بررسی اثر متقابل رژیم‌های آبیاری و سطوح نیتروژن بر عملکرد، کیفیت میوه و بهره‌وری آب آبیاری لایم‌کوات

رسول اصغری[1]، داود اکبری نودهی[2*] و علی باقری[3]

۱-دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائمشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائمشهر، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائمشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائمشهر، ایران(d.akbari@iau.ac.ir)

۳- گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائمشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائمشهر، ایران.

دریافت: بازنگری: پذیرش: انتشار:

چکیده

به‌منظور بررسی اثر متقابل راهبردهای آبیاری و سطوح نیتروژن بر عملکرد، برخی ویژگی‌های کیفی میوه، شاخص کلروفیل نسبی برگ و بهره‌وری آب آبیاری لایم‌کوات، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. تیمارهای آبیاری شامل آبیاری کامل (FI)، کم‌آبیاری تنظیم‌شده با تأمین ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه (DI75 و DI50) و خشک‌کردن بخشی از ناحیه ریشه با تأمین ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه (PRD100، PRD75وPRD50) بود. سطوح نیتروژن شامل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ گرم نیتروژن خالص در ماه به‌ازای هر درخت از منبع نیترات آمونیوم در نظر گرفته شد. تعداد میوه، وزن متوسط میوه، عملکرد، بهره‌وری آب آبیاری، شاخص کلروفیل نسبی برگ (SPAD)، مواد جامد محلول کل (TSS)، اسیدیته قابل تیتراسیون (TA) و نسبت TSS/TA اندازه‌گیری شدند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی آبیاری و نیتروژن و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر تعداد میوه، وزن متوسط میوه، عملکرد، بهره‌وری آب آبیاری، SPAD، TSSو نسبت TSS/TA معنی‌دار بود، درحالی‌که اثر متقابل آبیاری و نیتروژن بر اسیدیته قابل تیتراسیون معنی‌دار نبود. بیشترین عملکرد در تیمار FI×N100 با ۷۳ کیلوگرم در هر درخت به‌دست آمد که با ۱۵۲۰ میوه در هر درخت، وزن متوسط ٤٨ گرم و SPAD برابر ۵۹ همراه بود. تیمار PRD50×N100 با عملکرد ۷۰/۹ کیلوگرم در هر درخت، اختلاف معنی‌داری با FI×N100 نداشت و با ٦١/٣ کیلوگرم بر مترمکعب، بیشترین بهره‌وری آب را نشان داد. همچنین، بیشترین TSS (۱۰/۲ درجه بریکس) و نسبت TSS/TA (۷/٤٨) در تیمار PRD50×N100 مشاهده شد. در مجموع، FI×N100 برای دستیابی به حداکثر عملکرد و PRD50×N100 برای افزایش بهره‌وری آب و حفظ عملکرد در شرایط محدودیت آب مناسب بودند. تیمار PRD50×N100 با تولید ۹۷/۱ درصد عملکرد FI×N100 می‌تواند راهبردی مناسب برای تولید پایدار لایم‌کوات در شرایط گلخانه‌ای باشد.

کلید واژه‌ها: مرکبات، تغذیه نیتروژنی، تنش خشکی، عملکرد میوه، نسبت قند به اسید

مقدمه

مرکبات از مهم‌ترین محصولات باغی مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری جهان هستند و از نظر ارزش غذایی و اقتصادی اهمیت زیادی دارند. لایم‌کوات نیز به دلیل ویژگی‌های مطلوب میوه و باردهی مناسب، از مرکبات باارزش محسوب می‌شود (Liu et al., 2012). در شرایط گلخانه‌ای، محدود بودن حجم ریشه و وابستگی بیشتر گیاه به مدیریت آب و عناصر غذایی، ضرورت استفاده از راهبردهای مناسب آبیاری و تغذیه را افزایش می‌دهد.

کمبود آب و افزایش دوره‌های خشکی از مهم‌ترین چالش‌های تولید پایدار مرکبات است. تنش آبی می‌تواند با کاهش هدایت روزنه‌ای، فتوسنتز و رشد، موجب افت عملکرد و کیفیت میوه شود (Chaves et al., 2009; Wu and Xia, 2006). ازاین‌رو، استفاده از روش‌هایی که ضمن کاهش مصرف آب، عملکرد را حفظ کنند، اهمیت زیادی دارد. یکی از این روش‌ها کم‌آبیاری تنظیم‌شده (DI)است که در آن آب کمتر از نیاز کامل گیاه و به‌صورت کنترل‌شده تأمین می‌شود. مطالعه‌ها نشان داده‌اند که پاسخ مرکبات به کم‌آبیاری به شدت و زمان اعمال تنش وابسته است و در صورت مدیریت مناسب، می‌توان ضمن صرفه‌جویی در آب، عملکرد را در سطح قابل قبول حفظ و برخی ویژگی‌های کیفی میوه را بهبود داد (Pérez-Pérez et al., 2014; García-Tejero et al., 2010).

یکی دیگر از راهبردهای پیشرفته مدیریت آب، خشک‌کردن بخشی از ناحیه ریشه (PRD) است. در این روش، تنها بخشی از ناحیه ریشه در معرض کاهش رطوبت قرار می‌گیرد و بخش دیگر ریشه با آب کافی تغذیه می‌شود. این شیوه می‌تواند ضمن حفظ بخشی از ریشه در شرایط مناسب رطوبتی، پیام‌های شیمیایی ناشی از خشک‌شدن خاک را فعال کند. یکی از مهم‌ترین سازوکارهای مطرح‌شده در PRD، تغییر در سیگنال‌های هورمونی، به‌ویژه اسید

آبسزیک (ABA)، و در نتیجه تنظیم نسبی باز و بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش تعرق است (Davies et al., 2000; Kang and Zhang, 2004). بر این اساس، PRD تلاش می‌کند میان حفظ وضعیت آبی گیاه و کاهش مصرف آب تعادل ایجاد کند. Mossad et al (2020) در یک مطالعه پنج‌ساله روی درختان پرتقال والنسیا، آبیاری متداول، PRD و کم‌آبیاری پیوسته را با یکدیگر مقایسه کردند. در این پژوهش، PRD با مصرف حدود ۵۰ درصد آب آبیاری متداول، کاهش قابل توجهی در عملکرد ایجاد نکرد، درحالی‌که کم‌آبیاری پیوسته موجب کاهش اندازه میوه و عملکرد آبمیوه شد. همچنین، PRD موجب افزایش برخی شاخص‌های کیفیت میوه و بهره‌وری آب شد. نویسندگان نتیجه گرفتند که PRD می‌تواند راهبردی پایدار برای کاهش مصرف آب در باغ‌های پرتقال باشد. مطالعه‌های انجام‌شده در ایران نیز اهمیت مدیریت کم‌آبیاری در مرکبات را نشان داده‌اند. Selgi et al (2020) با بررسی کم‌آبیاری و آبیاری بخشی ریشه در پرتقال والنسیا، تأثیر وضعیت آب بر صفات رشدی و ویژگی‌های میوه را ارزیابی کردند. این پژوهش در شرایط منطقه‌ای با محدودیت منابع آب انجام شد و نشان داد که نحوه توزیع آب در ناحیه ریشه می‌تواند در پاسخ درخت و عملکرد آن اهمیت داشته باشد. همچنین، Shahabian et al (2018) با مقایسه راهبردهای مختلف کم‌آبیاری در پرتقال، بر اهمیت انتخاب روش مناسب آبیاری برای حفظ عملکرد و افزایش بهره‌وری آب تأکید کردند. Moghbeli Damaneh et al (2018) نیز اثر کم‌آبیاری سطحی و زیرسطحی را بر رشد رویشی و عملکرد مرکبات بررسی کرده و اهمیت روش تأمین آب در تعیین پاسخ گیاه را نشان دادند.

در کنار مدیریت آب، تغذیه نیتروژنی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رشد، عملکرد و کیفیت مرکبات محسوب می‌شود. نیتروژن در تشکیل اسیدهای آمینه، پروتئین‌ها، کلروفیل و بسیاری از ترکیبات و آنزیم‌های مرتبط با رشد و فتوسنتز نقش دارد؛ ازاین‌رو، کمبود آن می‌تواند ظرفیت فتوسنتزی و تولید ماده خشک را کاهش دهد (Marschner, 2012). در مقابل، مصرف بیش از نیاز نیتروژن نیز می‌تواند موجب رشد رویشی بیش از حد، کاهش کارایی مصرف کود و افزایش احتمال تلفات نیتروژن از طریق آبشویی شود (Alva et al., 1998; Alva et al., 2006). بنابراین، تعیین سطح مناسب نیتروژن و هماهنگ کردن مصرف آن با نیاز گیاه از اصول اساسی مدیریت تغذیه‌ای مرکبات است. مطالعه‌های متعددی تأثیر نیتروژن بر عملکرد و کیفیت مرکبات را نشان داده‌اند. Alva et al (1998) در یک مطالعه روی پرتقال والنسیا، اثر مدیریت نیتروژن را بر وضعیت تغذیه‌ای درخت، عملکرد و غلظت نیترات آب زیرزمینی بررسی کردند و نشان دادند که مدیریت مناسب نیتروژن می‌تواند ضمن حفظ عملکرد، وضعیت تغذیه‌ای مطلوب‌تری ایجاد کند و از تلفات غیرضروری نیتروژن جلوگیری نماید. همچنین، Alva et al (2006) با بررسی راهکارهای مدیریت نیتروژن در مرکبات نشان دادند که میزان و نحوه مصرف نیتروژن می‌تواند عملکرد، کیفیت میوه و وضعیت تغذیه‌ای برگ را تحت تأثیر قرار دهد. Quaggio et al (2002) در یک آزمایش هفت‌ساله روی لیموترش نشان دادند که افزایش نیتروژن تا سطح بهینه موجب افزایش عملکرد شد، درحالی‌که مصرف بیش از حد آن می‌توانست برخی صفات کیفی و اندازه میوه را کاهش دهد. Xiong et al (2026) در یک مطالعه مزرعه‌ای، اثر سطوح مختلف نیتروژن بر عملکرد و کیفیت مرکبات را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مصرف متعادل نیتروژن موجب بهبود مواد جامد محلول و قندهای میوه شد، درحالی‌که مصرف بیش از حد نیتروژن با کاهش کیفیت کلی میوه و برهم‌خوردن تعادل قندها و اسیدهای آلی همراه بود. Asadi Kangarshahi و Akhlaghi Amiri (2023) با بررسی مدیریت کوددهی نیتروژن در باغ‌های مرکبات، بر ضرورت هماهنگی میزان و زمان مصرف نیتروژن با نیاز درخت و شرایط محیطی تأکید کردند. همچنین، Daghighi et al (2024) در مطالعه‌ای روی پسته نشان دادند که نوع و سطح کودهای نیتروژنه، در کنار سایر عناصر و مواد اصلاح‌کننده، می‌تواند رشد، عملکرد و رنگدانه‌های فتوسنتزی را تحت تأثیر قرار دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که پاسخ گیاه به کوددهی تنها به مقدار مصرف عنصر محدود نبوده و به شرایط رشد و تعادل سایر عوامل نیز وابسته است.

