

Investigating Quantitative and Qualitative Traits of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill) under the Effect of Different Growth Stages and Levels of Foliar Spraying with Potassium Nanoparticles

N. Gharehbaghli^{1*}, A. Mehraban²

1- Crop and Horticultural Science Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center Research and Education Center (AREEO), Hamadan. Iran

2 - Department of Agriculture, Zahedan Unit, Islamic Azad University, Zahedan, Iran

(* - Corresponding author's Email: n.gharehbaghli@areeo.ac.ir)

Received: 11 March 2025
Revised: 09 July 2025
Accepted: 18 August 2025
Available Online: 18 August 2025

How to cite this article: ¹

Gharehbaghli, N., & Mehraban, A. (2026). Investigating quantitative and qualitative traits of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill) under the effect of different growth stages and levels of foliar spraying with potassium nanoparticles. *Journal of Horticultural Science*, 40(1), 111-128. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.92581.1420>

Introduction

Fennel (*Foeniculum vulgare*), a valuable medicinal plant belonging to the Apiaceae family, has been widely recognized for its medicinal and culinary uses. Its essential oils and bioactive compounds, such as anethole, fenchone, and estragole, have made it a significant crop in the pharmaceutical, food, and cosmetic industries. Fennel is not only prized for its aromatic seeds and leaves but also for its therapeutic properties, including anti-inflammatory, antimicrobial, and antioxidant effects. Given the increasing global demand for high-quality medicinal plants, optimizing cultivation practices to enhance growth, yield, and essential oil production is crucial. Traditional agricultural practices often face challenges such as nutrient inefficiency, environmental degradation, and resource depletion, which can limit the productivity and sustainability of medicinal plant cultivation. In this context, nanotechnology, particularly the use of nanofertilizers, has emerged as a promising approach to improve nutrient efficiency and plant performance. Nanofertilizers offer several advantages over conventional fertilizers, including enhanced nutrient uptake, reduced application rates, and minimized environmental impact. This study aimed to investigate the effects of foliar application timing and varying concentrations of potassium nanoparticles on the growth characteristics and essential oil yield of fennel over two cropping years (2021-2022 and 2022-2023). By exploring the potential of nanotechnology in fennel cultivation, this research seeks to contribute to the development of sustainable agricultural practices that can meet the growing demand for medicinal plants while preserving environmental health.

Materials and Methods

The experiment was conducted as a factorial design in a randomized complete block design with three replications. The factors included foliar application timing at three growth stages: stem formation, flowering, and fruiting; and nano potassium oxide concentrations at five levels: 0 (control), 2, 3, 4, and 5 parts per thousand (ppt). The measured parameters included plant height, biomass yield, seed yield, 1000-seed weight, number of umbels per plant, seed carbohydrate content, chlorophyll a, b, and total chlorophyll levels, as well as essential oil percentage and yield.



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/jhs.2025.92581.1420>

Result and Discussion

The results demonstrated that foliar application of potassium nanoparticles significantly influenced the growth and essential oil production of fennel. The application of 3 ppt potassium nanoparticles had the most pronounced positive effects on plant height, biomass yield, seed yield, 1000-seed weight, number of umbels per plant, seed carbohydrate content, and chlorophyll levels (a, b, and total). This concentration was found to optimize nutrient uptake and utilization, leading to enhanced photosynthetic efficiency and overall plant vigor. In terms of essential oil production, the highest essential oil percentage (4.37%) was observed in plants treated with 5 ppt potassium nanoparticles. However, the maximum essential oil yield (5.69 kg.ha^{-1}) was achieved with 4 ppt potassium nanoparticles applied during the fruiting stage. This indicates that while higher concentrations of potassium nanoparticles may increase the essential oil percentage, the optimal concentration for maximizing essential oil yield is 4 ppt during the fruiting stage. The fruiting stage was identified as the most critical period for foliar application, as it coincides with the peak demand for nutrients to support seed and essential oil development. The findings of this study highlight the importance of precise nutrient management in fennel cultivation. Potassium, as a vital macronutrient, plays a key role in various physiological processes, including enzyme activation, osmoregulation, and stress tolerance. The use of potassium nanoparticles enhances nutrient use efficiency by providing a controlled and sustained release of potassium, thereby improving plant growth and essential oil production. Furthermore, the application of nanotechnology in agriculture offers an environmentally friendly alternative to conventional fertilizers, reducing the risk of groundwater contamination and soil salinity. From an agronomic perspective, the results suggest that foliar application of 4 ppt potassium nanoparticles during the fruiting stage is the most effective strategy for maximizing essential oil yield in fennel. This approach not only improves the economic viability of fennel cultivation but also aligns with sustainable agricultural practices by minimizing input waste and environmental impact.

Conclusion

In conclusion, this study underscores the potential of nanotechnology, particularly potassium nanoparticles, in enhancing the growth and essential oil production of fennel. By optimizing foliar application timing and concentration, farmers can achieve higher yields and better-quality essential oils, thereby increasing the profitability of fennel cultivation. The findings of this research provide valuable insights into the role of nanotechnology in sustainable agriculture and its potential to address global challenges in food and medicinal plant production. Future research should explore the long-term effects of nanofertilizers on soil health and plant physiology, as well as their applicability to other medicinal plants. Additionally, studies on the economic feasibility and scalability of nanofertilizer use in different agricultural systems would be beneficial. This work contributes to the growing body of knowledge on sustainable agricultural practices and highlights the importance of integrating innovative technologies into traditional farming systems to ensure food security and environmental sustainability in the face of a changing climate and growing population.

Keywords: Carbohydrates, Chlorophyll, Essential oil, Nano potassium oxide

بررسی صفات کمی و کیفی رازیانه (*Foeniculum vulgare* Mill) تحت تأثیر زمان و

سطوح مختلف محلول پاشی با نانوکودپتاسیم

نساء قره باغلی^{۱*} - احمد مهربان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷

چکیده

رازیانه (*Foeniculum vulgare* Mill) از گیاهان ارزشمند دارویی خانواده چتریان و دارای مصارف متعدد دارویی و غذایی می باشد. پژوهش حاضر به منظور بررسی اثرات زمان و سطوح مختلف محلول پاشی نانوذرات پتاسیم بر خصوصیات رشدی و اسانس رازیانه طی دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱، به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار در شهرستان رزن استان همدان اجرا گردید. زمان محلول پاشی در سه مرحله ساقه دهی، گل دهی و میوه دهی؛ و غلظت های مختلف نانوکودپتاسیم با ترکیب نانواکسیدپتاسیم در پنج غلظت شامل عدم محلول پاشی (شاهد)، ۲، ۳، ۴ و ۵ در هزار بودند. نتایج نشان داد که محلول پاشی در مرحله ساقه دهی با غلظت ۳ در هزار از نانوکودپتاسیم بیشترین اثر مثبت بر افزایش ارتفاع بوته، عملکرد زیست توده، عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد چتر در بوته، کربوهیدرات دانه، میزان کلروفیل a، b و کل را داشت. بیشترین افزایش صفات رشد رازیانه مربوط به عملکرد دانه بود. بیشترین درصد اسانس دانه (۴/۳۷ درصد) در تیمار ۵ در هزار نانوکودپتاسیم، و بیشترین عملکرد اسانس دانه (۶۹/۵ کیلوگرم در هکتار) در تیمار ۴ در هزار نانوکودپتاسیم در مرحله میوه دهی به دست آمد. نتایج این پژوهش تأیید می کند که برای بهبود صفات کیفی رازیانه با محلول پاشی نانوکودپتاسیم، بهترین زمان مرحله میوه دهی می باشد. با توجه به هدف تولید می توان غلظت محلول پاشی را تعیین کرد. از آنجاکه ارزش گیاهان دارویی بیشتر به تولید عملکرد اسانس مرتبط است، به منظور دستیابی به حداکثر عملکرد اسانس دانه، محلول پاشی در غلظت ۴ در هزار نانوکودپتاسیم در مرحله میوه دهی پیشنهاد می شود.

واژه های کلیدی: اسانس، کربوهیدرات، کلروفیل، نانواکسیدپتاسیم

مقدمه

یاد شده است. قدیمی ترین شواهد استفاده از این گیاه دارویی به ۶۰۰۰ سال پیش در غار شانیدر کردستان عراق برمی گردد (Lietava, 1992). رازیانه متعلق به خانواده چتریان (Apiaceae) است که امروزه در صنایع غذایی، دارویی، آرایشی و بهداشتی استفاده فراوان می شود (Bahmani et al., 2016). این گیاه بومی جنوب اروپا و منطقه مدیترانه بوده و در فرانسه، اسپانیا، پرتغال و شمال آفریقا به حالت خودرو رشد می کند (Lim, 2013). مردم یونان و روم باستان از خواص دارویی آن اطلاع کاملی داشتند و از آن برای درمان برخی از بیماری ها استفاده می کردند (Bahmani et al., 2016). رازیانه در طب سنتی ایران جهت درمان مشکلات گوارشی مانند نفخ، سوءهاضمه و درد معده، ضداسپاسم و ضدالتهاب، تنظیم کننده هورمون های زنانه و همچنین برای افزایش شیر مادران شیرده توصیه شده است (Damjanovic et al., 2005). رازیانه یکی از چهار گیاه ادویه ای بسیار مهم است که در سراسر نواحی معتدل و نیمه

اهمیت، جایگاه و نقش ویژه و رو به افزایش گیاهان دارویی و صنعتی به ویژه در ابعاد کلان توسعه اقتصادی، زیست محیطی، بهداشتی، اشتغال، امنیت غذایی و ذخایر ژنتیکی در عرصه ملی و جهانی به حدی است که می توان امروزه روند احیاء نقش گیاهان دارویی به ویژه در تأمین دارو را به عنوان یکی از شاخص های توسعه مورد توجه قرار داد (Davis & Choisy, 2024). رازیانه (*Foeniculum vulgare* Mill) از مهم ترین و قدیمی ترین گیاهان دارویی و ادویه ای است که در تمام دارونامه های معتبر از آن به عنوان نوعی گیاه دارویی پراهمیت

۱- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران

۲- گروه زراعت، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: n.gharebaghli@areeo.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.92581.1420>

مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و کاتالاز (CAT)، از تخریب متابولیت‌های ثانویه تحت تنش جلوگیری می‌کند (Cakmak, 2005). این تأثیرات نشان‌دهنده اهمیت مدیریت صحیح تغذیه پتاسیمی در کشت رازیانه برای دستیابی به حداکثر تولید کمی و کیفی متابولیت‌های ارزشمند در این گیاه دارویی است.

