

Investigating the Effect of Humic Acid and Potassium Silicate Fertilizers on Growth Indicators, Yield and Essential Oil of Cumin (*Cuminum cyminum* L.)

M. H. Aminifard^{1,2*}, L. Asdollahi¹, H. Bayat¹

1- Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran

2- Regional Plant Research Center, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran

(*- Corresponding author's Email: mh.aminifard@birjand.ac.ir)

Received: 01 June 2025

Revised: 08 September 2025

Accepted: 13 September 2025

Available Online: 13 September 2025

How to cite this article:

Aminifard, M. H., Asdollahi, L., & Bayat, H. (2026). Investigating the effect of humic acid and potassium silicate fertilizers on growth indicators, yield and essential oil of cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Journal of Horticultural Science*, 40(2), 281-296. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jhs.2025.93814.1433>

Introduction

Cumin (*Cuminum cyminum* L.) is one of the most important domestic herbs in Iran and is one of the earliest spices used by humans. Due to its characteristics such as short growing season, low water requirement, non-interruption of growth season with other agricultural products as well as high economic justification for other crops and export, it has found a special place in arid and semi-arid areas. Organic and chemical fertilizers are necessary for each other and both types of fertilizers are needed to create favorable conditions to improve quantitative and qualitative traits. Overuse of chemical fertilizers has caused several problems in agriculture including changes in the soil structure, contamination of underground waters, and heavy metal toxicity. Agricultural scientists suggest replacing chemical fertilizers with organic products to reduce negative effects on the environment and soil properties. In recent years, neglecting the importance of organic matters to improve soil fertility has led to an increase in chemical fertilizer use in Iran. Organic matter, due to its positive effects on soil, is identified as one of the important pillars of soil productivity. However, more than 60 percent of agricultural soils in Iran contain less than one percent of organic matter. Therefore, the objective of this study was to investigate the influence of humic acid and potassium silicate on morphology parameters and the essential oil yield of cumin.

Materials and Methods

In order to investigate the effect of humic acid and potassium silicate on the growth and yield of Birjand cumin, a factorial experiment was conducted in a randomized complete block design with replication in the research field of the Faculty of Agriculture, Birjand University in 2023. The first factor included humic acid at three levels (0, 5, and 10 kg.ha⁻¹) and the second factor was potassium silicate at three levels (0, 2, and 4 per thousand). Humic acid fertilizer was applied with irrigation water at the three-leaf stage, tillering and after fruit formation of cumin. Potassium silicate fertilizer was applied as a foliar spray at the three-leaf stage, tillering and after fruit formation of cumin. After the crop ripened, the plant height, number of lateral shoots per plant, number of umbels per plant, number of umbels per umbel, number of seeds per umbel, 1000-seed weight, seed yield, percentage and yield of essential oil were measured.

Results and Discussion

The results of variance analysis showed that the use of potassium silicate and humic acid had a significant effect on the vegetative (plant height, number of lateral shoots), reproductive (number of umbels per plant, number of umbels per umbel, number of seeds per umbel, 1000 weight seed and seed yield) and essential oil characteristics of cumin, such that the highest plant height (15.27 cm) and the number of lateral shoots (3.77)



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.2025.93814.1433>

were obtained from the use of 2 per thousand potassium silicate and the highest fresh and dry plant weight was obtained from the use of 4 per thousand potassium silicate. The results of the interaction of treatments showed that the highest 1000-seed weight, seed yield and essential oil yield were obtained from the use of 4 per thousand potassium silicate and 10 kg.ha⁻¹ humic acid, and the highest plant height, number of umbels and number of seeds per umbel were obtained from the use of 2 per thousand potassium silicate and 5 kg.ha⁻¹ humic acid.

Conclusion

In general, the results indicated a positive effect of potassium silicate and humic acid on cumin yield and yield components. Therefore, according to the findings of this study, it seems that simultaneous use of potassium silicate (4 per thousand) and humic acid (10 kg.ha⁻¹) can be used to improve the seed yield and essential oil of cumin.

Keywords: Chemical fertilizer, Medicinal plant, Organic fertilizer, Silica

مقاله پژوهشی

جلد ۴۰، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص. ۲۹۶-۲۸۱

بررسی تأثیر اسید هیومیک و پتاسیم سیلیکات بر شاخص‌های رشد، عملکرد و اسانس زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.)

محمد حسین امینی فرد^۱  - لیلا اسدالهی^۱ - حسن بیات^۱ 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

چکیده

زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) از جمله مهم‌ترین و اقتصادی‌ترین گیاهان دارویی مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود. به منظور بررسی اثر اسید هیومیک و پتاسیم سیلیکات بر رشد و عملکرد زیره سبز آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند در سال ۱۴۰۲ انجام شد. عامل اول شامل اسید هیومیک در سه سطح (صفر، ۵ و ۱۰ کیلوگرم در هکتار) و عامل دوم پتاسیم سیلیکات در سه سطح (صفر، دو و چهار در هزار) بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مصرف پتاسیم سیلیکات و اسید هیومیک بر خصوصیات رویشی، زایشی و اسانس زیره سبز معنی‌دار بود، به طوری که بیشترین ارتفاع بوته و تعداد ساقه فرعی از مصرف دو در هزار پتاسیم سیلیکات و بیشترین وزن تر و خشک بوته از مصرف چهار در هزار پتاسیم سیلیکات به دست آمد. نتایج اثر متقابل تیمارها نشان داد که بیشترین وزن هزاردانه، عملکرد دانه و عملکرد اسانس از مصرف چهار در هزار پتاسیم سیلیکات و ۱۰ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و بیشترین ارتفاع بوته، تعداد چترک و تعداد دانه در چترک از مصرف دو در هزار پتاسیم سیلیکات و ۵ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک به دست آمد. با توجه به یافته‌های این پژوهش، به نظر می‌رسد که استفاده هم‌زمان از پتاسیم سیلیکات (چهار در هزار) و اسید هیومیک (۱۰ کیلوگرم در هکتار) می‌تواند برای بهبود بخشیدن به عملکرد دانه و اسانس زیره سبز مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: سیلیس، کود آلی، کود شیمیایی، گیاه دارویی

مقدمه

زیره سبز با نام علمی *Cuminum cyminum* L. متعلق به خانواده چتریان^۲ و دارای ۲n=۱۴ کروموزوم است (Jafari et al., 2017; Bhatt et al., 2017). این گیاه یک‌ساله یکی از قدیمی‌ترین فرآورده‌های طبیعی معطر و علفی است که دارای خواص دارویی و غذایی متعدد است. زیره سبز همچنین در صنایع نوشیدنی، غذایی، دارویی، عطری و لوازم بهداشتی کاربرد وسیعی دارد (Bhatt et al., 2017) و برای درمان بیماری‌های مختلفی مانند تشنج، صرع و دیابت

مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bayati et al., 2020). یکی از الزامات گیاهان دارویی، توجه به مواد مغذی مورد نیاز آن‌هاست (Mohammadi et al., 2015). کودهای آلی به عنوان یک جزء کلیدی کشاورزی پایدار، کمک زیادی به بهبود حاصلخیزی خاک می‌کند. استفاده از کودهای آلی می‌تواند باعث افزایش کیفیت گیاه و کاهش آلودگی محیطی ناشی از کود شیمیایی شود (Li et al., 2017).

اسید هیومیک به عنوان یک کود آلی برای افزایش بهره‌وری و کیفیت گیاهان دارویی و معطر استفاده می‌شود (El-Banna & Fouda, 2018; Hassan, 2019). اسید هیومیک حاوی حدود ۶۰ درصد کربن آلی است که نقش مهمی در رشد ریزجاندانان خاک دارد (Sible et al., 2021). اسید هیومیک علاوه بر کربن آلی حاوی نیتروژن، اکسیژن، هیدروژن و گوگرد است. اسیدهای هیومیک چندین نقش مهم ایفا می‌کنند، مانند افزایش فعالیت‌های فیزیکی و

۱- گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۲- مرکز پژوهشی گیاهان ویژه منطقه، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: mh.aminifard@birjand.ac.ir
<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.93814.1433>
2- Apiaceae

بیوشیمیایی خاک از طریق بهبود ساختار، بافت، ظرفیت نگهداری آب و جمعیت میکروبی (Nardi et al., 2017; Fuentes et al., 2018; Shah et al., 2018)، افزایش در دسترس بودن مواد مغذی خاک به‌ویژه ریزمغذی‌ها با کلاته کردن و انتقال مشترک ریز مغذی‌ها به گیاهان (Yang et al., 2021)، اسیدهای هیومیک همچنین با افزایش هورمون‌های محرک رشد گیاه مانند اکسین و سیتوکینین که به مقاومت در برابر تنش، متابولیسم مواد مغذی و فتوسنتز کمک می‌کنند، رشد محصول را افزایش می‌دهند (Laskosky et al., 2020; Nardi et al., 2021). محققان افزایش عملکرد زیره در نتیجه استفاده از اسید هیومیک (چهار لیتر در هکتار، ۳۰۰ میلی گرم در لیتر) را گزارش کردند (Nasiri Dehsorkhi et al., 2018; Rahghoshahi et al., 2022). کاربرد شش گرم در مترمربع اسید هیومیک سبب افزایش ارتفاع بوته، تعداد شاخه و وزن خشک گیاه سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) شد (Nassif et al., 2023). افزایش غلظت محلول پاشی اسید هیومیک از صفر به سه درصد باعث افزایش ۶۹/۲۸ درصدی عملکرد اسانس نعناع (*Mentha* sp) شد (Alavi et al., 2023).

