

چشم‌انداز آبیاری چگالشی در بهبود بهره‌وری آب

سمانه اروندی^۱، فرود شریفی*^۲ و علی شاه‌نظری^۳

^۱ دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ^۲ دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران و ^۳ دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۰۶

چکیده

آب عامل عمده در تولید محصولات و مواد غذایی و پایداری زیست‌بوم محسوب می‌شود. نیاز به منابع آبی روز به روز افزایش می‌یابد. با توجه به کمبود آب و خشک بودن بسیاری از عرصه‌ها، توسعه فناوری‌های جدید تامین نیاز آبی گیاه در مرحله استقرار یا پس از آن حائز اهمیت است. حل مشکل کم‌آبی، نیازمند توسعه فناوری‌های نوین است. چگالشی بخار در خاک، روشی نوین و در حال توسعه بوده که با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر دارای قابلیت در افزایش راندمان مصرف آب است. در این روش، با استفاده از انرژی خورشید، بخار آب به‌طور مستقیم به ناحیه ریشه منتقل شده و رطوبت خاک را بالا می‌برد. هدف پژوهش حاضر، بررسی کارایی سامانه آبیاری تبخیری-تقطیری در افزایش بهره‌وری آب و امکان‌سنجی افزایش رطوبت خاک‌های مختلف بهبود یافته با مواد آلی است. در این روش، برای افزایش چگالشی، بخار آب تولیدی وارد لوله‌های هادی بخار شده و پس از تقطیر منجر به افزایش رطوبت خاک می‌شود. در این پژوهش، ابتدا تعدادی آزمایش در فلوم‌های کوچک انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که رطوبت چگالشی یافته در خاک با مواد آلی، ۱۱ درصد بیشتر از همان خاک بدون ماده آلی بود. سپس، با توجه به امکان افزایش رطوبت با این روش، آزمایش‌ها در گلدان‌های بزرگ‌تری انجام شد. نتیجه تجزیه واریانس اثر متقابل بافت خاک، دمای بخار و مواد آلی نشان داد که پارامترها تاثیر معنی‌داری بر جذب رطوبت بخار ندارند. بر اساس نتایج به‌دست آمده، خاک با بافت متوسط، ۳۵ درصد ماده آلی و بخار ۴۵ درجه سانتی‌گراد با لوله هادی پوشش‌دار از شرایط بهتری نسبت به بقیه تیمارها از نظر جذب رطوبت برخوردار بود. بخار دمیده به درون لوله‌های هادی بخار در فلوم و گلدان‌ها برای آزمون خاک با دو دمای ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد بود که برای کشت گیاه، بخار ۳۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. پس از تعیین دمای مناسب و انتخاب بافت خاک، کشت گیاه با روش آبیاری تبخیری-تقطیری و مقایسه آب مصرفی با کشت گلخانه‌ای و مزرعه‌ای صورت گرفت. خاک انتخابی، برای کشت کاهو در شرایط کنترل شده و با آبیاری تبخیری-تقطیری، متوسط و در ترکیب با ۳۵ درصد ماده آلی و لوله هادی با پوشش و همچنین، دمای بخار ۳۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. نتایج این پژوهش نشان داد که پس از برداشت محصول و رشد کامل کاهو در هر سه شرایط، تولید به ازای مصرف یک متر مکعب آب برای کاهو در روش تبخیری-تقطیری، گلخانه و مزرعه به ترتیب ۱۲۵۰، ۳۳۳ و ۷۵/۵ کیلوگرم است. کارایی مصرف آب در تمامی تیمارها بررسی شد و نتایج نشان داد که با احتمال ۹۹ درصد، اختلاف معنی‌دار بین روش‌های مختلف آبیاری وجود دارد، به‌طوری که کارایی مناسب مصرف آب در تیمار آبیاری تبخیری-تقطیری است. آب مصرفی در طی دوران رشد در گلخانه در حدود چهار برابر روش آبیاری تبخیری-تقطیری و در مزرعه حدوداً ۲۱ برابر روش آبیاری تبخیری-تقطیری برای تولید کاهو (متوسط یک متر مربع) بوده که این ارقام

نشان‌دهنده کاهش چشمگیر استفاده از آب با روش یاد شده است. با بررسی وزن ماده خشک کاهو در هر سه روش، نتایج حاکی از آن است که در تمامی نمونه‌های برداشت شده از آبیاری تبخیری-تقطیری، گلخانه و مزرعه، به‌طور متوسط ماده خشک ۱۲/۵ درصد بوده و به‌طور متوسط ۸۷/۵ درصد آب که این امر نشان از کیفیت یکسان محصول در هر سه روش است.

واژه‌های کلیدی: چگالش، خاک، گلخانه، مزرعه، وردیج

مقدمه

خشک و نیمه‌خشک و ماندابی شدن خاک در مناطق مرطوب می‌شود.

اقلیم خشک و نیمه‌خشک در سطح کشور اغلب مناطق را تحت تأثیر قرار داده، خصوصاً خشکسالی‌های اخیر بر مشکل کم‌آبی افزوده است. هر یک از گیاهان به‌طور اعم و گیاهان زراعی به‌طور اخص دارای کمینه نیاز آبی برای رشد و تولید عملکرد مطلوب حتی تحت شرایط گلخانه‌ای هستند. در صورتی که کمینه نیاز آبی بنا به دلایلی فراهم نشود، گیاه با تنش خشکی مواجه شده، در صورت مصادف شدن تنش با مراحل رشدی حساس به کمبود آب، نظیر جوانه‌زنی بذر و مرحله گلدهی، می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیری به محصول وارد آید. برخی مواد نظیر بقایای گیاهی، کود دامی، کود کمپوست و هیدروژل‌های پلیمری سوپرجاذب می‌توانند مقادیر متفاوتی آب در خود ذخیره کرده و قابلیت نگهداری و ذخیره‌سازی آب را در خاک افزایش دهند. آب ذخیره شده در این مواد در مواقع کم‌آبی در خاک، آزاد شده و مورد استفاده ریشه گیاه قرار می‌گیرد.

با توجه به کمبود آب شیرین و افزایش جمعیت، نیاز به استفاده از آب‌های شور امری ضروری است، اما شیرین‌کردن آب‌های شور نیاز به صرف انرژی دارد. آبیاری چگالشی^۱ روشی نوین است که با استفاده از نور خورشید انرژی مورد نیاز خود را تأمین می‌کند. جریان هوا با عبور از روی سطح آب شور در دستگاه چگالش‌کننده با بخار آب مخلوط و اشباع می‌شود. در یک پژوهش، برای سامانه آبیاری از لوله‌های PVC که سوراخ‌هایی به قطر پنج میلی‌متر و به فاصله ۲/۱ سانتی‌متر در سرتاسر آن ایجاد شده بود، استفاده شد که آب چگالش‌یافته از درزهای لوله خارج و وارد خاک می‌شد. در این آزمایش، مقدار آب آبیاری به‌طور

افزایش جمعیت، افزایش تقاضا برای غذا را به‌دنبال خواهد داشت که نشان می‌دهد، تولیدات کشاورزی باید در یک سرعت برابر با رشد جمعیت، ولی با همان زمین‌ها و منابع آب ثابت، رشد کند. به هر حال موفقیت‌های گذشته انقلاب سبز به‌راحتی تکرار نخواهد شد. مناطقی از فناوری انقلاب سبز فایده بردند که همه حاصل‌خیز و غنی از آب شیرین بودند. استفاده از آب‌های با کیفیت پایین‌تر، از قبیل آب شور و یا هرزآب‌ها در آبیاری باعث کاهش شدید در عملکرد محصول و عوارض دیگر در خاک خواهد شد. با این تفاسیر، تنها راه مناسب برای تولید بیشتر آب شیرین استفاده از آب‌های نامتعارف و شیرین‌کردن آن‌ها با استفاده از مکانیزم‌های مختلف است (Yusefi و همکاران، ۲۰۱۱).

