



Optimizing Sowing Date and Plant Density to Improve Reproductive Traits and Yield of the Medicinal-Industrial Indigo Plant (*Indigofera tinctoria* L.) in Shushtar County

M. R. Zargaran Khouzani¹, M. H. Gharineh¹, A. Koochekzadeh^{1*}, A. Lotfi Jalalabadi¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

(*- Corresponding author's Email: koochekzadeh@asnrukh.ac.ir)

How to cite this article:

Zargaran Khouzani, M. R., Gharineh, M. H., Koochekzadeh, A., & Lotfi Jalalabadi, A. (2026). Optimizing sowing date and plant density to improve reproductive traits and yield of the medicinal-industrial indigo plant (*Indigofera tinctoria* L.) in Shushtar county. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(1), 115-132. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.93936.1407>

Received: 10 June 2025

Revised: 28 September 2025

Accepted: 29 September 2025

Available Online: 04 October 2025

Introduction

The growing global awareness of the environmental and health risks associated with synthetic chemicals has renewed interest in natural resources for pharmaceuticals, industry, and sustainable dye production. Indigo (*Indigofera tinctoria* L.), a member of the Fabaceae family, has re-emerged as a crop of interest due to its dual medicinal and industrial value. Traditionally cultivated in Iran, indigo leaves yield a stable natural blue pigment widely used in textiles and cultural heritage preservation. Although synthetic dyes largely displaced indigo in the nineteenth century, contemporary ecological and economic challenges have revived its importance as an eco-friendly alternative. Indigo thrives in warm, frost-free environments but is highly sensitive to both cold and heat stress, particularly during reproductive development. In semi-arid regions such as Shushtar County, Khuzestan Province (Iran), high summer temperatures, soil salinity, and water scarcity impose major constraints on cultivation. Sowing date and plant density are key agronomic factors that determine how crops adapt to these stresses by influencing phenological development, reproductive success, and resource use efficiency. This study aimed to assess the effects of sowing date and plant density on reproductive traits and seed yield of indigo under semi-arid conditions to identify optimal management strategies for sustainable production.

Materials and Methods

Two field experiments were conducted over two consecutive seasons (2022–2023) at distinct sites: Shahid Bahonar Agricultural School (Year I) and Shahid Sharafat Greenhouse Complex (Year II). Both experiments employed a split-plot design within a randomized complete block design (RCBD) with three replications. Sowing date was assigned to main plots, and plant density to subplots. In 2022, six sowing dates (April 29, May 19, June 8, June 28, July 18, and August 7) were evaluated in combination with four plant densities (30, 40, 50, and 60 plants m⁻²). Late sowings (July–August) performed poorly and were excluded in 2023, when only the first four dates were tested with the same densities. Seeds of the local Jiroft ecotype, known for resilience in arid environments, were sown directly in sandy loam soils. Initial soil analysis in 2022 indicated alkaline conditions (pH 7.56, EC 2.04 dS m⁻¹), which improved in 2023 (pH 7.18, EC 1.59 dS m⁻¹). After thinning at the 3–4 leaf stage, stands were adjusted to target densities, and manual weeding was conducted throughout the season. Standard agronomic practices were followed, including furrow irrigation and basal fertilization with urea, diammonium phosphate (DAP), and potassium sulfate. Measured traits included pods per plant, seeds per pod, thousand-seed weight (TSW), and seed yield (g m⁻²). Grain yield was harvested from the central subplot area to



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.2025.93936.1407>

avoid border effects. Data were analyzed using ANOVA, least significant difference (LSD) test at 5% probability, correlation analysis, and interaction analyses with SAS v9.4 and SPSS v26.

Results and Discussion

Sowing date imposed a much stronger effect than plant density on reproductive performance and yield ($p < 0.01$). The earliest sowing date (April 29) consistently produced the highest yields: 105.3 g m⁻² in 2022 and 114.2 g m⁻² in 2023. In contrast, the latest sowing (August 7) yielded only 47.5 g/m², representing more than a 50% reduction. Delayed sowing after mid-July exposed plants to severe heat stress during flowering and pod filling, shortening the growing period and sharply reducing reproductive output. Plant density significantly interacted with sowing date ($p < 0.05$). Medium density (40 plants m⁻²) maximized yield by balancing efficient resource use with minimal competition. Higher densities (≥ 60 plants m⁻²) intensified intra-specific competition, reducing yield by 10–12%, particularly under late sowing. Conversely, very low densities (< 30 plants m⁻²) underutilized available resources. Among yield components, pods per plant showed the greatest sensitivity. Under optimal conditions (early sowing, 40 plants m⁻²), plants produced up to 126 pods, but this decreased by 45% with late sowing due to heat-induced pod abortion. Seeds per pod also declined sharply (from 9.8 under early sowing to 5.9 under late sowing), reflecting high-temperature stress during pollination and seed set. In contrast, TSW remained stable (4.42–4.59 g) across treatments, indicating strong genetic control and limited responsiveness to environmental or management factors. Correlation analysis confirmed that seed yield was strongly associated with pods per plant ($r = 0.94$) and seeds per pod ($r = 0.87$), whereas TSW had only a weak relationship ($r = 0.32$). Thus, reproductive structure abundance was the primary driver of yield variability. Year-to-year comparisons demonstrated notable improvements in 2023. Reduced soil salinity (EC decline from 2.04 to 1.59 dS m⁻¹) and lower pH enhanced nutrient uptake and physiological efficiency, supporting greater pod and seed set. Additionally, exclusion of late sowing dates in 2023 minimized exposure to extreme heat stress, further improving performance relative to 2022.

Conclusion

The results highlight the decisive role of sowing date in determining reproductive performance and yield of Indigo under semi-arid conditions. Early sowing (April 29) combined with moderate density (40 plants m⁻²) consistently improved yield and reproductive efficiency, while delayed sowing and high densities markedly reduced performance. The year-to-year improvement further demonstrated the positive contribution of enhanced soil quality to reproductive success. Overall, this study emphasizes that precise agronomic management—particularly early sowing and optimal density—ensures stable and sustainable indigo production in hot, stress-prone environments. Given the growing global demand for natural, eco-friendly dyes and medicinal plants, these findings provide a strong scientific basis for the revival and expansion of indigo cultivation in Iran and similar semi-arid regions.

Keywords: Grain yield, Heat stress, Reproductive traits, Soil quality, Sustainability of production

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۱۱۵-۱۳۲

بهینه‌سازی تاریخ کاشت و تراکم گیاهی به منظور بهبود صفات زایشی و عملکرد گیاه دارویی - صنعتی نیل (*Indigofera tinctoria* L.) در شهرستان شوشتر

محمدرضا زرگران خوزانی^۱، محمدحسین قرینه^۱، احمد کوچک زاده^{۱*}، امین لطفی جلال آبادی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷

چکیده

گیاه دارویی-صنعتی نیل (*Indigofera tinctoria* L.) به دلیل تولید رنگدانه طبیعی ایندیگو کارمین و کاربردهای گسترده دارویی و صنعتی، در گذشته جایگاه ویژه‌ای در کشاورزی ایران به‌ویژه در شوشتر، دزفول و رامهرمز داشته است. با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و تمایل جهانی به جایگزینی رنگ‌های مصنوعی با منابع طبیعی، اهمیت احیای کشت آن دوباره آشکار شده است. به منظور بررسی تأثیر تاریخ و تراکم کاشت بر صفات زایشی این گیاه، دو آزمایش مستقل طی سال‌های زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ در شهرستان شوشتر و در قالب طرح کرت‌های خردشده برپایه بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در سال اول، شش تاریخ کاشت (۹ و ۲۹ اردیبهشت، ۱۸ خرداد، ۷ و ۲۷ تیر و ۱۶ مرداد) و چهار تراکم (۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ بوته در مترمربع) بررسی گردید. با توجه به کاهش شدید عملکرد در تیمارهای دیرکاشت (تیر و مرداد) ناشی از تنش گرمایی و کوتاه شدن دوره رشد، این دو تاریخ در سال دوم حذف شد و آزمایش با چهار تاریخ کاشت بهینه و همان تراکم‌ها تکرار گردید. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS ۹/۴ و SPSS و از طریق تحلیل واریانس (ANOVA)، آزمون LSD و همبستگی پیرسون تجزیه شدند. نتایج نشان داد که تاریخ کاشت اثر قوی‌تری نسبت به تراکم دارد. بیشترین عملکرد دانه از کاشت زود هنگام (۹ اردیبهشت) در تراکم ۴۰ بوته در مترمربع به دست آمد (۱۰۵/۳ و ۱۱۴/۲ گرم در مترمربع در سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲). تأخیر در کاشت موجب کاهش ۳۰ تا ۵۰ درصدی عملکرد شد. تراکم‌های بالاتر از ۴۰ بوته نیز به دلیل رقابت درون‌گونه‌ای عملکرد را ۱۰ تا ۱۲ درصد کاهش دادند. عملکرد دانه همبستگی بالایی با تعداد غلاف در بوته ($r=0.94$) و تعداد دانه در غلاف ($r=0.87$) داشت، درحالی‌که وزن هزار دانه پایدارتر بود. برتری سال دوم علاوه بر حذف تیمارهای دیرکاشت، بهبود شرایط خاک شامل کاهش شوری (۲۲ درصد) و اسیدیته (۵ درصد) نیز بود. در مجموع، کاشت زود هنگام همراه با تراکم متوسط (۴۰ بوته در مترمربع)، راهبردی مؤثر برای دستیابی به عملکرد بالا و پایدار نیل در شرایط گرم و نیمه‌خشک محسوب می‌شود و می‌تواند مبنایی علمی برای توسعه کشاورزی پایدار و احیای این گیاه ارزشمند باشد.

واژه‌های کلیدی: پایداری تولید، تنش گرمایی، صفات زایشی، عملکرد دانه، کیفیت خاک

مقدمه

به‌عنوان گزینه‌های جدیدی برای توسعه کشاورزی پایدار تسهیل کرده است. یکی از این گیاهان، نیل (*Indigofera tinctoria* L.) است که به‌عنوان گیاهی دارویی و صنعتی از خانواده بقولات (Fabaceae) شناخته می‌شود (Zargaran Khouzani et al., 2022).

نیل، سابقه‌ای طولانی کشت و کار در ایران دارد و به‌ویژه از برگ‌های آن رنگدانه آبی رنگ ایندیگو استخراج می‌شود. این رنگدانه دارای ثبات بالایی است و در رنگرزی پارچه و اشیاء تاریخی کاربرد دارد. متأسفانه این گیاه در سایه ظهور رنگ‌های شیمیایی مصنوعی در قرن نوزدهم به فراموشی سپرده شد، اما استفاده از رنگ‌های طبیعی به‌جای رنگ‌های مصنوعی در سال‌های اخیر مجدداً مورد توجه قرار گرفته است (Zargaran Khouzani et al., 2019). منشأ نیل به

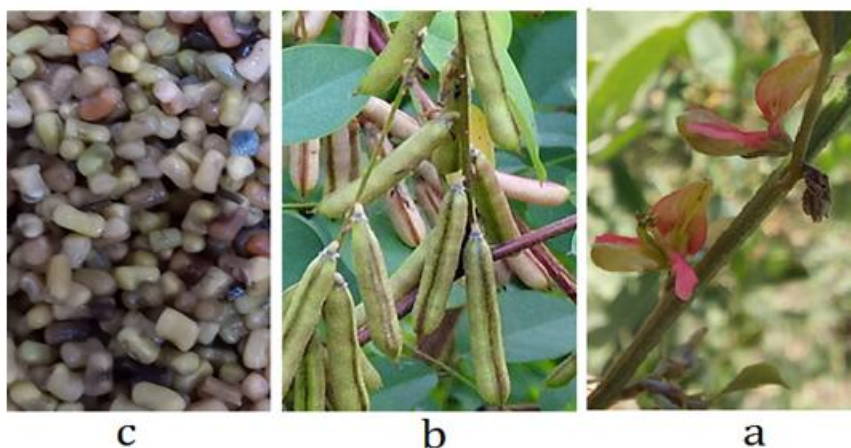
در سال‌های اخیر، با توجه به آگاهی بیشتر جوامع نسبت به عوارض منفی مواد شیمیایی و فرآورده‌های مصنوعی، تمایل به استفاده از منابع طبیعی و گیاهی به‌ویژه در حوزه‌های دارویی، صنعتی و رنگرزی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. این تغییر سبک زندگی و تمایل به‌سوی پایداری و سلامت، کشت گیاهان خاصی که پیش‌تر تنها در مناطق طبیعی و به‌صورت خودرو یافت می‌شدند را

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران

(*) نویسنده مسئول: koochekzadeh@asnruk.ac.ir (Email:)

برای آن نیستند. دمای متوسط مناسب برای رشد نیل حدود ۳۰ درجه سانتی گراد است و حداقل دمای لازم برای جوانه زنی بذر آن بین ۱۸ تا ۲۰ درجه سانتی گراد گزارش شده است (Modafeh Behzadi et al., 2019). همچنین این گیاه به یک دوره بدون یخبندان به طول ۱۲۰ روز نیاز دارد و دماهای زیر صفر می توانند به آن آسیب جدی وارد کنند (شکل ۱).