از سوی دیگر، جذب و استفاده از نیتروژن در گیاه به وضعیت آب خاک وابسته است. کاهش رطوبت خاک می‌تواند فعالیت ریشه و انتقال عناصر غذایی را محدود کرده و در نتیجه کارایی مصرف کود را کاهش دهد. بنابراین، مدیریت آب و نیتروژن را نمی‌توان به‌صورت کاملاً مستقل از یکدیگر بررسی کرد. Alva et al (2003) بر اهمیت هماهنگی مدیریت آبیاری و نیتروژن در تولید مرکبات تأکید کردند و نشان دادند که تنظیم هم‌زمان این دو نهاده می‌تواند ضمن حفظ تولید، کارایی مصرف آب و نیتروژن را افزایش دهد. این موضوع در شرایط گلخانه‌ای که حجم محیط ریشه محدود است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. شواهد موجود در سایر محصولات باغی نیز از وجود ارتباط بین آب و تغذیه حمایت می‌کنند Sun et al (2022) با بررسی هم‌زمان آبیاری و کوددهی در انبه نشان دادند که تنظیم مقدار آب و کود در مراحل مختلف رشد می‌تواند عملکرد، کیفیت میوه و بهره‌وری مصرف آب و کود را بهبود دهد. همچنین، Alva et al (2006) نشان دادند که مدیریت مناسب نیتروژن در مرکبات می‌تواند بر عملکرد، کیفیت میوه و وضعیت تغذیه‌ای برگ اثرگذار باشد. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت هم‌زمان آب و نیتروژن برای بهبود عملکرد و کیفیت مرکبات تأکید دارند.

بنابراین، سطح مطلوب نیتروژن ممکن است تحت شرایط آبیاری کامل با شرایط کم‌آبیاری یکسان نباشد. از میان مطالعه‌های مستقیم‌تر در زمینه برهم‌کنش آب و نیتروژن در مرکبات، Romero- Trigueros et al (2014) اثر کم‌آبیاری تنظیم‌شده و کوددهی نیتروژن را بر فیزیولوژی و بهره‌وری درختان مرکبات بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که پاسخ فیزیولوژیک

و تولیدی درخت به محدودیت آب با وضعیت تغذیه نیتروژن ارتباط دارد و مدیریت هم‌زمان دو نهاده می‌تواند برای حفظ بهره‌وری و عملکرد اهمیت داشته باشد. این یافته از این دیدگاه حمایت می‌کند که برای ارزیابی راهبردهای کم‌آبیاری، توجه هم‌زمان به وضعیت تغذیه‌ای گیاه ضروری است. Chen et al (2026) با بررسی هم‌زمان سطوح مختلف کم‌آبیاری و کوددهی در مراحل مختلف رشد مرکبات نشان دادند که تنظیم هماهنگ آب و عناصر غذایی می‌تواند بهره‌وری آب و کود را افزایش داده و در عین حال عملکرد و کیفیت میوه را در سطح مطلوب حفظ کند. نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که پاسخ مرکبات به مدیریت آب و کود در مراحل مختلف رشد متفاوت است و تنظیم هم‌زمان این دو نهاده می‌تواند به بهبود ویژگی‌های کیفی میوه، از جمله مواد جامد محلول و ویتامین C، منجر شود.

با وجود مطالعه‌های متعدد درباره کم‌آبیاری، PRD یا تغذیه نیتروژنی در مرکبات، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های انجام‌شده روی درختان بالغ باغی و ارقامی مانند پرتقال و گریپ‌فروت متمرکز بوده است. در مقابل، اطلاعات مربوط به پاسخ لایم‌کوات به ترکیب سطوح مختلف آبیاری و نیتروژن، به‌ویژه در شرایط گلخانه‌ای و محیط ریشه محدود، همچنان محدود است. از سوی دیگر، بسیاری از پژوهش‌ها یکی از دو عامل آب یا نیتروژن را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند و اطلاعات مربوط به اثر متقابل شدت و روش کم‌آبیاری با سطوح مختلف نیتروژن بر عملکرد، کیفیت میوه، وضعیت کلروفیل برگ و بهره‌وری آب در لایم‌کوات کافی نیست. با توجه به اهمیت افزایش بهره‌وری آب در تولید مرکبات و نقش تعیین‌کننده نیتروژن در حفظ ظرفیت فتوسنتزی و تولیدی گیاه، شناخت پاسخ لایم‌کوات به مدیریت هم‌زمان این دو نهاده می‌تواند در تدوین راهبردهای تولید پایدار اهمیت داشته باشد. به‌ویژه، مشخص نیست که آیا افزایش سطح نیتروژن در شرایط محدودیت آب می‌تواند بخشی از اثرات منفی کم‌آبی را جبران کرده و ضمن حفظ عملکرد، کیفیت میوه و بهره‌وری آب را بهبود دهد. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات اصلی و متقابل راهبردهای مختلف آبیاری و سطوح نیتروژن بر تعداد میوه، وزن متوسط میوه، عملکرد، ویژگی‌های کیفی میوه، شاخص کلروفیل نسبی برگ (SPAD) و بهره‌وری آب آبیاری لایم‌کوات در شرایط گلخانه‌ای و شناسایی مناسب‌ترین ترکیب تیمارهای آبیاری و نیتروژن برای حفظ عملکرد و افزایش بهره‌وری آب آبیاری انجام شد.

مواد و روش‌ها

محل اجرای آزمایش

این پژوهش در سال ۱۴۰۴ در یک گلخانه تجاری تولید مرکبات واقع در روستای خرماکلا، شهرستان قائم‌شهر، استان مازندران، اجرا شد. آزمایش بر روی درختان پنج‌ساله لایم‌کوات (Citrus × floridana) انجام گرفت. گلخانه دارای مساحتی حدود ۱۰۰۰ مترمربع بود و درختان با فاصله کاشت ۳ × ۲ متر در بستر خاکی گلخانه مستقر بودند. در طول دوره اجرای آزمایش، کلیه عملیات مدیریتی شامل کنترل آفات و بیماری‌ها، مدیریت علف‌های هرز، هرس و سایر عملیات باغی، به‌صورت یکنواخت در تمامی واحدهای آزمایشی انجام شد تا اختلافات مشاهده‌شده در صفات مورد بررسی، عمدتاً ناشی از اعمال تیمارهای آبیاری و نیتروژن باشد.

طرح آزمایشی و تیمارها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با سه تکرار اجرا شد. عوامل آزمایشی شامل شش سطح مدیریت آبیاری و سه سطح نیتروژن بودند؛ بنابراین، در مجموع ۱۸ ترکیب تیماری از اثر متقابل دو عامل مورد بررسی قرار گرفت. هر واحد آزمایشی شامل پنج درخت بود. به‌منظور کاهش اثرات حاشیه‌ای، اندازه‌گیری صفات مورد بررسی بر روی سه درخت میانی هر واحد آزمایشی انجام شد.

عامل اول شامل شش سطح مدیریت آبیاری به شرح زیر بود:

۱- آبیاری کامل (FI)

۲- کم‌آبیاری تنظیم‌شده با تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه (DI75)

۳- کم‌آبیاری تنظیم‌شده با تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه (DI50)

۴- خشک‌کردن بخشی از ناحیه ریشه با تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (PRD100)

۵- خشک‌کردن بخشی از ناحیه ریشه با تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه (PRD75)

۶- خشک‌کردن بخشی از ناحیه ریشه با تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه (PRD50)

عامل دوم شامل سه سطح نیتروژن بود که به‌ترتیب معادل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ گرم نیتروژن خالص در ماه به‌ازای هر درخت در نظر گرفته شدند و با عناوین N50 ، N75و N100 مشخص شدند.

مدیریت آبیاری

آبیاری درختان با استفاده از سامانه آبیاری قطره‌ای مجهز به دو نوار تیپ در دو طرف هر ردیف انجام شد. نوارهای تیپ دارای فاصله قطره‌چکان ۳۰ سانتی‌متر و دبی اسمی ۱/۶ لیتر در ساعت بودند. فاصله زمانی بین نوبت‌های آبیاری در تمامی تیمارها هفت روز در نظر گرفته شد و حجم آب مصرفی هر تیمار با تنظیم مدت زمان کارکرد سامانه آبیاری کنترل گردید.

حجم آب مورد نیاز در تیمار آبیاری کامل (FI) بر اساس تغییرات رطوبت خاک و با استفاده از روش وزنی تعیین شد. پیش از هر نوبت آبیاری، نمونه‌های خاک از عمق ۰–۳۰ سانتی‌متری ناحیه توسعه ریشه برداشت و پس از انتقال به آزمایشگاه، وزن تر نمونه‌ها تعیین شد. سپس نمونه‌ها در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. رطوبت وزنی خاک بر اساس اختلاف وزن تر و خشک نمونه‌ها محاسبه شد. حجم آب مورد نیاز در تیمار FI با هدف رساندن رطوبت خاک به ظرفیت زراعی (FC) و با در نظر گرفتن رطوبت فعلی خاک، نقطه پژمردگی دائم (PWP)

و وزن مخصوص ظاهری خاک تعیین شد. بر این اساس، حجم آب مورد نیاز هر نوبت آبیاری متناسب با میزان کاهش رطوبت خاک نسبت به ظرفیت زراعی محاسبه و اعمال شد. در تیمارهای کم‌آبیاری تنظیم‌شده، به‌ترتیب ۷۵ و ۵۰ درصد حجم آب مصرفی تیمار FI اعمال شد. در تیمارهای خشک‌کردن بخشی از ناحیه ریشه (PRD)، دو نوار تیپ مستقر در دو طرف ردیف به‌صورت متناوب مورد استفاده قرار گرفتند؛ به‌گونه‌ای که در هر نوبت آبیاری تنها یکی از نوارها فعال بود و در نوبت بعد، تأمین آب به نوار واقع در سمت مقابل منتقل می‌شد. بدین‌ترتیب، بخش‌های مختلف ناحیه ریشه به‌صورت متناوب در معرض شرایط رطوبتی متفاوت قرار گرفتند.

محاسبه حجم آب مورد نیاز

حجم آب مورد نیاز پیش از هر نوبت آبیاری بر اساس کسری رطوبت خاک نسبت به ظرفیت زراعی محاسبه شد. رطوبت خاک پیش از هر نوبت آبیاری در دو عمق ۰–۳۰ و ۳۰–۶۰ سانتی‌متر به روش وزنی اندازه‌گیری شد و میانگین رطوبت اندازه‌گیری‌شده در این دو لایه به‌عنوان رطوبت نماینده ناحیه ریشه در نظر گرفته شد. با توجه به توزیع ریشه در پروفیل خاک و به‌منظور برآورد حجم خاک تحت تأثیر آبیاری، عمق مؤثر ناحیه ریشه ۴۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

حجم آب مورد نیاز پیش از هر نوبت آبیاری بر اساس اختلاف بین رطوبت خاک در ظرفیت زراعی و رطوبت اندازه‌گیری‌شده پیش از آبیاری، با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی خاک، محاسبه شد (رابطه ۱).

$$V = (\theta_{fc} - \theta_i) \times BD \times D \times A \qquad (۱)$$

که در آن V حجم آب مورد نیاز، θ_i رطوبت خاک پیش از آبیاری و A سطح مورد نظر است.

در تیمار FI، کل کسری رطوبت خاک تا ظرفیت زراعی جبران شد؛ در DI75 و DI50، به‌ترتیب ۷۵ و ۵۰ درصد کسری رطوبت جبران گردید. در تیمارهای PRD نیز محاسبات بر اساس وضعیت رطوبتی بخش مورد آبیاری انجام شد و به‌ترتیب ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد کسری رطوبت در PRD100، PRD75 و PRD50 جبران گردید. مدت کارکرد نوار تیپ بر اساس حجم آب محاسبه‌شده و دبی سامانه تنظیم و حجم واقعی آب اعمال‌شده با استفاده از کنتورهای مستقل ثبت شد.

