نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۸، مهر - آبان ۱۴۰۳، ص. ۶۹۸-۶۸۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 18, Oct.-Nov. 2024, p. 683-698

مقاله علمی-پژوهشی

اثر سطوح آبیاری تنظیم‌شده بر عملکرد فلفل دلمه‌ای گلخانه‌ای (*Capsicum annuum* cv. Nirvin)

معصومه امانی اندبیلی[۱]، معظم حسن‌پور اصیل[۲]، جمالعلی الفتی[۳] و مریم نوابیان[۴*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۱

چکیده

رقم نیروین (Nirvin) از ارقام پرکشت فلفل دلمه‌ای در ایران است اما تاکنون برنامه غذایی و آبیاری مشخصی برای دستیابی به حداکثر محصول و کارایی مصرف آب آن مشخص نشده است. با هدف بررسی پاسخ‌های مورفو-فیزیولوزیکی گیاه به سطوح تنظیم‌شده آبیاری و همچنین تعیین حد بهینه آبیاری در پرورش گلخانه‌ای این رقم، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار بر اساس تیمارهای آبیاری ۱۰۰ (I_0)، ۸۵ (I_1) و ۷۰ (I_2) درصد نیاز آبی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان طی سال‌های ۱۴۰۳-۱۴۰۲ اجرا شد. نیاز آبی فلفل دلمه‌ای با استفاده از داده‌های میکرولایسیمتر نصب شده در گلخانه برآورد و تیمارهای مختلف آبیاری بر اساس مدت زمان آبیاری اعمال شد. برای ارزیابی تیمارهای آبیاری، عملکرد و صفات گیاه در طول دوره رشد اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که از نظر صفات عملکرد نهایی محصول و کارایی مصرف آب بین سطوح شاهد و ۸۵ درصد نیاز آبی اختلاف معناداری وجود نداشت، اما با کاهش میزان آبیاری به ۷۰ درصد نیاز آبی میزان این صفات به‌ترتیب ۲۱/۴۳ و ۸/۵۲ درصد کاهش یافت. همچنین بر اساس مقادیر نشت یونی و پرولین آزاد، کاهش میزان آبیاری تا ۸۵ درصد نیاز آبی، موجب بروز شرایط تنش آبی نشد. نتایج نشان داد که کاهش میزان آبیاری منجر به تغییر در اندازه دم میوه‌ها شد اما بیشترین تعداد لوب میوه در سطح ۸۵ درصد نیاز آبی مشاهده شد که نسبت به سطوح ۷۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی به‌ترتیب ۱۳/۹۶ و ۳۴/۸۹ درصد بیشتر بود. بین مجموعه صفات طول میوه، حجم میوه، ویتامین ث و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و مجموعه صفات وزن میوه، کارایی مصرف آب، محتوای نسبی آب، کلروفیل برگ و وزن تر بوته همبستگی منفی، قوی و معناداری مشاهده شد. بر اساس نتایج، کاهش میزان آبیاری از ۱۰۰ به ۸۵ درصد نیاز آبی، در عین عدم کاهش معنی‌دار محصول (کاهش ۵/۵ درصدی)، موجب صرفه‌جویی در مصرف آب به میزان ۱۵ درصد و همچنین بهبود سطح مقاومت گیاه در برابر عوارض شایعی همچون پوسیدگی گلگاه و افزایش عمر انبارداری میوه‌ها می‌شود. بنابراین، استفاده از سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی در پرورش این رقم از فلفل دلمه‌ای تحت شرایط گلخانه توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کارایی مصرف آب، کشت کنترل‌شده، کم‌آبیاری، عملکرد محصول، ویتامین ث

مقدمه

فلفل دلمه‌ای با نام علمی *Capsicum annuum*، سبزی میوه‌ای و محصول فصل گرم بوده و به خانواده گیاهی Solanaceae تعلق دارد (Rice et al., 1990). این گیاه حاوی ترکیبات آنتی اکسیدان، انواع ویتامین‌ها (مانند A، C و E)، پروتئین، انواع کربوهیدرات‌ها و ترکیبات متابولیکی است (Castilla et al., 2004). تولید این محصول به دو شکل کشت در فضای آزاد و گلخانه صورت می‌گیرد. سطح زیر کشت فلفل در جهان بالغ بر ۵۳۰ هزار هکتار بوده و کشور چین بزرگترین تولیدکننده این محصول در جهان است (FAO, 2022). در ایران، فلفل دلمه‌ای یکی از پرمصرف‌ترین سبزی‌ها در سبد غذایی خانوار است. استان‌های اصفهان، یزد و کرمان از مراکز اصلی تولید فلفل محسوب می‌شوند که به‌ترتیب بیشترین سطح تولید را نسبت به سایر استان‌های کشور به‌خود اختصاص داده‌اند (کشاورز و همکاران، ۱۳۹۸). در سطح جهانی، کمبود سبزیجات برای تأمین رژیم غذایی سالم وجود دارد و تولیدات گلخانه‌ای می‌تواند به تأمین تقاضا

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم باغبانی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۲- استاد، گروه علوم باغبانی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۳- دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۴- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: Navabian@guilan.ac.ir)

برای سبزیجات به‌ویژه در فصول سردتر کمک کند (Maham et al., 2020). کشت ارقام گلخانه‌ای فلفل دلمه‌ای علاوه بر افزایش ارزش اقتصادی تولید، مزایایی همچون صرفه‌جویی در مصرف منابع و تولید محصولی با کیفیت‌تر نسبت به شرایط غیرکنترل‌شده را با خود به‌همراه دارد (Singh et al., 2019). رقم نیروین (Nirvin) از ارقام پرکشت وکار فلفل دلمه‌ای در سطح جهان و ایران بوده که میوه‌هایی به رنگ قرمز و با ارزش غذایی بالا تولید می‌کند. این رقم جزء ارقام جدید فلفل دلمه‌ای با رشد رویشی بالا و توانایی تولید محصول بیشتر نسبت به سایر ارقام مزرعه‌ای فلفل دلمه‌ای است (Tahmasebi et al., 2023). با این حال، تاکنون برنامه غذایی و آبیاری مشخصی برای دستیابی به حداکثر میزان محصول در عین استفاده بهینه از منابع آبی و غذایی دردسترس برای این رقم مشخص نشده است.

کم‌آبیاری تکنیکی پرکاربرد است که در آن میزان مصرف آب، تا حدی که موجب اُفت کمیت و کیفیت محصول نشود، کاهش می‌یابد (Piri et al., 2022). استفاده از این تکنیک در فرآیند تولید محصولات باغی و زراعی از دو جهت حائز اهمیت است، اول این‌که به‌طور محسوسی منجر به کاهش میزان مصرف آب و صرفه‌جویی در استفاده از منابع محدود آبی در دسترس می‌شود، و دوم این‌که این کاهش در مصرف، آسیبی به فرآیند تولید وارد نمی‌کند و گیاه را وارد مرحله تنش نخواهد کرد (Bozkurt Colak, 2021). تعیین حد آبیاری بهینه یکی از مهم‌ترین مراحل اعمال تکنیک کم‌آبیاری است، چراکه با توجه به تفاوت‌های ژنتیکی بین محصولات مختلف و همچنین اختلاف در پارامترهای محیطی محل پرورش نمی‌توان از یک الگوی یکسان برای همه محصولات استفاده کرد و باید پاسخ‌های هر محصول و هر رقم به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گیرد (Abdelkhalik et al., 2020).

در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی برای تعیین حد بهینه آبیاری در طی فرآیند تولید محصولات مختلف باغی صورت گرفته است. سجادی و همکاران (۱۳۹۹) نشان دادند که تغییر در میزان آب آبیاری در کشت فلفل دلمه‌ای رقم کلیفرنیا واندر می‌تواند صفاتی همچون میانگین وزن تر و خشک میوه، تعداد میوه، عملکرد در واحد سطح و بهره‌وری مصرف آب را تحت تأثیر قرار دهد. آن‌ها گزارش کردند که کاهش ۱۵ و ۳۰ درصدی مصرف آب، منجر به کاهش معنادار میزان عملکرد محصول به مقدار ۶۹/۶ و ۷۹/۶ درصد می‌شود. در آزمایش دیگری نشان داده شد که عملکرد قابل فروش گیاه فلفل دلمه‌ای با کاهش میزان آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۷۵ درصد و سپس به ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، به‌طور معناداری دچار کاهش خواهد شد. همچنین گزارش شد که بروز تنش آبی در طی دوره رشد گیاه فلفل دلمه‌ای منجر به افزایش بروز عارضه پوسیدگی گلگاه در این محصول خواهد شد. نتایج این پژوهش نشان داد که پارامترهای کیفی میوه نسبت به سایر صفات رشدی و عملکردی، کم‌تر تحت تأثیر تیمارهای کم‌آبیاری قرار گرفتند (Abdelkhalik et al., 2020). مطالعه دیگری در نیوزیلند با هدف بررسی تأثیر نوع برنامه‌ریزی آبیاری و سطوح مختلف آن (۱- آبیاری از زمان کاشت تا هفته دوم در سطح ظرفیت زراعی و سپس کاهش میزان آبیاری به سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی تا زمان برداشت و ۲- آبیاری از زمان کاشت تا اواسط دوره گل‌دهی در سطح ظرفیت زراعی و سپس کاهش میزان آبیاری تا سطح نزدیک به پژمردگی دائم تا زمان برداشت) بر صفات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و عملکرد برخی از انواع فلفل دلمه‌ای و معرفی رقم سازگار به کم آبی انجام شد. نتایج نشان داد که تحت تیمارهای کم‌آبیاری، رقم Cupra می‌تواند از راندمان تولید محصول و پارامترهای کیفی بالاتری نسبت به رقم Viper برخوردار باشد (Zakki, 2020). طباطبائی و همکاران (۱۳۹۳) در آزمایشی بر روی فلفل قلمی رقم آلفا تحت شرایط گلخانه دریافتند که با توجه به این‌که اختلاف معنی‌داری بین عملکرد محصول در تیمارهای ۱۰۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی وجود نداشت، اما در شرایط محدودیت آب آبیاری، می‌توان میزان آبیاری را تا ۲۰ درصد کاهش داد. در پژوهشی که با هدف تعیین حد بهینه میزان آبیاری بر روی گیاه خربزه (*Cucumis melo*) و در شرایط گلخانه انجام شد، رژیم‌های آبیاری ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که میزان رشد بوته‌ها و کمیت و کیفیت نهایی محصول به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری قرار گرفت. ارتفاع و قطر ساقه با افزایش شدت کم‌آبیاری دچار کاهش شد. بالاترین میزان کیفیت میوه در سطح آبیاری ۹۰ درصد مشاهده شد. نتایج نهایی پژوهش نشان داد که کاهش میزان آبیاری تا ۸۰ درصد ظرفیت زراعی تأثیر منفی معناداری بر مهم‌ترین صفات زراعی این محصول نداشته و نهایتاً منجر به صرفه‌جویی در مصرف آب خواهد شد (Zeng et al., 2009). Ningoji و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که استفاده از سنسورهای اتوماتیک در فرآیند آبیاری فلفل شیرین (Capsicum annuum L) و تنظیم دقیق میزان آبیاری در سطح ۷۵ درصد ظرفیت زراعی و حفظ و ثبات این سطح از آبیاری به‌کمک سنسورهای هوشمند اندازه‌گیری میزان رطوبت بستر، علاوه بر حفظ میزان عملکرد محصول و ارزش غذایی میوه‌های تولیدشده، می‌تواند به‌طور قابل توجهی میزان آب مصرفی را در طی فرآیند تولید این محصول کاهش دهد. بررسی‌ها بر روی فلفل دلمه‌ای رقم Aristotle نشان داد که صفاتی همچون پتانسیل آب برگ، نرخ فتوسنتز، غلظت گاز دی‌اکسید کربن در زیر سلول‌های روزنه برگ، نرخ انتقال الکترون، کارایی فتوسیستم II و نرخ تبادلات گازی برگ به‌طور معناداری با تغییر سطوح آبیاری دچار تغییر خواهد شد و این تغییرات نهایتاً منجر به بروز تغییر در صفات کمی و کیفی و عملکرد نهایی محصول می‌شود (Kabir et al., 2021). همچنین، نتایج مطالعه Adeoye و همکاران (۲۰۱۴) بر روی گیاه فلفل دلمه‌ای نشان داد که با وجود

ثابت بودن حجم آبیاری در طول دوره پرورش، گیاهانی که تحت دورهای آبیاری مختلف قرار گرفته بودند، صفات رشدی، فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی متفاوتی از خود نشان دادند که این موضوع نشان از اهمیت تعیین یک برنامه آبیاری منظم و بهینه از نظر حجم و دور آبیاری به‌منظور دستیابی به حداکثر میزان بهره‌وری آب و راندمان تولید محصول دارد.

