کاربرد روش سطح پاسخ در بهینه‌یابی نسبت اختلاط خاک با خاک‌اره در تیمارهای رطوبتی مختلف خاک در کشت خیار گلخانه‌ای

یاسر حسینی[۱]

دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان- دانشگاه محقق اردبیلی.

y_hoseini@uma.ac.ir

دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۰ و پذیرش: آذر ۱۴۰۰

چکیده

خیار (*Cucumis sativus L*)یکی از مهم‌ترین تولیدات گلخانه‌ای در ایران و جهان محسوب می‌شود. خیار محصول فصل گرم معتدل بوده و به تغییرات رطوبت خاک بسیار حساس است. به‌منظور مدل‌سازی تأثیر اختلاط خاک با خاک‌اره بر عملکرد خیار گلخانه‌ای در شرایط تیمارهای رطوبتی، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل نمونه بدون خاک اره (شاهد) و ترکیب ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۴۰٪ خاک اره بود و رژیم‌های رطوبتی در دو سطح ۴۵٪ و ۶۵٪ ظرفیت زراعی و سطح بدون تنش منظور گردید. با استفاده از روش سطح پاسخ، نتایج نشان داد که بهترین مدل عملکرد براساس متغیرهای درصد خاک‌اره و میزان رطوبت، مدل درجه دو با ضریب تبیین ۰/۸۵ است. همچنین تأثیر میزان سطوح رطوبت در دسترس بر عملکرد به صورت خطی بوده و در مقابل تأثیر عامل درصد خاک‌اره بر عملکرد به صورت تابع درجه دو است. نیز، بیش‌ترین عملکرد با فرض کمترین رطوبت در دسترس و کمترین درصد اختلاط خاک‌اره، برابر ۸۶/۶ (تن بر هکتار) با درجه مقبولیت[۲] برابر ۰/۶، در تیمار ۱۳/۷٪ خاک‌اره و ۴۳/۶٪ تخلیه رطوبتی به‌دست آمد. بیش‌ترین عملکرد با فرض کمترین رطوبت در دسترس و تغییر میزان خاک‌اره بین صفر تا ۴۰٪، برابر ۹۳/۶ (تن بر هکتار) با درجه مقبولیت ۰/۸، در تیمار ۲۷/۶٪ خاک‌اره و ۴۷٪ تخلیه رطوبتی به‌دست آمد. نتایج نشان داد که با کاهش رطوبت در دسترس و همچنین در یک رژیم رطوبتی مشخص با افزایش میزان خاک‌اره، شاخص‌های ریشه، به غیر از طول ریشه اصلی، روندی افزایشی داشت. همچنین در هر یک از تیمارهای رطوبتی، روند افزایشی عملکرد با افزایش میزان خاک‌اره مشاهده گردید. بنابراین، با توجه به تأثیر غیرخطی متغیرهای رژیم رطوبتی و میزان اختلاط خاک‌اره بر عملکرد خیار گلخانه‌ای، برای رسیدن به بهترین عملکرد، می‌بایست نسبت مناسب اختلاط آن برای هر خاک تعیین شود.

واژه‌های کلیدی: رژیم رطوبتی خاک، عملکرد خیار، خصوصیات ریخت‌شناسی ریشه

---

[۱]- آدرس نویسنده مسئول: دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان- دانشگاه محقق اردبیلی

2 -Desirability

مقدمه

خاک یکی از منابع طبیعی تجدیدشونده بسیار مهم و اساسی برای زندگی جانداران و تولید مواد غذائی است. یکی از مهم‌ترین ترکیبات موجود در خاک‌ها، مواد آلی است که وجود مقدار کافی مواد آلی در خاک‌ها، پایداری و حاصلخیزی آن را حفظ خواهد کرد. با توجه به اینکه در سال‌های اخیر با کاهش سطوح آیش و عدم رعایت تناوب، زارعین آسان‌ترین روش برای دفع بقایای گیاهی را همانا سوزاندن بقایای گیاهی می‌دانند و از این رهگذر در بلندمدت لطمات جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست و خاک وارد خواهد شد. بقایای باغی می‌تواند به عنوان یک منبع طبیعی برای تأمین بخشی از نیازهای خاک به مواد آلی باشد و تولید در واحد سطح را افزایش داده و سبب افزایش کیفیت محصولات باغی شود. استفاده از بقایای باغی در اصلاح خاک در ایران کمتر مورد بررسی و مطالعه قرارگرفته است. خاک‌اره طی رشد گیاه تجزیه می‌شود. ظرفیت تبادل کاتیونی و مقدار آب قابل دسترس در آن کم و نسبت کربن به نیتروژن آن زیاد است؛ اما قیمت ناچیز، وزن اندک، فراوانی و در دسترس بودن آن در کشور مزیت محسوب می‌شود. بنابراین، افزودن مواد نگه‌دارنده آب و مواد غذایی به این قبیل بسترها می‌تواند در کاهش هدرروی محلول غذایی و کاهش هزینه‌های تولید مفید باشد (برزگر و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین استفاده از مدل سطح پاسخ جهت تعیین بهترین توابع پیش‌بینی عملکرد و تعیین نقاط بهینه عملکرد با توجه به محدودیت‌های موجود، کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. در تحقیقی که توسط احمد و همکاران (۲۰۱۹) انجام شد، بستر کشت‌های مختلف از جمله توف، ترکیب توف و پرلیت، ترکیب توف و پرلیت و خاک اره و هم‌چنین ترکیب توف و خاک اره برای تولید خیار گلخانه‌ای مورد سنجش قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب توف و خاک اره هرکدام به نسبت ۵۰ درصد حجمی، رشد بیشتری را سبب می‌شود و از نظر هزینه نیز کمترین هزینه را نسبت به سایر بسترهای کاشت دارد. علاوه بر این ترکیب توف و پرلیت و خاک اره، کمترین عملکرد را نسبت به سایر بسترهای کاشت داشت. در تحقیقی که توسط آلعیر و همکاران (۲۰۰۴) برای بررسی امکان استفاده از خاک اره به عنوان بستر کاشت گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای انجام شد، نتایج نشان‌داد که خاک اره در سال دوم آزمایش، عملکردی مشابه پودر سنگ دارد و درصورتی‌که بتوان شرایط بهینه را برای آن فراهم نمود، بستر مناسبی برای تولید محصولات گلخانه‌ای خواهد بود. سلطانی و سلطانی (۲۰۱۶)، ترکیب بهینه میزان آب کاربردی و نیتروژن را برای کشت سیب‌زمینی با استفاده از روش سطح پاسخ مورد مطالعه قرار دادند، طرح مورد استفاده در روش سطح پاسخ، روش مرکب مرکزی بود و آزمایش در دشت دهگلان استان کردستان انجام شد. در این مطالعه میزان عملکرد غده و راندمان مصرف آب به عنوان متغیر پاسخ و مقدار کود نیتروژنه و عمق آبیاری به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند، نتایج افزایش عملکرد را در نتیجه افزایش کود و میزان نیتروژن نشان داد. همچنین با افزایش مقدار آب کاربردی، راندمان مصرف آب کاهش داشت. با استفاده از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ، مقدار نیتروژن مصرفی برابر ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار و مقدار عمق آب آبیاری برابر ۲۸۷ میلی‌متر محاسبه گردید. جهان و امیری (۲۰۱۸)، تأثیر میزان کاربرد نیتروژن، فسفر و کود گاو را بر تولید گندم با استفاده از روش سطح پاسخ مورد مطالعه قرار دادند و در روش سطح پاسخ[3] (RSM) از طراحی مرکب مرکزی[4] (CCD) در طول فصل رشد استفاده نمودند. مقادیر کاربردی نیتروژن به صورت ۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم اوره بر هکتار بود و سطح مورد استفاده برای کود فسفر ۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد و برای کود گاو نیز مقادیر ۰، ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار استفاده گردید. عملکرد دانه (S_Y) و عملکرد بیولوژیکی (B_Y) در زمان برداشت اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که افزایش میزان نیتروژن و فسفر تا ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش عملکرد دانه می‌شود. بهینه‌سازی نیتروژن و فسفر و مقدار مصرف

3 -Response Surface Methodology

4 -Central Composite Designs

کود بر اساس شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی نیز مبتنی بر هر دو عامل انجام گرفت. تحت سناریوی اقتصادی، با استفاده از ۱۴۵/۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفر و ۱۸/۴ تن کود گاوی در هکتار، سبب تولید ۶۵۰۰ کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه شد. برای سناریوی زیست‌محیطی، با استفاده از ۲۱/۲ کیلوگرم در هکتار، بدون استفاده از فسفر و استفاده از ۱۶/۳ تن در هکتار کود، ۳۱۶۰ کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه به دست آمد. نتایج تحقیق نشان داد که روش سطح پاسخ به خوبی می‌تواند تحت عنوان سناریوهای مختلف، نقاط بهینه عملکرد را شناسایی نماید. دیوریس و همکاران (۲۰۱۲) بیان نمودند که بقایای باغی در خاک می‌تواند باعث ایجاد حالت بافری در خاک شده و تنش‌های دمایی را در گیاه کاهش دهد و باعث افزایش فعالیت‌های بیولوژی و افزایش عملکرد گیاه شود. اسوندار و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیق خود تأثیر مقادیر مختلف خاک اره را بر میزان عملکرد خیار گلخانه‌ای مورد بررسی قراردادند، نتایج تحقیق ایشان نشان داد که پلات‌های حاوی پنج کیلوگرم خاک اره در مساحت ۴ × ۴ متر مربع باعث افزایش معنی‌دار عملکرد در واحد سطح می‌گردد. در تحقیقی که توسط لی و ینژوانگ (۲۰۱۵) انجام شد، تیمارهای حاوی بقایای باغی باعث افزایش محتوای کربن خاک در طی دو سال گردید و افزایش قابل ملاحظه‌ای را از نظر محتوای کربن خاک نشان داد. هم‌چنین مطالعات چندی در رابطه با تأثیر کم آبیاری بر میزان عملکرد خیار گلخانه‌ای صورت گرفته است که اغلب مطالعات صورت گرفته کاهش عملکرد خیار گلخانه‌ای را نسبت به کم‌آبیاری و تنش‌آبی گزارش نموده‌اند.