با توجه به تغییر رطوبت خاک، حجم آب مصرفی در نوبت‌های مختلف ثابت نبود. حجم کل آب مصرفی هر تیمار از مجموع آب اعمال‌شده در ۲۵ نوبت آبیاری به‌دست آمد، سپس حجم آب به‌ازای هر درخت با استفاده از تراکم کاشت به مترمکعب در هکتار (m^3 ha^{-1}) تبدیل شد. عمق معادل آب آبیاری نیز بر اساس حجم آب مصرفی در واحد سطح محاسبه و به میلی‌متر (mm) بیان گردید. درصدهای ۷۵ و ۵۰ در تیمارهای DI و PRD بیانگر درصد جبران کسری رطوبت در هر نوبت آبیاری بودند و نه درصد حجم تجمعی آب مصرفی نسبت به FI، ازاین‌رو، این مقادیر لزوماً با نسبت حجم کل آب مصرفی تیمارها در پایان دوره آزمایش یکسان نیستند. حجم کل آب مصرفی و عمق معادل آب آبیاری در تیمارهای مختلف طی دوره آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است. به‌طور کلی، تعیین حجم آب آبیاری بر اساس رطوبت واقعی خاک، امکان اعمال دقیق‌تر تیمارهای آبیاری و مقایسه میزان آب مصرفی در رژیم‌های مختلف را فراهم کرد. ثبت حجم آب اعمال‌شده در هر نوبت و محاسبه مصرف تجمعی در پایان دوره نیز مبنایی برای ارزیابی تفاوت تیمارها از نظر مصرف آب و بررسی پاسخ گیاه به سطوح مختلف آبیاری بود.

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب و خاک

به‌منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش، پیش از اعمال تیمارها، نمونه‌برداری از دو عمق ۰–۳۰ و ۳۰–۶۰ سانتی‌متری انجام شد. نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه از نظر ویژگی‌های فیزیکی شامل بافت خاک، ظرفیت زراعی (FC)، نقطه پژمردگی دائم (PWP) و وزن مخصوص ظاهری (BD) و ویژگی‌های شیمیایی شامل اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، نیتروژن کل، فسفر قابل جذب و پتاسیم قابل تبادل بررسی شدند. بافت خاک با روش هیدرومتری تعیین و بر اساس مثلث بافت خاک طبقه‌بندی شد. ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم برای تعیین دامنه رطوبت قابل استفاده گیاه و وزن مخصوص ظاهری برای محاسبه حجم آب مورد نیاز آبیاری به کار رفتند. ویژگی‌های شیمیایی خاک نیز برای توصیف وضعیت اولیه محیط رشد بررسی شدند. نتایج در جدول (۲) ارائه شده‌اند. خاک در هر دو عمق دارای بافت لوم شنی بود و مقادیر pH نشان‌دهنده واکنش قلیایی خاک بود. ظرفیت زراعی در عمق‌های ۰–۳۰ و ۳۰–۶۰ سانتی‌متری به‌ترتیب ۲۴/۸ و ۲۳/۵ درصد، نقطه پژمردگی دائم به‌ترتیب ۱۱٫۸ و ۱۲٫۳ درصد و وزن مخصوص ظاهری به‌ترتیب ۱/۳۵ و ۱/۴۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. هدایت الکتریکی خاک نیز به‌ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۸۹ دسی‌زیمنس بر متر ثبت شد. آب آبیاری از چاه تأمین شد و ویژگی‌های کیفی آن در جدول (۳) ارائه شده‌اند. هدایت الکتریکی آب ۰/۷ دسی‌زیمنس بر متر، pH برابر با ۷٫۱، کل مواد جامد محلول ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و نسبت جذب سدیم (SAR)برابر با ۱٫۲ بود. هدایت الکتریکی و کل مواد جامد محلول به‌عنوان شاخص‌های میزان املاح محلول آب و نسبت جذب سدیم به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی وضعیت نسبی سدیم در مقایسه با کلسیم و منیزیم در نظر گرفته می‌شوند. از نظر کاربردی، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و وزن مخصوص ظاهری در برآورد کسری رطوبت خاک و تنظیم حجم آب آبیاری نقش داشتند، همچنین، بافت خاک در تفسیر ویژگی‌های نگهداری و حرکت آب در ناحیه ریشه اهمیت دارد. از سوی دیگر، pH و هدایت الکتریکی خاک و ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری، اطلاعاتی درباره شرایط شیمیایی محیط رشد فراهم می‌کنند.

جدول ۱- حجم و عمق آب آبیاری در تیمارهای مختلف طی دوره آزمایش

Table 1- Total irrigation water volume and irrigation depth under different irrigation treatments during the experimental period

(Irrigation treatment)	(Soil moisture deficit replacement level)	(Number of irrigation events)	(Total irrigation water applied) (m^3 ha^{-1})	(Total irrigation depth) (mm)
FI	100%	25	2075.4	207.5
DI75	75%	25	1795.3	179.5
DI50	50%	25	1593.0	159.3
PRD100	100%	25	2143.9	214.3
PRD75	75%	25	1838.7	183.8
PRD50	50%	25	1586.8	158.7

جدول۲ - خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 2- Physical and chemical characteristics of soil samples at the experimental site

Soil depth (cm)	Soil texture	Field capacity (FC) (%)	Permanent wilting point (PWP) (%)	Bulk density (BD) (g cm^{-3})	pH	Electrical conductivity (EC) (dS m^{-1})	Total nitrogen (N) (%)	Available phosphorus (P) (mg kg^{-1})	Available potassium (K) (mg kg^{-1})
0–30	Sandy Loam	24.8	11.8	1.35	8.4	0.78	0.03	2.8	232
30–60	Sandy Loam	23.5	12.3	1.42	8.2	0.89	0.03	2.1	210

جدول۳-ویژگی‌های شیمیایی آب مورد استفاده برای آبیاری لیموترش

Table 3- Chemical characteristics of the water used for lemon irrigation

Parameter	pH	EC (dS m^{-1})	TDS (mg L^{-1})	HCO_3^- (meq L^{-1})	Cl^- (meq L^{-1})	SO_4^{2-} (meq L^{-1})	Ca^{2+} (meq L^{-1})	Mg^{2+} (meq L^{-1})	Na^+ (meq L^{-1})	SAR
Value	7.1	0.7	450	2.5	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	1.2

در کنار مقادیر نیتروژن کل، فسفر قابل جذب و پتاسیم قابل تبادل خاک، این شاخص‌ها برای توصیف شرایط اولیه آزمایش و تفسیر پاسخ گیاه به رژیم‌های آبیاری و سطوح مختلف نیتروژن مورد توجه قرار گرفتند.

مدیریت نیتروژن و کودآبیاری

تیمارهای نیتروژن شامل N50، N75 و N100 بودند که به‌ترتیب معادل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ گرم نیتروژن خالص در ماه به‌ازای هر درخت در نظر گرفته شدند. نیتروژن مورد نیاز تیمارها از طریق کودآبیاری و با استفاده از نیترات آمونیوم (NH_4NO_3) با حدود ۳۴ درصد نیتروژن تأمین شد. مقدار نیترات آمونیوم مورد نیاز برای تأمین سطوح N50، N75 و N100، بر اساس درصد نیتروژن موجود در کود، به‌ترتیب حدود ۱۴۷، ۲۲۱ و ۲۹۴ گرم در ماه به‌ازای هر درخت محاسبه شد. مقدار کود مورد نیاز هر سطح در چند نوبت طی ماه تقسیم شد و پس از حل شدن در آب، از طریق سامانه کودآبیاری وارد شبکه آبیاری قطره‌ای شد. زمان‌بندی و تعداد نوبت‌های کودآبیاری در تمامی تیمارها یکسان بود و تنها مقدار کود متناسب با سطح نیتروژن تغییر کرد. اعمال تیمارهای آبیاری و نیتروژن از ابتدای تیرماه آغاز شد و تا زمان برداشت نهایی میوه در دی‌ماه ادامه یافت. در طول دوره آزمایش، سایر عملیات مدیریتی، از جمله کنترل آفات و بیماری‌ها، مدیریت علف‌های هرز و سایر عملیات باغی، در تمامی تیمارها به‌صورت یکسان انجام شد.

اندازه‌گیری صفات عملکردی

در زمان برداشت نهایی، میوه‌های تولیدشده از سه درخت میانی هر واحد آزمایشی به‌صورت جداگانه برداشت و صفات عملکردی اندازه‌گیری شدند. تعداد میوه‌های هر درخت با شمارش مستقیم ثبت شد. سپس وزن کل میوه‌های برداشت‌شده از هر درخت با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری و به‌عنوان عملکرد میوه، بر حسب کیلوگرم در هر درخت، ثبت شد. به‌منظور تعیین وزن متوسط میوه، پنج میوه سالم و یکنواخت از هر واحد آزمایشی به‌صورت تصادفی انتخاب و وزن هر میوه به‌طور جداگانه اندازه‌گیری شد. میانگین وزن پنج میوه به‌عنوان وزن متوسط میوه در نظر گرفته شد و بر حسب گرم گزارش گردید. بنابراین، صفات عملکردی مورد بررسی شامل

تعداد میوه در هر درخت، وزن متوسط میوه (گرم) و عملکرد میوه (کیلوگرم در درخت) بودند.

اندازه‌گیری صفات کیفی میوه

پس از برداشت نهایی، تعدادی میوه سالم و یکنواخت از سه درخت میانی هر واحد آزمایشی به‌صورت تصادفی انتخاب و پس از انتقال به آزمایشگاه، شست‌وشو و آماده‌سازی شدند. سپس عصاره میوه تهیه و برای اندازه‌گیری مواد جامد محلول کل (TSS)، اسیدیته قابل تیتراسیون (TA) و نسبت TSS/TA مورد استفاده قرار گرفت. مواد جامد محلول کل (TSS) با استفاده از رفراکتومتر دیجیتال اندازه‌گیری شد. پیش از اندازه‌گیری، دستگاه با آب مقطر کالیبره شد و نتایج بر حسب درجه بریکس (°Brix) گزارش گردید. اسیدیته قابل تیتراسیون (TA) با تیتراسیون عصاره میوه در برابر محلول استاندارد هیدروکسید سدیم (NaOH) تعیین شد و نتایج بر اساس درصد اسید سیتریک بیان گردید. نسبت TSS/TA نیز به‌عنوان شاخصی از تعادل بین مواد جامد محلول و اسیدیته میوه، از تقسیم مقدار مواد جامد محلول کل بر اسیدیته قابل تیتراسیون محاسبه شد. بنابراین، صفات کیفی مورد بررسی شامل مواد جامد محلول کل (°Brix)، اسیدیته قابل تیتراسیون (٪) و نسبت TSS/TAبودند.

اندازه‌گیری شاخص کلروفیل نسبی برگ(SPAD)

به‌منظور بررسی پاسخ فیزیولوژیک درختان لایم‌کوات به رژیم‌های مختلف آبیاری و سطوح نیتروژن، شاخص کلروفیل نسبی برگ (SPAD) اندازه‌گیری شد. شاخص SPAD روشی سریع و غیرمخرب برای برآورد نسبی محتوای کلروفیل برگ و ارزیابی وضعیت نیتروژن گیاه است (Markwell et al., 1995; Uddling et al., 2007).

از هر واحد آزمایشی، ۱۰ برگ سالم، کاملاً توسعه‌یافته و هم‌سن از بخش میانی تاج درخت و شاخه‌های دارای رشد فعال، به‌صورت تصادفی انتخاب شد. اندازه‌گیری شاخص SPAD با استفاده از کلروفیل‌متر Minolta SPAD-502 (Konica Minolta, Japan) انجام گرفت. قرائت‌ها در بخش میانی پهنک برگ و در فاصله‌ای مناسب از رگبرگ اصلی انجام شد تا اثر رگبرگ بر اندازه‌گیری کاهش یابد. در نهایت، میانگین قرائت‌های ۱۰ برگ به‌عنوان مقدار شاخص SPAD هر واحد آزمایشی در نظر گرفته شد.