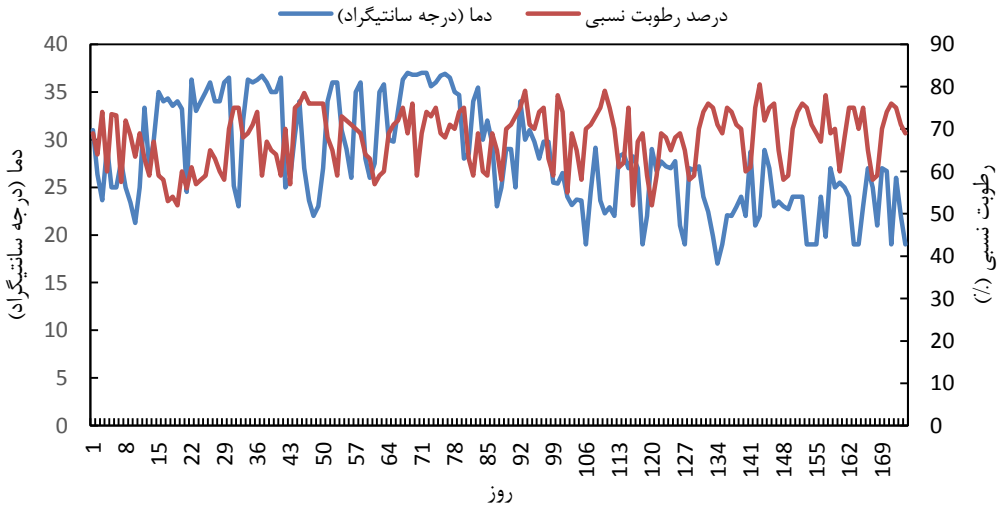
با توجه اقلیم خشک و نیمه خشک ایران و محدودیت منابع آب در کشور و پر مصرف بودن بخش باغبانی در میان فعالیت‌های کشاورزی، تعیین روش و برنامه بهینه آبیاری یک ضرورت به‌نظر می‌رسد. فلفل دلمه‌ای از جمله محصولات پرمصرف باغی در ایران است که نیاز آبی به نسبت بالایی دارد، همچنین رقم نیروین از جمله ارقام پرکشت گلخانه‌ای در سطح کشور است که تاکنون پژوهشی برای تعیین حد بهینه آبیاری در آن صورت نگرفته است. از آنجا که موقعیت جغرافیایی و شرایط محیطی می‌تواند بر عملکرد گیاه در گلخانه تاثیر بگذارد، بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیکی رقم نیروین در شرایط گلخانه‌ای شهر رشت به کاهش سطح آبیاری و تعیین سطح بهینه آبیاری برای اولین بار صورت پذیرفت. همچنین به دلیل استفاده از محلول‌های غذایی با غلظت‌های مختلف در کشت گلخانه‌ای فلفل دلمه‌ای، اثر غلظت محلول غذایی بر میزان تبخیر- تعرق گیاه و در نتیجه آن برنامه‌ریزی آبیاری بررسی شد.

مواد و روش‌ها

مکان و نحوه انجام آزمایش

برای دستیابی به اهداف پژوهش، آزمایشی به‌صورت طرح کاملا تصادفی در سه تکرار بر اساس تیمارهای آبیاری الف) ۱۰۰ درصد نیاز آبی به‌عنوان شاهد (I_0)، ب) ۸۵ درصد نیاز آبی (I_1) و ج) ۷۰ درصد نیاز آبی (I_2) در شرایط کنترل‌شده در گلخانه تحقیقاتی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان در سال‌های ۱۴۰۲-۱۴۰۱ طی ماه‌های بهمن تا آبان سال بعد انجام شد. سطوح آبیاری بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین که بر روی ارقام مختلف فلفل دلمه‌ای صورت پذیرفته بود، انتخاب شد. از آنجا که طبق گزارش‌ها سطوح پایین‌تر از ۶۵ تا ۷۰ درصد نیاز آبی منجر به قرار گرفتن گیاه تحت شرایط تنش آبی شد، سطح آبیاری ۷۰ درصد نیاز آبی به‌عنوان بالاترین سطح تیمار کم‌آبیاری در نظر گرفته شد تا نهایتاً در بازه بین ۷۰ تا ۱۰۰ درصد نیاز آبی (بازه بین نقطه آستانه تنش و نقطه ایده‌آل آبیاری)، سطح بهینه آبیاری مشخص شود.

منطقه مورد مطالعه در شهر رشت واقع شده است (۳۷ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی، ۴۹ درجه و ۳۷ دقیقه شرقی) که دارای میانگین ساعات آفتابی سالیانه برابر با ۱۶۵۰ ساعت بر اساس دوره آماری ۴۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۷۰) است. همچنین میانگین مجموع اشعه فعال فتوسنتزی روزانه در رشت برابر با ۱۳ مول در متر مربع در روز گزارش شده است (سدیدی شال و همکاران، ۱۴۰۱). بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی کشاورزی رشت، میانگین ساعات آفتابی در طول دوره کشت ۶/۰۵ ساعت بود و مابقی نور مورد نیاز برای رشد بهتر گیاه، از طریق لامپ‌های تکمیلی فراهم شد. دمای هوا بین ۱۷/۶ تا ۳۸/۶ درجه سانتی‌گراد با مقدار میانگین ۲۸/۸ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی هوا بین ۴۰ تا ۹۲ درصد با مقدار میانگین ۷۵ درصد در طول دوره آزمایش متغیر بود که در روند تغییرات آن‌ها شکل (۱) آورده شده است.



شکل ۱- تغییرات دما و رطوبت اندازه‌گیری شده در گلخانه

بذر فلفل دلمه‌ای رقم نیروین از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شد. این هیبرید از ارقام وارداتی پر کشت در فضای گلخانه‌ای بوده و دارای میوه‌های قرمز بلوکی شکل با اندازه و ضخامت نسبتا مناسب گوشت و باردهی یکنواخت در طول دوره است. پس از کشت بذر و تولید نشاء، نشاهای مورد نظر در ۱۷ اسفند ماه ۱۴۰۱ به بستر کشت حاوی کوکوپیت-پرلیت (جدول ۱) به نسبت ۷۰ به ۳۰ در گلدان سایز ۱۰ انتقال داده شد. در طول دوره آزمایش که حدود ۹ ماه به طول انجامید، دمای گلخانه بر روی ۲±۲۵ (دمای روز) و ۲±۲۰ (دمای شب) درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی بر روی ۷۰-۵۰ درصد تنظیم شد. برای تامین نور اضافه به‌ویژه در روزهای ابری، لامپ‌های LED با شعاع نوردهی ۵۰×۱۰۰ سانتی‌متر و توان ۳۶ وات و شدت نور ۲۰۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه در گلخانه نصب شد. در طی شبانه‌روز، گیاهان به‌طور متوسط در معرض ۱۴ ساعت روشنایی و ۱۰ ساعت تاریکی قرار داشتند. در ابتدای استقرار گیاه تا زمان گلدهی هر پانزده روز یکبار محول‌پاشی N-P-K صورت گرفت. پس از استقرار گیاه و تشکیل شاخ و برگ مناسب برای تغذیه گیاهان از محلول غذایی هوگلند (جدول ۲) به صورت کودآبیاری و محلول‌پاشی برگی استفاده شد. در مرحله‌ی اولیه تمام تیمارها، آبیاری کامل دریافت کردند و اعمال تیمارهای کم آبیاری از زمان تشکیل میوه (فروت ست) آغاز شد و تا انتهای دوره کشت به‌مدت ۱۷۴ روز ادامه پیدا کرد.

برای اعمال تیمارهای آبیاری، نیاز آبی گیاه فلفل دلمه‌ای با استفاده از میکرولایسیمتر در شرایط گلخانه محاسبه شد. در هر مرحله اندازه‌گیری در میکرولایسیمتر، میزان آب آبیاری، آب خروجی از میکرولایسیمتر و تغییرات وزنی رخ داده طی ۲۴ ساعت اندازه‌گیری و از معادله بیلان آب (رابطه ۱)، تبخیر- تعرق گیاه فلفل دلمه‌ای محاسبه شد. برای آبیاری میکرولایسیمتر از محلول غذایی هوگلند استفاده شد.

$$ET_c = I - D \pm \Delta W \quad (۱)$$

که در آن ET_c، I، D و W به‌ترتیب تبخیر- تعرق گیاه (میلی‌متر)، مقدار آب آبیاری (میلی‌متر)، مقدار آب خارج شده از میکرولایسیمتر (میلی‌متر) و تغییرات ذخیره آب در بستر (میلی‌متر) هستند. عمق آب آبیاری و آب خارج شده از میکرولایسیمتر، از تقسیم حجم آب آبیاری و آب خارج شده از میکرولایسیمتر بر مساحت متوسط بستر (قطر متوسط بستر با میانگین‌گیری از قطر سطح و کف بستر محاسبه شد) به دست آمد. تغییرات ذخیره آب در بستر از تفاضل رطوبت بستر قبل از آبیاری و پس از گذشت ۲۴ ساعت محاسبه شد. رطوبت وزنی بستر ماده متخلخل مانند کوکوپیت و پرلیت براساس وزن تر از رابطه (۲) محاسبه و با ضرب در جرم مخصوص ظاهری (به‌طور متوسط ۰/۱۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) به رطوبت حجمی تبدیل شد.

$$\theta_m = \frac{M_w - M_s}{M_w - M_0} \quad (۲)$$

که در آن M_w وزن میکرولایسیمتر و بستر در حالت تر (گرم)، M_s وزن میکرولایسیمتر و بستر در حالت خشک بستر (گرم) و M_0 وزن میکرولایسیمتر (گرم) هستند.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بستر کشت مورد استفاده در پژوهش حاضر

	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm^3)	وزن مخصوص حقیقی (gr/cm^3)	نسبت C/N (٪)	تخلخل کل (٪)	گنجایش رطوبتی (٪)	ظرفیت تبادل کاتیونی (٪)
کوکوپیت	۵/۵-۶/۴	۰/۱۱	۰/۲۶	۱/۴۶	۵۰/۲۲	۵۶	۹۰/۱	۱۴۱/۸
پرلیت	۵/۶	۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۴۳	۰/۰۰۰	۷۲	۹۷/۳	۰/۰۰۰

