نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۲۰، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۵، ص. ۱۱۳-۱۰۰

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.1, Vol. 20, Apr.-May. 2026, p. 100-113

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی جامع عملکرد و پایداری گلخانه‌های دارای سامانه آب‌شیرین‌کن اسمزمعکوس در چارچوب همبست WEFE

زینب سجودی[۱]، محمود مشعل*[۲]، حسین خواجه‌پور[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰

چکیده

با توجه به افزایش تنش‌های آبی خصوصا در مناطق خشک و نیمه‌خشک، اهمیت استفاده از فناوری‌های نوین برای مصرف بهینه آب در بخش کشاورزی بیشتر شده است. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد و پایداری گلخانه‌های دارای سامانه آب شیرین‌کن اسمز معکوس (RO) در چارچوب همبست آب، غذا، انرژی و محیط زیست (WEFE Nexus)، در منطقه پاکدشت ایران انجام شده است. روش تحقیق توصیفی - تحلیلی بوده و اطلاعات لازم با استفاده از پرسش‌نامه و مشاهدات میدانی جمع‌آوری شده‌اند. در این پژوهش ۱۵ گلخانه (۸ واحد دارای RO و ۷ واحد فاقد آن) در سه سناریو مبتنی بر تأمین انرژی و تصفیه آب مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد گلخانه‌های دارای RO، به‌طور متوسط ۱۹ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی داشتند و از طرفی عملکرد محصول را ۱۸.۹ درصد افزایش داده‌اند. همچنین مصرف کود شیمیایی و سموم به‌ترتیب ۲۱.٤ درصد و ۳۱ درصد کاهش را نشان داد. با این حال، افزایش هزینه‌های مربوط به بخش انرژی و نگهداری این سامانه‌ها وجود داشت. با توجه به نتایج تحلیل سناریوها، استفاده از انرژی خورشیدی به‌عنوان منبع جایگزین برق شبکه می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شود. تحلیل نهایی در چارچوب WEFE نشان داد که سامانه RO با طراحی صحیح و ترکیب با انرژی‌های تجدیدپذیر، می‌تواند نقش مؤثری در افزایش تاب‌آوری کشاورزی در مناطق کم‌آب ایفا کند.

واژه‌های کلیدی: اسمز معکوس، گلخانه، پیوند WEFE، پایداری منابع، کشاورزی

مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش فشارهای ناشی از رشد جمعیت، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع آب تجدیدپذیر، باعث شده است که استفاده بهینه و صحیح از منابع طبیعی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به یکی از اولویت‌های راهبردی کشورها تبدیل شود. در چنین شرایطی، کشاورزی با روش‌های سنتی که وابسته به منابع آب و خاک است، نمی‌تواند پاسخگوی نیازهای فزاینده غذایی باشد (FAO, 2021). یکی از راهکارهای موجود برای افزایش عملکرد محصولات و بهره‌وری مصرف آب، کشت در گلخانه است که به دلیل کنترل شرایط محیطی، مصرف بهینه‌ی منابع و امکان تولید در تمام فصول سال، جایگاه ویژه‌ای در سیاست‌های توسعه پایدار بخش کشاورزی دارد (Fu et al., 2025). با این وجود، تأمین آب باکیفیت برای محصولات گلخانه‌ای، به‌ویژه در مناطق دارای آب‌های شور یا کم‌آب، یکی از چالش‌های اصلی توسعه‌ی گلخانه‌ها می‌باشد. استفاده از آب‌های شور بدون تصفیه در گلخانه‌ها می‌تواند باعث افت عملکرد گیاه، تجمع نمک در خاک، و حتی توقف رشد گیاه شود (Awaad et al., 2022). در پاسخ به این مساله، فناوری‌های شیرین‌سازی آب مانند اسمز معکوس (RO)[1] به‌عنوان راه حلی عملی برای تأمین آب باکیفیت مورد توجه قرار گرفته‌اند. اگر چه استفاده از این سامانه‌ها می‌تواند منجر به رفع مشکل کیفیت آب برای آبیاری گردد، اما در مقابل با تبعاتی مانند مصرف بالای انرژی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری، و پیامدهای زیست‌محیطی (مانند تولید پساب و انتشار گازهای گلخانه‌ای) همراه است (Kurihara, 2020). از طرفی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که ارزیابی کارآمدی این سامانه‌ها نباید صرفاً بر پایه یک معیار (مثلاً صرفه‌جویی در مصرف آب) انجام شود، بلکه

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- دانشیار، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳- استادیار، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
(*- ایمیل نویسنده مسئول: mmashal@ut.ac.ir)
DOI: 10.22034/idj.2025.546690.2630

می‌بایست هم‌زمان تأثیر آن‌ها بر سایر مؤلفه‌های مهم مانند انرژی، غذا و محیط زیست نیز در نظر گرفته شود. باتوجه به این مساله، رویکرد «پیوند آب–غذا–انرژی–محیط زیست» یا WEFE Nexus[۲] به‌عنوان یک چارچوب مفهومی برای تحلیل یکپارچه و بین‌بخشی سامانه‌های بهره‌بردار منابع معرفی شده است (Zahedi et al., 2024). این رویکرد، با تأکید بر درهم‌تنیدگی مؤلفه‌ها، به سیاست‌گذاران و طراحان کمک می‌کند تا راه‌حل‌هایی را انتخاب کنند که بیشترین هم‌افزایی و کمترین تعارض را در ابعاد چهارگانه منابع ایجاد می‌کنند (Jolfan et al., 2023).

تحقیقات متعددی به بررسی بهره‌برداری از فناوری‌های نوین در گلخانه‌ها با هدف بهینه‌سازی مصرف منابع و افزایش پایداری پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، زو و همکاران با استفاده از رویکرد Nexus، استراتژی‌های نوینی برای صرفه‌جویی در مصرف آب در گلخانه‌ها ارائه داده‌اند که شامل بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند برداشت آب از جو، پلیمرهای فوق‌جاذب، خنک‌سازی تابشی و نمک‌زدایی با انرژی خورشیدی می‌باشد. این فناوری‌ها توانسته‌اند مصرف آب را کاهش دهند و بهره‌وری انرژی را افزایش دهند (Zou et al., 2025).

در پژوهشی دیگر، سان و همکاران طراحی یک سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی با قابلیت دفع مداوم نمک را معرفی کردند که با استفاده از جریان همرفتی و میعان غشا نازک، به کارایی بالایی در تولید آب شیرین دست یافت. این سامانه با استفاده از انرژی خورشیدی می‌تواند به‌طور مداوم آب شور را به آب شیرین تبدیل کند و برای استفاده جهت آبیاری محصولات در گلخانه‌ها مناسب باشد (Sun et al., 2023). در زمینه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیند شیرین‌سازی آب، دهار به بررسی اهمیت انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی در پیوند آب–انرژی–غذا و حل مسائل مربوط به تغییرات اقلیم پرداخته است. استفاده از این منابع انرژی می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش پایداری در بخش کشاورزی کمک کند (Dhar, 2025). مطالعه‌ای دیگر توسط وانگ و همکاران به طراحی و استفاده از یک سامانه کنترل هوشمند گلخانه مبتنی بر اینترنت اشیا و یادگیری ماشین پرداخته است. این سامانه با نظارت دقیق بر شاخص‌های محیط داخلی گلخانه و تنظیم شرایط بهینه، می‌تواند در افزایش عملکرد گیاهان و کاهش هدررفت منابع موثر باشد (Wang et al., 2024). در پژوهشی توسط مارتین گوریز، استفاده از سامانه‌های آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس برای تأمین آب مورد نیاز در شرایط کشت هیدروپونیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه در اسپانیا نشان داد که آبیاری با آب تصفیه‌شده می‌تواند ضمن حفظ کیفیت محصول، ترکیبات مفید مانند لیکوپن و آنتی‌اکسیدان‌ها را در گوجه‌فرنگی افزایش دهد (Gorriz et al., 2021). از سوی دیگر، تحلیل چرخه تولید کاهو در گلخانه در اسپانیا نشان داد که با استفاده از آب با کیفیت تولید شده توسط سامانه‌های آب شیرین‌کن، میزان مصرف آب نسبت به کشاورزی سنتی به طور قابل توجهی کاهش یافته و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز کم‌تر است (Martinez et al., 2018).