محاسبه بهره‌وری آب آبیاری

بهره‌وری آب آبیاری (IWP) به‌صورت نسبت عملکرد تازه میوه به حجم کل آب آبیاری مصرف‌شده طی دوره آزمایش محاسبه شد. حجم آب آبیاری مصرفی هر تیمار در طول دوره آزمایش با استفاده از کنتورهای مستقل اندازه‌گیری و در هر نوبت آبیاری ثبت شد. سپس مجموع حجم آب مصرفی برای هر واحد آزمایشی محاسبه و در تعیین بهره‌وری آب آبیاری مورد استفاده قرار گرفت. بهره‌وری آب آبیاری از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$IWP = Y/I \quad (۲)$$

که در آن: IWP بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y: کل عملکرد تازه قابل‌برداشت (کیلوگرم) و I: حجم کل آب آبیاری مصرف‌شده (متر مکعب) است. محاسبات بهره‌وری آب نیز بر اساس عملکرد و حجم آب مصرفی در هکتار انجام گرفت. مقدار نهایی بهره‌وری آب آبیاری بر حسب کیلوگرم میوه تازه به ازای هر مترمکعب آب آبیاری ($kg\ m^{-3}$) بیان شد (Latrech et al., 2019).

تجزیه آماری

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری صفات عملکردی، ویژگی‌های کیفی میوه، شاخص کلروفیل نسبی برگ (SPAD) و بهره‌وری آب آبیاری با استفاده از نرم‌افزار MSTAT-C تجزیه‌وتحلیل آماری شدند. به‌منظور بررسی اثرات اصلی رژیم آبیاری و سطوح نیتروژن و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر صفات مورد مطالعه، تجزیه واریانس (ANOVA) بر اساس طرح فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) انجام شد. در صورت معنی‌دار بودن اثر اصلی یا اثر متقابل در سطح احتمال پنج درصد ($P \leq 0.05$)، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن (DMRT) در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت. برای صفاتی که اثر متقابل آبیاری × نیتروژن معنی‌دار بود، مقایسه میانگین ترکیب‌های تیماری انجام و نتایج بر اساس اثر متقابل دو عامل تفسیر شد. در مواردی که اثر متقابل معنی‌دار نبود، مقایسه و تفسیر نتایج بر اساس اثرات اصلی عوامل آبیاری و نیتروژن انجام گرفت. گروه‌بندی میانگین‌ها با حروف انگلیسی انجام شد. به‌گونه‌ای که میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس صفات مورد بررسی تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و سطوح نیتروژن

به‌منظور بررسی اثرات اصلی رژیم‌های آبیاری و سطوح نیتروژن و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر صفات عملکردی، ویژگی‌های کیفی میوه، شاخص کلروفیل نسبی برگ (SPAD) و بهره‌وری آب آبیاری لایم‌کوات، داده‌های حاصل از آزمایش تجزیه واریانس شدند. نتایج تجزیه واریانس در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ٤- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و سطوح نیتروژن

Table 4- Analysis of variance of measured traits affected by irrigation treatments and nitrogen levels

Source of variation	df	Fruit number	Average fruit weight	Fruit yield	Irrigation water productivity (WP)	SPAD	TSS	TA	TSS/TA
Replication	2	8750 ns	2.3 ns	8.4 ns	3.8 ns	4.2 ns	0.08 ns	0.06 ns	0.004 ns
Irrigation (I)	5	184500**	10.6*	598.7**	502.5**	152.8**	5.12**	0.87*	0.235**
Nitrogen (N)	2	65800**	20.3*	265.0**	79.8*	98.4**	1.56*	0.18 ns	0.061*
I × N	10	24500*	6.5*	89.4**	72.1**	26.7*	0.59*	0.12 ns	0.026*
Error	34	9150	2.2	15.3	9.1	6.1	0.11	0.12	0.008
CV (%)	–	11.8	3.2	9.4	8.3	5.7	4.6	5.9	7.3

ns: Not significant; *: Significant at the 5% probability level ($P \leq 0.05$); **: Significant at the 1% probability level ($P \leq 0.01$).

بر اساس نتایج جدول (۴)، اثر اصلی تیمارهای آبیاری بر تعداد میوه، وزن متوسط میوه، عملکرد میوه، بهره‌وری آب آبیاری، شاخص کلروفیل نسبی برگ (SPAD)، مواد جامد محلول کل (TSS)، اسیدیته قابل تیتراسیون (TA) و نسبت TSS/TA معنی‌دار بود. این نتایج نشان می‌دهد که هم مقدار آب مصرفی و هم الگوی توزیع آب در ناحیه ریشه، بر پاسخ‌های کمی، کیفی و فیزیولوژیک لایم‌کوات اثرگذار بوده است. اثر اصلی نیتروژن نیز بر تعداد میوه، وزن متوسط میوه، عملکرد میوه، بهره‌وری آب آبیاری، SPAD، TSSو نسبت TSS/TA معنی‌دار بود، درحالی‌که اثر آن بر TA معنی‌دار نشد.

این نتیجه نشان می‌دهد که پاسخ برخی صفات لایم‌کوات به افزایش سطح نیتروژن، مستقل از تغییرات اسیدیته قابل تیتراسیون بوده است. همچنین، اثر متقابل آبیاری × نیتروژن برای تعداد میوه، وزن متوسط میوه، عملکرد میوه، بهره‌وری آب آبیاری، SPAD، TSSو نسبت TSS/TA معنی‌دار بود، اما برای TA معنی‌دار نشد.

بنابراین، پاسخ لایم‌کوات به سطوح نیتروژن برای بیشتر صفات به وضعیت تأمین آب وابسته بود و تفسیر این صفات بر اساس ترکیب تیماری آبیاری × نیتروژن انجام شد. در مقابل، TAبر اساس اثر اصلی آبیاری تفسیر شد. معنی‌دار شدن اثر آبیاری بر صفات مورد بررسی را می‌توان با نقش اساسی وضعیت آب گیاه در تنظیم رشد، توسعه میوه و فرایندهای فیزیولوژیک مرتبط دانست. کاهش دسترسی به آب معمولاً از طریق کاهش هدایت روزنه‌ای، محدود شدن تبادل گازی و فتوسنتز و در نتیجه کاهش رشد و توسعه اندام‌های گیاه بر تولید اثر می‌گذارد (Taiz et al., 2023). از سوی دیگر، نیتروژن از طریق نقش در تشکیل کلروفیل، پروتئین‌ها و سایر ترکیبات مرتبط با رشد و فتوسنتز، می‌تواند بر ظرفیت تولیدی گیاه اثرگذار باشد (Marschner, 2012).

در راهبرد PRD، علاوه بر حجم کل آب مصرفی، نحوه توزیع آب در ناحیه ریشه نیز تغییر می‌کند. خشک شدن متناوب بخشی از ناحیه ریشه ممکن است پیام‌های ریشه‌ای و تنظیم روزنه‌ای را تحت تأثیر قرار دهد (Davies et al., 2002; Kang and Zhang, 2004). بااین‌حال، از آنجا که شاخص‌هایی مانند ABA، هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز در پژوهش حاضر مستقیماً اندازه‌گیری نشدند، این موارد صرفاً می‌توانند به‌عنوان سازوکارهای احتمالی برای توضیح پاسخ مشاهده‌شده مطرح شوند. در مجموع، معنی‌دار بودن اثر متقابل آبیاری و نیتروژن در بیشتر صفات نشان داد که انتخاب سطح مناسب نیتروژن بدون توجه به رژیم آبیاری نمی‌تواند به‌تنهایی راهبرد بهینه مدیریت را مشخص کند.

اثر متقابل آبیاری و نیتروژن بر صفات عملکردی

با توجه به معنی‌دار بودن اثر متقابل آبیاری × نیتروژن بر تعداد میوه، وزن متوسط میوه، عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری، مقایسه میانگین ترکیب‌های تیماری با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد (جدول ۵ و شکل ۱).

بیشترین تعداد میوه، برابر با ۱۵۲۰ عدد در هر درخت، در تیمار FI×N100 مشاهده شد و در بالاترین گروه آماری قرار گرفت. در این رژیم، افزایش سطح نیتروژن از N50 به N100 با افزایش تعداد میوه از ۱۳۲۰ به ۱۵۲۰ عدد در هر درخت همراه بود. کمترین تعداد میوه، برابر با ۹۰۰ عدد در هر درخت، در تیمار DI50×N50 ثبت شد. در مقابل، در تیمار PRD50، تعداد میوه در سطوح N75 و N100 به‌ترتیب به ۱۴۸۰ و ۱۵۱۰ عدد در هر درخت رسید که از حفظ تعداد میوه در این ترکیب‌های تیماری حکایت داشت. وزن متوسط میوه نیز تحت تأثیر برهم‌کنش آبیاری و نیتروژن قرار گرفت. بیشترین وزن متوسط میوه (۴۸ گرم) در FI×N100 و کمترین مقدار (۴۱ گرم) در DI50×N50 مشاهده شد. در اغلب رژیم‌های آبیاری، افزایش سطح نیتروژن با افزایش وزن متوسط میوه همراه بود. برای مثال، درPRD50، وزن متوسط میوه از ۴۳ گرم در N50 به ۴۷ گرم در N100 افزایش یافت.

عملکرد میوه نیز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر برهم‌کنش دو عامل قرار گرفت. بیشترین عملکرد، برابر با ۷۳/۰ کیلوگرم در هر درخت، در FI×N100 و کمترین عملکرد، برابر با ۳۶/۹ کیلوگرم در هر درخت، در DI50×N50 به‌دست آمد.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارهای آبیاری و سطوح نیتروژن بر صفات عملکردی لیموترش رقم لایم‌کوات

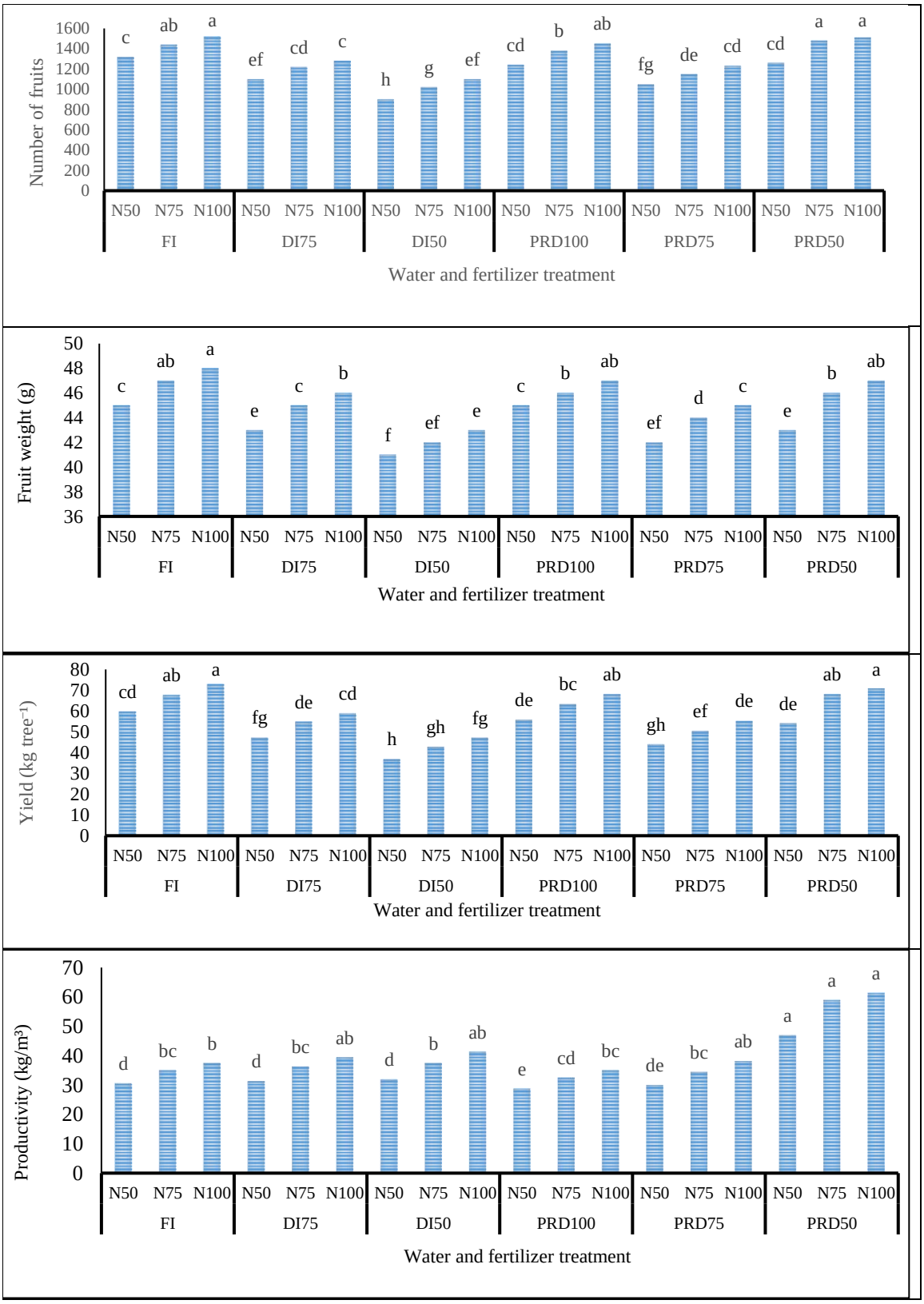
Table 5- Mean comparison of the interaction effects of irrigation treatments and nitrogen levels on yield-related traits of Limequat lemon