علاوه بر کودهای آلی، کودهای شیمیایی نیز یکی از مهم‌ترین نهادهای کشاورزی است که استفاده مدیریت‌شده از آن‌ها به‌منظور افزایش عملکرد محصولات کشاورزی به‌عنوان سریع‌ترین رویکرد رفع نیازهای تغذیه‌ای گیاه در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه بسیار مرسوم و موفقیت‌آمیز بوده است (Al-Taai, 2021). پتاسیم یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی و پرمصرف شیمیایی در رشدونمو گیاهان است. پتاسیم در فتوسنتز گیاهان، فعال شدن آنزیم، سنتز پروتئین و سایر فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی شرکت می‌کند (Amtmann et al., 2006). کمبود پتاسیم باعث اختلال مستقیم در این فعالیت‌ها می‌گردد که منجر به کاهش سرعت رشد گیاه، تسریع پیری برگ‌ها و حتی پژمردگی دائمی گیاه می‌شود (Pujos & Morard, 1997). علاوه بر این، پتاسیم مقاومت گیاه را در برابر عوامل تنش‌زا مانند خشکی، شرایط قلیایی و شوری افزایش می‌دهد (Zahoor et al., 2017).

پتاسیم سیلیکات یکی از کودهای شیمیایی غنی از پتاسیم و سیلیکون بسیار محلول است. این ماده در سیستم‌های تولید کشاورزی عمدتاً به‌عنوان یک ماده اصلاح‌کننده سیلیس استفاده می‌شود و دارای مقادیر کمی پتاسیم است (Abou-Baker et al., 2011). سیلیکون یک ماده مغذی ضروری گیاه در نظر گرفته نمی‌شود. با این حال، در چندین گونه گیاهی سبب مقاومت به بیماری، تحمل به تنش غیرزیستی و تغییر صفات ریخت‌شناختی شده است (Mattson & Leatherwood, 2010). سیلیکون نقش مهمی در بهبود رشد،

افزایش فتوسنتز، راندمان تبخیر و ترقق، افزایش استحکام برگ‌ها، غلظت کلروفیل در سطح برگ و کیفیت محصول دارد (Talebi et al., 2015). طی مطالعه‌ای که روی سیاهدانه انجام شد مشخص گردید که با مصرف هشت میلی‌لیتر در لیتر پتاسیم سیلیکات بیش‌ترین ارتفاع بوته، وزن خشک گیاه و عملکرد دانه حاصل شد (El-Sarhan & Shehata, 2019). سرهان و شهاتا (Sarhan & Shehata, 2019) نشان دادند که پتاسیم سیلیکات (سه سانتی‌متر مکعب در لیتر) به‌طور قابل توجهی بر ارتفاع بوته و وزن خشک گیاه در هر بوته زینان رومی (*Trachyspermum ammi* L.) تأثیر می‌گذارد. محلول پاشی ۲۰۰۰ پی‌پی‌ام پتاسیم سیلیکات بر بوته‌های ریحان (*Ocimum basilicum* L.) باعث افزایش وزن تر و خشک گیاه در هر بوته نسبت به شاهد (بدون محلول پاشی) شد. علاوه بر این محلول پاشی پتاسیم سیلیکات باعث افزایش معنی‌دار رشد ریحان فرانسوی و درصد اسانس گردید (Massoud et al., 2024).

استفاده تلفیقی از کودهای شیمیایی به‌همراه کودهای آلی رویکرد پایدار برای استفاده کارآمد از عناصر غذایی است که باعث افزایش کارایی کودهای شیمیایی، بهبود خواص فیزیکی خاک و کاهش تلفات مواد مغذی می‌گردد (Mahmood et al., 2017). سهرابی و همکاران (Sohrabi et al., 2021) در آزمایشی که با هدف بررسی اثر کودهای آلی، بیولوژیکی و شیمیایی بر اجزاء عملکرد و عملکرد روغن دانه سیاهدانه انجام دادند، گزارش کردند که کاربرد سطوح مختلف کودهای آلی و شیمیایی سبب افزایش معنی‌دار عملکرد بیولوژیک و دانه گیاه سیاهدانه در مقایسه با شاهد شد. براساس آزمایش‌های مزرعه‌ای انجام‌شده توسط محققان، استفاده از اسید هیومیک با کود NPK به‌طور قابل توجهی وزن خشک اندام هوایی و محتوای کلروفیل گندم دوروم (*Triticum durum*) و *Stevia rebaudiana* را بهبود بخشید (El-Bassiouny et al., 2014; Mohammad et al., 2019). با توجه به لزوم مدیریت تغذیه گیاهی در راستای افزایش و پایداری تولید و حفظ محیط زیست، این تحقیق با هدف بررسی توانایی کودهای آلی، شیمیایی و تلفیقی بر عملکرد گیاه دارویی زیره سبز و همچنین یافتن تلفیقی مناسب از کودها به‌منظور افزایش کمیت و کیفیت این گیاه دارویی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در زمستان ۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند انجام شد. قبل از کاشت، پنج نمونه خاک از مکان‌های مختلف انتخاب گردید. سپس، آن‌ها را ترکیب کرده و یک نمونه مرکب از آن‌ها تهیه و سپس برخی از ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مزرعه تحقیقاتی
Table 1- Chemical and physical characteristics of experiment soil

هدایت الکتریکی EC (mS.cm ⁻¹)	کربن آلی Organic C (%)	منیزیم Mg (meq.L ⁻¹)	کلسیم Ca (meq.L ⁻¹)	فسفر P (ppm)	پتاسیم K (ppm)	ازت N (%)	بافت Texture	pH
12.74	0.25	45	35	7.89	276.2	0.031	لومی-شنی Loam-sand	7.7

اوایل شهریور ماه پس از رسیدگی فیزیولوژیکی محصول، جهت تعیین تأثیر تیمارهای مورد بررسی بر صفات ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی در بوته، تعداد چتر در بوته، تعداد چترک در چتر، تعداد دانه در چترک، دو خط کناری هر کرت آزمایشی به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شد و از دو خط میانی به تعداد پنج بوته به‌طور تصادفی انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفتند. ارتفاع بوته به‌وسیله خط‌کش با دقت یک میلی‌متر از سطح خاک اندازه‌گیری شد. تعداد شاخه فرعی در بوته، تعداد چتر در بوته، تعداد چترک در چتر و تعداد دانه در چترک پنج بوته انتخابی شمارش گردید. برای محاسبه وزن تر بوته، بعد از مطمئن شدن از نبود خاک روی سطوح آن‌ها با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شدند. سپس بوته‌ها داخل پاکت درون آون با دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند و سپس وزن خشک آن‌ها با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن هزار دانه، پنج نمونه ۱۰۰ تایی از هر کرت به‌طور تصادفی انتخاب و پس از خشک نمودن در هوای آزاد، وزن هزار دانه محاسبه گردید. به‌منظور محاسبه عملکرد دانه، کل چترهای برداشت‌شده در مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه از سطح یک مترمربع جدا شده و با دست عملیات خرمن‌کوبی و بوجاری انجام و دانه‌ها جدا گردید. وزن دانه به‌وسیله ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم تعیین شد.

به‌منظور سنجش اسانس از دانه‌های برداشت‌شده از هر کرت، ۳۰ گرم بذر توزین و اسانس‌گیری به‌روش تقطیر با بخار آب توسط دستگاه کلونجر به مدت سه ساعت انجام شد و درصد و عملکرد اسانس مربوط به هر نمونه طبق معادله ۱ تعیین شد (Rivandi et al., 2020).

$$\text{درصد اسانس} = \frac{\text{وزن اسانس}}{\text{وزن نمونه خشک گیاه در کلونجر}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{عملکرد ماده خشک} (\text{گرم متر در مربع}) = \text{عملکرد اسانس} \times \text{درصد اسانس} \quad (2)$$

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها توسط نرم افزار آماری SAS 9.1 انجام شد و میانگین‌ها توسط آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند.

به‌منظور بررسی اثر اسید هیومیک و پتاسیم سیلیکات بر رشد و عملکرد زیره سبز توده بیرجند، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اول شامل اسید هیومیک در سه سطح (صفر، ۵ و ۱۰ کیلوگرم در هکتار) و عامل دوم شامل کود پتاسیم سیلیکات در سه سطح (صفر، دو و چهار در هزار) بود. کود اسید هیومیک از شرکت گیاه پرنیان اطلس ساخت کشور چین تهیه شد. کود پتاسیم سیلیکات حاوی ۱۰ درصد پتاسیم محلول (K₂O) و ۲۴ درصد سیلیسیم (SiO₂) محلول بود. کود اسید هیومیک نیز دارای ۶۰ درصد اسید هیومیک، هشت درصد اسید فولیک و هشت درصد پتاسیم بود. زمین محل اجرای آزمایش ابتدا شخم زده شد و سپس از لولر برای مسطح کردن زمین استفاده شد. در نهایت، کرت‌هایی به ابعاد ۱/۵×۳ (۴/۵ مترمربع) ایجاد گردید و جهت آبیاری نیز جوی‌های لازم ایجاد شد. فاصله بین بلوک‌ها سه متر و بین کرت‌ها یک متر در نظر گرفته شد. بذرها، از توده محلی بیرجند و از کشاورزان این شهرستان تهیه گردید. درصد جوانه‌زنی بذرها، بالای ۹۰ درصد بود. کاشت بذرها به‌صورت ردیفی در تاریخ ۲۷ بهمن ۱۴۰۲ انجام شد. فاصله بین ردیف‌ها ۲۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف‌ها ۷ تا ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در مرحله سه برگی برای رسیدن به تراکم مناسب تنک انجام گردید. اولین آبیاری پس از کاشت و آبیاری‌های بعدی به فاصله هر شش روز یک بار تا آخر فصل رشد انجام شد. از زمان کاشت تا نمونه‌برداری، وجین و مبارزه با علف‌های هرز نیز صورت گرفت. کود اسید هیومیک همراه آب آبیاری به‌مقدار ۲/۲۵ و ۴/۵ گرم پس از غرقاب شدن کرت مورد استفاده قرار گرفتند. اولین کود آبیاری در مرحله سه برگی در تاریخ ۱۷/۱۱/۱۴۰۳، دومین کود آبیاری در مرحله پنجه‌زنی در تاریخ ۰۷/۰۲/۱۴۰۳ و سومین کود آبیاری بعد از تشکیل میوه در تاریخ ۲۹/۰۲/۱۴۰۳ انجام شد.