پژوهشی توسط هرنالئون و همکاران در کشور شیلی، به بررسی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر استفاده از سامانه‌های آب‌شیرین‌کن آب دریا و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در تأمین آب برای مناطقی که با مشکل کم‌آبی مواجه بودند پرداخت. نتایج این پژوهش نشان داد که این سامانه‌ها بین ۰.۳٤ درصد تا ۰.۷۵ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای این کشور را تولید می‌کنند، اما در مقابل، نقش مهمی در کاهش تنش آبی ایفا می‌کنند و گزینه‌ای پایدار برای مناطق آسیب‌پذیر هستند (Herrera-León et al., 2022). مطالعه‌ای در جنوب شرقی اسپانیا نیز با بررسی چرخه زندگی تولید محصول در گلخانه‌های هیدروپونیک با استفاده از آب تصفیه شده، نشان داد که اگرچه این نوع کشاورزی موجب کاهش مصرف آب می‌شود، اما به‌دلیل مصرف انرژی بالا در فرایند تصفیه آب شور، انتشار گازهای گلخانه‌ای تا ۳۰.۳ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین، اگرچه استفاده از منابع آب غیرمتعارف می‌تواند در مدیریت تنش آبی مؤثر باشد، اما در صورت عدم توجه به مصرف انرژی، ممکن است خود به افزایش اثرات تغییر اقلیم منجر شود (Martinez et al., 2018). این پژوهش بر اهمیت بهینه‌سازی مصرف انرژی در گلخانه تأکید دارد. از سوی دیگر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی خورشیدی در فرآیندهای تصفیه آب، یکی از راهکارهای مهم برای کاهش ردپای کربن در این فناوری‌ها می‌باشد. در مطالعه‌ای توسط آی و همکاران، نشان داده شد که جایگزینی انرژی خورشیدی با انرژی فسیلی می‌تواند تا ۹۴.۹۷ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فرآیند نمک‌زدایی را کاهش دهد، که بر وجود همگرایی میان سیاست‌های انرژی و آب در برنامه‌ریزی‌های آینده تأکید می‌کند (Ai et al. 2023). بهره‌گیری از سیستم‌های آب‌شیرین‌کن به‌ویژه برای تامین آب کشاورزی می‌تواند به کاهش مصرف کود و سموم منجر شود و به این ترتیب، آلودگی خاک و انتشار گازهای گلخانه‌ای مثل N_2O، CH_4 و CO_2 را کاهش دهد. مطالعات کشت محصولات با آب لب‌شور نشان داده‌اند که شوری متوسط می‌تواند میزان انتشار N_2O را کاهش دهد. این کاهش ناشی از تنظیم بهتر فرآیندهای میکروبی خاک است و حاکی از آن است که استفاده از آب شیرین و نمک‌زدایی‌شده می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد، زیرا استفاده از آب با شوری کنترل‌شده و فاقد عناصر مضر نظیر سدیم و کلر، موجب افزایش کارایی جذب مواد غذایی توسط گیاه شده و نیاز به مصرف بیش‌ازحد کودها و اصلاح‌کننده‌های شیمیایی را کاهش می‌دهد

Zolghadr-Asli et al., 2023; Tzeng et al., 2025; Ma et al.,) (2024; Zhang et al., 2022).

حیدری و همکاران به بررسی نقش ادغام فناوری‌های آب‌شیرین‌کن و انرژی‌های تجدیدپذیر در راستای توسعه پایدار پرداختند. در این مطالعه، ترکیب انرژی خورشیدی و بادی به‌منظور افزایش پایداری، کاهش هزینه انرژی و افزایش دسترسی به انرژی تجدیدپذیر بررسی شد. همچنین، ترکیب دو روش آب‌شیرین‌سازی اسمز معکوس (RO) و تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای(MSF) [۳] به‌عنوان روشی برای بهبود کیفیت و راندمان آب شیرین تولیدی و کاهش هزینه مورد توجه قرار گرفت (Heidary et al., 2019).

محبی و روشندل با هدف کاهش وابستگی گلخانه‌های کشاورزی به سوخت‌های فسیلی، چارچوبی بهینه‌سازی خطی برای طراحی و بهره‌برداری هم‌زمان از یک سامانه خورشیدی همراه با ذخیره‌سازی حرارتی توسعه دادند. سامانه انرژی مورد بررسی شامل کلکتور خورشیدی، دیگ پشتیبان، و ذخیره‌سازهای حرارت کوتاه‌مدت و بلندمدت بود. این چارچوب با هدف یافتن کم‌هزینه‌ترین ترکیب ممکن پیاده‌سازی شد. سپس اثرات سیاست‌های کاهش انتشار، زمان‌بندی کشت، قیمت گاز طبیعی و سناریوهای هزینه سرمایه‌گذاری تحلیل گردید. این مطالعه راهکارهایی علمی و عملی برای طراحی بهینه سیستم‌های حرارتی گلخانه‌ای در راستای اهداف توسعه پایدار ارائه می‌دهد (Mohebi and Roshandel, 2023).

بورگ و همکاران مفهوم «همزیستی» را که به معنای رابطه‌ای سودمند متقابل است، در سیستم‌های غذایی و انرژی بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که سامانه‌های گلخانه‌ای و نیروگاه‌های بیوگاز به‌عنوان فناوری‌هایی در مناطق روستایی، ظرفیت بالایی برای ایجاد همزیستی غذایی و انرژی دارند، به‌طوری‌که پسماند زیستی گلخانه‌ها می‌تواند به‌عنوان خوراک ورودی نیروگاه بیوگاز استفاده شود و گرمای حاصل از تولید هم‌زمان نیروگاه نیز برای گرمایش گلخانه‌ها به‌کار رود. نتایج نشان داد که با استفاده از گرمای حاصل از بیوگاز کود دامی می‌توان تا ۱۰۴ هکتار گلخانه را پشتیبانی کرد که معادل تولید سالانه ۲۰۸۰۰ تُن گوجه‌فرنگی بوده و حدود ۱۱ درصد از نیاز داخلی این محصول در سوئیس را تأمین می‌کند. اگرچه یافته‌های این مطالعه مربوط به شرایط سوئیس است، اما روش ارائه‌شده قابلیت تطبیق و کاربرد در سایر مناطق جهان را نیز دارد (Burg et al., 2021).

کرمی و همکاران پژوهشی کیفی با هدف شناسایی و تحلیل عوامل بازدارنده در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در استان چهارمحال و بختیاری انجام دادند. چارچوب نظری این پژوهش مبتنی بر روش‌شناسی کیفی و رویکرد نظریه داده‌بنیاد بود. فرآیند گردآوری داده‌ها از طریق مصاحبه‌های عمیق، تشکیل گروه‌های متمرکز، و مشاهده مستقیم صورت گرفت و تا رسیدن به اشباع نظری ادامه یافت. یافته‌های پژوهش نشان داد که عوامل بازدارنده در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به ترتیب اولویت شامل: عوامل اطلاعاتی و فرهنگی، سیاسی شدن موضوع، ضعف در آموزش و پژوهش، عوامل انسانی و سرمایه‌گذاری و در نهایت محدودیت‌های فناوری بودند. این نتایج بیانگر آن بودند که توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در مناطق روستایی این استان مستلزم تمرکز بر ارتقای فرهنگ عمومی، کاهش نگاه سیاسی به مسئله، بهبود زیرساخت‌های آموزشی و پژوهشی، ایجاد انگیزه‌های سرمایه‌گذاری و در نهایت توسعه فناوری‌های بومی‌سازی‌شده است (Karami et al., 2019).

در مجموع، مطالعات انجام شده نشان می‌دهند سامانه‌های آب‌شیرین‌کن که به عنوان راهکاری برای مقابله با کم‌آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌توانند با طراحی مناسب و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به صورتی که مصرف انرژی آن‌ها بهینه شود و از فناوری‌های کم کربن استفاده شود، در کاهش یا کنترل اثرات گلخانه‌ای موثر باشند. علاوه بر این، تأمین آب با کیفیت مناسب از طریق آب‌شیرین‌کن‌های اسمز معکوس می‌تواند به بهبود بهره‌وری مصرف کود و سموم در سامانه‌های کشت گلخانه‌ای کمک کند. این امر نه‌تنها از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است، بلکه با کاهش ورود نیتروژن و سایر آلاینده‌ها به خاک و آب، از انتشار غیرمستقیم گازهای گلخانه‌ای نظیر N_2O نیز جلوگیری می‌کند.

در مقایسه با مطالعات پیشین، پژوهش حاضر دارای نوآوری‌هایی مهم و چندلایه است که آن را از نظر علمی و کاربردی متمایز می‌سازد. نخست آن‌که، این تحقیق با تمرکز بر اقلیم خشک و نیمه‌خشک و در بستر واقعی گلخانه‌های فعال در منطقه پاکدشت اجرا شده است، برخلاف بسیاری از مطالعات مشابه که در شرایط آزمایشگاهی یا اقلیم‌های مرطوب انجام شده‌اند لذا یافته‌های این پژوهش از قابلیت اتکای بالایی برای سیاست‌گذاری‌های منطقه‌ای برخوردارند. دوم، رویکرد پژوهش مبتنی بر تحلیل یکپارچه همبست آب، انرژی، غذا و محیط زیست (WEFE) بوده و هم‌زمان به ارزیابی شاخص‌های مختلف مانند مصرف آب، انرژی، کود شیمیایی، سموم و کیفیت پساب می‌پردازد، امری که تصویری چندبعدی از پایداری سیستم ارائه می‌دهد. در نهایت، استفاده از ترکیبی از داده‌های میدانی، ابزار پرسش‌نامه، تحلیل‌های آماری، مدل‌سازی و سناریونویسی، ساختاری منسجم و چندمنظوره برای پژوهش فراهم کرده است که هم از منظر تجربی، هم تحلیلی و هم سیاست‌گذارانه ارزش‌مند تلقی می‌شود.

