در بوته در شرایط کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، از غلظت ۶ میلی‌مولار سیلیکون (۳۵/۵ کپسول در بوته) بدست آمد که با سایر تیمارها بجز غلظت ۹ میلی‌مولار سیلیکون تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۵A).

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.

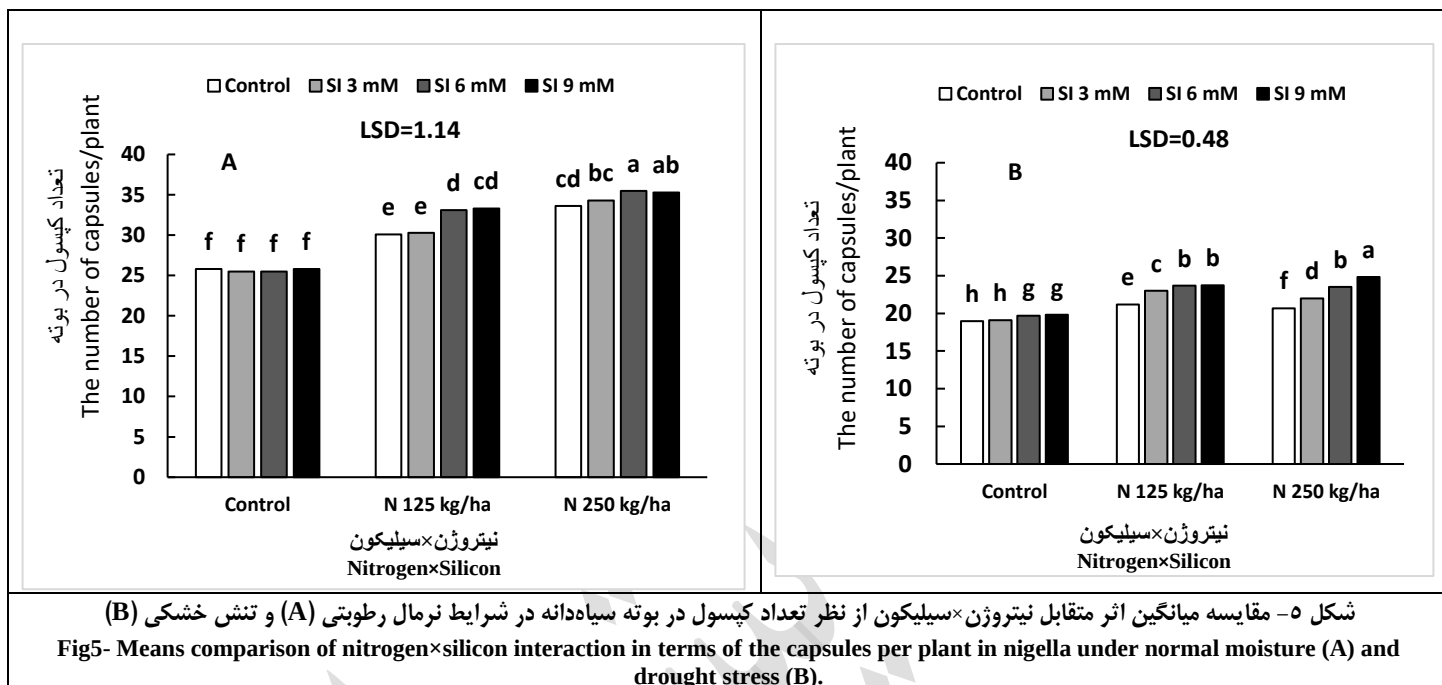
Table 4. Combined analysis of variance for the effects of year, nitrogen, silicon and their interactions in terms of the number of capsules per plant, the number of seeds per capsule, 1000 Grain weight, and the number of grains per plant under normal moisture and drought stress.

میانگین مربعات Mean square									
منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	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 (درصد) CV (%)		7.83	4.50	4.41	10.01	8.05	6.22	5.24	10.20

ns, * و ** به ترتیب: بدون اختلاف معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.
ns: no significant; **, * Significant at 1 and 5% probability levels, respectively.

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 محلول پاشی ۹ میلی مولار سیلیکون بدست آمد که با بقیه سطوح سیلیکون بجز ۶ میلی مولار 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 محلول پاشی ۹ میلی مولار سیلیکون (۲۴/۸۱) کپسول در بوته) بدست 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)

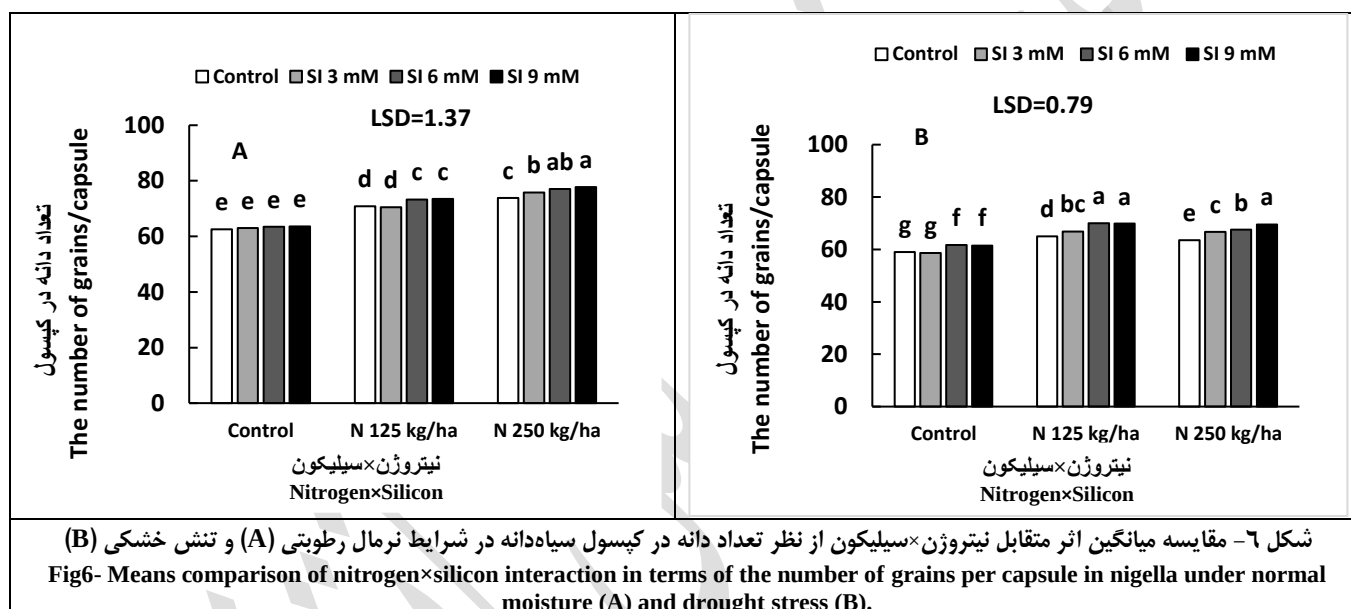
نیز افزایش تعداد کپسول در بوته در گیاه سیاه دانه با کاربرد نیتروژن را گزارش کردند. این در حالی است که در تحقیق سلطانیه و همکاران (Soltanieh, Talei & Nejatkhah, 2023)، کاربرد نیتروژن سبب کاهش تعداد کپسول در بوته شد که با نتایج ما مغایرت داشت.