کود پتاسیم سیلیکات به‌صورت محلول‌پاشی با مقادیر دو و چهار در هزار آب اعمال شدند. برای شاهد، محلول‌پاشی با آب مقطر انجام گردید. در مرحله سه برگی اولین محلول‌پاشی در تاریخ ۲۰/۰۱/۱۴۰۳ اعمال شد. مرحله دوم محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی در تاریخ ۰۹/۰۲/۱۴۰۳ و مرحله سوم محلول‌پاشی بعد از تشکیل میوه در تاریخ ۲۹/۰۲/۱۴۰۳ انجام گردید.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که ارتفاع بوته تحت تأثیر اثر ساده پتاسیم سیلیکات و اثر متقابل اسید هیومیک و پتاسیم سیلیکات قرار گرفت. اثر ساده اسید هیومیک تأثیر معنی‌داری بر این شاخص نداشت (جدول ۲). نتایج اثر متقابل تیمارها نشان داد که مصرف پنج کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و دو در هزار پتاسیم سیلیکات سبب بیش‌ترین ارتفاع بوته در زیره سبز شد (جدول ۵). مشخص شده است که اسید هیومیک می‌تواند به افزایش رشد ساقه اصلی کمک کند (Eyheraguibel et al., 2008). طبق گزارش‌ها، طول ساقه صفتی است که بیشترین پاسخ را به کاربرد اسید هیومیک دارد (Ulukan, 2008). اثر تسریع‌کننده اسید هیومیک بر رشد ساقه می‌تواند با تأثیر آن بر فعالیت H-ATPase ریشه و توزیع نیترات در سرتاسر ریشه‌ها و ساقه‌ها مرتبط باشد که به نوبه خود توزیع سیتوکینین‌ها، پلی آمین‌ها و اسید آسبیزیک را تغییر می‌دهد (Rubio et al., 2009). همچنین اسید هیومیک از طریق تأثیر بر متابولیسم سلول‌های گیاهی و نیز با افزایش قدرت کلات‌کنندگی و جذب عناصر غذایی بر افزایش رشد و ارتفاع گیاه مؤثر است (Nardi et al., 2002). در مطالعه‌ای مشخص شد که مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر اسید هیومیک طول ساقه گل شاخه بریده مریم (Polianthes tuberosa) را در مقایسه با شاهد بهبود بخشید (Babarabie et al., 2020). کاربرد اسید هیومیک باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته گیاه

ریحان شد که این افزایش طولی گیاه احتمالاً به دلیل خاصیت شبه‌اکسینی مواد هیومیکی باشد (Befrozfar et al., 2013). تجزیه و تحلیل اسید هیومیک بر ارتفاع بوته سیاهدانه نشان داد که هرگونه افزایش در میزان اسید هیومیک استفاده‌شده باعث افزایش ارتفاع بوته گردید (Aiyafar et al., 2015).

پتاسیم سیلیکات یک منبع سیلیکون و پتاسیم بسیار محلول است، که با تأمین مقادیر کمی پتاسیم به گیاهان و خاک فوایدی می‌بخشد و بیش‌تر به‌عنوان یک اصلاح‌کننده سیلیس در سیستم‌های تولید کشاورزی استفاده می‌شود (Abou-Baker et al., 2011). سیلیکون و پتاسیم باعث بهبود رشد گیاه می‌شود (Talebi et al., 2015). افزایش ارتفاع گیاه به نقش سیلیکون در افزایش جذب آب و مواد غذایی مانند فسفر و پتاسیم نسبت داده می‌شود (Xie et al., 2014; Cooke & Leishman, 2016). در نتایجی مشابه، استفاده از پتاسیم سیلیکات به‌صورت محلول‌پاشی (دو گرم در لیتر در دو نوبت) به‌طور قابل توجهی ارتفاع ریحان فرانسوی را نسبت به شاهد (بدون محلول‌پاشی) افزایش داد (Massoud et al., 2024). ال لیتی و همکاران (El-Leithy et al., 2019) نیز نشان دادند که بیش‌ترین ارتفاع بوته سیاهدانه با محلول‌پاشی هشت میلی‌لیتر در لیتر پتاسیم سیلیکات به دست آمد. پژوهشگران افزایش رشد و عملکرد دانه گیاه زینان را با کاربرد مقدار کودهای شیمیایی و آلی به‌صورت هم‌زمان، به علت افزایش NPK قابل دسترس گیاه گزارش کردند (Akbarinia et al., 2004).

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر کود اسید هیومیک و پتاسیم سیلیکات بر صفات رویشی زیره سبز
Table 2- ANOVA (mean of squares) for the effect of humic acid and potassium silicate on vegetative traits of cumin

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	تعداد شاخه فرعی Lateral shoot number	وزن تر بوته Plant fresh weight	وزن خشک بوته Plant dry weight
تکرار Replication	2	2.39 ^{ns}	0.25 ^{ns}	65682.85 ^{**}	35951.16 ^{**}
پتاسیم سیلیکات Potassium silicate (PS)	2	5.73 [*]	1.81 ^{**}	826706.72 ^{**}	45537.44 ^{**}
اسید هیومیک Humic acid (HA)	2	2.39 ^{ns}	0.92 [*]	245584.08 ^{**}	134700.13 ^{**}
PS×HA	4	8.42 ^{**}	0.25 ^{ns}	17967.35 ^{ns}	9798.07 ^{ns}
خطا Error	16	1.15	0.25	1.18	6326.47
ضریب تغییرات CV (%)	-	7.49	15.62	6.76	10.11

^{ns}، * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد
^{ns}، * and **: non-significant, and significant at 5% and 1% levels of probability, respectively.

جدول ۳- اثرات ساده پتاسیم سیلیکات و اسید هیومیک بر صفات رویشی زیره سبز
Table 3- Simple effect of potassium silicate and humic acid on vegetative traits of cumin

	ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد شاخه فرعی در بوته Lateral shoot number in plant	وزن تر بوته Plant fresh weight (g)	وزن خشک بوته Plant dry weight (g)
پتاسیم سیلیکات				
Potassium silicate (In thousand)				
0	13.77 b*	3.00 b	740.00 c	547.6 c
2	15.27 a	3.77 a	1104.20 b	817.53 b
4	14.05 b	3.00 b	1341.73 a	993.83 a
اسید هیومیک				
Humic acid (kg.ha ⁻¹)				
0	13.77 a	2.88 b	921.48 b	682.22 b
5	14.61 a	3.44 a	1020.49 b	755.31 b
10	14.72 a	3.44 a	1243.95 a	920.99 a

* میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

* Mean followed by similar letters in each column, are not significantly different based on Duncan's multiple range test ($p \leq 0.05$).

تعداد شاخه فرعی در بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از تأثیر معنی‌دار اثر ساده اسید هیومیک و پتاسیم سیلیکات بر تعداد شاخه فرعی در بوته بود. اثر متقابل تیمارها تأثیر معنی‌داری بر شاخص مذکور نداشت (جدول ۲). مصرف ۵ و ۱۰ کیلوگرم اسید هیومیک سبب افزایش ۱۶/۲۷ درصدی تعداد شاخه فرعی در بوته نسبت به شاهد شد. بیش‌ترین تعداد شاخه فرعی در بوته از مصرف دو در هزار پتاسیم سیلیکات به دست آمد (جدول ۳). کاربرد اسید هیومیک به‌طور مکرر رشد و عملکرد گیاه را از طریق نقش آن در تنظیم چرخه کربن و آزادسازی مواد غذایی از جمله نیتروژن، فسفر و گوگرد افزایش می‌دهد. علاوه‌بر این، رشد گیاه را از طریق جذب عناصر اصلی و فرعی، فعال‌سازی و یا مهار آنزیم، تغییر در نفوذپذیری غشاء، سنتز پروتئین و در نهایت فعال‌سازی تولید زیست‌توده تحریک می‌کند (Ulukan, 2008). آياس و گولسر (Ayas & Gulser, 2005) گزارش کردند که اسید هیومیک تولید زیست‌توده و شاخه‌های جانبی گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea*) را از طریق افزایش محتوای نیتروژن و میزان بقای برگ‌ها افزایش می‌دهد. کاربرد شش گرم در مترمربع اسید هیومیک سبب افزایش ارتفاع بوته، تعداد شاخه و وزن خشک گیاه سیاهدانه شد (Nassif et al., 2023). محلول‌پاشی شش لیتر در هکتار اسید هیومیک، تعداد شاخه فرعی زیره سبز را ۱۳/۴ درصد نسبت به شاهد (عدم محلول‌پاشی) افزایش داد (Varnaseri Ghandali et al., 2020). افزایش کارایی فتوسنتزی در حضور سیلیسیم، ناشی از تغییرات مثبت در ویژگی‌های فراساختاری برگ، غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی و فعالیت کاتالیزوری آنزیم ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز است. علاوه‌بر این، سیلیسیم با افزایش ضخامت و استحکام دیواره‌های سلولی موجب توسعه سیستم آوندی گیاه می‌گردد (Meena et al., 2014). بهبود ساختار سیستم آوندی، با تسهیل انتقال آب و مواد مغذی، وضعیت فیزیولوژیک گیاه

را بهبود بخشیده (Farouk & Omar, 2020) و بدین ترتیب، شرایط لازم برای افزایش تعداد شاخه‌های فرعی در بوته زیره سبز را فراهم آورده است. در گیاه جعفری (*Petroselinum crispum*)، محلول-پاشی پنج میلی‌لیتر در لیتر پتاسیم سیلیکات و پنج میلی‌لیتر در لیتر عصاره جلبک سبب افزایش تعداد شاخه در بوته شد (Ayyat & Abdel-Mola, 2020). تعداد شاخه در بوته کلزا (*Brassica napus*) با افزایش غلظت پتاسیم سیلیکات افزایش یافت که دلیل آن را تأثیر پتاسیم سیلیکات بر رشد گیاه دانستند (El-Samie et al., 2022). همچنین سایر محققان نیز به نتایج مشابهی دست یافتند (Abdel-Latif et al., 2019; Abd Allah et al., 2021).