از زمان انقلاب صنعتی، جمعیت جهان به‌دلیل بهبود استانداردهای زندگی افزایش بی‌سابقه‌ای یافته است. پیامد آن، افزایش تقاضا برای آب و غذا منجر به بروز معضلات بین‌المللی برای جامعه بشری و محیط زیست شده است. امروزه در سطح جهانی، سطح کشت آبی ۲۰ درصد اراضی کشاورزی را تشکیل می‌دهد که با مصرف ۷۲ درصد منابع آب، حدود ۴۰ درصد محصولات کشاورزی در آن تولید می‌شود (Rosegrant و همکاران، ۲۰۰۲). در طی قرن بیستم، سطح زیرکشت آبی حدود پنج برابر شد که بدون افزایش آن، تولیدات کشاورزی برای تأمین غذای جمعیت فعلی کافی نبود (Rosegrant و همکاران، ۲۰۰۲). اگر چه آبیاری برای حصول به امنیت غذایی لازم است، اما در برخی از مناطق باعث فرسودگی اراضی، شوری و زهدار شدن خاک‌ها می‌شود (Lindblom و Nordell، ۲۰۰۶). سطح سفره آب زیرزمینی در اراضی با زهکشی ضعیف بالا می‌آید که باعث شوری در مناطق

¹ Condensation irrigation

درجه حرارت در سطح خاک، با افزایش عمق کاهش یافته، در عمق ۱۰ سانتی‌متری تاثیر رطوبت خاک در تغییرات درجه حرارت ناچیز می‌شود. بدین دلیل، نوسان درجه حرارت در سطح یک خاک شنی بزرگ‌تر از یک خاک رسی مجاور بوده، ولی درجه حرارت هر دو خاک در اعماق پنج تا ۱۰ سانتی‌متری تقریباً یکسان است. بدیهی است، علت جوانه زدن و سبز شدن بهتر بذور را در خاک شنی باید معلول عوامل دیگر به‌ویژه تهویه خاک دانست، زیرا در اوائل بهار اغلب آب بیشتری نسبت به خاک شنی داشته و تهویه آن نیز رضایت‌بخش نیست (Bai Bourdi, ۱۹۹۳).

طرح کلی سامانه‌های تولید آب چگالشی به‌گونه‌ای است که به‌وسیله انتقال هوای مرطوب در خاک زیرسطحی، به لوله‌هایی که در زیر خاک مدفون هستند، بخار هوا چگالش می‌یابد (به‌علت خنک‌تر بودن زمین نسبت به سطح آن، زمین همانند چگالش‌کننده عمل می‌کند) و آب شیرین تولید می‌شود، آب حاصل برای مصارف خوراکی و آبیاری زمین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای آبیاری زمین‌های کشاورزی از لوله‌های سوراخ‌دار استفاده می‌شود تا آب شیرین تولیدی به اطراف زمین تغذیه شود که این عمل مصرف آب را کم و اتلاف حاصل از تبخیر را حذف می‌کند (Nordell و Lindblom, ۲۰۰۶). فناوری مورد استفاده، ترکیبی از فناوری نمک‌زدایی، آبیاری چگالشی و تولید آب آشامیدنی با چگالش بخار به‌طور هم‌زمان است. با تبخیر آب شور در دستگاه چگالش و انتقال هوای گرم و مرطوب به درون سامانه لوله‌های زیرزمینی، هوای گرم و مرطوب با دادن گرمای خود به زمین، باعث چگالش آب در دیواره داخلی لوله می‌شود. با استفاده از لوله‌های هادی در زمین، برای انتقال هوای مرطوب از طریق سوراخ‌هایی در لوله، آب چگالش یافته به درون خاک نفوذ می‌کند. در بررسی دیگری، سامانه چگالشی با هدف تولید آب آشامیدنی با استفاده از لوله‌های معمولی دفن شده، استفاده شد. در این پژوهش، آب چگالش یافته در انتهای لوله جمع‌آوری و برای آشامیدن استفاده شد و متوسط ظرفیت تولید آب، چهار لیتر در هشت ساعت در طول ۲۵ متر طول لوله اندازه‌گیری شد که در روز اول به‌دلیل رطوبتی که صرف خیس کردن جدار داخلی

متوسط شش لیتر در هشت ساعت کار سامانه به‌دست آمد. افزایش رطوبت خاک در سامانه آبیاری زیرسطحی مورد بررسی قرار گرفت که نشان داد، در انتهای لوله از رطوبت جذب خاک شده کاسته شد و بیشترین جذب رطوبت در اوایل لوله رخ داد (Yusefi و همکاران، ۲۰۱۲). ظرفیت هوا در نگهداری بخار آب به‌شدت به دمای آن بستگی دارد. هر چه هوا گرم‌تر باشد، بخار آب بیشتری می‌تواند در هوا ذخیره شود، اما ذخیره بخار آب در هوا نیز محدود بوده و زمانی فرا می‌رسد که اگر بخار آب وارد هوا شود، به‌صورت ذرات ریز آب (بخار آب اشباع) ظاهر می‌شود (Mohammadi, ۲۰۱۲).

مواد آلی به‌دلیل افزایش دادن تخلخل خاک باعث می‌شود، پخشیدگی گرما در خاک کاهش یابد، همان‌طور که فشرده کردن خاک به‌دلیل کاهش تخلخل پخشیدگی گرما را افزایش می‌دهد، زیرا در تخلخل زیاد هوای خاک که عایق حرارت است، افزایش می‌یابد (Alizadeh, ۲۰۰۴). وجود ماده آلی، علاوه بر این که نشان‌دهنده سلامت و کیفیت خاک بوده، شاخص مناسبی برای باروری خاک به‌شمار می‌رود که حاصل برهم‌کنش فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی است. ماده آلی با بهبود شرایط خاکدانه‌سازی، وضعیت تخلخل و نفوذپذیری خاک را بهبود می‌بخشد (Bazargan و Mirzashahi, ۲۰۱۵). کودهای دامی عناصر غذایی را به تدریج آزاد کرده و از هدررفت آن‌ها در اثر شستشو جلوگیری می‌کنند و باعث می‌شوند، جذب آن‌ها به‌وسیله گیاه به بیشترین مقدار صورت گیرد. این کودها علاوه بر این که منبع خوبی از عناصر غذایی هستند، خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک را نیز بهبود می‌بخشد (Zamil و همکاران، ۲۰۰۴).

معمولاً شیب درجه حرارت یا تغییرات درجه حرارت با عمق در حدود ۰/۵ درجه سانتی‌گراد در هر ۱۰ سانتی‌متر از عمق خاک است. تاثیر میزان رطوبت خاک در درجه حرارت آن پیچیده است، زیرا انتقال گرما در یک خاک مرطوب سریع‌تر و بهتر از خاک خشک بوده، از سویی، در یک روز آفتابی سطح یک خاک خشک زودتر گرم می‌شود. در شب نیز زودتر از یک خاک مرطوب سرد می‌شود. این نوسان قابل توجه

با مواد آلی است که در دماهای مختلف، بخار با لوله‌های هادی بخار که بدون پوشش و با پوشش هستند، بررسی و در نهایت تیمار مناسب برای حصول نتایج بهتر معرفی شد. سپس، با کشت گیاه در این روش، نتایج به‌دست آمده با روش‌های کشت گلخانه‌ای و مزرعه‌ای مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش، بر روی خاکی از دامنه‌های جنوبی البرز، در شمال غرب تهران در منطقه وردیج انجام شد. این منطقه عمدتاً کوهستانی و مشتمل بر اراضی مرتعی بوده، دارای پستی و بلندی‌های زیادی است. جدول ۱، خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده در پژوهش را نشان می‌دهد. هدایت الکتریکی آب مورد استفاده در پژوهش ۳/۲ دسی‌زیمنس بر متر بوده است. آب مورد استفاده در تمامی سه فاز مورد آزمایش یکسان بود.