Irrigation treatment	Nitrogen level	Fruit number	Average fruit weight (g)	Fruit yield (kg tree^{-1})	Irrigation water productivity (kg m^{-3})
FI	N50	1320 c	45 c	59.8 cd	30.6 d
FI	N75	1440 ab	47 ab	67.7 ab	35.0 bc
FI	N100	1520 a	48 a	73.0 a	37.5 b
DI75	N50	1100 ef	43 e	47.3 fg	31.3 d
DI75	N75	1220 cd	45 c	54.9 de	36.3 bc
DI75	N100	1280 c	46 b	58.9 cd	39.4 ab
DI50	N50	900 h	41 f	36.9 h	31.9 d
DI50	N75	1020 g	42 ef	42.8 gh	37.5 b
DI50	N100	1100 ef	43 e	47.2 fg	41.3 ab
PRD100	N50	1240 cd	45 c	55.7 de	28.8 e
PRD100	N75	1380 b	46 b	63.4 bc	32.5 cd
PRD100	N100	1450 ab	47 ab	68.1 ab	35.0 bc
PRD75	N50	1050 fg	42 ef	44.0 gh	30.0 de
PRD75	N75	1150 de	44 d	50.5 ef	34.4 bc
PRD75	N100	1230 cd	45 c	55.3 de	38.1 ab
PRD50	N50	1260 cd	43 e	54.1 de	46.9 a
PRD50	N75	1480 a	46 b	68.0 ab	58.8 a
PRD50	N100	1510 a	47 ab	70.9 a	61.3 a

FI: Full Irrigation; DI: Deficit Irrigation; PRD: Partial Root-zone Drying. N50, N75, and N100 represent the application of 50, 75, and 100 g of pure nitrogen per tree per month, respectively. Means sharing at least one common letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

افزایش سطح نیتروژن در بسیاری از رژیم‌های آبیاری موجب افزایش عملکرد شد. به‌طوری‌که در PRD50، عملکرد از ۵۴/۱ کیلوگرم در N50 به ۷۰/۹ کیلوگرم در N100 افزایش یافت. نکته قابل توجه، عملکرد بالای تیمار PRD50×N100 بود. عملکرد این تیمار ۷۰/۹ کیلوگرم در هر درخت بود و بر اساس گروه‌بندی آماری، با FI×N100 (۷۳ کیلوگرم در هر درخت) اختلاف معنی‌داری نداشت. بنابراین، در شرایط آزمایش حاضر، تأمین ۵۰ درصد آب مورد استفاده در آبیاری کامل در قالب راهبرد PRD، همراه با N100، به کاهش معنی‌دار عملکرد نسبت به آبیاری کامل منجر نشد. بهره‌وری آب آبیاری نیز تحت تأثیر معنی‌دار برهم‌کنش آبیاری و نیتروژن قرار گرفت. بیشترین مقدار بهره‌وری آب، برابر با ۶۱/۳ کیلوگرم بر مترمکعب، در PRD50×N100 مشاهده شد و PRD50×N75 نیز با مقدار ۵۸/۸ کیلوگرم بر مترمکعب در گروه آماری برتر قرار گرفت. در مقابل، کمترین مقدار (۲۸/۸ کیلوگرم بر مترمکعب) در PRD100×N50 ثبت شد. بهره‌وری آب در FI×N100 برابر با ۳۷/۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود. بنابراین، اگرچه این تیمار بیشترین عملکرد را تولید کرد، از نظر بهره‌وری آب نسبت به PRD50×N100 برتری نداشت. افزایش بهره‌وری آب در PRD50×N100 عمدتاً ناشی از ترکیب کاهش حجم آب مصرفی و حفظ عملکرد در سطح بالا بود. از نظر تعریف شاخص نیز، بهره‌وری آب حاصل نسبت عملکرد تازه میوه به حجم آب آبیاری مصرف‌شده است؛ بنابراین، حفظ عملکرد در کنار کاهش مصرف آب می‌تواند موجب افزایش این شاخص شود.

نتایج حاضر با گزارش‌هایی مبنی بر امکان افزایش بهره‌وری آب در مرکبات تحت راهبردهای کم‌آبیاری و PRD همخوانی دارد (González-Altozano and Castel, 1999; Davies et al., 2002; Kang and Zhang, 2004).



شکل ۱-اثر متقابل راهبردهای مختلف آبیاری × سطوح مختلف نیتروژن بر صفات عملکردی لیموترش رقم لایم‌کوات

Fig. 1- Interaction effect of different irrigation strategies × different nitrogen levels on the performance traits of Limequat lime.

بااین‌حال، برتری PRD50 نسبت به DI50 در شرایط حاضر را نمی‌توان صرفاً به یک سازوکار فیزیولوژیک مشخص نسبت داد، زیرا شاخص‌های مستقیم روابط آبی و تبادل گازی گیاه در این آزمایش اندازه‌گیری نشدند. در مجموع، FI×N100 برای دستیابی به حداکثر عملکرد و PRD50×N100 برای دستیابی هم‌زمان به عملکرد بالا و حداکثر بهره‌وری آب آبیاری مناسب‌ترین ترکیب‌ها بودند.

اثر متقابل آبیاری و نیتروژن بر SPAD و ویژگی‌های کیفی میوه

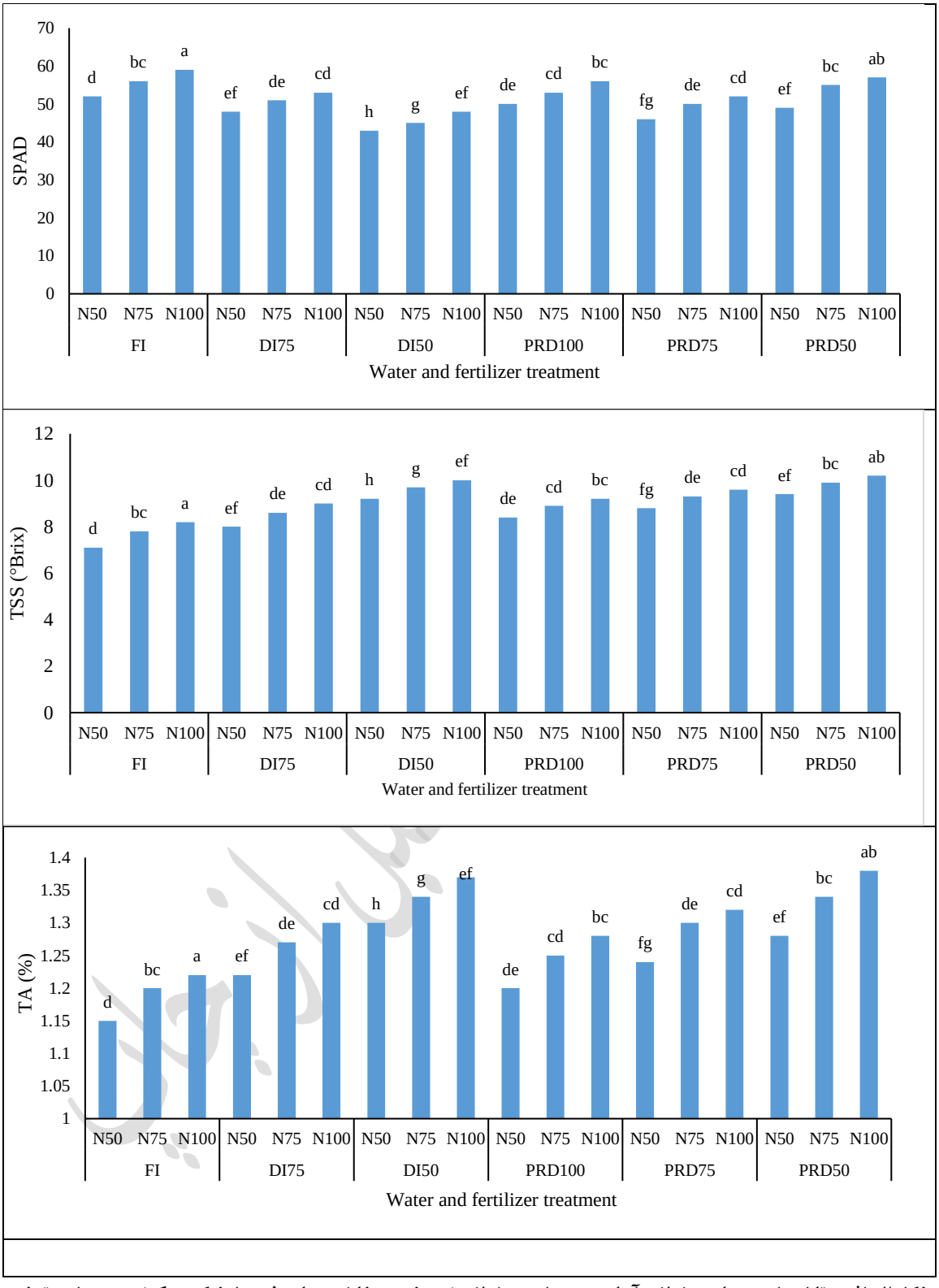
نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارهای آبیاری و سطوح نیتروژن نشان داد که پاسخ شاخص کلروفیل نسبی برگ (SPAD)، مواد جامد محلول کل (TSS) و نسبت TSS/TA به ترکیب رژیم آبیاری و سطح نیتروژن وابسته بود. با افزایش سطح نیتروژن، مقدار SPAD در بیشتر تیمارهای آبیاری افزایش یافت، درحالی‌که محدودیت آب، به‌ویژه در تیمارهای DI، موجب کاهش SPAD شد. در مقابل، کاهش میزان آب آبیاری به‌طور کلی با افزایش TSS و نسبت TSS/TA همراه بود و بیشترین مقادیر این صفات در تیمار PRD50×N100 مشاهده شد. اسیدیته قابل تیتراسیون (TA) نیز تحت تأثیر تیمارهای آبیاری قرار گرفت، اما اثر متقابل آبیاری × نیتروژن بر این صفت معنی‌دار نبود. نتایج مقایسه میانگین این صفات در جدول (۶) و شکل (۲) ارائه شده است.

