

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی اثر مدت زمان و فواصل آبیاری بر صفات مورفولوژیک و توزیع عناصر غذایی کاهو (*Lactuca sativa*) در سامانه کشت عمودی تحت تیمارهای تغذیه‌ای متنوع

مهدی حسین زاده^{۱*}، سیده الناز علویه ثانی^۲ و جواد شباهنگ^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۷

چکیده

کشت عمودی به عنوان روشی نوین کشاورزی، امکان تولید محصولات با کیفیت در فضاهای محدود و با مصرف کمتر منابع را فراهم می‌کند. هدف این تحقیق بررسی تأثیر مدت زمان و فواصل آبیاری همراه با تیمارهای تغذیه‌ای مختلف بر صفات مورفولوژیکی و توزیع عناصر غذایی کاهو در سامانه کشت عمودی بود. آزمایش به صورت فاکتوریل با سه تکرار و سه سطح برای هر عامل (آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار، آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار و ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار؛ همچنین تیمارهای کودی نیز شامل محلول نیتروژن بالا (۱۰-۱۰-۳۰ NPK)، محلول پتاس بالا (۱۵-۱۵-۳۰ NPK) و محلول تعادل کامل (۲۰-۲۰-۲۰ NPK) در لوله‌های PVC به عنوان ظروف کشت ستونی در سیستم کشت عمودی در سال ۱۴۰۲ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. نتایج نشان داد که تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار همراه با محلول غذایی ۲۰-۲۰-۲۰ NPK بهترین عملکرد را در کشت عمودی کاهو داشت. در این تیمار، بیشترین ارتفاع بوته (۲۰/۲ سانتی‌متر) ثبت شد که نسبت به تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار، + محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK (۱۴/۲ سانتی‌متر) ۴۳/۲ درصد افزایش نشان داد. همچنین بیشترین تعداد برگ (۱۵ برگ)، طول برگ (۱۵/۴ سانتی‌متر) و عرض برگ (۶/۹۹ سانتی‌متر) مشاهده شد که به ترتیب ۳۴/۷ درصد، ۲۵/۲ درصد و ۱۸ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار بود. بیشترین وزن تر و وزن خشک بوته به ترتیب ۵۰/۳ و ۵۰/۸ گرم به دست آمد که نسبت به تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار (۳۷/۹ و ۴۲/۱ گرم) به ترتیب ۶ درصد و ۳۳ درصد افزایش داشت. طول ریشه نیز در این تیمار به ۱۸/۱ سانتی‌متر رسید که نسبت به کمترین مقدار (۱۲/۱ سانتی‌متر) افزایش قابل توجهی نشان داد. از نظر عناصر غذایی، بیشترین مقادیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم در تیمارهای آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار مشاهده شد. در مجموع، ترکیب آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار و محلول غذایی ۲۰-۲۰-۲۰ NPK به عنوان تیمار بهینه برای افزایش رشد، عملکرد و جذب عناصر غذایی کاهو در سیستم کشت عمودی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: توزیع عناصر، عرض برگ، کلسیم طول ریشه، محلول تعادل کامل

مقدمه

فضا، کاهش مصرف آب و امکان کنترل دقیق شرایط محیطی، به عنوان یکی از راه‌حل‌های مؤثر در تولید محصولات کشاورزی معرفی شده است (Oh and Lu, 2022). در این سامانه، استفاده از برنامه‌های آبیاری بهینه و مدیریت تغذیه‌ای نقش بسزایی در افزایش بهره‌وری و کیفیت محصولات ایفا می‌کند (Akbari et al., 2024). کاهو (*Lactuca sativa*) یکی از سبزیجات برگ‌دار پر مصرف در سراسر جهان است که به دلیل ارزش غذایی بالا و رشد سریع، به عنوان مدل مناسبی برای پژوهش‌های مرتبط با سامانه‌های کشت مدرن انتخاب می‌شود (Kim et al., 2016). این ویژگی‌ها، همراه با امکان مطالعه دقیق اثرات شرایط محیطی و تغذیه‌ای، کاهو را به گزینه‌ای ایده‌آل برای بررسی عملکرد گیاه در سامانه‌های نوین کشت تبدیل کرده است.

با توجه به رشد جمعیت جهانی و افزایش نیاز به تولید غذا، توسعه روش‌های کشاورزی پایدار و بهره‌ور ضروری به نظر می‌رسد. یکی از این روش‌ها، کشت عمودی است که به دلیل بهره‌برداری بهینه از

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، شهرمشهد، ایران

۲- دانش آموخته کارشناسی، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، شهرمشهد، ایران

۳- استاد بازنشسته گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، شهرمشهد، ایران

*-نویسنده مسئول: mhosseinzadh@yahoo.com

DOI: [10.22034/ijdi.2026.553397.2634](https://doi.org/10.22034/ijdi.2026.553397.2634)

مواد و روش

زمان و مکان اجرای آزمایش

به منظور بررسی تأثیر مدت زمان و فواصل آبیاری و اثرات تغذیه‌ای بر خصوصیات رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی کاهو در سامانه‌های کشت عمودی، آزمایشی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۴۰۲ اجرا شد.

طرح آزمایشی و تیمارهای آزمایش

در این تحقیق، آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل مدت زمان و فواصل آبیاری در سه سطح (آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار، آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار و آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار) به‌عنوان عامل اول و تیمار تغذیه‌ای در سه سطح (تیمارهای کودی نیز شامل محلول نیتروژن بالا (۱۰-۱۰-۳۰ NPK)، محلول پتاس بالا (۱۵-۱۵-۳۰ NPK) و محلول تعادل کامل (۲۰-۲۰-۲۰ NPK) بود.

شرایط مکان آزمایشی

در تمام تیمارها، شرایط محیطی شامل دما (25 ± 2 درجه سانتی‌گراد)، رطوبت نسبی (۶۰-۷۰ درصد) و مدت زمان روشنایی روزانه (۱۶ ساعت نور + ۸ ساعت تاریکی) یکسان بود. برای انجام آزمایش کشت عمودی کاهو در سامانه هیدروپونیک، از ترکیب کوکوپیت و پرلیت (نسبت ۷۰ به ۳۰) به‌عنوان بستر کشت استفاده شد. این روش به دلیل خصوصیات آبیاری خودکار و تهویه مناسب برای ریشه‌ها، انتخابی مناسب برای کشت عمودی بود.

تولید نشاء کاهو

بذرهای کاهو در سینی‌های کاشت قرار داده شدند. برای هر سینی، ترکیب کوکوپیت و پرلیت به طور یکنواخت پخش شد. بذرها به عمق ۰/۵ تا ۱ سانتی‌متر در بستر کاشت قرار گرفتند و سپس با اسپری آب نرم مرطوب شدند. بذرها در محیطی با دمای ۲۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۷۰-۸۰ درصد قرار گرفتند تا جوانه‌زنی به خوبی انجام شود. پس از ۱۴ روز، زمانی که نشاهای کاهو به اندازه کافی رشد کردند و به ارتفاع ۵-۷ سانتی‌متر رسیدند، به سامانه کشت عمودی منتقل شدند.

عملیات کاشت

پس از جوانه‌زنی و رسیدن نشاء به اندازه کافی برای انتقال، گیاهان به سامانه کشت عمودی منتقل شدند. سامانه کشت عمودی از ساختارهای لوله‌ای (قطر ۱۵ سانتی‌متر و طول ۲ متر) ساخته شده

آبیاری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر رشد و توسعه گیاهان، نه تنها بر تأمین آب مورد نیاز برای فرآیندهای متابولیکی تأثیر می‌گذارد، بلکه بر جذب عناصر غذایی و تخصیص آنها به اندام‌های مختلف گیاه نیز اثرگذار است (Li et al., 2009). به‌عنوان مثال، برنامه‌های آبیاری منظم و با فواصل مناسب می‌توانند تعادل مطلوبی بین تأمین آب و تهویه ریشه ایجاد کرده و شرایط را برای جذب بهتر مواد مغذی فراهم کنند. علاوه بر این، ترکیب محلول‌های تغذیه‌ای با مقادیر مختلف عناصر اصلی مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم در کنار روش‌های آبیاری متنوع، تأثیر قابل‌توجهی بر رشد و کیفیت گیاه دارند (Chrysargyris and Tzortzakis, 2025).

تغذیه گیاهی نیز به‌عنوان یکی از ارکان اصلی تولید پایدار، نقش کلیدی در بهبود کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی ایفا می‌کند (Sharma et al., 2024). عناصر غذایی ماکرو مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم از مهم‌ترین اجزای مورد نیاز برای رشد گیاهان هستند. نیتروژن به‌عنوان یک عنصر حیاتی در ساختار پروتئین‌ها و کلروفیل، نقش اصلی در فتوسنتز و رشد رویشی دارد (Noor et al., 2023). در حالی که فسفر در انتقال انرژی و توسعه ریشه مؤثر است (Malhotra et al., 2018) و پتاسیم باعث بهبود کارایی مصرف آب، افزایش مقاومت گیاه به تنش‌ها و تنظیم فرآیندهای متابولیکی می‌شود (Wang et al., 2013). تعامل متوازن این عناصر با الگوهای آبیاری بهینه، از جمله عواملی است که به افزایش بهره‌وری گیاه کمک می‌کند.