لوله شد، کمتر از این مقدار بود. همچنین، با بررسی دما در طول لوله، نتیجه‌گیری شد که با دور شدن از ابتدای لوله، تولید آب آشامیدنی نیز کمتر خواهد بود (Yusefi و همکاران، ۲۰۱۵).

در پژوهشی که Yusefi و همکاران (۲۰۱۲) انجام دادند، روش آبیاری چگالشی مورد مطالعه قرار گرفت. در آبیاری زیرسطحی مقدار آب آبیاری تولید شده بسته به شرایط محیطی متفاوت بود. در این روش، آب چگالش‌یافته جذب خاک شد و رطوبت اطراف لوله افزایش یافت. این افزایش رطوبت در ابتدا بیشتر و با پیشروی در طول لوله، از مقدار رطوبت، کاسته شد.

در پژوهش‌های دیگری، تاثیر روش آبیاری تبخیری-تقطیری بر افزایش رطوبت خاک سنجد شده است، اما در پژوهش حاضر، علاوه بر بررسی میزان جذب رطوبت، امکان تامین رطوبت لازم برای کشت گیاه ارزیابی شد. هدف از این پژوهش، بررسی کارایی سامانه چگالش بخار در خاک‌های تقویت شده

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی نمونه‌های خاک

نمونه	درصد ذرات خاک			بافت توصیفی
	شن	سیلت	رس	
S ₁	۵۱	۱۵	۳۴	سنگین
S ₂	۶۸	۱۵	۱۷	سبک
S ₃	۶۰	۲۳	۱۷	متوسط

۴/۷۵ میلی‌متری، در هر قسمت از فلوم، خاک با ویژگی‌های جداگانه ریخته شد و تسطیح و فشردن خاک (متناسب با وزن مخصوص ظاهری خاک) تا لبه فلوم به انجام رسید. لوله‌های هادی بخار به دو صورت با پوشش و بدون آن جاگذاری شد. پوشش لوله‌های هادی در این پژوهش از جنس پلی‌استر است. یکی از مزیت‌های عمده پلی‌استرها خاصیت آبگریزی آنهاست که مواد روغنی را به‌خوبی جذب کرده، در خود نگه می‌دارند (Burr و Hindman، ۱۹۶۰). از سوی دیگر، مقدار جذب رطوبت کمی دارند و دمای ذوب آن‌ها ۲۵۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است (Tortora، ۱۹۷۸).

فلومی که به‌منظور آزمایش مورد استفاده قرار گرفت، به سه قسمت مساوی تقسیم شد (جدول ۲ و شکل ۱). در این آزمایش، بخار با دو دمای ۴۵ و ۵۵

پژوهش حاضر، در سه فاز انجام شد که به‌ترتیب شامل فاز اول، آزمون جذب آب در خاک و افزایش رطوبت در فلوم، فاز دوم، آزمون گلدانی و فاز سوم، آزمون کشت بوده است. در این پژوهش، برای تولید هوای مرطوب به حجم زیاد برای پژوهش‌های آزمایشگاهی، یک دستگاه بویلر و بخارساز رطوبت‌زنی هوا طراحی و مورد استفاده قرار گرفت. در این دستگاه دمای آب با یک سامانه گرمکن زیاد شده و هوای مرطوب به داخل یک سامانه تبخیری-تقطیری هدایت شده و تبدیل به آب شیرین می‌شود.

فاز اول، آزمون جذب آب در خاک در فلوم: ابعاد فلوم ۶۸×۲۳×۳۶ سانتی‌متر مکعب بود و در هر قسمت یک لوله هادی بخار با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از سطح خاک قرار داده شد. به‌منظور تعیین تاثیر چگالش در افزایش رطوبت خاک پس از عبور خاک منطقه از الک

پژوهش مورد استفاده قرار گرفت (Sharifi و همکاران، ۲۰۱۸).

درجه سانتی‌گراد دمیده شد. لوله‌های هادی بخار از جنس PVC انتخاب شد. مواد آلی مورد استفاده نوعی کود بیولوژیک تولید شده بود که در تمامی فازهای این

جدول ۲- نحوه نام‌گذاری سه قسمت فلوم

نام‌گذاری	بخش اول (a)	بخش دوم (b)	بخش سوم (c)
ترکیب خاک و لوله هادی با پوشش یا بدون پوشش	خاک و مواد آلی، گراول در اطراف لوله هادی بخار بدون پوشش	خاک و مواد آلی، لوله هادی با پوشش	خاک و مواد آلی، لوله هادی بدون پوشش

از سطح قرار گرفت و دمای خاک هم‌زمان با اندازه‌گیری رطوبت ثبت شد. اندازه‌گیری و ثبت دما و رطوبت در بازه‌های زمانی دو ساعته در فروردین ماه و اردیبهشت ماه ۱۳۹۵ انجام شد. پس از دمیدن بخار به درون لوله‌های بخار، رطوبت هوا در دیواره لوله چگالش می‌یابد، آب از طریق سوراخ‌های لوله وارد خاک می‌شود و باعث افزایش رطوبت می‌شود و همچنین، هوا از همین طریق وارد خاک شده و به تهویه خاک و هوادهی ریشه کمک می‌کند.

دمای بخار ورودی بر روی دستگاه بخارساز تنظیم و به‌وسیله دمنده، هوای مرطوب به درون لوله‌های هادی بخار دمیده می‌شد. در این پژوهش، مقدار رطوبت با استفاده از دستگاه TDR در سه مقطع جاگذاری پروب‌ها اندازه‌گیری شد. حس‌گرهای رطوبتی در فواصل مشخص به‌صورت عمودی برای اندازه‌گیری پروفیل رطوبتی جاگذاری شد. علاوه بر رطوبت، تغییرات دما نیز اندازه‌گیری و ثبت شد. حس‌گرهای اندازه‌گیری دما در فاصله ۲۵ سانتی‌متری



شکل ۱- تصویر فلوم سه قسمتی در آزمایش

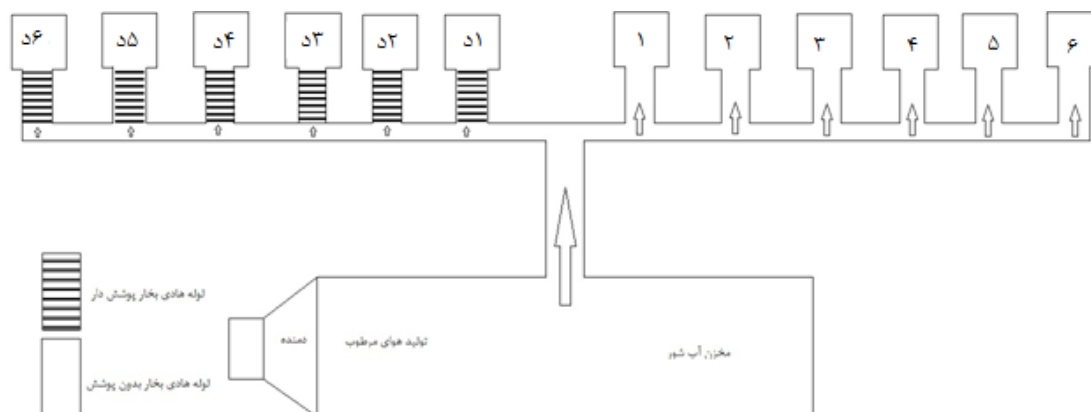
رطوبت و دما در سه عمق ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری و ثبت شد.