با توجه به مطالعات پیشین و خلأهای موجود در زمینه ارزیابی یکپارچه سامانه‌های آب‌شیرین‌کن در گلخانه‌ها با رویکرد WEFE، هدف از این تحقیق تحلیل کارایی و پایداری استفاده از سامانه‌های آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس در گلخانه‌ها با استفاده از رویکرد Nexus می‌باشد. با توجه به اهمیت این رویکرد، مطالعات اندکی به بررسی یکپارچه‌ی تأثیر به‌کارگیری سامانه‌های آب‌شیرین‌کن در گلخانه‌ها بر اساس چارچوب WEFE پرداخته‌اند. بیشتر تحقیقات انجام شده در

این زمینه یا بر ابعاد فنی و اقتصادی سامانه‌های آب‌شیرین‌کن پرداخته‌اند، یا فقط عملکرد گلخانه‌ها را در شرایط کم‌آبی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. این خلأ، ضرورت انجام پژوهش‌هایی را نشان می‌دهد که بتوانند با استفاده از داده‌های تحلیلی یا مدل‌سازی، تعاملات متقابل بین مؤلفه‌های چهارگانه را در محیط گلخانه‌ها تحلیل کنند. در این راستا، با استفاده از داده‌های میدانی و طراحی سناریوهای مختلف بهره‌برداری، پیامدهای آن‌ها در ابعاد آب، انرژی، غذا و محیط زیست مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش می‌تواند در کمک به تصمیم‌گیری‌های بهینه در زمینه توسعه کشاورزی پایدار و مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی موثر باشد.

مواد و روش‌ها

رویکرد پژوهش

این پژوهش به‌صورت توصیفی–تحلیلی و میدانی انجام شده است و از رویکرد همبست آب، غذا، انرژی و محیط‌زیست (WEFE Nexus) برای تحلیل تعاملات منابع در گلخانه‌های دارای سامانه آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس استفاده شده است. تحلیل‌ها بر پایه برداشت داده‌های میدانی، نظر کارشناسان محلی و مدل‌سازی سناریوها صورت پذیرفته است.

محدوده مورد مطالعه

این پژوهش در گلخانه‌های واقع در شهرستان پاکدشت در دشت ورامین (استان تهران) انجام شد. منطقه‌ای نیمه‌خشک با متوسط بارندگی سالانه کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر، دمای بالا در فصل رشد و وابستگی شدید به منابع آب زیرزمینی. دشت ورامین به‌عنوان یکی از دشت‌های مهم کشاورزی ایران در مختصات جغرافیایی تقریباً ۱۵′ ۳۵° تا ۳۵′ ۳۵° عرض شمالی و ۳۰′ ۵۱° تا ۵۵′ ۵۱° طول شرقی قرار دارد (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۹). این منطقه یکی از قطب‌های تولید محصولات گلخانه‌ای کشور محسوب می‌شود و طی سال‌های اخیر با بحران افت سطح آب‌های زیرزمینی و شوری خاک مواجه بوده است. از این‌رو استفاده از فناوری‌هایی مانند سامانه‌های آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس در برخی گلخانه‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

روش‌های جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز

جمع‌آوری داده‌ها از طریق سه روش انجام شده است:

۱. **مشاهدات میدانی و بازدید از گلخانه‌ها:** در این مرحله، اطلاعات مربوط به سامانه‌های آبیاری، منبع آب مصرفی در گلخانه، نوع سامانه‌های تصفیه آب و چگونگی مدیریت این سامانه‌ها به‌صورت مستقیم از طریق بازدید از گلخانه‌ها جمع‌آوری شد. همچنین، داده‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و محیطی گلخانه‌ها به کمک مشاهدات جمع‌آوردی گردید.

۲. **استفاده از پرسش‌نامه:** این مرحله با همکاری کارشناسان گلخانه، بهره‌برداران و مدیران واحدهای تولیدی تکمیل شد. پرسش‌نامه‌ها شامل شاخص‌های مصرف آب، نوع انرژی، هزینه‌های بهره‌برداری، نوع و مقدار مصرف نهاده‌های کشاورزی (شامل کود، سموم شیمیایی و مواد مغذی محلول)، محصولات گلخانه و میزان درک و آگاهی از اثرات زیست‌محیطی بودند. داده‌های این پژوهش به‌صورت میدانی و از طریق ترکیبی از ابزارهای کمی و کیفی گردآوری شده‌اند. ابزار اصلی گردآوری اطلاعات، پرسش‌نامه‌ای هدفمند بود که بین بهره‌برداران گلخانه‌های منطقه پاکدشت توزیع گردید. برای اطمینان از روایی صوری، پرسش‌نامه ابتدا توسط سه نفر از متخصصان در زمینه گلخانه، آبیاری و انرژی مورد بررسی و ویرایش قرار گرفت. همچنین، برای بررسی پایایی ابزار، از آزمون آلفای کرونباخ استفاده شد که مقدار آن برای کل پرسش‌نامه 0.83 به‌دست آمد که نشان‌دهنده پایایی قابل قبول ابزار می‌باشد. در مجموع، ۱۵ پرسش‌نامه جمع‌آوری شده از گلخانه‌داران مبنای تحلیل‌ها قرار گرفتند. اطلاعات تکمیلی نیز از طریق بازدید میدانی و مصاحبه با کارشناسان جهاد کشاورزی شهرستان جمع‌آوری شد. پرسش‌نامه (جدول ۱) دارای ۴ بخش اصلی می‌باشد:

- ✓ **ویژگی‌های عمومی واحد گلخانه‌ای:** مانند مساحت گلخانه، محصولات گلخانه، روش آبیاری و نوع منبع انرژی
- ✓ **منابع و کیفیت آب مصرفی:** منبع تامین آب (چاه، لب‌شور)، تجهیز یا عدم تجهیز گلخانه با سیستم آب‌شیرین‌کن، هزینه ماهانه تأمین آب
- ✓ **اطلاعات مربوط به مصرف انرژی:** نوع انرژی مصرفی (برق، گاز، خورشیدی)، میزان مصرف انرژی، هزینه‌های مربوط به انرژی
- ✓ **نگرش و تجربه بهره‌بردار:** مانند آگاهی از محاسن و معایب استفاده از آب‌شیرین‌کن، رضایت از عملکرد سامانه، و آگاهی از اثرات زیست‌محیطی

۳. **تحلیل داده‌های ثبتی منطقه‌ای و گزارش‌های رسمی:** برای تکمیل اطلاعات در بخش‌های اقلیمی، کشاورزی و انرژی، از داده‌های موجود در گزارش‌های رسمی و منابع ثبتی منطقه‌ای استفاده شد. این داده‌ها برای بررسی شرایط محیطی و پیش‌بینی اثرات بلندمدت استفاده از سیستم‌های اسمز معکوس در گلخانه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

برای بررسی اثرات استفاده از سامانه‌های آب‌شیرین‌کن در گلخانه‌ها، از چارچوب WEFE استفاده شد که شامل چهار مؤلفه به شرح زیر می‌باشد:

- **آب:** نوع منبع تامین آب، حجم آب مصرفی، کیفیت و نحوه مدیریت پساب تولید شده
- **غذا:** ارزیابی عملکرد کمی و کیفی محصولات گلخانه‌ای در شرایط مختلف تأمین آب و نهاده‌های کشاورزی شامل کود و سموم که مستقیماً بر رشد و کیفیت محصول تأثیر می‌گذارند.
- **انرژی:** محاسبه میزان انرژی مصرفی آب شیرین‌کن، انرژی مربوط به پمپاژ، تهویه و روشنایی گلخانه
- **محیط‌زیست:** بررسی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، تاثیرات مخرب پساب تولید شده بر محیط‌زیست

برای ارزیابی اثرات بهره‌برداری از سامانه‌های آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس در گلخانه‌های منطقه، سه سناریو واقع‌گرایانه تدوین شد. این سناریوها با توجه به تفاوت‌های موجود در نحوه تأمین آب و نوع انرژی مصرفی طراحی شدند.

سناریو ۱ (وضع موجود): گلخانه‌هایی که مجهز به سامانه آب شیرین‌کن نیستند و برای آبیاری محصولات از آب زیرزمینی موجود استفاده می‌کنند. در این حالت، انرژی مورد استفاده در این گلخانه‌ها معمولا از برق شبکه تأمین می‌شود و روش آبیاری سنتی یا قطره‌ای بدون تصفیه می‌باشد.

سناریو ۲ (اسمز معکوس + برق شبکه): در این سناریو گلخانه‌ها مجهز به سامانه آب شیرین‌کن اسمز معکوس هستند و از این سامانه برای شیرین سازی آب لب‌شور (نسبتاً شور) استفاده می‌نمایند. در این سناریو، برای تامین انرژی مورد نیاز جهت تصفیه از برق شبکه استفاده می‌شود.