با وجود تحقیقات گسترده در زمینه مدیریت آبیاری و تغذیه، هنوز نیاز به بررسی جامع اثرات ترکیبی این عوامل در سامانه‌های کشت عمودی وجود دارد. این نوع کشت به دلیل توزیع متفاوت منابع (آب و مواد غذایی) و شرایط خاص محیطی، پاسخ‌های منحصر به فردی در گیاهان ایجاد می‌کند که به مطالعات دقیق و سیستماتیک نیازمند است. از این رو، بررسی ارتباط بین برنامه‌های آبیاری و مدیریت تغذیه‌ای، می‌تواند به درک عمیق‌تری از تعامل این عوامل در سامانه‌های نوین کشت منجر شود. این پژوهش با هدف بررسی اثر مدت زمان و فواصل آبیاری بر صفات مورفولوژیک و تغذیه‌ای کاهو در سامانه کشت عمودی طراحی شده است. در این مطالعه، تیمارهای مختلف تغذیه‌ای با مقادیر متنوع عناصر غذایی و برنامه‌های آبیاری متغیر اعمال شده‌اند تا تأثیر این عوامل بر رشد، توزیع عناصر غذایی و بهره‌وری کلی گیاه ارزیابی شود. نتایج این تحقیق می‌تواند به بهبود مدیریت منابع در سامانه‌های کشت عمودی و ارتقاء بهره‌وری تولید سبزیجات کمک کند.

از PVC تشکیل شد که به‌طور ویژه برای کشت گیاهان در فضاهای محدود طراحی شده بودند. این لوله‌ها در سامانه به‌صورت عمودی قرار می‌گرفتند و نشاها به‌طور منظم و در فاصله‌های مشخص در داخل سوراخ‌هایی که بر روی لوله‌ها تعبیه شده بود، قرار گرفتند. این سوراخ‌ها به گونه‌ای طراحی شده بودند که اندازه آن‌ها با توجه به نوع گیاه و نیاز ریشه‌ها تنظیم شده بود تا نشاها به راحتی در آن‌ها قرار بگیرند و در طول زمان ثابت بمانند.

روش آبیاری

برای کشت کاهو در سامانه عمودی از روش آبیاری قطره‌ای استفاده شد که قطره‌چکان‌هایی در فواصل مشخص درون لوله‌ها نصب گردید. در این سامانه، قطره‌چکان‌های فشار جبران‌شده (Pressure-compensating) از نوع Online با دبی دو لیتر بر ساعت در فواصل مشخص در داخل لوله‌های PVC نصب شدند تا توزیع یکنواخت آب و محلول غذایی در طول ستون‌های کشت تأمین شود. برنامه آبیاری و نیاز آبی تیمارها در جدول ۱ ارائه شده است. در این سامانه، محلول غذایی به‌طور یکنواخت از طریق پمپ‌ها به هر

طبقه از گیاهان منتقل گردید. برای تیمارهای مختلف، زمان و فواصل آبیاری به‌طور دقیق تنظیم شد. ابزارهایی مانند پمپ‌های هیدروپونیک برای پمپاژ محلول غذایی، قطره‌چکان‌ها برای توزیع یکنواخت آب و مواد مغذی، و تایمرهای دیجیتال برای تنظیم دقیق زمان آبیاری و فواصل آن استفاده شد. این سامانه به کاهو اجازه داد تا رطوبت و مواد مغذی به‌طور مداوم و بهینه در اختیار ریشه‌ها قرار گیرد، بدون اینکه رطوبت زیاد یا کم برای گیاه ایجاد مشکل کند. محلول‌های غذایی بر اساس تیمارهای کودی تهیه شدند و هدایت الکتریکی (EC) و pH آن‌ها پیش از اعمال در سامانه به‌طور منظم پایش و تنظیم گردید. هدایت الکتریکی محلول غذایی در محدوده ۱/۸ تا ۲/۲ دسی‌زیمنس بر متر نگه داشته شد. همچنین pH محلول در محدوده ۵/۸ تا ۶/۲ تنظیم گردید تا شرایط مناسب برای جذب عناصر غذایی فراهم شود. برای کاهش pH از اسید فسفریک و در صورت نیاز برای افزایش pH از هیدروکسید پتاسیم استفاده شد. مقادیر EC و pH محلول زهکش نیز به‌طور دوره‌ای اندازه‌گیری شد تا از پایداری شرایط تغذیه‌ای در طول دوره رشد اطمینان حاصل شود.

جدول ۱- جدول برنامه آبیاری و نیاز آبی تیمارها

نیاز آبی کل (میلی‌متر)	مصرف کل دوره (لیتر/گیاه)	مصرف روزانه (لیتر/گیاه)	حجم هر نوبت برای ستون (لیتر/گیاه)	فاصله آبیاری	مدت آبیاری (دقیقه)	تیمار آبیاری
۴۲۰	۱۶/۸	۱۶۸	۴	هر یک ساعت	۵	کوتاه با فواصل کم
۴۲۰	۱۶/۸	۱۶۸	۴	هر دو ساعت	۱۰	متوسط با فواصل منظم
۴۲۰	۱۶/۸	۱۶۸	۴	هر چهار ساعت	۲۰	طولانی با فواصل زیاد

اندازه‌گیری صفات

برای اندازه‌گیری ارتفاع گیاه از پایه تا بالاترین نقطه با استفاده از خط کش اندازه‌گیری شد. سپس تعداد برگ‌ها با شمارش فیزیکی برگ‌های سالم تعیین شد و برگ‌های زرد و پژمرده از شمارش حذف گردید. طول و عرض برگ‌ها با خط کش اندازه‌گیری شد، به‌طوری‌که طول برگ از پایین‌ترین نقطه تا بالاترین نوک آن و عرض برگ در میانه طول برگ اندازه‌گیری شد. برای وزن تازه گیاه، گیاه به‌طور کامل از محیط کشت برداشت شده و وزن آن به‌وسیله ترازوی دیجیتال دقیق اندازه‌گیری شد. در نهایت، برای اندازه‌گیری وزن خشک، گیاه پس از برداشت و شست‌وشو در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفت تا تمام رطوبت آن تبخیر شود و سپس وزن خشک آن اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری حجم گیاه کاهو، از روش آب‌جابه‌جایی استفاده شد. در این روش، گیاه پس از خارج شدن از محیط کشت، به‌طور کامل در یک ظرف حاوی آب غوطه‌ور شد و حجم آب جابه‌جاشده به‌عنوان حجم گیاه محاسبه گردید.

برداشت کاهو ۶ هفته (سایز برگ بین ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر) پس از انتقال نشاء به سامانه کشت عمودی انجام گرفت. در انتهای دوره رشد صفات مختلف اندازه‌گیری شد.

محاسبه نیاز آبی گیاه (ETc)

نیاز آبی کاهو (ETc) بر اساس رابطه FAO محاسبه شد:

$$ETc = ET0 \times Kc \quad (1)$$

که در آن ET0 تبخیر تعرق مرجع و Kc ضریب گیاهی کاهو بود. تبخیر تعرق مرجع (ETc) با استفاده از روش اندازه‌گیری مصرف آب واقعی و ثبت زهکش در طول دوره رشد گیاه تعیین شد. ضریب گیاهی (Kc) کاهو برای هر مرحله رشد بر اساس مقادیر استاندارد FAO (شروع رشد: ۰/۸، رشد رویشی: ۱/۰، بلوغ: ۰/۹) و مقایسه با مصرف واقعی آب گیاه تنظیم گردید تا ETc واقعی در گلخانه به‌دست آید.

کلسیم اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل صفات

برای محاسبات آماری در این مطالعه از نرم‌افزار SAS 9.4 و برای ترسیم از Excel (Ver. 2017) استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون دانکن انجام شد و سطح احتمال به کار رفته در کلیه تجزیه و تحلیل‌ها ۹۵ درصد در نظر گرفته شد. قبل از انجام تجزیه واریانس، فروض آماری مورد نیاز شامل نرمال بودن داده‌ها و یکنواختی واریانس‌ها بررسی شد. نرمال بودن باقیمانده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro-Wilk) و یکنواختی واریانس‌ها با آزمون لون (Levene) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که داده‌ها از فروض لازم برای انجام تجزیه واریانس برخوردار بوده و نیازی به تبدیل داده‌ها وجود نداشت.

نتایج و بحث

خصوصیات رشدی

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات اصلی آبیاری و تغذیه بر ارتفاع بوته، تعداد برگ، طول و عرض برگ، وزن تر و خشک بوته و حجم گیاه در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). اثر آبیاری بر طول برگ در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۰۰۱ و اثر تغذیه بر این صفت در سطح احتمال ۰/۰۰۱۷ معنی‌دار بود. همچنین اثر آبیاری و تغذیه بر عرض برگ و تعداد برگ در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۰۰۱ معنی‌دار مشاهده شد. نتایج همچنین نشان داد برهم‌کنش آبیاری × تغذیه بر ارتفاع بوته در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۰۰۱ و بر حجم بوته در سطح احتمال ۰/۰۰۴۶ معنی‌دار بود. این برهم‌کنش برای وزن تر و وزن خشک بوته نیز در سطح پنج درصد معنی‌دار به‌دست آمد، به‌طوری‌که مقدار احتمال به‌ترتیب ۰/۰۴۵۰ و ۰/۰۴۱۸ به‌دست آمد (جدول ۲).

