نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۲، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، ص. ۱۲۸-۱۱۱

Water Management in Agriculture
Vol. 12, No. 2, Autumn and Winter 2026, 111-128

مقاله علمی -پژوهشی

تأثیر سطوح مختلف شوری و مقادیر آب آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای در دو دوره کشت پاییز-زمستان و بهار-تابستان

مرتضی خوش‌سیمای چنار[۱]، عبدالمجید لیاقت[۲*]، حمیده نوری[۳]، فروزنده سلطانی صالح‌آبادی[۴] و بابک متشرع‌زاده[۵]

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر جداگانه مقادیر مختلف آب آبیاری و شوری آب آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای در دو دوره رشد پاییز – زمستان (A-W) و بهار – تابستان (S-S) در گلخانه‌های تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران انجام شد. آزمایش ۱ شامل ۴ سطح آبیاری I_1 تا I_4 (به‌ترتیب ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی) بود. در دوره A-W، سطح آبیاری I_2 با عملکرد ۵/۶۵ کیلوگرم در بوته و سطح آبیاری I_4 با بهره‌وری آب ۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب بهترین نتایج را نشان دادند. در دوره S-S، سطح آبیاری I_1 بیشترین عملکرد و بهره‌وری آب (۱۱ کیلوگرم در بوته و ۳۵/۶۹ کیلوگرم بر مترمکعب) را داشت. آزمایش ۲ شامل ۴ سطح شوری آب آبیاری S_1 تا S_4 (به‌ترتیب کمتر از ۳، ۳، ۶ و ۹ دسی‌زیمنس بر متر) بود. در هر دو دوره، سطح شوری S_1 بالاترین عملکرد و بهره‌وری آب را ارائه داد؛ به‌طوری‌که در دوره S-S، این دو صفت به‌ترتیب ۱۰/۵۹ کیلوگرم در بوته و ۴۳/۳۱ کیلوگرم بر مترمکعب اندازه‌گیری شدند. اثرات منفی شوری در دوره S-S به دلیل افزایش تبخیر – تعرق و تجمع نمک شدیدتر بود. نتایج نشان داد که در دوره A-W با کاهش آبیاری به شرط تولید اقتصادی یا استفاده از آب با شوری پایین‌تر، بهره‌وری آب افزایش می‌یابد، درحالی‌که در دوره S-S تأمین کامل نیاز آبی و شوری پایین‌تر برای دستیابی به عملکرد و بهره‌وری آب بهینه، ضروری است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی آبیاری، تنش‌های محیطی، کارایی مصرف آب، کشاورزی پایدار

مقدمه

وضعیت بحران آبی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، از جمله ایران نمایان است. افزایش جمعیت، تغییرات اقلیمی، کاهش منابع آبی و مدیریت نادرست منابع، همگی دست به دست هم داده‌اند تا دسترسی به آب شیرین برای کشاورزی به‌طور فزاینده‌ای محدود شود (Gleick and Cooley, 2021; Nouri et al., 2023; Reca et al., 2018). بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب، به‌شدت تحت تأثیر این بحران قرار گرفته است. در این میان، کشت‌های گلخانه‌ای به دلیل توانایی در مدیریت بهتر شرایط محیطی و کاهش تلفات آب، به یکی از راهبردهای اصلی برای افزایش بهره‌وری و تولید محصولات کشاورزی تبدیل شده است (Moradi et al., 2020; Ramírez-Pérez et al., 2018). در دهه‌های اخیر، توسعه گلخانه در کشور شتاب قابل‌توجهی داشته (زارعی و همکاران، ۱۳۹۵) و سطح زیر کشت گلخانه از ۶۰۲۱ هکتار در سال ۱۳۹۱ به ۱۴۱۴۳ هکتار در سال ۱۴۰۱ افزایش یافته است. بر اساس آمارنامه‌های وزارت جهاد کشاورزی، محصولات گلخانه‌ای در سال‌های اخیر ۹/۸–۱۱/۹ درصد از کل تولیدات باغی کشور را تشکیل داده است،

[۱] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
[۲] استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران (*- نویسنده مسئول: Email: aliaghat@ut.ac.ir)
[۳] دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
[۴] دانشیار، گروه علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
[۵] استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۶

همچنین محصول خیار (*Cucumis sativus* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات گلخانه‌ای در کشور بوده و حدود ۵۷ درصد از سطح زیر کشت گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده است. علاوه بر کمبود آب، نگرانی‌های قابل‌توجهی نیز در مورد کیفیت آب آبیاری وجود دارد. در بسیاری از مناطق، به دلیل بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی، شوری این منابع به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است (Mirzavand et al., 2020; Noori et al., 2021; Taherian and Joodavi, 2021). در نتیجه، استفاده از منابع آب غیرمتعارف در جهان به یک ضرورت تبدیل شده است. این مناطق نیازمند توسعه استراتژی‌های مدیریت آب هستند که منابع آب غیرمتعارف را شامل شود تا بتوانند با واقعیت کنونی و آینده‌نگری در کشاورزی آبی هماهنگ شوند. زیرا روش‌های سنتی آبیاری با استفاده از منابع آب متعارف دیگر پاسخگوی نیازهای فعلی و آینده کشاورزی آبی نیستند (Amali et al., 2021; Chen et al., 2021; Karimidastenaei et al., 2022) . یکی از راه‌حل‌های رایج در مناطق کم‌آب، استفاده ترکیبی از دو یا چند منبع آب مختلف؛ ازجمله آب شیرین، آب‌شور زیرزمینی، آب دریا، پساب تصفیه‌شده و آب نمک‌زدایی شده، است (Benaafi et al., 2024; Daghari et al., 2020; Dhakal et al., 2022; Hendrickson et al., 2023; Pagliero et al., 2024; Shemer et al., 2023).

بهره‌وری آب، به‌عنوان معیاری از تولید محصول به ازای واحد آب مصرفی، یکی از شاخص‌های کلیدی در کشاورزی پایدار است و در شرایط محدودیت منابع آبی، اهمیت ویژه‌ای دارد. خیار به‌عنوان یک محصول مهم گلخانه‌ای، به کم‌آبی و شوری حساس است و مطالعات مختلفی برای بهینه‌سازی بهره‌وری آب آن انجام‌شده است. کم‌آبیاری[1] (DI)، روشی پایدار در جهت کاهش مصرف آب، به‌عنوان یک استراتژی مدیریتی، با هدف کاهش بهینه و محاسبه‌شده میزان آبیاری در مقایسه با نیاز آبی گیاه، شناخته می شود (فخرآبادی و خوش‌سیمای چنار، ۱۴۰۰). این روش در بسیاری از مناطق دنیا به‌کار گرفته شده است و مزایای قابل‌توجهی مانند کاهش هزینه‌های آبیاری و افزایش بهره‌وری آب بدون کاهش شدید در عملکرد دارد (Geerts and Raes, 2009). راحیل و گانادیلو گزارش کردند که بالاترین عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای به‌ترتیب ۵۹/۵۲ تن در هکتار و ۳۳ کیلوگرم بر مترمکعب در سطح آبیاری معادل ۷۰ درصد ET_c حاصل شد (Rahil and Qanadillo, 2015). بااین‌حال، تأثیر DI بر عملکرد بسته به مراحل رشد گیاه متغیر است؛ مائو و همکاران نشان دادند که در کشت خیار گلخانه‌ای، کمبود آب در مراحل میوه‌دهی منجر به کاهش قابل‌توجه عملکرد می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که مدیریت دقیق DI در مراحل مختلف رشد برای کاهش تأثیرات منفی آن ضروری است (Mao et al., 2003). العمران و همکاران در مطالعه خود اشاره کردند که محصول خیار توانست در مرحله میانی رشد نسبت به کمبود آب مقاومت نشان دهد، به‌طوری‌که مقادیر Ky بین ۰/۷۶ – ۰/۵۷ متغیر بود. مقدار آب مصرفی در تیمار ۱۰۰ درصد ET_c به‌طور قابل‌توجهی کمتر از روش سنتی که توسط کشاورزان محلی استفاده می‌شود؛ بود. بالاترین مقادیر بهره‌وری آب در تیمار ۴۰ درصد ET_c مشاهده شد، هرچند که عملکرد کلی محصول کاهش یافت (Alomran et al., 2013) و به همین دلیل کم‌آبیاری در محیط گلخانه را برای محصول خیار پیشنهاد ندادند.

فرامرزپور و همکاران (۱۳۹۱) نشان دادند که کاهش حجم آب مصرفی در نقاط پتانسیلی ۴۵ و ۶۵ سانتی‌بار، باعث افزایش بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای شد. بهره‌وری آب در تیمار ۶۵ سانتی‌بار برابر ۴۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود که نسبت به تیمارهای ۲۵ و ۴۵ سانتی‌بار به ترتیب ۴۶ و ۴۸ درصد بیشتر بود. کرمانی و اسدی (۱۳۹۳) در مطالعه‌ای تأثیر چهار آستانه پتانسیل خاک (۴۵، ۵۵، ۶۵ و ۷۵ سانتی‌بار) را بر عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای بررسی کردند. بیشترین عملکرد محصول در تیمار ۴۵ سانتی‌بار و بالاترین بهره‌وری آب در تیمار ۷۵ سانتی‌بار به دست آمد. بهره‌وری آب در تیمار ۷۵ سانتی‌بار برابر با ۵۸/۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود. این نتایج نشان می‌دهند که تنظیم دقیق آبیاری با توجه به شرایط اقلیمی و نوع سیستم آبیاری، عملکرد محصول و بهره‌وری آب را بهبود می‌بخشد. آشور و همکاران اثر آبیاری بر

[1] Deficit Irrigation

اساس سه سطح ET_c (۰/۸، ۱ و ۱/۲) و تناوب‌های آبیاری (یک، دو و سه بار در روز) را بر بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای بررسی کردند. بهترین بهره‌وری آب (۹/۳۲ کیلوگرم بر مترمکعب) در تیمار ET_c ۰/۸ و سه بار آبیاری در روز حاصل شد (Ashour et al., 2020). بوتارو و همکاران نشان دادند که در کشت زمستانه، بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای در سطح مکش ۳۰۰- سانتی‌بار به ۴۴/۱ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش یافت. در کشت تابستانه، بهره‌وری آب در همین سطح مکش به ۱۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب رسید که بیانگر اهمیت مدیریت مناسب رطوبت خاک و در نظر گرفتن دوره رشد است (Buttaro et al., 2015). همچنین رضوانی و همکاران (۱۳۹۹) گزارش کردند که عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای (رقم نگین) بسیار تحت تأثیر فصل رشد (زمستانه یا تابستانه) و سطوح مختلف آبیاری قرار گرفت؛ به‌طوری‌که بیشترین عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای به‌ترتیب در کشت تابستانه به میزان ۲۱/۱۴ کیلوگرم در مترمربع در تیمار ۱۲۰ درصد و ۴۹ کیلوگرم در مترمکعب در تیمار ۸۰ درصد تبخیر – تعرق به‌دست آمد. العمران و لوکی نیز تأثیر آبیاری بر اساس ۳۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ET_c را بررسی کردند و دریافتند که بهترین بهره‌وری آب (۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب) در تیمار ۸۰ درصد ET_c به دست آمد (Alomran and Luki, 2012). این مطالعات تأکید دارند که مدیریت دقیق مقدار و دور آبیاری (برنامه‌ریزی آبیاری بهینه) با توجه به دوره رشد، می‌تواند به بهبود عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای منجر شود.