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×محلول‌پاشی سیلیکون ۹ میلی‌مولار به تعداد ۷۷/۸ دانه در کپسول بدست آمد که افزایش ۲۴/۴۸ درصدی را نسبت به تیمار 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×۶ میلی‌مولار سیلیکون با ۷۰/۰۰ دانه در کپسول (افزایش ۱۸/۶۴ درصدی نسبت به شاهد) بدست آمد که با تیمارهای ۱۲۵ کیلوگرم اوره×محلول‌پاشی سیلیکون ۹ میلی‌مولار و همچنین اثر متقابل ۲۵۰ کیلوگرم اوره×محلول‌پاشی سیلیکون ۹ میلی‌مولار (به ترتیب با ۶۹/۸۳ و ۶۹/۵۰ دانه در کپسول) تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۶B). بر اساس نتایج حاصل از پژوهشی که توسط عبدالزاده و همکاران (۲۰۱۷) بر روی سیاه‌دانه انجام شد مشخص گردید که کاربرد کود نیتروژن بر روی صفت تعداد دانه در

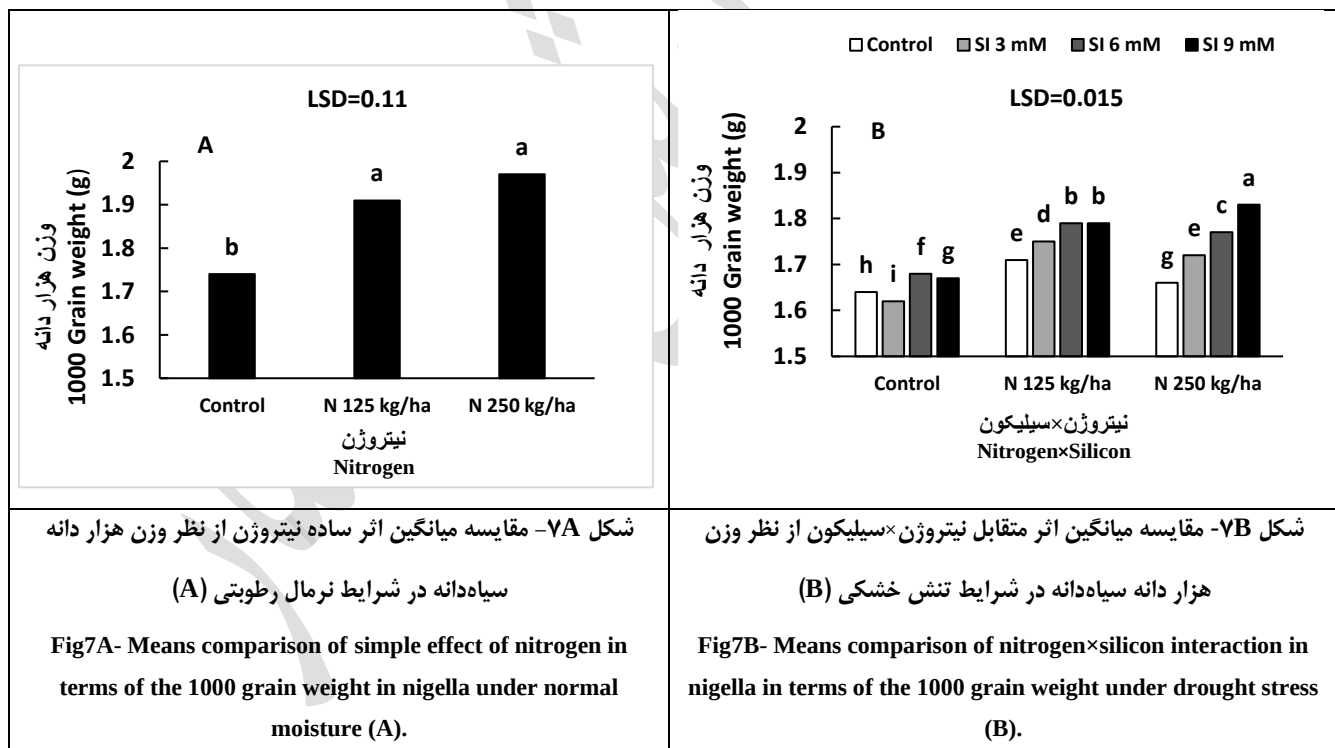
کپسول اثر معنی‌دار داشت. دیتا و همکاران (Datta, Rai & Ashutosh, 2022) در پژوهشی که بر روی سیاه‌دانه انجام دادند بیان کردند که با مصرف ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، بیشترین تعداد دانه در کپسول در مقایسه با شاهد (عدم مصرف نیتروژن) بدست آمد که با نتایج ما در رابطه با افزایش تعداد دانه در کپسول با افزایش میزان نیتروژن مطابقت داشت (El-Leithy, Abdallah & Ali, 2019). گزارش شده که افزایش تعداد دانه در کپسول در گیاه سیاه‌دانه (Rana et al., 2012) و جو بهاره (Tariq Alislami, Zarghami, MashhadiAkbar Bojar & Oveysi, 2012) ناشی از افزایش در محتوای کلروفیل، افزایش سرعت رشد محصول و شاخص سطح برگ بوده است. در تحقیق رضاییگی و همکاران (Rezabeigi et al., 2020) مشخص شد که تعداد دانه در سنبله گندم با کاربرد ۲ میلی‌مولار برگی سیلیکون ۲۵/۴ درصد نسبت به زمان عدم مصرف سیلیکون افزایش یافت.