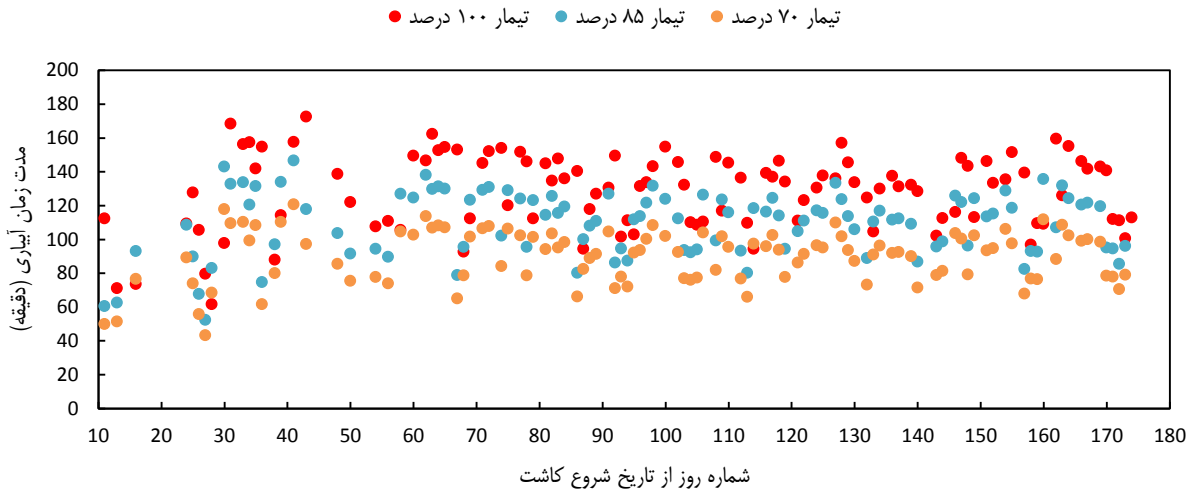
از روش آبیاری قطره‌ای نواری برای آبیاری گیاهان استفاده شد و از آنجا که طول نوار در هر ردیف از چهار متر فراتر نبود، از تلفات آبیاری و عدم یکنواختی پخش آب قطره‌چکان‌ها صرفنظر شد. از این رو مدت زمان آبیاری از رابطه (۳) و با توجه به تنظیم دبی قطره‌چکان‌ها بر روی ۰/۵ لیتر بر ساعت به دست آمد. دبی قطره‌چکان به‌گونه‌ای تعیین شد که آب آبیاری از انتهای گلدان خارج نشود. برای اعمال تیمارهای آبیاری، در تیمارهای ۸۵ و ۷۰ درصد نیاز آبیاری، تبخیر- تعرق گیاه به‌ترتیب در ضرایب ۸۵ و ۷۰ درصد ضرب و سپس مدت زمان آبیاری تعیین شد. شکل (۲) و (۳) به ترتیب مدت زمان آبیاری و مقدار آب آبیاری را در طول دوره آزمایش در تیمارهای مورد بررسی نشان می‌دهند. مدت زمان آبیاری در تیمارهای ۱۰۰، ۸۵ و ۷۰ درصد نیاز آبیاری به ترتیب ۱۶۶۸۱، ۱۴۱۷۹ و ۱۱۶۷۷ دقیقه و مقدار آب آبیاری به ترتیب ۱۳۹، ۱۱۸ و ۹۷ لیتر بودند.

$$T = \frac{ET_c \times A \times 10^{-3}}{q} \quad (۳)$$

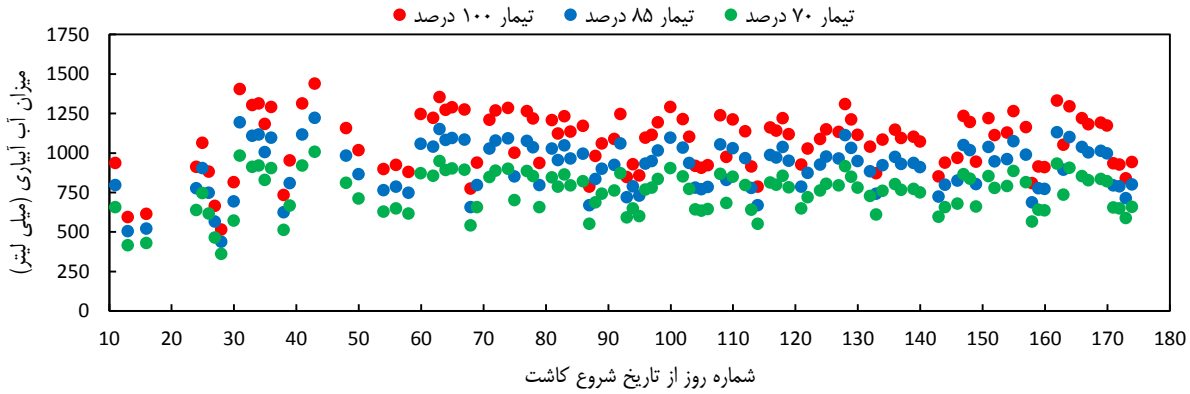
که در آن T مدت زمان آبیاری (ساعت)، A مساحت متوسط بستر (سانتی‌متر مربع) و q دبی قطره‌چکان (لیتر بر ساعت) هستند.

از آنجا که کیفیت آب آبیاری می‌تواند بر جذب آب و تبخیر-

تعرق گیاه و در نتیجه برنامه آبیاری موثر باشد، هم‌زمان با اندازه‌گیری‌ها در میکرولایسیمتر آبیاری شده با محلول غذایی هوگلند نرمال (۱۰۰)، از یک میکرولایسیمتر دیگر که تحت آبیاری با محلول غذایی هوگلند ۱۱۵ بود، داده‌برداری و تبخیر- تعرق گیاه فلفل دلمه‌ای با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شد. خصوصیات محلول هوگلند در جدول (۲) و کیفیت آب آبیاری در جدول (۳) آمده است. مطابق با جدول (۲) تفاوت محلول غذایی ۱۰۰ و ۱۱۵ درصد در مقادیر فرم‌های مختلف نیتروژن است.



شکل ۲- مقادیر مدت زمان آبیاری در طول دوره آزمایش در تیمارهای مورد بررسی



شکل ۳- مقادیر مقدار آب آبیاری در طول دوره آزمایش در تیمارهای مورد بررسی

جدول ۲- ترکیبات محلول غذایی هوگلند (گرم در ۱۰۰ لیتر آب) استفاده شده در پژوهش حاضر

محلول غذایی	نیترات کلسیم	نیترات پتاسیم	منوفسفات آمونیوم	سولفات منیزیم	اسید بوریک	کلرید منگنز	سولفات روی	سولفات مس	اسید مولیبدیک
۱۰۰ درصد	۱۸۸۹۲	۶۰۶۶	۲۳۰۰	۲۴۶۶	۲/۸۶	۱/۱۸	۰/۲۲	۰/۰۸	۰/۰۲
۱۱۵ درصد	۱۰۸۶۳	۶۹۷۵/۹	۲۶۴۵	۲۴۶۶	۲/۸۶	۱/۱۸	۰/۲۲	۰/۰۸	۰/۰۲

جدول ۳- برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های آب آبیاری مورد استفاده در پژوهش حاضر

اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (umohs cm^{-1})	کل جامدات محلول TDS (mg L^{-1})	آمونیوم NH_4 (mg L^{-1})	کلسیم Ca (mg L^{-1})	منیزیم Mg (mg L^{-1})	سدیم Na (mg L^{-1})	نیترات NO_3 (mg L^{-1})
۶/۲۵	۴۴۴	۲۸۶	۵/۳۳	۸۹	۴/۲	۳/۰۲	۱/۶۱

کارایی مصرف آب با استفاده از مقادیر وزن تر میوه و مقدار آب مصرفی از رابطه (۴) محاسبه شد. که در آن WUE کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، M_c وزن تر میوه (کیلوگرم) و W مقدار آب مصرفی در آبیاری گیاه در طول دوره ثبت شده (متر مکعب) هستند.

$$WUE = \frac{M_c}{W} \quad (۴)$$

اندازه‌گیری خصوصیات گیاهی

سه گروه از صفات شامل صفات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و صفات مرتبط با میوه مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. صفات مورد بررسی شامل ارتفاع بوته، قطر ساقه، وزن تر و خشک بوته، تعداد گره، طول میانگره اول (فاصله بین گره اول و دوم)، طول میانگره دوم (فاصله بین گره دوم و سوم)، تعداد و سطح برگ، کلروفیل برگ، نشت یونی، محتوای آب نسبی، طول ریشه، وزن تر و خشک ریشه، وزن میوه، طول میوه، قطر میوه، طول دم میوه، قطر دم میوه، ضخامت گوشت میوه، ضخامت لوب میوه، حجم میوه، سفتی بافت میوه، مواد جامد محلول، وزن تر و خشک میوه و اسیدیته قابل تیتر آب میوه بودند. ارتفاع گیاه در اواخر فصل رشد با استفاده از خط‌کش (بر حسب سانتی‌متر)، قطر ساقه با استفاده از کولیس (برحسب میلی‌متر)، طول میانگره با استفاده از خط‌کش (برحسب میلی‌متر)، سطح برگ توسط دستگاه سطح‌سنج (بر حسب سانتی‌متر مربع) اندازه‌گیری شدند. جهت برآورد پایداری غشای سلولی در برگ، میزان نشت الکترولیت آن‌ها با استفاده از روش مارکوم اندازه‌گیری شد (Marcum, 1998). برای برآورد محتوای نسبی آب برگ، نمونه‌برداری از برگ‌های کاملاً توسعه یافته انجام شد و وزن تر، خشک و تورژسانس نمونه‌های برگی تعیین شد (Khazaei and Estagi, 2021). شاخص سبزینگی با استفاده از SPAD و میزان کلروفیل برگ به روش Arnon (1967) اندازه‌گیری شد. میزان پرولین برگ براساس روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) برآورد شد. برای مقایسه وزن تر و خشک بوته در اواخر فصل رشد بوته‌هایی از هر واحد آزمایشی به‌طور تصادفی انتخاب و بوته‌ها به‌همراه ریشه از محیط کشت خارج و پس از جدا نمودن قسمت هوایی، نسبت به جدا نمودن خاک از ریشه با الک، اقدام شد. سپس ریشه‌ها و سایر قسمت‌های هوایی گیاه با قرار دادن در آون و در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت تا رسیدن به وزن ثابت خشک نگهداری و سپس وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد (Khazaei and Estagi, 2021). در زمان پایان آزمایش، تعداد میوه‌های هر بوته شمارش و وزن آن‌ها با ترازوی دیجیتال توزین شد. ابعاد میوه، دم میوه و گوشت میوه به‌کمک کولیس اندازه‌گیری شدند. از دستگاه سفتی‌سنج برای بررسی میزان سفتی بافت میوه استفاده شد. کل مواد جامد محلول با استفاده از رفرکتومتر مدل CETI-BELGUM برحسب درصد بریکس اندازه‌گیری شد (حقیقی و برزگر، ۱۳۹۹). برای تعیین اسید قابل تیتر، مقدار ۵ میلی‌لیتر از عصاره‌ی میوه با آب مقطر به حجم ۴۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس میزان pH محلول اندازه-گیری و با افزودن هیدروکسید سدیم ۰/۱ نرمال تا رسیدن به pH به میزان ۸/۲ تیتر و درصد اسید قابل تیتر از رابطه (۵) محاسبه شد (شبانی و همکاران، ۱۳۹۰).

$$pH_t = \frac{V_{NaOH} \times 0.064}{V} \times 100 \quad (۵)$$

که در آن V_{NaOH} و V به ترتیب مقدار سود مصرفی و حجم نمونه بر حسب میلی‌لیتر هستند.