وزن تر و خشک بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده اسید هیومیک و پتاسیم سیلیکات در سطح احتمال یک درصد بر وزن تر و خشک بوته معنی‌دار بود. اثر متقابل تیمارها تأثیر معنی‌داری بر وزن تر و خشک بوته نداشت (جدول ۲). نتایج نشان داد که مصرف ۱۰ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک سبب بیش‌ترین وزن تر و خشک بوته زیره سبز توده بیرجند شد. بیش‌ترین وزن تر و خشک بوته از مصرف چهار در هزار پتاسیم سیلیکات حاصل شد (جدول ۳).

تأثیر اسید هیومیک از طریق افزایش سبزینه و دیگر رنگیزه‌های نورساختی مانند کاروتنوئیدها و افزایش سرعت نورساخت و کربوهیدرات‌ها موجب تحریک جذب عناصر غذایی و افزایش زیست‌توده ریشه و اندام‌های هوایی گیاه می‌شود (Nardi et al., 2002). اسید هیومیک از طریق افزایش محتوای نیتروژن رشد، ارتفاع، تعداد برگ‌ها و عملکرد را افزایش می‌دهد (Ayas & Gulser, 2005). گزارش شده است که بالاترین سطح اسید هیومیک آزمایش‌شده (چهار درصد) منجر به بلندترین گیاهان و بالاترین مقادیر

(et al., 2016). حیدری و خلیلی (Heidari & Khahlil, 2014) گزارش دادند که تیمار اسید هیومیک تأثیر معنی‌داری بر تعداد کپسول در بوته در چای ترش (*Hibiscus sabdariffa* L.) داشت. در گیاه سیاهدانه مشخص شد که در روش استفاده از اسید هیومیک، مصرف بیش‌تر اسید هیومیک تأثیر بهتری بر عملکرد گیاه و اجزای آن دارد (Aiyafar et al., 2015).

بیشترین تعداد گل‌آذین در بوته گل جعفری از مصرف پتاسیم سیلیکات (پنج میلی‌لیتر در لیتر) و عصاره جلبک (پنج میلی‌لیتر در لیتر) حاصل شد (Ayyat & Abdel-Mola, 2020). محلول‌پاشی هشت سانتی‌متر مکعب در لیتر پتاسیم سیلیکات، تعداد گل در بوته گلرنگ را نسبت به شاهد افزایش داد (Attia & Elbohy, 2019). گزارش شده است که هم منابع سیلیسیم خاک و هم محلول‌پاشی به همراه پتاسیم به‌طور قابل توجهی طول سنبله، وزن سنبله، تعداد دانه در سنبله، وزن ۱۰۰۰ دانه گندم را در مقایسه با شاهد بدون کاربرد سیلیس افزایش دادند (Jeer et al., 2021). همچنین کاربرد سیلیسیم باعث افزایش عملکرد دانه، تعداد سنبله در مترمربع و تعداد دانه در سنبله گندم شد (White et al., 2017).

تعداد چترک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده اسید هیومیک و اثر متقابل پتاسیم سیلیکات و اسید هیومیک بر تعداد چترک معنی‌دار بود. اما اثر ساده پتاسیم سیلیکات بر شاخص مذکور معنی‌دار نبود (جدول ۴). نتایج اثر متقابل تیمارها نشان داد که بیش‌ترین تعداد چترک مربوط به تیمار پنج کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و عدم مصرف پتاسیم سیلیکات بود که با تیمار پنج کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و دو در هزار پتاسیم سیلیکات اختلاف معنی‌دار آماری نداشت (جدول ۵).

اسید هیومیک و فولیک منجر به تشکیل کمپلکس‌های پایدار و کمپلکس‌های نامحلول و محلول با ریزمغذی‌ها و همچنین افزایش جذب عناصری مانند آهن و روی می‌شوند (Nardi et al., 2002). در آزمایشی مشابه، اسید هیومیک روی گندم دوروم اعمال شد و باروری سنبله را افزایش داد. به همین ترتیب، فعالیت فتوسنتزی گیاه را با افزایش عملکرد آنزیم روبیسکو افزایش داد (Delfine et al., 2005). محلول‌پاشی اسید هیومیک سبب افزایش معنی‌دار تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و عملکرد دانه شد، به‌طوری‌که بیش‌ترین صفات مذکور از غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد (Vafaahd et al., 2024). غلظت پتاسیم در اندام هوایی و دانه گندم با کاربرد سیلیسیم افزایش یافت که به گیاه اجازه داد تا پتانسیل آب را در گیاه حفظ کند و باعث عملکرد و زیست‌توده بالاتر شود (Ahmad et al., 2016).

وزن تر و خشک گیاه شاهی در مقایسه با شاهد و سایر سطوح اسید هیومیک آزمایش شده بود (Hafez, 2018). شهابا و همکاران (Shehata et al., 2012) روی خیار (*Cucumis sativus* L.) و ال-قمری و همکاران (El-Ghamry et al., 2009) در مورد باقلا (*Vicia faba* L.) نتایج مشابهی را گزارش کردند. آن‌ها افزایش صفات رشد رویشی را پس از کاربرد اسید هیومیک ثبت کردند. عبدالموگود و همکاران (Abdel-Mawgoud et al., 2007) بیان کردند که کاربرد اسید هیومیک با بهبود تخلخل خاک، نقش مؤثری در تهویه، افزایش تنفس ریشه و تسهیل گسترش آن در بستر کشت ایفا می‌کند. این امر ممکن است نشان‌دهنده افزایش رشد گیاه باشد. افزایش رشد رویشی را می‌توان با نقش کود پتاسیم با افزایش فعالیت آنزیم‌های مختلف و افزایش فرآیند فتوسنتز و در نتیجه تحریک و افزایش رشد گیاه توضیح داد (EL Sayed & EL Morsy, 2012). سیلیکون می‌تواند وزن خشک را از طریق دو سازوکار تحت تأثیر قرار دهد: ۱- حفظ یکپارچگی ساختارهای کلروپلاست و کلروفیل، در نتیجه فتوسنتز، که منجر به افزایش جذب نور می‌شود (Bayanati et al., 2023; Rastogi et al., 2021; Silva et al., 2012) و ۲- افزایش ظرفیت ذخیره آب با افزایش سطح بیان ژن آکوپورین به‌ویژه ژن‌های SbPIP در ریشه (Yin et al., 2013) و افزایش هدایت هیدرولیکی ریشه (Liu et al., 2014). مصرف ۱۰۰ تا ۱۵۰ پی‌پی‌ام پتاسیم سیلیکات، وزن خشک شاخساره گل جعفری (*Tagetes erecta* L.) را افزایش داد (Chalki et al., 2022). مهدوی و همکاران (Mahdavi et al., 2018) با ارزیابی اثر محلول‌پاشی سیلیس (صفر و یک میلی‌مولار) بر ویژگی‌های کمی و کیفی نعنای عنوان نمودند که در غلظت یک میلی‌مولار سیلیکون، وزن خشک اندام هوایی و کربوهیدرات‌ها در گیاه بیش‌تر از شاهد بود.

تعداد چتر در بوته

بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که اثر پتاسیم سیلیکات بر تعداد چتر در بوته معنی‌دار بود. اثر متقابل پتاسیم سیلیکات و اسید هیومیک بر شاخص مذکور معنی‌دار بود. اما اثر ساده اسید هیومیک بر شاخص مذکور معنی‌دار نبود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارها نشان داد که بیش‌ترین تعداد چتر در بوته مربوط به تیمار ۱۰ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و دو در هزار پتاسیم سیلیکات بود (جدول ۵).

نتایج محققان در گیاه زیره سیاه (*Carum carvi* L.) نشان داد که بیش‌ترین تعداد چتر در هر بوته از مصرف کود اسید هیومیک ۱۷/۴۲ و کم‌ترین تعداد آن از عدم مصرف کود با ۱۴/۲۵ به دست آمد و نسبت به شاهد با ۲۲ درصد افزایش نشان دادند (Nourihoseini

جدول ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر کود اسید هیومیک و پتاسیم سیلیکات بر صفات زایشی زیره سبز
Table 4- ANOVA (mean of squares) for the effect of humic acid and potassium silicate on reproductive traits of cumin

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	تعداد چتر در بوته Number of umbel in plant	تعداد چترک Number of of umbellet	تعداد دانه در چترک Number of seed in umbellet	وزن هزار دانه 1000- seed weight	عملکرد دانه Seed yield	درصد اسانس Essential oil (%)	عملکرد اسانس Essential oil yield
تکرار Replication	2	3.00 ^{ns}	0.03 ^{ns}	2.33 ^{ns}	0.009 ^{ns}	578.04 [*]	0.0389 ^{ns}	0.0164 ^{ns}
پتاسیم سیلیکات Potassium silicate (PS)	2	15.44 ^{**}	0.03 ^{ns}	8.77 ^{**}	1.186 ^{**}	17444.6 ^{**}	0.4237 ^{**}	0.0619 ^{**}
اسید هیومیک Humic acid (HA)	2	4.33 ^{ns}	5.59 ^{**}	2.77 ^{ns}	0.008 ^{ns}	23434.3 ^{**}	1.3944 ^{**}	0.2374 ^{**}
PS×HA	4	9.11 [*]	3.98 ^{**}	4.55 [*]	1.070 ^{**}	12600.5 ^{**}	0.5192 ^{**}	0.0407 ^{**}
خطا Error	16	2.41	0.82	1.16	0.008	165.02	0.0403	0.0072
ضریب تغییرات CV (%)	-	22.93	16.27	10.34	3.91	5.20	14.72	24.47

^{ns}, ^{*} و ^{**}: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد
^{ns}, ^{*} and ^{**}: non-significant, and significant at 5% and 1% levels of probability, respectively.