طی چند سال اخیر، با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی، راهبردهای مختلف تغذیه گیاه برپایه حفظ محیط‌زیست و دسترسی بهتر عناصر غذایی برای گیاه مورد بررسی قرار گرفته است، که یکی از مهم‌ترین آن‌ها استفاده از فناوری نانو می‌باشد. فناوری نانو عبارت از دستکاری مواد در مقیاس اتمی و مولکولی، با هدف کنترل و استفاده از خواص آن‌ها در این سطوح است (Liu & Lal, 2014). با توجه به مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی و در نتیجه آلودگی آب‌های زیرزمینی و شور شدن خاک، استفاده از کودهای نانو به دلیل رهاسازی کنترل‌شده عناصر غذایی و کاهش هدررفت آن‌ها، بسیار کارآمد و مؤثر خواهد بود (Mim et al., 2025). راوات و همکاران (Rawat et al., 2019) گزارش دادند که کودهای نانو، پتانسیل استفاده به‌عنوان محرک رشد گیاه را دارند و می‌توانند تبادل گازی گیاه و کارایی ریشه را افزایش دهند. استفاده از نانوکودها (Nanofertilizers (NFs)) سبب افزایش کارایی عناصر غذایی می‌شوند، به‌طوری‌که علاوه بر رهاسازی مداوم عناصر غذایی، جذب و انتقال آن‌ها از طریق برگ نیز به‌سهولت انجام می‌گیرد (Yadav et al., 2023). از جمله ویژگی‌های جالب توجه مواد نانو، سبک و کوچک بودن آن‌ها و صرفه‌جویی در مواد مصرفی است، که این ویژگی‌ها باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی در کشاورزی می‌شود (Subramanian & Thirunavukkarasu, 2017). از آنجاکه مدیریت تغذیه در گیاهان زراعی و دارویی یکی از مهم‌ترین عواملی است که بر رشد، تولید و کیفیت ترکیبات مؤثره گیاهان اثر می‌گذارد، استفاده از نانوکودها ضروری به نظر می‌رسد (Karami et al., 2018).

با توجه به اهمیت بالای تغذیه در تولید کمی و کیفی گیاهان دارویی و مزایای کاربرد نانوکودپتاسیم نسبت به کودهای معمولی پتاسیم، استفاده از کودها در ابعاد نانو توصیه شده است. این‌طور به نظر می‌رسد که مصرف نانوکودها به سبب بهبود جذب و انتقال آن‌ها از طریق روزنه‌های برگ (استوماتا) و ریشه، همچنین انتقال سریع‌تر به بافت‌های گیاهی به دلیل عبور از موانع سلولی (Yadav et al., 2023) باشد. همچنین به نظر می‌رسد که نانوکودپتاسیم اثر بیشتری بر افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز، سنتز اسانس‌ها و دفاع آنتی‌اکسیدانی نسبت به کود پتاسیم داشته باشد (Davarpanah et al., 2014).

گرمسیری جهان کشت می‌شود (Jadid et al., 2023). وجود تنوع ژنتیکی بین گونه‌ها، نیاز آبی کم و مقاومت به خشکی بیش از پیش بر اهمیت این گیاه می‌افزاید (Coshge et al., 2008). ایران یکی از تولیدکنندگان و صادرکنندگان مهم رازیانه در منطقه است و استان‌های عمده تولیدکننده آن در کشور، همدان، خراسان، کهگیلویه و بویراحمد، لرستان، تهران، کرمان و گلستان می‌باشند. سطح زیرکشت رازیانه در کشور سه هزار و ۲۱۷ هکتار است که سه هزار و ۳۴ هکتار آن در استان همدان کشت می‌شود و سه هزار هکتار آن مربوط به شهرستان رزن است. همدان، بیشترین میزان عملکرد دانه در واحد سطح (۲۵۳۵ کیلوگرم در هکتار) را تولید می‌کند. در سال‌های اخیر به‌منظور افزایش تولید کمی و کیفی گیاهان دارویی به تغذیه آن‌ها توجه زیادی شده است.

در بین عناصر مورد استفاده به‌صورت کود، پتاسیم مهم‌ترین کاتیون یک‌ظرفیتی است که دارای جذب انتخابی بوده و در فیزیولوژی و متابولیسم گیاه و فعال کردن آنزیم‌های گیاهی و افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی نقش مهمی دارد (Larki et al., 2015). مصرف کودهای شیمیایی می‌تواند زیست‌توده گیاهی را افزایش دهد. در این رابطه، مقدار و منابع کودی پتاسیم دارای اهمیت خاصی هستند (Rawat et al., 2016). پتاسیم علاوه بر افزایش تولید و بهبود کیفیت محصول سبب افزایش مقاومت گیاهان به شوری، کم‌آبی، انواع تنش‌ها، آفت‌ها و بیماری‌ها گردیده و کارایی آب و کود را افزایش می‌دهد (Hasanuzzaman et al., 2018). نقش پتاسیم در تغذیه گیاه دارویی رازیانه شامل تنظیم فشار تورگر و باز شدن روزنه‌ها (Marschner, 2012)، فعال‌سازی بیش از ۵۰ آنزیم از جمله آنزیم‌های دخیل در سنتز پروتئین و کربوهیدرات‌ها (Cakmak, 2005)، افزایش مقاومت به تنش‌ها از طریق تقویت دیواره سلولی و کاهش تنش اکسیداتیو (Hasanuzzaman et al., 2018) گزارش شده است. علاوه بر این پتاسیم نیز بر تولید متابولیت‌های ثانویه در رازیانه تأثیر می‌گذارد. مطالعات نشان داده‌اند که مصرف بهینه پتاسیم (معمولاً ۲۰۰-۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) محتوای اسانس دانه‌های رازیانه را افزایش داد (Hassanpour Aghdam et al., 2011). پتاسیم با بهبود فتوسنتز، پیش‌سازهای اسانس‌ها (مانند فنیل پروپانویدها) را افزایش می‌دهد (Omid Baigi, 2005) و آنزیم‌های کلیدی در مسیر شیکیمات و فنیل پروپانویدها مانند فنیل آلانین آمونیلایز (PAL) را فعال می‌کند که منجر به سنتز بیشتر ترکیبات فنلی می‌شود (Taiz & Zeiger, 2015). مطالعات روی گیاه رازیانه نشان داد که کمبود پتاسیم باعث کاهش غلظت ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مانند روتین و کوثرستین می‌شود (Alam et al., 2014). همچنین پتاسیم با تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر مدیریت زمان و سطوح محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم بر صفات کمی و کیفی رازیانه، این پژوهش طی دو سال در بهار سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱ انجام شد. شهرستان رزن، با مختصات جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۷ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۸ دقیقه عرض شمالی و با ارتفاع ۲۶۴۳ متر از سطح دریا با آب‌وهوایی نیمه‌خشک و میانگین بارندگی سالانه ۲۳۰ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت ۱۱ درجه سانتی‌گراد، در فاصله ۷۵ کیلومتری شمال شهرستان همدان قرار دارد. میانگین آمار هواشناسی در بهار سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در جدول ۱ ارائه شده است.

مشخصات فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای آزمایش در جدول

۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- میانگین آمار هواشناسی در بهار سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 1- The average of meteorological statistics in the spring of the 1400-1401 and 1402-2021 crop years

Table 1- The average of meteorological statistics in the spring of the 1400-1401 and 1401-1402 crop years						
سال Year	۱۴۰۱-۱۴۰۰ 2021-2022			۱۴۰۲-۱۴۰۱ 2022-2023		
ماه Month	فروردین March	اردیبهشت April	خرداد May	فروردین March	اردیبهشت April	خرداد May
میانگین دما Average temperature (°C)	15.06	20.26	26.14	17.24	20.00	25.65
بارش Precipitation (mm)	22.6	13.2	2.4	24.2	20.11	10.50

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 2- The physical and chemical characteristics of soil

سال Year	بافت Texture	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	واکنش خاک pH	ماده آلی Organic matter	نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K
		(%)						(%)		(ppm)
اول First	لوم شنی Sandy	52	26	22	1.02	7.7	0.79	0.09	8	169.53
دوم Second	loam				1.10	7.4	0.83	0.07	8.1	141

پاشی (شاهد)، ۲، ۳، ۴ و ۵ در هزار نانوکودپتاسیم بودند (Saedi et al., 2020).

نانوکودپتاسیم با نام تجاری Nano-Potassium Fertilizer از شرکت نانوکود پارس خریداری گردید. این نانوکود با فرمولاسیون مبتنی بر نانوذرات اکسیدپتاسیم (K₂O) با اندازه ذرات ۱۰۰-۲۰ نانومتر بوده که با روش‌های استاندارد سنتز و مشخص‌سازی شده است. این ترکیب در آب (به دلیل پوشش سطحی هیدروفیل) محلول بوده، در PH= 5-8 و دمای ۴-۳۰° سانتی‌گراد پایدار است و شکل ذرات مشاهده‌شده با میکروسکوپ الکترونی (SEM) به شکل کروی یا

الی (al., 2017). علی‌رغم مشخص شدن اثرات چشمگیر نانوکودهای پتاسیمی بر تولید کمی و کیفی بسیاری از گیاهان دارویی، متأسفانه اطلاعات بسیار کمی در خصوص زمان و غلظت کاربرد این ترکیبات در رازیانه وجود دارد. از آنجاکه یکی از دلایل عمده محدودیت توسعه سطح زیرکشت رازیانه در ایران، کمبود تحقیقات به‌زراعی و به‌نژادی، بالا بودن هزینه و پایین بودن بازده تولید است (Safaii et al., 2020). بنابراین تحقیق حاضر در راستای بررسی زمان و غلظت‌های مطلوب محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم در تولید رازیانه به‌عنوان یک گیاه دارویی پراهمیت در شهرستان رزن استان همدان، برای ارزیابی صفات کمی (ارتفاع بوته، عملکرد زیست‌توده، عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد چتر در بوته و تعداد دانه در چتر) و صفات کیفی (درصد اسانس، عملکرد اسانس، کربوهیدرات، کلروفیل a, b و کلروفیل کل) اجرا شد.