تجزیه آماری

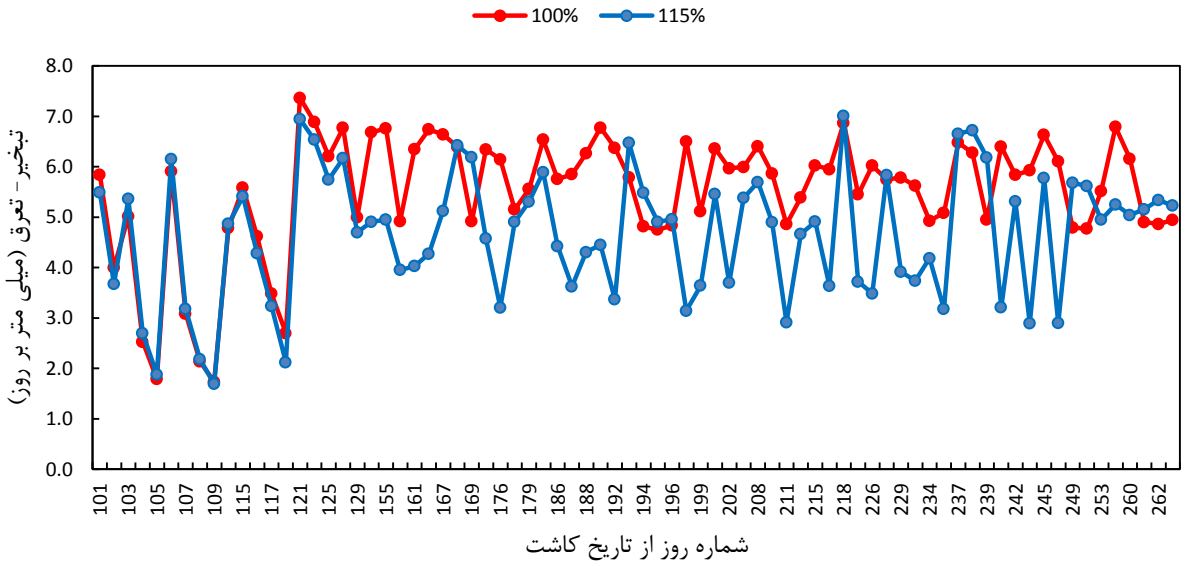
برای تحلیل آماری پارامترهای مورد بررسی، تجزیه واریانس داده‌ها به‌کمک نرم‌افزار SAS 19.0 انجام شد. همچنین از روش تجزیه همبستگی پیرسون و نرم‌افزار SPSS 22.0 برای بررسی روابط بین صفات استفاده شد.

نتایج و بحث

ارزیابی تبخیر- تعرق در محلول‌های غذایی با غلظت‌های مختلف

مقادیر تبخیر- تعرق گیاه فلفل دلمه‌ای در دو شرایط آبیاری با محلول غذایی هوگلند ۱۰۰ و ۱۱۵ درصد در شکل (۴) آمده است. با توجه به نتایج تا اولین دوره باردهی (۱۱۵ روز بعد از انتقال نشاء) تقریبا تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده در دو غلظت محلول غذایی مشابه بود اما پس از آن، تبخیر-تعرق در محلول با غلظت ۱۱۵ درصد کمتر از محلول غذایی ۱۰۰ درصد بود. میانگین تبخیر- تعرق در طول دوره ۱۷۴ روز که تیمارهای کم آبیاری اعمال شد، به ترتیب در محلول غذایی هوگلند ۱۰۰ و ۱۱۵، ۵/۴۸ و ۴/۹۱ میلی‌متر بر روز به دست آمد. عابدی کوپایی و همکاران (۱۳۹۰) نیز مقدار تبخیر- تعرق گیاه فلفل را در گلخانه شیشه‌ای دانشگاه صنعتی اصفهان با بستری از

بافت خاک لوم رسی شنی در محدوده ۰/۵ تا ۵/۰۴ میلی‌متر بر روز از زمان نشاء تا برداشت گزارش کردند. مقایسه میانگین تبخیر- تعرق گیاه در طول دوره مورد بررسی نشان داد که در غلظت ۱۱۵ درصد محلول غذایی، ۱۵ درصد کاهش تبخیر- تعرق در مقایسه با محلول غذایی ۱۰۰ درصد رخ داده است. مقدار کل تبخیر- تعرق در طول دوره ۱۷۴ روز به ترتیب ۹۵۲ و ۸۵۳ میلی‌متر در محلول غذایی هوگلند ۱۰۰ و ۱۱۵به دست آمد که اختلاف بین این دو می‌تواند اهمیت غلظت محلول غذایی در برنامه‌ریزی آبیاری در سطح گلخانه را نشان دهد. سجادی و همکاران (۱۳۹۹) در کشت گلخانه‌ای فلفل دلمه‌ای در گرگان، مقدار تبخیر- تعرق در دوره رشد را ۹۸۰ میلی‌متر برآورد کردند که با نتایج این پژوهش تطابق خوبی دارد. برای بررسی دلیل کاهش تبخیر- تعرق در محلول غذایی با شوری بیشتر، نتایج برخی خصوصیات گیاهی اندازه‌گیری شده در این دو میکرولایسیمتر درجدول (۴) آورده شد. نتایج نشان داد که اگرچه سطح برگ (به عنوان یک شاخص تعرق گیاه) در محلول غلظت ۱۱۵ درصد بیشتر است اما محتوای نسبی آب برگ آن کمتر است. همچنین مقایسه خصوصیات ریشه گیاه در این دو حالت نشان می‌دهد که در محلول غلظت ۱۱۵ درصد، گیاه به دلیل با محلول با شوری بیشتر، تلاش کرده است با افزایش طول ریشه و حجم آن، آب بیشتری را جذب نماید. Morales-Garcia و همکاران (۲۰۰۸) نیز برای گیاه فلفل دلمه‌ای گزارش دادند که افزایش شوری آب آبیاری موجب کاهش میزان تبادلات گازی و نرخ تعرق گیاه شد که با یافته‌های پژوهش حاضر در یک راستا قرار دارد.



شکل ٤- روند تبخیر - تعرق گیاه قلفل دلمه‌ای تحت آبیاری با محلول غذایی هوگلند با غلظت ۱۰۰ و ۱۱۵ درصد

جدول ٤- برخی از صفات گیاهی فلفل دلمه‌ای در آبیاری با محلول غذایی هوگلند ۱۰۰ و ۱۱۵ درصد

محلول غذایی	سطح برگ (سانتیمتر مربع)	محتوای نسبی آب برگ (درصد)	وزن خشک ریشه (گرم)	حجم ریشه (سانتیمتر مکعب)	قطر ساقه (سانتیمتر)
۱۰۰ درصد	۱۲۳۰۳/۶۷	۰/۹۰	۲۲	۲۰۰	۲۸
۱۱۵ درصد	۱۲۵۴۶/۸۳	۰/۸۳	۳۲	۳۳۰	۲۲

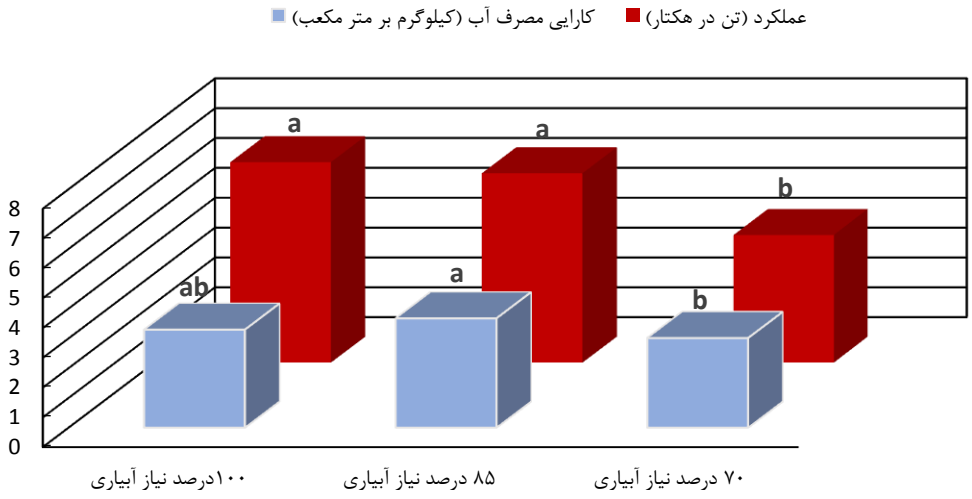
کارایی مصرف آب

برای تعیین حد بهینه آبیاری، بررسی دو فاکتور میزان آب مصرف‌شده و میزان عملکرد نهایی محصول ضروری است. سطحی از آبیاری را می‌توان به‌عنوان حد بهینه در نظر گرفت که در عین کاهش مصرف آب منجر به کاهش چشمگیر و معنادار میزان عملکرد نهایی نشود (Parkash et al., 2021). شکل (۵) میزان عملکرد و کارایی مصرف آب را در تیمارهای مورد بررسی نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که از نظر عملکرد نهایی محصول بین سطوح شاهد و ۸۵ درصد نیاز

آبی اختلاف معناداری وجود نداشت، اما با کاهش میزان آبیاری به ۷۰ درصد نیاز آبی، میزان عملکرد به میزان ۲۱/۴۳ درصد (نسبت به شاهد) کاهش یافت. از نظر کارایی مصرف آب، بین سطوح شاهد و ۸۵ درصد نیاز آبی اختلاف ۱۱ درصدی مشاهده شد، اما این اختلاف معنادار نبود. کاهش میزان آبیاری به ۷۰ درصد نیاز آبی نیز منجر به کاهش کارایی مصرف آب به میزان ۸/۵۲ درصد نسبت به سطح شاهد شد که معنی‌دار نبود. مقایسه دو تیمار ۸۵ و ۷۰ درصد نیاز آبی نشان داد که آبیاری تا حد ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه، توانست کارایی مصرف آب را با اختلاف معنی‌دار ۲۲ درصد بیشتر از تیمار ۷۰ درصد نیاز آبی برساند. بنابراین، به لحاظ کارایی مصرف آب، تیمار ۸۵ درصد نیاز آبیاری قابل توصیه است.

کارایی مصرف آب در واقع نسبت بین میزان آب مصرف‌شده و میزان محصول تولیدشده را نشان می‌دهد (Ningoji et al., 2024). چنانچه در طی فرآیند تولید، گیاهان میزان محصول بیشتری در ازای مصرف مقادیری کمتری از آب را تولید کنند، می‌توان گفت که کارایی مصرف آب در طی فرایند کشت قابل قبول بوده است (Zeng et al., 2009). یکی از روش‌های بهبود میزان کارایی مصرف آب، تعیین حد دقیق نیاز آبی گیاه است (Ghahremani et al.,2023; Ningoji et al., 2024). با این روش، آبیاری بیش از حد نیاز آبی گیاه صورت نخواهد گرفت و میزان آب مصرف‌شده به‌طور کامل صرف انجام فرآیندهای فیزیولوژیکی، متابولیکی و رشدی گیاه خواهد شد (Abdelkhalik et al., 2020; Kabir et al., 2021). براساس نتایج پژوهش حاضر، آبیاری فلفل رقم نیروین در حد ۱۰۰ درصد نیاز آبی، آبی بیش از حد نیاز گیاه را در اختیار آن قرار می‌دهد و در مقابل، کاهش سطح آبیاری تا ۷۰ درصد نیاز آبی، منجر به عدم دسترسی گیاه به حداقل میزان آب لازم برای انجام فعالیت‌های متابولیکی خواهد شد. در نهایت، آبیاری در سطح ۸۵ درصد نیاز آبی، در عین عدم هدر رفت ۱۵ درصدی آب آبیاری، می‌تواند نیاز گیاه به آب را برای انجام واکنش‌های حیاتی و کلیدی به‌طور کامل برطرف کند.