شوری آب آبیاری نیز تأثیر بسزایی بر عملکرد خیار دارد. وان و همکاران در مطالعه‌ای مزرعه‌ای نشان دادند که استفاده از آب‌شور تا ۴/۹ دسی‌زیمنس بر متر برای آبیاری خیار قابل‌قبول است و می‌تواند در شرایط محدودیت منابع آب شیرین به‌عنوان یک استراتژی جایگزین مورد استفاده قرار گیرد (Wan et al., 2010). بااین‌حال آمر و همکاران گزارش کردند که در شرایط گلخانه‌ای شوری و کمبود آب به‌صورت همزمان، عملکرد خیار را کاهش می‌دهد (Amer et al., 2009). همچنین نتایج حاصل از مطالعه رئیسی‌نژاد دوبنه و یزدان‌پناه (۱۳۹۸) در بررسی عملکرد و اجزای عملکرد خیار گلخانه‌ای در شرایط اعمال توأم کم‌آبیاری و شوری نشان داد که بیشترین بهره‌وری آب در سطح شوری آب آبیاری ۰/۹ دسی‌زیمنس بر متر به میزان ۹/۸ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد و با افزایش شوری آب آبیاری از ۰/۹ به ۲/۶ دسی‌زیمنس بر متر باعث کاهش ۷/۱ درصدی عملکرد و بهره‌وری آب شد. کاهش عملکرد عمدتاً ناشی از تجمع یون‌های سمی مانند سدیم و کلرید است که تعادل آبی گیاه را مختل می‌کند و فتوسنتز را کاهش می‌دهد (Al-Momany and Abu-Romman, 2023). این یافته‌ها اهمیت ترکیب شوری و مدیریت دقیق مقدار آب آبیاری را برای دستیابی به بهترین نتایج، برجسته می‌کنند.

مقایسهٔ اجمالی بهره‌وری آب در محصولات گلخانه‌ای کشور با میانگین جهانی و کشورهای پیشرو نشان می‌دهد که پایین بودن عملکرد و بهره‌وری آب در کشور نسبت به کشورهای پیشرو در این صنعت، بیش از ۵۰ درصد است که جای تأمل و آسیب‌شناسی دارد (زارعی و مؤمنی، ۱۳۹۶). با توجه به اهمیت خیار به‌عنوان یک محصول مهم گلخانه‌ای در ایران، این مطالعه به‌منظور بررسی عملکرد و بهره‌وری فیزیکی آب خیار گلخانه‌ای تحت تأثیر شوری و مقادیر مختلف آب آبیاری در دو دوره کشت پاییز – زمستان و بهار – تابستان ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

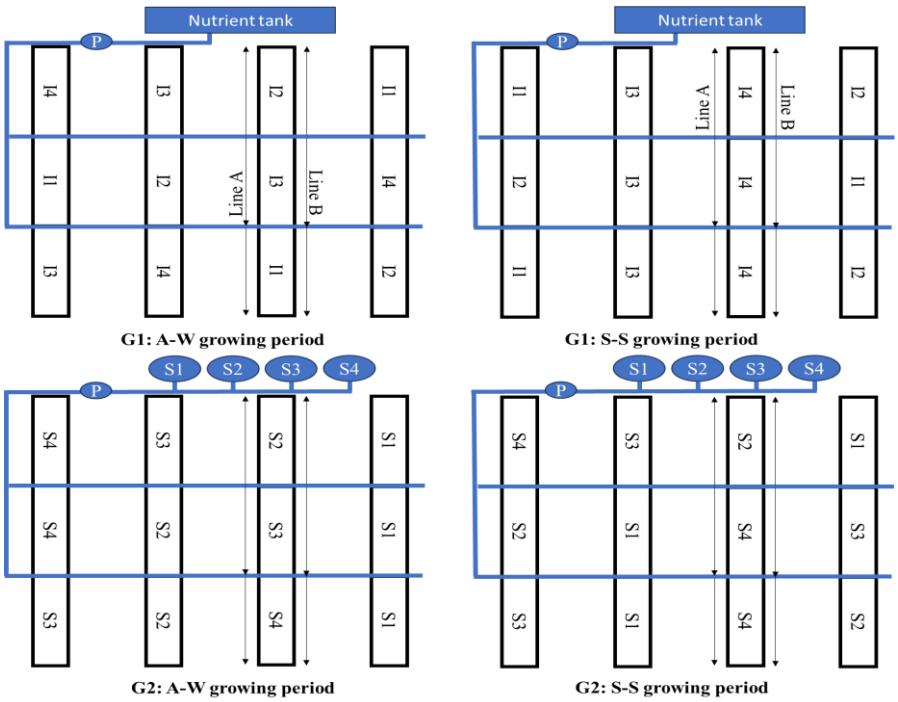
برای بررسی عملکرد و بهره‌وری فیزیکی آب خیار گلخانه‌ای رقم تالیسیا تحت تأثیر شوری و مقادیر مختلف آب آبیاری در دو دوره کشت پاییز – زمستان ۱۴۰۱ (A-W) و بهار – تابستان ۱۴۰۲ (S-S) به‌ترتیب دو گلخانه G1 و G2 از گلخانه‌های پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در کرج با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۲۹۲/۹ متر از سطح دریا، انتخاب شدند. ابعاد هر دو گلخانه ۸×۱۰ مترمربع، از نوع چنددهانه‌ای با دیوارهای شیشه‌ای و پوشش سقف از جنس پلی‌کربنات بود. برای تعدیل درجه حرارت محیط، در هر دو گلخانه از سیستم پد و فن و برای گرمایش در فصل سرد از هیتر تابشی سقفی استفاده شد. بستر گلخانه برای ایجاد زهکشی مناسب و رشد بهینه گیاه، شخم

سطحی زده شده و سنگریزه‌های بزرگ جمع‌آوری شدند. سپس به عمق ۳۰ سانتی‌متر خاک باغچه که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است؛ به هر دو گلخانه ریخته شد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک تحت آزمایش در هر دو گلخانه G1 و G2

عمق	بافت	C	N	P	K	Na	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	pH	EC_e
سانتیمتر	–	درصد		میلی‌گرم در کیلوگرم									–	دسی زیمنس بر متر
۳۰	لوم‌رسی شنی	۱/۱	۰/۱	۱۷	۱۱۳	۵۰	۱۳۲	۸۱	۴	۰/۷۵	۰/۵	۲	۷/۷۲	۱/۳۵

گلخانه‌های G1 و G2 به‌ترتیب برای انجام آزمایش تأثیر مقادیر آب آبیاری (آزمایش ۱) و شوری‌های مختلف آن (آزمایش ۲) بر عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای رقم تالیسیا در نظر گرفته شدند. هر دو آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. تیمارهای آزمایش ۱، شامل چهار سطح مقدار آب آبیاری ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد تبخیر – تعرق (I_1، I_2، I_3 و I_4) با سه تکرار و آزمایش ۲، شامل چهار سطح شوری آب آبیاری کمتر از ۳، برابر ۳، برابر ۶ و برابر ۹ دسی‌زیمنس بر متر (S_1، S_2، S_3 و S_4) با سه تکرار، انجام شدند. در هر آزمایش ۱۲ کرت آزمایشی در نظر گرفته شد. جانمایی کرت‌های آزمایشی در هر دو دوره رشد A-W و S-S در شکل ۱ برای گلخانه G1 و G2 ارائه شده است.