آسیای شرقی بازمی گرد (Sarhadi et al., 2014)، اما امروزه در مناطق گرم و نیمه مرطوب جنوب شرقی آسیا، آفریقا و برخی نقاط اروپا نیز کشت می شود. این گیاه به طور عمده در مناطق حاره ای و نیمه حاره ای رشد می کند و بهترین عملکرد را در شرایط آب و هوایی گرم نشان می دهد. نیل تا ارتفاع ۱۲۵۰ متری از سطح دریا قابلیت کشت دارد، اما مناطق با ابرناکی زیاد در دوره رشد، شرایط مناسبی



شکل ۱- ریخت شناسی اجزای زایشی گیاه نیل: (a) گل آذین، (b) غلاف، (c) بذر

Figure 1- Morphology of reproductive parts in indigo (*Indigofera tinctoria* L.): (a) Inflorescence, (b) Pod, (c) Seed

دارد، تراکم بوته است. تراکم مناسب به عنوان یکی از اصول بنیادین زراعت هر محصول، تأثیر مستقیمی بر نحوه استفاده از منابع محیطی مانند نور، آب و مواد غذایی دارد. افزایش تراکم بیش از حد مطلوب منجر به رقابت بیشتر بین بوته ها شده و در نهایت عملکرد را کاهش می دهد، درحالی که کاهش تراکم از حد بهینه باعث استفاده ناکافی از منابع موجود و در نتیجه کاهش بهره وری می شود (Diwan et al., 2018; Martin & Deo, 2001).

خرمدل و همکاران (Khorramdel et al., 2017) در تحقیقی روی اثر سطوح مختلف کود دامی و تراکم بوته گیاه نیل دریافتند که تأثیر این عوامل بر صفاتی زایشی معنی دار بود. مدافع بهزادی و همکاران (Modafeh Behzadi et al., 2019) نشان دادند که تراکم بوته تأثیر معنی داری بر صفات زایشی گیاه دارویی نیل داشته و تراکم مطلوب، ۴۵ بوته در مترمربع تعیین شد. در آزمایشی که توسط نیکبخت راینی (Nikbakht Rayini, 2012) در بررسی اثر تراکم بر عملکرد بذر نیل اجرا گردید، گزارش شد که با افزایش تراکم بوته در واحد سطح، عملکرد بذر به دلیل افزایش تعداد نیام و تعداد دانه در نیام به صورت خطی افزایش یافت.

نیل از نظر شیمیایی دارای ترکیبات متنوعی است که شامل آلکالوئیدها، گلیکوزیدها، فلاونوئیدها، تانن ها، ترکیبات فنولیک، اسیدهای آمینه، کربوهیدرات ها و مواد معدنی است. مهم ترین ماده

در مدیریت زراعی این گیاه، تعیین زمان مناسب کاشت یکی از مهم ترین عوامل مؤثر بر رشد، نمو و عملکرد آن محسوب می شود. کاشت به موقع به بهره برداری بهینه از شرایط محیطی، مهار آفات و بیماری ها، کاهش آلودگی علف های هرز و همچنین هماهنگی فصلی گل دهی با دمای مطلوب کمک می کند (Ullah & Honermeier, 2013). مدافع بهزادی و همکاران (Modafeh Behzadi et al., 2019) در تحقیق خود روی گیاه نیل در شهرستان بهم نشان دادند که تاریخ کاشت ۱۵ فروردین، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد و با تأخیر در کاشت از ۱۵ فروردین به ۲۹ اردیبهشت، تعداد غلاف در بوته ۶۷ درصد کاهش یافت.

همچنین انصوری و همکاران (Ansori et al., 2016) در پژوهشی نیز روی گیاه نیل نشان دادند که تاریخ کاشت زود هنگام به دلیل طولانی تر بودن دوره رشد و بیشینه ماده خشک تجمعی، سرعت رشد را به ترتیب ۴/۴۱ و ۳/۵۹ برابر بیشتر از تاریخ کاشت ۲۷ تیر می کند. همچنین کاشت زودتر، عملکرد زیستی را ۴۷/۲۷ درصد افزایش داد. زمان کاشت به عنوان یکی از اساسی ترین تصمیمات مدیریتی در کشاورزی تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند طول روز، دما و رطوبت نسبی قرار دارد و نقش برجسته ای در تعیین طول دوره رشد رویشی و زایشی گیاه دارد (Khichar & Niwas, 2006).

عامل دیگری که در دستیابی به عملکرد بهینه گیاه نیل اهمیت

جغرافیایی ۴۸ درجه و ۷۴ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۲ و ۰۷ دقیقه) و سال ۱۴۰۲ در مجتمع گلخانه‌ای شهید شرافت شوشتر (طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۷۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۲ و ۰۹ دقیقه) به اجرا درآمده است (شکل ۲).

شوشتر با مساحت ۲۴۳۶ کیلومترمربع و طول جغرافیایی بین ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۲ دقیقه و عرض جغرافیایی بین ۳۱ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۲۶ دقیقه، با میانگین دما ۲۷/۲ درجه سلسیوس و متوسط بارندگی سالانه ۳۲۲ میلی‌متر (شکل ۳ و ۴)، به‌عنوان یکی از شهرستان‌های استان خوزستان، با شرایط اقلیمی خاص خود، بستر مناسبی برای پرورش گیاهان زراعی به‌ویژه نیل فراهم می‌کند.

طرح آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با سه تکرار اجرا شد. این طرح به‌منظور کنترل تغییرات ناشی از ناهمگنی‌های محیطی موضعی از جمله تغییرات جزئی در بافت خاک، شیب زمین، رطوبت محلی و دسترسی به نور خورشید انتخاب گردید. بررسی‌های اولیه نشان داد که در هر دو مکان آزمایش (هنرستان کشاورزی شهید باهنر و مجتمع گلخانه‌ای شهید شرافت)، شرایط خاک و توپوگرافی در جهت‌های خاصی (به‌ویژه شرق به غرب) دارای الگوی شیب‌داری بوده است. بنابراین، با تقسیم هر سال آزمایش به سه بلوک مستقل، اثرات این ناهمگنی‌های محیطی درون بلوک‌ها کاهش یافته و تنها تغییرات ناشی از تیمارهای آزمایشی (تاریخ کاشت و تراکم) مورد ارزیابی قرار گرفت.

مؤثره این گیاه، ایندیگو است که یک متابولیت ثانویه طبیعی محسوب می‌شود. این رنگدانه از گلیکوزیدهایی مانند ایندیکان تشکیل می‌شود که تحت واکنش‌های آنزیمی و اکسیداسیونی به ایندیگو آبی و ایندیروبین قرمز رنگ تبدیل می‌شوند (Kun Lestari, 1998; Sales et al., 2006). این ترکیبات علاوه‌بر کاربرد رنگرزی، دارای خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی و دارویی نیز هستند (Chanayath et al., 2002).

با وجود اینکه استفاده از رنگ‌های مصنوعی در قرون اخیر، جایگاه نیل را در صنایع رنگرزی کاهش داده است، ولی با توجه به افزایش تقاضا برای رنگ‌های طبیعی و دوستدار محیط زیست، این گیاه مجدداً می‌تواند به‌عنوان یک منبع مهم اقتصادی و فرهنگی مطرح شود (Zargaran Khouzani & Daei Naseri, 2025). همچنین با توجه به افزایش جهانی تمایل به گیاهان دارویی و کیفیت بالای گیاهان ایرانی، فرصت‌های مناسبی برای توسعه کشت و صادرات گیاه نیل در کشور فراهم شده است. بنابراین، بررسی دقیق تأثیر عوامل زراعی مانند تاریخ کاشت و تراکم بوته در شرایط اقلیمی مختلف می‌تواند به شناسایی بهترین روش‌های کشت این گیاه دارویی-صنعتی کمک کند و در جهت بهینه‌سازی عملکرد کمی و کیفی آن، گام مؤثری برداشته شود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر زمان کاشت و تراکم بوته بر صفات زایشی گیاه دارویی-صنعتی نیل در شهرستان شوشتر طی دو سال ۱۴۰۱ در هنرستان کشاورزی شهید باهنر شوشتر (طول



ب) (b)



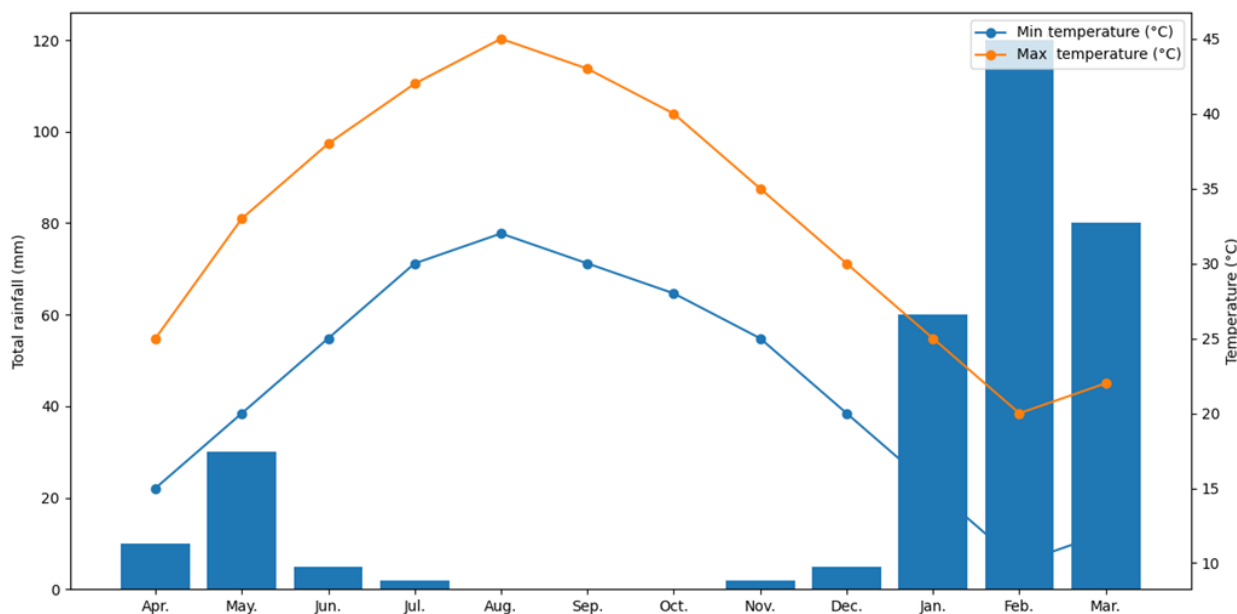
الف (a)