العمران و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای، تنش رطوبتی را به میزان ۴۰، ۶۰، ۸۰ درصد تبخیر و تعرق مورد نیاز گیاه بر خیار گلخانه‌ای اعمال نمودند. نتایج نشان‌داد که با افزایش تنش رطوبتی، شوری خاک افزایش می‌یابد و بیش‌ترین نسبت تولید به ازای واحد آب مصرفی، در تیمار ۴۰ درصد تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه به‌دست می‌آید. همچنین آمر و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که عملکرد خیار گلخانه‌ای با افزایش تنش رطوبتی به صورت خطی کاهش می‌یابد. محمودی اشکفتکی و رفیعی (۲۰۲۰) یک روش ابتکاری برای بهینه‌سازی نیاز آبی گیاه، رشد و پارامترهای عملکرد در کشاورزی با توجه به محدودیت‌های آب و کیفیت آب در دو محیط مختلف کشت انجام دادند. پارامترهای تبخیر و تعرق و رشد بادمجان در پایان فصول رشد در دو سال متوالی اندازه‌گیری شد. شرایط آبیاری مطلوب، یعنی فاصله آبیاری، شوری آب و محیط کشت (سه عامل) با توجه به پارامترهای اندازه‌گیری شده محصول (۱۲ پاسخ) تعیین شد و بهینه‌سازی با مدل‌سازی پارامترها با استفاده از روش سطح پاسخ و تعیین هدف مطلوب براساس یک طرح مرکب مرکزی انجام شد. همچنین از مطلوبیت هدف برای تعیین یک منطقه بهینه با همپوشانی پارامترها استفاده شد. دقت مدل‌های تهیه‌شده برای تخمین عملکرد محصول، تبخیر و تعرق، راندمان استفاده از آب، شوری خاک، وزن خشک اندام هوایی و قطر میوه با ضریب تبیین، ضریب تبیین تنظیم‌شده و ضریب تبیین پیش‌بینی شده، دقیق به‌دست آمد.

نتایج نشان داد که فاصله آبیاری مطلوب، شوری آب و محیط کشت به‌ترتیب ۴/۵ روز، ۱/۴۷ (دسی زیمنس بر متر) و محیط فضای باز بود که منجر به عملکرد مطلوب محصول (۲۴۹۰/۷ گرم در بوته)، تبخیر و تعرق (۶۰۴/۷۶ میلی‌متر)، راندمان مصرف آب (۳/۳۲ گرم در گرم) و شوری خاک ۵/۲۷ (دسی زیمنس بر متر) گردید. دلوی و همکاران (۱۹۹۸)، تولید گوجه با روش‌های آبیاری میکرو را با استفاده از روش سطح پاسخ مورد مطالعه قراردادند و برای ارزیابی اثر سطوح آبیاری از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده نمودند. بدین ترتیب اثر سطوح کوددهی و سطوح آبیاری بر عملکرد گوجه‌فرنگی بررسی گردید و بهینه‌سازی برای ارزیابی حداکثر عملکرد و حداقل مقدار آبیاری انجام شد. تفسیر خطوط میزان عملکرد نشان داد که آبیاری قطره‌ای با سطح آبیاری ۷۹ درصد تبخیر و تعرق پتانسیل و کوددهی به میزان ۹۶ درصد غلظت توصیه شده منجر به

حداکثر عملکرد گوجه‌فرنگی می‌گردد؛ که در این شرایط، صرفه‌جویی آب به میزان ۲۱ درصد و افزایش عملکرد تا ۲۷ درصد به‌دست می‌آید. از آنجا که بقایای باغی می‌تواند به‌عنوان یک منبع طبیعی برای تأمین نیازهای خاک به مواد آلی باشد و علاوه بر آن می‌تواند تولید در واحد سطح را افزایش داده و سبب افزایش کیفیت محصولات باغی شود، لذا به نظر می‌رسد با توجه به تحقیقات کم انجام‌شده در این زمینه، نیاز است در شرایط آب و هوایی ایران و در شرایطی که اکثر خاک‌های ایران متأثر از کمبود مواد آلی خاک می‌باشند، تحقیقاتی صورت پذیرد تا بتوان این منبع را که در حال حاضر به عنوان ضایعات تلقی می‌شود، به عنوان بهبود دهنده خواص فیزیکی و شیمیایی خاک به باغداران و کشاورزان پیشنهاد نمود، علاوه بر این در کنار استفاده از افزودنی‌های مختلف به خاک برای دستیابی به عملکرد بهتر در شرایط تنش رطوبتی نیازمند استفاده از ابزاری است که بتواند میزان استفاده از این افزودنی‌ها را در شرایط تنش رطوبتی، بهینه نماید و توصیه کارشناسی بر اساس مقدار کاربرد این مواد ارائه نماید. یکی از روش‌های مدرن برای تعیین مقادیر پارامترهای تأثیرگذار بر متغییر وابسته استفاده از روش سطح پاسخ است و در مطالعه انجام شده، برای بررسی چگونگی تأثیر خاک اره و رژیم‌های رطوبتی بر عملکرد خیار گلخانه‌ای از این روش استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در شهرستان پارس‌آباد استان اردبیل انجام شده است. خاک مورد استفاده برای کشت از زمین زراعی موجود در محوطه دانشکده کشاورزی مغان انتخاب گردید که برخی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۱) نشان داده شده است. بافت خاک منطقه جزء خاک‌های ریزبافت طبقه‌بندی می‌گردد. خاک‌های ریز بافت که خاک‌های منطقه مورد مطالعه نیز جزء این نوع خاک‌ها محسوب می‌شوند، معمولاً به صورت ترکیبی از ذرات شنی، لای و رس تعریف می‌شوند که خصوصیات این بخش‌ها را به طور یکسان دارا می‌باشند. چگالی ظاهری خاک که در حدود ۱/۵۶ گرم به سانتی‌متر مکعب تعیین‌شده است که در محدودهٔ متوسط از نظر چگالی ظاهری خاک قرار دارد و در محدوده خاک‌های رسی و لوم سیلتی شخم خورده است. چگالی ظاهری بالا سبب کاهش رشد ریشه گردیده و مشکلاتی را برای گیاه ایجاد می‌نماید از نظر میزان درصد آهک خاک، خاک مورد آزمایش، جزو خاک‌های آهکی طبقه‌بندی نمی‌شود زیرا درصد آهک آن کم‌تر از ۱۰ درصد است. زیادی آهک در خاک از نظر کشاورزی مضر بوده و سبب افزایش pH خاک شده و در نتیجه از جذب برخی عناصر غذایی توسط گیاه جلوگیری می‌کند. از نظر pH خاک مورد آزمایش در محدوده قلیایی کم قرار گرفته و از نظر میزان فسفر خاک نیز میزان آن با توجه به مطالعات نوابی و همکاران (۱۳۷۷)، در شرایط متوسط قرار دارد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های منطقه مورد استفاده برای آزمایش‌ها

فسفر (ppm)	ماسه (%)	رس (%)	سیلت (%)	چگالی حقیقی ($g.cm^{-3}$)	چگالی ظاهری ($g.cm^{-3}$)	هدایت الکتریکی (dS/m)	کربن آلی (%)	pH	درصد آهک TNV%	بافت
۸/۴۳	۷۰	۲۰	۱۰	۲/۲۵	۱/۵۶	۱/۱	۱/۰۵	۷/۷۶	۷/۶۴	لوم، رس، شنی

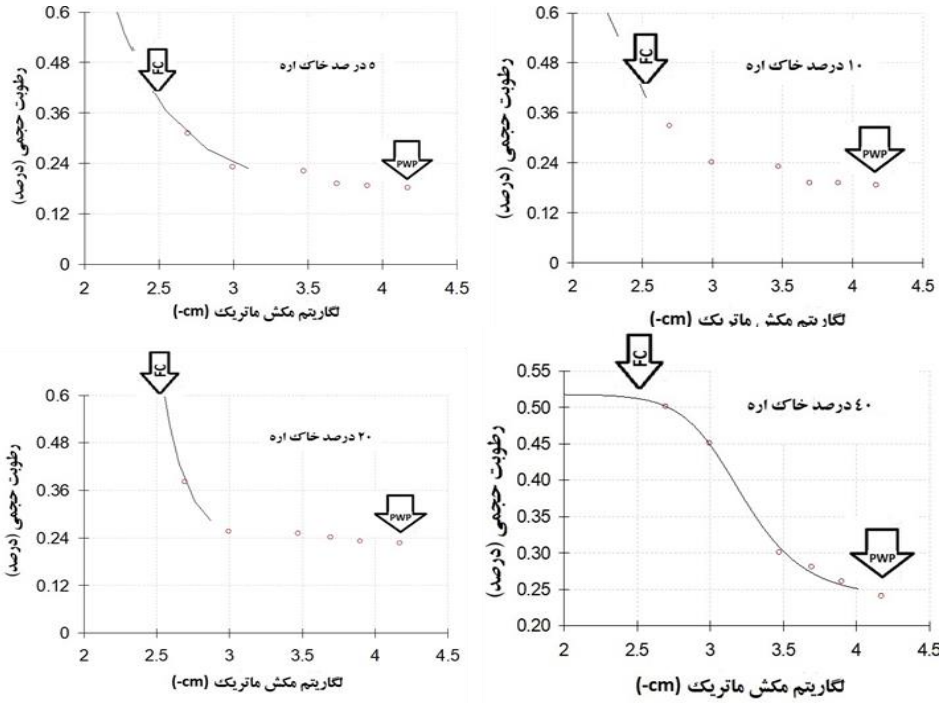
این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشکده کشاورزی مغان انجام گرفت. عامل اصلی شامل رژیم‌های رطوبتی در دو سطح ۶۵ و ۴۵ درصد ظرفیت زراعی و تیمار شاهد بدون اعمال تنش بود و فاکتور فرعی شامل چهار سطح خاک اره، در سطوح ۴۰، ۲۰، ۱۰، ۵ درصد حجمی و تیمار شاهد بدون خاک اره بود. خاک‌اره پس از الک کردن و جد ا نمودن تراشه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. خاک اره مورد استفاده از فرآورده‌های چوبی درختان تبریزی به‌صورت خام (کمپوست نشده) تهیه شد. برای تعیین منحنی خصوصیات رطوبتی خاک، نمونه‌هایی از خاک مورد نظر انتخاب و با استفاده از دستگاه صفحات فشاری درصد رطوبت وزنی در

فشارهای ۰/۳-، ۵-، ۱۰- و ۱۵- بار که در برگیرنده نقاط پتانسیلی مهم خاک می‌باشند تعیین گردید. سپس پارامترهای معادله منحنی مشخصه خاک مطابق مدل وانگنوختن – معلم (۱۹۷۶) برای درصدهای مختلف خاک اره تعیین شد. مدل وانگنوختن – معلم (۱۹۷۶) مطابق رابطه زیر است. همچنین، برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع تیمارهای مختلف خاک اره، از دستگاه اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی بار افتان استفاده شد.

$$\theta_h = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times \left[1 + (\alpha h)^n\right]^{-m} \quad (۱)$$

در این رابطه θ_s و θ_r به ترتیب مقادیر رطوبت اشباع و باقی مانده بر حسب ($cm^3.cm^{-3}$)، h مقدار مکش بر حسب (cm)، α معادل عکس پتانسیل در نقطه ورود هوا بوده و m و n پارامترهای تجربی معادله است.