از آنجایی‌که هوای مرطوب در طول دمیدن به درون لوله‌ها خنک می‌شود، بخار بر دیواره خنک‌تر لوله‌ها تقطیر می‌شود. گرمای نهان و محسوس از هوای مرطوب از لوله‌ها چگالش یافته، در خاک اطراف تجمع می‌یابد. میزان تقطیر در طول لوله به خواص جریان هوای ورودی و خاک بستگی دارد. زمانی که جریان هوای گرم و مرطوب به لوله‌های آبیاری زیرزمینی سردتر وارد می‌شود، بخار به‌صورت قطره و به شکل مایع در می‌آید. آب و مقداری هوای مرطوب به خاک

فاز دوم، آزمون در گلدان‌ها: ادامه آزمون روش آبیاری تبخیری-تقطیری در ۱۲ گلدان و در سه تکرار انجام شد. سه نوع خاک، دو نوع لوله هادی بخار (با پوشش پلی‌استر و بدون پوشش)، دو درجه دمای بخار (در چندین آزمایش در فلوم آزمایشگاهی مناسب‌ترین دما ۴۵ و ۵۵ درجه انتخاب شد) و خاک‌ها در دو حالت مخلوط با مواد آلی و بدون آن (در دو سطح ۲۵ و ۳۵ درصد) مورد آزمون قرار گرفت (شکل ۲). با استفاده از دستگاه بخارساز، بخار آب اشباع با دمای ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد به درون لوله‌های هادی بخار دمیده شد. در طول مدت انجام آزمایش، مقدار

روابط (۱) الی (۸) ریاضی، علت و معلولی، حدود رطوبت، دما و نقطه شبنم بررسی شد.

اطراف از طریق منافذ لوله‌ها نفوذ می‌کند، بنابراین، شار جرم درون لوله‌ها را کاهش می‌دهد. با استفاده از



شکل ۲- شماتیک جانمایی گلدان‌ها در این پژوهش و دستگاه بخارساز

$$Nu_D = \frac{\frac{f}{8}(Re_D - 1000).pr}{(1 + 12.7(\frac{f}{8})^{0.5})(pr^{2/3} - 1)} \quad (4)$$

که در آن، Re_D عدد رینولدز و f عامل اصطکاک است.

$$f = (0.79 \ln(Re_D) - 1.64)^{-2} \quad (5)$$

اگر جریان هوا آرام باشد، سپس، $Nu_D Nu_D = 3.66$ استفاده می‌شود. در حرکت از محل $i-1/2$ به $i+1/2$ با کاهش شار جرم با مقدار بخار میعان یافته در حجم کنترل و با جرم بخار هوا که از منافذ خارج می‌شوند.

$$\dot{m}_{1,i+1/2} = \dot{m}_{1,i-1/2} - A_p h_{m,i} (\rho_{1,i} - \rho_{p,i}) - \dot{m}_{s,i} \quad (6)$$

که در آن، A_p (م^۲) مقطع سطحی لوله است. ثابت جرم همرفتی h_m (m s⁻¹) از آنالوگ رینولدز به دست می‌آید.

$$h_m = \frac{h_D Dav}{\rho_l^{1/3} c_p^{1/3} k_l^{-2/3}} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{s,i} = -A_h k_i \rho_l i g \rho_{w0} \sum_{j=1}^n \frac{k_{rg,j}}{\mu_{g,j}} (\nabla H_{g,jk} + \nabla y) \quad (8)$$

که در آن‌ها، $\dot{m}_{s,i}$ به‌عنوان نسبتی از اختلاف فشار استاتیک هوای مرطوب درون لوله است، $H_{l,i}$ فشار گاز در خاک بیرون لوله (متر)، $H_{g,i}$ در مقطع (متر)، A_h کل سطح منافذ لوله‌ها در مقطع (متر مربع)، $\nabla H_{g,jk}$ گرادیان فشار بین فشار استاتیک جریان هوا در مقطع i و k و k و i گردهای همجوار در همان مقطع i در دیواره مجاور لوله است (Lindblom, ۲۰۱۲). خاک مورد استفاده و شرایط حاکم بر آزمایش‌های صورت

با استفاده از یک حجم کنترل اطراف لوله، بین دو محل $i-1/2$ و $i+1/2$ در هر طرف مقطع i خاک، افت جریان هوای گرم در لوله افقی، $q_{p,i}$ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$q_{p,i} = \dot{m}_{1,i-1/2} (h_1 + \frac{c^2}{2})_{i-1/2} - \dot{m}_{1,i+1/2} (h_1 + \frac{c^2}{2})_{i+1/2} \quad (1)$$

که در آن، \dot{m}_1 (kg s⁻¹)، h_1 (J kg⁻¹) و c (m s⁻¹) شار جرم، آنتالپی و سرعت جریان هوای گرم هستند. گرما از دیواره لوله به خاک در مقطع دوبعدی i انتقال می‌یابد، همچنین، $q_{p,i}$ برابر با تغییر انرژی جریان هواست، به‌عنوان نمونه مجموع انتقال گرمای همرفتی به دلیل اختلاف و میزان درجه حرارت در جایی که که گرما با انتقال جرم از درون منافذ لوله به مقطع i از خاک کاهش می‌یابد.

$$q_{p,i} = A_p (h_D (T_1 - T_p) + L h_m (\rho_1 + \rho_p))_i + \dot{m}_{s,i} h_1 \quad (2)$$

که در آن، A_p (م^۲)، T_p (°C) و ρ_p (kg m⁻³) در سطح لوله، دمای دیواره و چگالی بخار، T_l (°C) و ρ_l (kg m⁻³) متوسط دمای هوا و چگالی در سطح مقطع است، $\dot{m}_{s,i}$ (kg s⁻¹) شار جرم درون منافذ است. ثابت همرفتی h_D (W m⁻² °C⁻¹) به‌صورت معادله (۳) توصیف می‌شود.

$$h_D = (Nu_D \cdot k_1) / D_p \quad (3)$$

که در آن، k_1 (W m⁻¹ °C⁻¹) و D_p (m) هدایت گرمایی هوا و قطر لوله هستند.

گرفته در آزمایشگاه در جدول ۳ نشان داده شده است. آزمایش مربوط به هر تیمار در سه نوبت تکرار شد. میزان دما و رطوبت حجمی خاک در هر یک از مقاطع زمانی ثبت شد.

جدول ۳- خاک‌ها و شرایط استفاده در پژوهش

شماره تیمار	تیمار استفاده شده	شماره تیمار	تیمار استفاده شده
۱ د *	خاک سنگین، لوله هادی پوشش‌دار	۱	خاک سنگین، لوله هادی بدون پوشش
۲ د	خاک سبک، لوله هادی پوشش‌دار	۲	خاک سبک، لوله هادی بدون پوشش
۳ د	خاک متوسط، لوله هادی پوشش‌دار	۳	خاک متوسط، لوله هادی بدون پوشش
۴ د	خاک سبک، لوله هادی پوشش‌دار، مواد آلی	۴	خاک سبک، لوله هادی بدون پوشش، مواد آلی
۵ د	خاک سنگین، لوله هادی پوشش‌دار، مواد آلی	۵	خاک سنگین، لوله هادی بدون پوشش، مواد آلی
۶ د	خاک متوسط، لوله هادی پوشش‌دار، مواد آلی	۶	خاک متوسط، لوله هادی بدون پوشش، مواد آلی

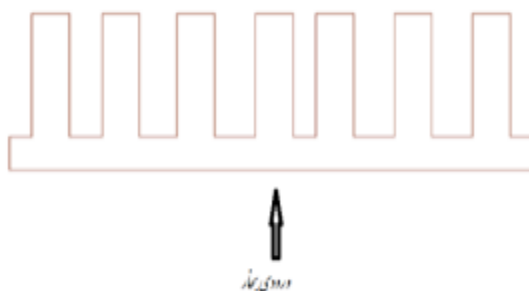
*علامت اختصاری د به معنای لوله هادی دارای پوشش است

برای آزمون روش آبیاری تبخیری-تقطیری از کلکتور طراحی شده از جنس لوله‌های پی‌وی‌سی به‌منظور جاگذاری و هدایت بخار به گلدان‌های کاهو استفاده شد (شکل‌های ۴ و ۵). پس از تعدادی آزمایش با گلدان‌های کاغذی برای افزایش جذب رطوبت، گلدان‌هایی فلزی برای استفاده و کشت کاهو طراحی و ساخته شد. این گلدان‌ها با پوشش مشبکی که داشتند، منجر به افزایش سطح تماس خاک و بخار شد.

