فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۴، شماره ۶۹، آذر و دی‌ماه ۱۴۰۴ صفحه: ۲۴۵-۲۶۰
https://doi.org/10.22034/14.69.245

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی مقادیر نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی برای بهبود عملکرد، شاخص کلروفیل و ترکیب شیمیایی کاهو (*Lactuca sativa* L.)

شاهین محمدپور[۱]، فرهاد بهتاش[۱]، سید بهمن موسوی[۲]، حنیفه سید حاجی‌زاده[۱*] و قاسم اقلیما[۳]

[۱] گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه ۵۵۳-۵۵۱۳۶، ایران

[۲] گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه ۵۵۳-۵۵۱۳۶، ایران

[۳] گروه کشاورزی، پژوهشکده گیاهان و مواد اولیه دارویی، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴)

چکیده

نیتروژن (N) یک عنصر کلیدی برای گیاهان است و در دسترس‌بودن آن عامل اصلی تعیین‌کننده رشد گیاه و تولید محصول است. همچنین، پتاسیم (K) بر رشد، عملکرد و کیفیت محصول تأثیر می‌گذارد، زیرا در فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی متعددی از جمله فتوسنتز، تنفس، انتقال سیگنال، تنظیم اسمزی و رشد و نمو نقش دارد. به منظور بهینه‌سازی غلظت نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی بر روی عملکرد بوته، شاخص کلروفیل و ترکیبات شیمیایی کاهو (*Lactuca sativa* L.) رقم سیاهو آزمایشی با سه سطح نیتروژن (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) از منبع نیترات کلسیم و سه سطح پتاسیم (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) از منبع سولفات پتاسیم به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی، با سه تکرار صورت گرفت. نتایج نشان داد که تأثیر غلظت‌های مختلف نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی بر صفات عملکرد بوته، شاخص کلروفیل، محتوای نیترات، سدیم و عناصر پرمصرف و کم‌مصرف به جز عنصر مس معنی‌دار بود. بیشترین میزان عملکرد و شاخص کلروفیل در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر N و K مشاهده شد، در حالیکه این تیمار حاوی کمترین (۱/۱۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) میزان تجمع سدیم در برگ بود. گیاهان تغذیه‌شده با محلول حاوی ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر N و K کمترین میزان نیترات (۱۱۴۵ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم وزن خشک) را داشتند. محتوای عناصر روی، منگنز، آهن و منیزیم در برگ کاهو به موازات افزایش N و K کاهش یافت، در حالیکه محتوای کلسیم روندی صعودی داشت. همچنین محتوای پتاسیم همراه با افزایش مقدار N در محلول غذایی ۱۵/۵٪ کاهش یافت. در کل، یافته‌های این مطالعه اطلاعات پایه‌ای با توجه به مقادیر N و K برای بهبود مدیریت مواد غذایی هیدروپونیک فراهم می‌کند که مقدار صحیح N و K مورد نیاز گیاهان را با در نظر گرفتن تأثیر آنها بر میزان تجمع عناصر دیگر و نیز عملکرد گیاه تعیین می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اثرات آنتاگونیستی، ارزش غذایی، سبزیجات برگی، تجمع نیترات

مقدمه

سبزیجات جز حیاتی رژیم غذایی روزانه انسان محسوب می‌شوند زیرا مواد ضروری بدن انسان مانند مواد معدنی، ویتامین‌ها و فیبر توسط آنها تأمین می‌گردد (Renna *et al.*, 2018). کاهو یکی از پرمصرف‌ترین سبزیجات در سراسر جهان است که به طور گسترده در سراسر جهان کشت می‌شود، اما

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: hajizade@maragheh.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]

ارزش غذایی آن دست کم گرفته شده است. این سبزی به دلیل اینکه حاوی مواد مغذی، ویتامین‌ها و آنتی‌اکسیدان‌های مختلفی است نقش مهمی در تغذیه انسان ایفا می‌کند و از این رو تحقیقات زیادی بر روی آن انجام شده است (Zou *et al.*, 2021). اندازه کوچک کاهو، چرخه رشد کوتاه، مناسب بودن برای رشد در شرایط هیدروپونیک، ارزش اقتصادی بالا و مزایای زیست‌محیطی، آن را به یکی از اصلی‌ترین گیاهان مورد استفاده برای تولید سبزیجات با غلظت پتاسیم پایین تبدیل کرده است (Zhang *et al.*, 2017). همچنین یک محصول مهم اقتصادی است که اغلب در گلخانه‌ها با روشنایی تکمیلی کشت می‌شود و با ۱۱/۷ کیلوگرم به ازای هر نفر در سال، دومین محصول سبزی پرمصرف در ایالات متحده است (Legendre and Van Lersel, 2021).

متابولیسم گیاه با حضور عناصر پرمصرف و کم‌مصرف ضروری تنظیم می‌شود (Adamczyk-Szabela *et al.*, 2015). کمبود مواد معدنی دو سوم جمعیت جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و به عنوان یک چالش جدی جهانی تلقی می‌شود (Davis, 2009). کاهش در کیفیت محصولات ارزیابی‌شده توسط ویژگی‌های ارگانولپتیک (طعم، رنگ، بو و ظاهر) و ترکیبات مرتبط با سلامت، مانند نیترات، معمولاً گزارش می‌شود (Albornoz, 2016). از این‌رو تأثیر نوع تغذیه مخصوصا نیتروژن (N) بر تجمع عناصر معدنی ممکن است در تعیین کیفیت غذایی سبزیجات برگی مهم باشد. شدت رنگ سبز در برگ‌های گیاه به طور مستقیم وضعیت N گیاه را نشان می‌دهد زیرا جز مهم کلروفیل و مسئول رشد رویشی است (Wiedenfeld *et al.*, 2009). از آنجا که مصرف سطوح بالای نیترات ممکن است منجر به آسیب شدید در انسان شود، تولید محصولاتی با محتوای نیترات کم بسیار مهم است (Liu *et al.*, 2014). با توجه به نتایج مطالعات قبلی، تجمع نیترات در قسمت‌های خوراکی محصولات به طور مستقیم با نوع کود نیتروژن مورد استفاده و همچنین خواص خاک ارتباط دارد. سبزیجات برگ سبز دارای بالاترین سطوح نیترات هستند و کاهو به عنوان یک سبزی که دارای محتوای نیترات بسیار بالا است، طبقه‌بندی می‌شود (Santamaria, 2006). همچنین شدت نور، زمان انتشار کود N و نوع کاهو نشان داده شده که بر تجمع نیترات در این محصول تأثیر می‌گذارد (Pavlou *et al.*, 2007). در مطالعه‌ای مبتنی بر نقش نیتروژن بر جنبه‌های مختلف رشد و نمو گیاه و نیز سلامتی انسان، مشخص شد که غلظت نیتروژن برگی در تمام تیمارهای کودی در محدوده کفایت ۳/۵ تا ۵/۱ درصد برای سبزیجات برگ‌پهن بود (Barker and Pilbeam, 2015). از طرف دیگر، پتاسیم (K) نیز یکی از عناصر غذایی مهم است و نقش مهمی در رشد و نمو محصول ایفا می‌کند بطوریکه در فعال‌سازی آنزیم‌ها، تنظیم اسمز سلولی و حرکت روزنه‌ای فتوسنتز نقش دارد (Coskun *et al.*, 2014) زیرا انتشار CO_2 از اتمسفر به کلروپلاست را تسهیل می‌کند (Jakli *et al.*, 2017). پتاسیم و منیزیم (Mg) علاوه‌براین در انتقال ساکارز با واسطه آوند آبکش و توزیع فتواسمیلات‌ها در گیاه نقش دارند. سرعت جذب CO_2 فتوسنتزی در محدوده وسیعی از غلظت K و Mg در برگ‌ها پایدار است. با این حال، برای حفظ فعالیت فتوسنتزی محصولات، تغذیه کافی پتاسیم و منیزیم مورد نیاز است (Trankner *et al.*, 2018). مواد آلی موجود در خاک حاوی مقدار ناچیزی پتاسیم است زیرا جز مولکول‌های زیستی نیست و از این‌رو به دلیل حلالیت بالا به راحتی و به سرعت از برگ‌ها شسته می‌شود. با این حال، بخشی از K خاک به طور مستقیم در دسترس گیاهان است (Britzke *et al.*, 2012) اما کمبود پتاسیم باعث کلروز حاشیه‌ای در برگ‌های مسن‌تر و به دنبال آن نکروز می‌شود (Prado, 2008). از طرفی عرضه کافی پتاسیم می‌تواند ماده خشک گیاه را بهتر از غلظت کمتر پتاسیم در خاک در شرایط خشکی بهبود بخشد (Hasanuzzaman *et al.*, 2018). Cheema و همکاران (۲۰۱۲) دریافتند که پتاسیم به افزایش استفاده از کربوهیدرات‌ها کمک می‌کند و شاخص سطح برگ را افزایش می‌دهد که به افزایش تجمع ماده خشک و در نهایت افزایش عملکرد در کلزا (*Brassica napus* L.) کمک می‌کند. Guo و همکاران (۲۰۰۷) بیان کردند که همبستگی مثبتی بین جذب آب و جذب پتاسیم در لوبیا

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]

(*Phaseolus vulgaris* L.) وجود دارد.