سناریو ۳ (اسمز معکوس + انرژی خورشیدی): در این سناریو، مانند سناریو ۲ گلخانه‌ها از سامانه اسمز معکوس برای تصفیه آب لب‌شور استفاده می‌کنند، تفاوت این سناریو در تامین انرژی مورد نیاز برای تصفیه، پمپاژ و بهره‌برداری است که با استفاده از سامانه فتوولتائیک خورشیدی می‌باشد. این گزینه با هدف کاهش هزینه انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بررسی شده است.

برای تحلیل سناریوها، داده‌های جمع‌آوری‌شده از طریق پرسش‌نامه‌ها و مشاهدات میدانی وارد نرم‌افزار Excel و SPSS شدند و پس از پردازش آماری، مدل‌سازی زیست‌محیطی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار LEAP برای برآورد میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای انجام شد. در تحلیل سناریوها، شاخص‌هایی مانند حجم آب مصرفی، هزینه انرژی، عملکرد محصول، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO_2) و بهره‌وری آب به‌عنوان معیارهای مقایسه‌ای در نظر گرفته شده‌اند. این شاخص‌ها بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده، محاسبات و مدل‌سازی انجام‌شده مورد ارزیابی قرار گرفتند.

جدول ۱- پرسشنامه

بخش اول: مشخصات عمومی بهره‌بردار و گلخانه

۱. سن شما چقدر است؟	....
۲. میزان تحصیلات شما چیست؟	☐ ابتدایی ☐ دیپلم ☐ کاردانی ☐ کارشناسی ☐ کارشناسی ارشد ☐ دکتری
۳. چند سال تجربه کار در حوزه کشاورزی یا گلخانه دارید؟	....
۴. مساحت گلخانه (مترمربع)؟	....
۵. نوع محصول اصلی شما در گلخانه چیست؟	....

بخش دوم: منابع آب و تصفیه

۶. منبع اصلی تأمین آب در گلخانه چیست؟	☐ چاه عمیق ☐ چاه نیمه‌عمیق ☐ قنات ☐ آب لب‌شور ☐ شبکه آبرسانی عمومی ☐ سایر:
۷. آیا در گلخانه از سامانه آب‌شیرین‌کن استفاده می‌کنید؟	☐ بله ☐ خیر
۸. اگر پاسخ سؤال قبل "بله" است، نوع سامانه چیست؟	☐ اسمز معکوس ☐ سایر (لطفاً توضیح دهید):
۹. سامانه آب‌شیرین‌کن از چه سالی در گلخانه نصب شده است؟	....
۱۰. هزینه ماهانه تأمین و تصفیه آب چقدر است؟	..... میلیون ریال
۱۱. در صورت عدم استفاده از آب‌شیرین‌کن، دلیل آن چیست؟	☐ هزینه بالا ☐ نیاز نداشتم ☐ آشنا نبودم ☐ سایر:

بخش سوم: سیستم انرژی و آبیاری

۱۲. نوع سیستم آبیاری گلخانه شما چیست؟	☐ قطره‌ای ☐ بارانی ☐ سنتی (جوی و پشته) ☐ هوشمند
۱۳. منبع انرژی مورد استفاده برای پمپاژ و تصفیه آب چیست؟	☐ برق شبکه ☐ سیستم خورشیدی ☐دیزل ☐ ترکیبی
۱۴. آیا سیستم خورشیدی مستقلی در گلخانه نصب کرده‌اید؟	☐ بله ☐ خیر
۱۵. در صورت استفاده از انرژی خورشیدی، هزینه راه‌اندازی اولیه چقدر بوده است؟	.... میلیون ریال

بخش چهارم: ارزیابی عملکرد و نگرش بهره‌بردار

۱۶. میزان تولید محصول سالانه (میانگین در ۳ سال اخیر):	..... تن در سال
۱۷. میزان رضایت شما از سیستم آب‌شیرین‌کن گلخانه به چه میزان است؟	☐ کاملاً راضی ☐ راضی ☐ متوسط ☐ ناراضی ☐ کاملاً ناراضی
۱۸. آیا تمایل به گسترش سامانه‌های تصفیه و انرژی تجدیدپذیر در گلخانه خود دارید؟	☐ بله ☐ خیر ☐ نمی‌دانم
۱۹. بزرگ‌ترین چالش شما در استفاده از سامانه‌های آب‌شیرین‌کن چیست؟	☐ هزینه اولیه بالا ☐ تعمیر و نگهداری ☐ دانش فنی ☐ سایر:
۲۰. به‌نظر شما، استفاده از آب‌شیرین‌کن چه تأثیری بر موارد زیر داشته است؟ (با انتخاب گزینه مناسب مشخص کنید)	شاخص
	بهبود کیفیت محصول
	افزایش عملکرد
	کاهش بیماری‌ها
	کاهش مصرف آب
	صرفه‌جویی در هزینه‌ها

سؤالات ۶ تا ۱۵ به صورت عددمحور (پاسخ‌ها قابلیت تبدیل به داده‌های کمی را داشته باشند) تنظیم شدند تا اطلاعات دقیق‌تری در مورد منابع آب، هزینه‌ها و سیستم‌های انرژی ارائه دهند. سؤالات ۱۶ تا ۲۰ با مقیاس لیکرت برای ارزیابی اثرات و رضایت بهره‌بردار از سامانه‌های آب‌شیرین‌کن طراحی شده‌اند. در این مقیاس، پاسخ‌دهندگان نظر خود را در قالب گزینه‌های کاملاً مخالف، مخالف، نظری ندارم، موافق و کاملاً موافق بیان نمودند. (مقادیر عددی ۱ تا ۵ به ترتیب به این گزینه‌ها اختصاص داده شد تا امکان تحلیل آماری داده‌ها فراهم شود). تفسیر نتایج در جدول های ۲ و ۳ می‌باشند.

نتایج و بحث

تحلیل اطلاعات جمع‌آوری شده از پرسش‌نامه‌ها (سوالات ۱۶ تا ۲۰)

پرسش‌نامه‌ها در میان ۱۵ گلخانه منطقه پاکدشت توزیع شدند و پاسخ‌ها بر اساس مقیاس لیکرت پنج درجه‌ای گردآوری شدند (کاملاً مخالف تا کاملاً موافق). هدف از این تحلیل، بررسی وضعیت مصرف آب، انرژی، بهره‌وری، هزینه‌های تولید و نگرش نسبت به استفاده از سامانه آب‌شیرین‌کن (اسمز معکوس) بود. نتایج نشان داد که بهره‌برداران گلخانه، کیفیت آب تصفیه شده با سامانه اسمز معکوس را مطلوب ارزیابی کرده‌اند. همچنین، آن‌ها کاهش مصرف آب را تایید کرده‌اند، اما در مقابل اعلام کرده‌اند که هزینه‌های انرژی با افزایش اندکی همراه بوده است. با این حال، بهبود عملکرد محصول این افزایش هزینه را تا حدی جبران کرده است. آگاهی از ابعاد زیست‌محیطی نیز در سطح نسبتاً خوبی قرار دارد.

تحلیل پاسخ‌های عددی (مربوط به سؤالات ٦ تا ١٥ پرسش‌نامه)

در این بخش، به تحلیل داده‌های عددی به دست آمده از پرسش‌نامه‌هایی که توسط ۱۵ واحد گلخانه‌ای تکمیل شدند پرداخته شده است. تمرکز تحلیل در این قسمت بر شاخص‌های کمی شامل مصرف آب، هزینه انرژی، سطح زیر کشت، عملکرد محصول، ظرفیت سیستم RO و هزینه‌های نگهداری آن می‌باشد.

جدول۲- تفسیر نتایج شاخص‌ها با مقیاس لیکرت

شاخص	میانگین امتیاز	انحراف معیار	تفسیر
رضایت از کیفیت آب تصفیه شده با سامانه RO	۴.۳	۰.۵	رضایت بالا
کاهش مصرف آب پس از نصب سامانه RO	۴	۰.۷	تأثیر قابل‌توجه
افزایش هزینه انرژی پس از نصب سامانه RO	۳.۶	۰.۸	افزایش متوسط
بهبود عملکرد محصول در اثر بهبود کیفیت آب	۴.۲	۰.۶	تأثیر مثبت
آگاهی از تاثیرات زیست‌محیطی سامانه RO	۳.۹	۰.۹	آگاهی نسبتاً خوب

جدول۳- شاخص های عددی

شاخص	میانگین	کمینه	بیشینه	واحد
مصرف آب روزانه	۶.۵	۴.۲	۹.۱	متر مکعب
هزینه ماهانه انرژی	۱۹۵۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰۰	تومان
عملکرد محصول در هر برداشت	۸۲۰	۶۰۰	۱۰۵۰	کیلوگرم بر برداشت
سطح زیر کشت	۱۰۵۰	۸۰۰	۱۴۰۰	مترمربع
تعداد کارگر	۳.۴	۲	۶	نفر
ساعات کار روزانه سامانه RO	۶.۸	۴	۱۰	ساعت
درصد بازیابی آب	٪۴۸	٪۳۵	٪۶۰	درصد
هزینه تعویض فیلتر سالانه	۳۵۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰۰	تومان
تعداد خرابی سالانه سامانه RO	۱.۶	۰	۴	بار
مقدار آب تصفیه‌شده روزانه	۵.۴	۳۵	۷.۲	مترمکعب