طباطبایی و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که با کاهش مصرف آب به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی، عملکرد محصول گیاه فلفل دلمه‌ای به ترتیب ۲۷، ۵۱ و ۷۰ درصد و کارایی مصرف آب در این تیمارها به ترتیب ۲۲/۲۴، ۱۰/۵۶ و ۲۹/۳۵ درصد کاهش داشت. آن‌ها با توجه به معنی‌دار نبودن تفاوت میان تیمار شاهد (۱۰۰ درصد نیاز آبی) و تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی، اعمال تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی را پیشنهاد نمودند. سجادی و همکاران (۱۳۹۹) حداکثر عملکرد محصول و حداکثر کارایی مصرف آب در شرایط گلخانه‌ای در شهر گرگان در تیمار ۱۰۰ و ۸۵ درصد نیاز آبی را به‌ترتیب ۴/۱ و ۱/۵ تن در هکتار و ۵/۱ و ۲ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش کردند. در پژوهش حاضر، حداکثر عملکرد در سطح شاهد برابر با ۵/۹ تن در هکتار و حداکثر میزان کارایی مصرف آب (۱/۹ کیلوگرم در متر مکعب) در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی به دست آمد. همچنین، آن‌ها نشان دادند که با کاهش ۱۵ درصدی نیاز آبی، عملکرد محصول و بهره‌وری آب به‌ترتیب ۶۹/۶ و ۶۳/۹ درصد کاهش می‌یابد و از این رو گیاه فلفل دلمه‌ای رقم کالیفرنیا واندر را حساس به کم آبی بیان کردند.



شکل ۵- تأثیر سطوح آبیاری بر کارایی مصرف آب و عملکرد فلفل دلمه‌ای تحت شرایط گلخانه. حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنادار براساس روش توکی در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

ارزیابی پارامترهای گیاهی

نتایج تجزیه واریانس بر روی خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی گیاه فلفل دلمه‌ای در جدول (۵) نشان داده شده است. تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر کم‌آبیاری بر صفات وزن خشک بوته، تعداد گره، طول میانگره، تعداد برگ، سطح برگ، تعداد برگ و وزن تر و خشک ریشه معنی‌دار نبود. ارتفاع بوته‌های فلفل با کاهش میزان آبیاری از ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ۸۵ درصد، دچار کاهش معنی‌داری شد، اما بوته‌های آبیاری‌شده با سطوح ۸۵ و ۷۰ درصد، اختلاف معناداری از نظر این صفت با یکدیگر نداشتند. وزن تر بوته‌ها در سطح ۷۰ درصد نیاز آبی به‌ترتیب ۱۸/۰۷ و ۲۷/۷۵ درصد نسبت به سطوح ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی کاهش یافت. نتایج نشان داد که افزایش شدت کم‌آبیاری منجر به کاهش قطر ساقه در بوته‌های فلفل شد. نتایج مربوط به میزان نشت یونی و میزان پرولین آزاد حاکی از آن بود که کاهش میزان آبیاری از حد ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ۸۵ درصد، موجب قرار گرفتن بوته‌ها تحت شرایط تنش آبی نشد، چراکه میزان آسیب به غشای سلولی و همچنین واکنش دفاعی گیاه از نظر افزایش سطح پرولین آزاد در این دو سطح اختلاف معناداری نداشت، از سوی دیگر افزایش شدت کم‌آبیاری به ۷۰ درصد نیاز آبی به‌طور معناداری میزان نشت یونی و پرولین آزاد سلول‌ها را افزایش داد. همانطور که انتظار می‌رفت، کم‌آبیاری منجر به کاهش محتوای آب نسبی سلول‌ها شد، اما این کاهش فقط در سطح ۷۰ درصد نیاز آبی مشاهده شده و بین سطوح ۸۵ درصد نیاز آبی و شاهد اختلاف معناداری از این نظر مشاهده نشد. کاهش میزان آبیاری موجب افزایش رشد و حجم نهایی ریشه در بوته‌های فلفل شد.

جدول ۵- تأثیر کم‌آبیاری بر برخی از مهم‌ترین خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی فلفل دلمه‌ای تحت شرایط گلخانه

کم‌آبیاری (درصد نیاز آبی)	ارتفاع بوته (cm)	وزن تر بوته (g)	قطر ساقه (mm)	نشت یونی (٪)	محتوای آب نسبی (٪)	طول ریشه (cm)	حجم ریشه (cm^3)
۱۰۰ ٪ نیاز آبی (شاهد)	۱۶۰/۳^{a}	۳۶۴/۰^{a}	۱۳/۸^{a}	۲۲/۰^{b}	۹۰/۳۲^{a}	۵۱/۲۲^{b}	۱۳۳/۳^{b}
۸۵٪ نیاز ابی	۱۴۳^{b}	۳۲۱/۰^{a}	۱۳/۳^{ab}	۲۳/۹^{b}	۹۰/۴۴^{a}	۵۰/۴۳^{ab}	۱۲۶/۷^{b}
۷۰٪ نیاز آبی	۱۳۹^{b}	۲۶۳/۰^{b}	۱۳/۰^{b}	۲۵/۱^{a}	۷۹/۲۲^{b}	۵۵/۰۶^{a}	۱۸۰/۰^{a}
میانگین مربعات	۳۷۴/۶۷*	۵۰۶۱*	۰/۴۵*	۷/۲۰*	۰/۰۰۵۲*	۶۷/۸۳*	۲۱۴۷*
خطا	۳۲/۵۳	۸۹۹	۰/۰۸	۱/۴۸	۰/۰۰۰۴	۹/۶۷	۵۶۷
ضریب تغییرات (٪)	۷/۲۲	۱۵/۸۷	۳/۰۶	۹/۳۹	۴/۹۲	۱۲/۶۰	۱۶/۰۱

کم‌آبیاری (%FC)	سطح برگ (cm^2)	کلروفیل برگ (SPAD)	ظرفیت آنتی‌اکسیدانی (٪)	تعداد برگ	پرولین $\mu molg^{-1}FW$
۱۰۰٪ نیاز آبی (شاهد)	۱۳۵۰۲/۷^{a}	۴۶/۰^{a}	۶۱/۴^{b}	۱۶۰/۷^{a}	۸/۷۳^{c}
۸۵٪ نیاز آبی	۱۲۴۷۲/۱^{b}	۴۵/۲^{ab}	۶۳/۸^{b}	۱۵۸/۷^{b}	۱۰/۱۳^{ab}
۷۰٪ نیاز آبی	۱۲۳۸۰/۶^{b}	۴۰/۸^{b}	۷۲/۲^{a}	۱۵۸/۵^{b}	۱۷/۳^{a}
میانگین مربعات	۹۴۵۲۶۸*	۲۴/۴۲**	۱۳۶/۲*	۶۵۳/۶*	۰/۵۹
خطا	۱۳۴۳۳۸	۳/۶۹	۱۲/۵۵	۵۰/۳۴	۰/۱۱
ضریب تغییرات (٪)	۷/۸۰	۴/۲۵	۱۴/۱۳	۱۲/۳	۴/۰۲

در هر ستون، حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنادار براساس روش توکی در سطح احتمال ۵ درصد است. ns، ** و * به‌ترتیب نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار و وجود اختلاف در سطوح ۱ و ۵ درصد هستند.

آب به‌عنوان یک عنصر حیاتی برای گیاه، به‌طور مستقیم و غیرمستقیم (با تأثیر بر سطح برگ و به‌دنبال آن تأثیر بر میزان جذب نور و تبادلات گازی) نرخ فتوسنتز و در نتیجه میزان رشد و گسترش رویشی نهایی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. گیاهان در مواجهه با شرایط تنش خشکی واکنش‌های فیزیولوژیکی و متابولیکی مختلفی را از خود بروز می‌دهند. گیاهان می‌توانند با بستن روزنه‌ها منجر به حفظ محتوای آب سلول‌ها و کاهش روند ازدست‌روی آب شوند (Petrović et al., 2021) و یا با افزایش نرخ بیوسنتز آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی به مقابله با گونه‌های فعال اکسیژن و کاهش آسیب به ساختار فسفولیپیدی غشای سلولی بپردازند (Petrović et al., 2021; Ghahremani et al., 2023). در این پژوهش، افزایش معنادار سطح پرولین (به‌عنوان یک فاکتور آنتی‌اکسیدانی غیر آنزیمی) و همچنین افزایش معنادار میزان نشت یونی (که نشان از آسیب به ساختار غشاء در اثر کمبود آب و افزایش میزان بیوسنتز و سطح فعالیت رادیکال‌های آسیب‌زا دارد) در سطح آبیاری ۷۰ درصد نیاز آبی نشان از آن دارد که آبیاری بوته‌های فلفل رقم نیروین با سطح ۷۰ درصد نیاز آبی موجب

بروز علائم تنش در بوته‌ها شده و استفاده از این سطح، مناسب اعمال تکنیک کم‌آبیاری برای این رقم نخواهد بود. Abdelkhalik و همکاران (۲۰۲۰) گزارش دادند که برای اعمال تکنیک کم‌آبیاری در پرورش فلفل رقم 'Estrada' F_1 نباید از سطوح آبیاری کم‌تر از ۷۵ درصد نیاز آبی استفاده کرد، چراکه در این سطوح با وجود اینکه میزان آب مصرفی به‌طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند، اما گیاه با قرار گرفتن در شرایط تنش میزان محصول بازارپسند کمتری تولید کرده و به‌طور کلی از کارایی مصرف آب کاسته می‌شود.

مانایی شرایط تنش به‌مرور زمان موجب کاهش تبادلات گازی مرتبط با فتوسنتز (در اثر بسته شدن روزنه‌ها) و کاهش سطح دریافت‌کننده نور (در اثر چروکیدگی برگ‌ها) می‌شود که این موضوع نهایتاً منجر به کاهش نرخ آسیمیلاسیون و انرژی دردسترس برای تقسیم و رشد سلول‌های گیاهی خواهد شد (Namaki et al., 2022a; Ghahremani et al., 2023). به‌همین جهت گزارشات متعددی مبنی بر اثر منفی کم‌آبیاری بر برخی از خصوصیات رشدی گیاه از جمله ارتفاع نهایی بوته‌ها و یا ضخامت ساقه و سطح برگ‌ها منتشر شده است که با نتایج حاصل از این پژوهش در یک راستا قرار دارد. برای مثال Ghahremani و همکاران (۲۰۲۳) با اعمال تکنیک کم‌آبیاری در طی روند تولید و پرورش فلفل دلمه‌ای رقم 'Dimaz' گزارش دادند که کاهش میزان آبیاری به ۷۵ درصد نیاز آبی موجب کاهش معنادار ارتفاع بوته‌ها، ضخامت ساقه و سطح برگ شد.