در حالیکه هیدروپونیک به عنوان یک سیستم تولید سبزیجات کارآمد در نظر گرفته می‌شود، نیاز قانع‌کننده‌ای برای بررسی کارایی توصیه‌های عمومی فعلی دوز مواد مغذی عمدتاً براساس اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC) وجود دارد. چنین اطلاعاتی برای تنظیم دقیق و بهینه‌سازی شیوه‌های مدیریت هیدروپونیک فعلی برای بهبود راندمان جذب مواد مغذی حیاتی است که با بررسی تحرک برخی از عناصر پرمصرف و کم‌مصرف (N، P، Ca، Mg، K، Fe، و Mn) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا و با توجه به اهمیت کاهو طبق تحقیقات انجام‌شده، این مطالعه درصدد است تا اثر غلظت‌های مختلف N و K را در محلول غذایی بر بهبود عملکرد کاهو در شرایط هیدروپونیک و نیز کیفیت غذایی آن از طریق ارزیابی میزان کلروفیل و ذخیره عناصر آهن، روی، پتاسیم، مس، کلسیم و منیزیم، و نیز برآورد مقدار تجمع سدیم و نیترات مورد ارزیابی و آزمایش قرار دهد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در گلخانه دانشگاه مراغه به مختصات عرض جغرافیایی ۷۳ درجه و ۲۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی و دارای ۱۵۵۱ متر ارتفاع از سطح دریا انجام شد.

مواد گیاهی مورد نیاز: به منظور بررسی اثر مقادیر مختلف N و K بر عملکرد و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و ارزش غذایی کاهو، آزمایشی گلخانه‌ای با سه سطح N و سه سطح K با چهار تکرار به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی انجام شد. برای این منظور بذر کاهوی رقم سیاهو (*Lactuca sativa* L. cv. Siahoo) تولید شرکت سمینیس (Seminis) از کشور آمریکا و با درجه خلوص ۹۹ درصد و قابلیت جوانه‌زنی ۸۵ درصد استفاده گردید. بذور با هیپوکلریت (NaOCl، ۱٪ (v/v)، ۵ دقیقه) ضدعفونی شده، سه بار با آب‌مقطر شسته شدند. سپس در هر گلدان ۱۲ کیلوگرمی حاوی شن و ماسه پنج بذر کاشته شد و با آب لوله‌کشی یک روز در میان آبیاری شده و پس از سبزشدن گیاهچه‌ها، گلدان‌ها با محلول هوگلند ۱/۲ غلظت (EC:۱/۵، pH: ۶/۶) (Coolong *et al*., 2004) تغذیه شدند. دو هفته بعد، هر گلدان حاوی دو گیاه قوی نگه داشته شد و با غلظت کامل محلول هوگلند آبیاری و دوباره بعد از دو هفته دیگر نیترات کلسیم ($Ca(NO_3)_2\ 4H_2O$) در سه سطح (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و پتاسیم از منبع کودی سولفات پتاسیم (K_2SO_4) در سه سطح (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) به محلول غذایی هوگلند اضافه شده و در چهار تکرار برای تغذیه کاهو (*L. sativa* cv. Siyahoo) تا زمان برداشت در شرایط هیدروپونیک مورد استفاده قرار گرفت. گیاهان شاهد ابتدا با محلول هوگلند با غلظت نیم و در نهایت محلول هوگلند با غلظت کامل تغذیه شدند تا بذور به مرحله گیاهچه برسند، سپس کمترین غلظت نیتروژن و پتاسیم (۱۰۰) برای تغذیه گیاهان شاهد تا زمان برداشت مورد استفاده قرار گرفتند. شش هفته پس از تیمار فاکتورهای قابل اندازه‌گیری شامل وزن تک بوته کاهو که با استفاده از ترازوی دیجیتالی (Sartorius, Basic Germany) با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. همچنین، میزان شاخص کلروفیل برگ‌ها با دستگاه کلروفیل‌متر (Minolta-504) سنجیده شد. برای اندازه‌گیری وزن تر و خشک گیاه، یک برگ گیاه به طور تصادفی انتخاب و توزین شده و به عنوان وزن تر (FW) نوشته شد. سپس نمونه در آون (۷۰ درجه سانتی‌گراد، ۷۲ ساعت) برای اندازه گیری وزن خشک (DW) قرار داده شد. اندازه‌گیری عملکرد از طریق توزین اندام‌های هوایی تمام گیاهان هر تیمار به دست آمد.

اندازه‌گیری عناصر: اندازه‌گیری عناصر آهن، روی، مس و منگنز به روش استخراج عصاره انجام شد. تعیین غلظت عناصر با نمونه‌های برگ که قبلاً در آون ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک‌شده بودند، انجام شد. میزان ۰/۵-۰/۳ گرم از نمونه‌های خشک (برای هر تکرار به صورت جداگانه با ترازو وزن شد) در هاون پودر شده و در بوته چینی ریخته و به کوره الکتریکی با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد انتقال داده شده و نمونه‌ها در مدت ۴ تا ۵ ساعت به خاکستر سفید رنگی تبدیل

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]

شدند. این خاکستر سفید رنگ به کمک ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدیک ۲ مولار هضم شده، سپس این ترکیب به‌وسیله کاغذ صافی فیلتر شده و به درون لوله‌های فالکون ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد و سپس با کمک آب‌مقطر، حجم محلول به ۵۰ میلی‌مولار رسانده شد. این محلول به عنوان عصاره خام برای اندازه‌گیری میزان عناصر مورد استفاده قرار گرفت (Ryan *et al.*, 2001).

تعیین میزان آهن با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Shimadzu AA-630) انجام شد. برای این منظور با ارائه نمونه استانداردها و سپس نمونه‌های آزمایشی به دستگاه میزان آهن به نسبت استانداردها توسط نرم‌افزار روی صفحه مانیتور ثبت گردید. برای این منظور اسید هیدروکلریک ۰/۱۲ مول در لیتر: ۱۰ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک غلیظ (۳۷ درصد) به ۴۰۰ میلی‌لیتر آب اضافه شد و سپس به حجم یک لیتر رسانده شد. محلول استاندارد غلیظ آهن ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر: ۲۰۰ میلی‌لیتر آب به بالن ژوژه یک لیتری ریخته شد و ۱۰ میلی‌لیتر از اسید هیدروکلریک غلیظ به آن اضافه شد. مقدار ۷/۰۲۲ گرم از نمک فروآمونیوم سولفات $Fe(NH_4)_2(SO_4)26H_2O$ با کمی آب به داخل بالن ژوژه منتقل یافت. بالن ژوژه حرارت داده شده تا تمامی نمک حل گردید و بعد از خنک‌شدن به حجم رسانده شد. محلول استاندارد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر: ۲۵ میلی‌لیتر از استاندارد غلیظ به بالن ژوژه ۵۰۰ میلی‌لیتری انتقال داده شد و با اسید هیدروکلریک ۰/۱۲ مول به حجم رسانده شد. سری محلول‌های استاندارد: صفر، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌لیتر از استاندارد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر را به بالن ژوزه ۱۰۰ میلی‌لیتر انتقال داده شد و با اسید هیدروکلریک ۰/۱۲ مول به حجم رسانده شد، این محلول‌ها حاوی صفر، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ میلی‌گرم در لیتر آهن هستند. نمونه‌های استاندارد و عصاره با دستگاه جذب تمی با طول‌موج ۲۴۸/۳ نانومتر اندازه‌گیری شد. غلظت آهن در نمونه‌ها در با استفاده از سیستم قرائت دستگاه و با استفاده منحنی کالیبراسیون به دست آمد و براساس میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک گزارش گردید (Ghazan Shahi, 2005).

به‌منظور اندازه‌گیری میزان عنصر روی با استفاده از محلول به حجم رسانده و محلول استاندارد غلیظ ۴۰۰ میلی‌گرم روی: ۱/۷۹۵ از سولفات‌روی ($ZnSO_4,7H_2O$) در ۵۰۰ میلی‌لیتر آب حل شد و ۱۲ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک غلیظ به آن اضافه شد و بعد از خنک‌شدن به حجم ۱ لیتر رسانده شد. محلول استاندارد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر روی: ۲۵ میلی‌گرم از استاندارد غلیظ روی (۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر) به بالن ژوژه ۵۰۰ میلی‌لیتری منتقل و با اسید هیدروکلریک ۰/۱۲ مول به حجم رسانده شد. سری محلول‌های استاندارد: صفر، ۲، ۳، ۴ و ۵ میلی‌لیتر از محلول استاندارد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر به بالن ژوژه ۱۰۰ میلی‌لیتری منتقل و اسید هیدروکلریک ۰/۱۲ مول به حجم رسانده گردید. استانداردها و عصاره‌های گیاهی با شعله آبی استیلن- هوا ابری شده و میزان جذب در طول‌موج ۲۱/۹ نانومتر خوانده و با رسم منحنی کالیبراسیون غلظت روی در نمونه‌ها به دست آمد و به‌صورت میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک گزارش شد (Ghazan Shahi, 2005).