شکل ۲- تصویر هوایی محل‌های اجرای طرح در شهر شوشتر

Figure 2- Aerial view of the experimental sites in Shushtar city

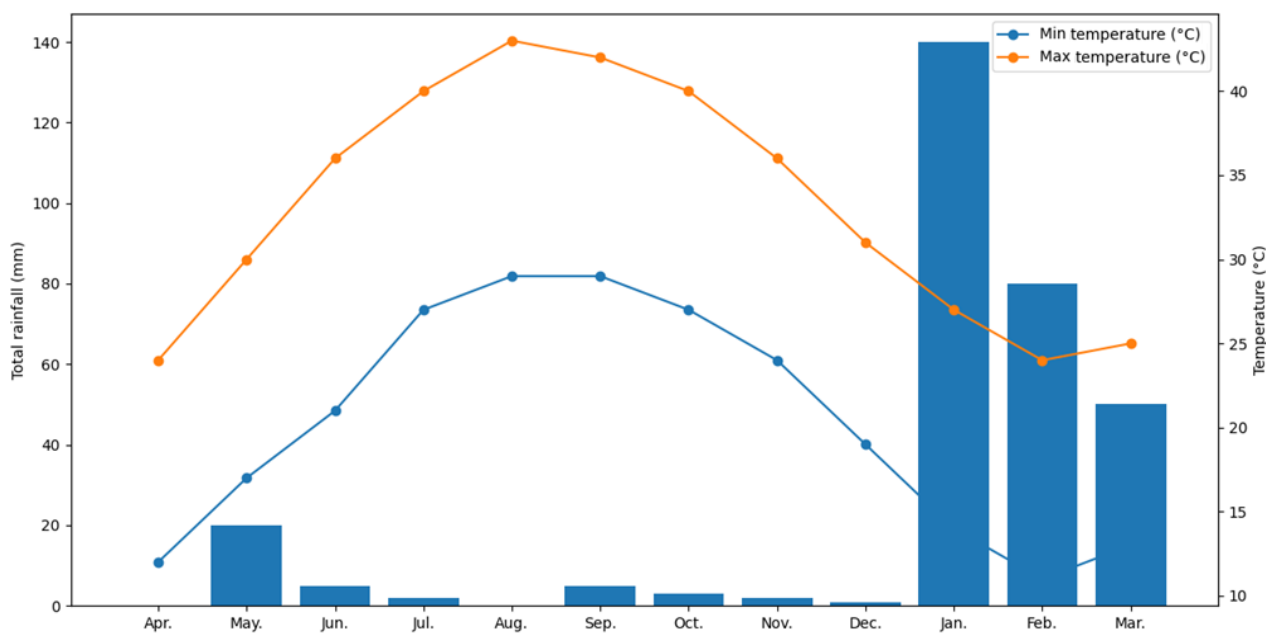
الف: سال ۱۴۰۱ (هنرستان کشاورزی شهید باهنر)، ب: سال ۱۴۰۲ (مجتمع گلخانه‌ای شهید شرافت)

(a): Year 2022 (Shahid Bahonar Agricultural School), b): Year 2023 (Shahid Sharafat Greenhouse Complex)



شکل ۳- میانگین دمای حداقل و حداکثر و میزان بارندگی در سال ۱۴۰۱ شهرستان شوشتر

Figure 3- Average minimum and maximum temperatures and rainfall in 2022 in Shushtar county



شکل ۴- میانگین دمای حداقل و حداکثر و میزان بارندگی در سال ۱۴۰۲ شهرستان شوشتر

Figure 4- Average minimum and maximum temperatures and rainfall in 2023 in Shushtar county

عملیاتی دشوار و پرخطا می‌باشد. در مقابل، تنظیم تراکم گیاهی تنها با کنترل فاصله بین بوته‌ها در مرحله کاشت یا تنک‌سازی اولیه امکان‌پذیر است و به‌راحتی در سطح زیرکرت‌ها قابل اجرا است. در سال اول آزمایش، عامل اصلی شامل شش تاریخ کاشت (۹ و ۲۹ اردیبهشت، ۱۸ خرداد، ۷ و ۲۷ تیر و ۱۶ مرداد) و عامل فرعی

در این طرح، تاریخ کاشت به‌عنوان عامل اصلی (Main plot) و تراکم گیاهی به‌عنوان عامل فرعی (Subplot) در نظر گرفته شد. این انتخاب براساس ماهیت عملیاتی تیمارها صورت گرفت، زیرا تغییر تاریخ کاشت مستلزم اجرای عملیات کشت در زمان‌های مجزا و غیرهمزمان است که اجرای آن در واحدهای کوچک (زیرکرت) از نظر

اصلاح ساختاری با هدف بهینه‌سازی طرح آزمایشی و تمرکز بر تیمارهای مؤثر انجام گرفت.

در نتیجه، آزمایش در سال دوم با چهار تاریخ کاشت بهینه (۹ و ۲۹ اردیبهشت، ۱۸ خرداد و ۷ تیر) و چهار سطح تراکم بوته (۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ بوته در مترمربع) به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار اجرا شد. این رویکرد تطبیقی، امکان بررسی دقیق‌تر اثرات تیمارهای مؤثر بر عملکرد گیاه نیل را در شرایط اقلیمی منطقه فراهم کرد.

برای ارزیابی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌برداری از لایه ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک، به‌صورت ترکیبی و منظم-تصادفی، پیش از اجرای تیمارهای آزمایشی (قبل از کاشت) در هر سال انجام شد. در هر بلوک آزمایشی، پنج نمونه نقطه‌ای براساس الگوی W (شکل ۵) جمع‌آوری و پس از اختلاط، یک نمونه ترکیبی (Composite Sample) تشکیل گردید. بدین ترتیب، سه نمونه ترکیبی مستقل (یکی در هر بلوک) در هر سال برای تحلیل آزمایشگاهی تهیه شد. این روش نمونه‌برداری مطابق با استانداردهای بین‌المللی FAO و USDA بوده و نماینده بودن داده‌های خاک از کل سطح آزمایش را تضمین می‌کند.

آنالیز نمونه‌ها در آزمایشگاه آب و خاک شوشتر انجام شد و مقادیر گزارش‌شده در **جدول ۱ و ۲**، میانگین سه نمونه ترکیبی را نشان می‌دهند که وضعیت کلی خاک منطقه را در آغاز هر سال نمایندگی می‌کنند.

در سال اول و دوم (۱۴۰۱-۱۴۰۲)، آماده‌سازی بستر کشت دو ماه قبل از تاریخ کاشت اول به‌ترتیب در اسفند ماه سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ آغاز شد و شامل دو نوبت شخم عمود بر هم، تسطیح زمین و ایجاد جوی‌های اصلی و فرعی بود. ابعاد کرت‌ها فرعی ۳×۵ متر با فاصله دو ۲ متر بین کرت‌های اصلی و یک متر بین کرت‌های فرعی در نظر گرفته شد و فواصل کاشت براساس تراکم‌های مختلف تنظیم گردید.

شامل چهار سطح تراکم بوته (۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ بوته در هر مترمربع) در نظر گرفته شد. انتخاب طرح کرت‌های خردشده به‌دلیل تفاوت در ماهیت اجرایی تیمارها صورت گرفت؛ به‌گونه‌ای که تاریخ کاشت به‌عنوان عامل اصلی انتخاب شد، چرا که تغییر مکرر تاریخ کاشت در واحدهای آزمایشی کوچک به لحاظ عملیاتی دشوار و زمان‌بر بوده و نیاز به تفکیک فضایی و زمانی بزرگ‌تری دارد. در مقابل، تراکم بوته به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد، زیرا تنظیم و اجرای دقیق آن در سطح زیرکرت‌های کوچک‌تر بدون دخالت در تیمارهای دیگر و با دقت بالا امکان‌پذیر است. این ساختار طراحی آزمایشی نه‌تنها از نظر اجرای عملیات کشت و مدیریت تیمارها بهینه بود، بلکه از دیدگاه تحلیل آماری نیز با توجه به تفکیک مناسب عوامل با سطوح مختلف دسترسی و کنترل، منجر به افزایش دقت و اعتبار نتایج آزمایش گردید.

در سال اول آزمایش، به‌منظور اکتشاف محدوده بهینه زمان کاشت نیل در شرایط اقلیمی شوشتر، گستره‌ای از تیمارهای تاریخ کاشت (از کاشت‌های بسیار زود هنگام تا بسیار دیر هنگام) اعمال شد. این پژوهش با هدف شناسایی محدوده مناسب کاشت و بررسی تنش‌های محیطی به‌ویژه گرما و کوتاهی دوره رشد طراحی گردید. بر این اساس، شش تاریخ کاشت از اردیبهشت تا مرداد ماه اعمال شد تا طیف کامل پاسخ گیاه به تنش‌های محیطی (به‌ویژه گرما و کوتاه شدن دوره رشد) بررسی گردد. تحلیل داده‌های سال اول نشان داد که دو تاریخ کاشت دیر هنگام (۲۷ تیر و ۱۶ مرداد) به‌دلیل قرارگیری گیاه در معرض دمای بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در مراحل حساس گل‌دهی و پر شدن دانه، منجر به کاهش بیش از ۵۰ درصدی عملکرد و سقوط گسترده غلاف‌ها شدند و از نظر زراعی و اقتصادی توجیه‌پذیر نبودند.

با توجه به این یافته‌ها، برای افزایش دقت آماری، کاهش خطای آزمایش و تمرکز بر تیمارهای وعده‌بخش، در سال دوم (سال ۱۴۰۲) تصمیم آگاهانه‌ای به‌منظور حذف این دو تاریخ کاشت دیر هنگام (بدون حذف داده‌های سال اول از تحلیل‌های اکتشافی) اتخاذ شد. این

Field layour (split.plot RCBD)					
Rep 1.	.	.	.	.	.
Rep 2.	.	.	.	.	.
Rep 3.	.	.	.	.	.

شکل ۵- نقاط نمونه‌برداری خاک در سه تکرار (بلوک) با استفاده از الگوی W به‌صورت تصادفی

Figure 5- Layout of soil sampling points in three randomized blocks using the W-pattern

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از کاشت (عمق ۳۰-۰ سانتیمتر) در سال اول

Table 1- Physical and chemical properties of soil before planting (0-30 cm depth) in the first year

اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	نیترژن کل Total N (%)	فسفر قابل جذب Available P (mg kg ⁻¹)	پتاسیم قابل جذب Available K (mg kg ⁻¹)	رس Clay (%)	لای Silt (%)	ماسه Sand (%)
7.56	2.04	0.20	7	480	13	48	39

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از کاشت (عمق ۳۰-۰ سانتیمتر) در سال دوم

Table 2- Physical and chemical properties of soil before planting (0-30 cm depth) in the second year

اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	نیترژن کل Total N (%)	فسفر قابل جذب Available P (mg kg ⁻¹)	پتاسیم قابل جذب Available K (mg kg ⁻¹)	رس Clay (%)	لای Silt (%)	ماسه Sand (%)
7.18	1.59	0.047	4	430	13	48	39

کوددهی و جمع‌آوری داده‌ها) به‌صورت استاندارد و یکسان در تمام تیمارها انجام شد.