جدول ٦- مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارهای آبیاری و سطوح نیتروژن بر شاخص کلروفیل نسبی برگ (SPAD)، مواد جامد محلول کل (TSS) و نسبت TSS/TA و اثر تیمارهای آبیاری و نیتروژن بر اسیدیته قابل تیتراسیون (TA) لیموترش رقم لایم‌کوات

Table 6- Mean comparison of the interaction effects of irrigation treatments and nitrogen levels on relative chlorophyll index (SPAD), total soluble solids (TSS), and TSS/TA ratio, and the main effect of irrigation treatments on titratable acidity (TA) of Limequat lemon

Irrigation treatment	Nitrogen level	SPAD	TSS (°Brix)	TA (% citric acid)	TSS/TA
FI	N50	52 d	7.1 e	1.19 c	6.17 d
FI	N75	56 bc	7.8 d	1.19 c	6.50 cd
FI	N100	59 a	8.2 cd	1.19 c	6.72 cd
DI75	N50	48 ef	8.0 d	1.26 bc	6.56 cd
DI75	N75	51 de	8.6 c	1.26 bc	6.77 c
DI75	N100	53 cd	9.0 bc	1.26 bc	6.92 c
DI50	N50	43 h	9.2 bc	1.34 a	7.08 b
DI50	N75	45 g	9.7 ab	1.34 a	7.24 ab
DI50	N100	48 ef	10.0 a	1.34 a	7.30 ab
PRD100	N50	50 de	8.4 cd	1.24 bc	7.00 bc
PRD100	N75	53 cd	8.9 bc	1.24 bc	7.12 b
PRD100	N100	56 bc	9.2 bc	1.24 bc	7.19 b
PRD75	N50	46 fg	8.8 bc	1.29 ab	7.10 b
PRD75	N75	50 de	9.3 bc	1.29 ab	7.15 b
PRD75	N100	52 cd	9.6 ab	1.29 ab	7.27 ab
PRD50	N50	49 ef	9.4 ab	1.33 a	7.34 a
PRD50	N75	55 bc	9.9 a	1.33 a	7.40 a
PRD50	N100	57 ab	10.2 a	1.33 a	7.48 a

N50, N75, and N100 represent the application of 50, 75, and 100 g of pure nitrogen per tree per month, respectively. Means sharing at least one common letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 5% significance level.



شکل۲- اثر متقابل راهبردهای مختلف آبیاری × سطوح مختلف نیتروژن بر شاخص‌های فیزیولوژیک و کیفی میوه لیموترش رقم لایم‌کوات

Figure. 2- Interaction effect of different irrigation strategies × different nitrogen levels on the physiological and fruit quality indices of 'Limequat' lime.

شاخص کلروفیل نسبی برگ (SPAD) تحت تأثیر معنی‌دار اثر متقابل آبیاری × نیتروژن قرار گرفت. همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار SPAD (۵۹) در تیمار FI×N100 و کمترین مقدار آن (۴۳) در تیمار DI50×N50

به‌دست آمد. در آبیاری کامل، افزایش سطح نیتروژن از N50 به N100 موجب افزایش SPAD از ۵۲ به ۵۹ شد. همچنین، در تیمار PRD50، افزایش نیتروژن از N50 به N100 مقدار SPAD را از ۴۹ به ۵۷ افزایش داد. به‌طور کلی، این روند نشان داد که افزایش سطح نیتروژن در رژیم‌های مختلف آبیاری، عموماً با افزایش شاخص کلروفیل نسبی برگ همراه بود.

کاهش SPAD در برخی تیمارهای دارای محدودیت آبی می‌تواند با تغییر وضعیت تغذیه‌ای و فیزیولوژیک برگ مرتبط باشد. از سوی دیگر، افزایش SPAD در سطوح بالاتر نیتروژن با نقش این عنصر در تشکیل کلروفیل و ترکیبات پروتئینی سازگار است (Marschner, 2012; Srivastava and Singh, 2009). با این‌حال، از آنجا که SPAD یک شاخص غیرمستقیم است و در پژوهش حاضر غلظت واقعی کلروفیل یا نیتروژن برگ اندازه‌گیری نشده است، این نتایج باید صرفاً به‌عنوان تغییر در شاخص کلروفیل نسبی برگ تفسیر شوند و نمی‌توان از آن‌ها به‌طور مستقیم تغییر غلظت نیتروژن یا ظرفیت فتوسنتزی را نتیجه‌گیری کرد.

اثر متقابل آبیاری × نیتروژن بر TSS معنی‌دار بود. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار TSS (۱۰/۲ بریکس) درجه در تیمار PRD50×N100 و کمترین مقدار آن (۷/۱ درجه بریکس) در تیمار FI×N50 مشاهده شد.

به‌طور کلی، محدودیت آب با افزایش TSS همراه بود و این افزایش در تیمارهای DI50 و PRD50 آشکارتر بود. در تیمار PRD50، افزایش سطح نیتروژن از N50 به N100 موجب افزایش مقدار TSS از ۹/۴ به ۱۰/۲ درجه بریکس شد. این روند نشان می‌دهد که ترکیب محدودیت کنترل‌شده آب و سطح بالاتر نیتروژن می‌تواند در افزایش مواد جامد محلول میوه مؤثر باشد. افزایش TSS در شرایط محدودیت آب می‌تواند با تغییر غلظت نسبی مواد محلول و وضعیت آب میوه مرتبط باشد (Chaves et al., 2009). بااین‌حال، از آنجا که در پژوهش حاضر درصد آب، ماده خشک و اجزای اختصاصی TSS اندازه‌گیری نشدند، این توضیح باید به‌عنوان یک تبیین احتمالی در نظر گرفته شود و نمی‌توان تغییر TSS را به یک سازوکار مشخص نسبت داد. اثر متقابل آبیاری × نیتروژن بر اسیدیته قابل تیتراسیون (TA) معنی‌دار نبود. بنابراین، این صفت بر اساس اثر اصلی تیمارهای آبیاری تفسیر شد. همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، مقدار TA در تیمار FI برابر با ۱/۱۹ درصد اسید سیتریک بود و با کاهش میزان تأمین آب افزایش یافت. بیشترین مقدار TA در تیمار DI50 با ۱/۳۴ درصد مشاهده شد. همچنین، میانگین TA در تیمارهای PRD75 و PRD50 به‌ترتیب ۱/۲۹ و ۱/۳۳ درصد بود.

افزایش TA در شرایط محدودیت آب می‌تواند با تغییر در تجمع و متابولیسم اسیدهای آلی و همچنین وضعیت آب میوه مرتبط باشد (Kader, 2002). بااین‌حال، از آنجا که اثر متقابل آبیاری × نیتروژن بر TA معنی‌دار نبود، تفاوت مشاهده‌شده در مقدار این صفت را نمی‌توان به برهم‌کنش دو عامل آبیاری و نیتروژن نسبت داد. بنابراین، در تفسیر نتایج TA، نقش اصلی رژیم آبیاری باید مورد توجه قرار گیرد. نسبت TSS/TA نیز تحت تأثیر معنی‌دار اثر متقابل آبیاری × نیتروژن قرار گرفت. همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار این شاخص (۷/۴۸) در تیمار PRD50×N100 و کمترین مقدار آن (۶/۱۷) در تیمار FI×N50 به‌دست آمد. به‌طور کلی، افزایش نسبت TSS/TA در تیمارهای دارای محدودیت آب نشان‌دهنده تغییر در تعادل نسبی مواد جامد محلول و اسیدیته میوه است. بیشترین مقدار این شاخص در تیمار PRD50×N100 مشاهده شد که با بالاترین مقدار TSSدر این تیمار نیز همراه بود. این نتایج نشان می‌دهد که اعمال محدودیت کنترل‌شده آب، به‌ویژه در شرایط تأمین نیتروژن بالاتر، می‌تواند نسبت ترکیبات محلول به اسیدهای آلی میوه را افزایش دهد. اگرچه نسبت TSS/TA یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی کیفیت داخلی و تعادل طعمی میوه محسوب می‌شود، در پژوهش حاضر ارزیابی حسی انجام نشده است؛ بنابراین، نمی‌توان بر اساس افزایش این شاخص، به‌طور مستقیم درباره پذیرش حسی، مطلوبیت طعم یا ترجیح مصرف‌کننده نتیجه‌گیری کرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که رژیم آبیاری و سطح نیتروژن، هم به‌صورت مستقل و هم در تعامل با یکدیگر، بر عملکرد، برخی ویژگی‌های کیفی میوه، شاخص کلروفیل نسبی برگ (SPAD) و بهره‌وری آب آبیاری لایم‌کوات اثرگذار بودند. معنی‌دار بودن اثر متقابل آبیاری × نیتروژن برای بیشتر صفات نشان داد که پاسخ گیاه به سطح نیتروژن به وضعیت تأمین آب وابسته است و مدیریت این دو نهاده باید به‌صورت هماهنگ انجام شود. آبیاری کامل همراه با مصرف ۱۰۰ گرم نیتروژن خالص در ماه به‌ازای هر درخت (FI×N100) بیشترین عملکرد میوه را با ۷۳ کیلوگرم در هر درخت ایجاد کرد. بیشترین تعداد میوه (۱۵۲۰ عدد در هر درخت) و وزن متوسط میوه (۴۸ گرم) نیز در این تیمار به‌دست آمد. بنابراین، در شرایط آزمایش حاضر و در صورت نبود محدودیت آب، FI×N100 مناسب‌ترین ترکیب برای دستیابی به حداکثر عملکرد در محدوده تیمارهای مورد بررسی بود. در مقابل، تیمار PRD50×N100 با عملکرد ۷۰/۹ کیلوگرم در هر درخت، بر اساس گروه‌بندی آماری، با FI×N100 اختلاف معنی‌داری نداشت. این تیمار با ۶۱/۳ کیلوگرم بر مترمکعب، بیشترین بهره‌وری آب آبیاری را نشان داد. همچنین، بیشترین مقادیر TSS (۱۰/۲درجه بریکس) و نسبت TSS/TA (۷/۴۸) در PRD50×N100 مشاهده شد. بنابراین، در شرایط این آزمایش، استفاده از PRD در سطح ۵۰ درصد تأمین آب همراه با N100 توانست ضمن حفظ عملکرد در سطح آماری مشابه آبیاری کامل، بهره‌وری آب آبیاری را افزایش داده و با مقادیر بالاتر برخی شاخص‌های کیفیت داخلی میوه همراه باشد. مقایسه تیمارهایDI50 و PRD50 در سطح مشابه تأمین آب نشان داد که الگوی توزیع آب در ناحیه ریشه

می‌تواند در پاسخ عملکردی گیاه اهمیت داشته باشد. به‌ویژه، PRD50 در ترکیب با N75 و N100 عملکرد بیشتری نسبت به DI50 در سطوح متناظر نیتروژن ایجاد کرد. بااین‌حال، از آنجا که شاخص‌های مستقیم روابط آب و گیاه و سازوکارهای فیزیولوژیک مرتبط در این پژوهش اندازه‌گیری نشدند، تبیین این تفاوت از نظر سازوکارهای ریشه‌ای و هورمونی نیازمند بررسی‌های تکمیلی است. در مجموع، با در نظر گرفتن هم‌زمان عملکرد، بهره‌وری آب آبیاری و برخی شاخص‌های کیفیت داخلی میوه، تیمار PRD50×N100 در شرایط گلخانه‌ای مورد مطالعه، گزینه‌ای مناسب برای افزایش بهره‌وری آب و حفظ عملکرد لایم‌کوات تحت محدودیت آب بود. این تیمار با تولید ۹۷/۱ درصد عملکرد FI×N100، در حالی که از نظر آماری با آن اختلاف معنی‌داری نداشت، بهره‌وری آب آبیاری را افزایش داد. بنابراین، PRD50 همراه با N100 را می‌توان در شرایط مشابه آزمایش حاضر به‌عنوان یک راهبرد مدیریتی امیدبخش برای افزایش بهره‌وری آب در تولید لایم‌کوات پیشنهاد کرد. با توجه به اجرای پژوهش در شرایط گلخانه‌ای و طی یک دوره آزمایشی، پیشنهاد می‌شود کارایی PRD50×N100 در شرایط باغی، اقلیم‌های مختلف و درختان با سنین متفاوت و طی چندین فصل بررسی شود تا پایداری عملکرد و بهره‌وری آب آن مشخص گردد. همچنین، اندازه‌گیری شاخص‌هایی مانند هدایت روزنه‌ای، محتوای نسبی آب برگ، فتوسنتز، وضعیت تغذیه‌ای و توسعه ریشه می‌تواند به تبیین دقیق‌تر سازوکار پاسخ لایم‌کوات به مدیریت هم‌زمان آب و نیتروژن کمک کند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در مقاله خود از هوش مصنوعی مولد و فناوریهای کمکی هوش مصنوعی استفاده نکرده اند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: رسول اصغری، طراحی و اجرای پژوهش، جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، تفسیر نتایج و نگارش پیش‌نویس مقاله.