تعداد دانه در چترک

نتایج حاصل از بررسی تعداد دانه در چترک نشان داد که اثر ساده پتاسیم سیلیکات و اثر متقابل اسید هیومیک و پتاسیم سیلیکات بر این شاخص معنی‌دار بود. اما اثر ساده اسید هیومیک بر شاخص مذکور معنی‌دار نبود (جدول ۴). نتایج اثر متقابل تیمارها نشان داد که بیش‌ترین تعداد دانه در چترک از تیمار عدم مصرف اسید هیومیک و مصرف چهار در هزار پتاسیم سیلیکات به دست آمد که اختلاف معنی‌دار آماری با تیمار پنج کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و دو در هزار پتاسیم سیلیکات و تیمار ۱۰ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و چهار در هزار پتاسیم سیلیکات نداشت (جدول ۵).

تأثیر مثبت اسید هیومیک بر اجزای عملکرد می‌تواند عمدتاً به دلیل افزایش سطح سیتوکینین‌های درون‌زا و اکسین باشد که احتمالاً منجر به بهبود عملکرد می‌شود (Moraditochaee, 2012). علاوه بر این، تیمارهای سیلیسیوم احتمالاً به دلیل کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و افزایش فعالیت کاتالاز و پتاسیم سیلیکات به‌طور قابل توجهی کیفیت میوه را از طریق افزایش مخزن آنتی‌اکسیدانی در میوه بهبود می‌بخشد (Tesfay et al., 2011). تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، عملکرد دانه در بوته و وزن ۱۰۰۰ دانه سیاهدانه با افزایش میزان کاربرد محلول‌پاشی پتاسیم سیلیکات به‌طور تدریجی افزایش یافت که تفاوت معنی‌داری با شاهد در دو فصل داشتند (El-Leithy et al., 2019). این بهبود ممکن است به دلیل نقش سیلیکون در افزایش رشد گیاه از طریق ترویج

فرآیندهای فیزیولوژیکی مطلوب گیاه باشد (Korndorfer & Lepsch, 2001). در گیاه سیاهدانه، بیش‌ترین تعداد دانه در بوته (۳۱۳/۵۴) با کاربرد سه کیلوگرم اسید هیومیک در هکتار و کم‌ترین تعداد دانه در بوته (۱۹۵/۲۵) در شاهد (بدون مصرف) به دست آمد (Ariafar et al., 2015).

وزن هزاردانه

در این آزمایش مشاهده گردید که اثر ساده پتاسیم سیلیکات و اثر متقابل پتاسیم سیلیکات و اسید هیومیک بر وزن هزار دانه معنی‌دار بود. اما اثر ساده اسید هیومیک بر شاخص مذکور معنی‌دار نبود (جدول ۴). نتایج اثر متقابل تیمارها نشان داد که بیش‌ترین وزن هزاردانه از مصرف پنج کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و دو در هزار پتاسیم سیلیکات و تیمار ۱۰ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و چهار در هزار پتاسیم سیلیکات به دست آمد (جدول ۵).

نتایج نشان داد که با افزایش مقدار اسید هیومیک مصرفی، میزان وزن هزار دانه افزایش یافت که بیش‌تر به دلیل افزایش جذب عواملی مانند نیتروژن، کلسیم، فسفر، پتاسیم، منگنز، آهن، روی و مس است (Harper et al., 2000). مصرف اسید هیومیک، وزن هزار دانه زیره سیاه را بهبود بخشید (Nourihoseini et al., 2016). اسید هیومیک سبب تداوم بافت‌های فتوسنتزکننده می‌شود و عملکرد گیاهان را افزایش می‌دهد و نیز از طریق تأثیرات مثبت فیزیولوژیکی از جمله اثر

بر متابولیسم سلول‌های گیاهی و افزایش غلظت کلروفیل برگ، افزایش عملکرد گیاهان را در پی دارد (Naderi et al., 2002). پتاسیم سیلیکات، وزن ۱۰۰۰ دانه گندم را ۱۲۰ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (Osman et al., 2017). اثرات کودهای سیلیکات بر عملکرد دانه مربوط به رسوب عنصر در زیر اپیدرم برگ است که منجر به دفاع با سازوکار فیزیکی، افزایش ظرفیت فتوسنتز و کاهش تلفات تعرق می‌شود (Korndorfer et al., 2001). کاربرد سیلیکون در گیاه باعث افزایش راندمان فتوسنتزی برگ، بهبود خصوصیات رشد و تولید عملکرد دانه بیش‌تر در غلات زراعی می‌شود (Shashidhar et al., 2008). افزایش فعالیت‌های فتوسنتز باعث بهبود شرایط رشد و عملکرد دانه ژنوتیپ کلزا تیمار شده با پتاسیم سیلیکات شد (Artyszak, 2018).

عملکرد دانه

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات ساده و متقابل پتاسیم سیلیکات و اسید هیومیک در سطح احتمال یک درصد بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج اثر متقابل تیمارها نشان داد که از مصرف چهار در هزار پتاسیم سیلیکات و ۱۰ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک بیش‌ترین عملکرد دانه حاصل شد (جدول ۵).

برای تأیید نتایج این آزمایش، آریافر و فروزنده (Ariafar & Forouzandeh, 2017) گزارش کردند که کاربرد اسید هیومیک به‌طور قابل توجهی عملکرد دانه در زیره سبز را بهبود بخشید. این مطالعه نشان داد که بیش‌ترین عملکرد دانه با کاربرد سه کیلوگرم اسید هیومیک در هکتار به دست آمد که منجر به افزایش ۳۳/۲۴ درصدی نسبت به گروه شاهد بدون مصرف اسید هیومیک شد. سایر محققان نیز افزایش عملکرد زیره در نتیجه استفاده از اسید هیومیک را گزارش کردند (Nasiri Dehsorkhi et al., 2018; Rahghoshahi et al., 2022). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از مواد هیومیک باعث افزایش جذب مواد غذایی و بهبود رشد گیاه گردید (Celik et al., 2011). افزایش خصوصیات ریخت‌شناختی و فیزیولوژیکی در گیاهان تغذیه‌شده با اسید هیومیک به تأثیر آن بر بهبود جذب عناصر غذایی (Zn و Fe، Cu، N)، محتوای کلروفیل و فتوسنتز بستگی دارد. به گفته چن و آویاد (Chen & Aviad, 1990)، اسید هیومیک با افزایش رشد گیاه از جمله ریشه، سطح برگ، زیست‌توده گیاهی و نفوذپذیری بافت و همچنین با بهبود سرعت فتوسنتز و جذب مواد غذایی، عملکرد گیاه را افزایش می‌دهد.

سیلیکون با سرعت بخشیدن به رشد رویشی و افزایش تولید ماده خشک و کاهش تعرق باعث افزایش کیفیت دانه و در نهایت عملکرد می‌شود. نتایج مشابه در پژوهش‌های صورت‌گرفته حاکی از تأثیر

مثبت پتاسیم سیلیکات بر رشد و عملکرد دانه در گونه‌های زراعی است (Gugala et al., 2017; Kalandyk et al., 2014). پتاسیم سیلیکات، منبعی از پتاسیم است که نقش مهمی در افزایش سرعت فتوسنتز و افزایش کربوهیدرات‌های ذخیره‌شده و پرکننده‌های دانه ایفا می‌کند (Szczerba et al., 2009). این اثرات مثبت از جمله کاربردهای سیلیکون در بهبود عملکرد دانه برنج (*Oryza sativa* L.) است که توسط حکیم و همکاران به دست آمده است (Hakim et al., 2012). کاربرد کودهای شیمیایی و آلی در کنار هم باعث تأمین قسمتی از عنصرهای مورد نیاز گیاه، افزایش قابلیت جذب عنصرهای غذایی و افزایش کارایی جذب عنصرها از کود شیمیایی شد (Noorgholipour et al., 2010) که با توجه به یافته‌های پژوهش‌های یادشده می‌توان گفت که تیمار برهم‌کنش کود آلی و کود شیمیایی به دلیل جذب عنصرهای غذایی باعث افزایش عملکرد شد.

درصد و عملکرد اسانس

نتایج تجزیه واریانس حاکی از تأثیر معنی‌دار اثرات ساده و متقابل پتاسیم سیلیکات و اسید هیومیک در سطح احتمال یک درصد بر درصد و عملکرد اسانس بود (جدول ۴). نتایج اثر متقابل تیمارها نشان داد که بیش‌ترین درصد اسانس از مصرف ۱۰ کیلوگرم اسید هیومیک و عدم مصرف پتاسیم سیلیکات به دست آمد. بیش‌ترین عملکرد اسانس از مصرف ۱۰ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و چهار در هزار پتاسیم سیلیکات حاصل شد (جدول ۵).

اسید هیومیک، مخلوط پیچیده‌ای از اسیدهای آلی معطر است که حاوی عناصری مانند گوگرد، نیتروژن، فسفر و فلزات مختلف مانند کلسیم، منیزیم، مس و روی است. از نظر بیولوژیکی، اسید هیومیک مشابه سایر کودهای آلی مانند کمپوست، ورمی کمپوست و کودهای آلی عمل می‌کند. مطالعات قبلی نشان داده است که استفاده از کودهای آلی می‌تواند درصد اسانس را در گیاهان دارویی افزایش دهد (Badran & Safwat, 2004). عیافر و همکاران (Aiyafar et al., 2015) گزارش کردند که افزودن اسید هیومیک به‌میزان سه کیلوگرم در هکتار منجر به بالاترین درصد اسانس در زیره سیاه شد، درحالی که گروه شاهد (بدون اسید هیومیک) کم‌ترین درصد اسانس را نشان دادند. محققان در گیاه دارویی زنیان (*Carum copticum* L.) بیش‌ترین مقدار اسانس را از طریق کاربرد اسید هیومیک و نیتروکسین به دست آوردند (Barghamadi & Najafi, 2015). افزایش غلظت محلول‌پاشی اسید هیومیک از صفر به سه درصد باعث افزایش ۶۹/۲۸ درصدی عملکرد اسانس نعنای شد (Alavi Asl et al., 2023).