همانگونه که ذکر شد، نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش میزان آبیاری از حد ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ۸۵ درصد تأثیر معناداری بر میزان رشد و گسترش ریشه بوته‌ها نداشت، اما افزایش سطح کم‌آبیاری به ۷۰ درصد نیاز آبی به‌طور معناداری منجر به افزایش طول و حجم ریشه بوته‌های فلفل شد. Namaki و همکاران (۲۰۲۲) به نتایج مشابه‌ای در طی پرورش بوته‌های مارچوبه تحت شرایط کم‌آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی دست یافتند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که میزان رشد و گسترش ریشه بوته‌های مارچوبه در اثر کاهش میزان آبیاری به‌طور معناداری افزایش یافت. آن‌ها بیان کردن که گیاهان مارچوبه با قرار گرفتن در شرایط کم‌آبیاری میزان رشد و تقسیم سلولی را در بخش ریشه افزایش داده و علاوه بر این سلول‌های ریشه دچار کشیدگی شدند. احتمالاً افزایش هوشمندانه رشد و گسترش ریشه تحت شرایط تنش با هدف نفوذ به اعماق خاک جهت دستیابی به آب‌های موجود در لایه‌های عمیق‌تر خاک صورت می‌گیرد. از سوی دیگر، Cantürk و همکاران (۲۰۲۳) اشاره کردند که افزایش حجم ریشه تحت شرایط تنش آبی، نسبت به افزایش نرخ تقسیم سلولی، بیشتر متاثر از تغییر شکل و کشیده شدن سلول‌های ریشه است. همچنین بیان کردند که افزایش حجم ریشه تنها در سطوح ضعیف‌تر از تنش آبی قابل مشاهده بوده و با افزایش سطح تنش به‌سرعت و به‌طور چشمگیری از رشد و گسترش بخش ریشه جلوگیری خواهد شد.

جدول (۶) نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به صفات مرتبط با میوه را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر فاکتور کم‌آبیاری بر صفات طول میوه، ضخامت گوشت میوه، وزن خشک میوه، ضخامت لوب میوه و اسیدیته قابل تیتراسیون معنی‌دار نبود. وزن میوه‌های تولیدشده با افزایش سطح کم‌آبیاری به‌طور معناداری کاهش یافت. از طرفی دیگر، بیشترین میزان قطر میوه در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی مشاهده شد (۶۸/۷ میلی‌متر). به‌طور کلی، می‌توان گفت که کاهش میزان آبیاری منجر به طویل‌تر شدن دم میوه‌ها شده و از ضخامت آن‌ها کاست به‌طوری که بوته‌های آبیاری شده با سطح ۷۰ درصد نیاز آبی دارای میوه‌هایی با بخش دم بلندتر و نازک‌تر نسبت به سطوح دیگر بودند.

جدول ٦- تأثیر کم‌آبیاری بر مهم‌ترین خصوصیات میوه فلفل دلمه‌ای تحت شرایط گلخانه

کم‌آبیاری (درصد نیاز آبی)	وزن میوه (g)	قطر میوه (mm)	تعداد میوه	طول دم - میوه (mm)	قطر دم میوه (mm)	تعداد لوب	حجم میوه (cm^3)	سفتی بافت (Kg/W)	کل مواد جامد محلول (%B)	ویتامین ث (mg 100 mL^{-1})
۱۰۰ ٪ نیاز آبی (شاهد)	۱۰۸/۵^{ab}	۶۱/۰^{b}	۴/۶۶^{a}	۳۰/۶^{c}	۹/۱^{ab}	۲/۸^{c}	۸۵/۸^{c}	۵/۸^{b}	۶/۲^{b}	۴۸/۲^{b}
۸۵٪ نیاز آبی	۱۲۱/۲^{a}	۶۸/۷^{a}	۳/۸۸^{b}	۳۳/۵^{b}	۹/۸^{a}	۴/۳^{a}	۱۲۷/۲^{a}	۶/۱^{a}	۶/۵^{a}	۵۰/۳^{b}
۷۰٪ نیاز آبی	۹۱/۹^{b}	۶۰/۳^{b}	۴/۳۲^{a}	۳۵/۴^{a}	۹/۱^{b}	۳/۷^{b}	۱۱۴/۵^{b}	۵/۸۷^{b}	۶/۵^{a}	۶۲/۶^{a}
میانگین مربعات	۵۱۴/۲۱**	۶۰/۱۱*	۲/۴۹	۱۴/۰۲**	۱/۳۴*	۱/۴۵**	۱۰۴۱/۲**	۰/۱۰۳**	۰/۰۸۲*	۱۸۲/۵۶**
خطا	۵۰/۵۳	۷/۷۳	۰/۶۵	۰/۵۶	۰/۴۸	۰/۰۵	۲۱/۸	۰/۰۰۴	۰/۰۰۷	۹/۷۲
ضریب تغییرات (٪)	۱۱/۶۹	۶/۸۹	۷/۴۵	۶/۷۱	۶/۹۶	۱۳/۶۰	۱۵/۱۳	۳/۴۱	۲/۵۸	۱۳/۵۶

در هر ستون، حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنادار براساس روش توکی در سطح احتمال ۵ درصد است. ns، ** و * به‌ترتیب نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار و وجود اختلاف در سطوح ۱ و ۵ درصد هستند

بیشترین میزان تعداد لوب میوه در سطح ۸۵ درصد نیاز آبی مشاهده شد که این میزان به‌ترتیب ۱۳/۹۶ و ۳۴/۸۹ درصد نسبت به سطوح ۷۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی بیشتر بود. همچنین، بیشترین میزان حجم میوه در سطح ۸۵ درصد نیاز آبی مشاهده شد که برابر با ۱۲۷/۲ سانتی‌متر مکعب بود. براساس نتایج، سفتی بافت میوه با کاهش میزان آبیاری از سطح شاهد به سطح ۸۵ درصد نیاز آبی دچار افزایش و پس از آن با افزایش شدت کم‌آبیاری به ۷۰ درصد نیاز آبی دچار کاهش شد. با اعمال تکنیک کم‌آبیاری میزان مواد جامد محلول در میوه‌های فلفل افزایش یافت و اختلاف معناداری بین سطوح ۸۵ و ۷۰ درصد نیاز آبی از نظر این صفت مشاهده نشد.

کاهش میزان وزن میوه‌ها در اثر کاهش میزان آبیاری می‌تواند عمدتاً به علت کاهش محتوای آب سلول‌های میوه باشد. نتایج مشابه‌ای در محصولات مختلف باغبانی همچون خیار (Parkash et al., 2021)، بادمجان (Cantürk et al., 2023) و گوجه (Xu et al., 2014) گزارش شده است. همچنین، فرآیندهای مرتبط با آسیمیلاسیون و تولید فرآورده‌های مرتبط با آن در گیاه به‌شدت تحت تأثیر میزان آب در دسترس سلول قرار دارد و در شرایط کمبود آب، کاهش نرخ آسیمیلاسیون سلولی به‌طور مستقیم بر میزان تولید ماده خشک در سلول‌ها و در نتیجه وزن نهایی محصول تولیدشده تأثیرگذار است (Xu et al., 2014; Khazaei et al., 2020).

به‌طور کلی، تعداد لوب میوه و همچنین سفتی بافت دو صفت مهم موثر بر عمر پس از برداشت محصول فلفل دلمه‌ای محسوب می‌شوند (Yeboah et al., 2023). میوه‌های با تعداد لوب بیشتر و همچنین با بافتی سفت‌تر، عمدتاً در برابر ضربات و فشارهای فیزیکی (همچنین بروز آلودگی‌های قارچی احتمالی پس از آسیب‌دیدگی) مقاوم‌تر بوده و به‌طور کلی از قابلیت انبارمانی بیشتر و بهتری نسبت به سایر میوه‌ها برخوردار هستند (Zhao et al., 2023). یکی از نتایج حائز توجه پژوهش حاضر، بهبود هر دو صفت مؤثر بر عمر انباری میوه‌ها در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی بود. Carrasco-Benavides و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که مصرف بهینه آب و عناصر غذایی در طول دوره رشد گیاه می‌تواند به‌طور چشمگیری طول عمر انباری محصول تولیدشده را تحت تأثیر قرار دهد. آبیاری بیش از حد و یا کاربرد افراطی برخی از عناصر غذایی مانند نیتروژن در طول دوره داشت می‌تواند عمر انباری محصول را تا دو برابر کاهش دهد. در مقابل، آبیاری به‌اندازه و کاربرد بهینه برخی از عناصر همچون پتاسیم و کلسیم در دوره پرورش می‌تواند به‌شکل مثبتی کیفیت و طول دوره انباری را تحت تأثیر قرار دهد. Şimşek و همکاران (۲۰۲۴) در نتایج پژوهش خود بر روی محصول خیار (**Cucumis sativus**) بیان داشتند که اعمال کم‌آبیاری کنترل‌شده و خفیف با جلوگیری از افزایش بیش از حد محتوای آب سلول‌ها، منجر به افزایش سفتی بافت میوه و افزایش مقاومت در برابر آسیب‌های پس از برداشت خواهد شد، که با نتایج حاصل از این پژوهش در یک راستا قرار دارد.

Vinh و همکاران (۲۰۱۸) در نتایج حاصل از پژوهش خود بر روی گیاه گوجه فرنگی گزارش دادند که علاوه بر عواملی همچون کمبود آب و کمبود کلسیم که به‌طور مستقیم می‌توانند موجب بروز عارضه پوسیدگی گلگاه در میوه گوجه‌فرنگی شوند برخی دیگر از پارامترها مانند خصوصیات دم میوه نیز می‌توانند به‌طور غیرمستقیم میزان انتقال عنصر کلسیم به داخل میوه‌ها را تحت تأثیر قرار داده و موجب تقویت و یا تضعیف این عارضه شوند. آن‌ها بیان کردند که در شرایط یکسان، میزان شیوع عارضه پوسیدگی گلگاه در میوه‌هایی که دارای دم کوتاه‌تر و قطورتر بودند به‌طور قابل ملاحظه‌ای از سایر میوه‌ها کمتر بود. با توجه به نکات ذکر شده و نتایج حاصل از این پژوهش، برخورداری بوته‌های آبیاری‌شده با سطح ۸۵ درصد نیاز آبی از میوه‌هایی با دم کوتاه‌تر و ضخیم‌تر می‌تواند به عنوان فاکتوری مثبت در جهت جلوگیری از بروز عارضه پوسیدگی گلگاه در میوه‌های فلفل محسوب شود.