با استفاده از منحنی رطوبتی خاک، رطوبت معادل دو سطح رژیم‌های تخلیه رطوبتی شامل ۶۵ و ۴۵ درصد رطوبت در دسترس تعیین گردید. همچنین برای تیمارهای مختلف خاک‌اره منحنی رطوبتی مطابق شکل (۱) به‌دست آمد.



شکل ۱- منحنی رطوبتی خاک در درصدهای مختلف خاک‌اره

سپس از دستگاه رطوبت‌سنج TDR-100 جهت تعیین رطوبت روزانه و زمان آبیاری استفاده شد. رطوبت گلدان‌ها به‌صورت روزانه به‌وسیله دستگاه رطوبت‌سنج اندازه‌گیری می‌شد و این اندازه‌گیری‌ها تا زمانی که رطوبت حجمی باقی‌مانده در گلدان‌ها به اعداد مربوط به رژیم‌های تخلیه رطوبتی ۴۵ و ۶۵ درصد رطوبت در دسترس برسد، ادامه می‌یافت و زمانی که دستگاه اعداد مربوط به این نقاط می‌رسید، آبیاری انجام می‌گرفت. رطوبت حجمی این نقاط برای تخلیه رطوبتی ۶۵، ۴۵ و تیمار شاهد به‌ترتیب برابر ۱۷، ۲۱ و ۲۸ درصد حجمی بودند. همچنین رطوبت نقطه پژمردگی خاک برای تیمار شاهد، برابر ۱۱ درصد حجمی برآورد گردید. در این آزمایش برای تعیین عملکرد و خصوصیات ریخت‌شناسی ریشه که شامل وزن‌تر و خشک ریشه، طول ریشه، حجم ریشه و قطر ریشه است، به این‌صورت عمل شد که در طول اعمال دوره آبیاری، میزان محصول هر تیمار توزین شده و ثبت گردیدند و بعد از اتمام آزمایش، ریشه هر یک از تیمارها به‌صورت جداگانه برای تعیین طول، حجم، قطر و وزن‌تر آن‌ها از خاک خارج

شدند. شایان ذکر است برای به‌دست آوردن حجم ریشه مقدار ۳۰۰ سی‌سی آب در استوانه مدرج یک لیتری ریخته و به‌وسیله آن حجم ریشه‌ها محاسبه گردید. همچنین برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه، ریشه‌ها را به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در دستگاه آون قرارداده و بعد از خشک شدن توزین گردیدند.

در روش سطح پاسخ از روش داده‌های موجود[5] استفاده شد. در این روش، داده‌های آزمایش انجام شده با در نظر گرفتن حدود بیشینه و کمینه با کد سطح‌های (+۱) و (−۱) مشخص می‌شوند و در اختیار نرم‌افزار آماری قرار می‌گیرد. پس از انتخاب طرح، معادله مدل تعیین شده و ضرایب آن پیش‌بینی می‌شوند. مدل استفاده شده در روش سطح پاسخ عموماً، معادله مدل درجه دوم کامل یا فرم کاهیده آن است. مدل درجه دوم می‌تواند به صورت زیر بیان شود.

$$Y = C_{k.} + \sum_{i=1}^{4} C_{ki} x_i + \sum_{i=1}^{4} C_{kii} x_i^2 + \sum_{i<j=2}^{4} C_{kij} x_i x_j \qquad (۲)$$

در اینجا β_0، β_j، β_{jj} و β_{ij} به‌ترتیب ضرایب ثابت، خطی، درجه دوم و اثر متقابل رگرسیون هستند. X_i و X_j متغیرهای مستقل کد شده هستند.

پس از آنکه ضرایب معادله محاسبه شدند، با حل معادله بالا، پاسخ پیش‌بینی می‌شود. سپس باید مطابقت مدل با داده‌های آزمایش مورد بررسی قرار گیرد. برای این کار روش‌های متعددی نظیر تحلیل باقیمانده، ریشه میانگین مربعات خطاهای پیش‌بینی شده و آزمون عدم تطابق وجود دارد. قابلیت پیش‌بینی کلی مدل توسط ضریب تبیین[6] (R^2) بیان می‌گردد و اهمیت آماری آن بوسیله آزمون آماری فیشر[7] (F-Value) مشخص می‌شود. اهمیت هر یک از ضرایب رگرسیون (مدل) نیز بر اساس آزمون T به‌دست می‌آید. البته باید توجه داشت که ضریب تبیین به تنهایی نمی‌تواند دقت مدل را توضیح دهد، زیرا این شاخص بیان کننده تغییرات حول میانگین پاسخ است. لذا از ضریب دیگری به نام ضریب تبیین اصلاح شده (R^2_{adj}) استفاده می‌کنند. در محاسبه این ضریب، برخلاف R^2، به جای مجموع مربعات از میانگین مجموع مربعات استفاده می‌شود. نحوه محاسبه این دو ضریب در معادله‌های (۳) و (۴) ارائه شده است:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{total}} \qquad (۳)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_{residual}/DF_{residual}}{SS_{total}/(DF_{model}+DF_{residual})} \qquad (۴)$$

در روابط بالا $SS_{residual}$ بیان‌گر مجموع مربعات باقیمانده، DF معرف درجه آزادی و SS_{total} معرف مجموع مربعات کل $(SS_{residual} + SS_{model})$ است.

پس از تعیین مدل رگرسیونی مناسب، اهداف مختلف با توجه به محدودیت‌های عوامل موثر و متغیرهای مستقل تعیین گردیده و نقاط بهینه عملکردی مدل با توجه به محدودیت‌های اعمالی تعیین می‌شوند که هر یک از این نقاط، با توجه به میزان در دسترس بودن با درجات مقبولیت متفاوت نشان داده می‌شوند. درواقع میزان مقبولیت، یک تابع هدف است که از صفر تا یک متغیر است. به‌طور مثال اگر هدف بیشترین میزان عملکرد در شرایط کاهش میزان مصرف آب و کاهش درصد خاک‌اره باشد، پس از بهینه‌سازی، با مقایسه نتایج درصد خاک‌اره و میزان آب مصرفی، با کمینه مقدار آن‌ها در آزمایش، درجه مقبولیت تابع هدف مشخص می‌گردد. بهینه‌سازی عددی، نقطه‌ای را مشخص می‌کند که تابع مقبولیت را به حداکثر می‌رساند. ویژگی‌های یک هدف ممکن است با تنظیم اوزان متغیرهای مستقل یا اهمیت آن‌ها تغییر نماید. برای چندین پاسخ و عامل، همه اهداف در یک تابع مقبولیت ترکیب می‌شوند تا نقطه هدف با ارزش مقبولیت بسیار بالا به‌دست آید که در واقع در این شرایط درجه مقبولیت تابع هدف برابر یک خواهد بود.

تعیین بهره‌وری آب

برای محاسبه بهره‌وری آب از معادله پیشنهادی فائو (۳۳) استفاده شد (دورنبوث و کسام، ۱۹۷۹):

$$WP = \frac{Y}{ET} \times 100 \qquad (۵)$$

5 -Historical Data
6 -Coefficient of determination
7- Fisher test

که**WP**: بهره‌وری آب بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب آب، Y: عملکرد بر حسب تن بر هکتار و ET: تبخیر و تعرق گیاه بر حسب میلی‌متر است.

نتایج و بحث

در شکل (۲) شماتیک ریشه در درصدهای مختلف خاک اره نشان داده شده است. پارامترهای برازش داده شده مدل وان گنوختن- معلم (۱۹۷۶)، برای درصدهای مختلف خاک اره در جدول (۲) نشان داده شده است.. همچنین نتایج عملکرد و خصوصیات ریشه خیار گلخانه‌ای در جدول (۳) نشان داده شده است و در جدول (۴)، اثر توأمان سطوح رژیم‌های رطوبتی در درصدهای مختلف خاک اره روی صفات رویشی خیار گلخانه‌ای نشان داده شده است. با بررسی این جدول که مجموع اثر رژیم‌های رطوبتی و تیمارهای خاک اره را بررسی نموده است، می‌توان به این نتیجه رسید که اگرچه با افزایش درصدهای خاک‌اره می‌توان تا حدی تأثیر رژیم رطوبتی را بر گیاه کاهش داد. لیکن نمی‌توان به‌طور کامل مانع کاهش عملکرد محصول گردید. با در نظر گرفتن میزان خاک‌اره به‌عنوان عامل تأثیرگذار و تجمیع نتایج تیمارهای رطوبتی، نتایج از نظر خصوصیات ریخت‌شناسی ریشه که مؤثر در جذب آب است، تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد که بدون خاک اره است، داشته است. در تحقیقی که توسط رافائل و همکاران (۲۰۱۰) انجام شد، افزایش مقاومت نسبت به تنش رطوبتی در رابطه با تولید محصول، به افزایش پارامترهای مهم ریشه در جذب رطوبت از جمله طول، قطر و حجم ریشه پایه‌های پیوندی ارتباط داده شده است که با نتایج این تحقیق مطابقت می‌نماید. همان‌طور که در جداول (۳) و (۴) مشخص است، استفاده از بستر خاک‌اره بر کلیه شاخص‌های عملکرد خیار تأثیر معنی‌داری داشته است که با تحقیقات همتیان و همکاران (۱۳۹۰) مطابقت دارد. وزن تر ریشه در تیمارهای مختلف خاک اره با اعمال رژیم‌های رطوبتی افزایش پیدا کرد که با سایر تحقیقات انجام‌شده در این زمینه مطابقت داشته است (قائمی و همکاران، ۱۳۸۸) زیرا در شرایط تنش، گیاه ماده خشک را در ریشه ذخیره می‌نماید تا در اندام‌های هوایی به کار گیرد. از میان تیمارهای مختلف خاک‌اره، تیمار ۲۰ درصد خاک‌اره از وزن‌تر ریشه بیش‌تری نسبت به سایر تیمارها برخوردار است و پس از آن به‌ترتیب تیمارهای ۱۰، ۴۰، ۵ درصد و در نهایت تیمار شاهد قرار دارد. همچنین افزایش حجم ریشه با افزایش میزان خاک‌اره به وضوح در تنش ۶۵ درصد مشاهده می‌گردد. در تحقیقی که توسط پاکدل و همکاران (۱۳۹۰) انجام شد نیز افزایش صفات رویشی با افزایش میزان خاکپوش مشاهده گردید. نتایج نشان‌داد که با افزایش رطوبت خاک، قطر ریشه اصلی در درصدهای مختلف خاک اره و تیمار شاهد به هم نزدیک شده و تأثیر تنش بر خصوصیات ریخت‌شناسی ریشه کاهش می‌یابد، لیکن با افزایش تنش به میزان ۶۵ درصد، قطر ریشه اصلی در تیمار ۴۰ درصد خاک اره، تقریباً به میزان دو برابر تیمار شاهد افزایش می‌یابد و این نشان‌دهنده افزایش توانایی گیاه برای مقابله با شرایط تنش رطوبتی و انطباق گیاه با شرایط تنش و جلوگیری از خسارت ناشی از آن با افزایش میزان خاک‌اره در خاک است. این موضوع در رابطه با تعداد ریشه جانبی نیز مشاهده می‌گردد، تعداد ریشه جانبی به واسطهٔ قدرت جذب آب از قسمت‌های مختلف خاک در شرایط کم آبی، بسیار اهمیت داشته و تأثیرگذار است. تحقیقات نشان داده است که خیار با داشتن ریشه‌های قوی و عمیق در مواجه با تنش رطوبتی، باعث توسعه بیش‌تر ریشه می‌گردند و می‌توانند آب و عناصر معدنی را با کارایی بیش‌تری جذب نمایند. تحقیقات نیز نشان داده است که در اثر تنش آبی، مقدار ریشه در واحد حجم خاک افزایش می‌یابد (آذرمی و همکاران، ۱۳۹۸). بیش‌ترین طول ریشه مربوط به تیمار شاهد بدون خاک اره بوده و پس از آن تیمار ۱۰ درصد خاک اره در رژیم رطوبتی ۶۵ درصد قرار می‌گیرد. همچنین تیمار شاهد با پنج درصد خاک اره، نیز دارای کمترین طول ریشه بود. مطالعات مختلفی، افزایش طول ریشه را بر اثر تنش خشکی و محدودیت آب گزارش نموده‌اند (آسنگ و همکاران ۱۹۹۸، اسدیان و همکاران،۲۰۲۰) لیکن در تحقیق حاضر روند افزایش طول ریشه با کاهش رطوبت در