سیلیسیم ممکن است از طریق بهبود رشد سلولی، جذب یون و تراکم و اندازه غده روغنی برگ، بازده اسانس‌ها را افزایش دهد (Talebi et al., 2018). علاوه بر این، به نظر می‌رسد که پایداری لیپیدها در غشای سلولی در گیاهان تیمار شده با پتاسیم سیلیکات بیش‌تر از گیاهان تیمار نشده است (Agarie et al., 1998; Wang et al., 2013). بهبود محتوای روغن آفتابگردان (*Helianthus annuus*) و لوبیا چشم بلبلی (*Vigna unguiculata*) در نتیجه استفاده از سیلیکون، پتاسیم و پتاسیم سیلیکات گزارش شده است

جدول ۵- اثر متقابل کود سیلیکات پتاسیم × اسید هیومیک بر صفات مورد بررسی در زیره سبز
Table 5- The interaction effect of potassium silicate × humic acid on the studied traits in cumin

پتاسیم سیلیکات Potassium silicate (per thousand)	اسید هیومیک Humic Acid (kg.ha ⁻¹)	ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد چتر در بوته Number of umbel in plant	تعداد چترک Number of umbellet	تعداد دانه در چترک Number of seed in umbellet	وزن هزار دانه 1000- Seed weight (g)	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha ⁻¹)	درصد اسانس Essential oil (%)	عملکرد اسانس Essential oil yield (g.m ⁻²)
0	0	13.00 cde*	5.33 b	4.33 c	9.00 b	1.61 d	170.0 e	0.8 d	0.13 d
	5	12.83 de	6.00 b	7.33 a	9.66 b	2.37 b	224.22 c	0.99 cd	0.25 cd
	10	15.5 ab	5.33 b	5.00 bc	10.33 ab	1.76 cd	197.33 d	2.23 a	0.44 b
2	0	16.00 a	6.00 b	4.66 bc	12.00 a	2.36 b	270.37 b	1.14 cd	0.26 cd
	5	16.16 a	7.66 b	7.00 a	12.00 a	2.93 a	282.96 b	1.18 c	0.33 cb
	10	13.66 bcde	11.00 a	5.00 bc	10.66 ab	2.34 b	291.19 b	1.14 cd	0.37 bc
4	0	12.33 e	5.66 b	5.66 abc	8.66 b	2.94 a	127.41 f	1.1 cd	0.14 d
	5	14.83 abcd	5.66 b	5.00 bc	9.66 b	1.78 c	284.44 b	1.68 b	0.47 b
	10	15.00 abc	6.33 b	6.33 ab	12.00 a	2.93 a	372.07 a	1.99 ab	0.70 a

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

* Mean followed by similar letters in each column, are not significantly different based on Duncan' multiple range test ($p \leq 0.05$).

سیلیکات و ۱۰ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک به دست آمد. بنابراین، با توجه به یافته‌های این پژوهش، به نظر می‌رسد که استفاده هم‌زمان از پتاسیم سیلیکات (چهار در هزار) و اسید هیومیک (۱۰ کیلوگرم در هکتار) می‌تواند برای بهبود بخشیدن به عملکرد دانه و اسانس زیره سبز مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش تأثیر سطوح مختلف کود اسید هیومیک و پتاسیم سیلیکات بر عملکرد و اسانس زیره سبز نشان داد که تیمارهای کودی بر اکثر صفات به‌صورت ساده یا ترکیبی اختلاف معنی‌داری با شاهد داشتند و باعث بهبود صفات مورد اندازه‌گیری شدند، به‌طوری‌که بیشترین خصوصیات رویشی و زایشی از مصرف چهار در هزار پتاسیم

References

1. AbdAllah, A. M., Mohamed, T. S., Mohamed, M. S., & Noreldin, T. (2021). Alleviation of water deficiency effect by application of potassium silicate to faba bean intercropped with sugar beet in sandy soil. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, 48(1), 1-18.
2. Abdel-Latif, A. A., Ibrahim, N. M., & Ismail, S. A. (2019). Effect of foliar application of potassium silicate and some postharvest treatments on growth, productivity and storability of Garlic. *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences*, 27(1), 761-773.
3. Abdel-Mawgoud, A. M. R., EL-Greudy, N. H. M., Helmy, Y. I., & Singer, S. M. (2007). Responses of tomato plants different rates of humic based fertilizer and NPK fertilization. *Journal of Applied Sciences Research*, 3, 169-174.
4. Abou-Baker, N. H., Abd-Eladl, M., & Abbas, M. M. (2011). Use of silicate and different cultivation practices in alleviating salt stress effect on bean plants. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(9), 769-781.

5. Agarie, S., Hanaoka, N., Ueno, O., Miyazaki, A., Kubota, F., Agata, W., & Kaufman, P. B. (1998). Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. *Plant Production Science*, 1(2), 96-103. <https://doi.org/10.1626/pps.1.96>
6. Ahmad, M., El-Saeid, M. H., Akram, M. A., Ahmad, H. R., Haroon, H., & Hussain, A. (2016). Silicon fertilization—a tool to boost up drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) crop for better yield. *Journal of Plant Nutrition*, 39(9), 1283-1291. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1105262>
7. Aiyafar, S., Poudineh, H. M., & Forouzandeh, M. (2015). Effect of humic acid on qualitative and quantitative characteristics and essential oil of black cumin (*Nigella sativa* L.) under water deficit stress. *DAV International Journal of Science*, 4(2), 90-102.
8. Akbarinia, A., Ghalavand, A., Sefidkan, F., Rezaei, M. B., & Sharifi Ashourabadi, A. (2004). Study on the effect of different rates of chemical fertilizer, manure and mixture of them on seed yield and main, compositions of essential oil of ajowan (*Trachyspermum copticum*). *Pajouhesh & Sazandegi*, 61(1), 32-41.
9. Alavi Asl, S. A., Majidian, M., Modares Sanavy, S. A. M., & Esfahani, M. (2023). Effect of wood vinegar and humic acid on morphological and biochemical traits, antioxidant enzymes, and essential oil of peppermint (*Mentha piperita* L.) under water deficit stress conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(3), 163-176. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/IJFCS.2023.356625.654990>
10. Al-Taai, S. H. H. (2021). The effect of fertilizer uses on environmental pollution: A review. *Review of International Geographical Education Online*, 11(5), 3620-3529.
11. Amtmann, A., Hammond, J. P., Armengaud, P., & White P. J. (2006). Nutrient sensing and signalling in plants: potassium and phosphorus. *Advances in Botanical Research*, 43, 209-257. [https://doi.org/10.1016/S0065-2296\(05\)43005-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2296(05)43005-0)
12. Ariaifar, S., & Forouzandeh, M. (2017). Evaluation of humic acid application on biochemical composition and yield of black cumin under limited irrigation condition. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 86, 13.
13. Artyszak, A. (2018). Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality—a literature review in Europe. *Plants*, 7, 54. <https://doi.org/10.3390/plants7030054>
14. Artyszak, A., & Kucin'ska, K. (2016). Silicon nutrition and crop improvement: Recent advances and future perspective. In *Silicon in Plants*. D. K. Tripathi, V. P. Singh, P. Ahmad, D. K. Chauhan & S. M. Prasad (Eds.). CRC Press: London, UK. New York, NY, USA. pp. 297-319.
15. Attia, K. E., & Elbohy, N. F. (2019). The influence of spraying with potassium silicate and irrigation with saline water in sandy soil on *Calendula officinalis* L. *The Future Journal of Biology*, 2, 39-56.
16. Ayas, H., & Gulser F. (2005). The effect of sulfur and humic acid on yield components and macronutrient contents of spinach (*Spinacia oleracea* Var. Spinoza). *Journal of Biological Science*, 5(6), 801-804. <https://doi.org/10.3923/jbs.2005.801.804>
17. Ayyat, A. M., & Abdel-Mola, M. A. M. (2020). Response of *Tagetes patula* plants to foliar application of potassium silicate and seaweed extract under various irrigation intervals. *Scientific Journal of flowers and Ornamental Plants*, 7(4), 513-526.
18. Babarabie, M., Zarei, H., Badeli, S., Danyaei, A., & Ghobadi, F. (2020). Humic acid and folic acid application improve marketable traits of cut tuberose (*Polianthes tuberosa*). *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 10(1), 85-91. <https://doi.org/10.22034/JPPB.2020.12526>
19. Badran, F. S., & Safwat, M. S. (2004). Response of fennel plants to organic manure and bio-fertilizers in replacement of chemical fertilization. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 82, 247.
20. Barghamadi, K., & Najafi, S. (2015). Effect of different levels of nitroxin and humic acid on quantitative properties and essential oil of ajowan (*Carum copticum* (L.) C. B. Clarke). *Journal of Horticultural Science*, 29(3), 321-341. <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.22523>
21. Bayanati, M., Mohammad Al-Tawaha, A. R., Bayanati, M., Rasouli, M., & Asgari Lajayer, B. (2023). Conferring drought and salinity stress tolerance in horticultural crops by Si application. *Silicon*, 15(14), 5833-5843. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02489-1>
22. Bayati, P., Karimmojeni, H., & Razmjoo, J. (2020). Changes in essential oil yield and fatty acid contents in black cumin (*Nigella sativa* L.) genotypes in response to drought stress. *Industrial Crops and Products*, 155(1), 112764. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112764>
23. Befrozfar, M. R., Habibi, D., Asgharzadeh, A., Sadeghi-Shoae, M., & Tookallo, M. (2013). Vermicompost, plant growth promoting bacteria and humic acid can affect the growth and essence of basil (*Ocimum basilicum* L.). *Annual Biological Research*, 4, 8-12.
24. Bhatt, J., Kumar, S., Patel, S., & Solanki, R. (2017). Sequence-related amplified polymorphism (SRAP) markers based genetic diversity analysis of cumin genotypes. *Annals of Agrarian Science*, 15(4), 434-438. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.09.001>