اندازه‌گیری مس و منگنز به روش جذب اتمی در عصاره و با هضم HCL ۲ مولار انجام شد. نمونه‌های استاندارد و عصاره‌های گیاهی با طول‌موج ۳۲۴/۷ نانومتر جذب قرائت و با رسم منحنی کالیبراسیون غلظت این عناصر در نمونه‌ها به دست آورده شد و براساس میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تر گزارش شد (Ryan *et al.*, 2001).

برای اندازه‌گیری سدیم و پتاسیم ابتدا ۰/۵ گرم از ماده خشک گیاهی با ترازوی حساس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. سپس ۲/۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ به هر لوله اضافه گردید. درروز بعد نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. سپس دما به صورت تدریجی تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و برای سه ساعت عمل هضم انجام گرفت. سپس مایع به دست آمده را از کاغذهای صافی عبور داده و در نهایت در فلاسک‌های ۱۰۰ میلی‌لیتری قرارگرفته به ۱۰۰ میلی‌لیتر می‌رسانیم. میزان پتاسیم موجود در نمونه‌ها توسط دستگاه فلیم فوتومتر در طول موج ۴۱۰ نانومتر خوانده شد (Chapman and Pratt, 1962).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]

برای اندازه‌گیری نیترات مقداری از هر نمونه، درون آون با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از خشک‌شدن نمونه‌ها و پودرکردن آنها، از هر نمونه ۰/۱ تا ۰/۵ گرم به ارلن مایر۱۰۰میلی‌لیتر منتقل و به روش کالریمتری بعد از احیا (روش دیآزو)، به آن ۵۰ میلی‌لیتر اسید استیک ۲٪ اضافه و به مدت نیم ساعت با دستگاه شیکر تکان داده شد. برای از بین بردن رنگ عصاره و داشتن عصاره شفاف، ۰/۲گرم کربن اکتیو به هر یک از نمونه‌ها در ۵ دقیقه پایانی زمان تکان خوردن، اضافه شد و پس از عبور از کاغذ صافی ۱۰ میلی‌لیتر از عصاره به‌دست آمده داخل لوله آزمایش ریخته و به آن ۰/۵گرم از مخلوط سالسیلیک اسید، سولفات منگنز مونوهیدرات، سولفانیل امید، ان-۱ - نفتیل اتیلن دی هیدروکلراید و روی اضافه و در لوله آزمایش به مدت۳۰ ثانیه به‌هم زده شد. پس از عبور از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ و تنظیم دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۵۴۰ نانومتر، غلظت نیترات گیاهی، اندازه‌گیری گردید (امامی، ۱۳۷۵).

برای انجام تجزیه واریانس و مقایسه میانگین صفات مورد بررسی، از نرم‌افزار MSTATC نسخه ۲/۱ استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد انجام گرفت. همچنین، برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

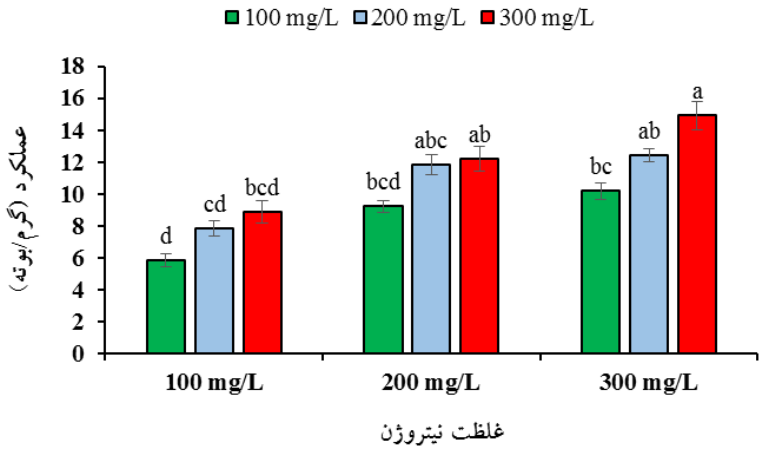
نتایج و بحث

تأثیر غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر عملکرد و کلروفیل برگ کاهو رقم سیاهو: تأثیر غلظت‌های مختلف نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی بر عملکرد کاهو در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود بطوریکه با افزایش غلظت هر دو عنصر در محلول غذایی، میزان عملکرد افزایش یافت. به عبارتی کمترین میزان عملکرد (۵/۸۳ گرم) در غلظت ۱۰۰ و بیشتری میزان عملکرد (۱۴/۹ گرم) در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر N و K به دست آمد. با افزایش مقدار K در محلول غذایی از ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر در غلظت پایه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر N، مقدار عملکرد به میزان ۵۱٪ افزایش یافت در حالیکه در غلظت پایه ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر N، این نسبت تا ۴۶/۶٪ افزایش نشان داد (شکل ۱). میزان اثرگذاری افزایش مقدار N در محلول غذایی از ۱۰۰-۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر در غلظت پایه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر K بر مقدار عملکرد کاهو ۷۴/۲٪ و در غلظت پایه ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر K تا ۶۸/۱٪ افزایش نشان داد. با این حال هر دو عنصر نیتروژن و پتاسیم در بالاترین سطح خود باعث بیشترین عملکرد شده‌اند (شکل ۱).

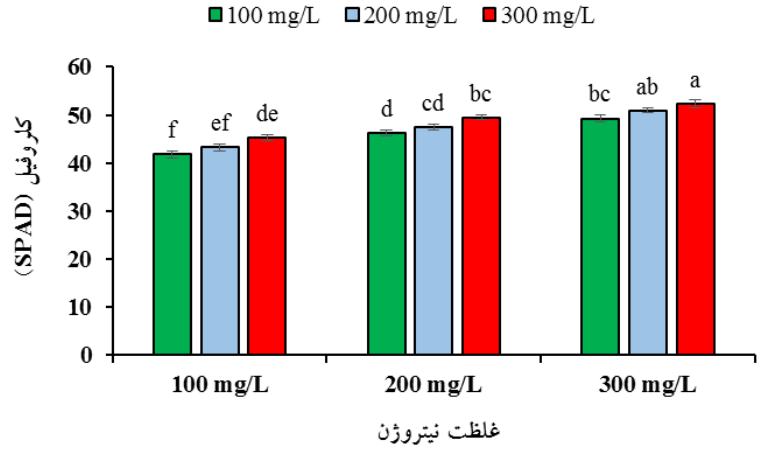
اثر غلظت‌های مختلف نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی بر مقدار کلروفیل کاهو در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود بطوریکه با افزایش غلظت هر دو عنصر تا مقدار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر در محلول غذایی، میزان کلروفیل در مقایسه با شاهد (غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر N و K) ۲۵ درصد افزایش یافت. کمترین (۴۱/۸) و بیشترین (۵۲/۳۳) مقدار کلروفیل به ترتیب مربوط به غلظت ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر هر دو عنصر در محلول غذایی بود (شکل ۲). در غلظت پایه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم، افزایش مقدار نیتروژن از ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر باعث ۱۷/۸ درصد افزایش در مقدار کلروفیل برگ شد در حالیکه در غلظت پایه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن، با افزایش پتاسیم از ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، مقدار کلروفیل برگ ۸/۳ درصد افزایش نشان داد (شکل ۲).

با توجه نتایج شکل ۱ و ۲، تأثیر بیشتر نیتروژن بر افزایش عملکرد و کلروفیل نسبت به پتاسیم بسیار واضح است. در این راستا فرزانه و همکاران (۱۳۸۹) و Liao و همکاران (۲۰۲۲) به نتایج مشابهی در گوجه‌فرنگی و سویا دست یافتند. استفاده از کودهای نیتروژن توجه زیادی را به خود جلب کرده است زیرا N یک عنصر مغذی ضروری برای رشد گیاه است و برای سنتز اسیدآمینه، پروتئین و ترکیبات فتوسنتزی کلروفیل در گیاهان حیاتی است (Mao *et al.*, 2018). یکی از علل افزایش عملکرد با افزایش نیتروژن در محلول غذایی، توسعه مناسب اندام‌های هوایی طی دوره رشد و استفاده مفید از نور خورشید و افزایش مواد فتوسنتزی در گیاه است. با افزایش سطح برگ تا حد مطلوب میزان تولید بالا می‌رود (خلدبرین و اسلام‌زاده،

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]



شکل ۱- برهمکنش بین غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر عملکرد تک بوته کاهو رقم سیاهو (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است).