دسترس و یا افزایش خاک اره مشاهده نشد. افزایش طول ریشه در واریته‌های مختلف خیار گلخانه‌ای متفاوت است، لذا در صورت مواجه گیاه با تنش رطوبتی، می‌توان یکی از معیارهای انتخاب را براساس قابلیت افزایش عمق ریشه و جذب آب در نظر گرفت که نیاز به آزمایش واریته‌های مختلف خیار در شرایط تنش رطوبتی دارد (آلدبی و همکاران،۲۰۱۲). در رابطه با میزان عملکرد محصول، کاهش منطقی میزان عملکرد در تیمار شاهد بدون خاک‌اره با کاهش رطوبت در دسترس مشاهده گردید؛ به‌طوری‌که با کاهش رطوبت در دسترس از صفر درصد ظرفیت زراعی به ۶۵ درصد ظرفیت زراعی در تیمار بدون خاک اره، میزان عملکرد تقریباً ۶۲ درصد کاهش یافت. این درحالیست که در تیمار پنج درصد خاک اره، میزان کاهش عملکرد نزدیک به ۶۷ درصد بوده و در تیمارهای ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد با کاهش رطوبت در دسترس، میزان کاهش عملکرد ۴۲، ۴۲ و ۵۰ درصد می‌شود. میزان کاهش عملکرد در رژیم تخلیه رطوبتی ۴۵ درصد رطوبت در دسترس، برای تیمارهای شاهد، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد خاک‌اره به‌ترتیب برابر ۳۵،۳۳، ۳۹، ۳۷ و ۲۵ درصد به‌دست آمد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با کاهش رطوبت در دسترس از ۴۵ درصد ظرفیت زراعی به ۶۵ درصد، کاهش عملکرد بوجود می‌آید. میزان کاهش عملکرد در رژیم تخلیه رطوبتی ۶۵ درصد رطوبت در دسترس، نسبت به رژیم رطوبتی ۴۵ درصد، به‌ترتیب برای تیمارهای شاهد، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد خاک اره، برابر ۴۳، ۵۰، ۴، ۸ و ۳۳ درصد به‌دست آمد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، با افزایش درصد خاک اره، کاهش عملکرد تا حدودی جبران شده و میزان شیب کاهش عملکرد کاهش می‌یابد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، در تیمارهای شاهد و پنج درصد خاک اره و در رژیم رطوبتی ۴۵ درصد، میزان عملکرد نسبت به رژیم رطوبتی ۶۵ درصد تفاوت معنی‌داری داشته و کاهش عملکرد در این تیمارها نسبت به تیمارهای ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد خاک‌اره بیش‌تر مشهود است. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر مثبت خاک اره در جلوگیری از کاهش عملکرد محصول در تیمارهای با رطوبت در دسترس کمتر، مؤثرتر است. علاوه بر این تأثیر متفاوت میزان خاک‌اره در سطوح رطوبتی، نشان‌گر آن است که تعیین درصد بهینه خاک‌اره برای اختلاط با خاک بسیار مهم است و این کار با استفاده از روش سطح پاسخ امکان‌پذیر است. در این پژوهش، روش سطح پاسخ مطابق طرح داده‌های موجود[8] برای بررسی داده‌های عملکرد استفاده شد و به‌وسیله مجموع مربعات مانده پیش‌بینی مدل، دقت مدل ارزیابی گردید. بدین منظور ضرایب مدل بدون وجود نقطه اول و حضور دیگر نقاط محاسبه‌شده، سپس مدل انتخابی برای برآورد نقطه اول و محاسبه مانده آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش برای تمام نقاط انجام شد و سپس جمع مربعات مانده تمام نقاط محاسبه گردید و در نهایت مدل با مجموع مربعات مانده کمتر نسبت به سایر مدل‌ها انتخاب گردید. با مقایسه مقادیر مشاهده‌شده با مقادیر پیش‌بینی‌شده، از میان مدل‌های مختلف، مدل درجه دوم[9] با پیشنهاد نرم‌افزار با در نظر گرفتن شاخص‌های آماری مطلوب و مختلف مدنظر نرم‌افزار از جمله داشتن ریشه میانگین مربعات خطای کمتر، ضرایب تبیین تنظیم‌شده و پیش‌بینی بالاتر و همچنین مجموع مربعات مانده پیش‌بینی مدل[10] کمتر نسبت به سایر مدل‌ها، برای پیش‌بینی عملکرد انتخاب گردید. سپس با استفاده از روش گام به گام و اعمال آن بر مدل انتخابی، مدل ساده‌تر و دارای تعداد جملات کم‌تر (درجه آزادی) با ضریب تبیین ۰/۸۵ به‌دست آمد. (جدول ۵).

8 - Historical Data
9 - Quadratic
10 - Predicted Residual Sum of Squares for the model

شکل ۲- ریشه خیار گلخانه‌ای در تیمارهای مختلف خاک اره در کمبود رطوبت در دسترس ۶۵ درصد ظرفیت زراعی

جدول ۲- پارامترهای منحنی رطوبتی خاک در درصدهای مختلف خاک اره

تیمار خاک اره	θ_r ($cm^3.cm^{-3}$)	θ_s ($cm^3.cm^{-3}$)	α (cm^{-1})	n	m	k_s ($cm.day^{-1}$)
تیمار شاهد	۰/۱۱	۰/۵۱	۰/۰۵	۱/۴۸	۰/۳۲	۳۱/۴
پنج درصد خاک اره	۰/۱۹	۰/۷	۰/۰۲۸	۱/۳۵	۰/۲۶	۲۱/۷۸
ده درصد خاک اره	۰/۲	۰/۷۱	۰/۰۲	۱/۳	۰/۲۳	۲۱
بیست درصد خاک اره	۰/۲۳۷	۰/۷۵	۰/۰۲	۱/۳۵	۰/۲۶	۱۹
چهل درصد خاک اره	۰/۲۳	۰/۵۲	۰/۰۵۹	۱/۴۸	۰/۳۲	۳۱/۴۴

جدول ۳- میزان عملکرد و خصوصیات فیزیکی ریشه خیار گلخانه‌ای در رژیم‌های رطوبتی و درصدهای مختلف خاک اره

حجم ریشه (cm^3)	وزن خشک ریشه (gr)	تعداد ریشه جانبی (n)	وزن تر ریشه (gr)	قطر ریشه اصلی (cm)	عملکرد ($T.ha^{-1}$)	طول ریشه اصلی (cm)	رژیم رطوبتی (٪)	درصد خاک اره (٪)
۸	۱/۴۷	۱۳	۷/۲۴	۰/۳	۶۴	۲۶	۶۵	۴۰
۶/۵	۱/۰۷	۵	۷/۵۲	۰/۳۵	۷۶/۸	۲۵	۶۵	۲۰
۷	۰/۹۵	۱۰	۶/۴۹	۰/۴	۷۰/۴	۴۲	۶۵	۱۰
۵	۰/۸	۶	۶	۰/۴	۳۸/۴	۳۹	۶۵	۵
۴/۲۵	۰/۵۶	۱۰	۴/۲۸	۰/۵	۳۲	۲۱/۵	۶۵	۰
۴/۲۵	۰/۳۶	۷	۲/۹۱	۰/۲۵	۹۶	۳۸/۵	۴۵	۴۰
۴	۰/۵۱	۱۳	۴/۸۳	۰/۱۲	۸۳/۲	۲۷	۴۵	۲۰
۵/۲۵	۰/۶۸	۶	۳/۶۹	۰/۱۲	۷۳/۶	۳۶	۴۵	۱۰
۴/۵	۰/۵	۴	۲/۸۵	۰/۲۲	۷۶/۸	۲۵	۴۵	۵
۴/۲۵	۰/۴۱	۷	۳/۰۲	۰/۲۵	۵۷/۶	۲۶/۵	۴۵	۰
۴	۰/۴۴	۵	۳/۹	۰/۲۵	۱۲۸	۲۵/۵	۰	۴۰
۶	۱/۲۵	۱۰	۶/۹۹	۰/۳	۱۳۴	۴۰	۰	۲۰
۴/۵	۰/۳۹	۴	۳/۵	۰/۳	۱۲۲	۲۵/۵	۰	۱۰
۴/۲۵	۰/۴۱	۴	۱/۹۱	۰/۲۵	۱۱۹	۱۹	۰	۵
۴/۲۵	۰/۳۹	۸	۳/۶	۰/۲۵	۸۶	۶۸/۵	۰	۰