برای اندازه‌گیری طول ریشه گیاه کاهو، ابتدا گیاه به‌طور کامل از محیط کشت خارج شده و ریشه‌ها به دقت از سایر بخش‌های گیاه جدا شدند. سپس طول ریشه از انتهای ریشه اصلی تا بلندترین نقطه آن با استفاده از خط کش اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری حجم ریشه، ابتدا ریشه‌ها در یک ظرف آب به‌طور کامل غوطه‌ور شدند و حجم جابجایی آب به‌عنوان معیاری برای حجم ریشه محاسبه گردید. در نهایت، برای اندازه‌گیری وزن ریشه، ریشه‌ها پس از شست‌وشو و جدا کردن ذرات اضافی، به آون در دمای ۷۰ درجه و مدت زمان ۴۸ ساعت نگهداری و با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ هزارم اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری میزان نیتروژن، ابتدا نمونه گیاهی خشک و آسیاب شد. سپس، نمونه به همراه اسید سولفوریک و کاتالیزورهایی مانند سولفات مس در یک دستگاه کداسیون گرم شد تا نیتروژن موجود در نمونه به آمونیاک تبدیل شود. پس از این مرحله، آمونیاک آزاد شده با استفاده از محلول بوراکس جذب شده و سپس با استفاده از محلول اسیدی استاندارد تیتراسیون گردید. حجم محلول اسیدی مصرفی برای تیتراسیون، میزان نیتروژن موجود در نمونه را نشان داد. برای اندازه‌گیری فسفر، ابتدا نمونه گیاهی به‌طور کامل خشک و آسیاب شد. سپس، ماده نمونه به یک محلول استخراجی مانند اسید نیتریک یا اسید کلریدریک اضافه شد. محلول حاصل از استخراج به دستگاه اسپکتروفتومتر وارد شد، که میزان فسفر موجود در نمونه را بر اساس جذب نور در طول موج ۴۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پتاسیم، نمونه گیاهی خشک و آسیاب شده و در محلول استخراجی مانند اسید نیتریک قرار گرفت. سپس، نمونه در دستگاه atomic absorption spectrometer (AAS) قرار گرفت و جذب نور در طول موج ۷۶۶ نانومتر برای پتاسیم اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری کلسیم، نمونه گیاهی مشابه آماده شد و در محلول استخراجی قرار گرفت. سپس، نمونه در دستگاه AAS یا flame photometer قرار گرفت و جذب نور در طول موج ۴۲۲ نانومتر برای

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات رشدی گیاه کاهو تحت تاثیر مدت زمان و فواصل آبیاری و تغذیه

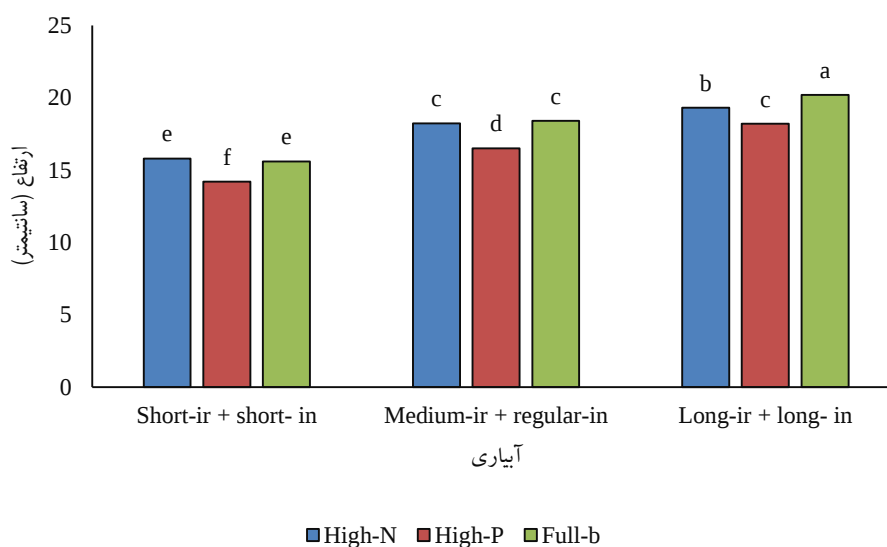
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		ارتفاع	تعداد برگ	طول برگ	عرض برگ	وزن تر بوته	وزن خشک بوته
آبیاری (A)	۲	۳۷/۳**	۴۹**	۲۱/۳**	۲/۵۱**	۸۵۵۶**	۱۳۱**
تغذیه (B)	۲	۸/۰۸**	۱۳**	۵/۱۰**	۰/۵۱۴**	۸۵۶**	۳۱/۹**
A × B	۴	۰/۲۶۴**	۰/۵ ^{NS}	۰/۱۹۸ ^{NS}	۰/۲۸۷ ^{NS}	۱۸۱*	۱/۶۷*
خطای کل	۱۸	۰/۰۱۸	۰/۲۲	۰/۵۴۷	۰/۰۳۱	۵۹/۹	۰/۵۴۰
ضریب تغییرات		۷/۷۵	۳/۸۲	۵/۳۰	۱۲/۷	۱۱/۷	۱۰/۶

NS * و ** به‌ترتیب عدم معنی داری، معنی‌داری در سطح پنج درصد و معنی‌داری در سطح یک درصد می‌باشد.

می‌تواند رشد گیاهان را بهینه کند (Mahmoud et al., 2023). دانگ و همکاران نیز نشان دادند که تغذیه متعادل با تأمین هم‌زمان نیتروژن، پتاسیم و فسفر به نسبت مناسب، باعث بهبود عملکرد رشد و افزایش بیومس گیاهان می‌شود (Dong et al., 2023). به طور مشابه، لیو و همکاران گزارش کردند که فواصل آبیاری طولانی‌تر، به‌ویژه در سامانه‌های مدرن آبیاری، فشارهای ناشی از کمبود آب را کاهش داده و امکان جذب بهتر عناصر غذایی توسط گیاهان را فراهم می‌کند (Luo et al., 2019). از نظر مکانیسم‌های فیزیولوژیکی، بهبود ارتفاع بوته در شرایط آبیاری طولانی و تغذیه متعادل ممکن است به افزایش فتوسنتز خالص و تنظیم بهتر روابط آبی گیاه مرتبط باشد. طبق گزارش، تأمین آب کافی به افزایش بازده فتوسنتزی و کاهش مقاومت روزنه‌ای کمک می‌کند، که خود باعث جذب مؤثرتر CO_2 و بهبود متابولیسم کربن می‌شود. علاوه بر این، حضور نیتروژن، پتاسیم و فسفر در محلول $NPK\ 20-20-20$ باعث افزایش سنتز پروتئین‌ها، توسعه سلولی و گسترش سطح برگ‌ها می‌شود، که در نهایت به افزایش ارتفاع بوته منجر می‌گردد (Lawlor, 2012).

نتایج نشان داد که بیشترین ارتفاع بوته مربوط به تیمار آبیاری 20 دقیقه برای هر طبقه و 4 ساعت یکبار + محلول $NPK\ 20-20-20$ با $20/2$ سانتی‌متر بود که نسبت به کمترین ارتفاع در تیمار آبیاری 5 دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول $15-15-30\ NPK$ ($14/2$ سانتی‌متر)، $42/3$ درصد افزایش داشت. همچنین، در شرایط آبیاری 20 دقیقه برای هر طبقه و 4 ساعت یکبار، محلول $20-20-20\ NPK$ $4/66$ درصد بهتر از تیمار $10-10-30\ NPK$ و 11 درصد بهتر از محلول $15-15-30\ NPK$ عمل کرد (شکل ۱). آبیاری 20 دقیقه برای هر طبقه و 4 ساعت یکبار با تأمین پایدارتر آب و تنظیم فشار تورگر، به جذب بهتر مواد مغذی و توزیع بهینه آنها در گیاه کمک می‌کند. همچنین محلول $20-20-20\ NPK$ به دلیل فراهم کردن نسبتی مناسب از عناصر غذایی ماکرو، عملکرد سیستم فتوسنتزی و متابولیسم گیاه را بهبود می‌بخشد، که این امر با افزایش ارتفاع بوته معطوف می‌شود.

این یافته‌ها با نتایج مطالعات گذشته همخوانی دارد. محمود و همکاران تأکید کردند که آبیاری منظم و تغذیه هم‌زمان NPK



شکل ۱- برهمکنش آبیاری و تغذیه بر ارتفاع بوته کاهو

10 دقیقه برای هر طبقه و هر 2 ساعت یکبار و $7/34$ درصد، $25/2$ درصد و 18 درصد بیشتر از تیمار آبیاری 5 دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار بود (جدول ۳). از سوی دیگر، نتایج نشان داد که اثر محلول‌های تغذیه‌ای مختلف بر صفات تعداد برگ، طول برگ و عرض برگ به وضوح مشاهده شد. بیشترین تعداد برگ (13 برگ)، طول برگ ($14/7$ سانتی‌متر) و عرض برگ ($6/67$ سانتی‌متر) در تیمار محلول $20-20-20\ NPK$ مشاهده گردید. این تیمار به ترتیب $7/4$

خصوصیات برگ (تعداد، طول و عرض برگ)

نتایج نشان داد که تغییر مدت و فواصل آبیاری تأثیر قابل‌توجهی بر صفات تعداد برگ، طول برگ و عرض برگ گیاهان داشت. تیمار آبیاری 20 دقیقه برای هر طبقه و 4 ساعت یکبار با فواصل زیاد به طور چشمگیری بیشترین تعداد برگ (15 برگ)، طول برگ ($15/4$ سانتی‌متر) و عرض برگ ($6/99$ سانتی‌متر) را نشان داد. این تیمار به ترتیب $8/11$ درصد، $4/7$ درصد و $9/7$ درصد بیشتر از تیمار آبیاری هر

درصد و ۳/۶ درصد بیشتر از تیمار ۱۰-۱۰-۳۰ NPK و ۲۳/۶ درصد و ۱۱/۳ درصد بیشتر از تیمار محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK بود (جدول ۳).

آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار به دلیل امکان نفوذ آب به عمق بیشتر و افزایش دسترسی ریشه‌ها به آب و مواد مغذی از لایه‌های عمیق، تأثیر مثبتی بر رشد برگ‌ها دارد. این شرایط معمولاً باعث افزایش طول و عرض برگ‌ها می‌شود، زیرا گیاه می‌تواند در دوره‌های طولانی‌تر از منابع آب و مواد مغذی بهره‌مند شود. مطالعات نشان داده‌اند که آبیاری مطلوب می‌تواند به تولید برگ‌هایی با کیفیت بالاتر و ابعاد بزرگ‌تر منجر شود، زیرا توزیع آب و جذب مواد مغذی در طول زمان بهینه می‌شود (Liu et al., 2015). در مقابل، آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار اگرچه موجب تأمین رطوبت مداوم در سطح خاک می‌شود، اما ممکن است به کاهش رشد عمقی ریشه و رقابت بیشتر بین برگ‌ها برای جذب منابع منجر گردد. این شرایط می‌تواند باعث افزایش تعداد برگ‌ها اما کاهش طول و عرض آن‌ها شود، زیرا منابع گیاه بین تعداد بیشتری از برگ‌ها تقسیم می‌شود.