میانگین مصرف آب در روز ۶.۵ مترمکعب می‌باشد که در گلخانه‌های مجهز به سامانه اسمز معکوس کم‌تر از گلخانه‌های فاقد آن است. علت این کاهش مصرف، بازیابی و استفاده مجدد از آب تصفیه‌شده درون سامانه است. میانگین هزینه انرژی ۱,۹۵۰,۰۰۰ تومان در ماه می‌باشد که در گلخانه‌های دارای آب شیرین‌کن حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد بیشتر از سایر گلخانه‌ها گزارش شده است. این افزایش هزینه ناشی از مصرف برق توسط سیستم‌های پمپاژ و فیلتراسیون سامانه اسمز معکوس است، اما از طرفی باید به اثرات مثبت استفاده از آب شیرین‌کن در بهبود کیفیت آب و در نتیجه عملکرد محصول توجه داشت. عملکرد محصول نیز به‌طور متوسط ۸۲۰ کیلوگرم در هر نوبت برداشت ثبت شده که در گلخانه‌های دارای سامانه آب شیرین‌کن حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد بیشتر می‌باشد. بهره‌برداران این گلخانه‌ها افزایش کیفیت آب و کاهش شوری خاک در اثر استفاده از سامانه اسمز معکوس را از دلایل اصلی افزایش عملکرد محصولات عنوان کرده‌اند. میانگین درصد بازیابی آب توسط سامانه‌های اسمز معکوس ۴۸ درصد می‌باشد که در گلخانه‌هایی که دارای شرایط نگهداری مناسب هستند و از فیلترهای جدید استفاده می‌کنند، تا ۶۰ درصد هم افزایش داشته است. این شاخص نقش موثری در افزایش بهره‌وری و کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی ایفا می‌کند. هزینه‌های نگهداری سیستم مانند تعویض فیلتر، به‌طور میانگین سالانه ۳.۵ میلیون تومان برآورد شده است که برای گلخانه‌های کوچک ممکن است قابل توجه باشد. در تحلیل اقتصادی که در بخش‌های بعدی ارائه می‌شود، مشخص خواهد شد که این هزینه در مقایسه با افزایش تولید قابل توجیه است. سامانه آب شیرین‌کن روزانه حدود ۵.۴ مترمکعب آب را تصفیه می‌کند که حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد از نیاز آبی روزانه در این گلخانه‌ها را تأمین می‌کند و این موضوع توان عملیاتی قابل قبول این سامانه‌ها را نشان می‌دهد. تعداد خرابی سالانه کم (میانگین ۱.۶ بار) نشان می‌دهد که در صورت نگهداری مناسب و استفاده از تجهیزات با کیفیت می‌توان به پایداری عملکرد این سامانه‌ها دست یافت. داده‌های کمی نشان می‌دهند که اگرچه استفاده از سامانه‌های آب شیرین‌کن با افزایش هزینه‌های انرژی و نگهداری همراه است، اما به دلیل کاهش مصرف آب، افزایش عملکرد محصول و پایداری در تأمین آب باکیفیت، ارزش اقتصادی قابل توجهی برای بهره‌برداران دارند. به‌منظور مقایسه شاخص‌های ناهمگن، مقادیر میانگین هر شاخص به روش نرمال‌سازی خطی در بازه [۰–۱] تبدیل شده‌اند و در قالب نمودار عنکبوتی ارائه می‌گردند (شکل ۱).

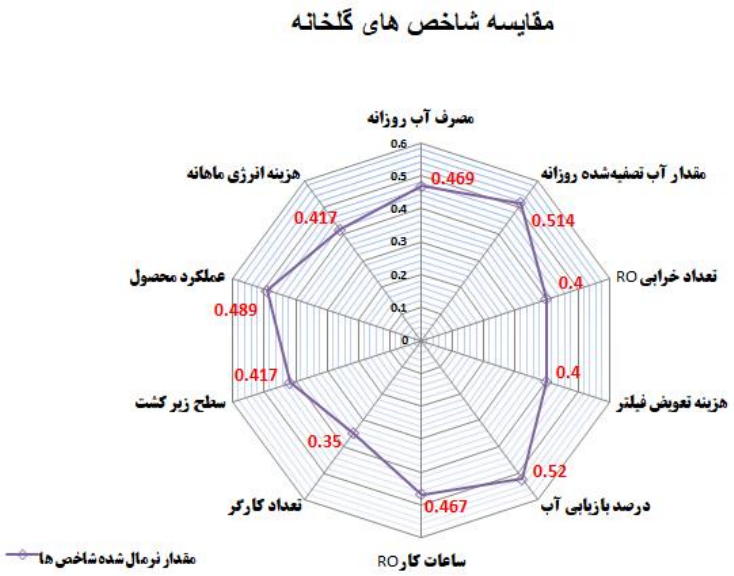
مقایسه عملکرد گلخانه‌های دارای سامانه RO با گلخانه‌های فاقد این سامانه

برای بررسی دقیق‌تر تأثیر استفاده از سامانه‌های تصفیه آب با روش اسمز معکوس روی شاخص‌ها، داده‌های حاصل از ۱۵ گلخانه مورد مطالعه به دو گروه تقسیم شدند: (جدول ۴) مقایسه شاخص‌های کلیدی عملکرد میان دو گروه را نشان می‌دهد.

گلخانه‌های مجهز به سامانه RO (۸ واحد)

گلخانه‌های فاقد سامانه RO (۷ واحد)

گلخانه‌های مجهز به آب‌شیرین‌کن به‌طور متوسط حدود ۱۹ درصد آب کمتری مصرف کردند. علت این کاهش مصرف، استفاده مجدد از آب تصفیه‌شده و امکان مدیریت دقیق‌تر کمیت و کیفیت آب آبیاری است. میانگین عملکرد محصول در گلخانه‌های دارای آب‌شیرین‌کن، حدود ۱۸.۹ درصد بالاتر بود. این افزایش عملکرد عمدتاً به دلیل بهبود کیفیت آب آبیاری و کاهش شوری خاک می‌باشد که شرایط رشد مناسب‌تری برای گیاهان ایجاد می‌کند. مصرف برق در گلخانه‌های دارای آب‌شیرین‌کن بیشتر بوده و هزینه ماهانه انرژی حدود ۴۸ درصد افزایش را نشان داد.



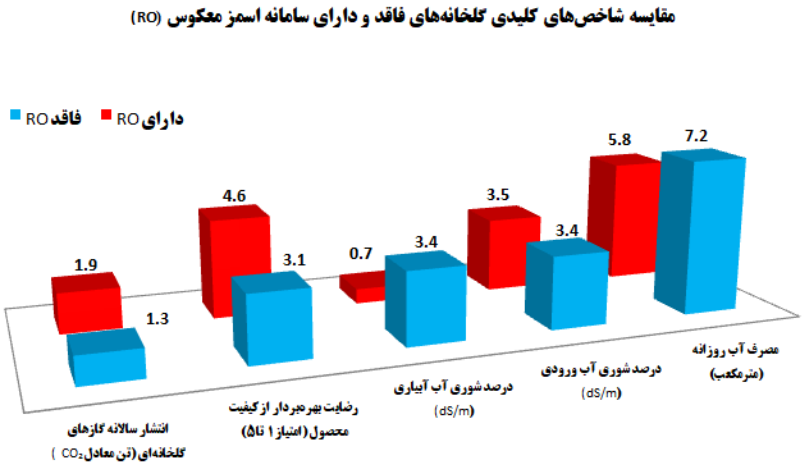
شکل ۱- تحلیل نرمال‌شده شاخص‌های عملکردی مرتبط با سامانه اسمز معکوس در گلخانه‌ها. بیشترین امتیاز نسبی مربوط به درصد بازیابی آب و عملکرد محصول بوده و کمترین مربوط به تعداد کارگر و هزینه‌های انرژی است. داده‌ها بر اساس میانگین مقادیر واقعی و نرمال‌سازی خطی در بازه [۰-۱] محاسبه شده‌اند.