شکل ۲- برهمکنش بین غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر محتوای کلروفیل کاهو رقم سیاهو (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است).

۱۳۸۴) که این امر در محصولات برگی نسبت به محصولات میوه‌ای بیشتر صدق می‌کند به طوریکه در صورت عدم تکمیل با عناصر دیگر، تأثیر سویی خواهد داشت. عناصر نیتروژن، منیزیم و آهن در سنتز کلروفیل مورد نیاز هستند، بنابراین کمبود این عناصر بر غلظت کلروفیل تأثیر می‌گذارد (Laing *et al.*, 2002). از بین‌رفتن رنگدانه در برگ‌ها تحت کمبود نیتروژن به این دلیل است که فرآیند توزیع مجدد به دلیل پروتئولیز آنزیم روبیسکو و سایر پروتئین‌های کلروپلاست، آزادسازی N موجود در این ترکیبات برای پاسخگویی به تقاضای اندام‌های جدید است (Feller *et al.*, 2008). غلظت نیتروژن در بافت برگ به طور مستقیم در رنگدانه‌ها و در نتیجه در فعالیت فتوسنتزی دخالت می‌کند زیرا یک ماده مغذی ساختاری مولکول کلروفیل است. این کاهش در سرعت فتوسنتز، در کاهش تنفس، فعالیت آنزیم‌های مرتبط با فتوسنتز و در راندمان مصرف آب منعکس می‌شود (Zhang *et al.*, 2013). کمبود نیتروژن در محلول غذایی به دلیل جذب کم نیتروژن توسط گیاهان، تولید ماده خشک را مختل می‌کند که توسط پرادو Prado و همکاران (۲۰۱۱) نیز تأیید شده است. همچنین پتاسیم یک ماده مغذی ضروری برای رشد و تکثیر گیاهان است. کاهش محتویات کاروتنوئید و کلروفیل ممکن

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]

است به دلیل تخریب بتا-کاروتن و اثر منفی یون‌های نمک انباشته‌شده در محلول خاک باشد. Gomes و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند که در مقایسه با کاربرد کلرید پتاسیم، سولفات پتاسیم بالاترین محتوای کاروتنوئید و کلروفیل را در گیاهان داشت. از طرفی کمبود پتاسیم می‌تواند فشار اسمزی را کاهش داده، باعث بسته‌شدن روزنه‌ها، کاهش فعالیت فتوسنتزی و تأثیر بر فعالیت آنزیم‌ها شود که در نهایت منجر به کند شدن رشد گیاه می‌شود که تأییدکننده منبع کودی پتاسیم مورد استفاده در این پژوهش است.

تأثیر غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر غلظت عناصر پرمصرف و کم‌مصرف در برگ کاهو رقم سیاهو: برهمکنش بین غلظت‌های مختلف نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی بر مقدار غلظت تمام عناصر پرمصرف و کم‌مصرف اندازه‌گیری شده در کاهو در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود و فقط مقدار عنصر مس تفاوت معنی‌دار نشان نداد. با توجه به نتایج گزارش‌شده در شکل ۳، با افزایش مقدار هر دو عنصر در محلول غذایی محتوای روی در برگ کاهو نسبت به غلظت پایه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر N و K کاهش یافت. بیشترین مقدار روی (۱۵۵/۱۳ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر N و K در محلول غذایی مشاهده شد در حالیکه محلول حاوی ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر N و K، دارای کمترین میزان روی (۱۱۸/۶۷ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) بود (شکل ۳).

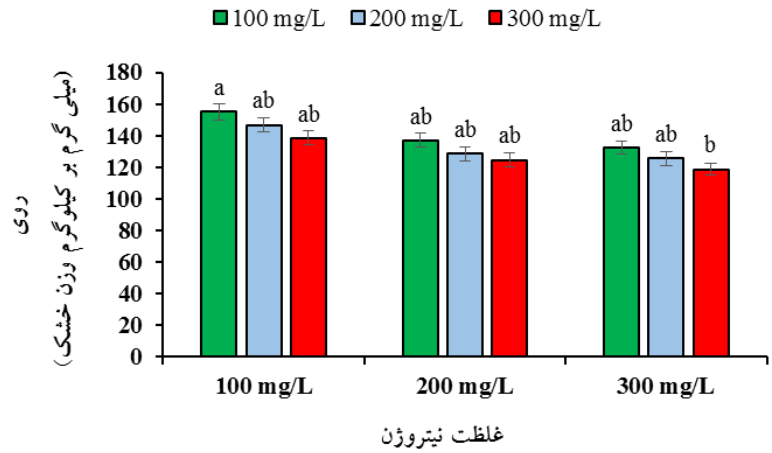
اندازه‌گیری محتوای منگنز در برگ کاهو رقم سیاهو نشان داد که اثر غلظت‌های مختلف نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی معنی‌دار بود ($P\leq0.01$) بطوریکه روند کاهشی در جذب و تجمع منگنز همانند عنصر روی به موازات افزایش غلظت هر دو عنصر در محلول غذایی، مشاهده شد (شکل ۴). بیشترین (۱۲۳/۰۶ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) و کمترین (۱۰۵/۳۳ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) مقدار تجمع منگنز در برگ کاهو به ترتیب مربوط به تیمار حاوی غلظت ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی بود. با اینکه بین غلظت‌های ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی تفاوت قابل توجهی از نظر انباشت منگنز وجود داشت ولی بین سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۴).

از نظر محتوای آهن تأثیر غلظت‌های مختلف نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی تفاوت‌معنی‌داری را نشان داد ($P\leq0.01$) بطوریکه با افزایش غلظت نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی، میزان تجمع آهن در بافت برگی کاهو کاهش یافت بطوریکه بیشترین (۵۲۷/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) و کمترین (۳۲۹/۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) میزان تجمع آهن در کاهو به ترتیب مربوط به محلول غذایی حاوی ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن و پتاسیم بود. در غلظت پایه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن با افزایش میزان پتاسیم تا ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، میزان آهن ۱۹/۷ درصد و در غلظت پایه ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن افزایش پتاسیم باعث کاهش میزان تجمع آهن تا ۰/۶ درصد شد (شکل ۵). نتایج مشابهی دال بر کاهش غلظت عناصر کم‌مصرف در مقادیر زیاد کودهای پرمصرف در سیستم هیدروپونیک NFT در کاهو نیز بدست آمده است (Vought *et al.*, 2024).

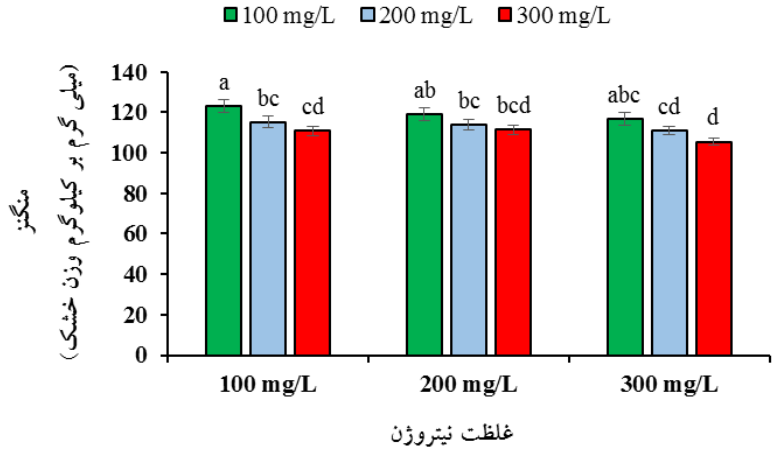
اندازه‌گیری محتوای کلسیم در کاهو نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها بود ($P\leq0.01$) بطوریکه با افزایش غلظت هر دو عنصر در محلول غذایی میزان تجمع کلسیم در کاهو افزایش یافت. کمترین (۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) مقدار کلسیم در کاهوهای تغذیه‌شده با ۳۰۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم و نیتروژن و بیشترین (۴/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) مقدار کلسیم در کاهوهای تغذیه‌شده با ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر میتروژن و پتاسیم مشاهده شد (شکل ۶).

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود محتوای منیزیم با افزایش غلظت هر دو عنصر نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی کاهش یافت. در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن، با افزایش میزان پتاسیم از ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر محتوای منیزیم ۱۷ درصد کاهش یافت که این میزان در غلظت پایه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن ۱۴ درصد کاهش نشان داد (شکل ۷). بیشترین مقدار منیزیم در کاهوهای تغذیه‌شده با

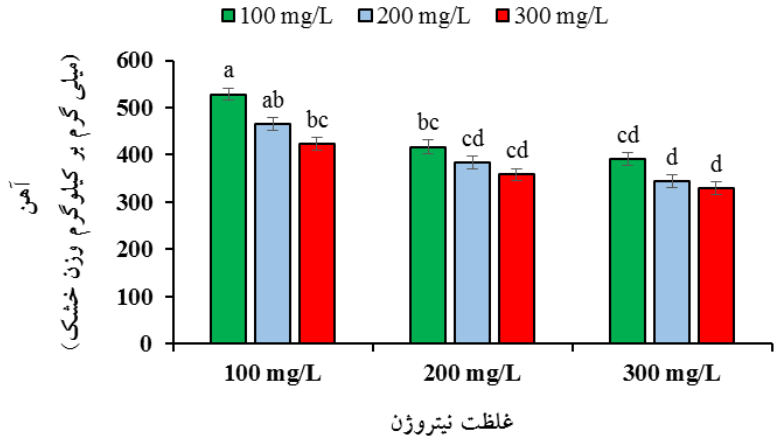
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]



شکل ۳- برهمکنش بین غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر محتوای روی کاهو رقم سیاهو (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است).