این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. در این آزمایش، مراحل مختلف محلول‌پاشی به‌عنوان عامل اول در سه مرحله ساقه-دهی، گل‌دهی و میوه‌دهی محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم در این سه مرحله بحرانی، نیاز گیاه به پتاسیم را به‌صورت هدفمند تأمین می‌کند و از هدررفت کود جلوگیری می‌نماید. این روش مبتنی بر فیزیولوژی گیاه و شواهد آزمایشگاهی است (Marschner, 2012; Zorb et al., 2014; Hasanuzzaman et al., 2018) و غلظت‌های مختلف نانوکودپتاسیم به‌عنوان عامل دوم در پنج غلظت شامل عدم محلول-

بیضوی می‌باشد. بذرهای مورد نیاز جهت کشت از توده محلی رازیانه همدان، بعد از اطمینان از قوه نامیه مناسب تهیه شد. به‌منظور اجرای عملیات زراعی زمانی که دمای خاک مناسب بود، زمین زراعی با یک شخم و دو دیسک سبک عمود بر هم، آماده و با لولر تسطیح شد. هر کرت با طول شش متر و عرض سه متر، فاصله بین ردیف‌ها ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف ۲۵ سانتی‌متر، فاصله بین کرت‌ها ۰/۵ متر، و فاصله بین بلوک‌ها سه متر در نظر گرفته شد. اولین آبیاری قبل از کشت به‌صورت ثقلی و نشتی بود. پس از گاو رو شدن زمین، عملیات کاشت به‌ترتیب در سال‌های اول و دوم آزمایش در تاریخ یکم اردیبهشت ماه ۱۴۰۰ و سوم اردیبهشت ماه ۱۴۰۱ به‌صورت دست‌پاش در چاله‌هایی به‌عمق دو تا سه سانتی‌متر و در هر چاله سه تا چهار بذر در کرت‌های مذکور صورت گرفت و بلافاصله عملیات آبیاری انجام شد. بذر با استفاده از رطوبت خاک جوانه زده و طی یک هفته سبز شدند. در این زمان، خاک خشک شده و آبیاری دوم انجام شد. دور آبیاری هر چهار تا پنج روز یک بار بود، مگر اینکه شرایط خاصی نظیر دمای بالا به مدت طولانی سبب تغییر دور آبیاری گردید. به‌طور کلی، مسئله آبیاری در انجام بازدیدهای مزرعه‌ای کنترل و برنامه‌ریزی شد.

جهت دستیابی به تراکم مطلوب، عمل تنک کردن در دو مرحله شش و هشت برگی صورت گرفت. مبارزه با علف‌های هرز در دو مرحله در نیمه دوم اردیبهشت و اوایل خرداد ماه به‌روش مکانیکی (وجین دستی) و با نیروی کارگری انجام شد. مقدار و نوع کود مصرفی با توجه به آزمایش خاک، شامل ۱۰۰ کیلوگرم آمونیوم فسفات در هکتار در مرحله خاکورزی و کود اوره در سه مرحله هنگام کاشت، ساقه‌دهی و قبل از گل‌دهی به‌مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار همراه با آب آبیاری مورد استفاده قرار گرفت. همچنین محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم براساس تیمارهای مورد مطالعه روی گیاه اعمال شد. محلول‌پاشی در ساعات پایانی روز و هنگام غروب آفتاب به‌وسیله سم‌پاش پستی تلمبه‌ای و با فشار یکسان روی بوته‌ها انجام شد. فاصله نازل سم‌پاش تا بالای بوته‌ها ۵۰ سانتی‌متر بود. محلول‌پاشی تا زمان جاری شدن قطرات محلول از روی بوته‌ها ادامه یافت.

بذرهای رازیانه به‌طور هم‌زمان نمی‌رسند و پس از رسیدن از گیاه جدا و به اطراف پراکنده می‌شوند. از این رو قبل از ریزش باید محصول را برداشت نمود. عملیات برداشت در سال‌های اول و دوم آزمایش به‌ترتیب در تاریخ ۲۱ شهریورماه ۱۴۰۰ و ۱۹ شهریور ماه ۱۴۰۱ پس از حذف ردیف‌های کناری و ۰/۵ متر ابتدا و انتهای هر کرت در زمان رسیدگی فیزیولوژیک (زرد شدن ۷۰ درصد برگ‌ها و چترها) با نمونه-برداری از ۱۰ بوته به‌طور تصادفی آغاز گردید.

اندازه‌گیری ارتفاع بوته از محل یقه در سطح خاک تا نوک بوته با استفاده از متر پارچه‌ای برحسب سانتی‌متر انجام شد. جهت اندازه-گیری عملکرد زیست‌توده، ابتدا بذور از نمونه‌ها جدا و سپس به کمک دستگاه آون (در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد) تا حصول وزن ثابت خشک شدند، سپس وزن ساقه و برگ خشک‌شده همراه بذور اندازه‌گیری و بر مبنای کیلوگرم در هکتار گزارش گردید. جهت بررسی و محاسبه عملکرد دانه، بعد از جداسازی دانه از بوته، عملکرد دانه در هکتار برحسب کیلوگرم در هکتار به‌وسیله ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد. تعداد چتر در بوته و دانه در چتر ۱۰ بوته به‌طور جداگانه شمارش و میانگین آن‌ها محاسبه گردید. جهت محاسبه وزن هزاردانه، تعداد چهار نمونه ۱۰۰ تایی به‌طور تصادفی انتخاب و میانگین وزنی به‌دست‌آمده در عدد ۱۰ ضرب و برحسب گرم برای هر کرت آزمایشی گزارش گردید.

تعیین درصد اسانس دانه با کمک روش استفاده‌شده در تحقیق میرعبداللهی (Mirabdollahi, 2011) انجام گردید. سپس عملکرد اسانس از حاصل‌ضرب عملکرد دانه و درصد اسانس محاسبه شد. برای اندازه‌گیری کربوهیدرات‌های محلول برگ از روش ایریگوین و همکاران (Irigoyen et al., 1992) و برای اندازه‌گیری کلروفیل برگ از روش آرنون (Arnon, 1965) استفاده شد. اندازه‌گیری غلظت نیتروژن با استفاده از روش کج‌دلال (Kjeldahl, 1883)، فسفر با استفاده از روش اولسن و همکاران (Olsen et al., 1954) و پتاسیم به‌روش شعله‌سنجی با استفاده از دستگاه نورسنج شعله‌ای (فلیم‌فومتر) در آزمایشگاه اندازه‌گیری و تعیین شد.

پس از جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه واریانس با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴) و ترسیم جداول با استفاده از نرم‌افزار Word انجام گرفت. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

برپایه نتایج حاصل از تجزیه واریانس، ارتفاع بوته رازیانه بین دو سال آزمایش به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر مراحل و سطوح مختلف محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم با احتمال خطای یک درصد قرار گرفت (جدول ۳).

با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۴) مشاهده می‌شود که بیشترین ارتفاع بوته برابر با ۸۴/۵۹ سانتی‌متر در سال دوم آزمایش در مرحله ساقه‌دهی همراه با محلول‌پاشی در غلظت ۳ در هزار نانوکودپتاسیم به دست آمد. بین این تیمار با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده شد، به‌طوری‌که محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم در

مرحله میوه‌دهی در سال اول آزمایش نسبت به شاهد منجر به افزایش ۲۰ سانتی‌متری ارتفاع بوته شد. به نظر می‌رسد که نقش پتاسیم در حفظ پتانسیل آب سلول و کمک به جذب آب توسط گیاه، از دلایل افزایش ارتفاع بوته‌های رازیانه در واکنش به مصرف نانوکودپتاسیم می‌باشد. پتاسیم با تأثیری که در رشد و فتوسنتز گیاه، تنظیمات روزنه‌ای و فعال کردن حداقل ۶۰ آنزیم گیاهی داشته (Selva-Preetha & Balakrishnam, 2017) می‌تواند به‌عنوان محرک رشد طولی سلول‌ها همراه با مصرف کودهای شیمیایی نیتروژن و فسفردار در افزایش ارتفاع بوته نقش داشته باشد.

حسنى و همکاران (Hassani et al., 2015) در مطالعه‌ای روی نعنای فلفلی (*Mentha piperta*) نشان دادند که کودهای آهن، نانو آهن، نانو روی، پتاس و نانوپتاس به‌طور معنی‌داری ارتفاع بوته را در گیاه نعنای فلفلی نسبت به شاهد افزایش دادند. آن‌ها معتقد بودند که کودهای شیمیایی معمول و نانو علاوه بر تحریک رشد، فعالیت متابولیکی را در گیاهان دارویی تغییر می‌دهند. نجفی وفا و همکاران

(Najafi Vafa et al., 2015) گزارش نمودند که استفاده از کودهای نانو روی در سطوح بالاتر به‌شکل محلول‌پاشی به‌طور معنی‌داری ارتفاع بوته را در گیاه مرزه (*Satureja hotensis*) نسبت به تیمار بدون کود افزایش داد. در تأیید نتایج این پژوهش، مباحثیر و همکاران (Mubashir et al., 2023) گزارش کردند که محلول‌پاشی با نانوکودپتاسیم در مراحل اولیه رشد اندام هوایی در گیاه گوجه فرنگی (*Solanum lycopersiacum*)، افزایش معنی‌داری در ارتفاع بوته به‌وجود آورده است. مطالعات ماهیل و کومار (Mahil & Aravinda Kumar, 2019)، دلیل افزایش رشد در گیاهان مختلف با کاربرد نانوکودها را تأثیر نانوکودها بر افزایش دسترسی به مواد مغذی و نقش مهم آن‌ها در فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان دانسته و تأکید کردند که نانوکودها سبب ارتقای فعالیت‌های مریستمی در گیاهان شده و رشد رأس ساقه و ناحیه فتوسنتزی را افزایش می‌دهد که احتمالاً این موضوع، دلیل اصلی افزایش ارتفاع در گیاهان در معرض نانوکودها می‌باشد.