جدول ٤- مقایسه شاخص‌های کلیدی عملکرد میان دو گروه

شاخص	دارای RO	فاقد RO	تفاوت نسبی (درصد)
مصرف آب روزانه (مترمکعب)	۵.۸	۷.۲	↓ ۱۹٪ کاهش
عملکرد محصول (کیلوگرم/برداشت)	۸۸۰	۷۴۰	↑ ۱۸.۹٪ افزایش
هزینه انرژی ماهانه (تومان)	۲۳۰۰۰۰۰	۱۵۵۰۰۰۰	↑ ۴۸٪ افزایش
درصد شوری آب ورودی (dS/m)	۳.۵	۳.۴	.....
درصد شوری آب آبیاری (dS/m)	۰.۷	۳.۴	↓ ۷۹٪ کاهش
هزینه نگهداری سالانه (تومان)	۴۰۰۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰۰	↑ زیادتر
رضایت بهره‌بردار از کیفیت محصول (امتیاز ۱ تا ۵)	۴.۶	۳.۱	↑ محسوس
انتشار سالانه گازهای گلخانه‌ای (تن معادل CO_2)	۱.۹	۱.۳	↑ ۴۶٪ افزایش

که لزوم مداخلات حمایتی (یارانه انرژی یا مشوق‌های فنی) را برای پایداری این سامانه‌ها مشخص می‌کند. با این حال، بسیاری از بهره‌برداران این هزینه را با توجه به افزایش عملکرد و کیفیت محصول قابل توجیه دانسته‌اند. سامانه‌های آب‌شیرین‌کن به‌طور میانگین شوری آب را از ۳.۵ dS/m به حدود ۰.۷ dS/m کاهش داده‌اند که باعث جلوگیری از تجمع نمک در بستر کشت و تخریب ریشه‌ها می‌شود و رشد و عملکرد محصولات را بهبود می‌دهد. هزینه‌های نگهداری و تعویض فیلتر در گلخانه‌های دارای آب‌شیرین‌کن بیشتر است، اما با توجه به طول عمر تجهیزات، بسیاری از گلخانه‌داران این هزینه را قابل مدیریت می‌دانند. داده‌های کیفی حاصل از پرسش‌نامه نشان داد که بهره‌برداران گلخانه‌های دارای سامانه اسمز معکوس امتیاز بالاتری به کیفیت محصول تولید شده و رضایت کلی از عملکرد گلخانه داده‌اند. این شاخص می‌تواند به‌عنوان نشانه‌ای از پذیرش فناوری در میان کاربران تلقی شود. بر اساس مدل‌سازی زیست‌محیطی که با استفاده از نرم‌افزار LEAP، انجام شد میزان انتشار سالانه گازهای گلخانه‌ای بر حسب تن معادل CO_2 در گلخانه‌های مجهز به سامانه اسمز معکوس به‌طور میانگین 1.9 تن در سال برآورد گردید، در حالی که این مقدار در گلخانه‌های فاقد سامانه اسمز معکوس حدود 1.3 تن در سال می‌باشد. این افزایش که معادل 46 درصد است عمدتاً به دلیل مصرف بیشتر انرژی الکتریکی در فرآیند تصفیه آب، پمپاژ تحت فشار و نگهداری مداوم سامانه می‌باشد. با توجه به این موضوع که بخش عمده‌ای از برق مصرفی این گلخانه‌ها از شبکه‌ی سراسری مبتنی بر منابع فسیلی تأمین می‌شود، سهم مستقیمی در افزایش ردپای کربن دارد. که با پژوهش دوتهی و همکاران که تأکید دارند فرآیندهای غشایی در صورت

استفاده از منابع فسیلی، ردپای کربن بالایی خواهند داشت هم‌راستا می‌باشد (Do Thi et al., 2023). با این حال، باید توجه داشت که ارزیابی ردپای کربن نیازمند نگاهی سیستمی و جامع است. در گلخانه‌های دارای RO، به موازات افزایش مصرف برق، کاهش قابل‌توجهی در مصرف آب، کودهای شیمیایی و سموم دفع آفات مشاهده شده است. همچنین، افزایش بهره‌وری تولید و بهبود کیفیت محصول نیز منجر به کاهش نسبی انتشار آلاینده‌ها به ازای هر واحد تولید شده می‌گردد. در نتیجه، اگرچه در نگاه تک‌بُعدی ممکن است انتشار گازهای گلخانه‌ای بیشتر به نظر برسد، اما در ارزیابی جامع چرخه زندگی(LCA) ° می‌توان استدلال کرد که کاربرد سامانه RO، به‌ویژه در صورت ترکیب با انرژی‌های تجدیدپذیر، می‌تواند منجر به کاهش خالص ردپای کربن و ارتقاء پایداری سیستم گلخانه‌ای گردد. با این حال، داده‌های حاصل از سناریوی سوم استفاده از انرژی خورشیدی همراه با سامانه آب‌شیرین‌کن نشان می‌دهد که جایگزین شدن برق شبکه با انرژی خورشیدی می‌تواند میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا 70 درصد کاهش دهد. همچنین بر اساس مطالعه نورجاناه و همکاران، ترکیب سامانه آب شیرین‌کن اسمز معکوس با منبع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی به طور چشمگیری در مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای موثر است و به پایداری فناوری آب‌شیرین‌کن کمک می‌کند (Nurjanah et al., 2024). علاوه بر این، مطالعه گیل و همکاران نیز نشان می‌دهد که استفاده از پنل‌های خورشیدی در سامانه‌های تصفیه آب، ضمن کاهش هزینه‌های جاری، مزیت رقابتی برای کشاورزان مناطق کم‌آب ایجاد می‌کند (Gil et al., 2024). بنابراین، هرچند استفاده از سامانه آب‌شیرین‌کن بدون تغییر در منبع انرژی می‌تواند اثرات زیست‌محیطی منفی داشته باشد، اما در صورت ترکیب با انرژی‌های تجدیدپذیر، سامانه به‌صورت پایدار و سازگار با محیط‌زیست عمل خواهد کرد. استفاده از سامانه‌های اسمز معکوس در گلخانه‌ها اگرچه با افزایش نسبی هزینه‌های انرژی و نگهداری همراه است، اما به‌وضوح مزایایی از جمله کاهش مصرف آب، افزایش بهره‌وری، بهبود کیفیت محصول و کاهش اثرات منفی شوری را به همراه دارد. بنابراین، در چارچوب پیوند آب، غذا، انرژی و محیط زیست این فناوری می‌تواند نقش مهمی در ارتقای پایداری سامانه‌های گلخانه‌ای در مناطق خشک و نیمه خشک ایفا کند. برای بررسی تأثیر سامانه اسمز معکوس (RO) بر شاخص‌های مختلف گلخانه‌ای، شاخص‌های کلیدی در دو گروه گلخانه‌های دارای RO و فاقد آن مقایسه شدند. مقادیر مربوط به هر شاخص استخراج و درصد تغییرات نسبی نیز محاسبه گردید تا تأثیر این سامانه در بهبود عملکرد، مصرف منابع و هزینه‌ها به صورت کمی و واضح نشان داده شود. (شکل ۲) مقایسه مستقیم این شاخص‌ها را در قالب نمودار میله‌ای نمایش می‌دهد.



شکل ۲- مقایسه شاخص‌های کلیدی گلخانه‌های فاقد و دارای سامانه اسمز معکوس (RO)

ارزیابی منابع مصرفی در گلخانه‌های مورد بررسی

این بخش از پژوهش به ارزیابی منابع مصرفی شامل آب، انرژی و نهاده‌های کشاورزی (کود، سم، و...) در گلخانه‌های دارای سامانه اسمز معکوس و فاقد آن می‌پردازد. هدف از این ارزیابی تحلیل بهره‌وری، کارایی مصرف منابع و اثرات جانبی زیست‌محیطی می‌باشد.

۱. مصرف آب

میزان مصرف آب در گلخانه‌های مجهز به سامانه آب شیرین‌کن به‌طور میانگین 5.8 مترمکعب در روز است، در حالی که در گلخانه‌های فاقد این سامانه 7.2 مترمکعب در روز می‌باشد که کاهش در مصرف آب را نشان می‌دهد. این کاهش با موارد زیر در ارتباط می‌باشد:

- بهبود کیفیت آب آبیاری، که آب مورد نیاز برای شستشوی نمک از بستر کشت را کاهش می‌دهد.
- کاربرد دقیق‌تر و برنامه‌ریزی‌شده آب در گلخانه‌هایی که به فناوری اسمز معکوس مجهز هستند، چرا که به‌واسطه ارزش بالاتر آب تصفیه‌شده، مدیریت مصرف آن نیز با دقت بیشتری انجام می‌شود.
- امکان بازیافت و استفاده مجدد از آب برگشتی در برخی واحدها، که منجر به کاهش برداشت از منابع اصلی آب شده است.

هرچند این رفتارها از ویژگی‌های ذاتی سامانه RO نمی‌باشند، اما می‌توان آن‌ها را از پیامدهای غیرمستقیم و رفتاری به‌کارگیری این فناوری دانست که در مجموع، در راستای کاهش مصرف واقعی آب تأثیرگذار بوده‌اند.

۲. مصرف انرژی

استفاده از سامانه آب شیرین‌کن اسمز معکوس منجر به افزایش مصرف انرژی الکتریکی به دلیل عملکرد پمپ‌های فشار بالا، سیستم‌های فیلتراسیون و فعالیت مستمر سامانه می‌شود. به‌طور میانگین:

- گلخانه‌های دارای سامانه اسمز معکوس حدود 2,300 کیلووات ساعت در ماه مصرف انرژی داشتند.
- گلخانه‌های فاقد سامانه اسمز معکوس حدود 1,550 کیلووات ساعت در ماه مصرف انرژی داشتند.

اگرچه مصرف انرژی با افزایش همراه است اما با در نظر گرفتن افزایش تولید و کیفیت محصول، این افزایش هزینه انرژی تا حدی توجیه‌پذیر می‌شود. اما در مواردی که از انرژی خورشیدی استفاده شده است (سناریو ۳)، هزینه کاهش یافته و پیامدهای زیست‌محیطی به حداقل رسیده‌اند. از منظر زیست‌محیطی، استفاده از انرژی تجدیدپذیر کلید کاهش ردپای کربن سامانه‌های اسمز معکوس محسوب می‌شود (Rahman et al., 2023).