جدول ۴- اثر توأمان سطوح رژیم رطوبتی در درصدهای مختلف خاک اره روی صفات رویشی خیار گلخانه‌ای

تیمار	طول ریشه اصلی (سانتی‌متر)	عملکرد میوه (تن درهکتار)	قطر ریشه اصلی (سانتی‌متر)	وزن تر ریشه(گرم)	تعداد ریشه های جانبی	وزن خشک ریشه(گرم)	حجم ریشه (سانتی متر مکعب)
۴۰ درصدخاک اره	^{a}۳۰/۳	^{a}۹۶	^{a}۰/۲۶	^{ab}۴/۶	^{a}۸	^{ab}۰/۷۶	^{a}۵/۴
۲۰ درصدخاک اره	^{a}۳۰/۶	^{a}۹۸	^{a}۰/۲۵	^{a}۶/۴	^{a}۹	^{a}۰/۹۴	^{ab}۵/۵
۱۰ درصدخاک اره	^{a}۳۴/۵	^{ab}۸۹	^{a}۰/۲۷	^{ab}۴/۵	^{ab}۷	^{ab}۰/۶۷	^{ab}۵/۵
۵ درصدخاک اره	^{a}۲۷/۶	^{bc}۷۸	^{a}۰/۲۹	^{b}۳/۶	^{b}۵	^{ab}۰/۵۷	^{ab}۴/۵
شاهد(بدون خاک اره)	^{a}۳۸/۸	^{c}۵۸	^{a}۰/۲۷	^{b}۳/۶	^{ab}۶/۶	^{b}۰/۴۵	^{b}۴/۲۵

† در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک با نمونه شاهد هستند از نظر آزمون فیشر در سطح احتمال ۱٪ در یک گروه قرار می‌گیرند

جدول ۵- شاخص‌های آماری مدل‌های مختلف تابع عملکرد

شماره	مدل چندجمله‌ای	ضریب تبیین	ضریب تبیین اصلاح‌شده	احتمال خطا	مدل انتخابی
۱	خطی	۰/۷۶	۰/۸۳	<۰/۰۰۰۱	
۲	درجه ساده	۰/۵۵	۰/۸۱	۰/۹۹	
۳	درجه دوم	۰/۸۵	۰/۹۱	۰/۰۱	✔
۴	مربعی	-۰/۲۶	۰/۸۹	۰/۸۵	

با بهره‌گیری از نتایج طرح داده‌های موجود و تجزیه رگرسیون این داده‌ها، آنالیز واریانس مدل استخراج شده عملکرد خیار گلخانه‌ای با توجه به متغیرهای درصد خاک‌اره (A)، رژیم رطوبتی (B)، بر حسب مقادیر کد شده در جدول ۶) بیان‌شده است. همان‌طور که جدول نشان می‌دهد، تأثیر هر یک از فاکتورهای سطح رطوبت در دسترس و درصد خاک اره بر میزان عملکرد معنی‌دار می‌باشند و همچنین فاکتور توان دوم میزان درصد خاک اره نیز به طور معنی‌داری بر نتایج مدل تأثیرگذار است که این موضوع با نتایج تحقیقات رضا وردی نژاد و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد. از میان فاکتورهای مؤثر درصد خاک اره و رژیم رطوبتی، همان‌طور که در جدول (۶) مشخص است، تأثیر رژیم رطوبتی بر عملکرد خیار گلخانه‌ای بیش از میزان خاک‌اره است که با تحقیقات آذرمی و همکاران (۱۳۹۸) همخوانی دارد.

در جدول (۷)، شاخص‌های آماری مدل نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول مشخص است، میزان کفایت دقت مدل برابر ۲۳/۸ برآورد گردیده است که با توجه به اینکه این عدد بیش از چهار است، نشان‌دهنده دقت مناسب مدل است. علاوه بر این، با توجه به آن‌که مقدار اختلاف ضریب تبیین پیش‌بینی‌شده با ضریب تبیین اصلاح شده کمتر از ۰/۲ است و مقادیر آن‌ها به یک نزدیک است، این شاخص نیز نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل است. نمودارهای مربوط به کفایت مدل نیز عملکرد خوب مدل را نشان می‌دهند. در جدول (۸)، ضرایب مدل پیشنهادی عملکرد، بر اساس فاکتورهای رطوبت در دسترس و درصد خاک‌اره نشان داده شده است. شکل (۳) تأثیر هر یک از فاکتورهای مؤثر را به صورت مجزا بر عملکرد خیار گلخانه‌ای نشان می‌دهد، همان‌طور که در شکل مشخص است، تأثیر میزان رطوبت در دسترس بر میزان عملکرد به صورت خطی بوده و در مقابل تأثیر فاکتور درصد خاک اره بر عملکرد به صورت تابع درجه دو است که نیازمند تعیین حد بهینه برای رسیدن به بهترین عملکرد است. همان‌طور که در این شکل مشخص است تأثیر مثبت خاک اره در این شرایط تا ۲۵ درصد خاک اره دیده می‌شود و پس از آن باعث تأثیر منفی در میزان عملکرد محصول می‌شود. لذا به نظر می‌رسد در بافت لوم-رس- شنی با افزایش مقادیر خاک‌اره تأثیر مثبت آن در کمینه نمودن اثرات کاهش رطوبت در دسترس کم اثرتر خواهد شد.

در شکل (۴) خطوط هم‌میزان عملکرد بر اساس فاکتورهای درصد خاک اره و سطوح رژیم رطوبتی نشان داده شده است، همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است، تأثیر مثبت خاک اره بر میزان عملکرد خیار گلخانه‌ای با کاهش رطوبت در دسترس دیده می‌شود؛ به‌طوریکه فاصله خطوط هم‌میزان از یکدیگر با افزایش درصد خاک اره، افزایش می‌یابد. با بررسی خطوط هم‌میزان مربوط به عملکردهای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ تن در هکتار، مشخص می‌شود که می‌توان در یک سطح رطوبتی مشخص، با دو مقدار از درصد اختلاط خاک‌اره، عملکرد برابر به‌دست آورد البته باید در نظر داشت که به طور قطع میزان کمتر اختلاط خاک اره نقطه مطلوب‌تری است. مورد دیگر شیب بیش‌تر خطوط هم‌میزان و فاصله کم‌تر آن‌ها در مقادیر کم‌تر از مخلوط خاک‌اره است که نشان‌گر افزایش تأثیر مثبت مخلوط خاک اره در عملکرد است. همچنین فاصله یکسان خطوط هم‌میزان در درصد اختلاط بیش از ۲۰ درصد، نشان‌گر تأثیر یکنواخت درصدهای ترکیبی در رژیم‌های رطوبتی مختلف است. در تحقیقی که محبتی و همکاران (۱۳۹۷) نیز انجام دادند تأثیر ژوئولیت به عنوان نگه‌دارنده رطوبت خاک، بر عملکرد خیار گلخانه‌ای به‌صورت معنی‌دار و از درجه دوم بود که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. شکل (۵) نمودار یک به یک نتایج حاصل از مدل را نشان می‌دهد، همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، مدل به خوبی مقدار عملکرد را بر اساس فاکتورهای مؤثر پیش‌بینی نموده است و نتایج پیش‌بینی مدل در مقادیر بالاتر عملکرد به واقعیت نزدیک‌تر است.

جدول ۶- آنالیز واریانس مدل عملکرد بر اساس فاکتورهای رژیم رطوبتی و درصد خاک اره

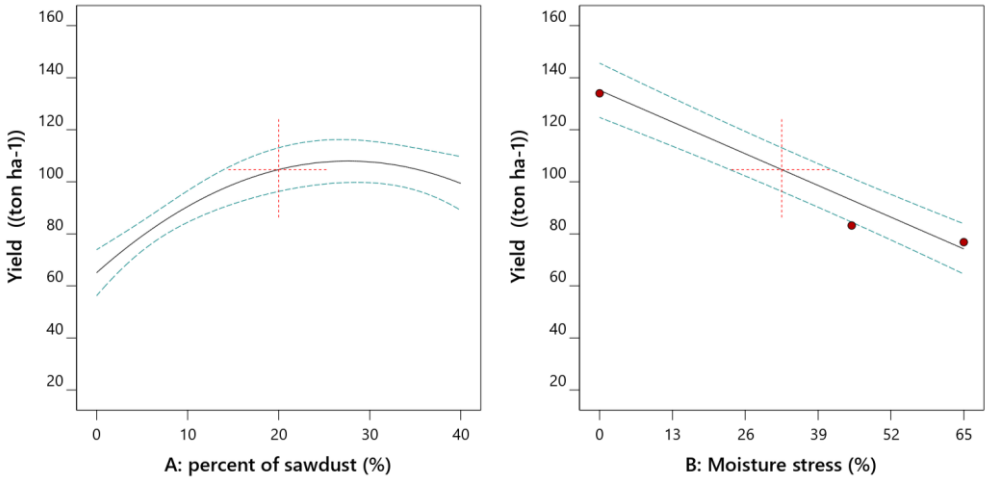
پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات خطا	میانگین مربعات خطا	مقدار F	احتمال خطا
**مدل	۳	۱۲۷۹۷	۴۲۶۵	۶۴	<۰/۰۰۰۱
A	۱	۲۱۸۲	۲۱۸۲	۳۲	۰/۰۰۰۱
B	۱	۹۷۴۲	۹۷۴۲	۱۴۶	<۰/۰۰۰۱
A^2	۱	۱۱۹۲	۱۱۹۲	۱۷/۹	۰/۰۰۱۴

جدول ۷- شاخص‌های آماری مدل عملکرد بر اساس فاکتورهای سطوح رطوبت و درصد خاک اره

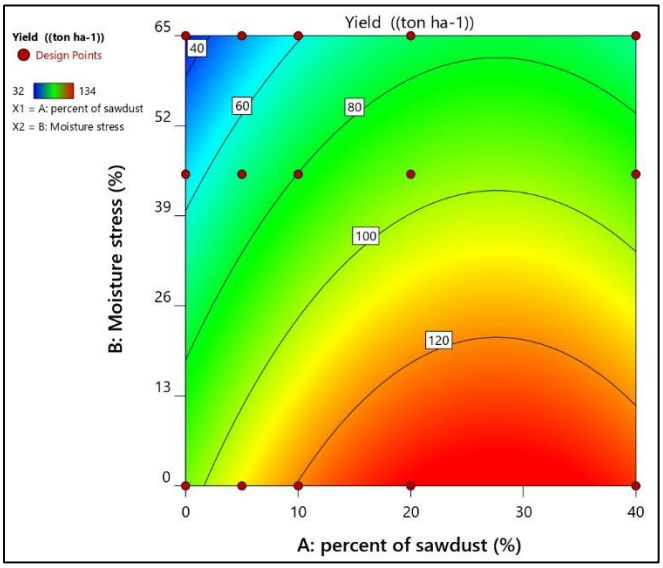
پارامتر	انحراف معیار	ضریب تعیین	ضریب تبیین اصلاح شده	ضریب تبیین پیش‌بینی‌شده	میانگین	کفایت دقت	ضریب تغییرات
عملکرد	۸/۱	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۹	۸۳	۲۳/۸	۹/۷