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب صفات رازیانه تحت تأثیر مراحل و سطوح محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم

Table 3- Combined ANOVA for the fennel traits affected by stages and levels of nanopotassium foliar application

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	عملکرد زیست‌توده Biomass yield	عملکرد دانه Seed yield	وزن هزار دانه Thousand- seed weight	چتر در بوته Umbles in plant	دانه در چتر Seed in umbles
سال Year (Y)	1	322.89**	639983.74*	461003.84**	1.61**	193.98**	373.21**
تکرار (سال) Replication (year)	2	15.20	120000.45	85000.32	0.05	18.45	25.12
مراحل محلول‌پاشی Spraying steps (SS)	2	49.72*	1239066.25**	424826.42**	0.17 ^{ns}	149.62**	62.06*
Y × SS	2	35.79*	991260.57**	230074.40*	0.08 ^{ns}	121.86**	37.62 ^{ns}
غلظت محلول‌پاشی Spray concentration (SC)	4	141.91**	1655105.9**	5559097.67**	0.29*	55.81**	262.86**
Y × SC	4	32.62*	171991.61 ^{ns}	1013189.66**	0.06 ^{ns}	8.54 ^{ns}	68.98**
SS × SC	8	52.43**	670012.52**	516494.33**	0.22*	63.92**	82.64**
Y × SS × SC	8	38.47**	559752.25**	572354.83**	0.17*	39.70**	27.07 ^{ns}
خطای آزمایش Error	58	11.30	157504.38	58490.77	0.08	13.49	14.06
ضریب تغییرات C.V (%)	-	4.64	10.24	16.13	6.27	11.10	2.88

^{ns}: غیرمعنی‌دار، * و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

^{ns}: non- significant, * and **: significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively

جدول ۴- صفات رازیانه تحت تأثیر مراحل و سطوح محلول پاشی نانوکود پتاسیم

Table 4- The fennel traits affected by stages and levels of potassium nanoparticles foliar spraying

تیمارهای آزمایشی Experimental treatments			ارتفاع بوته Plant height (cm)	عملکرد زیست توده Biomass yield (kg.h ⁻¹)	عملکرد دانه Seed yield (kg.h ⁻¹)	وزن هزار دانه Thousand seed weight (g)	چتر در بوته Umbles in plant
سال Year	مراحل محلول پاشی Spraying steps	غلظت محلول پاشی Spray concentration					
سال اول First year	ساقه‌دهی Stemming	شاهد Control	68.02 ^{e-i*}	3468.9 ^{e-j}	783.3 ^{lm}	4.247 ^{efg}	30.53 ^{d-g}
		۲ در هزار 2/1000	72.20 ^{c-h}	3770.3 ^{l-i}	1283.6 ^{e-k}	4.231 ^{efg}	32.43 ^{d-g}
		۳ در هزار 3/1000	76.41 ^{b-d}	4113.2 ^{b-f}	2798.8 ^b	4.635 ^{a-f}	34.94 ^{de}
		۴ در هزار 4/1000	72.52 ^{c-h}	3954.1 ^{c-h}	1728.2 ^{de}	4.548 ^{a-f}	32.69 ^{d-g}
		۵ در هزار 5/1000	70.58 ^{d-i}	3880.7 ^{c-i}	1244.5 ^{f-l}	4.473 ^{b-f}	31.90 ^{d-g}
		شاهد Control	71.25 ^{d-h}	3137.0 ^{ij}	588.2 ^m	4.163 ^{fg}	29.55 ^{efg}
	گل‌دهی Flowering	۲ در هزار 2/1000	68.57 ^{e-i}	3668.9 ^{d-j}	1468.6 ^{e-h}	4.273 ^{efg}	32.12 ^{d-g}
		۳ در هزار 3/1000	74.66 ^{c-e}	4254.6 ^{a-c}	1361 ^{e-j}	4.552 ^{a-f}	34.58 ^{def}
		۴ در هزار 4/1000	70.97 ^{d-i}	4080.7 ^{b-g}	1559 ^{efg}	4.564 ^{a-f}	31.43 ^{d-g}
		۵ در هزار 5/1000	72.59 ^{c-g}	3937.0 ^{c-h}	2379.1 ^{bc}	4.601 ^{a-f}	30.70 ^{d-g}
		شاهد Control	64.59 ⁱ	2934.9 ^j	576.3 ^m	3.905 ^g	25.72 ^g
	میوه‌دهی Fruiting	۲ در هزار 2/1000	66.44 ^{g-i}	3504.2 ^{a-d}	952.1 ^{j-m}	4.273 ^{efg}	27.49 ^{fg}
		۳ در هزار 3/1000	70.00 ^{d-i}	4313.2 ^{a-d}	1476.8 ^{efg}	4.407 ^{l-g}	34.03 ^{def}
		۴ در هزار 4/1000	66.56 ^{f-i}	3651.7 ^{d-j}	1145.8 ^{g-l}	4.469 ^{b-f}	31.64 ^{d-g}
		۵ در هزار 5/1000	71.28 ^{d-h}	3495.5 ^{e-j}	1351.4 ^{e-j}	4.443 ^{e-g}	27.24 ^{fg}
		شاهد Control	69.63 ^{e-i}	3308.1 ^{g-j}	1111.9 ^{g-l}	4.497 ^{b-f}	31.80 ^{d-g}
سال دوم Second year	ساقه‌دهی Stemming	۲ در هزار 2/1000	69.53 ^{e-i}	4154.1 ^{b-f}	1228.8 ^{f-l}	4.693 ^{a-f}	32.53 ^{d-g}
		۳ در هزار 3/1000	84.59 ^a	4931.3 ^a	3311.1 ^a	5.099 ^a	45.97 ^a
		۴ در هزار 4/1000	81.58 ^{ab}	4773.9 ^{ab}	2080.9 ^{cd}	4.657 ^{a-f}	42.89 ^{ab}
		۵ در هزار 5/1000	78.31 ^{bc}	4561.8 ^{abc}	1451.4 ^{e-i}	4.481 ^{b-f}	42.29 ^{abc}
		شاهد Control	67.74 ^{f-i}	3177.5 ^{hij}	987.9 ^{i-m}	4.278 ^{efg}	32.10 ^{d-g}
		۲ در هزار 2/1000	72.97 ^{c-g}	4102.0 ^{b-f}	998.1 ^{h-m}	4.719 ^{a-f}	33.93 ^{def}
	گل‌دهی Flowering	۳ در هزار 3/1000	74.59 ^{c-e}	4928.7 ^a	2602.8 ^b	5.028 ^{ab}	36.09 ^{cde}
		۴ در هزار 4/1000	76.55 ^{b-d}	3704.8 ^{d-j}	1576.8 ^{efg}	4.859 ^{a-d}	37.43 ^{bcd}
		۵ در هزار 5/1000	77.93 ^{bc}	3481.4 ^{e-j}	1245.8 ^{f-l}	4.947 ^{a-d}	32.01 ^{d-g}
		شاهد Control	67.74 ^{f-i}	3177.5 ^{hij}	987.9 ^{i-m}	4.278 ^{efg}	32.10 ^{d-g}
		۲ در هزار 2/1000	72.97 ^{c-g}	4102.0 ^{b-f}	998.1 ^{h-m}	4.719 ^{a-f}	33.93 ^{def}
		۳ در هزار 3/1000	74.59 ^{c-e}	4928.7 ^a	2602.8 ^b	5.028 ^{ab}	36.09 ^{cde}
		۴ در هزار 4/1000	76.55 ^{b-d}	3704.8 ^{d-j}	1576.8 ^{efg}	4.859 ^{a-d}	37.43 ^{bcd}
		۵ در هزار 5/1000	77.93 ^{bc}	3481.4 ^{e-j}	1245.8 ^{f-l}	4.947 ^{a-d}	32.01 ^{d-g}

ميوه‌دهی Fruiting	شاهد Control	65.88 ^{hi}	3414.3 ^{f-j}	858.6 ^{klm}	4.265 ^{efg}	26.31 ^g
	۲ در هزار 2/1000	70.57 ^{d-i}	3823.4 ^{e-i}	1328.8 ^{e-j}	4.504 ^{b-f}	30.39 ^g
	۳ در هزار 3/1000	78.36 ^{bc}	4199.1 ^{a-f}	2407.1 ^{bc}	4.978 ^{abc}	35.52 ^{de}
	۴ در هزار 4/1000	73.25 ^{c-f}	3841.9 ^{e-i}	1701.9 ^{def}	4.764 ^{a-e}	35.30 ^{de}
	۵ در هزار 5/1000	72.00 ^{c-h}	3664.7 ^{d-j}	1383.6 ^{e-j}	4.781 ^{a-e}	31.66 ^{d-g}

* میانگین‌های با حروف مشترک در هر ستون، براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

* Means with common letters in each column are not significantly different at the five percent probability level, based on Duncan's multiple range test.

عملکرد زیست‌توده

برپایه نتایج حاصل از تجزیه واریانس، عملکرد زیست‌توده رازیانه بین دو سال آزمایش به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر مراحل و سطوح مختلف محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم با احتمال خطای یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۴) مشاهده شد که بیشترین عملکرد زیست‌توده برابر با ۴۹۳۱/۳ کیلوگرم در هکتار در سال دوم آزمایش در مرحله ساقه‌دهی همراه با محلول‌پاشی در غلظت ۳ در هزار نانوکودپتاسیم به دست آمد. بین این تیمار با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده شد، به‌طوری‌که نسبت به تیمار محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم در مرحله میوه‌دهی در سال اول آزمایش (کمترین عملکرد زیست‌توده)، ۱۹۹۶/۴ کیلوگرم افزایش نشان داد. می‌توان اظهار داشت که استفاده از نانوکودپتاسیم ضمن دسترسی سریع عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، موجبات افزایش پیکره رویشی و تولید زیست‌توده را فراهم آورده است. پتاسیم به‌راحتی در سراسر گیاه حرکت می‌کند و به‌مقدار زیاد در بخش‌های فعال و در حال رشد گیاه وجود دارد، یون پتاسیم انتقال مواد حاصل از فتوسنتز را تسریع می‌کند و منجر به رشد بهتر گیاهان می‌شود (Patil, 2011). پتاسیم نقش حیاتی در فتوسنتز دارد، چون باعث افزایش سطح برگ و جذب دی‌اکسید کربن و افزایش انتقال مواد فتوسنتزی به خارج برگ می‌شود. فعالیت پتاسیم موجب تشکیل ATP بیشتر شده که برای تجمع مواد فتوسنتزی در آوند آبکش لازم است (Gardner et al., 2011).