وزن هزار دانه

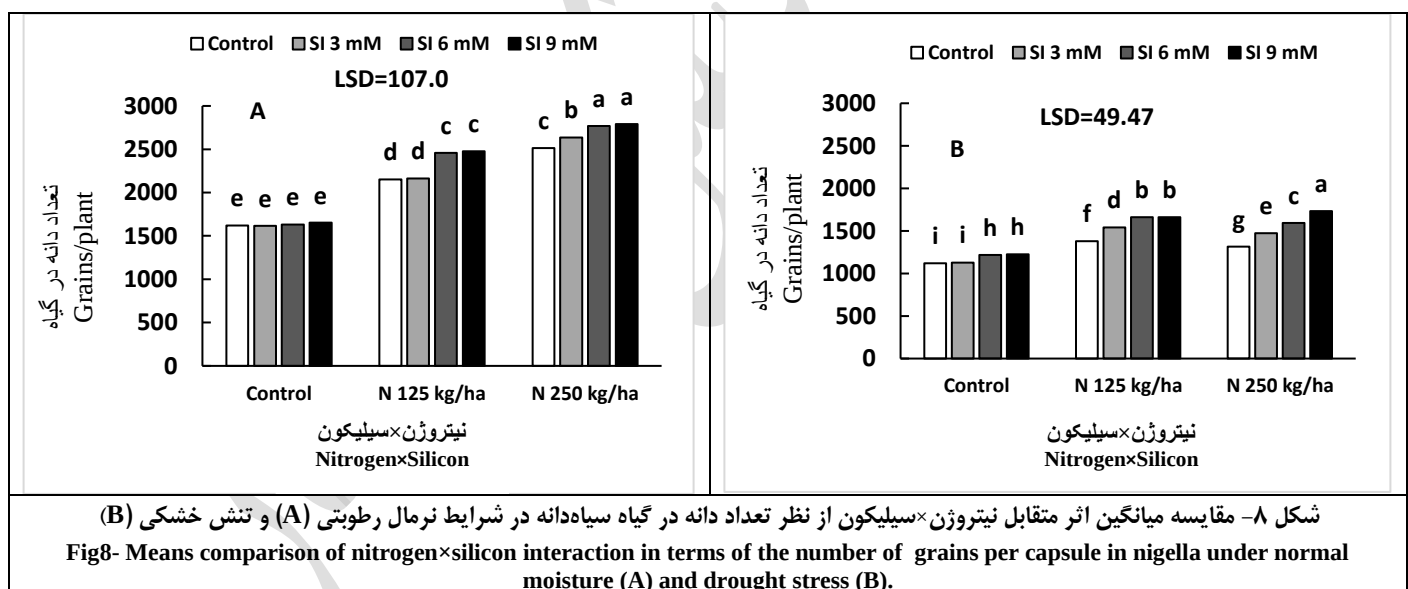
مطابق با نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها، در شرایط رطوبتی نرمال فقط سال و نیتروژن روی وزن هزار دانه اثر معنی‌دار داشتند. در شرایط تنش خشکی، اثرهای سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن×سیلیکون بر وزن هزار دانه معنی‌دار بودند (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر ساده نیتروژن در شرایط نرمال رطوبتی نشان داد که وزن هزار دانه با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن ۱۳/۲۱ درصد افزایش نسبت به شاهد (عدم مصرف نیتروژن) داشته است اما تفاوت معنی‌داری با تیمار ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن نداشت (شکل ۷A). در شرایط تنش خشکی، مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن×سیلیکون نشان داد که بدون مصرف سیلیکون، افزودن کود نیتروژن سبب افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه شد. با این حال، 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 ۳، ۶ و ۹ میلی‌مولار

سیلیکون، وزن هزار دانه را افزایش دادند هر چند که غلظت‌های ۶ و ۹ میلی‌مولار تفاوت آماری معنی‌دار با هم نداشتند. با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم اوره، غلظت ۹ میلی‌مولار سیلیکون، بالاترین وزن هزار دانه (۱/۸۳ گرم) را تولید نمود (شکل ۷B). تنش خشکی با سرعت بخشیدن به پیری برگ، کاهش سرعت پرشدن دانه و همچنین کاهش طول دوره پرشدن دانه، منجر به کاهش وزن هزار دانه می‌شود (Sehgal et al., 2018). رضوانی بیدختی و همکاران (Rezavani-Bidokhti, Dashtiyani, Snjani & Anvrkhvah, 2010) محدود بودن آب در زمان پرشدن دانه در سیاه دانه را از جمله عوامل کاهش وزن هزار دانه دانسته‌اند. در شرایط تنش خشکی به دلیل در دسترس نبودن آب کافی، مقصدهای فیزیولوژیک به خوبی پر نشد و در نتیجه وزن هزار دانه کاهش یافت که با نتایج تحقیق ما مطابقت داشت (Emam, Ranjbar & Bahrani, 2007). قویدل و همکاران (Qhavidel, Mostafavi & Pour-Aboughadareh, 2023) اثر معنی‌دار تنش خشکی بر برخی صفات از جمله وزن هزار دانه در گیاه جو را گزارش کردند. در پژوهش عبدالزاده و همکاران (Abdul-zadeh et al., 2017)، کود نیتروژن سبب افزایش وزن هزار دانه در سیاه‌دانه شد. خدابخنده‌لو و همکاران (Khodabandehloo, Sepehri, Ahmadvand & Keshtkar, 2014) در تحقیقی که بر روی گیاه ارزن (*Panicum miliaceum* L.) انجام دادند بیان کردند که محلول‌پاشی ۱۰ میلی‌مولار سیلیکون در شرایط تنش خشکی، در مقایسه با عدم مصرف سیلیکون سبب افزایش وزن هزار دانه شد.