از سوی دیگر، تیمار محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK، که شامل تمامی عناصر ضروری برای رشد گیاه است، نسبت به محلول‌های ۱۰-۱۰-۳۰ و ۱۵-۱۵-۳۰ NPK تأثیر بهتری بر خصوصیات برگ، از جمله تعداد برگ و ابعاد آن (طول و عرض برگ)، دارد. دلیل این برتری را می‌توان در نقش هماهنگ تمام عناصر تغذیه‌ای در فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی گیاه جستجو کرد. محلول ۱۰-

۱۰-۳۰ NPK به طور خاص بر افزایش تعداد برگ‌ها تأثیرگذار است، زیرا نیتروژن یکی از عناصر اصلی در سنتز پروتئین‌ها و کلروفیل است که به تقسیم سلولی و رشد برگ‌ها کمک می‌کند. با این حال، غلبه نیتروژن بر سایر عناصر ممکن است تعادل رشد گیاه را مختل کند، که به‌ویژه می‌تواند باعث کاهش کیفیت برگ‌ها و کاهش ابعاد آن‌ها شود (Zhou et al., 2019). محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK، از سوی دیگر، بیشتر بر بهبود کیفیت و مقاومت برگ‌ها متمرکز است. پتاسیم نقش کلیدی در تنظیم آب گیاه، استحکام دیواره سلولی، و افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی ایفا می‌کند. با این حال، تأکید بیش از حد بر پتاسیم ممکن است منجر به کاهش رشد رویشی، از جمله تعداد برگ‌ها، شود، زیرا گیاه برای سایر فرآیندهای رشد به نیتروژن و فسفر نیز نیاز دارد (Goussous et al., 2018). در مقابل، محلول تغذیه‌ای متعادل با تأمین تمام عناصر ضروری، از جمله نیتروژن، فسفر، پتاسیم، موجب هماهنگی بهتر در فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی گیاه می‌شود. این ترکیب، علاوه بر افزایش تعداد برگ‌ها، باعث رشد متعادل طول و عرض برگ‌ها نیز می‌شود. وجود فسفر در محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK نقش مهمی در رشد سلولی و انرژی‌زایی دارد، در حالی که پتاسیم و نیتروژن به ترتیب کیفیت و کمیت برگ‌ها را بهبود می‌بخشند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK، نه تنها باعث افزایش تولید زیست‌توده برگ‌ها می‌شود، بلکه کیفیت محصول از نظر استحکام، ضخامت، و مقاومت برگ‌ها نیز بهینه‌تر است (Hassan et al., 2017).

جدول ۳- اثرات اصلی مدت زمان و فواصل آبیاری و تغذیه بر صفات تعداد برگ، طول برگ و عرض برگ

تیمارهای مختلف	تعداد برگ	طول برگ	عرض برگ
آبیاری			
آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار	۱۰c	۱۲/۳c	۵/۹۳c
آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار	۱۲b	۱۴/۱b	۶/۴۷b
آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار	۱۵a	۱۵/۴a	۶/۹۹a
تغذیه			
NPK ۳۰-۱۰-۱۰	۱۳a	۱۳/۹b	۶/۵۲a
NPK ۳۰-۱۵-۱۵	۱۱b	۱۳/۲b	۶/۲۰b
NPK ۲۰-۲۰-۲۰	۱۳a	۱۴/۷a	۶/۶۷a

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

خشک بوته نیز در تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK با ۵۰/۳ گرم بالاترین میزان را داشت و نسبت به کمترین مقدار در تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK با ۳۷/۹ گرم، ۳۳ درصد افزایش نشان داد. در مقایسه سایر تیمارها، تیمار آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار + محلول ۲۰-۲۰-۲۰

وزن تر و خشک بوته

نتایج نشان داد که بیشترین وزن تر بوته در تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK با ۵۰۸ گرم مشاهده شد که نسبت به کمترین مقدار در تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK با ۴۲۱ گرم، ۶ درصد افزایش داشته است. در همین راستا، وزن

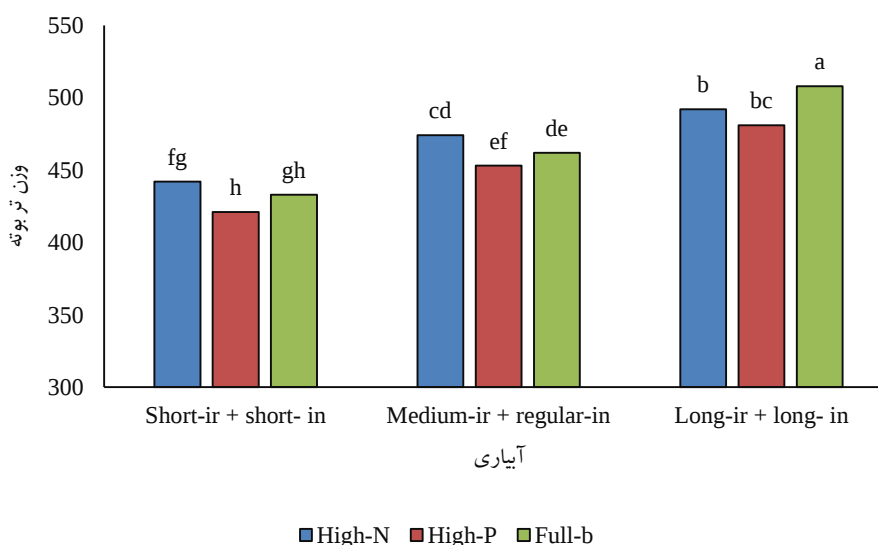
فرآیند فتوسنتز و در نهایت افزایش وزن تر و خشک بوته‌ها می‌شود (Zhao et al., 2020). به‌ویژه، در تیمارهای با محلول‌های متعادل، از آنجا که تمام عناصر ضروری برای رشد گیاه به‌طور همزمان تأمین می‌شود، رشد سلولی و توسعه ریشه‌ها بهبود یافته و وزن خشک گیاه افزایش می‌یابد. مطالعات مختلف نیز نشان داده‌اند که آبیاری و تغذیه مناسب می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر وزن خشک گیاهان بگذارد. تحقیقاتی که توسط لی و همکاران انجام شد، نشان داد که افزایش طول دوره آبیاری باعث بهبود عملکرد و افزایش بیوماس گیاهان می‌شود (Li et al., 2024). همچنین، آروین (۱۳۹۸) به این نتیجه رسید که محلول‌های تغذیه‌ای متعادل، به‌ویژه آنهایی که شامل نیتروژن و پتاسیم هستند، می‌توانند باعث افزایش رشد گیاهان و در نتیجه وزن خشک آن‌ها شوند.

حجم بوته

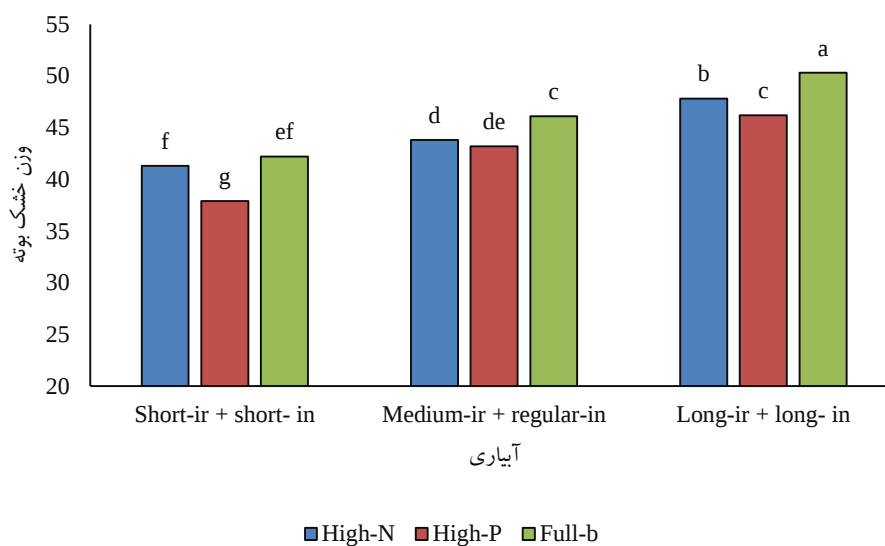
با توجه به حجم بوته‌ها، نتایج نشان داد که تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یک‌بار همراه محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK بالاترین حجم بوته (۲۵۱ سانتی‌متر مکعب) را به خود اختصاص داد. این تیمار ۷ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یک‌بار + محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK با ۲۳۱ سانتی‌متر مکعب و ۴ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یک‌بار + محلول ۱۰-۱۰-۳۰ NPK با ۲۴۲ سانتی‌متر مکعب بود. از طرف دیگر، کمترین حجم بوته در تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یک‌بار + محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK با ۱۹۱ سانتی‌متر مکعب مشاهده شد.

NPK با ۴۶۲ گرم وزن تر و ۴۶/۱ گرم وزن خشک، به ترتیب ۶ و ۹ درصد بیشتر از تیمار آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یک‌بار + محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK با ۴۵۳ گرم وزن تر و ۴۲/۲ گرم وزن خشک بود. در همین تیمارها، وزن تر و خشک در آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یک‌بار + ۳۰-۱۰-۱۰ NPK به ترتیب با ۴۷۴ گرم و ۴۴ گرم، ۷ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یک‌بار + محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK نشان داد. در نهایت، تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یک‌بار + محلول ۳۰-۱۰-۱۰ NPK با ۴۹۲ گرم وزن تر و ۴۸ گرم وزن خشک، ۳ درصد بیشتر از تیمار آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یک‌بار + محلول ۳۰-۱۰-۱۰ NPK بود (شکل ۲ و ۳).