در بخش ارزیابی صفات زایشی، اندازه‌گیری اجزای عملکرد نقش مهمی در درک توانایی تولیدمثلی و عملکرد نهایی گیاه نیل ایفا می‌کند. صفات مورد مطالعه شامل تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه و عملکرد دانه بودند. از هر کرت فرعی (۳×۵ مترمربع)، ۱۰ بوته به‌صورت تصادفی-سیستماتیک برای اندازه‌گیری صفات زایشی انتخاب شدند. اندازه نمونه (n=۱۰) براساس تحلیل توان آماری (Power Analysis) و تجربه مطالعات مشابه تعیین گردید. در آزمایش‌های پایلوت و مطالعات مشابه مشخص شد که با ۱۰ بوته، واریانس صفات زایشی (مانند تعداد غلاف و دانه در غلاف) به اندازه کافی پایدار می‌شود. بر این اساس و با توجه به قانون حد مرکزی و برآورد میانگین جامعه، نمونه‌های ۱۰ تایی در شرایط همگنی کرت‌ها (با تنک‌سازی و مدیریت یکسان) کافی برای تخمین قابل اعتماد میانگین هستند. اندازه نمونه با مطالعات مشابه در گیاهان دارویی مانند گیاه نیل (Modafeh Behzadi et al., 2019)، گیاه بادرشبو (*Dracocephalum moldavica* L.) (Zeynali Charkandi et al., 2021) و گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) (Farzaghy & Monemizadeh, 2014) که از ۵ تا ۱۲ بوته استفاده کرده‌اند، سازگار است. تعداد غلاف و دانه در بوته با شمارش مستقیم و محاسبه میانگین تعیین گردید. برای اندازه‌گیری وزن هزار دانه، دو نمونه ۱۰۰۰ دانه به‌صورت تصادفی از بذر جمع‌آوری‌شده از هر کرت فرعی انتخاب و وزن‌گیری شد و میانگین آن‌ها به‌عنوان مقدار نهایی گزارش گردید؛ این روش مطابق با دستورالعمل‌های بین‌المللی آزمایشگاه‌های تجزیه بذر (ISTA) است و با کاهش خطای شمارش و ارزیابی تکرارپذیری، دقت و اعتبار اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد. به‌منظور اندازه‌گیری عملکرد دانه، یک ناحیه نماینده به مساحت سه

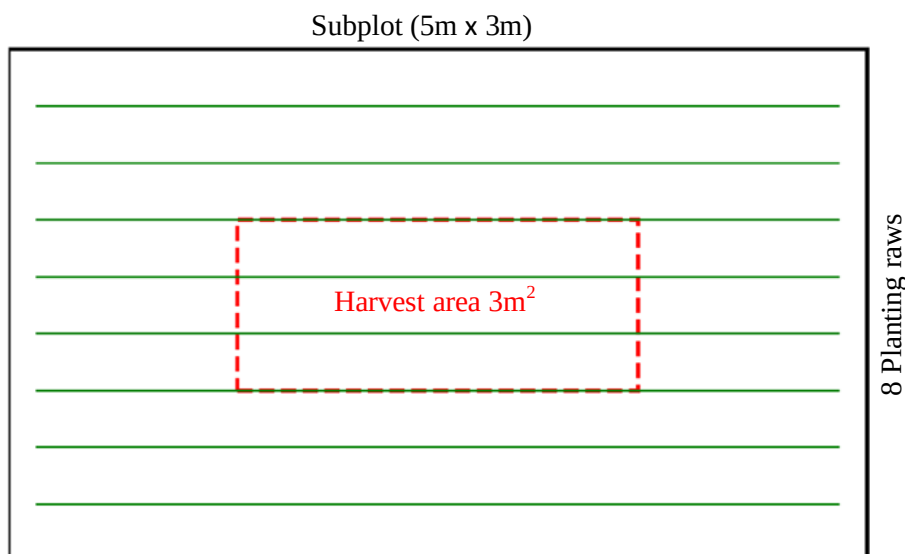
بذرهای مورد استفاده از توده شهر جیرفت تهیه و به‌صورت دستی و برنامه‌ریزی‌شده در تاریخ‌های تعیین‌شده کاشته شدند. اگرچه تهیه بذر از منطقه کاشت ایده‌آل است، اما در عمل، عدم وجود بذر این گیاه در شوشتر و وجود یک توده مرجع معتبر (جیرفت) با سازگاری بوم‌شناختی بالا، این انتخاب را منطقی و علمی کرد. استفاده از یک توده واحد در کل آزمایش، اثر عامل ژنتیکی را کنترل و از تداخل آن با اثر تیمارهای زراعی جلوگیری می‌کند. بنابراین، تفاوت‌های مشاهده‌شده در صفات زایشی و عملکرد، ناشی از تیمارهای تاریخ کاشت و تراکم بوده و نه تغییر در توده ژنتیکی. تمام بذرهای به‌صورت دستی و در یک روز مشخص برای هر تاریخ کاشت کاشته شدند.

در هر تاریخ کاشت، بذرهای با تراکم اولیه بالاتر از حد نهایی (۸۰-۷۰ بوته در مترمربع) کاشته شدند تا از اثرات تلفات جوانه‌زنی جلوگیری شود. پس از استقرار کامل گیاهچه‌ها (در مرحله ۳-۴ برگی)، عملیات تنک‌سازی به‌صورت دستی انجام شد تا تراکم نهایی به مقادیر ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ بوته در مترمربع برسد. این روش (کاشت متراکم اولیه + تنک‌سازی) یک روش استاندارد در تحقیقات مزرعه‌ای است و اطمینان حاکی از تحقق دقیق تراکم‌های برنامه‌ریزی‌شده را فراهم می‌کند. مهار علف‌های هرز به‌صورت دستی انجام شد.

آبیاری به‌روش کرتی و براساس نیاز آبی گیاه انجام شد، به‌طوری‌که در مراحل ابتدایی رشد، آبیاری هر ۷ تا ۱۰ روز یک بار و در دوره گل‌دهی و پر شدن دانه هر ۵ تا ۷ روز یک بار صورت گرفت. همچنین کوددهی شیمیایی شامل ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار آمونیوم فسفات و ۵۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم سولفات بود که کود اوره به‌صورت پایه و سرک (در دو مرحله رشد رویشی و قبل از گل‌دهی) اعمال گردید. آزمایش در دو سال متوالی و در دو مکان مشابه با سه تکرار اجرا شد تا اثرات سال و مکان نیز قابل ارزیابی باشد. تمامی مراحل اجرایی (آماده‌سازی بستر، کاشت، آبیاری،

نمونه‌برداری) و امکان‌پذیری عملیاتی تعیین گردید و با توجه به نسبت محیط به مساحت پایین‌تر، اثرات حاشیه‌ای را نسبت به اشکال مربعی یا مستطیلی با عرض بیشتر کاهش می‌دهد (شکل ۶).

مترمربع (یک متر عرض $\times$ سه متر طول) از بخش میانی هر کرت فرعی و پس از حذف یک متر اول و آخر به عنوان اثر حاشیه انتخاب شد؛ این ابعاد براساس تعادل بین دقت آماری (کاهش واریانس



شکل ۶- ابعاد کرت فرعی، چیدمان خطوط کاشت و موقعیت بخش نمونه‌برداری صفات زایشی

Figure 6- Illustration of the dimensions of the sub-plot, planting rows, and location of sampling for reproductive traits

مشابهی داشت، اما مقادیر مطلق بالاتر بودند؛ به طوری که در تاریخ ۹ اردیبهشت، عملکرد به $104/8$ گرم بر مترمربع رسید (جدول ۶). این بهبود عملکرد در سال دوم می‌تواند ناشی از بهبود شرایط خاکی باشد، کاهش هدایت الکتریکی (از $2/04$ دسی‌زیمنس بر متر به $1/59$ دسی‌زیمنس بر متر) و کاهش pH (از $7/56$ به $7/18$) (جدول‌های ۱ و ۲) ممکن است تنش شوری را کاهش داده و رشد گیاه و جذب عناصر غذایی را بهبود بخشد.

تراکم ۴۰ بوته در مترمربع در هر دو سال، بالاترین عملکرد را تولید کرد ($85/3$ و $96/5$ گرم بر مترمربع) (جدول‌های ۷ و ۸) و تحلیل اثر متقابل نشان داد که حداکثر عملکرد در تیمار ۹ اردیبهشت و تراکم ۴۰ به ترتیب به مقدار $105/3$ گرم بر مترمربع (جدول ۹) و $114/2$ گرم بر مترمربع (جدول ۱۰) حاصل شد. این نتایج بیانگر آن است که ترکیب بهینه زمانی و مکانی کاشت، کلید افزایش عملکرد است. از نظر همبستگی، عملکرد دانه ضریب همبستگی بسیار بالا و معنی‌داری با غلاف در بوته ($r = 0/94$) و با دانه در غلاف نیز همبستگی قوی و معنی‌داری ($r = 0/87$) دارد (شکل ۷). این امر نشان می‌دهد که افزایش تعداد غلاف و دانه در غلاف، به طور مستقیم و به طور قوی بر افزایش عملکرد دانه تأثیر می‌گذارد، درحالی که با وزن هزار دانه همبستگی ضعیف و غیرمعنی‌داری دارد.

داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزارهای آماری تحلیل گردید تا الگوی بهینه کشت برای شرایط اقلیمی منطقه تعیین شود. اصلاحات در سال دوم، امکان بررسی دقیق‌تر اثر متقابل تاریخ کاشت، تراکم و تغذیه را فراهم آورد و دقت نتایج را به میزان قابل توجهی افزایش داد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها در دو سال متوالی با استفاده از روش تجزیه واریانس (ANOVA) انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت. همچنین اثر متقابل متغیرها مورد تحلیل قرار گرفت. تمامی تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS v9.4 و SPSS v26 انجام شد و رسم نمودارها به وسیله نرم‌افزار Matplotlib انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که عملکرد دانه، از مهم‌ترین شاخص‌های زایشی در گیاهان زراعی و دارویی (Ydyrys et al., 2024) تحت تأثیر معنی‌دار تاریخ کاشت، تراکم و اثر متقابل آن‌ها در هر دو سال آزمایش (1401 و 1402) قرار داشت ($p < 0/01$) (جدول‌های ۳ و ۴). در سال 1401 ، بیشترین عملکرد $95/7$ گرم بر مترمربع در تاریخ ۹ اردیبهشت و کمترین مقدار $47/5$ گرم بر مترمربع در ۱۶ مرداد مشاهده شد (جدول ۵). در سال 1402 نیز روند