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×سیلیکون معنی دار شد (جدول ۴). در شرایط نرمال رطوبتی، مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن×سیلیکون نشان داد هنگامی که از سیلیکون استفاده نشد افزودن کود نیتروژن سبب افزایش معنی دار تعداد دانه در گیاه شد. در نبود نیتروژن، بین غلظت‌های سیلیکون و شاهد تفاوت آماری معنی دار مشاهده نشد. بیشترین تعداد دانه در گیاه از تیمار اثر متقابل ۲۵۰ کیلوگرم اوره×سیلیکون ۶ میلی‌مولار و همچنین اثر متقابل ۲۵۰ کیلوگرم اوره×سیلیکون ۹ میلی‌مولار (به ترتیب به تعداد ۲۷۶۷ و ۲۷۸۹ دانه) بدست 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 ۶ و ۹ میلی‌مولار از تعداد دانه در بوته بیشتری برخوردار بودند، هر چند با هم تفاوت آماری معنی دار نداشتند. با کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم اوره، بین غلظت‌های سیلیکون تفاوت معنی دار وجود داشت و بیشترین تعداد دانه در گیاه با محلول‌پاشی سیلیکون ۹ میلی‌مولار (به تعداد ۱۷۳۱ دانه) بدست 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 پرشدن 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, Coban, Sahin & Ors, 2020).



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 معنی دار ($p \leq 0.05$) شد. اما اثر سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن×سیلیکون معنی دار نبود (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر ساده نیتروژن در شرایط نرمال رطوبتی نشان داد کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم

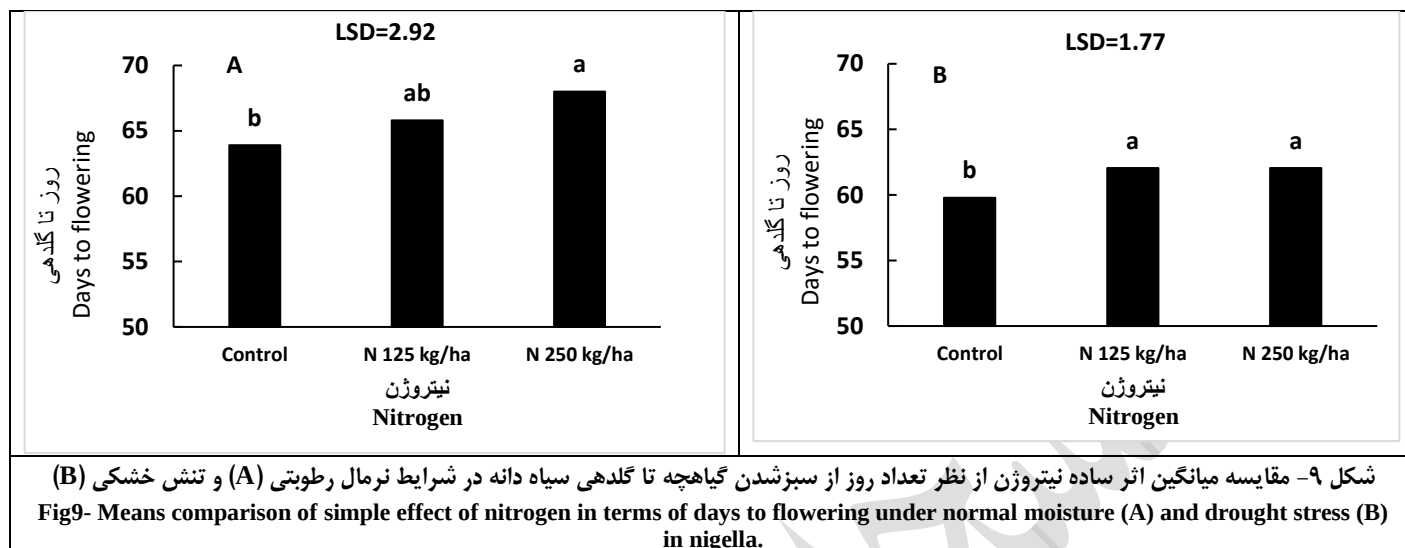
در هکتار نیتروژن سبب افزایش تعداد روز تا گلدهی (۶۸ روز) شد که با تیمار شاهد (عدم مصرف نیتروژن) تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۹A). در شرایط تنش خشکی، بین تیمارهای ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (۶۲/۰۴ روز تا گلدهی) با تیمار شاهد تفاوت معنی‌دار وجود داشت (شکل ۹B). با افزایش مصرف کود نیتروژن در مرحله گلدهی 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, Liao, & Liu, 2021). بر اساس تحقیقی که توسط سرداری و همکاران (Sardari, Asghari Zakaria, Zare, Ghafarzadeh Namazi & Moghaddaszadeh, 2020) صورت گرفت تعداد روز تا گلدهی در سیاه‌دانه تحت تنش خشکی کاهش یافت که با نتایج تحقیق ما مطابقت داشت. در گیاه نرگس (Narsicuss tazetta L.)، 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 بدست آمد (Naseri Moghadam, Bayat, Aminifard & Moradinezhad, 2019).

جدول ۵. تجزیه واریانس مرکب اثرات سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل آن‌ها از نظر روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، طول دوره پرشدن 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.