۳. مصرف نهاده‌های کشاورزی

طبق جدول ۵، مصرف نهاده‌ها در گلخانه‌های دارای سامانه اسمز معکوس کاهش قابل توجهی نسبت به گلخانه‌های فاقد این سامانه داشته است.

جدول ۵- مقایسه مصرف نهاده‌ها

تفاوت نسبی (درصد)	فاقد RO (میانگین ماهانه)	دارای RO (میانگین ماهانه)	نوع نهاده
↓ ۲۱.۴٪ کاهش	۲۸	۲۲	کود شیمیایی (کیلوگرم)
↓ ۳۱٪ کاهش	۴.۵	۳.۱	سموم دفع آفات (لیتر)
↓ ۱۶.۷٪ کاهش	۴۲۰۰۰۰۰	۳۵۰۰۰۰۰	هزینه نهاده‌ها (تومان)

کاهش حدود 21 درصدی مصرف کود شیمیایی مشخص می‌کند که بهبود کیفیت آب آبیاری پس از تصفیه با سامانه اسمز معکوس موجب دسترسی مؤثرتر ریشه گیاه به عناصر غذایی شده و از مصرف بی‌رویه کود جلوگیری به عمل آورده است (Jamal-Uddin et al., 2022). همچنین، مصرف سموم شیمیایی 31 درصد کاهش را نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از کاهش فشار آفات و بیماری‌ها در اثر شرایط بهداشتی‌تر ریشه و کاهش استرس ناشی از شوری باشد (Kumar et al., 2022). این موارد، اهمیت کیفیت آب در مدیریت تلفیقی آفات و حفظ سلامت گیاه را مشخص می‌کند. هزینه کلی نهاده‌ها به‌طور متوسط 16.7 درصد کاهش یافته است که به لحاظ اقتصادی، یکی از مزایای قابل‌توجه استفاده از سامانه اسمز معکوس می‌باشد. به لحاظ زیست‌محیطی، کاهش مصرف کود و سم منجر به کاهش بار آلودگی شیمیایی خاک و منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌شود. علاوه بر این، سلامت خاک و میکروبیوم آن در شرایط آبیاری با آب تصفیه‌شده پایدارتر باقی می‌ماند. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که کارایی مصرف منابع در گلخانه‌های مجهز به سامانه آب شیرین‌کن خصوصا در آب و نهاده‌های کشاورزی افزایش یافته است، اما برای دستیابی به پایداری زیست‌محیطی، توجه به نوع منبع انرژی مصرفی و ارائه راه‌کارهای کاهش مصرف برق (مثلاً استفاده از انرژی خورشیدی) ضرورت دارد. این یافته‌ها اهمیت طراحی سیاست‌هایی در راستای بهینه‌سازی ترکیبی مصرف منابع در بخش کشاورزی کنترل‌شده را مشخص می‌کنند.

تحلیل در چارچوب WEFE Nexus

تحلیل عملکرد گلخانه‌ها در چارچوب پیوند منابع چهارگانه WEFE (Water–Energy–Food–Environment) اجازه می‌دهد اثرات متقابل سامانه‌های آب‌شیرین‌کن بر پایداری سیستم کشاورزی را به‌صورت یکپارچه مورد ارزیابی قرار داد.

آب

استفاده از سامانه اسمز معکوس در گلخانه‌ها با کاهش در مصرف روزانه آب و همچنین افزایش بازده تصفیه، نقش مستقیمی در افزایش

بهره‌وری آب داشته است. این مزیت یک عامل کلیدی در تاب‌آوری منابع آبی محسوب می‌شود. کاهش شوری آب آبیاری نشان‌دهنده بهبود کیفیت آب و کاهش تنش شوری در خاک می‌باشد که موجب بهبود رشد گیاهان و حفظ ساختار خاک می‌شود. همچنین بازیافت بخشی از پساب تصفیه‌شده در برخی گلخانه‌ها، چرخش مؤثر آب در سیستم را ممکن می‌کند و وابستگی به منابع آب زیرزمینی را کاهش می‌دهد.

غذا

افزایش کمی و کیفی عملکرد محصول، به‌ویژه در محصولات حساس به شوری، نشان‌دهنده نقش مستقیم بهبود کیفیت آب بر امنیت غذایی است. کیفیت و کمیت تولید محصول در گلخانه‌های دارای سامانه اسمز معکوس افزایش معناداری داشته است. عملکرد برداشت محصول در این گلخانه‌ها حدود 18.9 درصد بالاتر است و کیفیت میوه‌ها نیز از نظر رنگ، اندازه، طعم و بازارپسندی بهبود یافته است. این دستاورد، ناشی از فراهم شدن شرایط مناسب رشد، آب با کیفیت مناسب، شوری پایین و جذب بهتر عناصر غذایی می‌باشد. کاهش مصرف کود و سم نیز به معنی کاهش هزینه‌های تولید و افزایش ایمنی غذایی محصول است. بنابراین، سامانه اسمز معکوس به افزایش بهره‌وری تولید، کاهش تلفات و ارتقای امنیت غذایی محلی کمک می‌کند.

انرژی

افزایش مصرف انرژی موضوعی چالش‌برانگیز می‌باشد، اما استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند این چالش را تعدیل کند و مسیر را برای بهره‌وری ترکیبی هموار سازد. یکی از چالش‌های اصلی سامانه‌های آب‌شیرین‌کن، افزایش مصرف انرژی الکتریکی خصوصا در فرآیند پمپاژ و فشار بالا برای فیلتراسیون است. داده‌ها نشان می‌دهند که میانگین هزینه ماهانه انرژی در گلخانه‌های دارای سامانه اسمز معکوس بیشتر از سایر واحدها می‌باشد. اما در سناریوی سوم که انرژی خورشیدی جایگزین برق شبکه شده است، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز به‌شدت کاهش یافته است. این سناریو نشان می‌دهد که ترکیب فناوری تصفیه با انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند راه‌حل پایدار و سازگار با اقلیم باشد، به‌ویژه در مناطقی با تابش بالای خورشید مانند دشت ورامین.

محیط زیست

کاهش شوری خاک و برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی، به همراه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سناریوهای خورشیدی، نشان‌دهنده پتانسیل زیست‌محیطی مثبت این سامانه است. استفاده از آب با شوری پایین و مصرف کمتر نهاده‌های شیمیایی مانند کود و سم در گلخانه‌های دارای سامانه آب شیرین‌کن، به‌طور مستقیم در کاهش بار آلاینده‌ها در خاک و آب تاثیر گذار می‌باشد. در عین حال، اگر انرژی مورد نیاز از منابع فسیلی تأمین شود، ممکن است منجر به اثر منفی بر ردپای کربن گلخانه‌ها شود. اما در صورت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، این مشکل می‌تواند به فرصت تبدیل شود. در مجموع، سامانه‌های آب شیرین‌کن با طراحی مناسب و نگهداری بهینه، می‌توانند نقش مهمی در کاهش اثرات زیست‌محیطی گلخانه‌ها ایفا کنند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش بر ارزیابی عملکرد گلخانه‌های دارای سامانه آب شیرین‌کن اسمز معکوس (RO) در چارچوب همبست آب، غذا، انرژی و محیط زیست (WEFE) پرداخته شد. به‌کارگیری این رویکرد خصوصا در مناطق خشک، می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری منابع، بهبود کیفیت محصول، کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی و ارتقای پایداری زیست‌محیطی شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سامانه‌های RO در کنار صرفه‌جویی حدود 19 درصدی در مصرف آب و افزایش 18.9 درصدی در عملکرد محصول، توانسته‌اند میزان مصرف کود و سموم را به‌ترتیب 21.4 درصد و 31 درصد کاهش دهند. اما افزایش میانگین هزینه انرژی به میزان 48 درصد و هزینه نگهداری، از چالش‌های اقتصادی این فناوری می‌باشند که می‌توانند مانع گسترش آن در بین بهره‌برداران کم‌درآمد شوند. علاوه بر این، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی در سناریوهای مطرح شده، اثر قابل‌توجهی در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. این امر نشان‌دهنده آن است که ترکیب سامانه‌های آب‌شیرین‌کن با انرژی‌های پاک، شرط لازم برای پایداری در مقیاس منطقه‌ای و اقلیمی می‌باشد. این پژوهش، خلأ موجود در مطالعات علمی انجام شده در خصوص تحلیل جامع گلخانه‌های دارای سامانه‌های آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس در چارچوب همبست آب، غذا، انرژی و محیط‌زیست را پر کرده و می‌تواند الگویی مناسب برای توسعه کشاورزی پایدار در مناطق خشک باشد.