نتایج کاظمی و همکاران (Kazemi et al., 2019) نیز نشان داد که برهم‌کنش تنش آبی و کودهای نانو و کودهای شیمیایی بر عملکرد زیستی گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor*) معنی‌دار گردید. بالاترین عملکردهای زیستی و دانه به‌ترتیب در شرایط آبیاری + کود شیمیایی و آبیاری معمولی + ماکرو نانوکود + میکرو نانوکود به دست آمد. همچنین نتایج آزمایش آستانه و همکاران (Astaneh et al., 2020) در بررسی اثر متقابل تنش، اوره و کود نانوکلات نیتروژن

عملکرد دانه

برپایه نتایج حاصل از تجزیه واریانس، عملکرد دانه رازیانه بین دو سال آزمایش به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر مراحل و سطوح مختلف محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم با احتمال خطای یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۴) مشاهده می‌شود که بیشترین عملکرد دانه برابر با ۳۳۱۱/۱ کیلوگرم در هکتار در سال دوم آزمایش در مرحله ساقه‌دهی همراه با محلول‌پاشی در غلظت ۳ در هزار نانوکودپتاسیم به دست آمد. بین این تیمار با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده شد، به‌طوری‌که محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم در مرحله میوه‌دهی در سال اول آزمایش نسبت به شاهد، ۲۷۳۴/۸ کیلوگرم در هکتار افزایش نشان داد. نتایج آزمایش‌های بخشایش و شرف‌الدین (Bakhshayesh & Sharafuddin, 2017) نشان داد که نانوذرات فسفر، کلسیم، آهن، روی، بور و مولیبدن سبب بهبود فتوسنتز و متابولیسم گیاه می‌گردد. لذا تلفیق میکرونانونوکودها با ماکرونانونوکودها می‌تواند عملکرد دانه را افزایش دهد. رامشایه و همکاران (Rameshaiah et al., 2015) پس از آزمایش‌های خود روی نانوکودها، نانوکودهای نیتروژن، فسفر و پتاسیم را بسیار مؤثر در افزایش عملکرد گیاهان دانستند. در آزمایش دیگری، محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم در مرحله پنجه‌زنی و ساقه‌دهی گندم (*Triticum sativum*)، باعث افزایش قابل توجه عملکرد اقتصادی گردید (Jafarzadeh et al., 2013).

نتایج رضایی و همکاران (Rezaie et al., 2019) نشان داد که برهم‌کنش محلول‌پاشی متانول و نانوکودپتاس بر عملکرد دانه تأثیر معنی‌داری داشت. بیشترین عملکرد دانه از تیمار ۱۵ درصد حجمی متانول + ۴ کیلوگرم در هکتار نانوکودپتاس حاصل شد. طبق نتایج

پژوهشگران، محلول‌پاشی سه در هزار نانوکلسیم باعث افزایش شاخص‌های رشدی از جمله سطح برگ و عملکرد دانه در ریحان (*Ocimum basilicum*) شد (Ghahremani et al., 2014). آن‌ها دلیل آن را بهبود فتوسنتز و همچنین بهبود جذب عناصر غذایی توسط گیاه و به دنبال آن افزایش رشد در گیاه دانستند. آقازاده خلخالی و همکاران (Aghazadeh-Khalkhali et al., 2015) با بررسی اثر محلول‌پاشی نانوکود کلات آهن و پتاسیم بر رشد و عملکرد اسفزه (*Plantago ovata*) گزارش کردند که فراهم کردن این دو کود سبب افزایش رشد ریشه و در نهایت عملکرد دانه این گیاه دارویی گردید.

وزن هزار دانه

برپایه نتایج حاصل از تجزیه واریانس، وزن هزار دانه رازیانه بین دو سال آزمایش به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر مراحل و سطوح مختلف محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم با احتمال خطای پنج درصد قرار گرفت (جدول ۳). با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۴) مشاهده می‌شود که بیشترین وزن هزار دانه برابر با ۵/۰۹ گرم در سال دوم آزمایش در مرحله ساقه‌دهی همراه با محلول‌پاشی در غلظت ۳ در هزار نانوکودپتاسیم به دست آمد. بین این تیمار با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده شد، به‌طوری‌که محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم در مرحله میوه‌دهی در سال اول آزمایش نسبت به شاهد، ۱/۱۹ گرم افزایش نشان داد. از موارد تأثیر پتاسیم بر گیاهان می‌توان ازدیاد وزن دانه را نام برد، زیرا پتاسیم، تولید نشاسته و کربوهیدرات‌ها را افزایش می‌دهد (Tavan et al., 2014). لذا مصرف کود پتاسیم می‌تواند افزایش‌دهنده وزن دانه باشد. همچنین نقش عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در گزارش‌های پژوهشگران دیگر (Selva-Preetha & Balakrishnam, 2017; Tavan et al., 2014) در افزایش وزن دانه گزارش گردید. در پژوهش دیگری، امیرنیا و همکاران (Amirnia et al., 2014) گزارش نمودند که نانوکود آهن به‌طور معنی‌داری وزن تر گل زعفران (*Crocus sativus*) را در مقایسه با کودهای نانوپتاس و نانوفسفر افزایش داد.

تعداد چتر در بوته

برپایه نتایج حاصل از تجزیه واریانس، تعداد چتر در بوته رازیانه بین دو سال آزمایش به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر مراحل و سطوح مختلف محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم با احتمال خطای یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۴) مشاهده می‌شود که بیشترین تعداد چتر در بوته برابر با ۴۵/۹۷ عدد در سال

دوم آزمایش در مرحله ساقه‌دهی همراه با محلول‌پاشی در غلظت ۳ در هزار نانوکودپتاسیم به دست آمد. بین این تیمار با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده شد، به‌طوری‌که محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم در مرحله میوه‌دهی در سال اول آزمایش نسبت به شاهد، تقریباً ۲۱ عدد افزایش نشان داد. نتایج آزمایش آستانه و همکاران (Astaneh et al., 2020) در بررسی اثر متقابل تنش، اوره و کود نانوکلات نیتروژن بر گیاه گندم نشان داد که در شرایط نرمال و قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی بیشترین تعداد پنجه بارور، وزن هزار دانه و عملکرد دانه با کاربرد ۱۱۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۴۱ کیلوگرم نانوکودنیتروژن در هکتار به دست آمد. همچنین نتایج هرسینی و همکاران (Harsini et al., 2014) روی گندم نشان داد که محلول‌پاشی کلات نانوکود اثرات قابل توجه و معناداری در سطح احتمال پنج درصد بر تعداد سنبله، وزن هزار دانه، تعداد دانه در سنبله، شاخص برداشت، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه داشت. نتایج بیاتی و همکاران (Bayati et al., 2014) نیز حاکی از اثر بهبوددهنده نانوکود آهن بر عملکرد دانه کلزا (*Brassica napus*) بود که این نتیجه به‌علت بهبود تعداد خورچین و وزن هزاردانه به دست آمد.

تعداد دانه در چتر

بر پایه نتایج حاصل از تجزیه واریانس، تعداد دانه در چتر رازیانه بین دو سال آزمایش به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر مراحل و سطوح مختلف محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم با احتمال خطای یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها مشاهده می‌شود که بیشترین تعداد دانه در چتر در سال دوم آزمایش برابر با ۱۳۲/۰۸ عدد بوده است (جدول ۵). همچنین در مرحله ساقه‌دهی همراه با محلول‌پاشی در غلظت ۳ در هزار نانوکودپتاسیم برابر با ۱۴۳/۰۸ عدد به دست آمد (جدول ۶). بین این تیمار با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده شد، به‌طوری‌که نسبت به سال اول آزمایش تقریباً ۴ عدد دانه در چتر و نسبت به شاهد با محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم در مرحله میوه‌دهی ۲۳ عدد دانه در چتر افزایش یافت. احتمالاً محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم از طریق تأثیر بر ظرفیت فتوسنتزی بوته‌ها و نیز انتقال مواد فتوسنتزی به سمت چترهای در حال رشد توانست از ریزش چترها جلوگیری کند و بر پر شدن دانه‌ها اثر مثبت بگذارد، و با توجه به نقش پتاسیم در انتقال مواد پرورده و مواد غذایی، افزایش تعداد دانه بر اثر مصرف آن منطقی به نظر می‌رسد. با افزایش سرعت رشد چتر و تخصیص بیشتر مواد پرورده فتوسنتزی به چترهای در حال رشد، دانه‌های بزرگتر و بیشتری تولید می‌شود.

جدول ۵- تعداد دانه در چتر رازیانه در سال‌های مختلف
Table 5- The number of seeds in fennel umbrellas in different years

سال Year	تعداد دانه در چتر Number of seed per umbel
اول First	128.015 ^{b*}
دوم Second	132.088 ^a

* میانگین‌های با حروف مشترک در هر ستون، براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

* Means with common letters in each column are not significantly different at the five percent probability level, based on Duncan's multiple range test.

جدول ۶- تعداد دانه در چتر تحت اثرات متقابل مراحل و سطوح محلول پاشی نانوکودپتاسیم
Table 6- The number of seeds in the umbrella under the interaction effects of stages × levels of nano potassium foliar application

تیمارهای آزمایشی Experimental treatments		تعداد دانه در چتر Number of seed per umbel	
مراحل محلول پاشی Spraying steps	غلظت محلول پاشی Spray concentration	سال اول First year	سال دوم Second year
ساقه‌دهی Stemming	شاهد Control	137.57 ^{a*}	143.08 ^a
	۲ در هزار 2/1000	129.90 ^{bc}	127.48 ^c
	۳ در هزار 3/1000	126.47 ^{cd}	130.91 ^{bc}
	۴ در هزار 4/1000	124.86 ^{cd}	126.21 ^{cd}
	۵ در هزار 5/1000	120.89 ^d	120.45 ^d
	شاهد Control	125.43 ^{cd}	141.99 ^a
	۲ در هزار 2/1000	130.45 ^{bc}	140.64 ^a
گل‌دهی Flowering	۳ در هزار 3/1000	136.26 ^{ab}	132.09 ^{bc}
	۴ در هزار 4/1000	126.37 ^{cd}	131.44 ^{bc}
	۵ در هزار 5/1000	124.24 ^{cd}	127.25 ^c
	شاهد Control	126.91 ^{cd}	136.97 ^{ab}
	۲ در هزار 2/1000	128.09 ^{cd}	131.85 ^{bc}
میوه‌دهی Fruiting	۳ در هزار 3/1000	127.44 ^{cd}	129.25 ^c
	۴ در هزار 4/1000	127.85 ^{cd}	131.50 ^{bc}
	۵ در هزار 5/1000	127.50 ^{cd}	130.22 ^{bc}

* میانگین‌های با حروف مشترک در هر ستون، براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

* Means with common letters in each column are not significantly different at the five percent probability level, based on Duncan's multiple range test.