جدول ۸- ضرایب مدل پیشنهادی عملکرد بر اساس فاکتورهای سطح رطوبت و درصد خاک اره

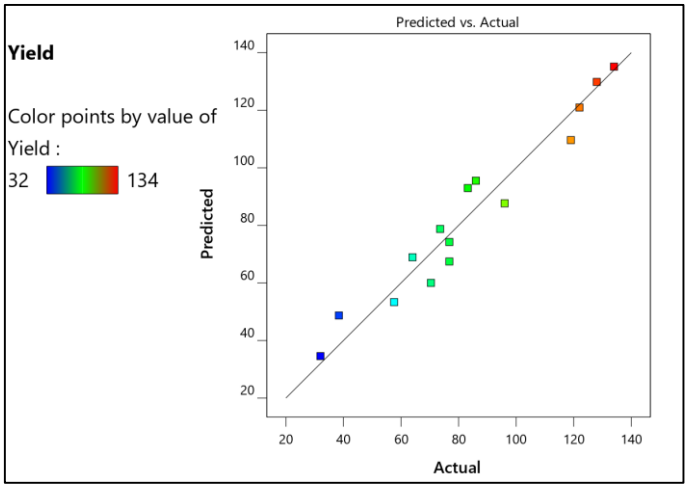
پارامتر	ضریب
عدد ثابت	۹۵/۵
A	۳/۱
B	-۰/۹۳
A^2	-۰/۰۵۶



شکل ۳- تأثیر هر یک از فاکتورهای مؤثر بر عملکرد خیارگلخانه‌ای



شکل ۴- خطوط تراز عملکرد بر اساس فاکتورهای درصد خاک اره و سطوح رطوبتی



شکل ۵- نمودار یک به یک نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده

همان‌طور که در جدول (۹) نشان داده شده است، همچنین در جدول (۱۰) و (۱۱) نتایج تجزیه واریانس میزان آب مصرفی تیمارها بیان شده است. در تیمار ۲۰ درصد خاک اره، بیش‌ترین بهره‌وری مصرف آب در کم‌ترین رطوبت در دسترس به‌دست‌آمده است که با نتایج شاکر و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد. این موضوع در تیمارهای ۱۰، ۵ و شاهد نیز صادق است و بهره‌وری مصرف آب با کاهش رطوبت در دسترس بیش‌تر شد و حداکثر آن در تیمار ۲۰ درصد به مقدار ۳۳ کیلوگرم بر مترمکعب رسید. بیش‌ترین کارایی مصرف آب در تیمار ۲۰ درصد خاک اره نزدیک به نتایج العمران و همکاران (۲۰۱۳) بوده و در حدود ۴۰ درصد تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه گردید در این مطالعه، تنش رطوبتی به میزان ۴۰، ۶۰، ۸۰ درصد تبخیر و تعرق مورد نیاز گیاه بر خیار گلخانه‌ای اعمال گردید. هم‌چنین در تحقیق رضاوردی نژاد و همکاران (۲۰۱۷) بهره‌وری مصرف آب در تیمار ۸۰ درصد تبخیر و تعرق پتانسیل ۳۱ درصد کمتر از تیمار شاهد و برابر ۳۶ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد که این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از خاک‌اره، می‌تواند در کنار کاهش مصرف آب، بهره‌وری مصرف آب را افزایش دهد، همان‌طورکه در این تحقیق بیش‌ترین بهره‌وری مصرف آب در تیمار ۲۰ درصد خاک اره به‌دست آمد؛ که با نتایج احمد و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت می‌نماید، در تحقیق ایشان بستر کشت‌های مختلف از جمله توف، ترکیب توف و پرلیت، ترکیب توف و پرلیت و خاک‌اره و هم‌چنین ترکیب توف و خاک اره برای تولید خیار گلخانه‌ای مورد سنجش قرار گرفت.

نتایج نشان‌داد که ترکیب توف و خاک اره هرکدام به نسبت ۵۰ درصد حجمی، رشد بیشتری را سبب می‌شود. لذا به نظر می‌رسد استفاده از خاک‌اره می‌تواند باعث کاهش اثرات ناشی از کم آبیاری در خیار گلخانه‌ای شود. در تحقیقی که توسط رافائل (۲۰۱۰) بر روی خانواده کدوییان انجام شد، نتایج نشان داد که افزایش مقاومت خیار نسبت به تنش رطوبتی با افزایش شاخص‌های فیزیولوژیکی ریشه از جمله طول، قطر و حجم ریشه همراه است که در واقع پاسخ گیاه به شرایط تنش رطوبتی است. لیکن با مقایسه شاخص‌های ریشه در تیمارهای مختلف خاک‌اره با تیمار شاهد در شرایط رژیم رطوبتی یکسان، اختلاف معنی‌داری دیده نمی‌شود. لذا به نظر می‌رسد در تیمارهای خاک‌اره در شرایط رژیم رطوبتی یکسان، گیاه تنش کم‌تری را تحمل کرده است.

در شکل (۶) و (۷) گروه‌بندی تیمارها بر اساس میزان آب مصرفی نسبت به درصد تخلیه رطوبتی و درصد خاک‌اره نشان داده‌شده است، همان‌طور که در این اشکال مشخص است میانگین مصرف آب در گروه‌های ۵ و ۱۰ درصد خاک اره با استفاده از آزمون فیشر در سطح یک درصد، در یک گروه طبقه‌بندی‌شده و نسبت به سایر گروه‌ها دارای میانگین مصرف آب بیش‌تری می‌باشند، به‌طوری‌که اختلاف مقادیر آب مصرفی این تیمارها با سایر تیمارها در سطح یک درصد معنی‌دار شده است. همچنین بررسی میزان آب مصرفی از نظر تیمارهای تخلیه رطوبتی، نشان داد که تیمارهای ۶۵ و ۴۵ درصد تخلیه رطوبتی، نسبت به تیمار شاهد دریک گروه طبقه‌بندی می‌شوند. وانگ و همکاران (۲۰۰۹) نیز افزایش بهره‌وری مصرف آب را با کاهش میزان آب کاربردی، درکشت خیار گلخانه‌ای گزارش نموده‌اند و نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که علاوه بر کم‌آبیاری که باعث افزایش بهره‌وری مصرف آب می‌گردد، استفاده از ترکیب خاک اره به نسبت مناسب به موازات کاهش آب مصرفی، می‌تواند بهره‌وری مصرف آب را تا حدود ۱/۵ برابر تیمار شاهد افزایش دهد. این موضوع نشان می‌دهد که با استفاده از نسبت ترکیب مناسب خاک اره با خاک در تولید محصولات گلخانه‌ای علاوه بر بالا بودن تولید در واحد سطح می‌توان میزان بهره‌وری مصرف آب را افزایش داده و در شرایط محدودیت منابع آبی، مصرف آب را بهینه‌سازی نمود. هم‌چنین نتایج نشان داد که بهره‌وری مصرف آب در تیمار ۲۰ درصد خاک اره در کلیه احجام مصرفی آب، دارای بهره‌وری بیش‌تری نسبت به سایر تیمارها است.

جدول ۹- آب مصرفی و بهره‌وری مصرف آب تیمارها در دوره کشت

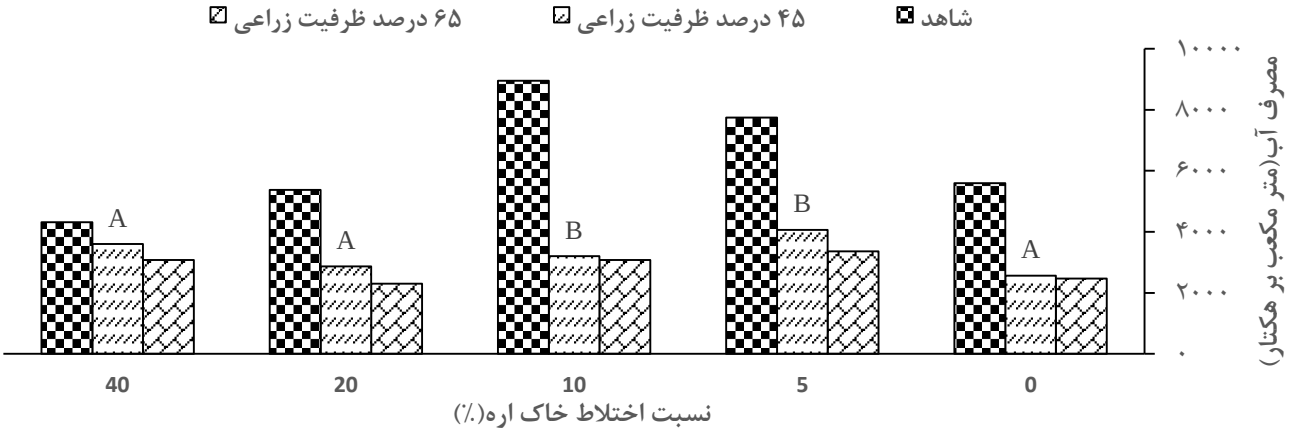
تیمار	درصد خاک اره	کاهش رطوبت به میزان ۶۵ درصد آب در دسترس	کاهش رطوبت به میزان ۴۵ درصد آب در دسترس	شاهد (بدون تنش)
میزان مصرف آب ($m^3\ ha^{-1}$)	۴۰	۳۰۷۲	۳۶۰۰	۴۳۲۰
	۲۰	۲۳۰۴	۲۸۶۷	۵۳۷۶
	۱۰	۳۰۷۲	۳۲۰۰	۸۹۶۰
	۵	۳۳۶۰	۴۰۶۴	۷۷۴۴
	شاهد	۲۴۶۴	۲۵۶۰	۵۶۰۰
کارایی مصرف آب ($kg\ m^{-3}$)	۴۰	۲۰/۸	۲۶/۶	۲۹/۶
	۲۰	۳۳	۲۹	۲۵
	۱۰	۲۳	۲۳	۱۳/۵
	۵	۱۱/۴	۱۹	۱۵/۲
	شاهد	۱۳	۲۲/۵	۱۵/۳