میانگین مربعات Mean square									
منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	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)	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 (درصد) CV (%)		1.93	2.28	1.87	10.87	2.06	2.33	3.34	8.98

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

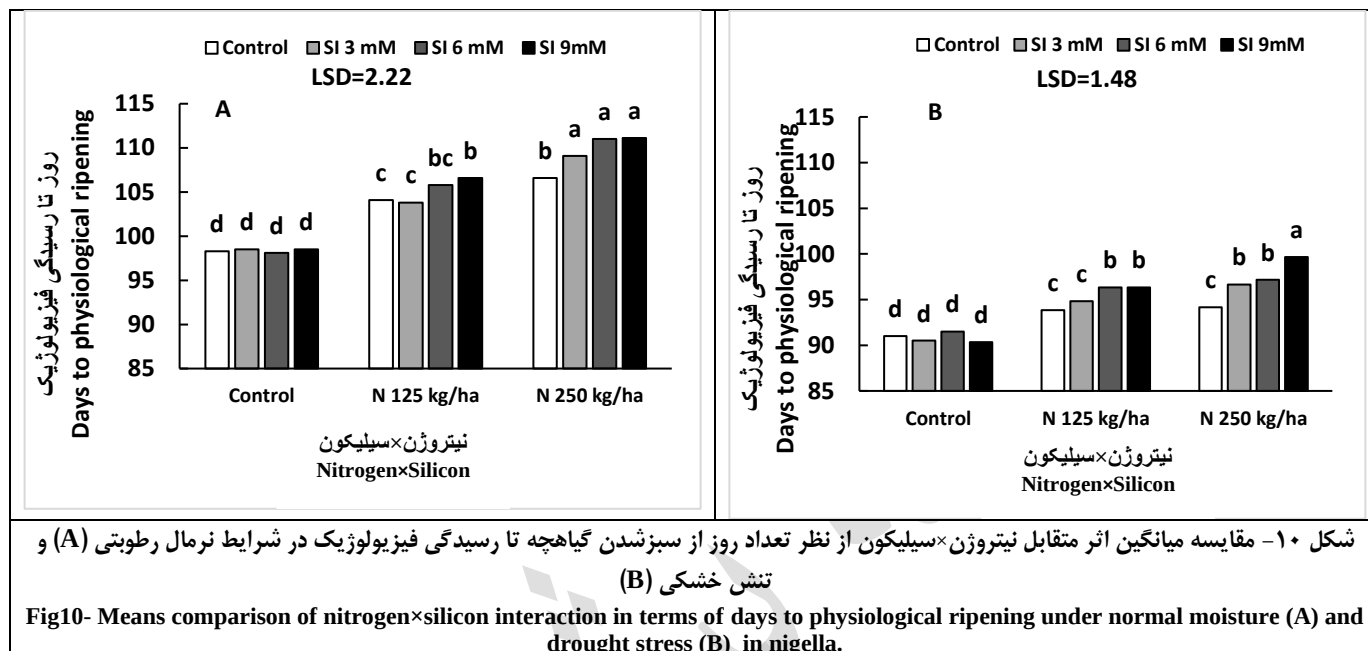


روز تا رسیدگی فیزیولوژیک دانه

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 بدست آمد (شکل ۱۰، A و B). در شرایط عدم مصرف نیتروژن در هر دو شرایط مطلوب رطوبتی و تنش خشکی، بین تیمارهای سیلیکون تفاوت معنی‌داری 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 محلول‌پاشی ۹ میلی‌مولار سیلیکون (۱۱۱/۱ روز تا رسیدگی فیزیولوژیک) حاصل شد که با تمامی تیمارها بجز تیمارهای مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و ۳ و ۶ میلی‌مولار سیلیکون از نظر آماری تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۱۰A). در شرایط تنش خشکی، مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به همراه محلول‌پاشی ۹ میلی‌مولار سیلیکون (۹۹/۶۶ روز تا رسیدگی فیزیولوژیک) تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها ایجاد کرد (شکل ۱۰B). در شرایط تنش خشکی، گیاهان به منظور فرار از شرایط تنش، سیکل زندگی خود را سریعتر تکمیل می‌کنند و همین امر سبب کاهش عملکرد دانه می‌شود. نتایج ما نشان می‌دهد در شرایط تنش خشکی و مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به همراه محلول‌پاشی ۹ میلی‌مولار سیلیکون، تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک نسبت به شاهد سیلیکون ۵/۸ درصد افزایش یافت. در مراحل پایانی رشد، گیاه با کمبود آب مواجه می‌شود 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 بر روی لاین‌های امید بخش جو (*Hordeum vulgare* L.) در شرایط تنش آخر فصل، مشخص شد که تنش خشکی منجر به کاهش تعداد روز تا رسیدگی دانه شد (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).