در این مطالعه، مشاهده شد که تیمارهایی که دارای آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یک‌بار و محلول‌های تغذیه‌ای متعادل بودند، وزن تر و خشک بالاتری داشتند. این نشان می‌دهد که در شرایط آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یک‌بار، گیاه قادر است آب و مواد مغذی بیشتری جذب کرده و این امر باعث افزایش بیوماس و در نتیجه وزن تر و خشک گیاه می‌شود. علاوه بر این، استفاده از محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK که به‌طور خاص شامل تمامی عناصر مورد نیاز گیاه برای رشد است، ممکن است موجب بهبود فرآیندهای متابولیک و فیزیولوژیکی در گیاه شود که منجر به افزایش وزن خشک گیاه می‌گردد. مکانیسم‌های این تغییرات مرتبط با افزایش بازده جذب آب و مواد مغذی در تیمارهای آبیاری طولانی‌تر است. هنگامی که گیاهان تحت شرایط آبیاری مناسب قرار می‌گیرند، سلول‌ها می‌توانند آب را به‌طور مؤثرتر ذخیره کرده و این باعث بهبود



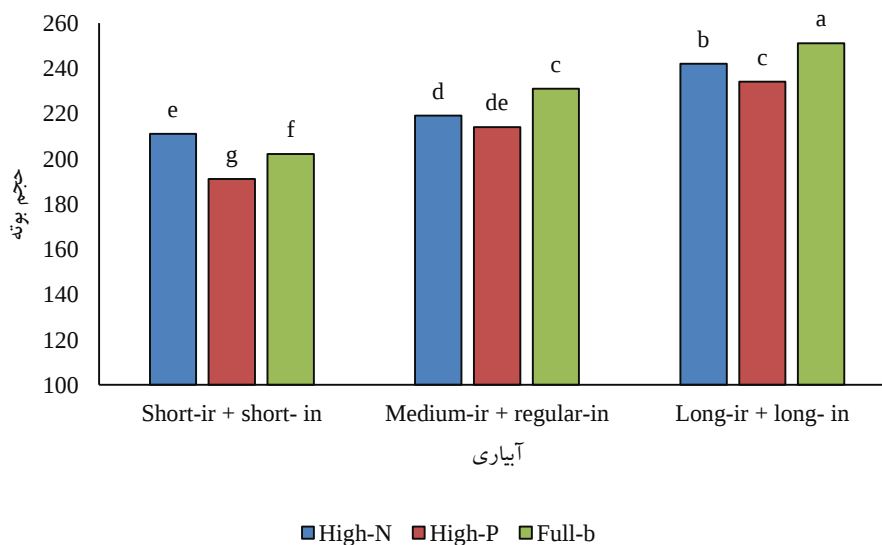
شکل ۲- برهمکنش آبیاری و تغذیه بر وزن تر بوته کاهو



شکل ۳- برهمکنش آبیاری و تغذیه بر وزن خشک بوته کاهو

بوته‌ها در تیمارهای با آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار و محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK احتمالاً به دلیل بهبود شرایط ریشه‌زایی و جذب مواد مغذی است. مطالعات مختلف نیز نشان داده‌اند که حجم بوته یکی از مهم‌ترین شاخص‌های رشد گیاه است و ارتباط مستقیمی با شرایط آبیاری و تغذیه دارد. در تحقیقاتی که توسط اسدی و همکاران (۱۳۹۷) انجام شد، نشان داده شد که آبیاری مناسب می‌تواند باعث بهبود فرایندهای ریشه‌زایی و در نتیجه افزایش حجم بوته در گیاهان شود. همچنین، صفایی و همکاران (۱۳۹۴) تأکید کردند که استفاده از محلول‌های تغذیه‌ای با ترکیبات یکسان می‌تواند به بهبود عملکرد گیاهان کمک کند و حجم بوته‌ها را افزایش دهد.

تیمارهای آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار + محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK (۲۳۱ سانتی‌متر مکعب) و آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار + محلول ۱۰-۳۰-۱۰ NPK (۲۱۹ سانتی‌متر مکعب) نیز نسبت به تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK با ۱۹۱ سانتی‌متر مکعب، به ترتیب ۲ درصد و ۷ درصد بیشتر حجم بوته نشان دادند. تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK با ۲۰۲ سانتی‌متر مکعب نیز نسبت به تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK ۶ درصد افزایش داشت (شکل ۴). افزایش حجم



شکل ۴- برهمکنش آبیاری و تغذیه بر حجم بوته کاهو

خصوصیات ریشه (طول، حجم و وزن خشک ریشه)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات اصلی آبیاری و تغذیه بر صفات طول ریشه، حجم ریشه و وزن خشک ریشه در سطح یک درصد معنی دار بود (جدول ۴). اثر آبیاری بر حجم و وزن خشک ریشه

در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۰۰۱ و اثر تغذیه بر حجم و وزن خشک ریشه به ترتیب در سطح احتمال ۰/۰۰۰۲ و ۰/۰۰۴۴ معنی دار مشاهده شد. همچنین، برهم کنش آبیاری $\times$ تغذیه بر صفت طول ریشه در سطح یک درصد (۰/۰۰۲۹) معنی دار بود.

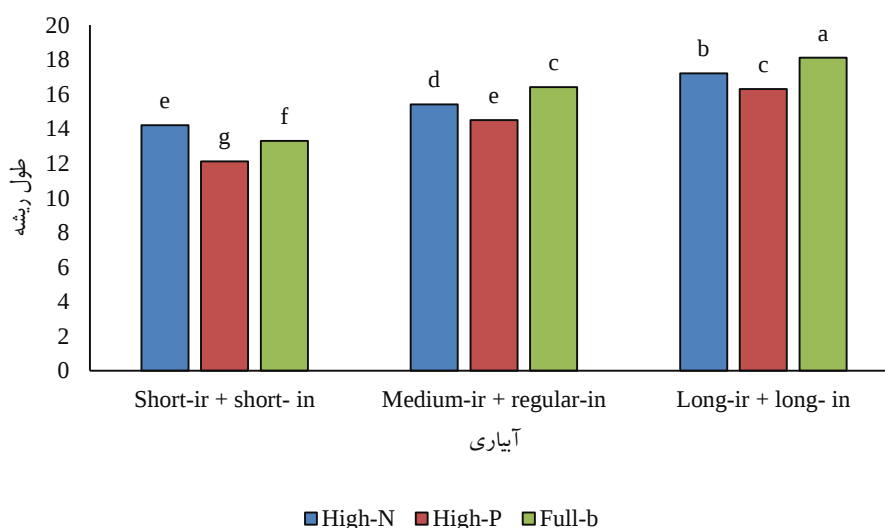
جدول ۴- تجزیه واریانس صفات ریشه گیاه کاهو تحت تاثیر مدت زمان و فواصل آبیاری و تغذیه

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		طول ریشه	حجم ریشه	وزن خشک ریشه
آبیاری (A)	۲	۳۶/۲**	۲۲۸**	۲/۱۱**
تغذیه (B)	۲	۶/۷۰**	۵۸/۶**	۰/۶۷۰**
A $\times$ B	۴	۰/۸۸۳**	۲/۱۳ ^{ns}	۰/۰۳۵ ^{ns}
خطای کل	۱۸	۰/۱۴۷	۴/۰۱	۰/۰۹۰
ضریب تغییرات		۱۲/۵	۳/۶۴	۵/۴۹

ns، * و ** به ترتیب عدم معنی داری، معنی داری در سطح پنج درصد و معنی داری در سطح یک درصد می باشد.

نتایج نشان داد که بیشترین طول ریشه در تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK با ۱۸/۱ سانتی متر مشاهده شد. این تیمار ۷/۴ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK با ۱۶/۳ سانتی متر و ۸/۵ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول ۱۰-۱۰-۳۰ NPK با ۱۷/۲ سانتی متر بود. همچنین، کمترین طول ریشه در تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۵-۱۵-۳۰

NPK با ۱۲/۱ سانتی متر مشاهده شد. در سایر تیمارها، تیمار آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار + محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK با ۱۶/۴ سانتی متر طول ریشه، ۸ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK بود. تیمار آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار + محلول ۱۰-۱۰-۳۰ NPK با ۱۵/۴ سانتی متر نیز ۶ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK نشان داد (شکل ۵).



شکل ۵- برهم کنش آبیاری و تغذیه بر طول ریشه کاهو

سانتی متر مکعب) و وزن خشک ریشه (۵/۹۷ گرم) در تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار مشاهده شد. این تیمار به

تغییر مدت و فواصل آبیاری تأثیر مثبت و قابل توجهی بر حجم ریشه و وزن خشک ریشه داشت. بیشترین حجم ریشه (۶۰/۱)

ریشه (۵/۷۰ گرم) در تیمار محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK مشاهده شد. این تیمار به ترتیب ۲/۷ درصد و ۳/۴ درصد بیشتر از تیمار محلول ۳۰-۱۰-۱۰ NPK و ۶/۹ درصد و ۱۰/۲ درصد بیشتر از تیمار محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK بود (جدول ۵).