اصول اکوفیزیولوژیک توسعه گیاهان همسو است؛ یعنی تشکیل بیشتر اندام‌های زایشی (غلاف‌ها) و فراهم بودن زمان کافی برای پر شدن دانه‌ها، عوامل به‌طور مستقیم بر عملکرد نهایی مؤثر هستند (Rezvani Moghaddam & Ahmadzadeh Motlagh, 2007). نتایج این مطالعه نشان داد که مدیریت صحیح تاریخ کاشت و تراکم بهینه (حدود ۴۰ بوته در مترمربع) شرایط لازم را برای دستیابی به حداکثر عملکرد دانه در گیاه نیل فراهم می‌کند. این یافته‌ها با مطالعات متعددی روی گیاه نیل (Modafeh Behzadi et al., 2019; Khorramdel et al., 2017; Nikbakht Rayini, 2012) و سایر گیاهان زراعی و دارویی مانند گلرنگ (Karimi-Farzaghy & Soleymani Sardoo et al., 2014)؛ ماش (Monemizadeh, 2014) و گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) (Shakeri et al., 2017) همسو است که نشان می‌دهند، عملکرد دانه یک شاخص حساس و تعیین‌کننده در برنامه‌های بهره‌برداری از گیاهان زراعی و دارویی است.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تعداد غلاف در بوته در هر دو سال تحت تأثیر معنی‌دار تاریخ کاشت، تراکم و اثر متقابل آن‌ها قرار داشت ($p < 0.01$) (جدول‌های ۳ و ۴). در سال ۱۴۰۱، تعداد غلاف از ۱۱۵ در ۹ اردیبهشت به ۷۹ در ۱۶ مرداد کاهش یافت (جدول ۵)، و در سال ۱۴۰۲ از ۱۲۳ در ۹ اردیبهشت به ۱۰۴ در ۷ تیر کاهش یافت (جدول ۶). این کاهش شدید با تأخیر در کاشت، نشان‌دهنده حساسیت بالای تشکیل گل‌آذین به طول دوره رشد و شرایط دمایی است. تراکم ۴۰ بوته در مترمربع در هر دو سال بیشترین تعداد غلاف را داشت (۱۰۶ در ۱۴۰۱ و ۱۱۴ در ۱۴۰۲) (جدول‌های ۷ و ۸) که نشان‌دهنده تعادل مناسب بین رقابت و پوشش سطح در این تراکم است. تحلیل اثر متقابل (جدول‌های ۹ و ۱۰) نشان داد که حداکثر غلاف در تیمارهای زود هنگام و تراکم متوسط (۳۰-۴۰) حاصل شد. از نظر همبستگی، غلاف در بوته با عملکرد دانه همبستگی بسیار قوی و معنی‌داری داشت ($r = 0.94$)، و با دانه در غلاف نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت ($r = 0.76$) (شکل ۷). این امر نشان می‌دهد که افزایش تعداد غلاف نه تنها به‌طور مستقیم بر عملکرد تأثیر می‌گذارد، بلکه با افزایش دانه در غلاف هم‌راستا است. بنابراین، غلاف در بوته یک شاخص کلیدی برای اصلاح و انتخاب ژنوتیپ‌های پرمحصول است. همبستگی بسیار قوی این صفت با عملکرد دانه نشان می‌دهد که توسعه ساختارهای زایشی (غلاف‌ها)، نقش اصلی را در تعیین عملکرد نهایی گیاه دارند. مدافع بهزادی و همکاران (Modafeh Behzadi et al., 2019) در بررسی گیاه نیل، سلیمانی ساردو و همکاران (Soleymani Sardoo et al., 2017) مطالعه‌ای روی ماش و کریمی فرزقی و منعمی‌زاده (Karimi-Farzaghy & Monemizadeh, 2014) در پژوهشی روی گلرنگ

مدافع بهزادی و همکاران (Modafeh Behzadi et al., 2019) مشاهده کردند که حداکثر عملکرد دانه در گیاه نیل در شرایط بهینه شهرستان بم در زمان کاشت ۱۵ فروردین و تراکم کاشت ۴۵ بوته در مترمربع حاصل می‌شود. انصوری و همکاران (Ansori et al., 2016) مشاهده کردند در کاشت‌های زود هنگام گیاه دارویی نیل، گیاهان قادر به تحمل تراکم‌های بالاتری بوده و از ظرفیت بیشتری برای تولید دانه برخوردارند. این امر را می‌توان به بهتر بودن شرایط محیطی (دما، نور و رطوبت)، توسعه سیستم ریشه‌ای و کاهش تنش‌های رقابتی بین بوته‌ها نسبت داد. کاشت زود هنگام به دلیل طولانی‌تر بودن دوره رشد، بیشینه ماده خشک تجمعی و سرعت رشد را به ترتیب ۴/۴۱ و ۳/۵۹ برابر بیشتر از کاشت در ۲۷ تیر ماه افزایش می‌دهد. کاهش تدریجی عملکرد دانه در کاشت‌های دیر هنگام (تیر ماه و مرداد ماه) بیانگر اثر منفی تنش گرمایی و کوتاه شدن دوره رشد زایشی است. این پدیده در مطالعات متعددی گزارش شده است؛ زارعی و همکاران (Zarei et al., 2022) در مطالعه‌ای روی گیاه کاملینا (*Camelina sativa* L.) گزارش کردند که تأخیر در تاریخ کاشت منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد دانه می‌شود. همچنین سلیمانی ساردو و همکاران (Soleimani Sardoo et al., 2017) در آزمایشی روی ماش (*Vigna radiata* L.) نشان دادند که تاریخ کاشت دیر هنگام موجب کاهش عملکرد دانه می‌گردد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر تاریخ کاشت ($p < 0.01$) بر عملکرد دانه قوی‌تر از تراکم است. این امر اهمیت زمان‌بندی دقیق کاشت را در دستیابی به حداکثر عملکرد برجسته می‌کند. مدافع بهزادی و همکاران (Modafeh Behzadi et al., 2019) در بررسی گیاه نیل، طهماسبی‌زاده و همکاران (Tahmasbizadeh et al., 2010) در مطالعه‌ای روی گیاه گلرنگ و زینالی چرکندی و همکاران (Zeynali Charkandi et al., 2021) در بررسی بادرسبو نشان دادند که زمان کاشت بهینه می‌تواند منجر به بهبود صفات زایشی و در نتیجه افزایش عملکرد شود. در تراکم‌های بالاتر از ۴۰ بوته در مترمربع، کاهش ۱۰ تا ۱۲ درصدی عملکرد دانه مشاهده شد که ناشی از رقابت شدید بین بوته‌ها برای دسترسی به منابع نوری، آبی و غذایی است که در مطالعه روی همیشه بهار نیز مشاهده شده است. (Rahmani et al., 2011). این رقابت می‌تواند منجر به کاهش فتوسنتز خالص، افزایش خودتنگی و در نهایت کاهش تعداد و وزن دانه‌ها شود (Khorramdel et al., 2017). این پدیده در گیاهان مختلفی از جمله ذرت (*Zea mays* L.) (Fateh et al., 2014) و آلوئه‌ورا (*Aloe barbadensis* miller.) (Nematian et al., 2011) نیز گزارش شده است. از دیدگاه فیزیولوژیک، تاریخ کاشت بهینه، امکان بهره‌برداری حداکثری از منابع محیطی (نور، آب و مواد غذایی) و تطبیق با نیازهای فیزیولوژیکی گیاه در مراحل حساس رشد را فراهم می‌کند (Sales et al., 2006). همچنین این نتایج با

نشان دادند که تعداد غلاف و طبق در بوته به‌عنوان یکی از اجزای اصلی عملکرد، تحت تأثیر مستقیم شرایط محیطی و مدیریت زراعی قرار می‌گیرد. در کاشت‌های زود هنگام، گیاهان قادر به تولید حداکثر غلاف بوده‌اند که این امر را می‌توان به طولانی‌تر بودن دوره رشد، دسترسی به شرایط اقلیمی مناسب‌تر و کاهش تنش‌های رقابتی بین بوته‌ها نسبت داد (Ansori et al., 2016). در کاشت‌های دیر هنگام، کاهش ۴۵ درصدی تعداد غلاف مشاهده شد که ناشی از تنش گرمایی در مراحل حساس رشد (مثل گل‌دهی و تشکیل غلاف) است. تنش‌های دما در این مراحل می‌توانند منجر به سقوط گل‌ها و غلاف‌های اولیه شوند و در نتیجه تعداد غلاف‌های قابل برداشت را کاهش دهند (Soleymani Sardoo et al., 2017). این واکنش در مطالعات متعددی روی گیاهان مختلف گزارش شده است؛ به‌عنوان مثال، لی و همکاران (Li et al., 2019) در مطالعه‌ای روی برنج (*Oryza sativa* L.) مشاهده کردند که تنش گرمایی در مرحله گل‌دهی موجب کاهش قابل توجه تعداد گلچه بارور و دانه‌ها می‌شود. از دیدگاه اکوفیزیولوژیک، در شرایط تنش، گیاه نیل تمایل به تخصیص مجدد منابع به غلاف‌های باقی‌مانده دارد تا از افت کیفیت و بقای نسل جلوگیری کند. این سازوکار فیزیولوژیکی یک واکنش تطبیقی است که به گیاه اجازه می‌دهد حتی در شرایط نامساعد نیز دانه‌های قابل تولید را به‌خوبی پُر کند (Norouzi et al., 2024). پاسخ این صفت به تراکم به‌صورت سهمی شکل بود؛ یعنی در تراکم‌های پایین‌تر، گیاهان فضای کافی برای توسعه ساختارهای زایشی داشتند، اما در تراکم‌های بالاتر از حد بهینه (بالاتر از ۴۰ بوته) ، رقابت شدید بین بوته‌ها برای دسترسی به نور، آب و مواد غذایی منجر به کاهش تعداد غلاف در هر بوته شد (Fateh, et al., 2014). زینالی چرکندی و همکاران (Zeynali Charkandi et al., 2021) در آزمایشی روی بادرسبو مشاهده کردند که افزایش تراکم گیاهی منجر به کاهش تعداد غوزه در بوته شد. افزایش تعداد غلاف در شرایط بهینه زراعی، گواهی بر کارایی بالاتر تبدیل مواد فتوسنتزی به محصول است. این موضوع نشان می‌دهد که گیاه نیل در شرایط مناسب، توانایی بالایی در تخصیص منابع به اندام‌های زایشی دارد که این امر به‌طور مستقیم بر عملکرد نهایی تأثیر می‌گذارد (Khoshnam et al., 2020).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تعداد دانه در غلاف نیز در هر دو سال تحت تأثیر معنی‌دار تاریخ کاشت، تراکم و اثر متقابل آن‌ها قرار داشت ($p < 0.01$) برای تاریخ کاشت و تراکم، $p < 0.05$ در 1401 و 1402 برای اثر متقابل آن‌ها) (جدول‌های ۳ و ۴). در سال 1401 ، دانه در غلاف از $9/1$ در 9 اردیبهشت به $5/8$ در 16 مرداد کاهش یافت (جدول ۵) و در سال 1402 از $9/3$ به $7/8$ در 7 تیر کاهش یافت (جدول ۶). این کاهش می‌تواند ناشی از تنش دمایی در فصل گل‌دهی دیر هنگام، کاهش گرده‌افشانی یا پُر شدن

ناقص دانه‌ها باشد. تراکم 40 بوته در مترمربع در هر دو سال بالاترین مقدار را داشت ($8/5$ و $8/9$) (جدول‌های ۷ و ۸) که نشان‌دهنده تأثیر مثبت تراکم متعادل بر کیفیت گل‌دهی است. تحلیل اثر متقابل (جدول‌های ۹ و ۱۰) نشان داد که حداکثر دانه در غلاف در تیمار 9 اردیبهشت + تراکم 40 حاصل شد ($9/4$ و $9/8$). از نظر همبستگی، دانه در غلاف با عملکرد دانه همبستگی بسیار قوی و معنی‌داری دارد ($r = 0.87$) و با غلاف در بوته نیز همبستگی مثبت و قوی ($r = 0.76$) داشت (شکل ۷). این امر نشان می‌دهد که این دو صفت به‌صورت هم‌راستا و مکمل یکدیگر بر عملکرد تأثیر می‌گذارند و هر دو باید در برنامه‌های به‌نژادی و مدیریت کشت مورد توجه قرار گیرند. فرآیندهای لقاح، تشکیل دانه و توسعه غلاف‌ها در طول دوره رشد نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد نهایی گیاه دارند (Izadi et al., 2022). این تعادل به نحوه تخصیص مواد فتوسنتزی در مرحله پُر شدن دانه بستگی دارد (Nematian et al., 2011). در کاشت‌های زود هنگام و تراکم بهینه، گیاهان قادر به تولید حداکثر تعداد دانه در غلاف بوده‌اند، در مقابل، در کاشت‌های دیر هنگام و تراکم‌های بالاتر از حد بهینه، کاهش چشمگیری در این صفت ثبت شد که احتمالاً ناشی از اختلال در فرآیندهای لقاح و تشکیل دانه تحت تنش گرمایی و کاهش دسترسی به نور در لایه‌های داخلی گیاه است (Akbarnia, 2017; Khorramdel et al., 2013). از دیدگاه فیزیولوژیک، تشکیل دانه‌های متعدد در غلاف به عواملی مانند دمای مناسب در مرحله گل‌دهی، گرده‌افشانی موفق و فراهمی مواد غذایی در زمان مناسب بستگی دارد. دماهای بالا در مرحله گل‌دهی می‌توانند به گرده آسیب برسانند، زنده‌مانی آن‌ها را کاهش دهند و در نتیجه فرآیند لقاح و تشکیل دانه را مختل کنند (Izadi et al., 2022).