شکل ۱- جانمایی کرت‌های آزمایشی در گلخانه G1 و G2 در دو دوره رشد A-W و S-S

لازم به ذکر است برای تکرار آزمایش در دوره رشد S-S، در گلخانه G1 همه کرت‌ها آبشویی کامل شده و سپس انتقال نشاء خیار انجام شد. برای گلخانه G2 نیز خاک کرت تیمارهای شور شده از دوره رشد A-W با خاک بدون شوری تعویض شده و همه کرت‌ها آبشویی کامل انجام پذیرفت. در هر دو آزمایش دوره رشد A-W از ۲۷ مهر ۱۴۰۱ تا ۳۰ دی ۱۴۰۱ به مدت ۹۶ روز و S-S از ۹ فروردین ۱۴۰۲ تا ۱۰ مرداد ۱۴۰۲ به مدت ۱۲۶ روز (از زمان انتقال نشاء به گلخانه) بود. در هر دو آزمایش و در هر دو دوره رشد

A-W و S-S، در ابتدای انتقال نشاء به گلخانه اصلی جهت جلوگیری از وارد شدن تنش و استقرار نشاء، بدون اعمال تیمار، چند نوبت آبیاری انجام شد. سپس به‌منظور اندازه‌گیری تبخیر – تعرق گیاه (ET_c) از معادله ساده شدهٔ بیلان آب خاک استفاده شد. یعنی با توجه به شرایط گلخانه‌ای و سیستم آبیاری که در این مطالعه آبیاری قطره‌ای است؛ از جزءهای بارندگی، صعود موئینه، رواناب و نفوذ عمقی بیلان آب خاک صرف‌نظر می‌شود؛ بنابراین رابطه بیلان آب خاک به شکل رابطه ۱ درمی‌آید (James, 1988).

$$ET_c = I \pm \Delta S \qquad (۱)$$

که در آن، I، آبیاری (mm) و ΔS، تغییرات رطوبت خاک در یک بازه زمانی مشخص در ناحیه ریشه گیاه است. در هر دو آزمایش، رطوبت خاک به‌صورت روزانه با استفاده از سنسورهای TDR[1] کارگذاری شده در لایه ۳۰-۰ سانتی‌متری، اندازه‌گیری از میانگین داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده در سه کرت آزمایشی شاهد بر اساس رابطه بیلان آب (رابطه ۱)، همچنین عمق ریشه در طول دوره رشد (رابطه ۲) برای تعیین ET_c خیار گلخانه‌ای (تغییرات رطوبت × در عمق ریشه) استفاده شد. عمق ریشه (Z_r) در طول دوره رشد با در نظر گرفتن حداکثر عمق ریشه ($Z_{r.m}$)، روزهای بعد از کاشت (DAP) و تعداد روزهایی که بعد از آن ریشه به عمق حداکثر می‌رسد (DTM)، از رابطه ۲ به دست آمد (Borg and Grimes, 1986; Merrill et al., 2002).

$$Z_r = Z_{r.m}\left(0.5 + 0.5 \times \sin\left[3.03\left(\frac{DAP}{DTM}\right) - 1.47\right]\right) \qquad (۲)$$

سپس با در نظر گرفتن دور آبیاری ۴ روز در A-W و ۳ روز در S-S، مجموع ET_c محاسبه و بر اساس آن و در نظر گرفتن نیاز آبشویی (به‌طور میانگین ۲۵ درصد) و راندمان سیستم آبیاری (۹۵ درصد)، میزان آب آبیاری محاسبه گردید. در آزمایش ۱ که برای تیمارهای مقدار آبیاری در نظر گرفته شده بود، میزان آب آبیاری در تیمار I_2 محاسبه شده و مابقی تیمارها با ضرب در ۱/۲، ۰/۸ و ۰/۶ به‌ترتیب میزان آبیاری تیمارهای I_1، I_3 و I_4 به دست آمد. در گلخانه ۲ نیز با اندازه‌گیری رطوبت در کرت‌های شاهد (S_1) میزان آب آبیاری در هر سطح شوری مشخص شد. در هر دو گلخانه از آب آبیاری با هدایت الکتریکی ۰/۹۲ دسی‌زیمنس بر متر استفاده شد. در آزمایش ۲ (گلخانه G2) ابتدا محلول تغذیه‌ای یکسان بر اساس نیاز تغذیه‌ای گیاه در هر مرحله رشدی که در جدول ۲ ارائه شده است و ترکیبات آب آبیاری؛ در هر مخزن که مختص هر تیمار بود؛ آماده شده و بعد از آن با توجه به سطوح شوری آب آبیاری (۳، ۶ و ۹ دسی‌زیمنس بر متر) NaCl به محلول موجود اضافه شد. به‌منظور محاسبه و تخمین اولیه مقدار نمک مورد نیاز برای رسیدن به سطح شوری در هر تیمار از رابطه ۳ استفاده شد.

$$TDS = EC \times 640 \times k$$

که در آن، TDS[2]، مقدار کل نمک‌های محلول در آب بر حسب میلی‌گرم بر لیتر؛ EC، هدایت الکتریکی محلول مورد نیاز برای سطوح شوری مختلف و k ضریبی است که به درصد خلوص نمک مورد آزمایش بستگی دارد که با توجه به نمکی که در این آزمایش استفاده شد، این ضریب برابر ۰/۸۶ در نظر گرفته شد (خوش‌سیمای چنار و نوری، ۱۳۹۸).

در هر دو آزمایش و در طول هر دو دوره رشد A-W و S-S، وزن میوه‌های برداشت شده از هر بوته در تیمارهای آزمایشی اندازه‌گیری؛ مجموع آن در آخر دوره رشد به‌عنوان عملکرد (WoF[3]) در نظر گرفته شده و سپس بر اساس رابطه ۴ بهره‌وری آب آبیاری (WP[4]) خیار گلخانه‌ای بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شد.

$$WP = \frac{WoF}{I} \qquad (۴)$$

محاسبات آماری و تجزیه واریانس برای صفات اندازه‌گیری شده در نرم‌افزار آماری SAS 9.4 (SAS Institute Inc, 2013) انجام گرفته و سپس میانگین صفات مورد مطالعه با استفاده از آزمون مقایسه‌ای میانگین دانکن در سطح ۱ و ۵ درصد، مقایسه شدند.

[1] Time-Domain Reflectometry
[2] Total Dissolved Solids
[3] Weight of Fruit
[4] Water Productivity

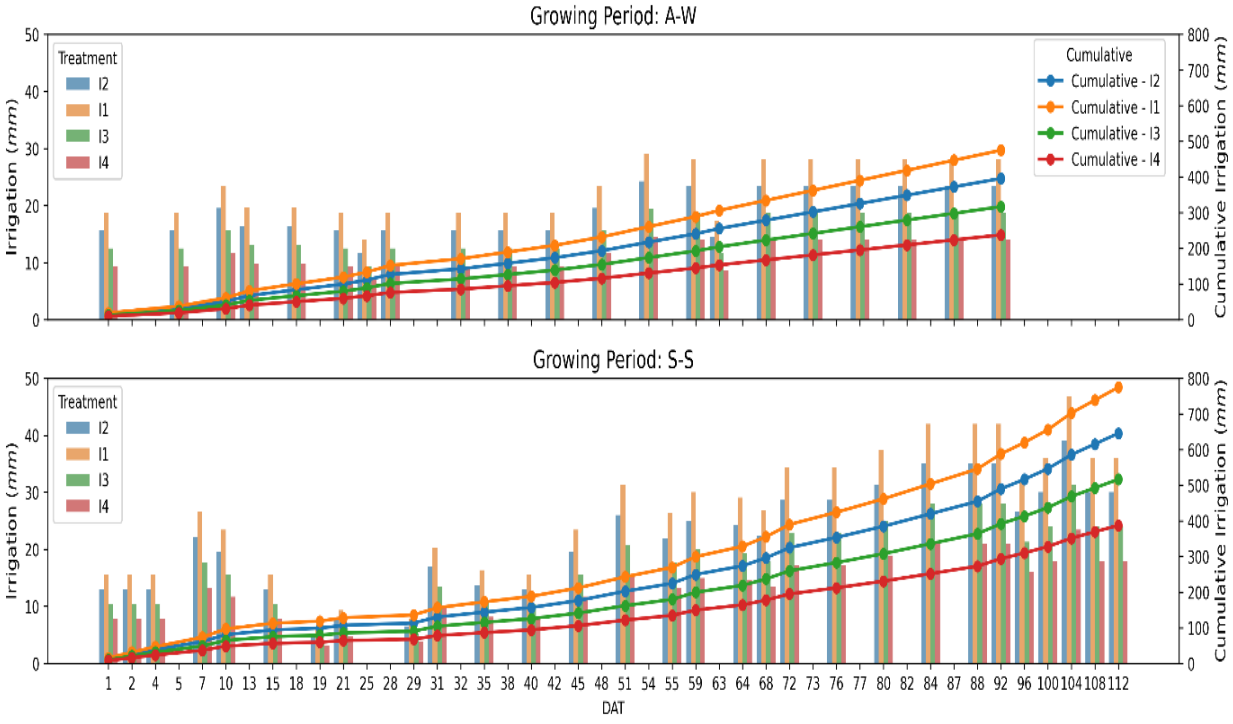
جدول ۲- محلول تغذیه‌ای ایده‌آل خیار گلخانه‌ای در مراحل مختلف رشد

مرحله رشد	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	SO_4	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo	B
	میلی‌گرم در لیتر											
استقرار	۶۳	۶۳	۶۳	۴۲	۲۱	۰	۰	۰/۵۸	۰/۳۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۹
رشد – گلدهی	۱۲۶	۸۹	۱۲۱	۶۳	۳۲	۰	۰/۸۸	۰/۵۸	۰/۳۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۹
گلدهی – شروع میوه	۱۵۷	۸۴	۱۸۹	۸۴	۴۲	۰	۰/۸۸	۰/۵۸	۰/۳۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۹
برداشت میوه	۱۸۹	۸۴	۲۴۲	۸۴	۴۲	۰	۰/۸۸	۰/۵۸	۰/۳۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۹