ترتیب ۱۱ درصد و ۷ درصد بیشتر از تیمار آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار و ۲۰/۲ درصد و ۱۹/۴ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار بود (جدول ۳). نوع محلول تغذیه‌ای نیز بر حجم ریشه و وزن خشک ریشه تأثیر داشت. بیشترین حجم ریشه (۵۷/۱ سانتی متر مکعب) و وزن خشک

جدول ۵- اثرات اصلی مدت زمان و فواصل آبیاری و تغذیه بر صفات حجم ریشه و وزن خشک ریشه

وزن خشک ریشه	حجم ریشه	تیمارهای مختلف
آبیاری		
۵/۰۰c	۵۰/۰c	آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار
۵/۴۳b	۵۴/۷b	آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار
۵/۹۷a	۶۰/۱a	آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار
تغذیه		
۵/۵۳a	۵۵/۶a	NPK ۱۰-۱۰-۳۰
۵/۱۷b	۵۲/۱b	NPK ۳۰-۱۵-۱۵
۵/۷۰a	۵۷/۱a	NPK ۲۰-۲۰-۲۰

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

و مدت زمان آبیاری با نوع محلول تغذیه‌ای می‌تواند به طور قابل توجهی ویژگی‌های ریشه را تحت تأثیر قرار دهد. برای مثال، در شرایط آبیاری مطلوب همراه با تیمار کودی NPK، ریشه‌ها به طور مؤثری رشد می‌کنند و توانایی جذب مواد مغذی بهبود می‌یابد. این ترکیب باعث افزایش تراکم ریشه و گسترش بیشتر ریشه‌ها در عمق خاک می‌شود، که به نوبه خود موجب جذب بهینه آب و مواد مغذی می‌گردد (Gao et al., 2015).

عناصر

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات اصلی آبیاری و تغذیه بر میزان نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم برگ کاهو در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). همچنین، برهم‌کنش آبیاری × تغذیه بر این صفات در سطح پنج درصد معنی‌دار به‌دست آمد، به‌طوری‌که مقدار احتمال برای نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم به‌ترتیب ۰/۰۱۷۱، ۰/۰۱۵۵، ۰/۰۴۶۴ و ۰/۰۳۵۸ بود.

نتایج تیمارهای مختلف نشان داد که میزان نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم در گیاهان تحت تأثیر زمان آبیاری و نوع محلول تغذیه‌ای قرار گرفت. بیشترین میزان نیتروژن در تیمارهای آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول ۱۰-۱۰-۳۰ NPK و آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK مشاهده شد که به ترتیب ۸ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK و ۱۰ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۰-۱۰-۳۰ NPK بود. در این میان،

آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار و مکرر باعث حفظ رطوبت مستمر در لایه‌های سطحی خاک می‌شود، که ممکن است باعث گسترش محدود ریشه‌ها در این نواحی گردد. این شرایط برای جذب سریع آب و مواد مغذی مناسب است، اما ممکن است منجر به کاهش رشد عمقی ریشه‌ها شود. در مقابل، آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار، باعث نفوذ عمیق‌تر آب در خاک می‌شود و ریشه‌ها قادر خواهند بود که به عمق بیشتری نفوذ کنند و مواد مغذی از لایه‌های عمیق خاک را جذب کنند (Liu et al., 2015). تحقیقات دیگر نیز نشان داده‌اند که در شرایط آبیاری طولانی، تراکم ریشه در لایه‌های عمقی خاک افزایش می‌یابد، که این امر به گیاهان اجازه می‌دهد تا بهره‌وری بیشتری از مواد مغذی موجود در خاک داشته باشند (جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۹).

کودهای نیتروژن بالا باعث افزایش رشد ریشه در برخی گیاهان می‌شود، چرا که نیتروژن یکی از عناصر اصلی برای رشد سلولی و توسعه ریشه است. در تحقیقاتی که توسط ژانگ و همکاران انجام شد، نشان داده شد که افزایش نیتروژن در محلول تغذیه‌ای باعث افزایش طول و تعداد ریشه‌ها در کاهو می‌شود (Zhang et al., 2017). با این حال، استفاده از محلول ۱۵-۱۵-۳۰ NPK ممکن است باعث کاهش رشد ریشه شود، زیرا پتاسیم ممکن است اثرات منفی بر تشکیل ریشه‌های جدید داشته باشد، به خصوص در شرایطی که این عنصر به میزان زیادی وارد گیاه شود (Goussous et al., 2018). کودهای کامل معمولاً به رشد و گسترش بهینه ریشه‌ها کمک می‌کند، زیرا این عناصر به صورت همزمان و متعادل در اختیار گیاه قرار می‌گیرند و رشد ریشه‌ها را تقویت می‌کنند (Zhou et al., 2019). ترکیب فواصل

تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول ۱۵-۳۰-۱۵ NPK و آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار + محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK به میزان قابل توجهی بیشتر از تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۰-۱۰-۳۰ NPK بودند (شکل ۷).

تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول ۱۵-۳۰-۱۵ NPK نیز میزان نیتروژن قابل توجهی را نشان داد (شکل ۶). از نظر میزان فسفر، بیشترین مقدار در تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK مشاهده شد که نسبت به تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۰-۱۰-۳۰ NPK، ۳۳ درصد افزایش نشان داد. همچنین،

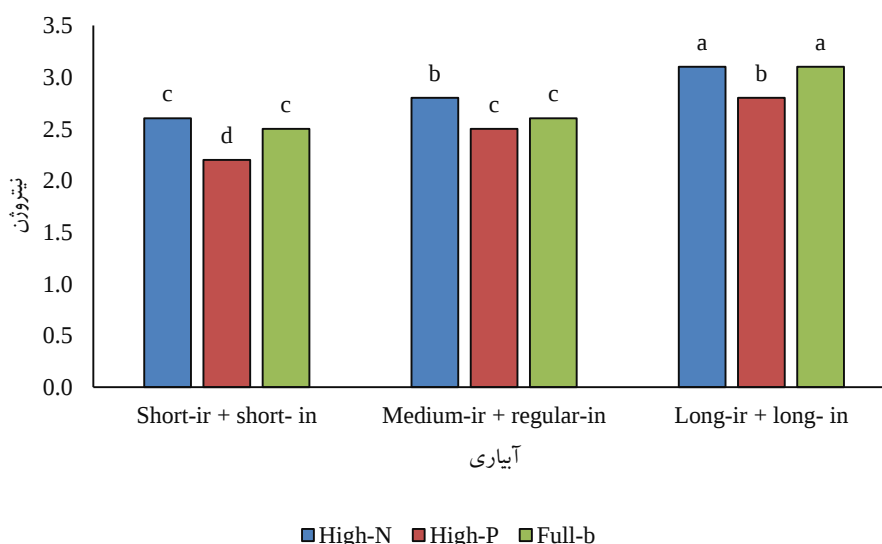
جدول ۶- تجزیه واریانس صفات عناصر در گیاه کاهو تحت تاثیر مدت زمان و فواصل آبیاری و تغذیه

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		نیتروژن	فسفر	پتاسیم	کلسیم
آبیاری (A)	۲	۰/۷۴۳**	۰/۰۷۸**	۱/۴۵**	۰/۳۹۱**
تغذیه (B)	۲	۰/۲۶۳**	۰/۰۱۹**	۰/۲۵۳**	۰/۰۴۳**
A × B	۴	۰/۰۱۳*	۰/۰۰۳*	۰/۰۱۳*	۰/۰۱۱*
خطای کل	۱۸	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۴۴	۰/۰۳۳
ضرب تبادلیات		۱۲/۱	۱۳/۹	۱۲/۵	۱۲/۹

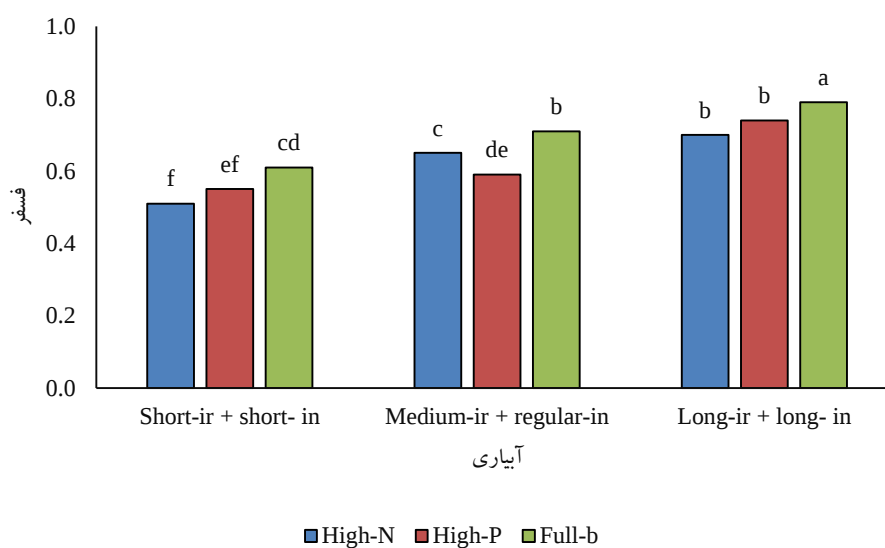
ns، * و ** به ترتیب عدم معنی داری، معنی داری در سطح پنج درصد و معنی داری در سطح یک درصد می باشد.

آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول تعادل کامل به بالاترین حد رسید که ۳/۲ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۵-۳۰-۱۵ NPK بود. سایر تیمارها مانند آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار + محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK و آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول ۱۵-۳۰-۱۵ NPK نیز به ترتیب ۲ و ۲/۲ درصد کلسیم را نشان دادند (شکل ۹).