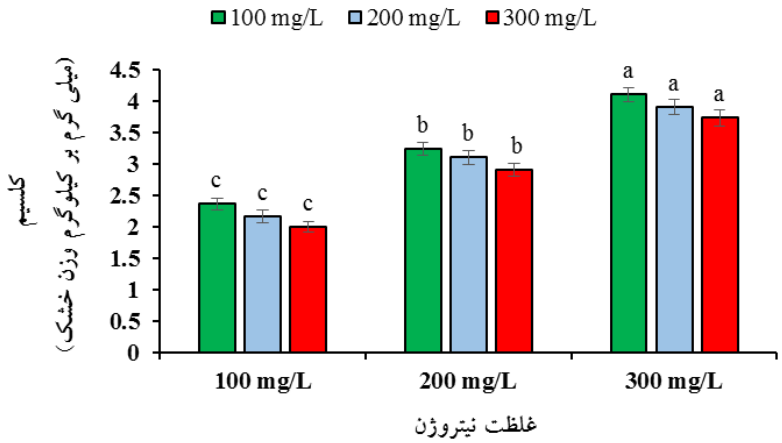
شکل ۴- برهمکنش بین غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر محتوای منگنز کاهو رقم سیاهو (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است).



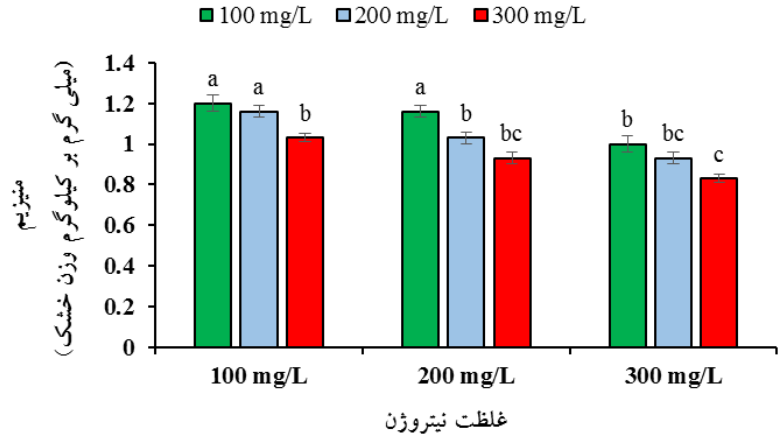
شکل ۵- برهمکنش بین غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر محتوای آهن کاهو رقم سیاهو (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]



شکل ۶- برهمکنش بین غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر محتوای کلسیم کاهو رقم سیاهو (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است).



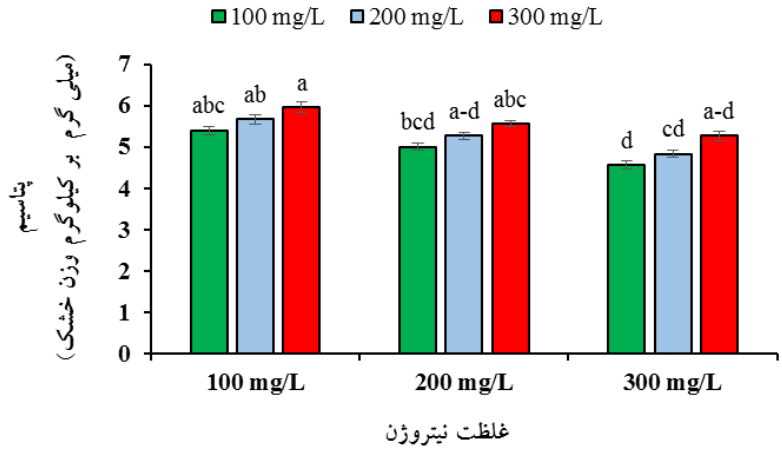
شکل ۷- برهمکنش بین غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر محتوای منیزیم کاهو رقم سیاهو (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است).

۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم همراه با ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن مشاهده شد در حالیکه گیاهان تغذیه‌شده با محلول حاوی ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر از هر دو عنصر نیتروژن و پتاسیم دارای حداقل (۰/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) محتوای منیزیم نسبت به شاهد و سایر تیمارها بودند (شکل ۷).

نتایج پتاسیم در برگ کاهو نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار غلظت‌های مختلف نیتروژن و پتاسیم بود ($P\leq0.01$) بطوریکه جذب و تجمع پتاسیم با افزایش نیتروژن روند نزولی داشت درحالیکه جذب و تجمع پتاسیم همراه با افزایش پتاسیم روند صعودی نشان داد (شکل ۸). کمترین (۴/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) میزان پتاسیم در گیاهان تیمارشده با محول حاوی ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم مشاهده شد ولی کاهوهای تغذیه‌شده با محلول حاوی ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم در هر سه غلظت نیتروژن (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) دارای حداکثر پتاسیم تجمع‌یافته در برگ کاهو بودند (شکل ۸).

افزایش غلظت پتاسیم در غلظت پایه نیتروژن سبب کاهش مقدار کلسیم تجمع‌یافته در کاهو شد (شکل ۸). روند افزایش غلظت کلسیم در هر دو تیمار نشان‌دهنده استفاده بیش از حد

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]



شکل ۸- برهمکنش بین غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر محتوای پتاسیم کاهو رقم سیاهو (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است).

یا استفاده کم از این عنصر است که با سایر کاتیون‌ها در ریشه گیاه رقابت می‌کند (Palani and Raju, 2019). در این آزمایش رابطه آنتاگونیستی بالقوه‌ای بین کلسیم، پتاسیم، منگنز و آهن مشاهده شد. تجمع مشابهی از کلسیم در محلول غذایی در حال گردش (NFT) در مطالعات قبلی گزارش شده بود که به اختلال رقابتی بین کلسیم، پتاسیم، منیزیم و ریزمغذی‌های فلزی اشاره داشت (Ropokis *et al.*, 2021). در آزمایش اخیر، نیز تأمین نیتروژن از منبع نیترات کلسیم، غلظت کلسیم را افزایش داد که با نتایج Kotsiras (۲۰۰۲) در مطالعه‌ای بر روی خیار مطابقت دارد. همچنین افزایش مداوم کلسیم به خاطر استفاده از منبع نیترات کلسیم برای تأمین نیتروژن در محلول غذایی نشان می‌دهد که کلسیم بیشتری نسبت به نیاز گیاهان اضافه شده است که منجر به تجمع می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که کلسیم، منیزیم و پتاسیم در محلول‌های غذایی در ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) رقابت می‌کنند. بنابراین، غلظت و نسبت یونی آنها بر جذب مواد مغذی و ترکیب شیمیایی کاهو تأثیر می‌گذارد (Asaduzzaman and Asao, 2019). لذا، تجمع کلسیم ممکن است در دسترس‌بودن سایر کاتیون‌های مغذی را کاهش دهد زیرا این یون‌ها برای مکان‌های فعال روی ریشه رقابت می‌کنند (Su *et al.*, 2015). افزایش کلسیم می‌تواند جذب منیزیم را کاهش دهد. بنابراین، نظارت بر نسبت‌های پتاسیم، کلسیم و منیزیم ضروری است (Al Meselmani, 2022). راندمان جذب مواد مغذی ممکن است تابعی خطی از غلظت در محلول غذایی نباشد و جذب منیزیم در مقایسه با نسبت کلسیم و پتاسیم بیشتر تحت تأثیر غلظت مواد مغذی است (Corrado *et al.*, 2021). در بین تمام عناصر کم‌مصرف، گیاهان بیشترین نیاز را به آهن دارند. در شرایط قلیایی Fe^{2+} به Fe^{3+} اکسیدشده که نسبتاً برای گیاه غیرقابل دسترس است. به ازای هر واحدی که به pH افزوده می‌شود قابلیت در دسترس‌بودن Fe^{2+} و F^{3+} به ترتیب ۱۰۰۰ و ۱۰۰ برابر کاهش پیدا می‌کند (Nikolic and Romheld, 2002). بنابراین قلیائیت خاک باعث کاهش جذب عناصری مانند آهن می‌شود. لذا استفاده از منابع کودی که باعث افزایش pH محلول شوند، افزایش pH قابلیت دسترسی به کلسیم، روی، منگنز و آهن را کاهش می‌دهند که به علت رسوب یا عدم جذب آنها است که پیشتر توسط Tyson و همکاران (۲۰۰۸) در خیار گزارش شده است. از طرفی، مصرف کود نیتروژن به شکل نیترات موجب تجمع آهن در ریشه می‌شود. این در حالی است که مصرف نیتروژن به شکل آمونیوم باعث افزایش میزان آهن در برگ‌های جوان و کاهش میزان آهن در ریشه‌ها می‌گردد (Saidi Goraghani *et al.*, 2014) که با نتایج بدست آمده از این پژوهش و استفاده از منبع نیترات کلسیم برای تأمین نیتروژن و در نهایت کاهش آهن در اندام‌های هوایی مطابقت دارد. افزایش جذب نیتروژن نیتراتی موجب عدم