25. Celik, H., Katkat, A. V., Asik, B. B., & Turan, M. A. (2011). Effect of foliar applied humic acid to dry weight and mineral nutrient uptake of maize under calcareous soil conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(1), 29-38. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.528490>
26. Chalki, A. B., Shoor, M., Kakhki, S. F. F., & Abedi, B. (2022). Evaluation of potassium silicate applying to reduce adverse effects of salinity on marigold plant (*Tagetes erecta* L.'nana'). *Journal of Plants Ornamental*, 12(2), 57-166.
27. Chen, Y., & Aviad, T. (1990). Effect of humic substances on plant growth. In: P. MacCarthy, C. E. Clapp, R. L. Malcolm & P. R. Bloom (Eds.). *Humic Substances in Soil and Crop Sciences: Selected Readings*. pp. 161-187. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc., USA.
28. Cooke, J., & Leishman, M. R. (2016). Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: A meta-analysis. *Functional Ecology*, 30(8), 1340-1357. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12713>
29. Dar, J. S., Cheema, M. A., Rehmani, M. I. A., Khuhro, S., Rajput, S., Virk, A. L., & Hessini, K. (2021). Potassium fertilization improves growth, yield and seed quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under drought stress at different growth stages. *Plos One*, 16(9), e0256075. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256075>
29. Delfine, S., Tognetti, R., Desiderio, E., & Alvino, A. (2005). Effect of foliar application of N and humic acids on growth and yield of durum wheat. *Agronomy for Sustainable Development*, 25, 183-191. <https://doi.org/10.1051/agro:2005017>
30. El-Banna, H., & Fouda, K. (2018). Effect of mineral, organic, biofertilizers and humic acid on vegetative growth and fruit yield quality of caraway plants (*Carum carvi* L.). *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 9(5), 237-241.
31. El-Bassiouny, H. S. M., Bakry, B. A., Attia, A. A. E. M., & Abd Allah, M. M. (2014). Physiological role of humic acid and nicotinamide on improving plant growth, yield, and mineral nutrient of wheat (*Triticum durum*) grown under newly reclaimed sandy soil. *Agricultural Sciences*, 05, 687-700. <https://doi.org/10.4236/as.2014.58072>
32. El-Ghamry, A. M., Abdel-Hai, K. M., & Ghoneen, K. M. (2009). Amino and humic acids promote growth, yield and disease resistance of faba bean cultivated in clayey soil. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(2), 731-739.
33. El-Leithy, A. S. I., Abdallah, S. A. S., & Ali, M. A. M. (2019). Effect of soil application with nitrogen levels and potassium silicate foliar spray on growth and yield of black cumin (*Nigella sativa* L.). *SINAI Journal of Applied Sciences*, 8(2), 185-198.
34. El-Samie, A., El-Aref, K. A. O., El-Said, M. A. A., & Ahmed, H. A. (2022). Impact of foliar spraying with potassium silicate and planting dates on the productivity and quality of canola plants (*Brassica napus* L.). *Archives of Agriculture Sciences Journal*, 5(3), 29-40.
35. El-Sayed, H. E. A., & El Morsy, A. H. A. (2012). Response of productivity and storability of garlic (*Allium sativum* L.) to some potassium levels and foliar spray with mepiquat chloride (PIX). *International Research Journal of Agriculture Science and Soil Science*, 2(7), 298-305.
36. Eyheraguibel, B., Silvestre, J., & Morard, P. (2008). Effects of humic substances derived from organic waste enhancement on the growth and mineral nutrition of maize. *Bioresource Technology*, 99(5), 10-25. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.082>
37. Farahani, H., Sajedi, N. A., Madani, H., Changizi, M., & Naeini, M. R. (2021). Effect of potassium silicate on water use efficiency, quantitative traits and essential oil yield of damask rose (*Rosa damascena* Miller) under water deficit stress. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 52(1), 171-182. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2020.289865.1727>
38. Farouk, S., & Omar, M. M. (2020). Sweet basil growth, physiological and ultrastructural modification, and oxidative defense system under water deficit and silicon forms treatment. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39(3), 1307-1331. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10071-x>
39. Fuentes, M., Baigorri, R., González-Gaitano, G., & García-Mina, J. M. (2018). New methodology to assess the quantity and quality of humic substances in organic materials and commercial products for agriculture. *Journal of Soils Sediments*, 18, 1389-1399. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1514-2>
40. Gugala, M., Sikorska, A., Zarzecka, K., Kapela, K., & Mystkowska, I. (2017). The effect of sowing method and biostimulators on autumn development and overwintering of winter rape. *Acta Scientiarum Polonorum Agricultura*, 16, 111-120.
41. Hafez, Y. (2018). Effect of humic acid soil application and foliar spray of some nutrient elements on growth, yield and chemical composition of *Lepidium sativum* plant. *Journal of Productivity and Development*, 23(3), 607-625.
42. Hakim, Y., Khan, A., Shinwari, Z., Kim, D., Waceas, M., Kamran, M., & Junglee, I. (2012). Silicon treatment to rice (*Oryza sativa* L. cv "Gopumbyeo") plants during different growth periods and its effects on growth and grain yield. *Pakistan Journal of Botany*, 44(3), 891-897.

43. Harper, S. M., Kerven, G. L., Edwards, D. G., & Ostatek Boczynski, Z. (2000). Characterization of fulvic and humic acids from leaves of eucalyptus comalduensis and from decomposed hay. *Soil Biochemistry*, 32, 1331-1336. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00021-3)
44. Hassan, A. A. (2019). Effects of irrigation water salinity and humic acid treatments on caraway plants. *Journal of Plant Production*, 10(7), 523-528.
45. Heidari, M., & Kahlil, S. (2014). Effect of humic acid and phosphorus fertilizer on seed and flower yield, photosynthetic pigments and mineral elements concentration in sour tea (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 45(2), 191-199. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20084811.1393.45.2.3.2>
46. Jafari, S., Sattari, R., & Ghavamzadeh, S. (2017). Evaluation of the effect of 50 and 100 mg doses of *Cuminum cyminum* essential oil on glycemic indices, insulin resistance and serum inflammatory factors on patients with diabetes type II: A double-blind randomized placebo-controlled clinical trial. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 7(3), 332-338. <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2016.08.004>
47. Jeer, M., Yele, Y., Sharma, K. C., & Prakash, N. B. (2021). Exogenous application of different silicon sources and potassium reduces pink stem borer damage and improves photosynthesis, yield and related parameters in wheat. *Silicon*, 13(3), 901-910. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00481-7>
48. Kalandyk, A., Waligorski, P., & Dubert, F. (2014). Application of biostimulators in alleviation of effects of drought and other environmental stresses in common soybean (*Glycine max*. L. Merr.). *Episteme*, 22, 267-274.
49. Khaled, H., & Fawy, H. A. (2011). Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity. *Soil Water Research*, 6(1), 21-29. <https://doi.org/10.17221/4/2010-SWR>
50. Korndorfer, G. H., & Lepsch, I. (2001). Effect of silicon on plant growth and crop yield. *Studies in Plant Science*, 8, 133-147. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80011-2](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80011-2)
51. Laskosky, J. D., Mante, A. A., Zvomuya, F., Amarakoon, I., & Leskiw, L. (2020). A bioassay of long-term stockpiled salvaged soil amended with biochar, peat, and humalite. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 3, 1-11. <https://doi.org/10.1002/agg2.20068>
52. Li, S., Li, J., Zhang, B., Li, D., Li, G., & Li, Y. (2017). Effect of different organic fertilizers application on growth and environmental risk of nitrate under a vegetable field. *Scientific Reports*, 7(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17219-y>
53. Liu, P., Yin, L., Deng, X., Wang, S., Tanaka, K., & Zhang, S. (2014). Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *Journal of Experimental Botany*, 65(17), 4747-4756. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru220>
54. Mahdavi, M., Esmailpour, B., & Fatemi, H. (2018). Effect of silicon nutrition on growth and physiology of spearmint (*Mentha spicata*) under cadmium stress condition. *Iranian Journal of Horticultural Sciences*, 49(1), 185-198. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2017.218536.1110>
55. Mahmood, F., Khan, I., Ashraf, U., Shahzad, T., Hussain, S., Shahid, M., Abid, M., & Ullah, S. (2017). Effects of organic and inorganic manures on maize and their residual impact on soil physico-chemical properties. *Journal of Soil Science Plant Nutrition*, 17(1), 22-32. <https://doi.org/10.4067/s0718-95162017005000002>
56. Massoud, H. Y., Farag, A. A., El-Gamal, S., & El-Nabawy, S. A. (2024). Effect of different drip irrigation rates and potassium silicate spray on growth and essential oil production of french basil. *Journal of Plant Production*, 15(1), 1-9. <https://doi.org/10.21608/JPP.2024.254953.1292>
57. Mattson, N. S., & Leatherwood, W. R. (2010). Potassium silicate drenches increase leaf silicon content and affect morphological traits of several floriculture crops grown in a peat-based substrate. *Horticulture Science*, 45(1), 43-47. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.1.43>
58. Meena, V. D., Dotaniya, M. L., Coumar, V., Rajendiran, S., Ajay, Kundu, S., & Subba Rao, A. (2014). A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 84(3), 505-518. <https://doi.org/10.1007/s40011-013-0270-y>
59. Mohamadnia, R., Rezaei Nejad, A., & Bahrami Nejad, S. (2018). Effect of irrigation interval and silicon on some morpho-physiological and biochemical properties of basil (*Ocimum basilicum* L.). *Iranian Journal of Horticultural Science*, 49(1), 37-45. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/IJHS.2017.217636.1109>
60. Mohammad, M. H., Meawad, A. A. A., El-Mogy, E. E. A. M., & Abdelkader, M. (2019). Growth, yield components and chemical constituents of *Stevia rebaudiana* Bert. as affected by humic acid and NPK fertilization rates. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, 46(1), 13-26.
61. Mohammadi, G. R., Chatrnour, S., Jalali-Honarmand, S., & Kahrizi D. (2015). The effects of planting arrangement and phosphate biofertilizer on soybean under different weed interference periods. *Acta Agriculturae Slovenica*, 105(2), 313-322. <https://doi.org/10.14720/aas.2015.105.2.14>
62. Moraditochaei, M. (2012). Effects of humic acid foliar spraying and nitrogen fertilizer management on the yield of peanut (*Arachis hypogaea* L.) in Iran. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 7(4), 289-293.