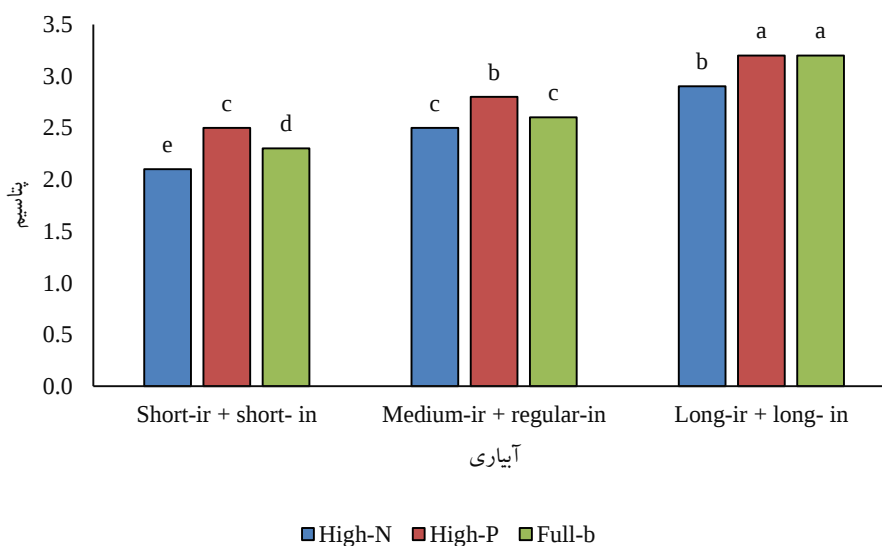
در مورد پتاسیم، بالاترین میزان در دو تیمار آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول ۱۵-۳۰-۱۵ NPK و آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار + محلول ۲۰-۲۰-۲۰ NPK مشاهده شد که ۲۸ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۰-۱۰-۳۰ NPK ۲۴ درصد بیشتر از تیمار آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار + محلول ۱۵-۳۰-۱۵ NPK بود (شکل ۸). میزان کلسیم نیز در تیمار



شکل ۶- برهمکنش آبیاری و تغذیه بر میزان نیتروژن کاهو



شکل ۷- برهمکنش آبیاری و تغذیه بر میزان فسفر کاهو



شکل ۸- برهمکنش آبیاری و تغذیه بر میزان پتاسیم کاهو

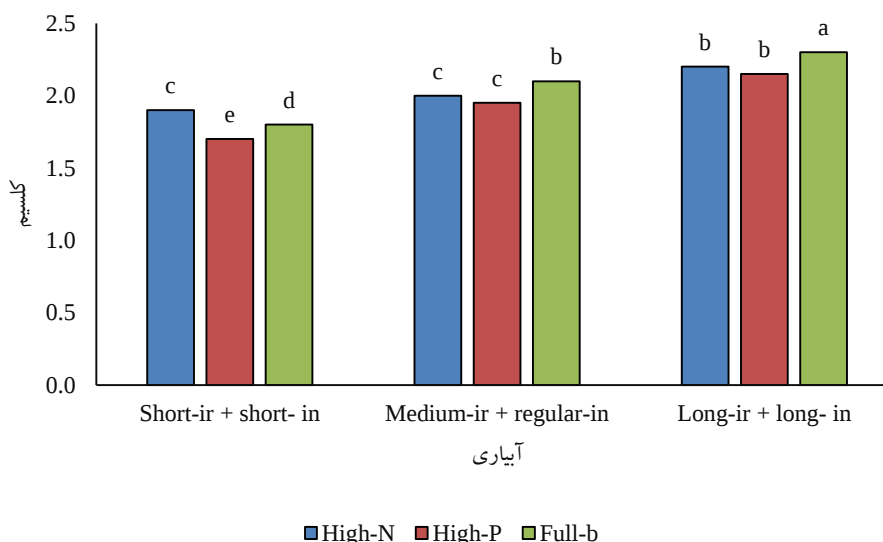
کلسیم و فسفر ممکن است کاهش یابد. این موضوع به دلیل کاهش توانایی ریشه‌ها برای گسترش به عمق خاک است که جذب این عناصر به طور خاص از لایه‌های عمیق خاک انجام می‌شود (McCollum et al., 2016).

از سوی دیگر، محلول ۱۰-۱۰-۳۰ NPK باعث افزایش غلظت نیتروژن در گیاهان می‌شود که نقش کلیدی در فرآیندهای متابولیک و رشد گیاه دارد (Fageria, 2012). با این حال، تغذیه با محلول ۱۵-۳۰-۱۵ NPK، منجر به کاهش غلظت نیتروژن در گیاه می‌شود، چرا که پتاسیم می‌تواند فرآیند جذب نیتروژن را تحت تأثیر قرار دهد. در مطالعات مشابه، یووانوویچ و همکاران نشان دادند که افزایش پتاسیم

آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار، آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار و آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار، هر کدام تأثیرات متفاوتی بر وضعیت مواد مغذی در گیاهان دارند. آبیاری ۵ دقیقه برای هر طبقه و یک ساعت یکبار، به دلیل فراهم آوردن رطوبت مداوم، ممکن است باعث کاهش تجمع مواد مغذی در ریشه شود. در مقابل، آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و ۴ ساعت یکبار، به علت جذب بیشتر آب، می‌تواند شرایط بهتری برای جذب مواد مغذی توسط ریشه‌ها فراهم کند. تحقیقات مک کولم و همکاران نشان دادند که در شرایط آبیاری مداوم و کوتاه، ریشه‌ها قادر به جذب نیتروژن به شکل کارآمدتری هستند، اما جذب

تبادل باعث بهبود عملکرد کلی گیاه و جذب بهتر تمامی مواد مغذی می‌شود. مطالعات Bahrami و همکاران نشان داده‌اند که کودهای NPK می‌توانند تأثیر مثبتی بر بهبود کیفیت و کمیت محصول و همچنین افزایش غلظت مواد مغذی مختلف در گیاه داشته باشند (Bahrami et al., 2015).

در خاک می‌تواند رقابت برای جذب نیتروژن را تقویت کند و به همین دلیل نیتروژن در گیاه کمتر در دسترس خواهد بود (Jovanović et al., 2018). کود کامل، که شامل تمامی عناصر ضروری مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم هستند، معمولاً به گیاهان امکان می‌دهند که تمام نیازهای تغذیه‌ای خود را به صورت متوازن تأمین کنند. این



شکل ۹- برهمکنش آبیاری و تغذیه بر میزان کلسیم کاهو

NPK در مقایسه با محلول‌های ۱۵-۱۵-۳۰ و ۳۰-۱۰-۱۰ و ۱۵-۱۵-۳۰ موجب بهبود بیشتری در عملکرد و کیفیت کاهو شد و تغذیه متعادل‌تری را برای گیاه فراهم کرد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در شرایط این مطالعه، ترکیب آبیاری ۲۰ دقیقه هر ۴ ساعت همراه با محلول غذایی ۲۰-۲۰-۲۰ NPK می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مدیریتی مناسب برای کشت عمودی کاهو در شرایط گلخانه‌ای مشابه مورد توجه قرار گیرد. با این حال، تعمیم این نتایج به سایر شرایط اقلیمی و سامانه‌های کشت نیازمند انجام پژوهش‌های تکمیلی است. یکی از محدودیت‌های این پژوهش انجام آزمایش در شرایط کنترل‌شده گلخانه‌ای و در یک فصل رشد بود؛ بنابراین تغییرات اقلیمی، شدت نور، دما و شرایط مدیریتی متفاوت می‌تواند بر پاسخ گیاه به برنامه آبیاری و تغذیه اثرگذار باشد. همچنین این مطالعه تنها بر یک رقم کاهو و یک سامانه کشت عمودی مبتنی بر بستر کوکوپیت-پرلیت متمرکز بود و امکان دارد نتایج در سایر ارقام، بسترهای کشت و سامانه‌های هیدروپونیک متفاوت باشد. از این رو پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، بررسی تیمارهای آبیاری و تغذیه در فصول مختلف سال، در شرایط اقلیمی گوناگون، با ارقام متفاوت کاهو و همچنین در سایر سامانه‌های کشت بدون خاک انجام شود. همچنین ارزیابی شاخص‌های مصرف آب، کارایی مصرف عناصر

آبیاری به تنهایی نمی‌تواند به طور کامل جذب مواد مغذی توسط گیاه را توضیح دهد. ترکیب فواصل و مدت زمان آبیاری با نوع محلول تغذیه‌ای، یک رویکرد یکپارچه برای بهبود رشد گیاه و افزایش کیفیت مواد مغذی است. تحقیقات گارسیا و همکاران، نشان داده است که استفاده از آبیاری هر ۱۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۲ ساعت یکبار همراه با تیمار کودی NPK، به طور مؤثری باعث افزایش غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم در اسفناج می‌شود. این ترکیب باعث افزایش رشد ریشه‌ها و بهبود جذب مواد مغذی از خاک می‌گردد. همچنین، در شرایطی که آبیاری طولانی با فواصل زیاد همراه با محلول پتاس بالا اعمال می‌شود، غلظت پتاسیم و کلسیم در گیاه به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (García et al., 2014).

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که آبیاری ۲۰ دقیقه برای هر طبقه و هر ۴ ساعت یکبار در مقایسه با سایر تیمارهای آبیاری، بیشترین بهبود را در صفات رشدی و عملکردی کاهو در شرایط این آزمایش ایجاد کرد. این تیمار در مقایسه با آبیاری ۵ دقیقه در هر ساعت و آبیاری ۱۰ دقیقه هر ۲ ساعت، اثر مطلوب‌تری بر رشد بوته و صفات مورفولوژیکی نشان داد. همچنین، کاربرد محلول غذایی ۲۰-۲۰-۲۰

Raton, FL, USA. ISBN: 9781439849670.

Gao, Q., Zhang, X. and Chen, M. 2015. Effect of irrigation regimes and nutrient solutions on root growth and nutrient uptake of lettuce (*Lactuca sativa* L.) under hydroponic conditions. *Hydroponics Journal* 28 (2): 101-109. <https://doi.org/10.1007/s11041-015-0161-3>.

García, J. A., Marín, M. L. and Pérez, J. L. 2014. Effects of different irrigation systems and nutrient solutions on the growth and nutrient content of lettuce. *Agricultural Water Management* 145: 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.06.015>.