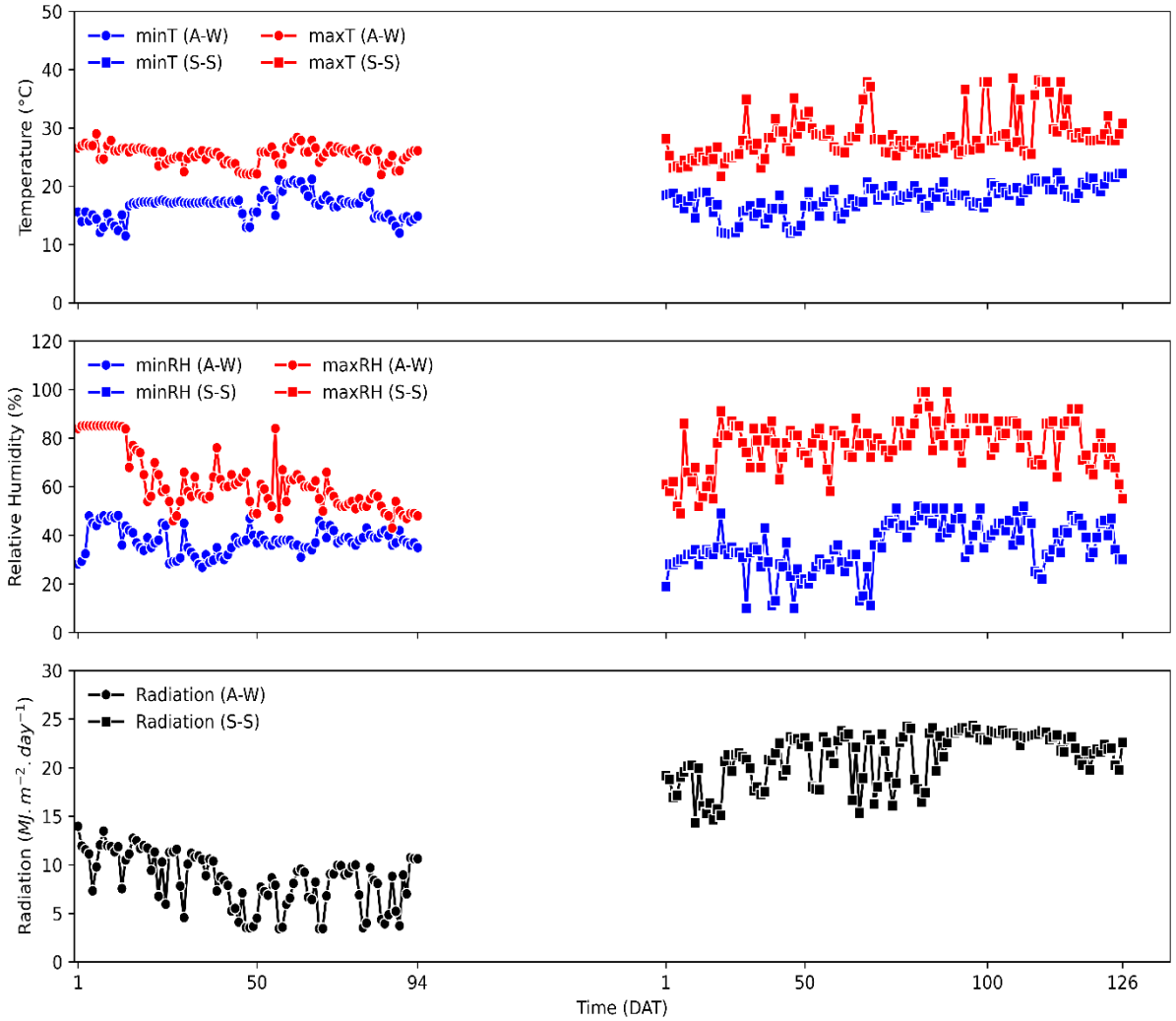
نتایج و بحث

برنامه‌ریزی آبیاری

برنامه آبیاری اعمال شده در آزمایش ۱ (سطوح مختلف مقدار آبیاری) در طول دو دوره رشد A-W و S-S در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج، در طول دوره رشد A-W و S-S، به‌ترتیب ۲۱ و ۲۹ رویداد آبیاری انجام شـــده که مجموع آبیاری تیمارهای I_1 تا I_4 به‌ترتیب ۴۷۵، ۳۹۶ (تیمار شـــاهد)، ۳۱۷ و ۲۳۸ میلی‌متر در دوره رشـــد A-W و با توجه به افزایش دما، تابش و تبخیر – تعرق در دوره رشـــد S-S، نیاز آبیاری گیاه نیز افزایش یافته و مجموع آبیاری به‌ترتیب ۷۷۵، ۶۴۶، ۵۱۷ و ۳۸۸ میلی‌متر برای تیمارهای I_1 تا I_4 بوده اســـت. شـــکل ۳ میانگین روزانهٔ تابش و حداقل و حداکثر دما و رطوبت نسبی در دو دوره رشد A-W و S-S را نشان می‌دهد. مقایسه داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده در گلخانه و مقادیر آبیاری در دو دوره رشـــد نشـــان‌دهنده افزایش قابل‌توجه نیاز آبی در دوره رشـــد گرم‌تر (S-S) اســـت که باعث افزایش تعداد و مقدار رویدادهای آبیاری شده ا ست. این تغییر در برنامه‌ریزی آبیاری بیانگر انطباق میزان آبیاری با شـرایط محیطی هر دوره رشدی است.

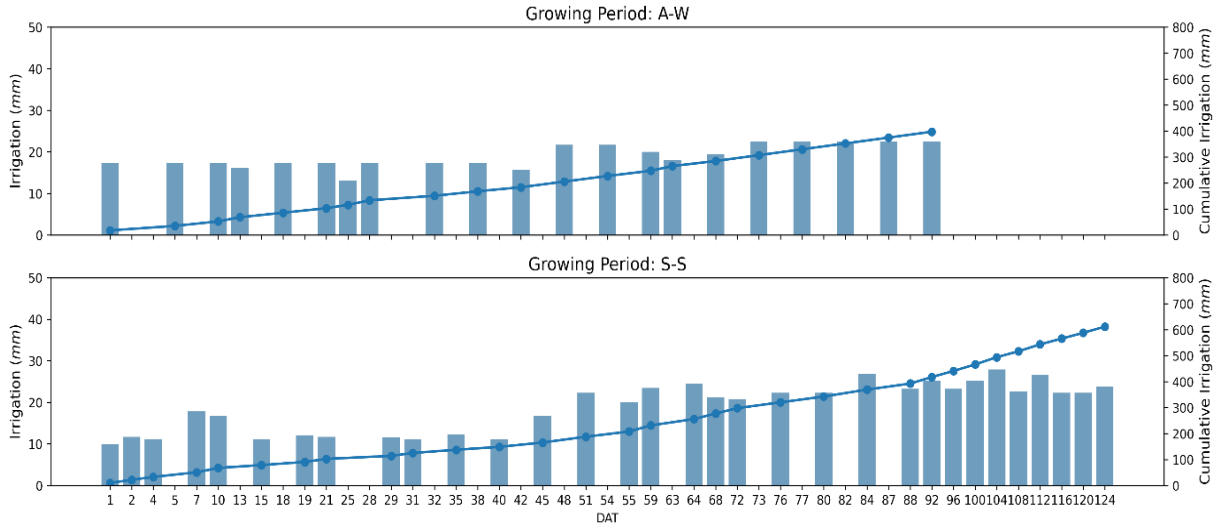


شکل ۲- برنامه آبیاری خیار گلخانه‌ای در سطوح مختلف مقدار آب آبیاری (آزمایش ۱) در طول دو دوره رشد A-W و S-S



شکل ۳- میانگین تابش، حداقل و حداکثر دما و رطوبت نسبی اندازه‌گیری شده در دو گلخانه G1 و G2 در دو دوره رشد A-W و S-S

شکل ۴ برنامه‌ریزی آبیاری اعمال‌شده در طول دوره رشد A-W و S-S در آزمایش ۲ که به بررسی سطوح مختلف شوری آب آبیاری (تیمارهای S_1 تا S_4) اختصاص دارد را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه‌شده، برنامه‌ریزی آبیاری در تمام تیمارها یکسان بوده است. محاسبات نیاز آبیاری بر اساس تیمار S_1 (شاهد) و با در نظر گرفتن میانگین نیاز آبشویی ۲۵ درصد انجام شده است و این رویکرد برای سایر تیمارها نیز به‌کار رفته است. به‌این‌ترتیب، هیچ تفاوتی در برنامه آبیاری بین تیمارهای S_1 تا S_4 وجود نداشته است. در طول دوره رشد A-W، تعداد ۲۱ رویداد آبیاری انجام‌شده و مجموع عمق آبیاری برابر با ۳۹۸ میلی‌متر بوده است. در مقابل، در دوره رشد S-S، به دلیل افزایش نیاز آبیاری ناشی از دما و تابش بیشتر (شکل ۳)، تعداد رویدادهای آبیاری به ۳۲ نوبت افزایش‌یافته و مجموع عمق آبیاری به ۶۱۲ میلی‌متر رسیده است.



شکل ٤- برنامه‌ریزی آبیاری خیار گلخانه‌ای در سطوح مختلف شوری آب آبیاری (آزمایش ۲) در طول دو دوره رشد A-W و S-S

عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای تحت تأثیر مقادیر مختلف آب آبیاری (آزمایش ۱)

جدول۳ نتایج تجزیه واریانس عملکرد (WoF) و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای (WP) را تحت تأثیر سطوح مختلف مقادیر آب آبیاری در آزمایش ۱ که در دو دوره رشد A-W و S-S انجام شده است، ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج تحلیل آماری ارائه شده در این جدول، سطوح مختلف آبیاری تأثیر معنی‌داری بر WoF در هر دو دوره رشد داشته‌اند. به‌طور خاص، اثر سطوح مختلف آبیاری در سطح احتمال یک درصد ($p < 0.01$) معنی‌دار بوده است؛ که نشان‌دهنده حساسیت بالای WoF به تغییرات مقادیر آب آبیاری در شرایط آزمایش است. این نتایج بر اهمیت مدیریت بهینه مقادیر آب آبیاری برای دستیابی به عملکرد مطلوب در شرایط کشت گلخانه‌ای، تأکید دارد. همچنین نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح مختلف مقادیر آب آبیاری در دوره رشد A-W بر بهره‌وری آب آبیاری (WP) خیار گلخانه‌ای اثر معنی‌دار داشته است؛ اما در دوره رشد S-S تأثیر معنی‌داری بر آن نداشته است.