و عملکرد دانه در گیاه گندم تأثیر معنی‌داری داشت. بیشترین تعداد دانه در سنبله از تیمار ۱۵ درصد حجمی متانول + ۴ کیلوگرم در هکتار

نتایج رضایی و همکاران (Rezaie et al., 2019) نشان داد که برهم‌کنش محلول پاشی متانول و نانوکودپتاس بر تعداد دانه در سنبله

نانوکودپتاس حاصل شد که نسبت به شاهد، ۴۲ درصد افزایش نشان داد. جعفرزاده و همکاران (Jafarzadeh et al., 2013) نقش کود نانوپتاسیم در افزایش تعداد دانه در سنبله گندم را مثبت ارزیابی کردند که در نهایت منجر به افزایش عملکرد دانه گندم شد.

درصد اسانس دانه

برپایه نتایج حاصل از تجزیه واریانس، درصد اسانس دانه رازیانه بین دو سال آزمایش به طور معنی داری تحت تأثیر مراحل و سطوح مختلف محلول پاشی نانوکودپتاسیم با احتمال خطای پنج درصد قرار گرفت (جدول ۷).

با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۸) مشاهده می‌شود که بیشترین درصد اسانس دانه برابر با ۴/۳۷ درصد در سال دوم آزمایش در مرحله میوه‌دهی همراه با محلول پاشی در غلظت ۵ در هزار نانوکودپتاسیم به دست آمد. بین این تیمار با سایر تیمارها تفاوت

معنی داری مشاهده شد، به طوری که نسبت به شاهد محلول پاشی نانوکودپتاسیم در مرحله ساقه‌دهی در سال اول آزمایش ۲/۵۶ واحد افزایش نشان داد.

پتاسیم در ساخت آنزیم‌های درگیر در سنتز مواد مؤثره گیاهی، نقش دارد و سبب تقویت مسیرهای درگیر در تولید متابولیت‌های ثانویه می‌شود (Hassanpour Aghdam, 2008). تأمین عناصر ضروری در مراحل مختلف به خصوص بعد از گل‌دهی موجب تداوم فعالیت سطح برگ و افزایش بازده فتوسنتزی شده و نقش کلیدی در افزایش میزان اسانس دارد (Briat, Dubos & Gaymard, 2015). افزایش اسانس گیاه بادرنجبویه دناپی (*Dracocephalum kotschyi*) (Boiss) (Khanizadeh et al., 2024) و پونه‌معطر (*Mentha pulegium*) (El-Naggar & Osman, 2024) در معرض نانوکودها گزارش شده است.

جدول ۷- تجزیه واریانس مرکب صفات کیفی رازیانه تحت تأثیر مراحل و سطوح محلول پاشی نانوکودپتاسیم
Table 7- Combined ANOVA for the fennel quality traits affected by stages and levels of nano-potassium foliar spraying

منابع تغییرات S.O.V	df درجه آزادی	درصد اسانس Percentage essential oil	عملکرد اسانس Essential oil performance	کربوهیدرات Carbohydr ats	کلروفیل a Chlorophyll	کلروفیل b Chlorophyll	کلروفیل کل Chlorophyll total
سال Year (Y)	1	4.394**	6037.01**	0.2960**	0.1106*	0.0508**	49.03**
تکرار (سال) Replication (year)	2	0.305	150.32	0.052	0.025	0.0032	0.045
مراحل محلول پاشی Spraying steps (SS)	2	0.319 ^{ns}	70.86 ^{ns}	0.0923*	0.0555*	0.0118**	0.1046**
سال × مراحل محلول پاشی Y × SS	2	1.068*	42.93 ^{ns}	0.0428 ^{ns}	0.0356 ^{ns}	0.0075*	0.0864*
غلظت محلول پاشی Spray concentration (SC)	4	6.517**	1051.02**	0.5956**	0.2852**	0.0363**	0.3506**
Y × SC	4	0.468 ^{ns}	310.61*	0.0897**	0.0399 ^{ns}	0.0028 ^{ns}	0.1273**
مراحل × غلظت محلول پاشی SS × SC	8	0.683**	298.18**	0.1336**	0.0901**	0.0106**	0.1123**
Y × SS × SC	8	0.519*	213.38*	0.1151**	0.0723**	0.0081**	0.0926**
خطای آزمایش Error	58	0.229	91.071	0.0207	0.0173	0.0019	0.0202
ضریب تغییرات C.V (%)	-	16.53	26.06	5.57	5.56	10.63	6.77

^{ns}: غیرمعنی دار، * و **: به ترتیب معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

^{ns}: non- significant, * and **: significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively

جدول ۸- صفات کیفی رازیانه تحت تأثیر مراحل و سطوح محلول پاشی نانوکودپتاسیم

Table 8 - The fennel quality traits affected by the stages and levels of potassium nanoparticles foliar spraying

تیمارهای آزمایشی Experimental treatments			درصد اسانس Essential oil (%)	عملکرد اسانس Essential oil yield (kg.h)	کربوهیدرات Carbohydrat (mg.g ⁻¹)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg.g ⁻¹ fresh wieght)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.g ⁻¹ fresh wieght)	کلروفیل کل Chlorophyll total (mg.g ⁻¹ fresh wieght)
سال Year	مراحل محلول پاشی Spraying steps	غلظت محلول پاشی Spray concentration						
سال اول First year	ساقه‌دهی Stemming	شاهد Control	1.81 ^{j*}	13.31 ^j	2.45 ^{e-i}	2.09 ^{ijk}	0.337 ^{hi}	1.317 ^{ij}
		۲ در هزار 2/1000	1.91 ^{ij}	21.25 ^{ij}	2.56 ^{d-h}	2.32 ^{e-i}	0.363 ^{f-i}	1.357 ^{ij}
		۳ در هزار 3/1000	2.38 ^{f-j}	22.31 ^{hij}	2.87 ^{abc}	2.47 ^{b-f}	0.463 ^{a-d}	1.433 ^{ij}
		۴ در هزار 4/1000	2.40 ^{e-j}	29.01 ^{f-j}	2.47 ^{e-i}	2.28 ^{f-i}	0.460 ^{a-e}	1.357 ^{ij}
		۵ در هزار 5/1000	3.28 ^{b-f}	28.43 ^{f-j}	2.45 ^{e-i}	2.31 ^{e-i}	0.403 ^{c-i}	1.327 ^{ij}
	گل‌دهی Flowering	شاهد Control	2.23 ^{g-j}	20.16 ^{ij}	2.27 ^{ijk}	2.03 ^{jk}	0.320 ⁱ	1.283 ^{ij}
		۲ در هزار 2/1000	2.33 ^{g-j}	23.68 ^{hij}	2.57 ^{d-i}	2.15 ^{h-k}	0.340 ^{hi}	1.347 ^{ij}
		۳ در هزار 3/1000	2.84 ^{d-i}	25.68 ^{hij}	2.77 ^{bcd}	2.47 ^{b-f}	0.427 ^{b-g}	1.463 ⁱ
		۴ در هزار 4/1000	3.09 ^{b-g}	35.91 ^{c-i}	2.62 ^{c-g}	2.36 ^{d-h}	0.413 ^{b-h}	1.387 ^{ij}
		۵ در هزار 5/1000	3.51 ^{a-d}	29.23 ^{e-j}	2.56 ^{d-h}	2.28 ^{f-i}	0.403 ^{c-i}	1.350 ^{ij}
	میوه‌دهی Fruiting	شاهد Control	2.25 ^{g-j}	27.21 ^{g-j}	2.08 ^k	1.98 ^k	0.320 ⁱ	1.177 ^j
		۲ در هزار 2/1000	2.24 ^{g-j}	26.60 ^{hij}	2.28 ^{ijk}	2.25 ^{f-j}	0.320 ⁱ	1.300 ^{ij}
		۳ در هزار 3/1000	2.99 ^{c-h}	29.25 ^{e-j}	2.62 ^{c-g}	2.55 ^{a-e}	0.427 ^{b-g}	1.510 ⁱ
		۴ در هزار 4/1000	3.32 ^{b-e}	48.28 ^{bcd}	2.61 ^{c-g}	2.42 ^{b-g}	0.393 ^{di}	1.423 ^{ij}
		۵ در هزار 5/1000	3.57 ^{a-d}	46.21 ^{c-f}	2.37 ^{f-j}	2.33 ^{e-i}	0.347 ^{ghi}	1.367 ^{ij}
سال دوم Second year	ساقه‌دهی Stemming	شاهد Control	2.07 ^{hij}	24.13 ^{hij}	2.36 ^{g-j}	2.23 ^{f-j}	0.387 ^{d-i}	1.303 ^h
		۲ در هزار 2/1000	2.23 ^{g-j}	34.21 ^{d-i}	2.70 ^{cde}	2.32 ^{e-i}	0.470 ^{a-d}	2.470 ^{gh}
		۳ در هزار 3/1000	2.77 ^{d-i}	51.96 ^{bcd}	3.12 ^a	2.73 ^a	0.540 ^a	3.273 ^a
		۴ در هزار 4/1000	3.88 ^{abc}	41.16 ^{c-h}	2.88 ^{abc}	2.56 ^{a-e}	0.483 ^{abc}	3.057 ^{a-d}
		۵ در هزار 5/1000	3.62 ^{a-d}	41.30 ^{c-h}	2.69 ^{cde}	2.18 ^{g-k}	0.480 ^{abc}	2.523 ^{fgh}
	گل‌دهی Flowering	شاهد Control	2.12 ^{hij}	33.50 ^{d-i}	2.32 ^{h-k}	2.36 ^{d-h}	0.407 ^{c-i}	2.753 ^{ef}
		۲ در هزار 2/1000	2.58 ^{e-j}	41.06 ^{c-h}	2.47 ^{e-i}	2.36 ^{d-h}	0.377 ^{e-i}	2.880 ^{cde}
		۳ در هزار 3/1000	2.37 ^{f-j}	65.40 ^{ab}	2.98 ^{ab}	2.65 ^{ab}	0.573 ^a	3.197 ^a
		۴ در هزار 4/1000	3.52 ^{a-d}	45.83 ^{c-g}	2.65 ^{c-f}	2.61 ^{a-d}	0.387 ^{d-i}	3.097 ^{abc}

۵ در هزار 5/1000	3.81 ^{abc}	36.25 ^{c-i}	2.65 ^{c-f}	2.40 ^{b-h}	0.443 ^{b-f}	2.847 ^{cde}
شاهد Control	2.69 ^{d-j}	36.01 ^{c-i}	2.14 ^{jk}	2.28 ^{f-i}	0.337 ^{hi}	2.500 ^{gh}
۲ در هزار 2/1000	2.78 ^{d-i}	49.87 ^{bcd}	2.43 ^{e-i}	2.35 ^{e-h}	0.363 ^{f-i}	2.693 ^{efg}
۳ در هزار 3/1000	3.96 ^{ab}	54.14 ^{abc}	2.78 ^{bcd}	2.64 ^{abc}	0.537 ^a	3.177 ^{ab}
۴ در هزار 4/1000	4.00 ^{ab}	69.50 ^a	2.98 ^{ab}	2.55 ^{a-e}	0.497 ^{ab}	2.937 ^{b-e}
۵ در هزار 5/1000	4.37 ^a	47.80 ^{b-e}	2.60 ^{c-h}	2.39 ^{c-h}	0.347 ^{ghi}	2.833 ^{de}

* میانگین‌های با حروف مشترک در هر ستون، براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

* Means with common letters in each column are not significantly different at the five percent probability level, based on Duncan's multiple range test.