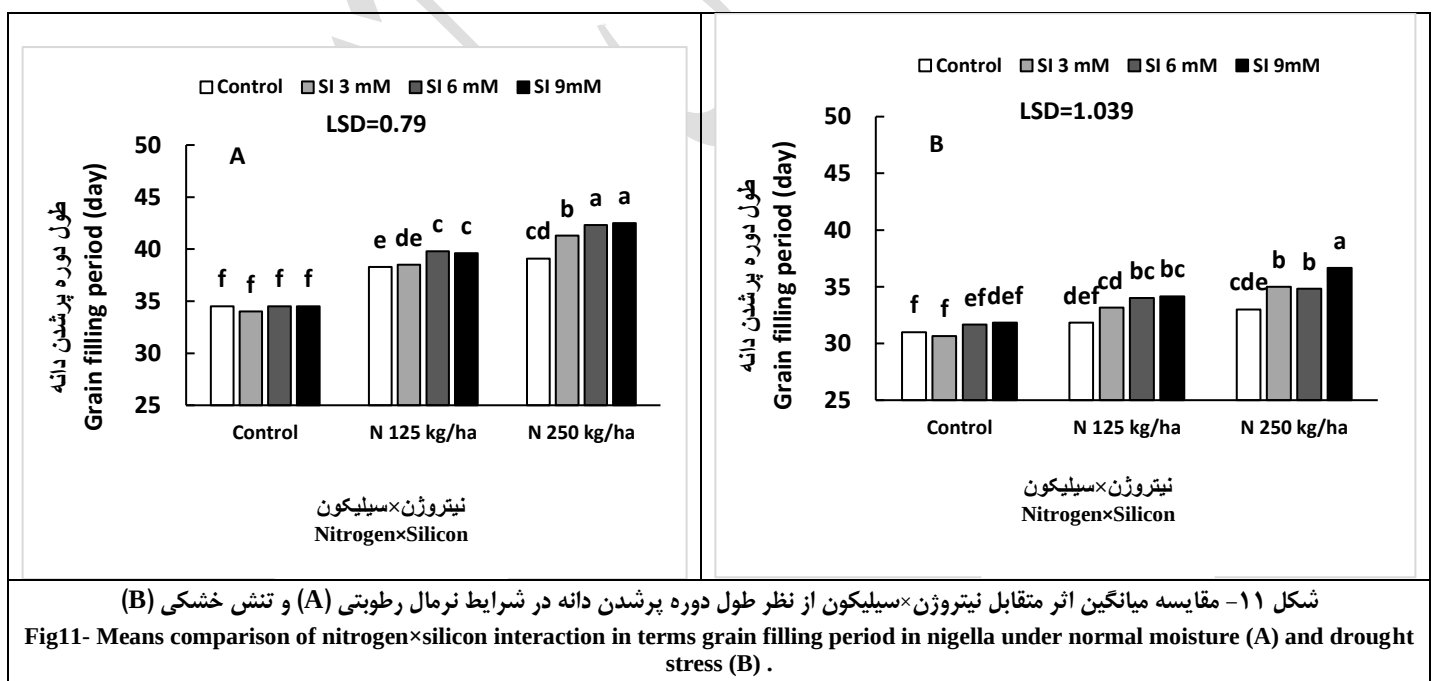
Ranjbar, 2023)



طول دوره پر شدن دانه

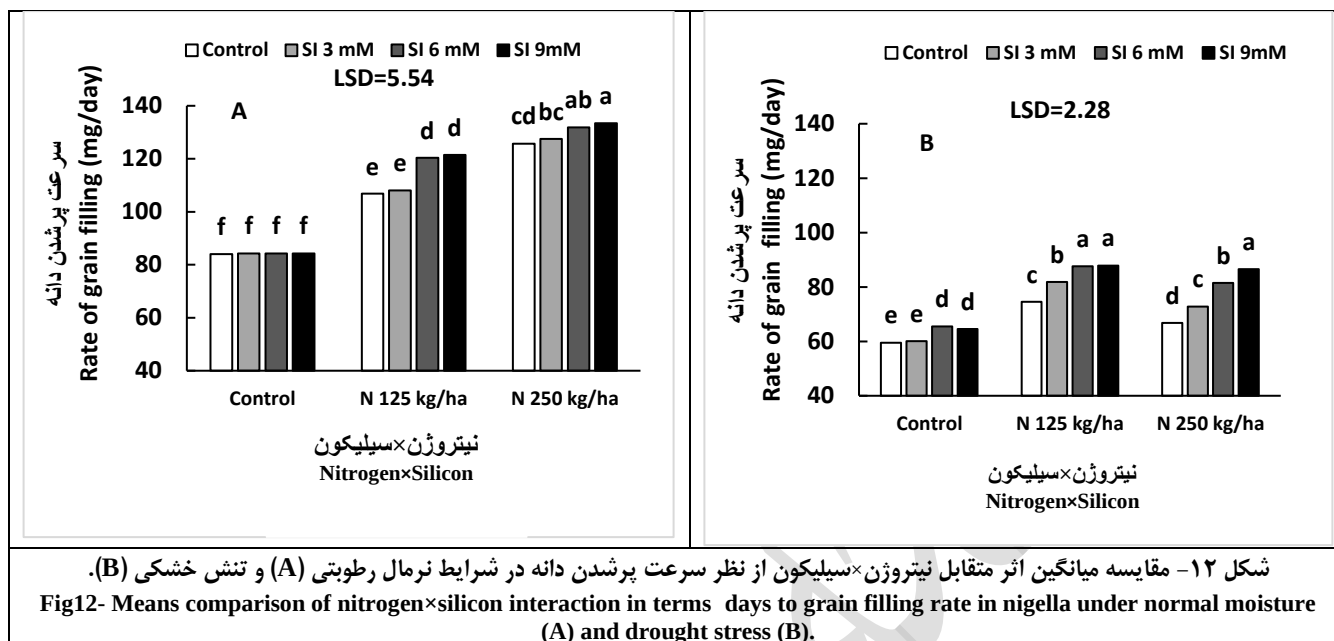
بر اساس نتایج تجزیه واریانس، در شرایط تنش رطوبتی، اثرات سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن×سیلیکون بر طول دوره پر شدن دانه معنی‌دار شدند. در شرایط عدم تنش خشکی، اثر نیتروژن و اثر متقابل نیتروژن×سیلیکون روی این صفت معنی‌دار شد (جدول ۵). در شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی، مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن×سیلیکون نشان داد هنگامی که از سیلیکون استفاده نشد، افزایش نیتروژن سبب افزایش معنی‌دار طول دوره پر شدن دانه شد. بیشترین طول دوره پر شدن دانه در هر دو شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی، از مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره (به ترتیب معادل ۴۲/۵ و ۳۶/۶۶ روز) بدست آمد (شکل ۱۱، A و B). همچنین به هنگام عدم مصرف نیتروژن، بین هیچ‌یک از تیمارهای سیلیکون در هر دو شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی تفاوتی از نظر آماری وجود نداشت. با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در شرایط مطلوب رطوبتی، محلول‌پاشی ۹ میلی‌مولار سیلیکون (۴۲/۵ روز) بیشترین طول دوره پر شدن دانه را به خود اختصاص داد که با محلول‌پاشی ۶ میلی‌مولار سیلیکون تفاوت معنی‌دار نداشت (شکل A ۱۱). 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×محلول‌پاشی ۹ میلی‌مولار سیلیکون (۳۶/۶۶ روز) بدست آمد که با سایر تیمارها از نظر آماری تفاوت معنی‌دار نداشت (شکل B ۱۱). طول دوره پر شدن دانه، فاصله بین شروع گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک دانه است که تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله

تنش خشکی می‌تواند تغییر کند. از بین صفات فنولوژیکی، طول دوره پر شدن دانه نقش مهمی در حفظ وزن دانه دارد (Qhavidel et al., 2023). بر طبق نتایج طباطبایی و همکاران (Tabatabaei, Shakeri & Shahedi, 2013)، تنش خشکی منجر به تسریع در رسیدگی دانه می‌گردد، زیرا گیاه برای تکمیل سیکل رسیدگی خود از مکانیسم فرار استفاده می‌کند که نهایتاً 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 می‌گردد که با نتایج جباری و همکاران (Jabari, Daneshian & Aliabadi Farahani, 2011) مطابقت دارد. در ذرت نتایج مشابهی بدست آمده است که نشان می‌دهد در شرایط کم‌آبی رسیدگی فیزیولوژیک زودتر اتفاق می‌افتد و طول پر شدن دانه (فاصله گرده افشانی تا رسیدگی فیزیولوژیک دانه) کوتاه شده است. 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 شده طول دوره پر شدن دانه می‌شود و به طور معنی‌داری وزن دانه و مؤلفه‌های پر شدن دانه را کاهش می‌دهد (Nouraldin & Sharifi, 2021). Siadat & Khalilzadeh, 2021). بنظر می‌رسد محدودیت آبی تعادل تغذیه‌ای در گیاه را بهم می‌ریزد بنابراین محلول‌پاشی عناصر ریز مغذی می‌تواند 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). محلول‌پاشی سیلیکون با افزایش شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ و هدایت روزنه‌ای، سبب بهبود در طول دوره پر شدن دانه می‌گردد (Seyed sharifi, Seifamiri & Narimani, 2023). در بررسی انجام شده بر روی آفتابگردان مشخص شد 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).



سرعت پرشدن دانه

نتایج بدست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها در شرایط مطلوب رطوبتی و تنش خشکی، نشان دهنده اثر معنی‌دار سال، نیتروژن، سیلیکون و همچنین اثر متقابل نیتروژن×سیلیکون بر سرعت پر شدن دانه بود. (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن×سیلیکون بر سرعت پر شدن دانه در شرایط مطلوب و عدم مصرف سیلیکون نشان داد که با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، بالاترین سرعت پرشدن دانه (۱۲۵/۷ میلی گرم در روز) حاصل شد (شکل A ۱۲). 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) بدست آمد (شکل B ۱۲). در شرایط مطلوب و عدم استفاده از نیتروژن، تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف سیلیکون از نظر سرعت پرشدن دانه وجود نداشت، اما در شرایط تنش خشکی در عدم حضور نیتروژن، محلول پاشی ۶ و ۹ میلی مولار سیلیکون سبب افزایش سرعت پر شدن دانه شدند که با تیمار شاهد (عدم مصرف سیلیکون) و ۳ میلی مولار 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 پرشدن دانه داشت، بطوریکه بیشترین سرعت پرشدن دانه به هنگام مصرف ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن×محلول پاشی ۹ میلی مولار سیلیکون (۱۲۳/۴ میلی گرم در روز) بدست آمد. در شرایط تنش خشکی و مصرف نیتروژن، افزایش غلظت سیلیکون تا ۶ میلی مولار برای ۱۲۵ کیلوگرم نیتروژن و تا ۹ میلی مولار برای ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن، سبب افزایش سرعت پر شدن دانه شد. پر شدن دانه تحت تأثیر دو عامل سرعت و طول دوره پرشدن قرار دارد (Brdar, Marija, kraljevic-Balalic & Borisl, 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 (Forooghi, Biyabani, Rahemi Karizaki & Rassam, Vazhdehfar, Paknejad, Shirani Rad& Ebrahimi, 2022). فروغی و همکاران (2017) در تحقیقی گزارش کردند در تعیین وزن دانه، سرعت پرشدن دانه از طول دوره پرشدن دانه مهم‌تر است و با کاهش طول دوره پرشدن دانه، سرعت پر شدن دانه افزایش می‌یابد. بررسی اثر برهمکنش آبیاری و سطوح مختلف نیتروژن بر روی آفتابگردان نشان داد، 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 ۸ و ۵ 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, Dastoor& (Aynaband, Hassanzade Ghorthapeh, Noormohamadi & Bernousi, 2012). در پژوهش انجام شده توسط دستور و همکاران (2014) Asghari-zakaria, بر روی گندم مشخص شد که سرعت پرشدن دانه تحت شرایط خشکی کاهش یافت، به طوری که در شرایط تنش خشکی با ۹۱/۰ میلی گرم در روز کمترین و در شرایط عدم تنش (۱/۳۳ میلی گرم در روز) بیشترین سرعت پر شدن دانه حاصل شد.



نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در شرایط نرمال رطوبتی و بدون مصرف سیلیکون، کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن بر روی صفتهای مورد بررسی مناسبتر بود، به طوری که بیشترین مقادیر عملکرد دانه (۱۴۵۳ کیلوگرم در هکتار)، تعداد کپسول در بوته (۳۳/۶ کپسول)، تعداد دانه در کپسول (۷۳/۸ دانه)، تعداد دانه در گیاه (۲۵۱۴ دانه)، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک (۱۰۶/۶ روز) و سرعت پرشدن دانه (۱۲۵/۷ میلی گرم در روز) در این سطح از نیتروژن بدست آمد. در صورت عدم مصرف نیتروژن، سیلیکون مؤثر نبود؛ اما با مصرف نیتروژن، محلول پاشی سیلیکون ۶ و ۹ میلی مولار، به طور مشابهی مؤثر واقع شدند. به طور کلی، در شرایط بدون تنش خشکی، اثر متقابل ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن×سیلیکون ۶ میلی مولار تیمار برتر مشخص شد. در شرایط تنش خشکی و بدون مصرف سیلیکون، مصرف ۱۲۵ کیلوگرم نیتروژن مناسبتر 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 ۶ و ۹ میلی مولار به طور مشابهی مناسبتر بودند؛ اما در شرایط مصرف ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن، محلول پاشی سیلیکون ۹ میلی مولار بهتر عمل نمود. با توجه به نتایج بدست آمده، در شرایط تنش خشکی، مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن×محلول پاشی ۹ 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 ۶ میلی مولار برای شرایط بدون تنش خشکی، و محلول پاشی سیلیکون ۹ میلی مولار برای شرایط تنش خشکی پیشنهاد می گردد.