نویسنده دوم: داود اکبری نودهی، راهنمایی علمی پژوهش، نظارت بر مراحل اجرای تحقیق، بررسی و تفسیر نتایج، بازبینی و اصلاح مقاله و مدیریت مکاتبات علمی.

نویسنده سوم: علی باقری، مشارکت در طراحی پژوهش، بررسی نتایج، ارائه پیشنهادهای علمی و بازبینی و اصلاح محتوای مقاله.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از گلخانه‌داران روستای خرماکلا، شهرستان قائم‌شهر، استان مازندران، به‌دلیل همکاری در اجرای این پژوهش تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

1- Alva, A. K., Paramasivam, S. and Graham, W. D., 1998. Impact of nitrogen management practices on nutritional status and yield of Valencia orange trees and groundwater nitrate. *Journal of Environmental Quality*. 27(4), pp.904–910. doi:10.2134/jeq1998.00472425002700040026x.

2- Alva, A. K., Paramasivam, S., Graham, W. D. and Wheaton, T. A., 2003. Best nitrogen and irrigation management practices for citrus production in sandy soils. *Water, Air, and Soil Pollution*. 143, pp.139–154. doi:10.1023/A:1023971124327.

3- Alva, A. K., Paramasivam, S., Obreza, T. A. and Schumann, A. W., 2006. Nitrogen best management practices for citrus trees: I. Fruit yield, quality, and leaf nutritional status. *Scientia Horticulturae*. 107(3), pp.233–244. doi:10.1016/j.scienta.2005.05.017.

4- Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2023. Management of nitrogen fertilization in citrus orchards. *Scientific Journal of Land Management*. 11(2), pp.222–242. (In Persian).

5- Chaves, M. M., Flexas, J. and Pinheiro, C., 2009. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*. 103(4), pp.551–560. doi:10.1093/aob/mcn125.

6- Chen, F., Zheng, S., Cui, N., Wang, Z., Jiang, S., Tan, M., Li, H., Zhao, L. and Liu, C., 2026. Optimizing deficit irrigation and fertilization at growth stages to improve citrus yield, fruit quality, and water-fertilizer productivity in semi-arid Southwest China. *Agricultural Water Management*. 327, 110278. doi:10.1016/j.agwat.2026.110278.

7- Daghighi, S., Heidari, A. and Azarmi Atajan, F., 2024. Effects of some nitrogen fertilizers combined with different levels of potassium sulfate and humic acid on growth, yield, and photosynthetic pigments of pistachio cv. Badami Sefid Mahvelat. *Journal of Horticultural Science*. 38(1), pp.51–65. (In Persian).

8- Davies, W. J., Bacon, M. A., Thompson, D. S., Sobeih, W. and González Rodríguez, L., 2000. Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: Exploitation of the plants' chemical signalling system and hydraulic architecture. *Journal of Experimental Botany*. 51(350), pp.1617–1626. doi:10.1093/jexbot/51.350.1617.

9- Davies, W. J., Wilkinson, S. and Loveys, B., 2002. Stomatal control by chemical signalling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytologist*. 153(3), pp.449–460. doi:10.1046/j.0028-646X.2001.00345.x.

10- García-Tejero, I., Jiménez-Bocanegra, J. A., Martínez, G., Romero, R., Durán-Zuazo, V. H. and Muriel-Fernández, J. L., 2010. Positive impact of regulated deficit irrigation on yield and fruit quality in a commercial citrus orchard (Citrus sinensis (L.) Osbeck, cv. Salustiano). *Agricultural Water Management*. 97(5), pp.614–622. doi:10.1016/j.agwat.2009.12.005.

11- González-Altozano, P. and Castel, J. R., 1999. Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 74(6), pp.706–713. doi:10.1080/14620316.1999.11511177.

12- Kader, A. A., 2002. Postharvest Technology of Horticultural Crops. 3rd ed. Oakland, CA, USA: University of California, *Agriculture and Natural Resources*, Publication 3311.

13- Kang, S. and Zhang, J., 2004. Controlled alternate partial root-zone irrigation: Its physiological consequences and impact on water use efficiency. *Journal of Experimental Botany*. 55(407), pp.2437–2446. doi:10.1093/jxb/erh249.

14- Latrech, B., Ghazouani, H., Lasram, A., Douh M'hamdi, B., Mansour, M. and Boujelben, A., 2019. Assessment of different methods for simulating actual evapotranspiration in a semi-arid environment. *Italian Journal of Agrometeorology*. 24(2), pp.21–34. doi:10.13128/ijam-650.

15- Liu, Y., Heying, E. and Tanumihardjo, S. A., 2012. History, global distribution, and nutritional importance of citrus fruits. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 11(6), pp.530–545. doi:10.1111/j.1541-4337.2012.00201.x.

16- Markwell, J., Osterman, J. C. and Mitchell, J. L., 1995. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*. 46(3), pp.467–472. doi:10.1007/BF00032301.

17- Marschner, H., 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd ed. Edited by P. Marschner. *Academic Press, Amsterdam*. doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9.

18- Moghbeli Damaneh, E., Fatahi, R., Ghorbani, B., Rabiei, G. R. and Esfandyari, S., 2018. Assessment of the effect of deficit irrigation under surface and subsurface irrigation conditions on vegetative development and yield of citrus. *Journal of Plant Production*. 25(3), pp.69–82. (In Persian).

19- Mossad, A., Farina, V. and Lo Bianco, R., 2020. Fruit yield and quality of 'Valencia' orange trees under long-term partial rootzone drying. *Agronomy*. 10(2), 164. doi:10.3390/agronomy10020164.

20- Pérez-Pérez, J. G., Robles, J. M. and Botía, P., 2014. Effects of deficit irrigation in different fruit growth stages on 'Star Ruby' grapefruit trees in semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*. 133, pp.44–54. doi:10.1016/j.agwat.2013.11.002.

21- Quaggio, J. A., Mattos, D., Cantarella, H., Almeida, E. L. E. and Cardoso, S. A. B., 2002. Lemon yield and fruit quality affected by NPK fertilization. *Scientia Horticulturae*. 96(1–4), pp.151–162. doi:10.1016/S0304-4238(02)00096-5.

22- Romero-Trigueros, C., Nortes, P. A., Pedrero, F., Mounzer, O., Alarcón, J. J., Bayona, J. M. and Nicolás, E., 2014. Assessment of the viability of using saline reclaimed water in grapefruit in medium to long term. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 12(4), pp.1137–1148. doi:10.5424/sjar/2014124-5495.

23- Selgi, M., Hashemi-Garmdareh, S.E. and Ebadi, H., 2020. Effect of deficit irrigation and partial root-zone irrigation on growth characteristics of tree and fruit of Valencia orange. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 51(5), pp.1127–1136. (In Persian).

24- Shahabian, M., Cherati, A., Dehghan, R. A. and Kamali, M. E., 2018. Comparison of different deficit irrigation management strategies in orange. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 12(6), pp.1381–1395. (In Persian).

25- Srivastava, A. K. and Singh, S., 2009. Citrus decline: Soil fertility and plant nutrition. *Journal of Plant Nutrition*. 32(2), pp.197–245. doi:10.1080/01904160802592706.

26- Sun, G., Hu, T., Liu, X., Peng, Y., Leng, X., Li, Y. and Yang, Q., 2022. Optimizing irrigation and fertilization at various growth stages to improve mango yield, fruit quality and water-fertilizer use efficiency in xerothermic regions. *Agricultural Water Management*. 260, 107296. doi:10.1016/j.agwat.2021.107296.

27- Taiz, L., Møller, I. M., Murphy, A. and Zeiger, E., 2023. *Plant Physiology and Development*. 7th ed. New York, USA: Oxford University Press.

28- Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K. and Pleijel, H., 2007. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthesis Research*. 91(1), pp.37–46. doi:10.1007/s11120-006-9077-5.

29- Wu, Q. and Xia, R., 2006. Effects of water stress on growth, photosynthesis and physiological responses of citrus plants. *Plant Growth Regulation*. 49, pp.125–132. doi:10.1007/s10725-006-9003-y.

30- Xiong, H., Yi, S., Zhu, Y., Luo, Y., Kang, F., Xie, J., Tang, X., Rennenberg, H., Shi, X., Fu, X.-Z. and Zhang, Y., 2026. Excessive nitrogen application deteriorates integrated citrus fruit quality: A multi-dimensional field study. *Scientia Horticulturae*. 358, 114696. doi:10.1016/j.scienta.2026.114696.

EXTENDED ABSTRACT

Interactive Effects of Deficit Irrigation Strategies and Nitrogen Levels on Yield, Fruit Quality, and Irrigation Water Productivity of Limequat

R. Asghari[1], D. Akbari Nodehi*[2] and A. Bagheri[3]

1-Ph.D. Candidate, Department of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.
2-Corresponding author, Department of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran (d.akbari@iau.ac.ir)
3-Department of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received:
Revised:
Accepted:
Available online:

Keywords:
Citrus, nitrogen nutrition, drought stress, fruit yield, sugar-to-acid ratio.

TO CITE THIS ARTICLE:

Abstract

To investigate the interaction effects of irrigation strategies and nitrogen levels on yield, selected fruit quality characteristics, leaf relative chlorophyll index, and irrigation water productivity of limequat, a factorial experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications under greenhouse conditions. Irrigation treatments included full irrigation (FI), regulated deficit irrigation supplying 75 and 50% of crop water requirements (DI75 and DI50), and partial root-zone drying supplying 100, 75, and 50% of crop water requirements (PRD100, PRD75, and PRD50). Nitrogen levels consisted of 50, 75, and 100 g of pure nitrogen per tree per month supplied as ammonium nitrate. Fruit number, average fruit weight, fruit yield, irrigation water productivity, leaf relative chlorophyll index (SPAD), total soluble solids (TSS), titratable acidity (TA), and TSS/TA ratio were measured. Analysis of variance showed that the main effects of irrigation and nitrogen, as well as their interaction, were significant for fruit number, average fruit weight, fruit yield, irrigation water productivity, SPAD, TSS, and TSS/TA ratio, whereas the interaction effect of irrigation and nitrogen on titratable acidity was not significant. The highest fruit yield was obtained under the FI×N100 treatment, reaching 73 kg tree^{-1}, accompanied by 1520 fruits tree^{-1}, an average fruit weight of 48 g, and an SPAD value of 59. The PRD50×N100 treatment produced 70.9 kg tree^{-1}, which was not significantly different from FI×N100, and achieved the highest irrigation water productivity of 61.3 kg m^{-3}. The highest TSS (10.2 °Brix) and TSS/TA ratio (7.48) were also recorded under PRD50×N100. Overall, FI×N100 was suitable for achieving maximum yield, whereas PRD50×N100 was more effective in improving irrigation water productivity while maintaining yield under water-limited conditions. The PRD50×N100 treatment, which produced 97.1% of the yield obtained under FI×N100, can therefore be considered a suitable strategy for sustainable limequat production under greenhouse conditions.