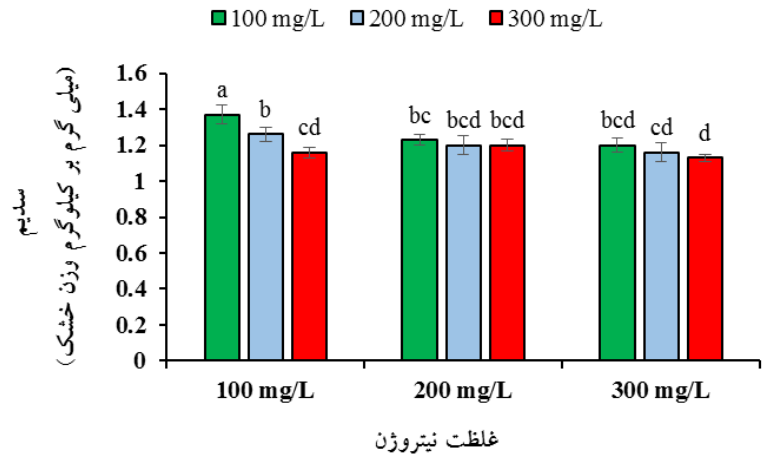
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]

تعادل نسبت کاتیون- آنیون می‌گردد که این امر باعث خروج بیکربنات از ریشه به ریزوسفر و در نتیجه کاهش جذب آهن می‌گردد. یون بیکربنات مانند یک بافر عمل کرده و با جلوگیری از کاهش pH در ریزوسفر ریشه از انحلال ترکیبات آهن‌دار کاسته و در نتیجه از فراهمی آهن می‌کاهد. به نظر می‌رسد به دلیل اینکه نیترات یک آنیون اسیدی قوی است و به هنگام جذب با یک آنیون اسیدی ضعیف مثل HCO_3^- جایگزین می‌شود، pH ناحیه ریشه افزایش می‌یابد در نتیجه قابلیت استفاده آهن به خصوص در سیستم‌هایی که خاصیت بافری ضعیف دارند، کاهش می‌یابد. در حالیکه مصرف آمونیوم قابلیت استفاده و جذب آهن را به خاطر کاهش pH افزایش می‌دهد (Malakoti and Tehrani, 1999). میزان پتاسیم گیاه همیشه متناسب با آنیون‌های متحرک مثل نیترات است. آنیون نیترات در حین حرکت خود از ریشه تا برگ‌ها، از پتاسیم به عنوان خنثی‌کننده بار منفی خود استفاده می‌کند. بنابراین رشد گیاه در حضور غلظت بالای آنیون نیترات ممکن است اثرات مثبتی روی جذب کاتیون‌ها مثل پتاسیم داشته باشد (Parra-Terraza, 2016). استفاده از ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر سولفات پتاسیم تأثیر مثبتی بر جذب عناصر پرمصرف و کم‌مصرف در شرایط تنش شوری در گندم داشت (Kausar and Gull, 2014) که احتمالاً چنین اثری در شرایط نرمال و بدون تنش نیز قابل انتظار است که با نتایج ما مطابقت داشت. کاربرد پتاسیم به صورت سولفات پتاسیم غلظت پتاسیم را افزایش داد. این امر نشان می‌دهد که آنیون سولفات نقش مهمی در تشکیل برخی پروتئین‌ها ایفا می‌کند که در نهایت تأثیر مثبتی بر رشد گیاه دارد. گوگرد موجود در آنیون سولفات یکی از اجزای ساختاری مهم برخی از اسیدهای آمینه مانند سیستئین (Lee *et al.*, 2009) است و غلظت زیاد پتاسیم در بافت‌های گیاهی، نشان‌دهنده وجود تنظیم اسمزی سلول‌ها و حفظ آماس سلولی است (Mengel, 2007). نتایج مشابهی توسط Rashid و همکاران (۲۰۰۱) و نیز Gupta و Haung (۲۰۱۴) بدست آمد.

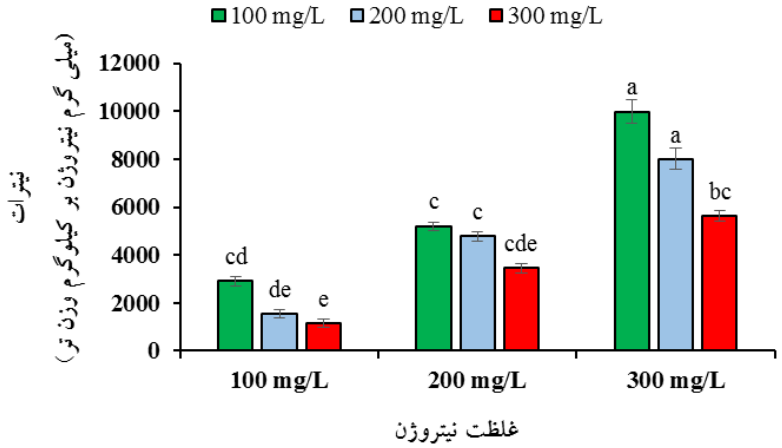
تأثیر غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر غلظت سدیم در برگ کاهو رقم سیاهو: تأثیر غلظت‌های مختلف نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی بر مقدار سدیم کاهو نیز در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود بطوریکه با افزایش غلظت هر دو عنصر نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی، مقدار سدیم در برگ کاهش (۱۷/۵ درصد) یافت. حداقل (۱/۱۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) و حداکثر (۱/۳۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) مقدار سدیم اندازه‌گیری‌شده در برگ کاهو به ترتیب متعلق به محلول غذایی حاوی ۳۰۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر هر دو عنصر نیتروژن و پتاسیم بود (شکل ۹). کمترین میزان سدیم تجمع‌یافته در برگ کاهو در بیشترین غلظت هر دو عنصر N و K مشاهده شد. اگر چه سدیم ممکن است تا حدودی میزان رطوبت سلولی را حفظ کند ولی قادر به انجام وظایف فیزیولوژیک مرتبط با پتاسیم مانند ساخت پروتئین‌ها و فعال‌کردن آنزیم‌ها نیست (Gupta and Huang, 2014). همچنین پتاسیم یکی از مهمترین عناصری است که در تعادل آنیون و کاتیون درون سلول نقش دارد. بطوریکه این عنصر اثر معنی‌داری در جذب سایر عناصر از ریشه دارد و در رفع آثار سوء از بین رفتن تعادل بعضی از عناصر غذایی در خاک کمک می‌کند (Karimi, 2017). لذا علت کاهش سدیم با افزایش غلظت عناصر به خصوص سولفات پتاسیم در محول غذایی، مربوط به افزایش میزان یون پتاسیم است که برای جذب از ریشه گیاه با یون سدیم رقابت می‌کند و تا حدودی از غلظت زیاد یون سدیم و سمیت آن در بافت‌های گیاهی می‌کاهد (Grattana and Grieve, 1999).

تأثیر غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر غلظت نیترات در برگ کاهو رقم سیاهو: محتوای نیترات تجمع‌یافته در کاهو تحت تأثیر غلظت‌های مختلف نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی قرار گرفت ولی تأثیر آنها همسو با یکدیگر نبود. کاهوهای تغذیه‌شده با ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم دارای بیشترین (۹۹۸۲ گرم نیتروژن در کیلوگرم وزن تر) میزان تجمع نیترات در برگ بودند درحالیکه گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی حاوی ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن و پتاسیم دارای کمترین (۱۱۴۵ گرم نیتروژن در کیلوگرم وزن تر) میزان تجمع نیترات

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]



شکل ۹- برهمکنش بین غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر محتوای سدیم کاهو رقم سیاهو (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است).



شکل ۱۰- برهمکنش بین غلظت‌های مختلف N و K در محلول غذایی بر محتوای نیترات کاهو رقم سیاهو (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است).