Goussous, S., Ghulam, R. and Al-Muhtaseb, A. H. 2018. Effect of potassium and nitrogen on root and shoot growth of lettuce in hydroponic systems. *Journal of Plant Nutrition* 41(10): 1251-1263. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1476332>.

Hassan, M. U., Javed, M. A. and Saleem, M. 2017. Influence of nutrient solutions on leaf number and size in lettuce. *Horticultural Science and Technology* 35(3): 211-220. <https://doi.org/10.15805/hort.2017.35.3.211>.

Jovanović, S., Mandić, V. and Milivojević, J. 2018. Impact of potassium on nitrogen uptake in plants under different soil moisture conditions. *Plant and Soil* 430(1-2): 193-204. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3747-0>.

Kim, M.J., Moon, Y., Tou, J.C., Mou, B. and Waterland, N.L. 2016. Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Composition and Analysis* 49: 19-34.

Lawlor, D.W. 2012. Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: stomata vs. metabolism and the role of ATP. *Annals of Botany* 109(7): 871-885. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf110>.

Li, S.-X., Wang, Z.-H., Malhi, S.S., Li, S.-Q., Gao, Y.-J. and Tian, X.-H. 2009. Nutrient and water management effects on crop production, and nutrient and water use efficiency in dryland areas of China. *Advances in Agronomy*, 102: 223-265. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(09\)01007-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(09)01007-4)

Li, YL., Zhang, Sq., Guo, Wz., et al. 2024. Effects of irrigation scheduling on the yield and irrigation water productivity of cucumber in coconut coir culture. *Scientific Reports*, 14: 2944. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52972-x>

Liu, Z., Zhang, H. and Li, L. 2015. Effects of irrigation frequency on leaf area and photosynthesis in lettuce. *Agricultural Water Management*, 147: 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.014>

Luo, L., Zhang, Y., Wang, Y., Cheng, T., Pan, H., Wang, J. and Zhang, Q. 2019. Interactions between irrigation and fertilization on growth performance of

غذایی و تحلیل اقتصادی سامانه می‌تواند به ارائه توصیه‌های کاربردی‌تر برای توسعه کشت عمودی کمک کند.

منابع

اسدی، ر.، حسن پور، ف.، مهربانی، م.، باقی‌زاده، ا. و کاراتدیش، ف. ۱۳۹۷. بررسی تأثیر کم‌آبیاری بر توزیع ریشه و رشد رویشی گیاه رزماری. مدیریت آب و آبیاری. ۸(۲): ۲۸۹-۳۰۱.

آروین، پ. ۱۳۹۸. مطالعه سطوح نیتروژن فسفر و پتاسیم بر پارامترهای فیزیولوژیکی، مرفولوژیکی و محتوای اسانس در گیاه دارویی مرزه (*Satureja hortensis* L.). مجله پژوهشهای گیاهی (زیست‌شناسی ایران). ۳۲(۳): ۲۶۰-۲۷۹.

جمشیدی، ا.ر.، غضنفری مقدم، ا. و محسنی، م. ۱۳۹۹. معرفی روش‌های مختلف محلول‌دهی غذایی به ریشه کاهو در سه شیوه کاشت هیدروپونیک ستونی، آئروپونیک ستونی و هیدرو-آئروپونیک ستونی ترکیبی. مجله ترویجی سبزیجات گلخانه‌ای. ۱(۱): ۹-۱۳.

صفايي، م.، پناه‌نده، ج.، طباطبایی، س.، ج. و مطلبی‌آذر، ع.ر. ۱۳۹۴. مقایسه تأثیر محلول‌های غذایی مختلف بر غلظت عناصر و برخی صفات کیفی کاهو در سیستم هیدروپونیک. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای. ۶(۲۲): ۷-۱.

Akbari, Z., Yari Hesar, A., Siamian, N., Fürst, C., Värnik, R. and Azadi, H. 2024. Feasibility of using vertical farming in northern Iran: A multiple necessity. *Journal of Environmental Management* 354: 120232. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120232>.

Bahrami, H., Jafari, A. and Yousefi, M. 2015. The effect of balanced nutrient solution on the growth and yield of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in hydroponic systems. *Journal of Plant Nutrition* 38(10): 1571-1582. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1016950>.

Chrysargyris, A. and Tzortzakis, N. 2025. Nitrogen, phosphorus, and potassium requirements to improve *Sideritis cypria* growth, nutrient and water use efficiency in hydroponic cultivation. *Heliyon* 11(1): e40755. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40755>.

Dong, Z., Liu, Y., Li, M., et al. 2023. Effect of different NPK fertilization timing sequences management on soil-petiole system nutrient uptake and fertilizer utilization efficiency of drip irrigation cotton. *Scientific Reports* 13: 14287. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40620-9>.

Fageria, N.K. 2012. The Role of Nutrients in Growth, Yield and Quality of Vegetables. CRC Press, Boca

- Horticultural Science and Biotechnology, 98(2): 133-140.
<https://doi.org/10.1080/14620316.2022.2141666>.
- Sharma, P., Sharma, P. and Thakur, N. 2024. Sustainable farming practices and soil health: a pathway to achieving SDGs and future prospects. *Discovery Sustainability*, 5: 250.
<https://doi.org/10.1007/s43621-024-00447-4>.
- Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q. and 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>
- Zhang, J., Wang, Y. and Li, S. 2017. Effect of nitrogen levels on root growth and nutrient absorption of lettuce in hydroponic culture. *Journal of Plant Physiology*, 48(5): 689-694.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.03.002>.
- Zhao, W., Liu, L., Shen, Q., Yang, J., Han, X., Tian, F. and Wu, J. 2020. Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. *Water*, 12: 2127.
<https://doi.org/10.3390/w12082127>.
- Zhou, X., Xie, J. and Zhang, Z. 2019. Balanced nutrient solutions improve leaf growth in hydroponically grown lettuce. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(4): 727-735.
<https://doi.org/10.4067/S0718-95162019000400727>.
- Gesnariad. *HortTechnology*, 29(2): 100-108.
<https://doi.org/10.21273/HORTTECH04117-18>
- Mahmoud, N., Abdou, M.A.H., Salaheldin, S., Soliman, W.S. and Abbas, A.M. 2023. The impact of irrigation intervals and NPK/yeast on the vegetative growth characteristics and essential oil content of lemongrass. *Horticulturae*, 9: 365.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae9030365>
- Malhotra, H., Vandana, Sharma, S. and Pandey, R. 2018. Phosphorus nutrition: Plant growth in response to deficiency and excess. In: Hasanuzzaman, M., Fujita, M., Oku, H., Nahar, K., Hawrylak-Nowak, B. (eds) *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*. Springer, Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_7
- McCollum, T. M., Nelson, P. V. and Oliviero, A. M. 2016. Irrigation frequency and nitrogen application effects on lettuce nutrient composition. *Horticultural Science*, 51(3): 327-334.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.3.327>
- Noor, H., Ding, P., Ren, A., Sun, M. and Gao, Z. 2023. Effects of nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics and yield. *Agronomy*, 13: 1550.
<https://doi.org/10.3390/agronomy13061550>.
- Oh, S. and Lu, C. 2022. Vertical farming - smart urban agriculture for enhancing resilience and sustainability in food security. *The Journal of*

The Effect of Irrigation Duration and Interval on Morphological Traits and Nutrient Distribution of Lettuce (*Lactuca sativa*) in a Vertical Farming System under Diverse Nutritional Treatments

M. Hosseinzadeh¹, S.E. Alavieh San², J. Shabahang³

Recived: Oct.14, 2025

Accepted: May.07, 2026

Abstract

Vertical farming, as an innovative agricultural method, enables the production of high-quality crops in limited spaces while using fewer resources. The aim of this study was to investigate the effects of irrigation duration and frequency, combined with different nutrient treatments, on the morphological traits and nutrient distribution of lettuce in a vertical farming system. The experiment was conducted in a factorial design with three replications and three levels for each factor: irrigation durations and frequencies (5 minutes per tier every hour, 10 minutes per tier every 2 hours, and 20 minutes per tier every 4 hours), and nutrient treatments (high-nitrogen solution [10-10-30 NPK], high-potassium solution [30-15-15 NPK], and balanced solution [20-20-20 NPK]). PVC tubes were used as columnar growth containers within the vertical farming system in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, in 2023 (year 1402 in the Iranian calendar). Results indicated that the treatment combining 20 minutes of irrigation per tier every 4 hours with the 20-20-20 NPK nutrient solution produced the best performance in vertical lettuce cultivation. In this treatment, the maximum plant height (20.2 cm) was recorded, representing a 43% increase compared to the 5-minute per tier, hourly irrigation combined with 30-15-15 NPK solution (14.2 cm). Additionally, the highest number of leaves (15 leaves), leaf length (15.4 cm), and leaf width (6.99 cm) were observed, which were 34.7%, 25.2%, and 18% higher than the same comparison treatment, respectively. The highest fresh and dry weights of the plants were 508 g and 50.3 g, respectively, showing 6% and 33% increases over the 5-minute per tier, hourly irrigation treatment (421 g and 37.9 g). Root length in this treatment reached 18.1 cm, representing a significant increase compared to the minimum value of 12.1 cm. Regarding nutrient content, the highest concentrations of nitrogen, phosphorus, potassium, and calcium were observed under the 20-minute per tier, 4-hour interval irrigation treatments. Overall, the combination of 20 minutes of irrigation per tier every 4 hours with a 20-20-20 NPK nutrient solution is recommended as the optimal treatment for enhancing growth, yield, and nutrient uptake of lettuce in vertical farming systems.

Keywords: Balanced solution, calcium, leaf width, nutrient distribution, root length.

-
1. PhD Student, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
 2. BSc in Crop Science and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
 3. Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran
(Corresponding Author Email: mhosseinzadh@yahoo.com)