فاز سوم، کشت گیاه: پس از انجام آزمون‌های مختلف در فلوم و گلدان و انتخاب بهترین ترکیب خاک، ادامه بررسی روش آبیاری تبخیری-تقطیری و تاثیر آن در کاهش مصرف آب با کشت گیاه و اندازه‌گیری آب مورد استفاده در طول دوره رشد گیاه (کاهو) انجام شد. این پژوهش، برای بررسی تاثیر سه روش آبیاری تبخیری-تقطیری، گلخانه‌ای و سنتی بر کشت کاهو انجام شد و در طول آزمایش آب مورد استفاده آن اندازه‌گیری و ارزیابی شد (شکل ۳).



شکل ۳- نشاهای کاهو برای کشت گلخانه‌ای و سنتی



شکل ۴- جانمایی گلدان‌های فلزی در کلکتور هادی بخار



شکل ۵- گلدان‌های فلزی در کلکتور هادی بخار

گلدان‌ها در طی دوره رشد هر روزه صورت گرفت. نتایج بررسی رشد و نفوذ آب در خاک و ابعاد گلدان مورد استفاده نشان داد که مقدار ۱۰۰ سی‌سی آب به‌صورت روزانه برای هر گلدان کفایت می‌کند (شکل ۶).

علاوه بر کشت و آبیاری به روش آبیاری تبخیری-تقطیری و گلخانه‌ای، کشت کاهو در مزرعه‌ای به وسعت یک هکتار و آبیاری به روش سنتی انجام شد. آب ورودی به مزرعه هشت لیتر بر ثانیه بود. آبیاری به طور متوسط هر پنج روز یک بار انجام شد و در روزهای نزدیک به برداشت محصول آبیاری هر چهار روز یک بار انجام شد (شکل ۷).

خاک مورد استفاده در تمامی گلدان‌ها دارای شن، ماسه و سیلت به نسبت مساوی در ترکیب با ۳۵ درصد ماده آلی بود. دمای انتخابی برای بخار در شرایط کشت گیاه به روش آبیاری تبخیری-تقطیری و با در نظرگرفتن شرایط مطلوب رشد ۳۰ درجه سانتی‌گراد بود. دستگاه دمنده بخار به‌صورت پیوسته روشن بود و میزان بخار ورودی به گلدان‌ها روزانه مشخص می‌شد. وزن گلدان، ارتفاع ساقه و سطح سایه‌انداز گیاه، روزانه اندازه‌گیری و نتایج آن ثبت شد. در روش کشت گلخانه‌ای و آبیاری کنترل شده تعداد ۱۶ گلدان به‌عنوان شاهد در گلخانه مورد استفاده قرار گرفت که نشاهای کاهو در آن‌ها کشت شد. آبیاری این



شکل ۶- گلدان‌های مورد استفاده در کشت گلخانه‌ای



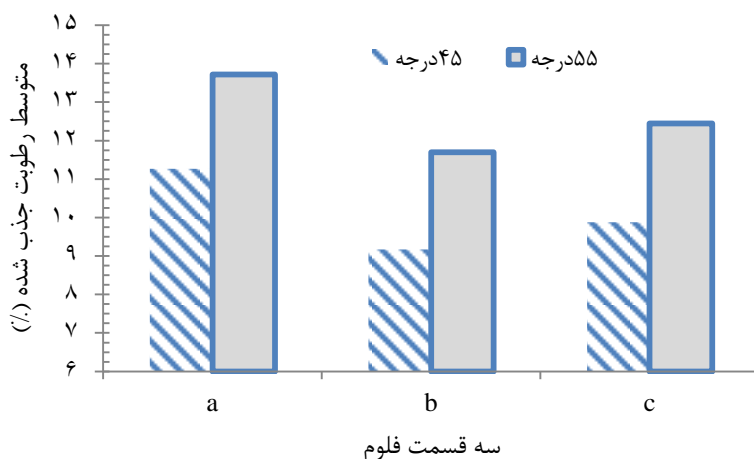
شکل ۷- کشت در مزرعه و آبیاری به روش سنتی

میزان رطوبت جذب‌شده به‌وسیله خاک پرداخته شد. این سری از آزمایش‌ها برای تیمارها در سه نوبت تکرار

نتایج و بحث
آزمون فلوم: در هر سری از آزمایش‌ها به بررسی

در فلوم نشان می‌دهد که استفاده از مواد آلی و لوله هادی پوشش‌دار تأثیر مثبتی در افزایش درصد رطوبت جذب‌شده خواهد داشت. تأثیر مثبت مواد آلی با لوله‌های بدون پوشش بیشتر است (شکل ۸).

شد و متوسط مقادیر حاصل شده به‌عنوان نتیجه نهایی مورد استناد قرار گرفت. مقدار رطوبت جذب‌شده در هر قسمت بدون توجه به محل حس‌گر رطوبتی در دمای ۵۵ بیشتر از ۴۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. بررسی نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام‌شده



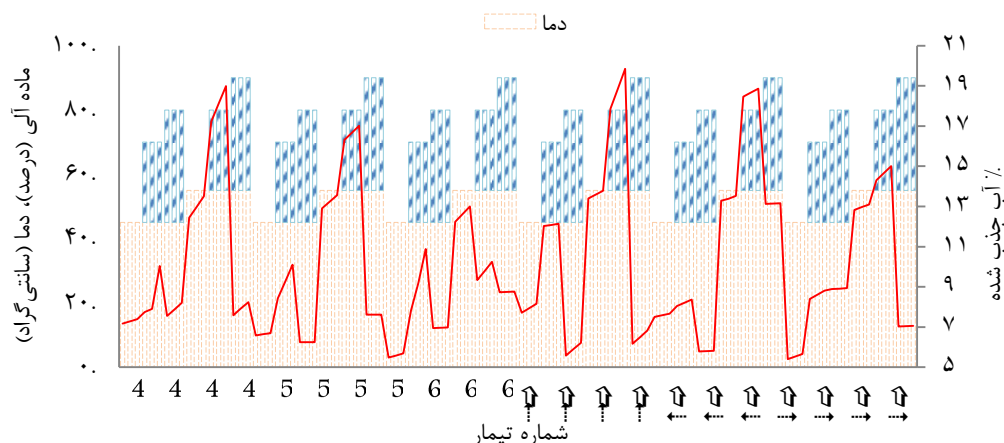
شکل ۸ - متوسط رطوبت جذب‌شده (اندازه‌گیری با حس‌گرهای رطوبتی در سه قسمت فلوم)

اثر متقابل تیمار کود، بافت خاک و دما بر درصد رطوبت خاک در سطح یک درصد معنی‌دار شد (شکل ۱۰). همچنین، نتایج جدول ۷ برای عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک نشان داد که اثر دما، بافت خاک، مواد آلی و اثر متقابل این تیمارها در سطح یک درصد معنی‌دار شد (شکل ۱۱). جدول ۵، مقادیر بیشینه و کمینه میزان جذب رطوبت را در عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک نشان می‌دهد (شکل ۹).