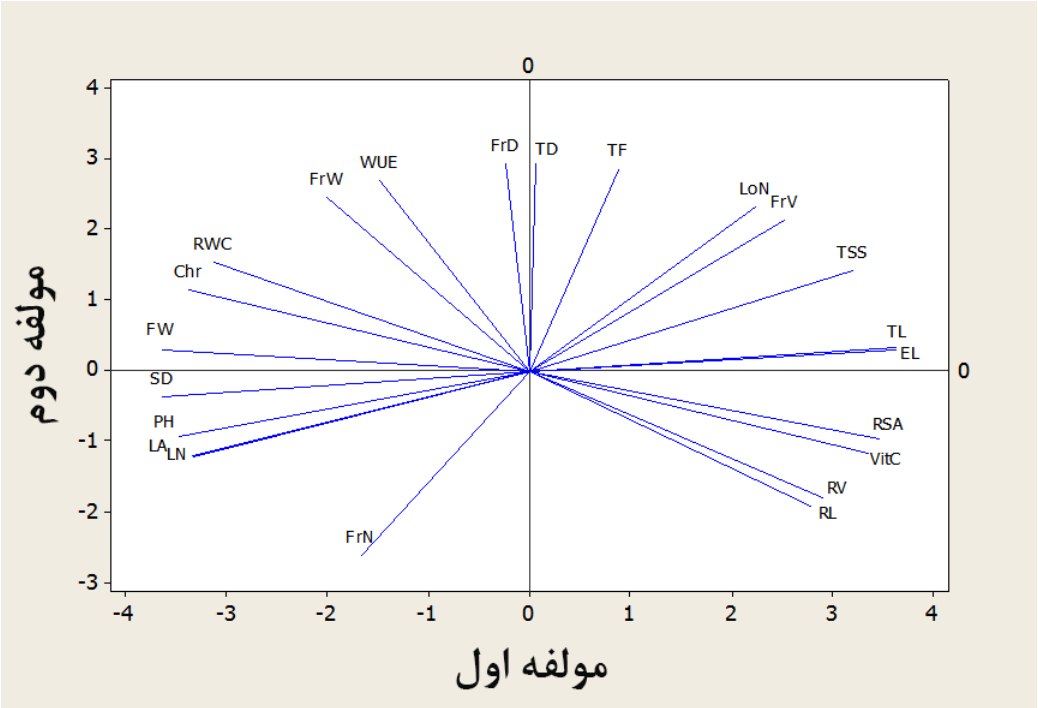
با توجه به عدم تأثیرگذاری کاهش سطح آبیاری تا ۷۰ درصد نیاز آبی بر میزان اسیدیته قابل تیتراسیون میوه‌های فلفل، شاخص طعم میوه‌ها صرفاً تحت افرایش و یا کاهش میزان کل مواد جامد محلول، دچار تغییر خواهد شد. نتایج نشان داد که میزان مواد جامد محلول میوه در بوته‌های آبیاری‌شده تحت تکنیک کم‌آبیاری به‌طور معناداری بیشتر از این صفت در بوته‌های آبیاری شده در ۱۰۰ درصد نیاز آبی بود. بنابراین، می‌توان به این مهم دست یافت که در پرورش این رقم از فلفل، کاهش سطح آبیاری از ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ۸۵ درصد از این مقدار، نه‌تنها موجب بهبود پارامترهای پس از برداشتی این محصول می‌شود، بلکه با تغییر نسبت مواد جامد محلول به محتوای آب سلول‌ها موجب بهبود طعم میوه‌ها نیز خواهد شد. درنهایت، میوه‌هایی با قابلیت انباری بالاتر و طعمی بهتر، از درجه بازارپسندی بیشتری نیز برخوردار خواهند بود که این موضوع در نهایت موجب بهبود راندمان اقتصادی تولید در عین کاهش مصرف آب خواهد شد.

آسکوربیک اسید از جمله آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی مهم در گیاه بوده که به‌طور معمول محتوای آن با قرار گرفتن گیاه در شرایط تنش‌های زنده و غیرزنده به‌تدریج در سلول‌های گیاه افزایش خواهد یافت (Khazaei et al., 2020; Khazaei and Estaji, 2020). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اعمال تنش‌های خفیف که منجر به وارد شدن آسیب‌های جدی به سلول‌ها نشود با افزایش سطح مواد فعال بیولوژیکی و آنتی‌اکسیدانی منجر به بهبود پارامترهای کیفی محصول خواهد شد (MacDonald et al., 2022). افزایش معنادار میزان ویتامین ث در میوه‌های فلفل دلمه‌ای در سطح ۷۰ درصد نیاز آبی

می‌تواند نشان از قرار گرفتن گیاه تحت شرایط تنش کم‌آبی باشد. کاهش سطح آبیاری به ۸۵ درصد نیاز آبی منجر به افزایش میزان ویتامین ث شد، اما این افزایش نسبت به سطح شاهد از نظر آماری معنادار نبود.

تجزیه روابط بین صفات

برای بررسی روابط بین صفات از تجزیه بای‌پلات براساس دو مولفه اصلی اول استفاده شد (شکل ۶) و نتایج حاکی از آن بود که بین صفات طول ریشه و حجم ریشه، محتوای ویتامین ث و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، طول دم میوه و نشت یونی، حجم و تعداد لوب میوه، محتوای آب نسبی و کلروفیل برگ، و درنهایت ارتفاع بوته، سطح برگ و تعداد برگ همبستگی مثبت، معنادار و قوی وجود دارد. از سوی دیگر، بین مجموعه صفات طول میوه، حجم میوه، ویتامین ث و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و مجموعه صفات وزن میوه، کارایی مصرف آب، محتوای نسبی آب، کلروفیل برگ و وزن تر بوته همبستگی منفی، قوی و معناداری وجود دارد. همچنین همبستگی منفی و قوی بین مجموعه صفات کل مواد جامد محلول، حجم میوه، تعداد لوب و طول و قطر دم میوه و مجموعه صفات تعداد میوه، تعداد برگ، ارتفاع بوته و قطر ساقه مشاهده شد. بررسی روابط بین صفات می‌تواند نهایتاً منجر به تشخیص ویژگی‌هایی از محصول شود که تأثیر بیشتری نسبت به سایر صفات در به‌وجود آمدن تنوع ثبت‌شده تحت شرایط تنش داشتند (Xu et al., 2023). همچنین، با ایجاد تغییر در صفات مشخص‌شده می‌توان به حصول نتیجه مطلوب دست یافت و یا سایر صفات مرتبط را تحت تأثیر قرار داد (Şimşek et al., 2024). بررسی روابط بین صفات و دسته‌بندی آن‌ها در پاسخ به یک تنش محیطی می‌تواند نتایج کاربردی و مهمی را در اختیار اصلاحگران قرار دهد (Xu et al., 2023). Mohammadi و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که با قرار گرفتن گیاه تحت شرایط تنش، به‌یکباره سطح آنتی-اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی در سلول‌ها افزایش خواهد یافت که این موضوع منجر به بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه خواهد شد، که با یافته‌های حاصل از این پژوهش مبنی بر وجود رابطه مستقیم بین محتوای ویتامین ث میوه (به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی) و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی سلول‌ها مطابقت دارد. در پژوهشی دیگر گزارش گردید که به‌طور کلی میوه‌ای با دم کوتاه‌تر در نقل و انتقال شیره خام و پرورده نسبت به میوه‌های با دم بلندتر موفق‌تر عمل کرده و بدین شکل تحت شرایط تنش معمولاً آسیب کمتری نسبت به سایر میوه‌ها متحمل می‌شوند (Vinh et al., 2018) که این گزارش با نتیجه مطالعه حاضر مبنی بر وجود رابطه مستقیم بین طول دم میوه و میزان نشت یونی در یک راستا قرار دارد.



شکل ٦- نمودار بای‌پلات مربوط به صفات مورد بررسی براساس دو مولفه اصلی اول. PH: ارتفاع گیاه، FW: وزن تر بوته، SD: قطر ساقه، EL: نشت یونی، RWC: محتوای آب نسبی، RL: طول ریشه، RV: حجم ریشه، WUE: کارایی مصرف آب، LA: سطح برگ، Chr: کلروفیل برگ، RSA: ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، LN: تعداد برگ، FrW: وزن میوه، FrD: قطر میوه، FrN: تعداد میوه، TL: طول دم میوه، TD: قطر دم میوه، LoN: تعداد لوب، FrV: حجم میوه، TF: سفتی بافت، TSS: مواد جامد محلول و VitC: ویتامین C.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج حاصل از این پژوهش، کاهش میزان آب مصرفی در پرورش فلفل دلمه‌ای رقم نیروین از حد ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ۸۵ درصد از این مقدار، نه‌تنها موجب صرفه‌جویی در میزان مصرف آب خواهد شد، بلکه موجب بهبود سطح مقاومت گیاه در برابر عوارض شایعی همچون پوسیدگی گلگاه (براساس مشخصات دم میوه) و افزایش عمر انباری میوه‌ها (براساس صفات تعداد لوب و سفتی بافت) خواهد شد. با توجه به اینکه بین عملکرد نهایی محصول در سطوح شاهد و ۸۵ درصد نیاز آبی اختلاف معناداری مشاهده نشد، استفاده از این سطح از آبیاری (۸۵ درصد) در پرورش این رقم از فلفل تحت شرایط کنترل‌شده گلخانه توصیه می‌شود. همچنین با توجه به کاهش معنادار عملکرد محصول، کاهش کارایی مصرف آب، افزایش نشت یونی و افزایش سطح فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی سلول‌ها در سطح ۷۰ درصد نیاز آبی که همگی بیانگر قرارگیری بوته‌ها تحت شرایط تنش کم‌آبی هستند، پرهیز از آبیاری بوته‌ها با این سطح در پرورش این رقم از فلفل دلمه‌ای ضروری به‌نظر می‌رسد. بررسی پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیکی رقم نیروین به سطوح آبیاری بین ۷۰ تا ۸۵ درصد نیاز آبی به‌منظور تعیین دقیق‌تر سطح بهینه آبیاری برای این محصول قابل توصیه است. نتایج نشان داد که غلظت محلول غذایی می‌تواند بر تبخیر- تعرق گیاه فلفل دلمه‌ای در گلخانه و در نتیجه میزان آب آبیاری اثرگذار باشد، از این‌رو بررسی بیشتر در خصوص نقطه بهینه کم آبیاری و غلظت محلول غذایی، در تعیین برنامه آبیاری توصیه می‌شود. همچنین، با توجه به نتایج بدست آمده از این مطالعه، اجرای پژوهش‌های مشابه بر روی سایر ارقام پر کشت و کار فلفل دلمه‌ای در ایران قابل پیشنهاد است.

منابع

حقیقی، م. و برزگر، م. ر. ۱۳۹۹. استفاده از غلظت‌های مختلف محلول غذایی در کشت فلفل دلمه‌ای در بسترهای مختلف آلی. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای. ۱۱ (۲): ۲۰-۱۳.

سجادی، ف.، هزارجزیبی، ا. و جمالی، ص. ۱۳۹۹. تاثیر سطوح مختلف آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه فلفل دلمه‌ای در گلخانه. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۱ (۴۱): ۱۲-۲۱.

سدیدی شال، س. م. ت.، یزدانی، م. ر.، امین دلدار، ز. و اسعدی اسکویی، ا. ۱۴۰۱. بررسی اثر دمای هوای استان گیلان در تعیین زمان مناسب کشت برنج. پژوهش‌های اقلیم شناسی. ۵۱: ۲۲۵-۲۱۳

شبانی، ط.، پیوست، غ. ع. و الفتی، ج. ع. ۱۳۹۰. بررسی اثر بسترهای کشت بر صفات کمی و کیفی سه رقم فلفل دلمه‌ای در سیستم کشت بدون خاک. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای. ۲ (۶): ۱۲-۲۵.

طباطبایی، س. ح.، مردانی نژاد، س. و زارع ابیانه، ح. ۱۳۹۳. اثر تنش آبی بر رشد، عملکرد و کارایی مصرف آب فلفل قلمی در شرایط گلخانه‌ای. پژوهش آب در کشاورزی. ۲۸ (۱): ۷۱-۶۳.

عابدی کوپایی، ج.، اسلامیان، س. س. و زارعیان، م. ج. ۱۳۹۰. اندازه‌گیری و مدل‌سازی نیاز آبی و ضریب گیاهی خیار، گوجه فرنگی و فلفل با استفاده از میکرولایسیمتر در گلخانه. مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای. ۲ (۷): ۶۳-۵۱.

کشاورز، س.، پیغمبری، س. ع.، زینالی خانقاه، ح.، بی‌همتا، م. ر. و حسن‌دخت، م. ر. ۱۳۹۸. مطالعه تنوع ژنتیکی برخی لاین‌های فلفل (*Capsicum annuum* L) با استفاده از تجزیه‌های آماری چندمتغیره. مجله علوم باغبانی ایران. ۵۰ (۱): ۱۲۹-۱۴۰.