در تراکم‌های بالا، کاهش تعداد دانه در غلاف احتمالاً ناشی از رقابت شدید برای نور و فضای فیزیولوژیک و در نتیجه کاهش فتوسنتز خالص و همچنین اختلال در گرده‌افشانی و لقاح است (Sales et al., 2006). اکبرنیا (Akbarnia, 2013) در مطالعه‌ای روی مرزه سهندی مشاهده کرد که تراکم بالا می‌تواند منجر به کاهش کیفیت زایشی گیاه شود. از دیدگاه مدیریت زراعی، این نتایج نشان می‌دهند که برای بهره‌برداری حداکثری از ظرفیت زایشی گیاه نیل، مدیریت دقیق زمان کاشت و کنترل تراکم گیاهی ضروری است. این یافته‌ها با نتایج محققان دیگری از جمله ایزدی و همکاران (Izadi et al., 2022) و نعمتیان و همکاران (Nematian et al., 2011) و مدافع بهزادی و همکاران (Modafeh Behzadi et al., 2019) همسو است که نشان دادند تنش‌های محیطی مانند گرما و رقابت شدید گیاهی می‌تواند به‌طور مستقیم بر تشکیل و رشد دانه تأثیر منفی بگذارد. این مطالعه نشان داد که تاریخ کاشت زود هنگام و تراکم بهینه (حدود 40 بوته در مترمربع)، شرایط لازم را برای حداکثر تعداد دانه در غلاف و در نتیجه افزایش عملکرد دانه فراهم می‌کند.

همچنین این نتایج با مبانی فیزیولوژیکی رشد گیاهان همسو است که در آن، هماهنگی بین رشد رویشی و زایشی نقش کلیدی در تعیین عملکرد نهایی گیاه دارد.

براساس نتایج تجزیه واریانس، وزن هزار دانه در هیچ یک از دو سال تحت تأثیر معنی دار تاریخ کاشت، تراکم یا اثر متقابل آن‌ها قرار نگرفت ($p > 0.05$) (جدول‌های ۳ و ۴). در سال ۱۴۰۱، مقادیر از ۴/۵۳ گرم (۹ اردیبهشت) به ۴/۴۲ گرم (۱۶ مرداد) کاهش یافت (جدول ۵) و در سال ۱۴۰۲ از ۴/۵۶ به ۴/۵۰ گرم (۷ تیر) کاهش یافت (جدول ۶)، اما این تغییرات از نظر آماری معنی دار نبودند. تراکم نیز تأثیر معنی داری بر این صفت نداشت (جدول‌های ۷ و ۸). این مهم نشان‌دهنده ثبات نسبی این صفت در برابر تغییرات زراعی است و بیانگر آن است که وزن هزار دانه بیشتر تحت تأثیر عوامل ژنتیکی تا شرایط محیطی در مرحله پر شدن دانه (مانند رطوبت و دما) قرار دارد. با این حال، مقادیر این صفت در سال ۱۴۰۲ در تمام تیمارها کمی بالاتر بود که ممکن است ناشی از کاهش شوری خاک و بهبود وضعیت رطوبتی در دوره پر شدن دانه باشد (جدول‌های ۱ و ۲). از نظر همبستگی، وزن هزار دانه با عملکرد دانه همبستگی ضعیف و غیرمعنی داری داشت ($r = 0.33^{ns}$)، و با غلاف در بوته ($r = 0.28^{ns}$) و دانه در غلاف ($r = 0.41^{ns}$) نیز همبستگی معنی داری نشان نداد (شکل ۷). این یافته نشان می‌دهد که افزایش عملکرد دانه در این مطالعه عمدتاً ناشی از افزایش تعداد غلاف و دانه بوده و نه افزایش اندازه دانه.

زینالی چرکندی و همکاران (Zeynali Charkandi et al., 2021) در مطالعه‌ای روی بادرشو مشاهده کردند که صفات زایشی مثل وزن هزار دانه تحت تأثیر قابل توجهی از سوی تغییرات مدیریتی نظیر تاریخ کاشت قرار نمی‌گیرند. گیاه نیل دارای سازوکارهای فیزیولوژیکی قوی برای تنظیم و حفظ وزن دانه حتی در شرایط تنش محیطی و رقابت بین بوته‌ها است (Nikbakht Rayini, 2012; Nematian et al., 2011). از دیدگاه ژنتیکی، این نتایج نشان می‌دهند که وزن هزار دانه در گیاه نیل بیش از اینکه متأثر از تغییرات محیطی یا مدیریتی باشد، تحت کنترل عوامل ژنتیکی است و این نتیجه در مورد گیاهان دیگر مانند بادرشو نیز به دست آمده است (Zeynali Charkandi et al., 2021). در پاسخ به محدودیت منابع، گیاه از طریق سازوکارهای فیزیولوژیکی جبرانی، تعداد غلاف و دانه‌ها را کاهش می‌دهد تا بتواند منابع فتوسنتزی را به صورت اولویت‌دار به تعداد کمتری دانه اختصاص دهد و بدین ترتیب کیفیت بذر (مانند وزن هزار دانه) را حفظ کند (Rezvani Moghaddam & Ahmadzadeh Motlagh, 2007). همچنین این پایداری می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که گیاه نیل در طول فرآیند تکامل، از سازوکارهای تنظیمی قوی برای حفظ کیفیت دانه برخوردار شده است. این موضوع از اهمیت بالایی در برنامه‌های اصلاحی و مدیریت زراعی

برخوردار است، زیرا اطمینان از ثبات کیفیت دانه در شرایط مختلف، نقش مهمی در ارزش تجاری و کاربرد صنعتی این گیاه دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که وزن هزار دانه گیاه نیل یک صفت نسبتاً پایدار است که بیشتر تحت کنترل عوامل ژنتیکی قرار دارد. بنابراین، این صفت می‌تواند شاخصی مناسب برای انتخاب ارقام مقاوم و پایدار در برنامه‌های اصلاحی باشد. این نتایج با مطالعات متعددی روی گیاه نیل (Modafeh Behzadi et al., 2019) و سایر گیاهان دارویی از جمله همیشه‌بهار (*Calendula officinalis* L.) (Rahmani et al., 2011) و بادرشو (Zeynali Charkandi et al., 2021) همسو است که نشان می‌دهند وزن هزار دانه یک صفت نسبتاً مستقل از شرایط محیطی است.

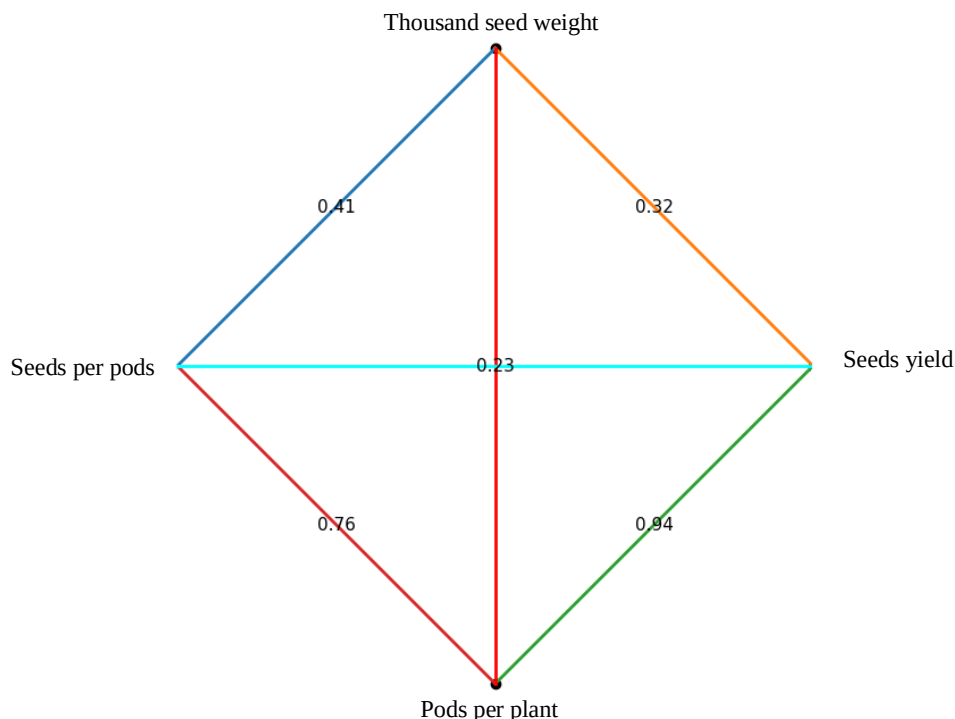
در مجموع، نتایج این مطالعه نشان داد که مدیریت صحیح زمان کاشت و استفاده از تراکم بهینه (حدود ۴۰ بوته در مترمربع) شرایط لازم را برای حداکثر تعداد غلاف و در نتیجه افزایش عملکرد دانه فراهم می‌کند. این نتایج با مطالعات متعددی روی گیاه نیل (Modafeh Behzadi et al., 2019; Khorramdel et al., 2017; Nikbakht Rayini, 2012) و سایر گیاهان زراعی و دارویی از جمله ماش (Soleymani Sardoo et al., 2017)، گلرنگ (Karimi-Shakeri et al., 2014) و گشنیز (Farzaghy & Monemizadeh, 2015) همسو است که نشان می‌دهند تعداد غلاف یک صفت حساس و تعیین‌کننده در برنامه‌های بهره‌برداری از گیاهان زراعی و دارویی است. عملکرد دانه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های زایشی، تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی و مدیریتی قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که عملکرد دانه در گیاه نیل عمدتاً تحت تأثیر تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در غلاف قرار دارد، که هر دو با تأخیر در تاریخ کاشت و تراکم نامناسب کاهش می‌یابند. تحلیل همبستگی (شکل ۷) این رابطه را تأیید می‌کند. همبستگی بسیار بالا و معنی‌دار بین عملکرد دانه با غلاف در بوته ($r = 0.94$) و دانه در غلاف ($r = 0.87$) نشان‌دهنده اهمیت این دو صفت به‌عنوان شاخص‌های انتخابی برای افزایش عملکرد است. در مقابل، وزن هزار دانه اگرچه صفتی پایدار است، اما نقش محدودی در تعیین عملکرد دارد. بهینه‌ترین تیمار، کاشت در ۹ اردیبهشت همراه با تراکم ۴۰ بوته در مترمربع شناسایی شد. بهبود عملکرد در سال ۱۴۰۲ علی‌رغم کاهش عناصر غذایی، بر اهمیت کیفیت خاک به‌ویژه کاهش شوری و pH مناسب در بهبود رشد و عملکرد گیاهان تأکید دارد. این یافته‌ها برای مدیریت کشت پایدار نیل در مناطق خشک و نیمه‌خشک با خاک‌های شور، به‌ویژه در شرایط تغییرات اقلیمی، ارزشمند است.