پس از بررسی نتایج به‌دست آمده از روش آبیاری تبخیری-تقطیری در گلدان‌های بزرگ و مشخص‌شدن بافت خاک متوسط با ۳۵ درصد ماده آلی به‌عنوان محیط کشت مناسب، دمای بخار ۴۵ درجه سانتی‌گراد و لوله هادی بخار پوشش‌دار، کشت نشای کاهو به روش گلخانه‌ای انجام شد. ابتدا کشت نشا در گلدان‌های بزرگ انجام شد، اما به‌دلیل فاصله زیاد لوله‌های هادی بخار از سطح خاک و عدم تامین رطوبت مورد نیاز گیاه، نشاها خشک شدند. برای حل این مشکل، کلکتوری با استفاده از لوله‌های پی‌وی‌سی طراحی و ساخته شد تا بخار دمیده‌شده در مدت زمان کمتری در دسترس گیاه قرار گیرد.

بنابراین، دماهای بخار انتخابی بر اساس آزمون‌های انجام‌شده ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد است که منجر به افزایش رطوبت در خاک شده است. با توجه به جداول حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها و با توجه به آماره F و سطح معنی‌داری، می‌توان مطرح کرد که در سطح پنج درصد، تمام تیمارها از نظر میزان جذب رطوبت متفاوت هستند و اختلاف معنی‌داری در میزان رطوبت جذب شده هر یک از آن‌ها وجود دارد.

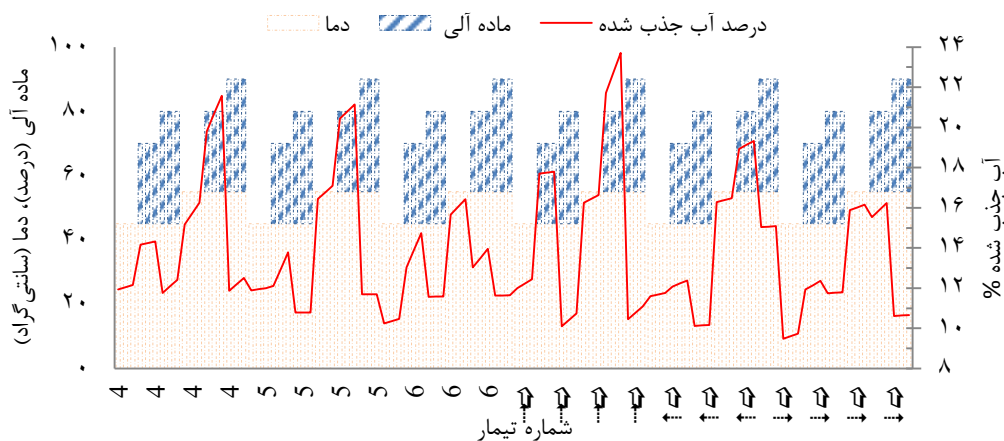
بررسی گلدانی: در آزمونی که در گلدان‌ها انجام شد، مقادیر رطوبت و دمای خاک در سه عمق ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری در طول مدت آزمایش اندازه‌گیری شد تا تیمار مناسب با بیشترین میزان رطوبت و کمترین دما به‌عنوان محیط کشت مناسب معرفی شود. نتایج جدول تجزیه واریانس جدول ۷ حاصل از داده‌ها نشان داد که اثر ساده تیمارها و برهم‌کنش متقابل آن‌ها در سطح یک درصد بر صفت رطوبت خاک در عمق ۱۰ سانتی‌متری معنی‌دار شد. جداول ۴ تا ۶ مقادیر بیشینه و کمینه میزان جذب رطوبت را به‌ترتیب در عمق‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری خاک نشان می‌دهد. در عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک، طبق جدول تجزیه واریانس جدول ۷ حاصل از داده‌ها نشان داد که



شکل ۹- اثر تیمارهای مختلف بر درصد آب جذب شده در خاک در عمق ۱۰ سانتی متری خاک

جدول ۴- بیشترین و کمترین درصد آب جذب شده در عمق ۱۰ سانتی متری در بازه زمانی یک ساله

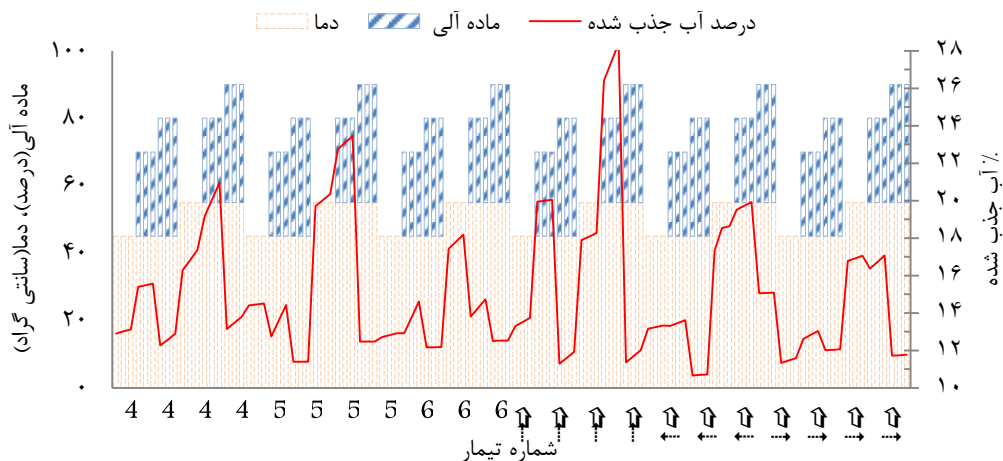
دما (سانتی گراد)	شماره تیمار	ماده آلی (درصد)	مقدار آب جذب شده در خاک (درصد)	
۵۵	۴	۰	۵/۱	کمترین
۴۵	۶	۰	۵/۵	
۴۵	۶	۰	۵/۶	
۵۵	۵	۲۵	۱۶/۷	بیشترین
۴۵	۵	۳۵	۰/۲	
۴۵	۵	۳۵	۱۷/۶	



شکل ۱۰- اثر متقابل تیمارهای آزمایشی بر درصد آب جذب شده در خاک در عمق ۲۰ سانتی متری خاک

جدول ۵- بیشترین و کمترین درصد آب جذب شده در عمق ۲۰ سانتی متری در بازه زمانی یک ساله

دما (سانتی گراد)	شماره گلدان	مواد آلی (درصد)	مقدار آب جذب شده در خاک (درصد)	
۴۵	۶	۰	۹/۶	کمترین
۴۵	۵	۳۵	۱۰/۱	
۴۵	۶	۰	۱۰/۴	
۵۵	۴	۲۵	۲۰/۷	بیشترین
۵۵	۵	۲۵	۲۰/۸	
۵۵	۴	۲۵	۲۲/۷	



شکل ۱۱- اثر متقابل تیمارهای آزمایشی بر درصد آب جذب شده در خاک در عمق ۳۰ سانتی متری خاک

جدول ۶- بیشترین و کمترین درصد آب جذب شده در عمق ۳۰ سانتی متری در بازه زمانی یک ساله

دمای (سانتی گراد)	شماره گلدان	مواد آلی (درصد)	مقدار آب جذب شده در خاک (درصد)	
۵۵	۴	۰	۹	
۴۵	۴	۰	۱۰	کمترین
۵۵	۵	۰	۱۰	
۴۵	۴	۳۵	۲۰	
۴۵	۴	۲۵	۲۰	بیشترین
۴۵	۴	۳۵	۲۰	

جدول ۷- تجزیه واریانس تیمارهای آزمایشی بر رطوبت خاک

مجموع مربعات			درجه آزادی	منابع تغییرات
رطوبت در عمق ۳۰ سانتی متری	رطوبت در عمق ۲۰ سانتی متری	رطوبت در عمق ۱۰ سانتی متری		
۳۸۴/۸ **	۳۴۳/۸ **	۶۴۸ **	۱	دمای
۰/۱۵	۰/۱۳	۴۵/۵۲	۷۲	اشتباه اصلی
۲۸/۸۵ **	۱۵/۹ **	۱۲/۷۷ **	۵	بافت خاک
۲۵۲/۳ **	۲۰۴/۳ **	۲۲۶/۸ **	۲	مواد آلی
۸/۱ **	۷/۵ **	۱۲/۱۷ **	۵	اثر دمای و بافت خاک
۴۹/۵۶ **	۴۹/۳ **	۷۶/۵۰ **	۲	اثر دمای × مواد آلی
۱۵/۵۲ **	۹/۷ **	۱۰/۶۸ **	۲۰	اثر بافت × دمای × مواد آلی
۲/۵	۲/۶	۴/۷		ضریب تغییرات (درصد)