Abdelkhalik, A., Pascual, B., Nájera, I., Domene, M. A., Baixauli, C. and Pascual-Seva, N. 2020. Effects of deficit irrigation on the yield and irrigation water use efficiency of drip-irrigated sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) under Mediterranean conditions. Irrigation science. 38: 89-104.

Adeoye, P.A., RAdesiji, R.A., Oloruntade. A.J. and Njemanze, C.F. 2014. Effect of irrigation intervals on growth and yield of bell pepper (*Capsicum annuum*) in a tropical semi-arid region, American Journal of Experimental Agriculture. 4(5): 515-524.

Arnon, A. N. 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. Agronomy Journal. 23 (1): 112-121.

Bates, L. S., Waldren, R. P. and Teare, I. D. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant and Soil. 39 (1): 205-207.

Bozkurt Colak, Y. 2021. Leaf water potential for surface and subsurface drip irrigated bell pepper under various deficit irrigation strategies. Chileam Journal of Agricultural Research. 81 (4): 491-506.

Cantürk, A., Cemek, B., Taşan, M. and Taşan, S. 2023. Effect of deficit irrigation on yield, water productivity, energy indices and economic productivity in eggplant cultivation. Gesunde Pflanzen. 75: 1579-1589. https://doi.org/10.1007/s10343-022-00814-z.

Carrasco-Benavides, M., Espinoza Meza, S., Olguín-Cáceres, J., Muñoz-Concha, D., von Bennewitz, E., Ávila-Sánchez, C. and Ortega-Farías, S. 2020. Effects of regulated post-harvest irrigation strategies on yield, fruit quality and water productivity in a

increasing salicylic acid biosynthesis. Post-harvest Physiology and technology. 201: 112359.

Morales-Garcia, D., Stewart, K. A. and Seguin, P. 2008. Effects of saline water on growth and physiology of bell pepper seedlings, International Journal of Vegetable Science. 14(2): 121-138. https://doi.org/10.1080/19315260801934431

Namaki, A., Ghahremani, Z., Aelaei, M. Barzegar, T. and Ranjbar, M. E. 2022a. The first report of drought tolerance assessment of Iranian asparagus. Gesunde Pflanzen. 74: 141–149. https://doi.org/10.1007/s10343-021-00596-w

Namaki, A., Ghahremani, Z., Aelaei, M., Barzegar, T. and Ranjbar, M. E. 2022b. Morpho-physiological responses of asparagus accessions to drought stress under greenhouse condition. Gesunde Pflanzen. 74: 925–934. https://doi.org/10.1007/s10343-022-00667-6.

Ningoji, S. N., Thimmegowda, M. N., Mudalagiriyappa, B. G., Vasanthi, H. S., Shivaramu, M. H. 2024. Effect of automated sensor-driven irrigation and fertigation on green pepper (*Capsicum annuum* L.) growth, phenology, quality and production, Scientia Horticulturae. 334: 113306. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113306

Parkash, V., Singh, S., Deb, S. K., Ritchie, G. L. and Wallace, R. W. 2021. Effect of deficit irrigation on physiology, plant growth, and fruit yield of cucumber cultivars. Plant Stress. 1:100004. https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100004.

Petrović, I., Savić, S., Gricourt, J., Causse, M., Jovanović, Z. and Stikić, R. 2021. Effect of long-term drought on tomato leaves: the impact on metabolic and antioxidative response. Physiology & Molecular Biology of Plants. 27 (12): 2805-2817. https://doi: 10.1007/s12298-021-01102-2.

Piri, H., Naserin, A. and Albalasmeh, A. A. 2022. Interactive effects of deficit irrigation and vermicompost on yield, quality, and irrigation water use efficiency of greenhouse cucumber. Journal of Arid Land. 14: 1274–1292. https://doi.org/10.1007/s40333-022-0035-7.

Rice, R. P., Rice, L. W. and Tindall, H. D. 1990. Fruit and vegetable production in warm climates. Macmillan Educational Corp, 496 pages.

Şimşek, O., Isak, M. A., Dönmez, D., Dalda Şekerci, A., İzgü, T. and Kaçar, Y. A. 2024. Advanced biotechnological interventions in mitigating drought stress in plants. Plants. 13: 717. https://doi.org/10.3390/plants13050717.

Singh, H., Dunn, L., Payton, B. M. and Brandenberger, L. 2019. Selection of fertilizer and cultivar of sweet pepper and eggplant for hydroponic production. Agronomy. 9 (8): 433.

drip-irrigated cherry orchard. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science. 48(2): 97–116. https://doi.org/10.1080/01140671.2020.1721544

Castilla, N., Hernández, J. and Abou-Hadid, A. F. 2004. Strategic crop and greenhouse management in mild winter climate areas. Acta Horticultural. 633: 183-196.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division (http://www.fao.org/faostat/).

Ghahremani, Z., Alizadeh, B., Barzegar, T., Nikbakht, J., Ranjbar, M. E. and Nezamdoost, D. 2023. The mechanism of enhancing drought tolerance threshold of pepper plant treated with putrescine and salicylic acid. Plant Stress. 9: 100199. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100199.

Kabir, Y. M., Nambeesan, S. U., Bautista, J. and Díaz-Pérez, J. C. 2021. Effect of irrigation level on plant growth, physiology and fruit yield and quality in bell pepper (*Capsicum annuum* L.), Scientia Horticulturae. 281: 109902. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109902.

Khazaei, Z., and Estaji, A. 2020. Effect of foliar application of ascorbic acid on sweet pepper (*Capsicum annuum*) plants under drought stress. Acta Physiolgea Plantrum. 42: 118. https://doi.org/10.1007/s11738-020-03106-z.

Khazaei, Z. and Estaji, A. 2021. Impact of exogenous application of salicylic acid on the drought-stress tolerance in pepper (*Capsicum annuum* L.). Journal of Plant Physiology and Breeding. 11 (2): 33-46.

Khazaei, Z., Esmaielpour, B. and Estaji, A. 2020. Ameliorative effects of ascorbic acid on tolerance to drought stress on pepper (*Capsicum annuum* L) plants. Physiology & Molecular Biology of Plants, 26(8): 1649-1662. https://doi: 10.1007/s12298-020-00846-7.

MacDonald, M. T., Kannan, R. and Jayaseelan, R. 2022. Ascorbic acid preconditioning effect on broccoli seedling growth and photosynthesis under drought stress. Plants (Basel). 11 (10): 1324. https://doi: 10.3390/plants11101324.

Maham. S. G., Rahimi, A., Subramanian, S. and Smith, D. L. 2020. The environmental impacts of organic greenhouse tomato production based on the nitrogen-fixing plant (*Azolla*). Journal of Cleaner Production. 45: 118679.

Marcum, K. B. 1998. Cell membrane theromotability and whole plant heat tolerance of Kentucky bluegrass. Crop Science. 38 (5): 1214-1218.

Mohammadi, M., Eghlima, Gh. and Ranjbar, M. E. 2023. Ascorbic acid reduces chilling injury in anthurium cut flowers during cold storage by

H.L. 2023. Postharvest quality improvement of bell pepper (*Capsicum annuum* L. CV Nagano) with forced-air precooling and modified atmosphere packaging. Foods**.** 12**:** 3961. https://doi.org/10.3390/foods12213961

Zakki, K. A. F. 2020. Quality of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) affected by drought condition. A thesis presented in the Messey University, Polmerston, North New Zealand.

Zeng, C., Bie, Zh. and Yuan, B. 2009. Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (Cucumis melo L.) in plastic greenhouse. Agricultural Water Management. 96 (4): 595-602. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.09.019.

Zhao, X., Joo, J.C., Du, D., Li, G. and Kim, J. Y. 2023. Modelling heavy-metal phytoextraction capacities of *Helianthus annuus* L. and *Brassica napus* L., Chemosphere. 337: 139341. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139341

Tahmasebi, A., Mirzaalian Dastjerdi, A. and Jamali, B. 2023. Microbial-based biological treatments improved the nutritional, nutraceutical and functional properties of greenhouse sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). Frontiers in Sustainable Food Systems. 7: 1145972.

Vinh, T. D., Yoshida, Y., Ooyama, M., Goto, T., Yasuba, K. and Tanaka, Y. 2018. Comparative analysis on blossom-end rot incidence in two tomato cultivars in relation to calcium nutrition and fruit growth. The Horticulture Journal. 87: 97-105.

Xu, C. and Leskovar, D. I. 2014. Growth, physiology and yield responses of cabbage to deficit irrigation. Horticultural Science. 41 (3): 138–146.

Xu, Z., Lai, X., Ren, Y., Yang, H., Wang, H., Wang, C., Xia, J., Wang, Z., Yang, Z., Geng, H., Shi, X. and Zhang, Y. 2023. Impact of drought stress on yield-related agronomic traits of different genotypes in spring wheat. Agronomy. 13: 2968. https://doi.org/10.3390/agronomy13122968

Yeboah, S., Hong, S. J., Park, Y., Choi, J. H. and Eum,

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 18, Oct.-Nov. 2024, p. 683-698

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۸، مهر - آبان ۱۴۰۳، ص. ۶۹۸-۶۸۳

Effect of Regulated Irrigation Levels on Yield of Greenhouse Bell Pepper (*Capsicum annuum* cv. Nirvin)

M. Amani Andabili[1], M. Hassanpour Asil[2], J. A. Olfati[3], M. Navabian[4]*
Recived: Jul.12, 2024 Accepted: Sep.01, 2024

Abstract

The Nirvin variety is one of Iran's most cultivated varieties of bell peppers. Still, no specific dietary and irrigation program has been determined to achieve the maximum yield and water use efficiency. To investigate the effect of defecit irrigation levels on the plant physio-morphological respons and determine the optimal irrigation for greenhouse cultivation of this variety, an experiment was conducted in a completely randomized design with three replications based on irrigation treatments of 100 (I_0), 85 (I_1) and 70 (I_2)% water requirement in the research greenhouse of the Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan in 2022-2023. Water requirement of pepper was calculated by microlysimeter that was installed in the greenhouse and irrigation treatments were applied trought irrigation time. To evaluate iirgation tratments, yield and plant's characters were measured in the experiment duration. The results showed no significant difference in final yield traits and water use efficiency between the 100 and 85% water requirement, with the reduction of irrigation to 70% water requirement, these traits decreased by 21.43, and 8.52%, respectively. The results related to the amount of ionic leakage and free proline content indicated that reducing the irrigation to 85% of the water requirement did not cause water stress in the plant. The reduction of irrigation led to an increase in the length of the fruit stems and a decrease in their thickness. The highest number of fruit lobes was observed at the 85% water requirement which was 13.96 and 34.89% more than 70 and 100% water requirement, respectively. A strong and significant negative correlation was observed between the traits of fruit length, fruit volume, vitamin C, and antioxidant capacity and the set of traits of fruit weight, water use efficiency, relative water content, leaf chlorophyll, and fresh plant weight. Based on the results of this research, changing irrigation from 100 to 85% water requirement not only saves water (15%) but also improves the plant's resistance to common problems such as blossom-end rot and increases the shelf life of the fruits. So, an 85% level of irrigation is recommended for this variety of pepper under controlled conditions.

Keywords: Controlled cultivation, Deficit irrigation, Vitamin C, Water use efficiency, Yield performance,

1- PhD Student, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
2- Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
3- Associate, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
4- Corresponding Author, Associate, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
(*- Corresponding Author Email: Navabian@guilan.ac.ir)