عملکرد اسانس دانه

براساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس، عملکرد اسانس دانه رازیانه بین دو سال آزمایش به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر مراحل و سطوح مختلف محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم با احتمال خطای پنج درصد قرار گرفت (جدول ۷). با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۸) مشاهده می‌شود که بیشترین عملکرد اسانس دانه برابر با ۶۹/۵ کیلوگرم در هکتار در سال دوم آزمایش در مرحله میوه‌دهی همراه با محلول‌پاشی در غلظت ۴ در هزار نانوکودپتاسیم به دست آمد. بین این تیمار با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده شد، به‌طوری‌که نسبت به شاهد محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم در مرحله ساقه‌دهی در سال اول آزمایش ۵۶/۱۹ واحد افزایش نشان داد. می‌توان گفت که کودهای مختلف با تأثیری که بر افزایش عملکرد گیاه می‌گذارند سبب افزایش میزان اسانس و عملکرد آن می‌شوند که در این آزمایش نیز محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم تا حد زیادی سبب افزایش عملکرد خشک گیاه و به‌تبع اسانس آن شد. خاتر (2015, Khater)، اثر محلول‌پاشی نانوکود مگنتیت را بر رشد و ترکیب اسانس نعنای مطالعه کرد. نتایج نشان داد که کاربرد نانوکودمگنتیت، رشد گیاه و اسانس گیاهان نعنای را به‌طور قابل توجهی افزایش داد که در غلظت ۱۵ میلی‌گرم در لیتر بیشترین بود.

کربوهیدرات دانه

برپایه نتایج حاصل از تجزیه واریانس، میزان کربوهیدرات دانه رازیانه بین دو سال آزمایش به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر مراحل و سطوح مختلف محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم با احتمال خطای یک درصد قرار گرفت (جدول ۷). با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۸) مشاهده می‌شود که بیشترین میزان کربوهیدرات دانه برابر با ۳/۱۲ میلی‌گرم بر گرم در سال دوم آزمایش در مرحله ساقه‌دهی همراه با محلول‌پاشی در غلظت ۳ در هزار نانوکودپتاسیم به دست آمد. بین این

تیمار با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده شد، به‌طوری‌که نسبت به شاهد محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم در مرحله میوه‌دهی در سال اول آزمایش ۱/۰۴ واحد افزایش نشان داد. پتاسیم، تولید نشاسته و کربوهیدرات‌ها را افزایش می‌دهد. لذا استفاده از کود پتاس، روند افزایشی میزان کربوهیدرات‌ها در مرحله پنجه‌زنی را در پی داشته و می‌تواند محرک آن باشد (Tavan et al., 2014). افزایش رشد و عملکرد گیاهان تحت تأثیر نانوکلات پتاسیم در ریحان نیز گزارش شده است (Zahedifar & Najafian, 2016; Ghahremani et al., 2014).

کلروفیل a، b و کل برگ

برپایه نتایج حاصل از تجزیه واریانس، میزان کلروفیل a، b و کل برگ رازیانه بین دو سال آزمایش به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر مراحل و سطوح مختلف محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم با احتمال خطای یک درصد قرار گرفت (جدول ۷). با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۸) مشاهده می‌شود که بیشترین میزان کلروفیل a، b و کل به‌ترتیب برابر با ۲/۷۳، ۰/۵۴ و ۳/۲۷ میلی‌گرم بر گرم در سال دوم آزمایش در مرحله ساقه‌دهی همراه با محلول‌پاشی در غلظت ۳ در هزار نانوکودپتاسیم به دست آمد. بین این تیمار با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده شد، به‌طوری‌که میزان کلروفیل a، b و کل در اثر کاربرد محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم در مرحله میوه‌دهی در سال اول آزمایش نسبت به شاهد، به‌ترتیب ۰/۷۵، ۰/۲۲ و ۲/۰۹ واحد افزایش نشان داد. این امر می‌تواند به‌دلیل افزایش جذب مواد غذایی باشد که موجب افزایش کلروفیل و فتوسنتز گیاه شده و از این طریق رشد گیاه را افزایش داده است.

پتاسیم و نیتروژن خاک بر میزان سبزی‌نگی و مقدار کلروفیل تأثیر زیادی دارند. در نتایج گزارش‌های برخی از پژوهشگران، افزایش محتوای کلروفیل در برگ‌ها به‌واسطه نقش پتاسیم گزارش شده است

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج این پژوهش، بیشترین ارتفاع بوته، عملکرد زیست-توده، عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد چتر در بوته، کربوهیدرات دانه، بیشترین میزان کلروفیل a، b و کل در تیمار ۳ در هزار نانوکودپتاسیم در مرحله ساقه‌دهی در سال دوم آزمایش حاصل شد. همچنین بیشترین درصد اسانس دانه در تیمار ۵ در هزار نانوکودپتاسیم، و بیشترین عملکرد اسانس دانه در تیمار ۴ در هزار نانوکودپتاسیم در مرحله میوه‌دهی در سال دوم آزمایش به دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، اعمال تیمارها در مراحل و سطوح مختلف محلول‌پاشی نانوکودپتاسیم، برای تعیین سطح و مرحله‌ای که بیشترین تأثیر را بر بهبود شاخص‌ها کمی و کیفی در گیاه دارد، پیشنهاد می‌شود. همچنین پیشنهاد می‌شود که این آزمایش در زمین‌های زراعی دیگر که خاک آن‌ها از نظر فیزیکی و شیمیایی نسبت به هم اختلاف دارند، اجرا شود.

و افزایش میزان کلروفیل برگ، تثبیت بهتر دی‌اکسید کربن برای برگ را به همراه دارد و در نتیجه سبب رشد بهتر برگ خواهد شد (Tavan et al., 2014). نتایج رضایی و همکاران (Rezaie et al., 2019) نشان داد که برهم‌کنش محلول‌پاشی متانول و نانوکودپتاس بر میزان کلروفیل‌ها و کاروتنوئید تأثیر معنی‌داری داشت و اثر تیمار ۱۰ درصد حجمی متانول + ۴ کیلوگرم در هکتار نانوکودپتاس بر رنگیزه‌های فتوسنتزی بیشتر از سایر صفات بود. در پژوهش قهرمانی و همکاران (Ghahremani et al., 2014)، استفاده از نانوکودهای کلسیم و پتاسیم در غلظت‌های بالا باعث افزایش کلروفیل کل در گیاه ریحان شد. همچنین آزمایش دیگری روی گیاه مرزه، بیشترین شاخص کلروفیل از تیمار تلفیقی نانوکودها و اسیدهیومیک گزارش شده است (Najafi Vafa et al., 2015).

References

1. Aghazadeh-Khalkhali, D., Mehrafarin, A., Abdossi, V., & Naghdi Badi, H. (2015). Mucilage and seed yield of psyllium (*Plantago psyllium* L.) in response to foliar application of nano-iron and potassium chelate fertilizer. *Journal of Medicinal Plants*, 14(56), 23-34. Dor: (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.2717204.2015.14.56.4.1>
2. Alam, M. A., Juraimi, A. S., Rafii, M. Y., Abdul Hamid, A., Aslani, F., Hasan, M. M., Zainudin, M. A. M., & Uddin, M. K. (2014). Evaluation of antioxidant compounds, antioxidant activities, and mineral composition of 13 collected purslane (*Portulaca oleracea* L.) accessions. *BioMed Research International*, 2014(1), 296063. <https://doi.org/10.1155/2014/296063>
3. Amirmia, R., Bayat, M., & Tajbakhsh, M. (2014). Effects of nano fertilizer application and maternal corm weight on flowering of some saffron (*Crocus sativus* L.) ecotypes. *Turkish Journal of Field Crops*, 19(2), 158-168. <https://doi.org/10.17557/tjfc.46269>
4. Arnon, D. I. (1965). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol-oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24, 1-15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
5. Astaneh, N., Bazrafshan, F., Zare, M., Amiri, B., & Bahrani, A. (2020). Effect of nano chelated nitrogen and urea fertilizers on wheat plant under drought stress condition. *Journal of Plant Ecophysiology*, 12(43), 214-228. (In Persian with English abstract)
6. Bahmani, K., Izadi-Darbandi, A., Faleh Alfekaiki, D., & Sticklen, M. (2016). Phytochemical diversity of fennel landraces from various growth types and origins. *Agronomy Research*, 14(5), 1530-1547.
7. Bakhshayesh, A. M., & Sharafuddin Zadeh, S. (2017). Monitoring of commercial nanotechnology products in the agricultural industry. *Nanotechnology Monthly*, 16(2), 27-36. (In Persian with English abstract)
8. Bayati, F., Aynehband, A., & Fateh, E. (2014). Effect of different rates and application times of nano-iron on yield and yield components of canola (*Brassica napus* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 12(4), 805-812. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v12i4.27090>
9. Briat, J. F., Dubos, C., & Gaymard, F. (2015). Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. *Trends Plant Science*, 20, 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07.005>
10. Cakmak, I. (2005) The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168, 521-530. <https://doi.org/10.1002/jpln.200420485>
11. Coshge, B., Kiralan, M., & Gürbüz, B. (2008). Characteristics of fatty acids and essential oil from sweet fennel (*Foeniculum vulgare* Mill. var. dulce) and bitter fennel fruits (*F. vulgare* Mill. var. Vulgare) growing in Turkey. *Journal Natural Product Research*, 22(12), 1011-1016.
12. Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Aran, M., Abadia, J., & Khorassani, R. (2017). Effects of foliar nano-nitrogen and urea fertilizers on the physical and chemical properties of pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruits. *HortScience*, 52(2), 288-294. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11248-16>