نسبت شاهد و سایر تیمارها بودند. افزایش مقدار نیتروژن از ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر منجر به افزایش تجمع نیترات تا ۳/۴ برابر شد ولی کاربرد پتاسیم در محلول غذایی، تجمع نیترات را کاهش داد (شکل ۶) بطوریکه در غلظت پایه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن، افزایش مقدار پتاسیم تا ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر باعث کاهش مقدار نیترات تا ۶۰ درصد شد (شکل ۱۰). از آنجایی‌که منگنز در فعالیت آنزیم احیاءکننده نیترات ایفای نقش می‌کند، در برگ‌های با کمبود منگنز تجمع نیترات افزایش می‌یابد (Rashed *et al.*, 2019) که در مطالعات ما کمبود منگنز در محلول‌های غذایی مشاهده نشد. در استاندارد ملی ایران و انستیتو تحقیقات تغذیه‌ای ایران (۱۳۹۲)، حد مجاز غلظت نیترات در انواع سبزیجات برگی، ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تر گیاه و در کشورهای چین و سنگاپور، حد مجاز نیترات در محصولات به ترتیب برابر با ۳۱۰۰ و ۴۵۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تر گزارش شده است. (Santamaria, 2006). از طرفی، بین غلظت نیترات در محیط و مقدار تجمع نیترات در گیاه رابطه مستقیمی وجود دارد و مهم‌ترین عامل محیطی مؤثر بر تجمع نیترات مقدار یون نیترات قابل دسترس گیاهی است (Darnell and Stutte, 2001). با در نظر گرفتن تمام جوانب و نیز با توجه به اینکه منبع نیتروژن

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]

مورد استفاده در این محلول غذایی از منبع نیترات کلسیم تأمین شده، می‌توان ادعا داشت که تنها گیاهان تغذیه‌شده با ۲۰۰ میلی‌گرم نیتروژن و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم با دارابودن ۳۴۴۴ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تر نیترات (شکل ۱۰)، در رنج عدم آلودگی به نیترات قرار داشته و مصرف آنها دور از خطر است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه اطلاعات مناسبی در مورد عملکرد و کیفیت گیاه از نظر بازده جذب مواد مغذی نظیر K، Ca، Mg، Mn، Fe، و Zn در صورت تغذیه کاهو رقم سیاهو تحت شرایط هیدروپونیک و نیز تغذیه با غلظت‌های متفاوت نیتروژن و پتاسیم از منبع نیترات کلسیم و سولفات پتاسیم ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج این تحقیق براساس میزان عملکرد، مقدار کلروفیل و میزان ارزش غذایی کاهو از نظر عناصر Mn، Zn، Fe، Ca، K، Mg، Na و به خصوص میزان نیترات تجمع‌یافته در برگ، بهترین تیمار شامل محلول غذایی غنی‌شده با ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم، به ترتیب از منبع نیترات کلسیم و سولفات پتاسیم است. اگر چه با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر از هر دو عنصر نیتروژن و پتاسیم در محلول غذایی میزان عملکرد درصد بیشتر از تیمار ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم بود ولی از نظر آماری بین این دو محلول غذایی تفاوت معنی‌دار نبود. لذا بهترین محلول غذایی بسته به میزان نیترات تجمع‌یافته که تنها عامل مهم محدودکننده در تغذیه نیتراته سبزیجات می‌باشد، محلول غذایی ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم است.

منابع

امامی، عاکفه (۱۳۷۵). روش‌های تجزیه شیمیایی گیاه. جلد اول. وزارت جهاد کشاورزی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.

خلدبرین، بهمن، و اسلامزاده، طاهره (۱۳۸۴). تغذیه معدنی گیاهان عالی. جلد اول. انتشارات دانشگاه شیراز. ایران.

فرزانه، نسرین، گلچین، احمد، و هاشمی مجد، کاظم (۱۳۸۹). تأثیر سطوح مختلف نیتروژن و پتاسیم مکمل محلول غذایی بر عملکرد و غلظت نیتروژن و پتاسیم برگ گوجه‌فرنگی. *مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای*، *۱*(۱)، ۳۴-۲۷. https://civilica.com/doc/1446478

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، استاندارد ملی ایران. (۱۳۹۲). مرز بیشینه مانده نیترات در محصولات کشاورزی. چاپ اول.

Adamczyk-Szabela, D., Markiewicz, J., & Wolf, W. M. (2015). Heavy metal uptake by herbs. IV. Influence of soil pH on the content of heavy metals in *Valeriana officinalis* L. *Water, Air, and Soil Pollution*, *226*, 1-8.

Al Meselmani, M. A. (2022). Nutrient Solution for Hydroponics. In Recent Research and Advances in Soilless Culture. Intech Open. 10.5772/intechopen.101604

Albornoz, F. (2016). Crop responses to nitrogen overfertilization: A review. *Scientia Horticulturae*, *205*, 79-83.

Asaduzzaman, M, & Asao, T. (2019). Improvement of Quality in Fruits and Vegetables through Hydroponic Nutrient Management. BoD–Books on Demand.

Barker, A. V, & Pilbeam, D. J. (2015). Handbook of Plant Nutrition. CRC Press.

Britzke, D., Da Silva, L. S., Moterle, D. F., dos Santos Rheinheimer, D., & Bortoluzzi, E. C. (2012). A study of potassium dynamics and mineralogy in soils from subtropical Brazilian lowlands. *Journal of Soils and Sediments*, *12*, 185-197.

Chapman, H. D, & Pratt, P. F. (1962). Methods of analysis for soils, plants and waters. *Soil Science*, *93*(1), 68.

Cheema, M. A., Wahid, M. A., Sattar, A., Rasul, F., & Saleem, M. F. (2012). Influence of different levels of potassium on growth, yield and quality of canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences 49*(2), 163-168.

Coolong, T. W., Randle, W. M., Toler, H. D., & Sams, C. E. (2004). Zinc availability in hydroponic culture influences glucosinolate concentrations in *Brassica rapa*. *Hortscience*, *39*(1), 84-86.

Corrado, G., De Micco, V., Lucini, L., Miras-Moreno, B., Senizza, B., Zengin, G., ... & Rouphael, Y. (2021). Isosmotic macrocation variation modulates mineral efficiency, morpho-physiological traits, and functional properties in

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]

hydroponically grown lettuce varieties (*Lactuca sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, *12*, 678799. 10.3389/fpls.2021.678799

Coskun, D., Britto, D. T., & Kronzucker, H. J. (2014). The physiology of channel-mediated K^+ acquisition in roots of higher plants. *Physiologia Plantarum*, *151*(3), 305-312.

Darnell, R. L, & Stutte, G. W. (2001). Nitrite concentration effects on NO_3-N uptake and reduction, growth, and fruit yield in strawberry. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *126*(5), 560-563.

Davis, D. R. (2009). Declining fruit and vegetable nutrient composition: What is the evidence?. *HortScience*, *44*(1), 15-19.

Feller, U., Anders, I., & Demirevska, K. (2008). Degradation of rubisco and other chloroplast proteins under abiotic stress. *General and Applied Plant Physiology*, *34*(1-2), 5-18.

Ghazan Shahi, J. (2005). Soil and Plant Analysis. Motarjem Publications.

Gomes, M. A. D. C., Suzuki, M. S., Cunha, M. D., & Tullii, C. F. (2011). Effect of salt stress on nutrient concentration, photosynthetic pigments, proline and foliar morphology of *Salvinia auriculata* Aubl. *Acta Limnologica Brasiliensia*, *23*, 164-176.

Grattana, S. R, & Grieve, C. M. (1999). Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crop. *Scientia Horticulturae 78*, 127-157.

Guo, S., Shen, Q., & Brueck, H. (2007). Effects of local nitrogen supply on water uptake of bean plants in a split root system. *Journal of Integrative Plant Biology*, *49*(4), 472-480.

Gupta, B, & Haung, B. (2014). Mechanisim of salinity tolerance in plants: Physiollogical, biochemical, and molecular characterization. *International Journal of Genomics*, 701596. http://dx.doi.org/10.1155/2014/701596

Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Nahar, K., Hossain, M. S., Mahmud, J. A., Hossen, M. S., ... & Fujita, M. (2018). Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy*, *8*(3), 31.

Jakli, B., Tavakol, E., Trankner, M., Senbayram, M., & Dittert, K. (2017). Quantitative limitations to photosynthesis in K deficient sunflower and their implications on water-use efficiency. *Journal of Plant Physiology*, *209*, 20-30.

Karimi, R. (2017). Potassium-induced freezing tolerance is associated with endogenous abscisic acid, polyamines and soluble sugars changes in grapevine. *Scientia Horticultura*, *215*, 184-194.

Kausar, A, & Gull, M. (2014). Effect of potassium sulphate on the growth and uptake of nutrients in wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stressed conditions. *Journal of Agricultural Science*, *6*(8), 101-112.