Introduction

Water scarcity is one of the major constraints to sustainable citrus production in semi-arid regions. Improving irrigation water productivity while maintaining fruit yield and quality requires irrigation strategies that reduce water use without causing excessive yield losses. Deficit irrigation and partial root-zone drying (PRD) are among the strategies developed to improve water use efficiency in horticultural crops. PRD involves alternately irrigating part of the root zone while allowing another part to dry, potentially modifying plant responses to soil water deficit and improving water productivity (Kang and Zhang, 2004). Previous studies on citrus have shown that regulated deficit irrigation can influence fruit yield, fruit quality, and water use efficiency, although

responses depend on the severity and timing of water restriction (González-Altozano and Castel, 1999; García-Tejero et al., 2010; Pérez-Pérez et al., 2014). Nitrogen is another important factor affecting citrus productivity and fruit quality. Adequate nitrogen availability can improve vegetative growth, leaf nutritional status, fruit number, and yield; however, excessive nitrogen application may negatively affect some components of fruit quality (Alva et al., 1998; Alva et al., 2006; Quaggio et al., 2002). Recent research has also emphasized the importance of coordinating irrigation and fertilization management to improve water-fertilizer productivity and maintain fruit quality (Sun et al., 2022; Chen et al., 2026). Therefore, determining suitable combinations of irrigation regime and nitrogen supply is particularly important for citrus production under water-limited conditions.The objective of this study was to evaluate the individual and interactive effects of irrigation strategies and nitrogen levels on fruit number, average fruit weight, fruit yield, irrigation water productivity, relative leaf chlorophyll index (SPAD), total soluble solids (TSS), titratable acidity (TA), and TSS/TA ratio of limequat under greenhouse conditions.

Methodology

The experiment was conducted under greenhouse conditions using a factorial arrangement based on a randomized complete block design with three replications. Irrigation treatments consisted of full irrigation (FI), regulated deficit irrigation at 75 and 50% of crop water requirement (DI75 and DI50), and partial root-zone drying at 100, 75, and 50% of crop water requirement (PRD100, PRD75, and PRD50). Nitrogen treatments included 50, 75, and 100 g pure N $month^{-1}$ $tree^{-1}$, supplied as ammonium nitrate.The measured variables included fruit number, average fruit weight, fruit yield, irrigation water productivity, relative leaf chlorophyll index (SPAD), TSS, TA, and TSS/TA ratio. Irrigation water productivity was calculated based on fruit yield and the amount of irrigation water applied. The SPAD index was used as a relative indicator of leaf chlorophyll status rather than as a direct measurement of chlorophyll or leaf nitrogen concentration. This interpretation is consistent with previous studies demonstrating the relationship between SPAD readings and leaf chlorophyll concentration (Markwell et al., 1995; Uddling et al., 2007). Analysis of variance was performed to determine the effects of irrigation, nitrogen, and their interaction. Mean comparisons were used to distinguish treatment differences.

Results and Discussion

The results showed that irrigation and nitrogen significantly affected fruit number, average fruit weight, fruit yield, irrigation water productivity, SPAD, TSS, and TSS/TA ratio. The irrigation × nitrogen interaction was also significant for these variables, indicating that the response of limequat to nitrogen depended on the irrigation regime. In contrast, the interaction between irrigation and nitrogen was not significant for titratable acidity; therefore, TA was interpreted based on the main effects.The highest fruit yield was obtained under FI × N100, reaching 73.0 kg $tree^{-1}$. This treatment also produced the highest fruit number (1520 fruits $tree^{-1}$) and average fruit weight (48 g), indicating that full irrigation combined with the highest nitrogen level was the most effective treatment for maximizing yield under the experimental conditions. Increasing nitrogen generally improved yield components under full irrigation, consistent with the established importance of adequate nitrogen nutrition for citrus productivity (Alva et al., 1998; Alva et al., 2006).

An important finding was the performance of PRD50 × N100. This treatment produced 70.9 kg $tree^{-1}$, corresponding to 97.1% of the yield obtained under FI × N100, and it was not statistically different from FI × N100. At the same time, PRD50 × N100 resulted in the highest irrigation water productivity, reaching 61.3 kg m^{-3}. Thus, reducing water supply to 50% under PRD did not result in a statistically significant reduction in fruit yield when combined with the highest nitrogen level, while substantially improving irrigation water productivity. This result agrees with the general potential of PRD to improve water use efficiency while maintaining crop productivity (Kang and Zhang, 2004) and with previous findings in citrus showing that partial root-zone drying can maintain yield and influence fruit quality under reduced water supply (Mossad et al., 2020). The response of fruit quality parameters further differentiated the irrigation treatments. The highest TSS value (10.2 °Brix) and TSS/TA ratio (7.48) were recorded under PRD50 × N100. In general, water

limitation was associated with higher TSS, particularly under DI50 and PRD50. In PRD50, increasing nitrogen from N50 to N100 increased TSS from 9.4 to 10.2 °Brix. Similar responses to deficit irrigation, including changes in fruit quality, have been reported in citrus (González-Altozano and Castel, 1999; García-Tejero et al., 2010; Pérez-Pérez et al., 2014). However, the increase in TSS should be interpreted cautiously because the present study did not directly measure fruit water content, dry matter, or individual soluble compounds.

The highest SPAD value was observed under FI × N100 (59), followed by PRD50 × N100 (57). The lowest value (43) occurred under DI50 × N50. The increase in SPAD with higher nitrogen supply is consistent with the role of nitrogen in chlorophyll and protein formation. Nevertheless, because actual leaf chlorophyll concentration and leaf nitrogen concentration were not measured, SPAD values should be interpreted as a relative chlorophyll index rather than direct measurements of nitrogen status or photosynthetic capacity. Titratable acidity was not significantly affected by the irrigation × nitrogen interaction. Its highest value was observed under DI50, while the lowest value occurred under full irrigation. The changes in TA may be related to alterations in organic acid accumulation and fruit water status, but the absence of a significant interaction indicates that differences among nitrogen levels should not be attributed to an interactive irrigation × nitrogen effect.

Overall, comparison of DI50 and PRD50 at the same nominal level of water supply indicated that the distribution of water within the root zone may be important for maintaining productivity. PRD50 combined with N75 and N100 produced higher yields than the corresponding DI50 treatments. However, because direct measurements of plant water relations and physiological signaling were not included, the mechanisms underlying this difference require further investigation.

Conclusions

The results demonstrated that irrigation regime and nitrogen level interactively influence limequat productivity, irrigation water productivity, SPAD, and several fruit quality indicators under greenhouse conditions. FI × N100 produced the maximum yield of 73.0 kg tree^{-1} and was therefore the most suitable treatment for maximizing production when water was not limiting. In contrast, PRD50 × N100 produced 70.9 kg tree^{-1}, equivalent to 97.1% of the FI × N100 yield, while achieving the highest irrigation water productivity (61.3 kg m^{-3}). This treatment also produced the highest TSS (10.2 °Brix) and TSS/TA ratio (7.48).

Therefore, under the conditions of this greenhouse experiment, FI × N100 can be recommended for maximum yield, whereas PRD50 × N100 appears to be a promising strategy for improving irrigation water productivity while maintaining yield at a statistically similar level to full irrigation. Nevertheless, the results should not be directly generalized to commercial orchards because the experiment was conducted under greenhouse conditions and over a limited experimental period. Field experiments under different climates, tree ages, soil conditions, and longer production periods are required to validate the applicability of PRD50 × N100 for commercial limequat production.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors state that they have not used generative AI or AI-assisted technologies in their manuscript.

Authors' contribution

First Author: Rasool Asghari, Research design and implementation, data collection, data analysis, interpretation of results, and preparation of the initial manuscript draft.

Second Author: Davod Akbari Nodehi, Scientific guidance, supervision of the research process, review and interpretation of results, manuscript review and revision, and management of scientific correspondence.

Third Author: Ali Bagheri, Contribution to research design, evaluation of results, provision of scientific suggestions, and review and revision of the manuscript.

Acknowledgment

The authors thank the greenhouse growers of Khormakola village, QaemShahr, Mazandaran Province, Iran, for their cooperation in this research.

References

1-Alva, A. K., Paramasivam, S. and Graham, W. D., 1998. Impact of nitrogen management practices on nutritional status and yield of Valencia orange trees and groundwater nitrate. *Journal of Environmental Quality*. 27(4), pp.904–910. doi:10.2134/jeq1998.00472425002700040026x.

2-Alva, A. K., Paramasivam, S., Obreza, T. A. and Schumann, A. W., 2006. Nitrogen best management practices for citrus trees: I. Fruit yield, quality, and leaf nutritional status. *Scientia Horticulturae*. 107(3), pp.233–244. doi:10.1016/j.scienta.2005.05.017.

3-Chen, F., Zheng, S., Cui, N., Wang, Z., Jiang, S., Tan, M., Li, H., Zhao, L. and Liu, C., 2026. Optimizing deficit irrigation and fertilization at growth stages to improve citrus yield, fruit quality, and water-fertilizer productivity in semi-arid Southwest China. *Agricultural Water Management*. 327, 110278. doi:10.1016/j.agwat.2026.110278.

4-García-Tejero, I., Jiménez-Bocanegra, J. A., Martínez, G., Romero, R., Durán-Zuazo, V. H. and Muriel-Fernández, J. L., 2010. Positive impact of regulated deficit irrigation on yield and fruit quality in a commercial citrus orchard (Citrus sinensis (L.) Osbeck, cv. Salustiano). *Agricultural Water Management*. 97(5), pp.614–622. doi:10.1016/j.agwat.2009.12.005.

5-González-Altozano, P. and Castel, J. R., 1999. Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 74(6), pp.706–713. doi:10.1080/14620316.1999.11511177.

6-Kang, S. and Zhang, J., 2004. Controlled alternate partial root-zone irrigation: Its physiological consequences and impact on water use efficiency. Journal of Experimental Botany. 55(407), pp.2437–2446. doi:10.1093/jxb/erh249.

7-Markwell, J., Osterman, J. C. and Mitchell, J. L., 1995. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*. 46(3), pp.467–472. doi:10.1007/BF00032301.

8-Mossad, A., Farina, V. and Lo Bianco, R., 2020. Fruit yield and quality of 'Valencia' orange trees under long-term partial rootzone drying. *Agronomy*. 10(2), 164. doi:10.3390/agronomy10020164.

9-Pérez-Pérez, J. G., Robles, J. M. and Botía, P., 2014. Effects of deficit irrigation in different fruit growth stages on 'Star Ruby' grapefruit trees in semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*. 133, pp.44–54. doi:10.1016/j.agwat.2013.11.002.

10-Quaggio, J. A., Mattos, D., Cantarella, H., Almeida, E. L. E. and Cardoso, S. A. B., 2002. Lemon yield and fruit quality affected by NPK fertilization. *Scientia Horticulturae*. 96(1–4), pp.151–162. doi:10.1016/S0304-4238(02)00096-5.

11-Sun, G., Hu, T., Liu, X., Peng, Y., Leng, X., Li, Y. and Yang, Q., 2022. Optimizing irrigation and fertilization at various growth stages to improve mango yield, fruit quality and water-fertilizer use efficiency in xerothermic regions. *Agricultural Water Management*. 260, 107296. doi:10.1016/j.agwat.2021.107296.

12-Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K. and Pleijel, H., 2007. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthesis Research*. 91(1), pp.37–46. doi:10.1007/s11120-006-9077-5.

پذیرش نهایی- قبل از چاپ