جدول ۱۰- نتایج آنالیز واریانس میزان مصرف آب در رژیم‌های مختلف رطوبتی

منبع پراکنش	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسبه‌شده	P_{Value}
تیمار	۲	۳۷۶۷۵۴۰۲	۱۸۸۳۷۷۰۱	۱۳/۶۳	۰/۰۰۱
خطا	۱۲	۱۶۵۹۰۶۴۴	۱۳۸۲۵۵۴		
کل	۱۴	۵۴۲۶۶۰۴۶			

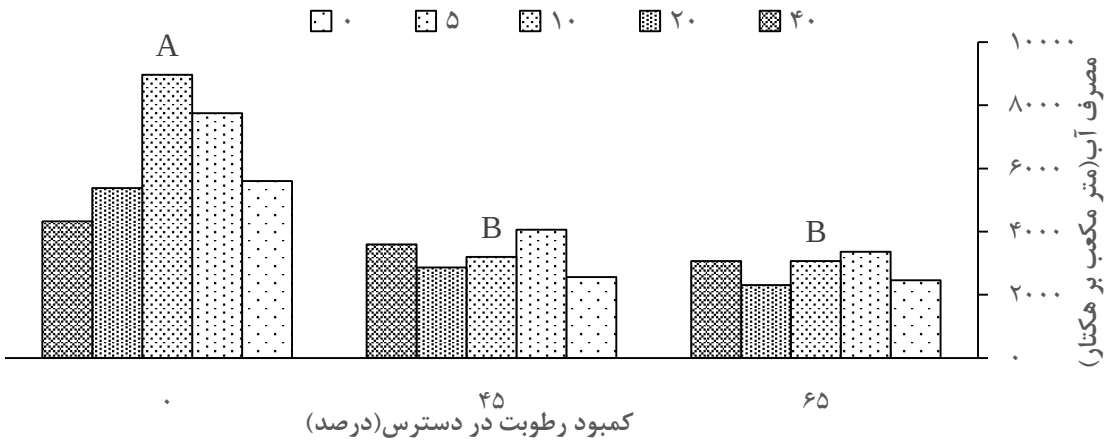
جدول ۱۱- نتایج آنالیز واریانس میزان مصرف آب در درصدهای مختلف خاک اره

منبع پراکنش	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسبه‌شده	P_{Value}
تیمار	۴	۱۶۱۲۵۹۳۶	۴۰۳۱۴۸۴	۱/۷۵	۰/۰۰۱۵
خطا	۱۰	۲۳۱۰۱۵۳۹	۲۳۱۰۱۵۴		
کل	۱۴	۳۹۲۲۷۴۷۵			



شکل ۶- نمودار میزان آب مصرفی در تیمارهای مختلف خاک اره

(حروف مشابه نشان‌دهنده عدم معنی‌داری اختلاف میانگین‌ها در سطح یک درصد است)



شکل ۷- نمودار میزان آب مصرفی در رژیم‌های مختلف آبیاری

(حروف مشابه نشان‌دهنده عدم معنی‌داری اختلاف میانگین‌ها در سطح یک درصد است)

پس از یافتن مدل‌های رگرسیونی برای یافتن نقطه بهینه عملکرد خیار گلخانه‌ای در بخش بهینه‌سازی نرم‌افزار دیزاین اکسپرت[11] برای تعیین نقطه بهینه عملکرد، مقدار حداکثر عملکرد به عنوان توابع هدف به نرم‌افزار معرفی گردید. در سناریوی اول شرایط به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که بیش‌ترین عملکرد خیار گلخانه‌ای در شرایطی محاسبه شود که فرض کمینه نمودن مقدار درصد خاک اره و کمینه نمودن رطوبت در دسترس لحاظ شده و همچنین سایر پارامترهای مؤثر بر عملکرد از جمله قطر ریشه اصلی، طول ریشه اصلی، وزن خشک ریشه و وزن تر ریشه، تعداد ریشه‌های جانبی و حجم ریشه در محدوده مقادیر به‌دست‌آمده باشند. لذا با در نظر گرفتن فرضیات فوق یک هدف با درجه مقبولیت ۰/۶ به‌دست‌آمده آمد. این هدف عملکرد ۸۶/۶ تن در هکتار را در میزان خاک اره ۱۳/۷ درصد و میزان تخلیه رطوبت در دسترس ۴۳/۶ درصد نشان داد. سایر مشخصات نقطه هدف مطابق جدول (۱۲) بوده و نقطه مذکور در شکل (۸) که تابع سه بعدی عملکرد بر اساس شاخص‌های درصد خاک اره و رژیم رطوبتی را نشان می‌دهد، مشخص‌شده است. در سناریوی دوم میزان عملکرد با این تفاوت که میزان درصد خاک اره در محدوده صفر تا ۴۰ درصد در نوسان باشد، محاسبه گردید که نتایج آن مطابق جدول (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول مشخص است، در این شرایط عملکرد محصول برابر ۹۳/۶ تن در هکتار در ۲۷/۶ درصد خاک اره و ۴۷ درصد تخلیه رطوبتی به‌دست‌آمده می‌آید. لذا همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد در این حالت با وجود کاهش رطوبت در دسترس، افزایش میزان درصد خاک اره، سبب افزایش میزان عملکرد به میزان هشت درصد شده است. همچنین در سناریوی دوم مقادیر شاخص‌های وزن تر ریشه، تعداد ریشه جانبی، وزن خشک ریشه و حجم ریشه افزایش داشته و شاخص طول ریشه اصلی کاهش داشته است. علاوه بر این، در هر دو سناریو، مقدار قطر ریشه اصلی یکسان به‌دست آمد این موضوع با تحقیقات کیم و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد در این تحقیق نیز با استفاده از کربن آلی مقاومت بوته خیار به تنش رطوبتی افزایش نشان داد. شکل (۹) مختصات فضایی هدف مطلوب به‌دست‌آمده تحت سناریوی دوم را نشان می‌دهد.

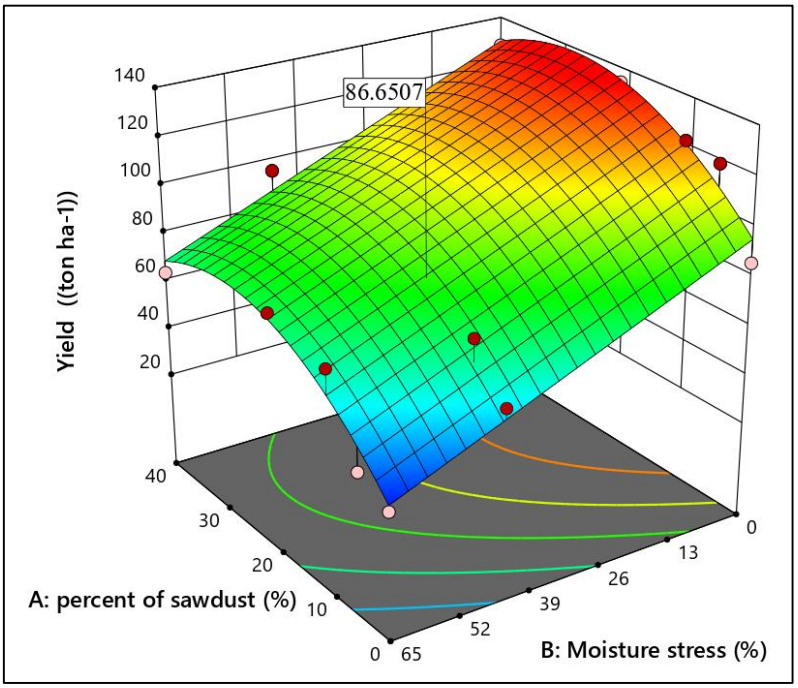
11 - Design expert

جدول ۱۲- نقاط بهینه عملکرد محصول تحت سناریوی اول

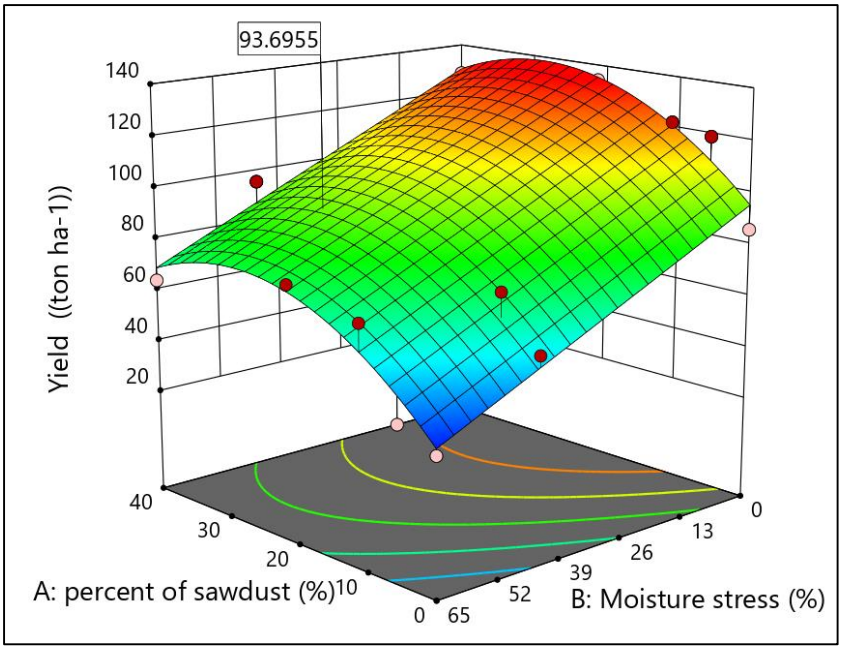
شماره	درصد خاک اره (%)	درصد رطوبت در دسترس (%)	عملکرد ($Ton.hr^{-1}$)	قطر ریشه اصلی (cm)	وزن تر ریشه (cm^3)	تعداد ریشه جانبی (n)	وزن خشک ریشه (gr)	حجم ریشه (cm^3)	طول ریشه اصلی (cm)
۱	۱۳/۷	۴۳/۶	۸۶/۶	۰/۱۶	۴/۱۸	۷	۰/۶	۴/۷	۳۱/۹

جدول ۱۳- نقاط بهینه عملکرد محصول تحت سناریوی دوم

شماره	درصد خاک اره (%)	درصد رطوبت در دسترس (%)	عملکرد ($Ton.hr^{-1}$)	قطر ریشه اصلی (cm)	وزن تر ریشه (cm^3)	تعداد ریشه جانبی (n)	وزن خشک ریشه (gr)	حجم ریشه (cm^3)	طول ریشه اصلی (cm)
۲	۲۷/۶	۴۷	۹۳/۶	۰/۱۶	۵	۸	۰/۷۷	۵/۴	۳۰