63. Naderi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., & Vianello, A. (2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 1527-1536. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8)
64. Nardi, S., Ertani, A., & Francioso, O. (2017). Soil-root cross-talking: The role of humic substances. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 180, 5-13. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600348>
65. Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., & Vianello, A. (2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 1527-1536. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8)
66. Nardi, S., Schiavon, M., & Francioso, O. (2021). Chemical structure and biological activity of humic substances define their role as plant growth promoters. *Molecules*, 26, 2256. <https://doi.org/10.3390/molecules26082256>
67. Nasiri Dehsorkhi, A., Makarian, H., Vernaseri Qandali, V., & Salari, N. (2018). The effect of humic acid and vermicompost application on yield and yield components of *Cumin cyminum* L. *Journal of Crop Applied Research*, 31(1), 93-113. (In Persian).
68. Nassif, A. H., Abd, R. M., & Al-Zubaidi, N. A. J. (2023). Improving the growth of black cumin (*Nigella sativa* L.) by humic acid and *Trichoderma harzianum* as biofertilizer. *Modern Phytomorphology*, 17, 37-40.
69. Noorgholipour, F., Samavat, S., & Tehrani, M. (2010). The necessity of combined use of chemical and organic fertilizers in sustainable agricultural systems. The First Congress on Fertilizer Challenges in Iran: Half a Century of Fertilizer Use, Tehran, Iran. (in Persian)
70. Nourihoseini, S. M., Khorassani, R., Astarai, A. R., Rezvani Moghadam, P., Zabihi, H. R., (2016). Effect of different fertilizer resources and humic acid on some morphological criteria, yield and antioxidant activity of black zira seed (*Bunium persicum* Boiss.). *Applied Field Crops Research*, 29(4), 88-105. (In Persian).
71. Osman, M. E., Mohsen, A. A., Elfeky, S. S., & Mohamed, W. (2017). Response of salt-stressed wheat (*Triticum aestivum* L.) to potassium humate treatment and potassium silicate foliar application. *Egyptian Journal of Botany*, 57(7th International Conf.), 85-102.
72. Pujos, A., & Morard, P. (1997). Effects of potassium deficiency on tomato growth and mineral nutrition at the early production stage. *Plant and Soil*, 189(2), 189-196. <https://doi.org/10.1023/A:1004263304657>
73. Rahghoshahi, M., Panahi Kord Laghari, K., & Rahimi, M. (2022). Study on humic acid and algae effects on grain yield and agronomical characteristics of cumin (*Cuminum cyminum* L.) under drought stress conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 38(2), 286-300. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2022.356393.3079>
74. Rastogi, A., Yadav, S., Hussain, S., Kataria, S., Hajhashemi, S., Kumari, P., & Brestic, M. (2021). Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants...?. *Plant Physiology and Biochemistry*, 169, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.004>
75. Rivandi, H., Rezvan, S., Jami Moeini, M., Sinaki, J. M., Damavandi, A., & Sanjani, S. (2020). Evaluation of quantity and quality yield of cumin (*Cuminum cyminum* L.) Ecotypes in different planting date under Sabzevar climatic conditions. *Journal of Agroecology*, 12(2), 227-240. <https://doi.org/10.22067/jag.v12i2.78488>
76. Rubio, V., Bustos, R., Irigoyen, M. L., Cardona-Lopez, X., Rojas-Triana, M., & Paz-Ares, J. (2009). Plant hormones and nutrient signaling. *Plant Molecular Biology*, 69(4), 361-73. <https://doi.org/10.1007/s11103-008-9380-y>
77. Sarhan, M. G. R., & Shehata, A. M. (2023). Evaluating the impact of biochar and foliar application of potassium silicate on the growth and productivity of ajwain (*Trachyspermum ammi* L.) plant under water stress in the newly reclaimed soil conditions. *Egyptian Journal of Horticulture*, 50(2), 247-263.
78. Shah, Z. H., Rehman, H. M., Akhtar, T., Alsamadany, H., Hamooh, B. T., Mujtaba, T., Daur, I., Al Zahrani, Y., Alzahrani, H. A. S., Ali, S., Yang, S. H., & Chung, G. (2018). Humic substances: Determining potential molecular regulatory processes in plants. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1-12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00263>
79. Shashidhar, H. E., Chandrashekhar, N., Narayanaswamy, C., Mehendra, A. C., & Prakash, N. B. (2008). Calcium silicate as silicon source and its interaction with nitrogen in aerobic rice. Silicon in Agriculture: 4th International Conference 26-31 Oct., South Africa, 93.
80. Shehata, S. A., Fawzy, Z. F., & El-Ramady, H. R. (2012). Response of cucumber plants to foliar application of chitosan and yeast under greenhouse conditions. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(4), 63-71.
81. Sible, C. N., Seebauer, J. R., & Below, F. E. (2021). Plant biostimulants: A categorical review, their implications for row crop production, and relation to soil health indicators. *Agronomy*, 11, 1297. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071297>
82. Silva, O. N., Lobato, A. K. S., Ávila, F. W., Costa, R. C. L., Oliveira Neto, C. F., Santos Filho, B. G., & Andrade, I. P. (2012). Silicon-induced increase in chlorophyll is modulated by the leaf water potential in two water-deficient tomato cultivars. *Plant Soil Environmental*, 58(11), 481-486. <https://doi.org/10.17221/213/2012-PSE>
83. Sohrabi Rinani, R., Rezvani Moghaddam, P., Ghorbani, R., & Astarai, A. (2021). Effect of organic, biological and chemical fertilizers on yield, yield components and oil yield of black seed (*Nigella sativa* L.). *Journal of Agroecology*, 13(1), 23-38. <https://doi.org/10.22067/jag.v12i1.22652>

84. Szczerba, M., Britto, D., & Kronzucher, H. (2009). K⁺ transport in plants: Physiology and molecular biology. *Journal of Plant Physiology*, 166, 447-466. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.12.009>
85. Talebi, M., Moghaddam, M., & Pirbalouti, A. G. (2018). Methyl jasmonate effects on volatile oil compounds and antioxidant activity of leaf extract of two basil cultivars under salinity stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(2), 34-40. <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2611-1>
86. Talebi, S., Majd, A., Mirzai, M., Jafari, S., & Abedini, M. (2015). The study of potassium silicate effects on qualitative and quantitative performance of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Biological Forum-An International Journal*, 7(2), 1021-1026.
87. Tesfay, S. Z., Bertling, I., & Bower, J. P. (2011). Effects of postharvest potassium silicate application on phenolics and other anti-oxidant systems aligned to avocado fruit quality. *Postharvest biology and Technology*, 60(2), 92-99. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.12.011>
88. Ulukan, H. (2008). Effect of soil-applied humic acid at different sowing times on some yield components in wheat hybrids. *International Journal of Botany*, 4(3), 164-175. <https://doi.org/10.3923/ijb.2008.164.175>
89. Vafaahd, F., Khalesro, S., Zareei, S., & Heidari, G. (2024). Response of black cumin (*Nigella sativa* L.) to digested fertilizer and humic acid in the sustainable agricultural system. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 33(4), 99-112. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/saps.2022.51374.2867>
90. Varnaseri Ghandali, V., Nasiri Dehsorkhi, A., Makarian, H., & Haghighat jou, P. (2020). Effects of vermicompost and humic acid application on the uptake of macro-elements, seed, and essential oil yield of cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 35(6), 950-966. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2019.125423.2521>
91. Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(4), 7370-7390. <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>
92. White, B., Tubana, B. S., Babu, T., Mascagni Jr, H., Agostinho, F., Datnoff, L. E., & Harrison, S. (2017). Effect of silicate slag application on wheat grown under two nitrogen rates. *Plants*, 6(4), 47. <https://doi.org/10.3390/plants6040047>
93. Xie, Z., Song, F., Xu, H., Shao, H., & Song, R. (2014). Effects of silicon on photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) on alluvial soil. *The Scientific World Journal*, 2014(1), 718716. <https://doi.org/10.1155/2014/718716>
94. Yang, F., Tang, C., & Antonietti, M. (2021). Natural and artificial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms. *Chemical Society Reviews Journal*, 50, 6221-6239.
95. Yin, L., Wang, S., Li, J., Tanaka, K., & Oka, M. (2013). Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of Sorghum bicolor. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35, 3099-3107. <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1343-5>
96. Zadegan, K., Monem, R., & Pazoki, A. (2023). Silicon dioxide nanoparticles improved yield, biochemical attributes, and fatty acid profile of cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) under different irrigation regimes. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(3), 3197-3208. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01297-1>
97. Zahoor, R., Dong, H., Abid, M., Zhao, W., Wang, Y., & Zhou Z. (2017). Potassium fertilizer improves drought stress alleviation potential in cotton by enhancing photosynthesis and carbohydrate metabolism. *Environmental & Experimental Botany*, 137, 73-83. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.02.002>