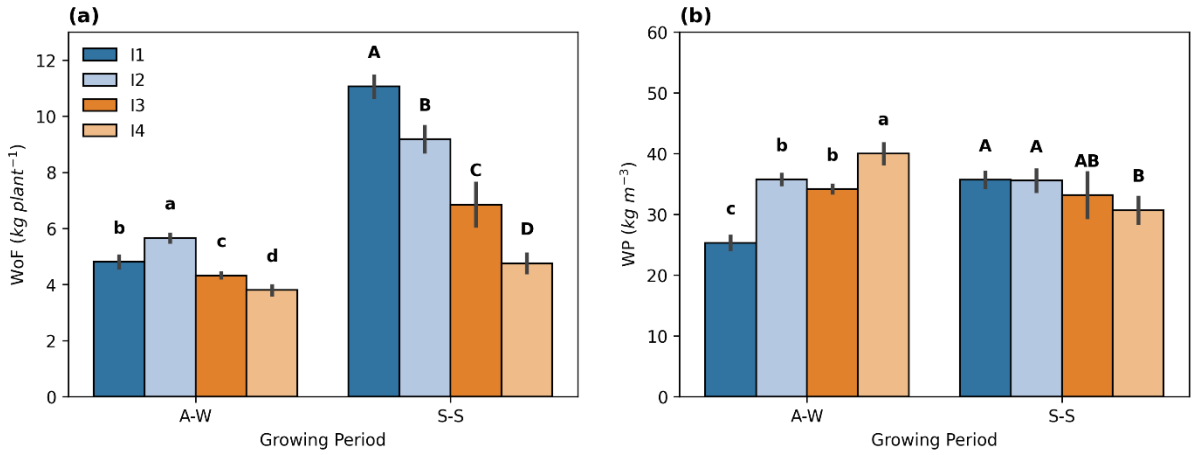
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس عملکرد (WoF) و بهره‌وری آب (WP) خیار گلخانه‌ای تحت تأثیر سطوح مختلف مقادیر آب آبیاری (آزمایش ۱) در دو دوره رشد A-W و S-S

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		A-W		S-S	
		WoF	WP	WoF	WP
بلوک	۲	۲۱۸۳۰۳/۱۱**	۱۱/۷۲**	۲۵۶۷۷۸۰/۷۶**	۵۳/۷۲**
مقدار آب آبیاری	۳	۱۸۷۳۲۱۹/۶۴**	۱۱۴/۰۵**	۲۲۵۹۱۱۸۴/۰۴**	۱۶/۷۱^{ns}
خطا	۶	۱۱۷۷۱/۹۵	۰/۷۷	۱۴۲۹۲۴/۱۶	۳/۹۶
ضریب تغییرات	–	۲/۳۳	۲/۶۰	۴/۷۴	۵/۹۰

** و ^{ns} به‌ترتیب نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و عدم اختلاف معنی‌دار است.

عملکرد

شکل ۵a نتایج مقایسه میانگین عملکرد خیار گلخانه‌ای تحت تأثیر سطوح مختلف مقادیر آب آبیاری (I_1 تا I_4) را در دو دوره رشد A-W و S-S نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۵a، بیشترین عملکرد در دوره رشد A-W مربوط به سطح آبیاری I_2 (۱۰۰ درصد نیاز آبی؛ تیمار شاهد) با مقدار ۵/۶۵ کیلوگرم در بوته بوده است؛ که با سایر سطوح آبیاری تفاوت معنی‌داری دارد. به‌طور مشخص، عملکرد سطح آبیاری I_2 نسبت به سطوح آبیاری I_1، I_3 و I_4 به‌ترتیب ۱۷، ۳۰ و ۴۹ درصد بیشتر بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که در دوره سردتر، افزایش میزان آبیاری (سطح آبیاری I_1) نه‌تنها تأثیر مثبتی بر عملکرد نداشته، بلکه به دلیل کاهش تابش خورشیدی و دما (مخصوصاً میزان تابش)، رشد رویشی بیش از حد بوته‌ها (علفی شدن) و کاهش رشد زایشی را به همراه داشته است. از سوی دیگر، کاهش مقادیر آبیاری در سطوح I_3 و I_4 منجر به افت معنی‌دار عملکرد محصول شده است که نشان‌دهنده اثر منفی تنش آبی بر رشد گیاه در این دوره است. در دوره رشد S-S، بیشترین عملکرد مربوط به سطح آبیاری I_1 با مقدار ۱۱/۰۵ کیلوگرم در بوته بوده است؛ که به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از سایر سطوح آبیاری است. عملکرد سطح آبیاری I_1 نسبت به سطوح آبیاری I_2، I_3 و I_4 به ترتیب ۲۰، ۶۱ و ۱۳۳ درصد بیشتر بوده است. این افزایش عملکرد در سطح آبیاری I_1 در دوره گرم‌تر را می‌توان به تأثیر مثبت دما و تابش خورشیدی بالا نسبت داد که منجر به افزایش فعالیت فتوسنتزی و تولید ماده خشک شده است (Nikolaou et al., 2021; Wei et al., 2023). تأمین آب بیشتر در سطح آبیاری I_1 همراه با بهتر شدن شرایط تهویه گلخانه در این دورهٔ کشت، باعث فراهم شدن شرایط ایده‌آل برای فتوسنتز، جلوگیری از بسته‌شدن روزنه‌ها و افزایش راندمان تولید محصول شده است. در مقابل، سطوح آبیاری I_3 و I_4 به دلیل تنش آبی شدید، دچار کاهش راندمان فتوسنتز و در نتیجه افت شدید عملکرد شده‌اند (شکل ۵a).



در هر ستون حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

شکل ۵- عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای تحت تأثیر مقادیر مختلف آب آبیاری (آزمایش ۱) در دو دوره رشد A-W و S-S

با توجه به شکل ۵a و در مقایسه عملکرد دو دوره رشد، تفاوت‌های قابل‌توجهی مشاهده می‌شود. در دوره A-W، بیشترین عملکرد (۵/۶۵ کیلوگرم در بوته) در سطح آبیاری I_2 به‌دست آمد، درحالی‌که در دوره S-S، سطح آبیاری I_1 با مقدار ۱۱/۰۵ کیلوگرم در بوته بیش‌ترین عملکرد را نشان داد. این تفاوت نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه شرایط محیطی هر فصل بر عملکرد محصول است. رضوانی و همکاران (۱۳۹۹) نیز در پژوهش خود به اختلاف عملکرد خیار گلخانه‌ای در دو دوره رشد پرداخته و گزارش کردند که در دوره S-S، بیشترین عملکرد به میزان ۲۱/۱۳ کیلوگرم بر مترمربع در سطح آبیاری ۱۲۰ درصد به‌دست‌آمده است و به‌طور

متوسط عملکرد در کشت S-S، ۱۰۱/۹ درصد بالاتر از کشت A-W بوده است. در دوره A-W، به دلیل کاهش تابش خورشیدی و احتمالاً دمای پایین، رشد رویشی بر رشد زایشی غالب بوده و افزایش آبیاری تأثیر مثبتی بر عملکرد نداشته است. در مقابل، در دوره S-S، شرایط گرم‌تر و تابش بیشتر باعث افزایش راندمان فتوسنتز شده و تأمین آب کافی یا حتی بیش از نیاز (I_1) منجر به عملکرد بالاتر گردیده است (Amin et al., 2024). به‌طورکلی، این نتایج نشان‌دهنده اهمیت تطبیق برنامه‌ریزی آبیاری با شرایط محیطی هر فصل است. در دوره‌های سردتر، تنظیم آبیاری برای جلوگیری از رشد رویشی بیش‌ازحد و دستیابی به عملکرد بهینه اهمیت دارد؛ درحالی‌که در دوره‌های گرم‌تر، تأمین آب کافی برای بهره‌گیری حداکثری از شرایط ایده‌آل محیطی ضروری است. این یافته‌ها بر لزوم مدیریت دقیق آبیاری برای دستیابی به عملکرد مطلوب در شرایط گلخانه‌ای تأکید دارد.

بهره‌وری آب

شکل 5b نتایج مقایسه میانگین بهره‌وری آب (WP) خیار گلخانه‌ای تحت تأثیر سطوح مختلف مقدار آبیاری (I_1 تا I_4) را در دو دوره رشد A-W و S-S نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر مقادیر مختلف آبیاری بر بهره‌وری آب در دوره رشد A-W معنی‌دار بوده و نتایج متفاوتی بین دوره های A-W و S-S مشاهده شده است. در دوره A-W، بیشترین WP مربوط به سطح آبیاری I_4 (۶۰ درصد نیاز آبی) با مقدار ۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. این سطح آبیاری با کمترین میزان آبیاری (۲۳۸ میلی‌متر) توانسته است بیشترین WP را داشته باشد. کاهش مقدار آبیاری در این دوره به دلیل شرایط محیطی سردتر و کاهش تبخیر – تعرق گیاه، باعث افزایش راندمان استفاده از منابع آبی شده است. همچنین، کمترین WP در این دوره مربوط به سطح آبیاریI_1 با مقدار ۲۵/۳ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. مصرف بیش از نیاز آبی در سطح آبیاری I_1، به دلیل رشد رویشی بیش از حد و کاهش عملکرد محصول، منجر به کاهش WP شده است. بهره‌وری آب در سطوح آبیاری میانی I_2 و I_3 به‌ترتیب ۳۵/۷۵ و ۳۴/۱۶ کیلوگرم بر مترمکعب بود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که آبیاری معادل ۱۰۰ درصد نیاز آبی قادر است تعادلی مطلوب میان مصرف آب و عملکرد محصول برقرار کند. این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین ازجمله مطالعات رضاوردی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۶) و کریمی و همکاران (۱۳۸۹) نیز همخوانی دارد که تأثیر مثبت تأمین کامل نیاز آبی بر عملکرد بهینه گیاه را تأیید کرده‌اند. به‌طورکلی، نتایج دوره A-W نشان‌دهنده تأثیر مثبت کاهش آبیاری بر WP در شرایط سردتر و کم‌تابش است. در دوره S-S، بیشترین WP مربوط به سطح آبیاری I_1 و I_2 به‌ترتیب با مقادیر ۳۵/۶۹ و ۳۵/۵۶ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. در این دوره، افزایش تابش خورشیدی و دما باعث افزایش تبخیر – تعرق گیاه شده است (شکل ۳). تأمین آب کافی در سطوح آبیاری I_1 و I_2شرایط بهینه‌ای برای فتوسنتز فراهم کرده و عملکرد بالاتر این تیمارها نسبت به تیمارهای کم‌آب‌تر، منجر به بهره‌وری بالای آب شده است. در مقابل، کمترین بهره‌وری آب در این دوره مربوط به سطح آبیاری I_4 با مقدار ۳۰/۷ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. کاهش شدید آب آبیاری در این تیمار، منجر به تنش آبی و کاهش عملکرد محصول شده است، به‌طوری‌که کاهش عملکرد نسبت به کاهش مقدار آبیاری، بیشتر بوده و بهره‌وری آب کاهش یافته است؛ به عبارت دیگر، کاهش شدید آب آبیاری در این دوره احتمالاً باعث وارد آمدن تنش آبی به گیاه شده که بر عملکرد کلی و بهره‌وری آب تأثیر منفی گذاشته است. سطح آبیاری I_3 نیز با مقدار ۳۳/۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب بهره‌وری متوسطی نشان داد، اما همچنان تحت تأثیر تنش آبی قرار داشته است (شکل 5b). کاهش بهره‌وری آب ناشی از افزایش میزان آب آبیاری توسط پژوهشگران متعددی گزارش شده است (Mao et al., 2003؛ فرامرزپور و همکاران، ۱۳۹۱؛ رئیسی‌نژاد دوبنه و یزدان‌پناه، ۱۳۹۸؛ رضوانی و همکاران، ۱۳۹۹). بااین‌حال، تفاوت در معنی‌دار بودن یا نبودن اثر سطوح مختلف آبیاری بر بهره‌وری آب در مطالعات مختلف، به عواملی مانند دامنه متفاوت تنش آبی و روش تخمین نیاز آبیاری نسبت داده می‌شود. در مطالعاتی که دامنه گسترده‌تری از تنش آبی در نظر گرفته شده است، تأثیر سطوح مختلف آبیاری بر بهره‌وری آب به‌طور معنی‌داری قابل‌مشاهده بوده است (رضوانی و همکاران، ۱۳۹۹). مقایسه