پی‌نوشت

1. Reverse osmosis
2. Water, energy, food, environment nexus
3. Multi-stage flash distillation
4. Photovoltaic
5. Life cycle assessment

منابع

عزیـزی، ح.، ابراهیمـی، ح.، سـامانی، ح. و خـاکی، و. ۱۳۹۹. اثـر خشکسالی هواشناسی بر منـابع آب زیرزمینـی دشـت ورامـین بـا اسـتفاده از شـاخص‌هـای بـارش اسـتاندارد، نیسـتور و منبـع آب زیرزمینـی. نشـریه آبیـاری و زهکشـی ایـران. ۶ (۱۴): ۲۱۲۵ – ۲۱۳۵

Awaad, H. A., Mansour, E., Akrami, M., Fath, H. E., Javadi, A. A. and Negm, A. 2020. Availability and feasibility of water desalination as a non-conventional resource for agricultural irrigation in the mena region: A review. Sustainability. 12(18): 7592.

Ai, C., Zhao, L., Song, D., Han, M., Shan, Q. and Liu, S. 2023. Identifying greenhouse gas emission reduction potentials through large-scale photovoltaic-driven seawater desalination. Science of the Total Environment. 857: 159402.

Burg, V., Golzar, F., Bowman, G., Hellweg, S. and Roshandel, R. 2021. Symbiosis opportunities between food and energy system: The potential of manure-based biogas as heating source for greenhouse production. Journal of Industrial Ecology. 25(3): 648-662.

Dhar, A. R. 2025. Building Climate-Resilient Food Systems Through the Water–Energy–Food–Environment Nexus. Environments. 12(5): 167.

Do Thi, H. T. and Tóth, A. J. 2023. Investigation of carbon footprints of three desalination technologies: reverse osmosis (RO), multi-stage flash distillation (MSF) and multi-effect distillation (MED). Periodica Polytechnica Chemical Engineering. 67(1): 41-48.

FAO. 2021. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization.

Fu, L., Zhang, F., Li, Y. and Yan, L. 2025. Research on intelligent control system of temperature in highland daylight greenhouse based on CFD technology. In Second International Conference on Big Data, Computational Intelligence, and Applications (BDCIA 2024). 13550: 534-546

Gil, J. D., González, R. A., Sánchez-Molina, J. A., Berenguel, M. and Rodríguez, F. 2024. Reverse osmosis desalination for greenhouse irrigation: Experimental characterization and economic evaluation based on energy hubs. Desalination. 574: 117281.

Herrera-León, S., Cruz, C., Negrete, M., Chacana, J., Cisternas, L. A. and Kraslawski, A. 2022. Impact of seawater desalination and wastewater treatment on water stress levels and greenhouse gas emissions: The case of Chile. Science of the Total Environment. 818: 151853.

Heidary, B., Hashjin, T., Ghobadian, B. and Roshandel, R. 2019. Performance analysis of hybrid solar-wind RO-MSF desalination system. Resource-Efficient Technologies. 1(2): 1-16.

Jolfan, M. H., Shahdany, S. M. H., Javadi, S., Milan, S. G., Neshat, A., Berndtsson, R. and Tork, H. 2023. Modernization in agricultural water distribution system for aquifer storage and recovery–A case study. Agricultural Water Management. 282: 108270.

Jamal-Uddin, A.-T., Matsuura, T., Al-Daoud, F. and Zytner, R. G. 2022. Treatment and Recycle of Greenhouse Nutrient Feed Water Applying Hydrochar and Activated Carbon Followed by Reverse Osmosis. Water. 14(21): 3573.

Kurihara, M. 2020. Sustainable seawater reverse osmosis desalination as green desalination in the 21st century. Journal of Membrane Science and Research. 6(1): 20-29.

Kumar, R., Ahmed, M., Bhadrachari, G. and Thomas, J. P. 2018. Desalination for agriculture: water quality and plant chemistry, technologies and challenges. Water Science and Technology: Water Supply. 18(5): 1505-1517.

Karami Dehkordi, M., Kohestani, H., Yad Avar, H. and Roshandel, R. 2019. Qualitative Analyze of Inhibiting Factors to Use of Renewable Energies with Grounded Theory (Case study: Kahkesh village from Chaharmahal va Bakhtiari province). Journal of Geography and Planning. 22(66): 207-229.

Martinez-Mate, M. A., Martin-Gorriz, B., Martínez-Alvarez, V., Soto-García, M. and Maestre-Valero, J. F. 2018. Hydroponic system and desalinated seawater as an alternative farm-productive proposal in water scarcity areas: Energy and greenhouse gas emissions analysis of lettuce production in southeast Spain. Journal of Cleaner Production. 172: 1298-1310.

Martin-Gorriz, B., Maestre-Valero, J. F., Gallego-Elvira, B., Marín-Membrive, P., Terrero, P. and Martínez Alvarez, V. 2021. Recycling drainage effluents using reverse osmosis powered by photovoltaic solar energy in hydroponic tomato production: Environmental footprint analysis. Journal of Environmental Management. 297:113326.

Mohebi, P. and Roshandel, R. 2023. Optimal design and operation of solar energy system with heat storage for agricultural greenhouse heating. Energy Conversion and Management.18: 100353.

Ma, B., Karimi, M. S., Mohammed, K. S., Shahzadi, I. and Dai, J. 2024. Nexus between climate change, agricultural output, fertilizer use, agriculture soil emissions: Novel implications in the context of environmental management. Journal of Cleaner

2402.09488.

Zahedi, R., Aslani, A., Yousefi, H., Noorollahi, Y. and Astaraei, F. R. 2024. Water, energy, food, and environment nexus for achieving sustainable transition, addressing gaps, and implementing solutions for global and iranian cases. Energy Science & Engineering. 12(12): 5708-5726.

Zou, H., Wang, F., Zeng, Z., Zhu, J., Zha, L., Huang, D. and Wang, R. 2025. Next-generation water-saving strategies for greenhouses using a nexus approach with modern technologies. Nature Communications. 16(1): 2091.

Zolghadr-Asli, B., McIntyre, N., Djordjevic, S., Farmani, R. and Pagliero, L. 2023. The sustainability of desalination as a remedy to the water crisis in the agriculture sector: An analysis from the climate-water-energy-food nexus perspective. Agricultural Water Management. 286: 108407.

Zhang, H., Batchelor, W. D., Hu, K., Liang, H., Han, H. and Li, J. 2022. Simulation of N2O emissions from greenhouse vegetable production under different management systems in North China. Ecological Modelling. 470: 110019.

Production. 450: 141801.

Nurjanah, I., Chang, T. T., You, S. J., Huang, C. Y. and Sean, W. Y. 2024. Reverse osmosis integrated with renewable energy as sustainable technology: A review.
Desalination. 117590.

Rahman, M., Ahmed, S. and Khan, M. 2023. Environmental impacts and carbon footprint mitigation of reverse osmosis desalination systems using renewable energy sources. Journal of Environmental Management. 329: 117003.

Sun, Q., Sun, Z., Hu, X., Zhang, W. and Wu, L. 2025. Optimizing integrated concentrated solar power and desalination systems with flexible design. Energy Conversion and Management. 326: 119523.

Tzeng, J. H., Ladner, D. A., Williams, C., Karthikeyan, R., Walker, W. S., Moe, N. and Amy, G. 2025. Partial desalination as a new paradigm for cultivation of salt-tolerant food crops in hydroponic controlled environment agriculture using brackish waters: A critical review. Desalination. 119072.

Wang, C. and Gong, J. 2024. Intelligent agricultural greenhouse control system based on internet of things and machine learning. arXiv preprint arXiv:

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.1, Vol. 20, Apr.-May. 2026, p. 100-113

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۲۰، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۵، ص. ۱۱۳-۱۰۰

Comprehensive Evaluation of the Performance and Sustainability of Greenhouses with Reverse Osmosis Desalination Systems within the WEFE Framework

Z. Sojoodi[1], M. Mashal[*2] , H. Khajehpour[3]
Recived: Sep. 17, 2025 Accepted: Nov. 21, 2025

Abstract

Due to increasing water stress, especially in arid and semi-arid regions, the importance of using modern technologies for optimal water consumption in the agricultural sector has increased. This study aimed to evaluate the performance and sustainability of greenhouses equipped with reverse osmosis (RO) desalination systems within the framework of the Water, Food, Energy and Environment (WEFE) Nexus in the Pakdasht region of Iran. The research method was descriptive-analytical and the necessary information was collected using a questionnaire and field observations. In this study, 15 greenhouses (8 with RO and 7 without) were studied in three scenarios based on energy supply and water purification. The results showed that greenhouses with RO saved an average of 19% in water consumption and increased crop yield by 18.9%. Also, the consumption of chemical fertilizers and pesticides showed a decrease of 21.4% and 31%, respectively. However, there was an increase in costs related to the energy sector and the maintenance of these systems. According to the results of the scenario analysis, the use of solar energy as an alternative source of grid electricity can lead to a reduction in costs and greenhouse gas emissions. The final analysis within the WEFE framework showed that the RO system, when properly designed and combined with renewable energies, can play an effective role in increasing the resilience of agriculture in water-scarce regions.

Keywords: Agriculture, Greenhouse, Reverse Osmosis, Resource Sustainability, WEFE Nexus

1- PhD student in Water Science and Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Associate Professor, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Assistant Professor, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: mmashal@ut.ac.ir)