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. 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.
6. Al-aghabary 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>
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. Attarzadeh M, Balouchi H, Rajaie M, Movahhedi Dehnavi M and Salehi A. 2019. Growth and nutrient content of *Echinacea purpurea* as affected by the combination of phosphorus with arbuscular mycorrhizal fungus and *Pseudomonas fluorescens* bacterium under different irrigation regimes. *Journal of Environmental Management*, 231: 182-188. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.040>
10. 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
11. 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). [doi: 10.22067/jcsc.2020.88386](https://doi.org/10.22067/jcsc.2020.88386)
12. Bassim Atta, A., 2003. Some characteristics of *nigella* *Withania somnifera*. *Plant Omics Journal*, 2(2):85-90.
13. 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>
14. Brdar, M.D., Marija, M., kraljevic-Balalic & BorislV,d. (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>
15. 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>
16. 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.
17. 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>

18. 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>
19. 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://dx.doi.org/10.21608/sinjas.2019.79096>
20. 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.
21. 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).
22. 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>
23. 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.
24. 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>
25. 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>
26. Gong, H., X. Zhu, K. Chen, S. Wang, and C. Zhang. 2005. Silicon alleviates oxidative groundnut by potassium application. *Pak. J. Bot.* 38(5), 1373-1380.
27. 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. *J. Irrig.Sci. Eng.* 35(4): 75-82. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.25885952.1391.35.4.8.8>
28. Gottardi, S., Iacuzzo, F., Tomasi, N., Cortella, G., Manzocco, L., Pinton, R., ... & Cesco, S. (2012). Beneficial effects of silicon on hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta* (L.) Laterr) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 56, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.002>
29. 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.
30. 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.
31. 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.
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.). 640-647.
33. Hasegawa, 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>
34. 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>
35. Haj Seyed Hadi, M. R., Darzi, M. T., & Riaz, G. (2016). Black cumin (*Nigella sativa* L.) 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>

36. 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. <https://doi.org/10.13002/jafag4647>
37. 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)
38. 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) No 97 pp: 47-54. (In Persian)
39. Kostopoulou, P., Barbayiannis, N., & Noitsakis, B. (2010). Water relations of yellow sweetclover under the synergy of drought and selenium addition. *Plant and Soil*, 330, 65-71.
40. 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>
41. 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>
42. 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>
43. 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>
44. 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. [doi: 10.22077/escs.2023.5430.2148](https://doi.org/10.22077/escs.2023.5430.2148)
45. 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>
46. 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>
47. 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>
48. Ma, J. F., & Takahashi, E. (2002). Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. *Science*, 275 pp.
49. Ma, J. F., & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in plant science*, 11(8), 392-397.
50. Mahdavi, F., Esmaeili, 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. <https://doi.org/10.22092/ida.2021.352329.322>
51. Majnoon Hosseini, N. & S, Davazdeh Imami. (2013). *Cultivation and Production of Some Medicinal and Spice Crops*. Tehran University Press. 310 pages.
52. Maleki, A., Fazel, S., Naseri, R., Rezaei, K., & Heydari, M. (2014). The effect of potassium and zinc sulfate application on grain yield of maize under drought stress conditions. *Advances in Environmental Biology*, 890-894.
53. 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
54. 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>

55. 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/10.1080/10412905.2000.971203>
56. Mohammadi, P., Sepehri, A., Abutalebian, M. and 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)
57. 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>
58. 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 English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.76772>
59. 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. <https://doi.org/10.22067/jcesc.2021.67258>
60. 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>
61. Paknejad, F., Mjid, E., Nourmohamadi, G., & Vazan, S. (2007). Evaluation of drought Stress on effective traits at accumulative assimilate of grain in different cultivars of wheat. *Journal of Agricultural Science, Islamic Azad University* 13(1):1-12. (In Persian With English Summary)
62. 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://dx.doi.org/10.61186/jcb.15.46.93>
63. 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.
64. Shabanzadeh, S., & Galavi, M. (2011). Effect of micronutrients foliar application and irrigation regimes on agronomic traits and yield of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 4(1), 1-9.
65. 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 English abstract). <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2251.1572>
66. Rezavani-Bidokhti, Sh., Dashtiyani, A., Snjani, S., & Anvrkhvah, 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.
67. 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>
68. 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>
69. 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.
70. 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>
71. Sanglard, L. M., Martins, S. C., Detmann, K. C., Silva, P. E., Lavinsky, A. O., Silva, M. M., ... & 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>
72. 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. *J Crop Breed.* 12(34), 138-150. (In Persian with English abstract). doi:10.29252/jcb.12.34.138
 73. 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). doi: 10.22092/aj.2023.355332.1555
 74. 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
 75. 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.
 76. 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>
 77. Sonobe, K., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., Eneji, A. E., Kobayashi, S., ... & 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>
 78. Sehgal, A., Sita, K., Siddique, K. H., Kumar, R., Bhogireddy, S., Varshney, R. K., ... & 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>
 79. 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]
 80. Tardieu, F. (2005). Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress. *Comptes rendus. Géoscience*, 337(1-2), 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.09.015>
 81. 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.
 82. 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. (in Persian)
 83. Zhu, Y., & Gong, H. (2014). Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 455-472.