بهره‌وری آب در دو دوره نشان‌دهنده الگوهای متفاوتی است که تحت تأثیر شرایط محیطی و نیاز آبی گیاه قرار دارند. در دوره A-W، بهره‌وری آب در سطوح کم‌آب‌تر (I_3 و I_4) بالاتر بود، زیرا شرایط کم‌تابش‌تر و کاهش تبخیر – تعرق، کاهش مصرف آب را مؤثرتر کرده و منجر به افزایش راندمان مصرف آب شده است. در این دوره سطح آبیاری I_4 با مقدار ۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب بالاترین WP را نشان داد. در مقابل، در دوره S-S، بهره‌وری آب در سطوح بالای آبیاری (I_1 و I_2) به دلیل افزایش نیاز آبی گیاه و تبخیر – تعرق بالا، در بالاترین سطح قرار داشت. در این دوره، سطح آبیاری I_1 با مقدار ۳۵/۶۹ کیلوگرم بر مترمکعب بهترین WP را نشان داد، درحالی‌که سطح آبیاری I_4 با کاهش شدید بهره‌وری مواجه بود. به‌طورکلی نتایج نشان می‌دهد که بهره‌وری آب به‌شدت تحت تأثیر شرایط محیطی (مخصوصاً تابش) هر دوره رشد قرار دارد. در دوره کم‌تابش‌تر (A-W)، کاهش مقدار آبیاری به دلیل کاهش تبخیر – تعرق منجر به بهره‌وری آب بالاتر شده است. در مقابل در دوره گرم‌تر و با تابش خورشیدی زیادتر (S-S) تأمین کامل یا حتی بیش از نیاز آبی (I_1 و I_2) برای دستیابی به بهره‌وری آب بالاتر ضروری بوده است. این تفاوت‌ها بر اهمیت مدیریت تطبیقی آبیاری بر اساس شرایط محیطی و نیاز واقعی گیاه تأکید دارد. تطبیق مقادیر آبیاری با شرایط دوره رشد می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش بهره‌وری آن کمک کند.

عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای تحت تأثیر سطوح مختلف شوری آب آبیاری (آزمایش ۲)

عملکرد

جدول ۴ نتایج تجزیه واریانس عملکرد (WoF) و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای (WP) را تحت تأثیر سطوح مختلف شوری آب آبیاری در آزمایش ۲ که در دو دوره رشد A-W و S-S انجام شده است، ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج، تأثیر شوری آب آبیاری بر هر دو شاخص WoF و WP در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بوده است ($p < 0.01$). این یافته نشان می‌دهد که شوری آب آبیاری نقش مهمی در تغییرات WoF و WP خیار گلخانه‌ای در هر دو دوره رشد، ایفا کرده است. ضریب تغییرات (CV)نیز در محدوده قابل قبولی قرار دارد، به‌طوری که برای WoF در دوره A-W مقدار ۹/۹۶ و برای دوره S-S مقدار ۱۱/۱۲ درصد و برای WP در دوره A-W و S-S به‌ترتیب ۹/۹۶ و ۱۱/۳۸ درصد بوده است. این مقادیر پایین CV نشان‌دهنده دقت و قابلیت اطمینان داده‌های آزمایش است.

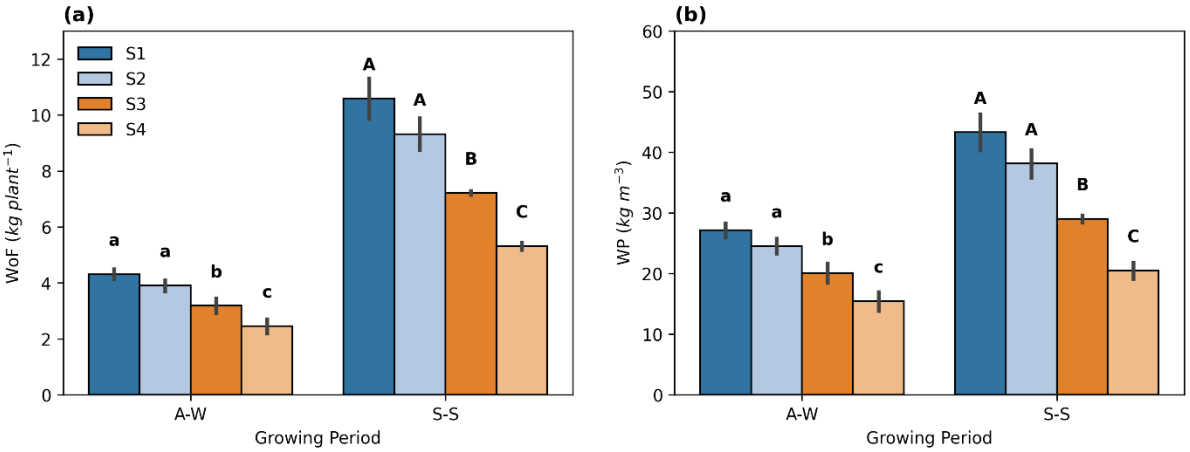
جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس عملکرد (WoF) و بهره‌وری آب (WP) خیار گلخانه‌ای تحت تأثیر شوری مختلف آب آبیاری (آزمایش ۲) در دو دوره رشد A-W و S-S

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		A-W		S-S	
		WoF	WP	WoF	WP
بلوک	۲	۲۳۳۴۲۳/۳۷^{ns}	۹/۲۴^{ns}	۱۵۳۷۹۲/۵۰^{ns}	۷/۱۴^{ns}
شوری آب آبیاری	۳	۲۰۱۳۶۵۶/۴۶**	۷۹/۷۱**	۱۶۲۲۹۶۶۱/۵۳**	۳۰۴/۸۸**
خطا	۶	۱۱۸۹۹۵/۴۸	۴/۷۱	۸۱۳۰۲۳/۲۸	۱۳/۸۹
ضریب تغییرات	-	۹/۹۶	۹/۹۶	۱۱/۱۲	۱۱/۳۸

** و ^{ns} به‌ترتیب نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و عدم اختلاف معنی‌دار است.

شکل ۶ نتایج مقایسه میانگین WoF و WP خیار گلخانه‌ای تحت تأثیر سطوح مختلف شوری آب آبیاری (S_1 تا S_4) را در دو دوره رشد A-W و S-S نشان می‌دهد. این تیمارها نمایانگر سطوح مختلف شوری آب آبیاری هستند که تأثیرات معنی‌داری بر عملکرد و بهره‌وری آب گیاه داشته‌اند. در دوره A-W، بیشترین عملکرد مربوط به سطح شوری S_1 (هدایت الکتریکی آب آبیاری کم‌تر از ۳ دسی‌زیمنس بر متر) با مقدار ۴/۳۱ کیلوگرم در بوته بوده است. این مقدار و سطح شوری به‌عنوان سطح شاهد و کنترل، مبنای مقایسه قرار گرفت. عملکرد سطح شوری S_2 (هدایت الکتریکی آب آبیاری برابر با ۳ دسی‌زیمنس بر متر) با

مقدار ۳/۹۰ کیلوگرم در بوته نسبت به S_1 حدود ۹/۵۷ درصد کاهش داشت، اما این کاهش از نظر آماری معنی‌دار نبود. در مقابل، عملکرد در سطح شوری S_3 با مقدار ۳/۱۹ کیلوگرم در بوته نسبت به سطح شوری شاهد حدود ۲۶/۰۹ در صد کاهش نشان داد و این کاهش در سطح شوری S_4 با مقدار ۲/۴۵ کیلوگرم در بوته به ۴۳/۱۷ درصد رسید (شکل ۶a). این نتیجه نشان می‌دهد که در شرایط شوری پایین، گیاه قادر به دستیابی به عملکرد بهینه است و کاهش شدید عملکرد در سطح شوری S_4، نشان‌دهنده اثرات منفی شوری بالا بر عملکرد گیاه است.



در هر ستون حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

شکل ٦- عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای تحت تأثیر شوری مختلف آب آبیاری (آزمایش ۲) در دو دوره رشد A-W و S-S

بهره‌وری آب

در دوره A-W، سطح شوری S_1 بیشترین WP را با مقدار ۲۷/۱۴ کیلوگرم در مترمکعب نشان داد. WP در سطح شوری S_2 با مقدار ۲۴/۵۴ کیلوگرم بر مترمکعب نسبت به S_1 حدود ۹/۵۸ درصد کاهش داشت، درحالی‌که در سطح شوری S_3 این کاهش به ۲۶/۰۹ درصد رسید (۲۰/۰۶ کیلوگرم بر مترمکعب). بیشترین کاهش WP در سطح شوری S_4 مشاهده شد که مقدار آن برابر با ۱۵/۴۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود و نسبت به S_1 ۴۳/۱۷ درصد کاهش داشت. این کاهش قابل‌توجه در سطح شوری S_4 نشان می‌دهد که شوری آب آبیاری بالا، استفاده بهینه از آب برای تولید محصول را به‌شدت محدود می‌کند (رئیسی‌نژاد دوبنه و یزدان‌پناه، ۱۳۹۸). در این دوره، اثرات منفی شوری بر جذب آب و مواد مغذی، به‌ویژه در تیمارهای با شوری بالاتر، به کاهش کارایی استفاده از آب منجر شده است. در دوره S-S، سطح شوری S_1 همچنان بیشترین WP را با مقدار ۴۳/۳۱ کیلوگرم بر مترمکعب نشان داد. در سطح شوری S_2، S_3 و S_4 به‌ترتیب WP با مقدار ۳۸/۱۳، ۲۹/۰۲ و ۲۰/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب مشاهده شد (۱۱/۹۸، ۳۲/۹۹ و ۵۲/۷۱ درصد کاهش نسبت به S_1). اثرات منفی شوری در این دوره به دلیل افزایش دما و تبخیر – تعرق، نسبت به دوره A-W شدت بیشتری داشته و باعث کاهش شدید بهره‌وری آب شده است.