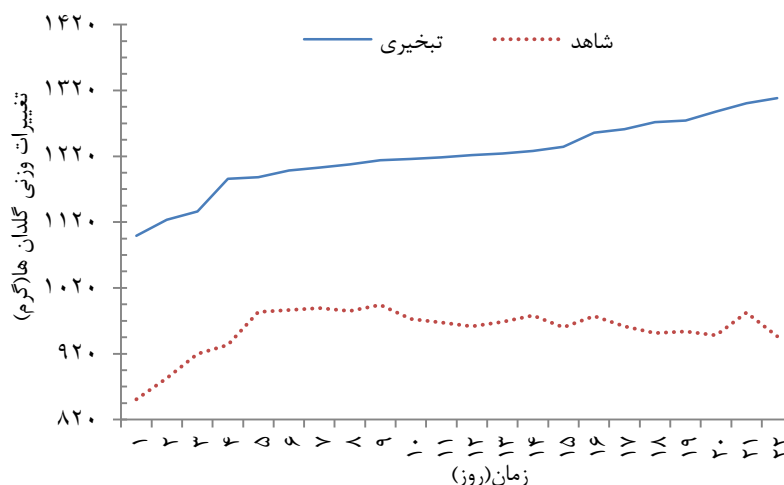
NS، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار، معنی داری در سطح پنج درصد و معنی داری در سطح یک درصد است.

اما نکته دیگر، رسیدن به دمای مطلوب برای کشت گیاه و عدم آسیب به ریشه گیاه بود که با انجام تعدادی آزمایش، دمای مناسب ۳۰ درجه سانتی گراد انتخاب شد. بررسی روند رشد گیاه در روش آبیاری تبخیری -

در ابتدا، از گلدان‌های کاغذی برای جاگذاری در کلکتور و کشت استفاده شد، اما جذب رطوبت کافی نبود، بنابراین، برای تامین رطوبت کافی، گلدان‌هایی فلزی و مشبک طراحی شد که سطح تماس رطوبت را با خاک افزایش داد و مشکل تامین رطوبت حل شد.

شده است. طبق شکل ۱۴، مقدار رطوبت در دو روش آبیاری تبخیری-تقطیری و گلخانه‌ای از روند صعودی تبعیت می‌کند. تغییرات نشان از تامین رطوبت موردنیاز گیاه در طول دوره رشد آن است. بنابراین رشد گیاه امکان‌پذیر خواهد بود.

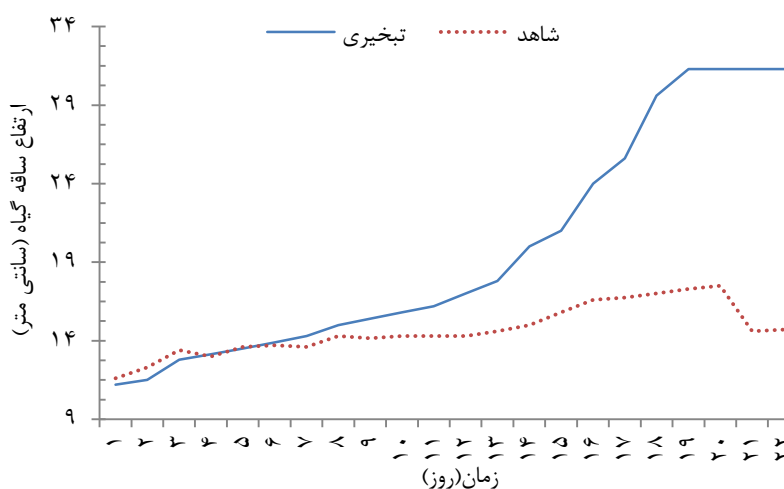
تقطیری و گلخانه‌ای: اندازه‌گیری وزن گلدان‌ها و میزان افزایش وزن آن‌ها، ارتفاع ساقه گیاه و سطح سایه‌انداز آن‌ها در دو روش آبیاری تبخیری-تقطیری و گلخانه‌ای در طول دوره رشد گیاه اندازه‌گیری و ثبت شد که نتایج آن در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده



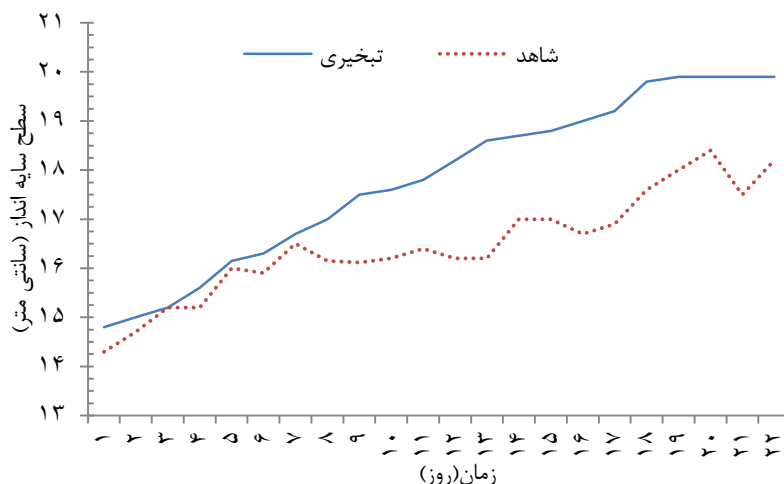
شکل ۱۲- تغییرات وزنی رطوبت خاک در روش‌های تبخیری-تقطیری و گلخانه‌ای (شاهد)

سایه‌انداز گیاه در دو روش آبیاری تبخیری-تقطیری و گلخانه‌ای انجام شد که نمودار تغییرات آن مطابق شکل ۱۴ است. تغییرات نشان‌دهنده رشد روزانه گیاه است. در پایان اندازه‌گیری‌ها ارتفاع نهایی ساقه در هر دو روش حدوداً ۳۰ سانتی‌متر ثبت شد.

تغییرات روزانه رشد گیاه و اندازه‌گیری ارتفاع ساقه گیاه در دو روش آبیاری تبخیری-تقطیری و گلخانه‌ای صورت پذیرفت که نمودار تغییرات آن مطابق شکل ۱۳ است. در پایان اندازه‌گیری‌ها، ارتفاع نهایی ساقه در هر دو روش حدوداً ۳۰ سانتی‌متر ثبت شد. اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات روزانه رشد و سطح



شکل ۱۳- تغییرات ارتفاع ساقه گیاه در دو روش آبیاری تبخیری-تقطیری و گلخانه‌ای (شاهد)



شکل ۱۴- تغییرات سطح سایه‌انداز گیاه در دو روش آبیاری تبخیری-تقطیری و گلخانه‌ای (شاهد)

آب‌های شور و نامتعارف استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش، نشان داد که روش آبیاری تبخیری-تقطیری به‌عنوان یکی از راه‌های کاهش هدررفت آب و تولید آب آشامیدنی از منابع آب غیرمتعارف دارای ظرفیت قابل توجهی است. نتایج این پژوهش، بیانگر این امر است که کارایی این سامانه به دما، محیط و فناوری مورد استفاده بستگی دارد. تغییرات رطوبتی، دما، نوع بستر جاذب و طول مسیر، کارایی سامانه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که رطوبت ذخیره‌شده با استفاده از خاک در ترکیب با مواد آلی در فلوم ۱۱ درصد بیشتر از خاک معمولی بوده است. در فاز بعدی، روش آبیاری تبخیری-تقطیری در گلدان‌های بزرگ مورد پژوهش قرار گرفت. در مرحله بعد، کشت نشای کاهو در بافت خاک مناسب (بافت متوسط با ۳۵ درصد ماده آلی به‌عنوان بستر مناسب جذب)، انجام و با دمای بخار ۴۵ درجه سانتی‌گراد (دمای ۴۵ درجه با انجام آزمایش‌های متعدد از بازه ۲۰ الی ۸۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد) و لوله هادی بخار پوشش‌دار، تامین رطوبت مورد نیاز آن انجام شد.