Kotsiras, A., Olympios, C. M., Drosopoulos, J., & Passam, H. C. (2002). Effects of nitrogen form and concentration on the distribution of ions within cucumber fruits. *Scientia Horticulturae*, *95*(3), 175-183. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00042-0

Lee, B. V., Dikiy, A., Kim, H. Y., & Gladyshev, V. N. (2009). Functions and evolution of selenoprotein methionine sulfoxide reductases. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)*, *1790*(11), 1471-1477. http://dx.doi.org/10.1016/j.bbagen.2009.04.014

Legendre, R, & van Iersel, M. W. (2021). Supplemental far-red light stimulates lettuce growth: Disentangling morphological and physiological effects. *Plants*, *10*(1), 166.

Liao, Z., Zeng, H., Fan, J., Lai, Z., Zhang, C., Zhang, F., ... & Wu, P. (2022). Effects of plant density, nitrogen rate and supplemental irrigation on photosynthesis, root growth, seed yield and water-nitrogen use efficiency of soybean under ridge-furrow plastic mulching. *Agricultural Water Management*, *268*, 107688. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107688

Laing, F, & Silberbush, M. (2002). Response of maize to foliar vs. soil application of nitrogen–phosphorus–potassium fertilizers. *Journal of Plant Nutrition*, *25*(11), 2333-2342.

Liu, C. W., Sung, Y., Chen, B. C., & Lai, H. Y. (2014). Effects of nitrogen fertilizers on the growth and nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *11*(4), 4427-4440.

Malakoti, M. J, & Tehrani, M. M. (1999). Effects of micronutrients on the yield and quality of agricultural products. *Tarbiat Modarres University Publications*, *22*, 292-294.

Mao, Q., Lu, X., Mo, H., Gundersen, P., & Mo, J. (2018). Effects of simulated N deposition on foliar nutrient status, N metabolism and photosynthetic capacity of three dominant understory plant species in a mature tropical forest. *Science of the Total Environment*, *610*, 555-562.

Mengel, K. (2007). Potassium. In: Handbook of Plant Nutrition (eds. Barker, A. V. and Pilbeam, D. J.) Pp. 91-120. CRC Press, New York.

Nikolic, M, & Romheld, V. (2002). Does high bicarbonate supply to roots change availability of iron in the leaf apoplast?. *Plant and Soil*, *241*, 67-74. https://doi.org/10.1023/A:1016029024374

Palani, V, & Raju, I. (2019). Synergistic and antagonistic interactions of calcium with other nutrients in soil and plants. *Available at SSRN, 3503225*. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3503225

Parra-Terraza, S. (2016). Relations NO^{3-}/anions and K^+/cations in the nutrient solution for the growth of tomato seedlings. *Revista Mexicana de Ciencias Agricolas*, *7*(7), 1527-1538.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]

Pavlou, G. C., Ehaliotis, C. D., & Kavvadias, V. A. (2007). Effect of organic and inorganic fertilizers applied during successive crop seasons on growth and nitrate accumulation in lettuce. *Scientia Horticulturae*, *111*(4), 319-325.

Prado, R. D. M. (2008). Manual de nutrição de plantas forrageiras. *Jaboticabal: Funep*, *1*, 261-280.

Prado, R. M., Hojo, R. H., Avalhaes, C. C., Vale, D. W., & Pimentel, U. V. (2011). Desempenho do capim-tanzania cultivado em solucao nutritiva com a omissao de macronutrientes. *Scientia Agraria Paranaensis*, *10*(1), 58-58.

Rashed, M. H., Hoque, T. S., Jahangir, M. M. R., & Hashem, M. A. (2019). Manganese as a micronutrient in agriculture: Crop requirement and management. *Journal of Environmental Science and Natural Resources*, *12*(1-2), 225-242.

Rashid, H. H., Ranjha, A. M., Mehdi, S. M., & Saifullah, (2001). Relative efficiency of muriate and sulphate of potash for wheat. *International Journal of Agricultural Biology*, 3, 403-405.

Renna, M., Castellino, M., Leoni, B., Paradiso, V. M., & Santamaria, P. (2018). Microgreens production with low potassium content for patients with impaired kidney function. *Nutrients*, *10*(6), 675.

Ropokis, A., Ntatsi, G., Rouphael, Y., Kotsiras, A., Kittas, C., Katsoulas, N., & Savvas, D. (2021). Responses of sweet pepper (*Capsicum annum* L.) cultivated in a closed hydroponic system to variable calcium concentrations in the nutrient solution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *101*(10), 4342-4349. https://doi.org/10.1002/jsfa.11074

Ryan, J., Estefan, G., & Rashid, A. (2001). Soil and Plant Analysis: Laboratory Manual. Icarda, Aleppo.

Saidi Goraghani, H., Yazdani Biouki, R., Saidi Goraghani, N., & Sodaeezadeh, H. (2014). Effect of different nitrogen sources and levels on quantitative and qualitative characteristics of parsley (*Petroselinum crispum* Mill.) in Jiroft Region. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *12*(2), 316-327.

Santamaria, P. (2006). Nitrate in vegetables: Toxicity, content, intake and EC regulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *86*(1), 10-17.

Su, Y., Hu, X., Wang, W. E., Wang, R., Zhang, D., & Qiao, Y. (2015). Effect of phosphorus on dynamic growth and nutrient absorption of hydroponic lettuce. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, *23*(10), 1244-1252.

Trankner, M., Tavakol, E., & Jakli, B. (2018). Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. *Physiologia Plantarum*, *163*(3), 414-431.

Tyson, R. V., Simonne, E. H., Treadwell, D. D., Davis, M., & White, J. M. (2008). Effect of water pH on yield and nutritional status of greenhouse cucumber grown in recirculating hydroponics. *Journal of Plant Nutrition*, *31*(11), 2018-2030. https://doi.org/10.1080/01904160802405412

Vought, K., Bayabil, H. K., Pompeo, J., Crawford, D., Zhang, Y., Correll, M., & Martin-Ryals, A. (2024). Dynamics of micro and macronutrients in a hydroponic nutrient film technique system under lettuce cultivation. *Heliyon*, *10*(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32316

Wiedenfeld, B., Wallace, B. W., & Hons, F. (2009). Indicators of cotton nitrogen status. *Journal of Plant Nutrition*, *32*(8), 1353-1370.

Zhang, G., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., & Maruo, T. (2017). Plant growth and photosynthesis response to low potassium conditions in three lettuce (*Lactuca sativa*) types. *The Horticulture Journal*, *86*(2), 229-237.

Zhang, X. C., Yu, X. F., & Ma, Y. F. (2013). Effect of nitrogen application and elevated CO_2 on photosynthetic gas exchange and electron transport in wheat leaves. *Photosynthetica*, *51*, 593-602.

Zou, J., Fanourakis, D., Tsaniklidis, G., Cheng, R., Yang, Q., & Li, T. (2021). Lettuce growth, morphology and critical leaf trait responses to far-red light during cultivation are low fluence and obey the reciprocity law. *Scientia Horticulturae, 289*, 110455.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]

Optimization of nitrogen and potassium levels in nutrient solution to improve yield, chlorophyll index, and chemical composition of lettuce (*Lactuca sativa* L.)

Shahin Mohammadpour[1], Farhad Behtash[1], Seyed Bahman Mousavi[2], Hanifeh Seyed Hajizadeh[*1] and Ghasem Eghlima[3]

[1] Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh P. B. 55136-553, Iran
[2] Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran
[3] Department of Agriculture, Medicinal Plants and Drugs Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
(Received: 2025/05/24, Accepted: 2025/08/26)

Abstract

Nitrogen (N) is a key element for plants, and its availability is the main determinant of plant growth and crop production. Potassium (K) also affects crop growth, yield, and quality, as it plays a role in numerous physiological and metabolic processes, including photosynthesis, respiration, signal transduction, osmotic regulation, and growth and development. In order to investigate the effects of N and K in nutrient solution on plant yield, chlorophyll index, and chemical compositions of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Siahoo), a factorial experiment was conducted with three levels of nitrogen (100, 200, and 300 mg L^{-1}) from calcium nitrate source and three levels of potassium (100, 200, and 300 mg L^{-1}) from potassium sulfate source based on a completely randomized design with three replications. The results showed that the effect of different concentrations of N and K in the nutrient solution on plant yield traits, chlorophyll index, nitrate content, sodium, and macro- and microelements except copper was significant. The highest yield and chlorophyll index were observed at a concentration of 300 mg L^{-1} N and K, while this treatment contained the lowest (13.1 mg kg^{-1}DW) sodium accumulation in the leaves. Plants fed with solutions containing 100 and 300 mg L^{-1} of N and K had the lowest nitrate content (1145 mg N kg^{-1}DW). The content of zinc, manganese, iron, and magnesium elements in lettuce leaves decreased in parallel with the increase in N and K, while the content of calcium increased. Also, potassium content decreased by 15.5% along with the increase of N concentration in the nutrient solution. In general, the findings of this study provide basic information regarding N and K values for improving hydroponic nutrient management, which determines the correct amount of N and K required by plants, taking into account their impact on the accumulation rate of other elements as well as plant performance.

Keywords: Antagonistic effects, Nutritional value, Leafy greens, Nitrate accumulation

Corresponding author, Email: hajizade@maragheh.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.245]