مقایسه بهره‌وری آب و عملکرد در دو دوره نشان می‌دهد که در هر دو دوره، سطوح شوری پایین‌تر (S_1 و S_2) به دلیل شرایط مطلوب‌تر برای رشد گیاه، عملکرد و بهره‌وری آب بالاتری داشتند. بااین حال، مقادیر بهره‌وری آب و عملکرد در دوره S-S به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از دوره A-W بود. این تفاوت به شرایط محیطی (تابش و دما) مناسب‌تر دوره S-S نسبت داده می‌شود که باعث افزایش نرخ فتوسنتز و تولید ماده خشک شده است (Nikolaou et al., 2021; Wei et al., 2023). در مقابل، اثرات منفی شوری در دوره S-S شدیدتر بوده است، زیرا دما و تبخیر – تعرق بالاتر، باعث تجمع بیشتر نمک‌ها در ناحیه ریشه و کاهش بیشتر جذب آب و اثرات سمی یون‌های سدیم و کلر شده است.

این موضوع در سطح شوری S_4 با کاهش شدید عملکرد و بهره‌وری آب در هر دو دوره مشهود است. در دوره A-W، شرایط خنک‌تر تأثیرات منفی شوری را تا حدودی کاهش داده است (Abu-Zinada, 2015; Amin et al., 2024; Ouyang et al., 2024). نتایج نشان می‌دهد که شوری پایین آب آبیاری (S_1 و S_2) می‌تواند منجر به عملکرد و بهره‌وری آب بالاتر شود؛ درحالی‌که شوری بالا S_3 و S_4 تأثیر منفی قابل‌توجهی بر هر دو شاخص دارد. در دوره S-S، تأمین آب با هدایت الکتریکی کمتر اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا اثرات منفی شوری در این شرایط تشدید می‌شود. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت شوری آب آبیاری برای دستیابی به عملکرد و بهره‌وری آب بهینه تأکید دارند. استفاده از استراتژی‌هایی مانند استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای، آبشویی دوره‌ای و یا مخلوط کردن منابع آب شیرین و شور می‌توانند در شرایط شوری آب آبیاری بالا مفید باشد (Ouyang et al., 2024; Wan et al., 2010)..

نتیجه‌گیری

در بررسی اثر مقادیر مختلف آب آبیاری بر کشت خیار گلخانه ای (آزمایش ۱)، مشخص شد که عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای به‌شدت تحت تأثیر میزان آب آبیاری و شرایط محیطی دوره رشد قرار دارند. در دوره رشد A-W، آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی بهترین عملکرد و آبیاری بر اساس ۶۰ درصد نیاز آبی بالاترین بهره‌وری آب را داشتند که نشان‌دهنده تعادل مناسب و استفاده بهینه از منابع آبی در شرایط با تابش کم است. در دوره رشد S-S، آبیاری بر اساس ۱۲۰ درصد نیاز آبی به دلیل کاهش تنش آبی و بهبود فتوسنتز، بالاترین عملکرد و بهره‌وری آب را داشت، درحالی‌که آبیاری ۶۰ درصد نیاز آبی به دلیل ET_c بالا با کاهش شدید این شاخص‌ها مواجه شد. در بررسی اثر شوری مختلف آب آبیاری بر کشت خیار گلخانه‌ای (آزمایش ۲)، افزایش شوری آب آبیاری باعث کاهش معنی‌دار عملکرد و بهره‌وری آب در هر دو دوره کشت شد. در هر دو دوره، شوری آب آبیاری کمتر از ۳ و برابر ۳ دسی‌زیمنس بر متر بالاترین عملکرد و بهره‌وری آب را نشان دادند، اما با افزایش شوری به ۶ و ۹ دسی‌زیمنس بر متر، این شاخص‌ها کاهش یافتند. اثرات منفی شوری در دوره S-S، به دلیل افزایش ET_c و تجمع نمک‌ها در ناحیه ریشه، بیشتر بود. این دو آزمایش نشان دادند که مدیریت آبیاری و کیفیت آب آبیاری نقش کلیدی در بهبود عملکرد و بهره‌وری آب دارند. در دوره رشد A-W، کاهش آبیاری یا استفاده از آب با شوری کم بهره‌وری آب را بهبود می‌بخشد، درحالی‌که در دوره رشد S-S، تأمین کامل نیاز آبی و آب با شوری کم برای دستیابی به عملکرد مطلوب ضروری است. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت آبیاری بر اساس ET_c، آبشویی مناسب، استفاده ترکیبی از آب‌شور و شیرین و انتخاب آب با کیفیت مناسب، تأکید دارند و می‌توانند به گلخانه‌داران در استفاده بهینه از منابع آبی و تولید پایدار، کمک کنند.

تشکر و قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره «۴۰۱۳۶۷۴» انجام شده است.

منابع

خوش‌سیمای چنار، م. و نوری، ح. ۱۳۹۸. اثر آبیاری قطره‌ای (نوارهای تیپ) با آب‌شور بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۳(۴): ۵۸۱-۵۶۵.

رضاوردی‌نژاد، و.، شبانیان اصل، م.، بشارت، س. و حسنی، ع. ۱۳۹۶. تعیین نیاز آبی، ضریب گیاهی و کارایی مصرف آب محصولات خیار و گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه (مطالعه موردی: منطقه ارومیه). علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای. ۸(۳): ۴۰-۲۷.

رضوانی، س. م.، زارعی، ق. و سالمی، ح. ر. ۱۳۹۹. اثر سطوح مختلف آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب خیار گلخانه‌ای. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۴(۵): ۱۵۳۷-۱۵۲۷.

رئیسی‌نژاد دوبنه، ر. و یزدان‌پناه، ن. ۱۳۹۸. تأثیر سطوح مختلف آبیاری و شوری بر عملکرد خیار گلخانه‌ای. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۳(۵): ۱۴۸۰-۱۴۷۱.

زارعی، ق. و مؤمنی، د. ۱۳۹۶. چالش‌های توسعه کشت‌های گلخانه‌ای در ایران از منظر انرژی و محیط‌زیست. تحلیل‌های فنی در مدیریت و مهندسی کشاورزی ایران (جلد اول)، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

زارعی، ق.، مؤمنی، د. و جوادی‌مقدم، ج. ۱۳۹۵. راهنمای جامع مکان‌یابی برای احداث گلخانه‌ها. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ۷۸ صفحه.

فخرآبادی، ح. و خوش‌سیمای چنار، م. ۱۴۰۰. اثر کم‌آبیاری و بیوچار بر روی خصوصیات کمی و کیفی گیاه دارویی ریحان. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۵(۴): ۹۵۴-۹۴۱.

فرامرزپور، ع.، دلشاد، م. و پارسانژاد، م. ۱۳۹۱. بررسی رشد، عملکرد و کارایی مصرف آب در خیار گلخانه‌ای در شرایط مختلف رطوبت خاک با استفاده از تانسیومتر. علوم باغی ایران. ۴۳(۳): ۲۹۲-۲۸۵.

کرمانی، م. و اسدی، ر. ۱۳۹۳. تأثیر پتانسیل ماتریک خاک و الگوی کارگذاری لولهٔ آبده بر عملکرد و کارایی مصرف آب خیار گلخانه‌ای. مدیریت آب و آبیاری. ۴(۲): ۲۱۴-۲۰۳.

کریمی، ن.، صدرالدینی، ع. ا.، ناظمی، ا. ح.، فرسادی‌زاده، د.، حسین‌زاده دلیر، ع. و دهقانی، ف. ۱۳۸۹. تأثیر کم‌آبیاری روی رشد و عملکرد خیار گلخانه‌ای. دانش آب و خاک. ۲۰(۱): ۲۵-۱۵.

Abu-Zinada, I.A. 2015. Effect of salinity levels and application stage on cucumber and soil under greenhouse condition. Journal of Agriculture and Crop Sciences 8: 73–80.

Al-Momany, B. and Abu-Romman, S. 2023. Cucumber and salinity. AJCS 17: 1835–2707. https://doi.org/10.21475/ajcs.23.17.07.p3915

Alomran, A.M., Louki, I.I., Aly, A.A., Nadeem, M.E. 2013. Impact of Deficit Irrigation on Soil Salinity and Cucumber Yield under Greenhouse Condition in an Arid Environment. Journal of Agricultural Science and Technology 15.

Alomran, A.M., Luki, I.I. 2012. Effects of deficit irrigation on yield and water use of grown cucumbers in Saudi Arabia. 353–358. https://doi.org/10.2495/SI120301

Amali, A.A., Mersha, A.N., Nofal, E.R., Murray, K., Norouzi, S., Saboory, S., Salo, H., Chevuru, S.R., Sarai Tabrizi, M., Reddy, P.K., Abdullahi, A.O., Farahani, H., Kolhe, P., Dowlati Fard, R., Salik, A.W., Hussein, A.H., Najafi, H., Poormoghadam, M., Adiaha, M. 2021. Non-conventional sources of agricultural water management: Insights from young professionals in the irrigation and drainage sector*. Irrigation and Drainage 70: 524–540. https://doi.org/10.1002/IRD.2495

Amer, K.H., Midan, S.A., Hatfield, J.L. 2009. Effect of Deficit Irrigation and Fertilization on Cucumber. Agron Journal. 101: 1556–1564. https://doi.org/10.2134/agronj2009.0112

Amin, B., Atif, M.J., Kandegama, W., Nasar, J., Alam, P., Fang, Z., Cheng, Z. 2024. Low temperature and high humidity affect dynamics of chlorophyll biosynthesis and secondary metabolites in Cucumber. BMC Plant Biol. 24: 903. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05615-2

Ashour, H., Khalifa, S., Okasha, A. 2020. Automated drip irrigation scheduling for maximizing water use efficiency of cucumber production inside greenhouse by solar energy. Fresenius Environ. Bull . 29: 706–714.