پیوست‌ها

نتایج تحلیل واریانس و میاگین اثرات ساده و متقابل، تاریخ کاشت و تراکم و سال بر صفات زایشی گیاه نیل در سال اول و دوم (۱۴۰۱ و ۱۴۰۲)



شکل ۷- شبکه تعاملی همبستگی یبین صفات زایشی
Figure 7- Correlation network among reproductive traits

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر تراکم و تاریخ کاشت بر صفات زایشی گیاه نیل (سال ۱۴۰۱)

Table 3- Analysis of variance for the effects of plant density and sowing date on reproductive traits of indigo (2022)

میانگین مربعات Mean of squares					
منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	عملکرد دانه Seed yield	وزن هزار دانه Thousand seed weight	دانه در غلاف seeds per pod	غلاف در بوته Pods per plant
بلوک Block	2	185 ns	0.002 ns	0.15 ns	12.5 ns
تاریخ کاشت Planting date (T)	5	2850**	0.008 ns	2.8**	210**
خطای کرت اصلی Main plot error (Ea)	10	85	0.003	0.18	14.8
تراکم Density (D)	3	980**	0.005 ns	1.5**	95**
T × D	15	320**	0.002 ns	0.45*	32**
خطای کرت فرعی Subplot error (Eb)	36	75	0.002	0.16	12.0

*: معنی‌دار در سطح پنج درصد ($p < 0.05$), **: معنی‌دار در سطح یک درصد ($p < 0.01$)

*: Significant at the 5% level ($p < 0.05$), **: Significant at the 1% level ($p < 0.01$)

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر تراکم و تاریخ کاشت بر صفات زایشی گیاه نیل (سال ۱۴۰۲)

Table 4- Analysis of variance for the effects of plant density and sowing date on reproductive traits of indigo (2023)

میانگین مربعات Mean of squares					
منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	عملکرد دانه Seed yield	وزن هزار دانه Thousand seed weight	دانه در غلاف Seeds per pod	غلاف در بوته Pods per plant
بلوک Block	2	210 ns	0.002 ns	0.14 ns	13.2 ns
تاریخ کاشت Planting date (T)	3	3100**	0.007 ns	3.2**	235**
خطای کرت اصلی Main plot error (Ea)	6	90	0.003	0.19	15.5
تراکم Density (D)	3	1150**	0.005 ns	1.8**	110**
T × D	9	350**	0.002 ns	0.52*	38**
خطای کرت فرعی Subplot error (Eb)	24	80	0.002	0.17	13.5

* معنی‌دار در سطح پنج درصد ($p < 0.05$)، ** معنی‌دار در سطح یک درصد ($p < 0.01$)*: Significant at the 5% level ($p < 0.05$), **: Significant at the 1% level ($p < 0.01$)جدول ۵- مقایسه میانگین اثر ساده تاریخ کاشت ($\pm$ خطای استاندارد) بر صفات زایشی (۱۴۰۱)Table 5- Mean comparison of the simple effect of sowing date ($\pm$ standard error) on reproductive traits (2022)

تاریخ کاشت Planting date	عملکرد دانه Seed yield (g m ⁻²)	وزن هزار دانه Thousand seed weight (g)	دانه در غلاف Seeds per pod	غلاف در بوته Pods per plant
۹ اردیبهشت March 30	95.7 $\pm$ 3.9	4.53 $\pm$ 0.04	9.1 $\pm$ 0.3	115 $\pm$ 4
۲۹ اردیبهشت April 19	88.1 $\pm$ 3.6	4.51 $\pm$ 0.04	8.7 $\pm$ 0.3	109 $\pm$ 4
۱۸ خرداد May 8	82.0 $\pm$ 3.4	4.49 $\pm$ 0.04	8.3 $\pm$ 0.3	103 $\pm$ 4
۷ تیر June 28	70.0 $\pm$ 2.9	4.47 $\pm$ 0.04	7.5 $\pm$ 0.3	95 $\pm$ 3
۲۷ تیر July 17	58.3 $\pm$ 2.4	4.45 $\pm$ 0.04	6.7 $\pm$ 0.2	85 $\pm$ 3
۱۶ مرداد August 7	47.5 $\pm$ 2.0	4.42 $\pm$ 0.04	5.8 $\pm$ 0.2	79 $\pm$ 3

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر ساده تاریخ کاشت ($\pm$ خطای استاندارد) بر صفات زایشی (۱۴۰۲)Table 6- Mean comparison of the simple effect of sowing date ($\pm$ standard error) on reproductive traits (2023)

تاریخ کاشت Planting date	عملکرد دانه Seed yield (g m ⁻²)	وزن هزار دانه Thousand seed weight (g)	دانه در غلاف Seeds per pod	غلاف در بوته Pods per plant
۹ اردیبهشت March 30	104.8 $\pm$ 4.3	4.56 $\pm$ 0.04	9.3 $\pm$ 0.3	123 $\pm$ 5
۲۹ اردیبهشت April 19	98.2 $\pm$ 4.0	4.55 $\pm$ 0.04	8.9 $\pm$ 0.3	115 $\pm$ 4
۱۸ خرداد May 8	92.4 $\pm$ 3.8	4.53 $\pm$ 0.04	8.5 $\pm$ 0.3	109 $\pm$ 4
۷ تیر June 28	77.5 $\pm$ 3.2	4.50 $\pm$ 0.04	7.8 $\pm$ 0.3	99 $\pm$ 4

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر ساده تراکم ($\pm$ خطای استاندارد) بر صفات زایشی (۱۴۰۱)Table 7- Mean comparison of the simple effect of plant density ($\pm$ standard error) on reproductive traits (2022)

تراکم Density (plants per m ²)	عملکرد دانه Seed yield (g m ⁻²)	وزن هزار دانه Thousand seed weight (g)	دانه در غلاف Seeds per pod	غلاف در بوته Pods per plant
30	72.5 $\pm$ 3.0	4.51 $\pm$ 0.04	8.0 $\pm$ 0.3	102 $\pm$ 4
40	85.3 $\pm$ 3.5	4.53 $\pm$ 0.04	8.5 $\pm$ 0.3	106 $\pm$ 4
50	78.9 $\pm$ 3.3	4.50 $\pm$ 0.04	8.0 $\pm$ 0.3	100 $\pm$ 4
60	70.8 $\pm$ 2.9	4.47 $\pm$ 0.04	7.4 $\pm$ 0.3	93 $\pm$ 3

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر ساده تراکم ($\pm$ خطای استاندارد) بر صفات زایشی (۱۴۰۲)Table 8- Mean comparison of the simple effect of plant density ($\pm$ standard error) on reproductive traits (2023)

تراکم Density (plants per m ²)	عملکرد دانه Seed yield (g/m ²)	وزن هزار دانه Thousand seed weight (g)	دانه در غلاف Seeds per pod	غلاف در بوته Pods per plant
30	82.7 $\pm$ 3.4	4.53 $\pm$ 0.04	8.4 $\pm$ 0.3	110 $\pm$ 4
40	96.5 $\pm$ 4.0	4.56 $\pm$ 0.04	8.9 $\pm$ 0.3	114 $\pm$ 4
50	89.6 $\pm$ 3.7	4.53 $\pm$ 0.04	8.4 $\pm$ 0.3	108 $\pm$ 4
60	80.5 $\pm$ 3.3	4.50 $\pm$ 0.04	7.8 $\pm$ 0.3	100 $\pm$ 4

جدول ۹- مقایسه میانگین اثر متقابل تراکم و تاریخ کاشت ($\pm$ خطای استاندارد) صفات زایشی (۱۴۰۱)

Table 9- Mean comparison of the interaction effect of plant density and sowing date on reproductive traits (2022)

تاریخ کاشت Planting date	تراکم Density (plants per m ²)	عملکرد دانه Seed yield (g m ⁻²)	وزن هزار دانه Thousand seed weight (g)	دانه در غلاف Seeds per pod	غلاف در بوته Pods per plant
۹ اردیبهشت March 30	30	92.5 $\pm$ 3.8	4.55 $\pm$ 0.04	9.1 $\pm$ 0.3	120 $\pm$ 5
	40	105.3 $\pm$ 4.3	4.56 $\pm$ 0.04	9.4 $\pm$ 0.3	118 $\pm$ 5
	50	97.8 $\pm$ 4.0	4.53 $\pm$ 0.05	8.9 $\pm$ 0.3	114 $\pm$ 4
	60	87.2 $\pm$ 3.6	4.49 $\pm$ 0.05	8.1 $\pm$ 0.3	106 $\pm$ 4
۲۹ اردیبهشت April 19	30	86.4 $\pm$ 3.6	4.53 $\pm$ 0.05	8.7 $\pm$ 0.3	114 $\pm$ 5
	40	96.0 $\pm$ 4.0	4.55 $\pm$ 0.05	9.0 $\pm$ 0.3	112 $\pm$ 4
	50	89.3 $\pm$ 3.7	4.51 $\pm$ 0.05	8.5 $\pm$ 0.3	108 $\pm$ 4
	60	80.7 $\pm$ 3.3	4.47 $\pm$ 0.05	7.7 $\pm$ 0.3	100 $\pm$ 4
۱۸ خرداد May 8	30	80.2 $\pm$ 3.3	4.51 $\pm$ 0.05	8.1 $\pm$ 0.3	108 $\pm$ 4
	40	89.3 $\pm$ 3.7	4.53 $\pm$ 0.05	8.4 $\pm$ 0.3	106 $\pm$ 4
	50	83.1 $\pm$ 3.4	4.49 $\pm$ 0.05	7.9 $\pm$ 0.3	102 $\pm$ 4
	60	75.0 $\pm$ 3.1	4.45 $\pm$ 0.05	7.1 $\pm$ 0.3	94 $\pm$ 3
۷ تیر June 28	30	68.5 $\pm$ 2.8	4.48 $\pm$ 0.05	7.3 $\pm$ 0.3	100 $\pm$ 4
	40	76.2 $\pm$ 3.2	4.50 $\pm$ 0.05	7.6 $\pm$ 0.3	98 $\pm$ 4
	50	70.9 $\pm$ 2.9	4.46 $\pm$ 0.05	7.0 $\pm$ 0.3	94 $\pm$ 3
	60	64.0 $\pm$ 2.7	4.42 $\pm$ 0.05	6.2 $\pm$ 0.2	86 $\pm$ 3
۲۷ تیر July 17	30	57.1 $\pm$ 2.4	4.46 $\pm$ 0.05	6.4 $\pm$ 0.2	90 $\pm$ 3
	40	63.5 $\pm$ 2.6	4.48 $\pm$ 0.05	6.7 $\pm$ 0.3	88 $\pm$ 3
	50	59.1 $\pm$ 2.5	4.44 $\pm$ 0.05	6.1 $\pm$ 0.2	84 $\pm$ 3
	60	53.4 $\pm$ 2.2	4.40 $\pm$ 0.05	5.4 $\pm$ 0.2	76 $\pm$ 2
۱۶ مرداد August 7	30	46.5 $\pm$ 1.9	4.43 $\pm$ 0.05	5.8 $\pm$ 0.2	84 $\pm$ 3
	40	51.7 $\pm$ 2.1	4.45 $\pm$ 0.05	6.1 $\pm$ 0.2	82 $\pm$ 3
	50	48.1 $\pm$ 2.0	4.41 $\pm$ 0.05	5.5 $\pm$ 0.2	78 $\pm$ 3
	60	43.5 $\pm$ 1.8	4.37 $\pm$ 0.05	4.8 $\pm$ 0.2	70 $\pm$ 2

جدول ۱۰- مقایسه میانگین اثر متقابل تراکم و تاریخ کاشت ($\pm$ خطای استاندارد) صفات زایشی (۱۴۰۲)

Table 10- Mean comparison of the interaction effect of plant density and sowing date on reproductive traits (2023)