شکل ۸- مختصات نقطه بهینه بر سطح سه بعدی پاسخ مدل در سناریوی اول



شکل ۹- مختصات نقطه بهینه بر سطح سه بعدی پاسخ مدل در سناریوی دوم

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد با کاهش رطوبت در دسترس کلیه تیمارها با روند خطی کاهش عملکرد همراه شدند، لیکن با افزایش میزان درصد خاک اره تأثیر مثبتی بر عملکرد محصول در سطوح مختلف رطوبتی مشاهده گردید. نتایج نشان داد تأثیر رژیم رطوبتی بر عملکرد به‌صورت خطی و تأثیر میزان خاک‌اره بر عملکرد به‌صورت تابع درجه دو است که نیازمند بهینه‌سازی و تعیین نسبت دقیق خاک‌اره در شرایط رژیم رطوبتی است. لذا در این رابطه باید به این موضوع توجه داشت که استفاده از افزودنی‌هایی مثل خاک‌اره باید به‌گونه‌ای باشد که ابتدا نسبت مناسب آن برای هر خاک تعیین شود. در این تحقیق نسبت مناسب اختلاط تحت سناریوهای مختلف در خاک لوم-رس-شنی مورد بررسی قرار گرفت که سناریوها، براساس محدودیت خاک اره و عدم محدودیت خاک اره اعمال گردید. نتایج نشان داد در شرایط عدم کمبود آب و میزان خاک اره، می‌توان با افزایش ۱۳ درصدی میزان خاک اره، عملکرد محصول را به میزان هشت درصد افزایش داد. علاوه بر این باید این نکته را در نظر داشت که استفاده از خاک‌اره فقط می‌تواند بخشی از تأثیرات منفی کاهش رطوبت در دسترس را خنثی نموده و در حالت کلی کاهش عملکرد در کلیه تیمارهای خاک اره در شرایط رژیم رطوبتی مختلف مشاهده گردید، لیکن در کلیه سطوح رطوبتی اعمالی، بالا بودن عملکرد تیمارهای خاک‌اره نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد. همچنین تأثیر مثبت میزان خاک‌اره بر خصوصیات ریشه به‌غیراز طول ریشه اصلی، در همه تیمارها مشاهده گردید.

تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی طی قرارداد طرح شماره ۲۲۳۴۳، تهیه‌شده است و از ایشان تشکر و قدردانی می‌گردد.

فهرست منابع

۱. آذرمی ر، ترابی گیگلو م و حسینی ی، ۱۳۹۸. تأثیر پایه‌های کدو و تنش آبی بر خصوصیات رشد و عملکرد خیار گلخانه‌ای. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای, ۱۰(۱): ۴۷-۵۸.

۲. پاکدل پ، تهرانی‌فر ع، نعمتی س ح، لکزیان ا و خرازی س م،۱۳۹۰. اثر چهار نوع خاکپوش چیپس چوب، کمپوست زباله شهری، خاک اره و سنگریزه در سه ضخامت مختلف بر رشد درخت چنار، نشریه علوم باغبانی (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵ (۳):۲۹۶-۳۰۳.

۳. قائمی م، بخش کلارستاقی ک و نبوی کلات س، ۱۳۸۸. مقایسه چند بستر کاشت در خواص کمی خیار گلخانه‌ای رقم نگین در روش آبکشت. یافته‌های نوین کشاورزی, ۴(۱۴): ۱۵۷-۱۶۶.

۴. محبتی ع ا، نجفی مود م ح، شهیدی ع، خاشعی سیوکی ع، ۱۳۹۷. اثر متقابل سطوح مختلف تنش خشکی و کاربرد زئولیت بر عملکرد خیار گلخانه‌ای .مجله روابط خاک و گیاه. ۹ (۲) :۵۵-۶۶

۵. همتیان دهکردی م، محمدی قهساره ا، ۱۳۹۰. اثر نوع بستر کشت بر عملکرد و غلظت عناصر غذایی در خیار گلخانه‌ای. دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران. تبریز.

۶. نوابی، ف،۱۳۷۷، تعیین نقطه بحرانی فسفر و پتاسیم برای محصول پنبه .وزارت جهاد کشاورزی، موسسه تحقیقات خاک و آب.

7. Ahmad MAF, Maher JT and Ibrahim M M, 2019. Evaluation of different soilless media on growth, quality, and yield of cucumber (Cucumis sativus L.) grown under greenhouse conditions. 13(08):1388-1401.
8. Al-Debei HS, Makhadmeh I, Abu-Al Ruz I, Al-Abdallat AM, Ayad JY and Al Amin N, 2012. Influence of different rootstocks on growth and yield of cucumber (Cucumis sativus L.) under the impact of soil-borne pathogens in Jordan. J. Food, Agric. Environ. 10 (2): 343-349.
9. Allaire S, Caron J, Menard C and Dorais M, 2004. Growing media varying in particle size and shape forgreenhouse tomato. Acta Horticulture. 644, pp.307-311.
10. Alomran AM, Louki II, Aly AA and Nadeem ME, 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: 1247-1259.
11. Amer KH, Sally A and Jerry LH, 2009. Effect of deficit irrigation and fertilization on cucumber, Journal of Agrobiology, 101:1556–1564.
12. Assadian F, Niazi A and Ramezani M, 2020. Response Surface Modeling and Optimization of Effective Parameters for Zn(II) Removal from Aqueous Solution Using Gracilaria Corticata. Journal of Chemical Health Risks.10(31):213-224.
13. Asseng A, Ritchia JT and Smuchker AJM, 1998. Root growth and water uptake during water deficit and recovering in wheat. Plant Soil. 201: 265-273.
14. Barzegar Hafshjani Z, Mobli M, Khoshgoftar manesh AH and Abedi Kupaie J. 2015. The Effect of adding pamis and bentonite to sawdust on growth traits of greenhouse capsicum. Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture, 6 (21):77–84.
15. Cakir R., Cebib UK., Altintasc S. and Ozdemirba A. 2017. Irrigation scheduling and water use efficiency of cucumber grown as aspring-summer cycle crop in solar greenhouse. Agricultural Water Management, 180: 78–87.
16. De Vries, FT, Liiri ME, Bjørnlund L, Bowker MA, Christensen S, Setala HM and Bardgett RD, 2012. Land use alters the resistance and resilience of soil food webs to drought. Nature Climate Change, 2, pp. 276–280.
17. Doorenbos J. and Kassam A.H. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage paper; no 33.
18. Jahan M and Amiri MB, 2018. Optimizing application rate of nitrogen, phosphorus and cattle manure in wheat production: An approach to determine optimum scenario using response-surface methodology. Journal of soil science and plant nutrition, 18(1): 13-26.
19. Kim, TYL, Sang H, Ku H., Lee SY, 2019. inhancement of Drought Tolerance in CucumberPlants by Natural Carbon Materials plants. 8: 446-462.

20. Li Zh and Yingzhong Xi, 2015. Improving desertified soil properties by incorporating and mulching tree branch in Ningxia province- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31(10): 174-181.
21. Mahmoodi-Eshkaftaki M and Rafiee MR, 2020.Optimization of irrigation management: A multi-objective approach based on crop yield, growth, evapotranspiration, water use efficiency and soil salinity,Journal of Cleaner Production, 252:221-232.
22. Osundare OT, Badmus AA and Olatubosun OA, 2019. Effects of organic weed control methods on weed density, phenotypic traits and yield attribute of cucumber (Cucumis Sativus). Journal of Biology, Agriculture and Healthcare, 9(10):105-110.
23. Raphael Y, Schwarz D, Krumbein A and Colla G. 2010. Impact of grafting on product quality of fruit vegetables. Scientia Horticulturae, 127:172–179.
24. Rezaverdinezhad V, Shabanian M, Besharat S and Hasani A. 2017. Determination of crop water requirement, crop coefficient and water use efficiency of greenhouse-grown cucumber and tomato (Case study: Urmia region). Journal of Science & Technolgy Greenhouse Culture, 8(3):27-40.
25. Soltani M and Soltani J, 2016. Determination of Optimal Combination of Applied Water and Nitrogen for Potato Yield Using Response Surface Methodology (RSM). Biosc.Biotech.Res.Comm. 9(1): 46-54
26. Van Genuchten M. Th. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report, U. S. Salinity Lab. Riverside CA.
27. Wang Z, Liu Z, Zhang Z and Liu X, 2009. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (Cucumis sativus L.) grown in solar greenhouse based on 20cm standard pan evaporation in Northeast China. Scientia Horticulture, 123 (1): 51–57.

Application of Response Surface Methodology in Optimizing Soil Mixing Ratio with Sawdust in Different Soil Moisture Treatments for Greenhouse Cucumber

Y. Hoseini[1]
Associate Professor, Moghan College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
y_hoseini@uma.ac.ir

Received: April 2021, and Accepted: November 2021

Abstract

Cucumber is one of the important greenhouse vegetables in Iran and the world. Cucumber is a warm and temperate season crop and is very sensitive to soil moisture regimes conditions. In order to model the effect of mixing soil with sawdust on the yield of greenhouse cucumber under different moisture regimes, an experiment was conducted in a completely randomized block design with three replications. Treatments included sawdust-free treatment (control) and a combination of 5%, 10%, 20%, and 40% sawdust and amount of water were considered at two levels of 45% and 65% of field capacity and a stress-free level. Using response surface method, the results showed that, based on the variables of sawdust percentage and moisture level, the best yield model is the second degree model with a regression coefficient of 0.85. Also, the effect of available moisture levels on yield was linear and, in contrast, the effect of sawdust percentage on yield was a quadratic function. Also, assuming the least available moisture and the lowest percentage of sawdust mixing (i.e. 13.7% of sawdust and 43.6% of field capacity), the highest yield was 86.6 tons/ha with a degree of desirability of 0.6. Also, assuming the least available moisture and change of sawdust between zero to 40 % (27.6% of sawdust and 47% of field capacity), the highest yield was 93.6 tons/ha, with a degree of desirability of 0.8. The results showed that, in any specific moisture regime, with increase in the amount of sawdust, root indices, except the main root length, had an increasing trend with decrease in available water. Besides, in each of the moisture regimes treatments, an increasing trend of yield was observed with increase in the amount of sawdust. Considering the nonlinear effect of changes in moisture regime and sawdust mixing rate on greenhouse cucumber yield, in order to achieve the best yield, sawdust mixing ratio should be determined for each soil.

Keywords: Moisture regimes, Cucumber yield, Root morphological characteristics

[1] - Corresponding author: Moghan College of Agriculture & Natural Resources , University of Mohaghegh Ardabili ,Ardabil , Iran.