Benaafi, M., Pradipta, A., Tawabini, B., Al-Areeq, A.M., Bafaqeer, A., Humphrey, J.D., Nazal, M.K., Aljundi, I.H. 2024. Suitability of treated wastewater for irrigation and its impact on groundwater resources in arid coastal regions: Insights for water resources sustainability. Heliyon 10. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E29320/ATTACHMENT/C04A0A7C-9965-4693-8B93-D0D9ABDBBC21/MMC1.DOCX

Borg, H., Grimes, D.W. 1986. Depth Development of Roots with Time: An Empirical Description. Transactions of the ASAE 29: 194–197. https://doi.org/10.13031/2013.30125

Buttaro, D., Santamaria, P., Signore, A., Cantore, V., Boari, F., Montesano, F.F., Parente, A. 2015. Irrigation Management of Greenhouse Tomato and Cucumber Using Tensiometer: Effects on Yield, Quality and Water Use. Agriculture and Agricultural Science Procedia 4: 440–444. https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.050

water use of greenhouse grown cucumber in the North China Plain. Agric Water Manag 61, 219–228. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00022-2

Merrill, S.D., Tanaka, D.L., Hanson, J.D. 2002. Root Length Growth of Eight Crop Species in Haplustoll Soils. Soil Science Society of America Journal 66, 913–923. https://doi.org/10.2136/SSSAJ2002.9130

Mirzavand, M., Sadeghi, S.H., Bagheri, R. 2020. Groundwater and soil salinization and geochemical evolution of Femenin-Ghahavand plain, Iran. Environmental Science and Pollution Research 27, 43056–43066. https://doi.org/10.1007/S11356-020-10229-W/METRICS

Moradi, P., Sadighi, H., Chizari, M., Sharifikia, M. 2020. Identification of Strategies for Application of Pro-Environmental Technologies to Produce Greenhouse Vegetables. Journal of Agricultural Science and Technology 22, 653–666.

Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Polycarpou, P., Kitta, E., Katsoulas, N. 2021. Energy and Water Related Parameters in Tomato and Cucumber Greenhouse Crops in Semiarid Mediterranean Regions. A Review, Part I: Increasing Energy Efficiency. Horticulturae 7, 521. https://doi.org/10.3390/horticulturae7120521

Noori, R., Maghrebi, M., Mirchi, A., Tang, Q., Bhattarai, R., Sadegh, M., Noury, M., Haghighi, A.T., Kløve, B., Madani, K. 2021. Anthropogenic depletion of Iran's aquifers. Proc Natl Acad Sci U S A 118, e2024221118. https://doi.org/10.1073/PNAS.2024221118/SUPPL_FILE/PNAS.2024221118.SAPP.PDF

Nouri, M., Homaee, M., Pereira, L.S., Bybordi, M. 2023. Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: A review focusing on water governance. Agric Water Manag 288. https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108480

Ouyang, Z., Tian, J., Yan, X. 2024. Effects of Mineralization Degree of Irrigation Water on Yield, Fruit Quality, and Soil Microbial and Enzyme Activities of Cucumbers in Greenhouse Drip Irrigation. Horticulturae 10, 113. https://doi.org/10.3390/horticulturae10020113

Pagliero, L., McIntyre, N., Aitken, D., Bolz, P., Jamett, N., Pérez-Murillo, G., Rivero, F., Herrera-León, S., Ordens, C.M., Campos, L., Chen, C.Y., Wang, S.W., Kim, H., Pan, S.Y., Fan, C., Lin, Y.J. 2021. Non-conventional water reuse in agriculture: A circular water economy. Water Resourse. 199: 117193. https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2021.117193

Chen, T.-W., Gomez Pineda, I.M., Brand, A.M., Stützel, H. 2020. Determining Ion Toxicity in Cucumber under Salinity Stress. Agronomy. 10: 677. https://doi.org/10.3390/agronomy10050677

Daghari, I., Bani, A., Bousnina, H., Chaabane, A. 2020. ON-FARM WATER AND SALT MANAGEMENT UNDER A STRAWBERRY–PEPPER COMBINATION IN THE KORBA AREA. Irrigation and Drainage. 69: 441–447. https://doi.org/10.1002/IRD.2422

Dhakal, N., Salinas-Rodriguez, S.G., Hamdani, J., Abushaban, A., Sawalha, H., Schippers, J.C., Kennedy, M.D. 2022. Is Desalination a Solution to Freshwater Scarcity in Developing Countries? Membranes (Basel) 12. https://doi.org/10.3390/MEMBRANES12040381

Geerts, S., Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. Agric Water M anagement 96, 1275–1284. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009

Gleick, P.H., Cooley, H. 2021. Freshwater Scarcity. Annu Rev Environ Resour 46, 319–348. https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ENVIRON-012220-101319

Hendrickson, G., Housh, M., Sela, L. 2023. Optimizing desalination for regional water systems: Integrating uncertainty, quality, and sustainability. J Clean Prod 415, 137785. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.137785

James, L. 1988. Principles of farm irrigation systems design. New York (N. Y.): Wiley.

Karimidastenaei, Z., Avellán, T., Sadegh, M., Kløve, B., Haghighi, A.T. 2022. Unconventional water resources: Global opportunities and challenges. Science of The Total Environment 827, 154429. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.154429

Mao, X., Liu, M., Wang, X., Liu, C., Hou, Z., Shi, J. 2003. Effects of deficit irrigation on yield and

García, G., Cisternas, L.A. 2024. Sustainable integration of desalinated seawater into regional water supply networks using a participatory modelling framework. Environ Sci Policy 155, 103714. https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2024.103714

Rahil, M.H., Qanadillo, A. 2015. Effects of different irrigation regimes on yield and water use efficiency of cucumber crop. Agric Water Manag 148, 10–15. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.005

Ramírez-Pérez, L.J., Morales-Díaz, A.B., Benavides-Mendoza, A., De-Alba-Romenus, K., González-Morales, S., Juárez-Maldonado, A. 2018. Dynamic modeling of cucumber crop growth and uptake of N, P and K under greenhouse conditions. Sci Hortic 234, 250–260. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2018.02.068

Reca, J., Trillo, C., Sánchez, J.A., Martínez, J., Valera, D. 2018. Optimization model for on-farm irrigation management of Mediterranean greenhouse crops using desalinated and saline water from different sources. Agric Syst 166, 173–183. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.02.004

Shemer, H., Wald, S., Semiat, R. 2023. Challenges and Solutions for Global Water Scarcity. Membranes 2023, Vol. 13, Page 612 13, 612. https://doi.org/10.3390/MEMBRANES13060612

Taherian, P., Joodavi, A. 2021. Hydrogeochemical characteristics and source identification of salinity in groundwater resources in an arid plain, northeast of Iran: implication for drinking and irrigation purposes. Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater 10, 21–31. https://doi.org/10.7343/AS-2021-502

Wan, S., Kang, Y., Wang, D., Liu, S. 2010. Effect of saline water on cucumber (Cucumis sativus L.) yield and water use under drip irrigation in North China. Agric Water Manag 98, 105–113. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.003

Wei, Z., Wan, X., Lei, W., Yuan, K., Lu, M., Li, B., Gao, P., Wu, H., Hu, J. 2023. A Cucumber Photosynthetic Rate Prediction Model in Whole Growth Period with Time Parameters. Agriculture 13, 204. https://doi.org/10.3390/agriculture13010204

.

Water Management in Agriculture
Vol. 12, No. 2, Autumn and Winter 2026, 111-128

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۲، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، ص. ۱۲۸-۱۱۱

Effects of Different Salinity Levels and Irrigation Water Amounts on Yield and Water Productivity of Greenhouse Cucumber during Two Autumn-Winter and Spring-Summer Growing Seasons

M. Khoshsimaie Chenar[1], A. Liaghat[2*], H. Noory[3], F. Soltani Salehabadi[4], B. Motesharezadeh[5]

Abstract

This study aimed to evaluate the individual effects of different irrigation water amounts and irrigation water salinity on the yield and water productivity of greenhouse cucumber during two growing seasons: autumn-winter (A-W) and spring-summer (S-S), in the research greenhouses of the Faculty of Agriculture, University of Tehran. Experiment 1 included four irrigation levels (I_1 to I_4), corresponding to 120, 100, 80 and 60% of the crop's water requirements, respectively. During the A-W season, irrigation level I_2 resulted in the highest yield (5.65 kg plant^{-1}), while irrigation level I_4 achieved the highest water productivity (40 kg m^{-3}). In the S-S season, irrigation level I_1 demonstrated the best performance, yielding 11 kg plant^{-1} and a water productivity of 35.69 kg m^{-3}. Experiment 2 consisted of four irrigation water salinity levels (S_1 to S_4), including less than 3, 3, 6, and 9 dS m^{-1}, respectively. Across both seasons, the lowest salinity level (S_1) produced the highest yield and water productivity; in the S–S season, these values were 10.59 kg plant^{-1} and 43.31 kg m^{-3}, respectively. The negative effects of salinity were more pronounced during the S-S season due to increased evapotranspiration and salt accumulation. The results indicated that during the A-W season, reducing irrigation water while maintaining economic yield or using low-salinity water can enhance water productivity. In contrast, during the S-S season, full irrigation combined with lowe salinity water is essential to achieve optimal yield and water productivity.

Keywords: Environmental Stresses, Irrigation Scheduling, Sustainable Agriculture, Water Use Efficiency

[1] PhD Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran
[2] Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. (* - Corresponding Author Email: aliaghat@ut.ac.ir)
[3] Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran
[4] Associate Professor, Department of Horticultural Science and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran
[5] Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran
Received: 14 Jan 2025
Accepted: 26 Mar 2025