تاریخ کاشت Planting date	تراکم Density plants per m ²	عملکرد دانه Seed yield (g m ⁻²)	وزن هزار دانه Thousand seed weight (g)	دانه در غلاف Seeds per pod	غلاف در بوته Pods per plant
۹ اردیبهشت March 30	30	102.7 $\pm$ 4.2	4.58 $\pm$ 0.04	9.5 $\pm$ 0.3	128 $\pm$ 5
	40	114.2 $\pm$ 4.7	4.59 $\pm$ 0.04	9.8 $\pm$ 0.3	126 $\pm$ 5
	50	106.3 $\pm$ 4.4	4.56 $\pm$ 0.05	9.3 $\pm$ 0.3	122 $\pm$ 4
	60	96.1 $\pm$ 4.0	4.52 $\pm$ 0.05	8.5 $\pm$ 0.3	114 $\pm$ 4
۲۹ اردیبهشت April 19	30	96.2 $\pm$ 4.0	4.56 $\pm$ 0.05	9.1 $\pm$ 0.3	120 $\pm$ 5
	40	107.0 $\pm$ 4.4	4.58 $\pm$ 0.05	9.4 $\pm$ 0.3	118 $\pm$ 5
	50	99.6 $\pm$ 4.1	4.54 $\pm$ 0.05	8.9 $\pm$ 0.3	114 $\pm$ 4
	60	90.0 $\pm$ 3.7	4.50 $\pm$ 0.05	8.1 $\pm$ 0.3	106 $\pm$ 4
۱۸ خرداد May 8	30	90.5 $\pm$ 3.7	4.54 $\pm$ 0.05	8.7 $\pm$ 0.3	114 $\pm$ 4
	40	100.7 $\pm$ 4.2	4.56 $\pm$ 0.05	9.0 $\pm$ 0.3	112 $\pm$ 4
	50	93.7 $\pm$ 3.9	4.52 $\pm$ 0.05	8.5 $\pm$ 0.3	108 $\pm$ 4
	60	84.7 $\pm$ 3.5	4.48 $\pm$ 0.05	7.7 $\pm$ 0.3	100 $\pm$ 4
۷ تیر June 28	30	76.0 $\pm$ 3.1	4.51 $\pm$ 0.05	7.9 $\pm$ 0.3	104 $\pm$ 4
	40	84.5 $\pm$ 3.5	4.53 $\pm$ 0.05	8.2 $\pm$ 0.3	102 $\pm$ 4
	50	78.7 $\pm$ 3.3	4.49 $\pm$ 0.05	7.6 $\pm$ 0.3	98 $\pm$ 4
	60	71.1 $\pm$ 3.0	4.45 $\pm$ 0.05	6.8 $\pm$ 0.3	90 $\pm$ 3

References

1. Akbarnia, A. (2013). Response of *Satureja sahendica* Bormn. to nitrogen and planting density. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 29(2), 261-268. (In Persian).
2. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2013.211345>
3. Ansori, A., Shahgholi, H., Makarian, H., & Gholipoor, M. (2016). The effect of planting date on the growth and yield of indigo (*Indigofera tinctoria* L.) in Shahrood conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 14(1), 37-47. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/gsc.v14i1.32881>
4. Chanayath, N., Lhieochaiphant, S., & Phutrakul, S. (2002). Pigment extraction techniques from the leaves of *Indigofera tinctoria* Linn. and *Baphicacanthus cusia* Brem. and chemical structure analysis of their major components. *CMU Journal*, 1(2), 149-160.
5. Diwan, G., Bisen, B. P., & Maida, P. (2018). Effect of nitrogen doses and row spacing on growth and seed yield of coriander (*Coriandrum sativum* L.). *International Journal of Chemical Sciences*, 6(4), 2768-2772.
6. Fateh, M., Kazemi Arbat, H., Mohammadi, S., Farahbakhsh, F., & Zand, A. (2021). The effect of plant density and nitrogen fertilizer on leaf area, chlorophyll, and grain protein of *Zea mays* L. in competition with *Amaranthus retroflexus* L. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 11(3), 3719-3730. (In Persian) <https://doi.org/10.30495/IJPP.2021.682917>
7. Izadi, Z., Biabani, A., Sabouri, H., Bahreini Nejad, B., & Gholizadeh, A. L. (2022). Evaluation of changes in alkaloid content and some physiological traits of *Datura stramonium* L. under the influence of planting date and plant density levels. *Journal of Horticultural Science*, 36(3), 657-669. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jhs.2021.72958.1095>
8. Karimi-Farzaghy, M., & Monamizadeh, Z. (2014). Effect of planting density and sowing date on yield and yield components of safflower in Torbat Heydarieh region. *Plant Environmental Physiology*, 9(36), 71-85. (In Persian)
9. Khichar, M. L., & Niwas, R. (2006). Microclimatic profiles under different sowing environment in wheat. *Journal of Agrometeorology*, 8(2), 201-209. <https://doi.org/10.54386/jam.v8i2.1048>
10. Khoshnam, Z., Amiri Nejad, M., Aeen, A., & Paresamotlagh, B. (2020). The evaluation of intercropping system of indigo (*Indigofera tinctoria* L.) and roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) on yield, weed biodiversity and changes of weeds community. *Journal of Crop Production and Processing*, 10(2), 109-121. (In Persian) <https://doi.org/10.47176/jcpp.10.2.34771>
11. Khorramdel, S., Rezvani Moghaddam, P., Houshmand, M., & Moallem Benhangi, F. (2017). Effects of cow manure levels and plant densities on yield and seed yield components, leaf and indigo yields of true *Indigo*. *Journal of Plant Production Research*, 23(4), 117-143. (In Persian) <https://doi.org/10.22069/JOPP.2017.10284.1966>
12. Kun Lestari, W. F. (1998). Dyeing Process with Natural Indigo: The Tradition and Technology. *Revival Natural*

- Indigo Dye. (Original Work Presented September 21–29, 1998)
13. Li, S., Yuan, F., Ata-Ui-Karim, S. T., Zheng, H., Cheng, T., Liu, X., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., & Cao, Q. (2019). Combining color indices and textures of UAV-based digital imagery for rice LAI estimation. *Remote Sensing*, 11(15), 1763. <https://doi.org/10.3390/rs11151763>
14. Martin, L. D., & Deo, S. (2001). Effect of planting geometry and level of nitrogen on growth and yield quality of European dill (*Anethum graveolens*). *Indian Journal of Horticulture*, 57, 351-355.
15. Modafeh Behzadi, N., Rezvani Moghaddam, P., & Jahan, M. (2019). Effects of planting date and plant density on morphology and yield of *Indigofera tinctoria* L. as a medicinal plant. *Journal of Agroecology*, 10(4), 1067-1079. <https://sid.ir/paper/211345/fa>
16. Nematian, A., Ghoushchi, F., Farnia, A., Ariapour, A., & Mashhadiakbar Boujar, M. (2011). The effect of planting density and nitrogen fertilizer on active substances in medicinal plant *Aloe vera* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 27(2), 338-347. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2011.6449>
17. Nikbakht Rayini, H. (2012). Effect of different levels of nitrogen and plant density on vegetative yield of medicinal-industrial plant *Indigofera tinctoria* in Jiroft region. The 1st national conference on solutions to access sustainable development in agriculture, natural resources and the environment. (In Persian) <https://civilica.com/doc/197733>
18. Norouzi, Y., Ghobadi, M., Saeidi, M., Rezadoost, H., Kahrizi, D., & Dogan, H. (2024). The effect of nitrogen and cutting on the yield, quality and the composition of thyme essential oil (*Thymus vulgaris* L.). *Ecophytochemistry Journal of Medicinal Plants*, 12(2), 27-44. (In Persian)
19. Rahmani, N., Jalali Yekta, A., Taher Khani, T., & Daneshian, J. (2011). Effects of plant density and nitrogen on essential oil yield of *Calendula officinalis* L. *Journal of Crop Ecophysiology*, 2(4), 347-354. (In Persian)
20. Rezvani Moghaddam, P., & Ahmadzadeh Motlagh, M. (2007). Effect of sowing date and plant density on yield and yield components of *Nigella sativa* in Qaenat region. *Journal of Research and Development in Natural Resources*, 76, 62-68. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/aj.2024.357663.1592>
21. Sales, E., Kanhonou, R., Baixauli, C., Giner, A., Cooke, D., Gilbert, K., Arrillaga, I., Segura, J., & Ros, R. (2006). Sowing date, transplanting, plant density and nitrogen fertilization affect indigo production from *Isatis* species in a Mediterranean region of Spain. *Industrial Crops and Products*, 23(1), 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.03.002>
22. Sarhadi, H., Afsharmanesh, G. R., & Mokhtari, Z. (2014). Effect of drought stress on some morphological traits and seed yield of indigo (*Indigofera tinctoria* L.) under different levels of nitrogen. *International Journal of Science*, 3, 2319-5037.
23. Shakeri, A., Sani, B., & Hasanzadeh Darvishi, H. (2015). *Evaluation of the combined effects of organic biofertilizers (vermicompost and compost) and poultry manure on yield and yield components of coriander (Coriandrum sativum L.)*. Paper presented at the National Conference on Modern Agriculture and Its Development Pathways in the Country. (In Persian)
24. Soleymani Sardoo, M., Afsharmanesh, G. R., & Roudbari, Z. (2017). Evaluating the effects of sowing date and plant density on yield and yield components of mung bean in Jiroft County. *Crop Science Research in Arid Regions*, 1(1), 27-34. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/csrar.01.01.03>
25. Tahmasbizadeh, H., Madani, H., & Naderi Broujerdi, G. H. (2010). The effect of sowing date, plant density and different levels of nitrogen on the growth traits and rate of essence in medicine safflower. *New Finding in Agriculture*, 4(4), 375-390. (In Persian) http://nfa.iau-arak.ac.ir/article_516470.html
26. Ullah, H., & Honermeier, B. (2013). Fruit yield, essential oil concentration and composition of three anise cultivars (*Pimpinella anisum* L.) in relation to sowing date, sowing rate and locations. *Industrial Crops and Products*, 42, 489-499. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.011>
27. Ydyrys, A., Mukhitdinov, N., Ivashchenko, A., Ashirova, Z., Massimzhan, M., Imanova, E., & Kaparbay, R. (2024). Methodological guide for geobotanical research on rare, endemic, and medicinal plants: A case study of the Ranunculaceae family. *ES Food & Agroforestry*, 18, 1340.
28. Zargarani Khouzani, M. R., Ghareineh, M. H., Khodai Jougan, A., & Shojaei, A. (2019). *Investigation of the forgotten medicinal-industrial plant indigo (Indigofera tinctoria L.) and the importance of its revitalization for the sustainability of Iran's agricultural ecosystems*. 7th National Conference on Applied Research in Agricultural Sciences: Healthy Food from Farm to Table, Tehran, Iran. (In Persian)
29. Zargarani Khouzani, M. R., Zargarani, S., & Daei Naseri, S. M. A. (2022). *A review on biochemical and pharmacological properties of medicinal indigo plant (Indigofera tinctoria L.)*. 1st National Congress on Medicinal Plants, Traditional Medicine and Community Health, Damghan, Iran. (In Persian) <https://civilica.com/doc/1582008>
30. Zargarani Khozani, M. R., & Daei Naseri, S. M. A. (2025). Indigo: A Reflection on Natural and Artificial Indigo Dye. Arshak Publications. Arak, Iran. (92 p.). (In Persian)
31. Zarei, S., Hassibi, P., Kahrizi, D., & Safieddin Ardebili, S. M. (2022). Effect of nitrogen application on *Camelina sativa* oilseed yield and yield components at different planting dates. *Iranian Journal of Field Crops*

32. Zeynali Charkandi, Z., Roshdi, M., & Yousefzadeh, S. (2021). Changes in essential oil content and plant yield of *Dracocephalum moldavica* L. affected by sowing date and nitrogen fertilizer in Khoy region. *Crop Science Research in Arid Regions*, 3(1), 25-38. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/csrar.2021.276139.1090>