13. Damjanovic, B., Lepojevic, Z., Zivkovic, Z., & Tolic, A. (2005). Extraction of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill) seed with supercritical CO₂: comparison with hydro distillation. *Food Chemistry*, 92, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.07.019>.
14. Davis, C. C., & Choisy, P. (2024). Medicinal plants meet modern biodiversity science. *Current Biology*, 34(4), R158-R173. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.12.038>.
15. Gardner, W. L., Coglisier, C. C., Davis, K. M., & Dickens, M. P. (2011). Authentic leadership: A review of the literature and research agenda. *The Leadership Quarterly*, 22(6), 1120-1145.
16. El-Naggar, H. M., & Osman, A. R. (2024). Enhancing growth and bioactive metabolites characteristics in *Mentha pulegium* L. via silicon nanoparticles during *in vitro* drought stress. *BMC Plant Biology*, 24, 657. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05313-z>
17. Ghahremani, A., Akbari, K., Yousefpour, M., & Ardalani, H. (2014). Effects of nano-potassium and nano-calcium chelated fertilizers on qualitative and quantitative characteristics of *Ocimum basilicum*. *International Journal for Pharmaceutical Research Scholars*, 3, 235-241.
18. Harsini, M. G., Habibi, H., & Talaei, G. H. (2014). Study the effects of iron nano chelated fertilizers foliar application on yield and yield components of new line of wheat cold region of Kermanshah province. *Agricultural Advances*, 3(4), 95-102. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.14196/aa.v3i4.1339>.
19. Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Nahar, K., Hossain, M. S., Mahmud, J. A., Hossen, M. S., Masud, A. A. Moumita, C., & Fujita, M. (2018). Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy*, 8(3), 31. <https://doi.org/10.3390/agronomy8030031>
20. Hassani, A., Tajali, A. L., & Hosseini Mazinani, S. M. (2015). Study the conventional chemical fertilizers and nano-fertilizer of iron, zinc and potassium on quantitative yield of medicinal plant of peppermint (*Mentha Piperita* L.) in Khuzestan. *International Journal of Agriculture Innovations and Research (IJAIR)*, 3(4), 1078-1082.
21. Hassanpour Aghdam, M. B., Tabatabaie, S. J., Nazemiyeh, H., & Aflatuni, A. (2008). N and nutrition levels affect growth and essential oil content of costmary (*Tanacetum balsamita* L.). *Food, Agriculture and Environment*, 6(2), 150-154. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhs.2022.74403.1120>.
22. Irigoyen, J. J., Einerich, D. W., & Sanchez-Diaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiologia Plantarum*, 84, 55-60. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x>
23. Jadid, N., Febrianti Widodo, A., Ermavitalini, D., Sa'adah, N. N., Gunawan, S., & Nisa, C. (2023). The medicinal umbelliferae plant fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.): Cultivation, traditional uses, phytopharmacological properties, and application in animal husbandry, *Arabian Journal of Chemistry*, 16, 104541, <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104541>.
24. Jafarzadeh, R., Jami Moieni, M., & Hokmabadi, M. (2013). Response of yield and yield components in wheat to soil and foliar application of nano potassium fertilizer. *Journal of Crop Production Research (Environmental Stresses in Plant Sciences)*, 5(2), 189-197. (In Persian with English abstract)
25. Karami, H., Maleki, A., & Fathi, A. (2018). Determination effect of mycorrhiza and vermicompost on accumulation of seed nutrient elements in maize (*Zea mays* L.) affected by chemical fertilizer. *Journal of Crop Nutrition Science*, 4(3), 15-29. (In Persian with English abstract)
26. Kazemi, E., Ganjali, H., Mehraban, A., & Ghasemi, A. (2019). The effect of different nanocodes and water stress on the yield and yield components of grain sorghum in Sistan region. *Journal of Plant Ecophysiology*, 12(41), 242-230. (In Persian with English abstract)
27. Khanizadeh, P., Mumivand, H., Morshedloo, M. R., & Maggi, F. (2024). Application of Fe₂O₃ nanoparticles improves the growth, antioxidant power, flavonoid content, and essential oil yield and composition of *Dracocephalum kotschy* Boiss. *Frontiers in Plant Science*, 9(15), 1475284. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1475284>.
28. Khater, M. S. (2015). Magnetite-nanoparticles effects on growth and essential oil of peppermint. *Current Science International*, 4(2), 2077-4435.
29. Kjeldahl, J. (1883). Neue methode zur bestimmung des stickstoffs in organischen körpern (New method for the determination of nitrogen in organic substances). *Zeitschrift Für Analytische Chemie*, 22(1), 366-383. <https://doi.org/10.1007/BF01338151>
30. Larki, S., Rahnema, A., & Aynehband, A. (2015). Effect of application of potassium fertilizers on physiological traits and cadmium accumulation in grain of two durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. durum (Desf.) Husn.) cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 17(3), 223-235. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/ppd.2015.11455>.

31. Lietava, J. (1992). Medicinal plants in a middle paleolithic grave Shanidar IV. *Journal of Ethnopharmacology*, 35(2), 263-266. [https://doi.org/10.1016/0378-8741\(92\)90023-k](https://doi.org/10.1016/0378-8741(92)90023-k)
32. Lim, T. K. (2013). Edible medicinal and Non-Medicinal Plants: Volume 5, *Fruits*. Springer Science+Business Media Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5653-3>.
33. Liu, R., & Lal, R. (2014). Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*). *Scientific Reports*, 4, 5686-5691. <https://doi.org/10.1038/srep05686>
34. Mahil, E. I. T., & Aravinda Kumar, B. N. (2019). Foliar application of nanofertilizers in agricultural crops -A review. *Journal of Farm Science*, 32(3), 239-249.
35. Marschner, H. (2012). Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press. pp: 648. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>
36. Mim, J. J., Rahman, S. M., Maksudur, K. F., Fardin, P. D., Sikder, S., Das, H., Khan, S., Orny, N., Hossain Shuvo, R., & Nayem, H. (2025). Towards smart agriculture through nano-fertilizer—a review. *Materials Today Sustainability*. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101100>
37. Mirabdollahi, S. M. (2011). Variation in the content and composition of fennel essential oil under limited irrigation conditions. Faculty of Agriculture, M.Sc. Thesis. Zanjan University, Zanjan, Iran. (In Persian with English abstract)
38. Mubashir, A., Nisa, Z. U., Shah, A. A., Kiran, M., Hussain, I., Ali, N., Zhang, L., Madnay, M. M. Y., Alsiary, W. A., Korany, S. M., Ashraf, M., Al-Mur, B. A., & AbdElgawad, H. (2023). Effect of foliar application of nano-nutrients solution on growth and biochemical attributes of tomato (*Solanum lycopersicum*) under drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1066790. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1066790>
39. Najafi Vafa, Z., Sirousmehr, A. R., Ghanbari, A., Khammari, I., & Falahi, N. (2015). Effects of nano zinc and humic acid on quantitative and qualitative characteristics of savory (*Satureja hortensis* L.). *International Journal of Biosciences*, 6, 124-136. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.12692/ijb/6.3.124-136>.
40. Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S., & Dean, L. A. (1954). Estimation of Available Phosphorous in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate. U.S. Department of Agriculture, Washington DC: USDA Circ, 939 p.
41. Omid Beigi, R. (2008). *Production and Processing of Medicinal Plants*. Vol. 2. Astan Quds Publication, Tehran, Iran. 414 p.
42. Patil, R. B. (2011). Role of potassium humate on growth and yield of soybean and black gram. *International Journal of Pharma and Bio science*, 2(1), 242-246.
43. Rameshaiah, G., Jpallavi, N., & Shabnam, S. (2015). Nano fertilizers and nano sensors an attempt for developing smart agriculture. *Engineering Research and General Science*, 3(1), 314-320.
44. Rawat, J., Sanwal, P. & Saxena, J. (2016). Potassium and Its Role in Sustainable Agriculture. 235-253. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_17.
45. Rawat, S., Adisa, I. O., Wang, Y., Sun, Y., Fadil, A. S., Niu, G., Sharma, N., Hernandez-Viezcas, J. A., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2019). Differential physiological and biochemical impacts of nano vs. micron Cu at two phenological growth stages in bell pepper (*Capsicum annum*) plant. *Nano Impact*, 14, 100-161. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2019.100161>
46. Rezaie, F., Barary, M., Hatami, A., & Hassanein Khoshro, H. (2019). The effect of nano-potass fertilizer and methanol application on some physiological characters, yield and yield components of wheat. *Journal of Plant Ecophysiology*, 11(39), 180-191. (In Persian with English abstract)
47. Saedi, F., Sirousmehr, A., & Javadi, T. (2020). Effect of nano-potassium fertilizer on some morpho-physiological characters of peppermint (*Mentha piperita* L.) under drought stress. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 33(1), 94-110. (In Persian with English abstract)
48. Safaai, L., Seinali, H., & Afiuni, D. (2020). The effect of environmental condition on essential oil and essential oil components in superior fennel genotypes (*Foeniculum vulgare* Mill.). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 33(1), 129-141. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23832592.1399.33.1.18.8>.
49. Selva-Preetha, P., & Balakrishnan, N. (2017). A reviw of nanofertilizers and their use and function in soil. *Microbiology and Applied Sciences*, 6(12), 3117-3133. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.612.364>
50. Subramanian, K. S., & Thirunavukkarasu, M. (2017). Nano-fertilizers and Nutrient Transformations in Soil. In: M. Ghorbanpour, M. Khanuja, and A.Varma (Eds.). *Nanoscience and Plant-Soil Systems. Soil Biology*, 48, 305-318. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46835-8_11
51. Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development*. 6th Edition, Sinauer Associates, Sunderland, CT.
52. Tavan, T., Niakan, M., & Norinia, A. A. (2014). Effect of nano-potassium fertilizer on growth factors, photosynthetic system and protein content in wheat (*Triticum aestivum* L. Cv. N8019). *Journal of Plant Environmental Physiology*, 3(35), 61-71. (In Persian with English abstract)

53. Yadav, A., Yadav, K., & Abd-Elsalam, K. (2023). Exploring the potential of nanofertilizers for a sustainable agriculture. *Plant Nano Biology*, 5, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100044>.
54. Zahedifar, M., & Najafian, S. (2016). *Ocimum basilicum* L. growth and nutrient status as influenced by biochar and potassium-nano-chelate fertilizers. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 63(5):638-656. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1233323>.
55. Zorb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture – Status and perspectives, *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 656-669. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>.