در این پژوهش، به‌طور متوسط، ۴۰ درصد آب شور مورد استفاده به‌صورت چگالش در خاک ذخیره شده، معادل ۴۴ درصد میعان و به آب خالص تبدیل شد، لذا، هدررفت آب شور مورد استفاده حدود ۱۶

وزن متوسط کاهو در پایان دوره رشد ۶۰ روزه دو کیلوگرم، ارتفاع و سطح سایه‌انداز گیاه نیز به‌ترتیب ۳۵ و ۳۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. با اندازه‌گیری وزن ماده خشک، آب موجود در کاهو کشت‌شده در مزرعه ۹۰ درصد بود. اندازه‌گیری‌های روزانه در روش آبیاری تبخیری-تقطیری، گلخانه‌ای و سنتی نشان از دوره رشد کوتاه‌تر در روش آبیاری تبخیری-تقطیری داشت. دوره رشد کاهو ۶۰ روزه است، اما در روش تبخیری در طول مدت ۲۲ روز رشد گیاه کامل شد و به ارتفاع و سطح سایه‌انداز نرمال ۳۰ سانتی‌متر رسید. در این مدت، به وزن معمول حدوداً دو کیلوگرم رسید و اندازه‌گیری وزن ماده خشک نیز نشان داد که حدوداً ۸۵ درصد آن را آب تشکیل می‌دهد. این نتایج برای کاهوی کشت شده در دو روش گلخانه‌ای و سنتی پس از دو ماه حاصل شد. نتایج این پژوهش نشان داد که پس از برداشت محصول و رشد یک کیلو کاهو در هر سه شرایط آب مصرفی در طول دوره رشد در روش تبخیری-تقطیری، گلخانه‌ای و سنتی به‌ترتیب ۳، ۰/۸ و ۱۳/۲ لیتر است. پس از مشاهدات، محاسبات و بررسی‌های لازم با توجه به نمودارهای ارائه شده راندمان سامانه آبیاری تبخیری-تقطیری بسیار بالاتر از روش‌های کشت گلخانه‌ای و کشت به روش سنتی و در مزرعه است. بررسی رطوبتی خاک نشان داد که افزایش رطوبت در خاک قابل توجه بوده و از این سامانه می‌توان در کشت گیاهان بهره گرفت. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته امکان اجرای این سامانه در شرایط کنترل شده وجود خواهد داشت و می‌توان از

اقدامات و پیامدهای مدیریت منابع آب در سطح ملی در مقاطع زمانی مختلف باشد. در صورت تامین انرژی مصرفی تبخیر آب با انرژی‌های نو و تجدیدپذیر تعادل بین هزینه و ارزش افزوده حاصله در روش آبیاری تبخیری-تقطیری دور از دسترس نیست. تحقیقات بیشتری برای تبیین ابعاد مختلف این روش ضروری به نظر می‌رسد.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از نتایج طرح پژوهشی در حال اجرای پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی بوده که مورد حمایت معاونت علمی و توسعه فناوری ریاست جمهوری قرار گرفته است. بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی معاونت علمی، همکاری دانشکده مهندسی آب دانشگاه منابع طبیعی و کشاورزی ساری و پشتیبانی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری سپاسگزاری می‌شود.

درصد بوده است. همچنین، امکان افزایش کارایی و بازده با پژوهش‌های بیشتر و استفاده از فناوری پیشرفته دور از دسترس نیست. نتایج نشان داد که آب مصرفی در دوره رشد کاهو در این روش معادل $4/7$ درصد میزان آب مصرفی در کشت به روش سنتی و ۲۵ درصد آب مصرفی به روش گلخانه‌ای است. کارایی مصرف آب در تولید کاهو با روش‌های آبیاری تبخیری-تقطیری، گلخانه‌ای و سنتی به ترتیب ۱۱۲۵، ۳۳۳ و $75/5$ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است.

ارزش مصرفی آب در بخش‌های، شرب، صنعت و کشاورزی متفاوت است و اظهار نظر در خصوص اقتصادی بودن این روش نیاز به پژوهشی مستقل دارد. هزینه هر متر مکعب آب استحصالی با این روش در مقیاس تجاری با توجه به عدم نیاز به انرژی در مرحله استفاده و عمر مفید بالا بین $0/2$ تا $0/5$ دلار تخمین زده می‌شود. برای نایل شدن به توسعه پایدار منابع آب، تعادل بین هزینه و ارزش منابع آب می‌تواند شاخص کمی مناسبی به لحاظ سنجش و ارزیابی

منابع مورد استفاده

1. Alizadeh, A. 2004. Soil physics book. Imam Reza University of Mashhad, 134 pages (in Persian).
2. Burr, G.S. and H. Hindman. 1960. Textile Industry. United Nations, 3(10): 771-789.
3. Bai Bourdi, M. 1993. Soil physics. First Edition, Tehran University Press, Publication and Printing Institute, 193 pages.
4. Khoshkam, S. and M. Saei. 2011. Agronomic and economic study the most suitable time for sequential cultivation of lettuce in greenhouse and open space conditions in Jiroft region. Journal of Greenhouse Cultivars, 2(7): 40-29 (in Persian).
5. Houshmandzadeh, A., S. Boroumandnasab, A. Houshmand and N. Alamzadeh Ansari. 2013. Optimization of water use efficiency in lettuce greenhouse cultivation. Droplet Irrigation System Conditions Using TDR, Non-Operating Defense Conference in Agriculture, Qeshm, Iran (in Persian).
6. Lindblom, J. and B. Nordell. 2006. Water production by underground condensation of humid air. Desalination, 189(2006): 248-260.
7. Lindblom, J. 2006. Condensation irrigation: simulations of heat and mass transfer. Licentiate, MSc Thesis, Lulea University of Technology, 234 pages.
8. Mirzashahi, K. and S. Bazargan. 2015. Organic soil management. Technical Review. Soil and Water Research Institute, No. 535th (in Persian).
9. Mohammadi, A.S. 2012. Water production using distillation of air in buried pipes in the basement. MSc Thesis, Khaje Nasir-e-Din Tusi University of Technology, 132 pages (in Persian).
10. Sharifi, F., S. Arvandi and A. Shahnazari. 2018. Evaluation of the efficiency of steam condensation system in soils with organic materials. Journal of Range and Watershed Management, 21(3): 667-680 (in Persian).
11. Yusefi, B., M. Behzad, S. Boroumandnasab and M. Rahmanshahi Zahabi. 2011. Evaporation-distillation irrigation a new method for the use of salt and unconventional waters. 4th Iranian Water Resources Management Conference, Amirkabir Industrial University, Tehran, Iran (in Persian).
12. Yousefi, B., M. Behzad, S. Boroumand Nasab and M. Thameur Chaibi. 2012. Application of evaporation-distillation irrigation in desalting saline waters and their reuse in irrigation and drinking water. MSc Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz, 145 pages (in Persian).
13. Yousefi, B. and S. Boroumand Nasab. 2015. Desalination using Condensation irrigation system.

- Water and Wastewater, (3): 127-133 (in Persian).
14. Rosegrant, M.W., X. Cai and S.A. Cline. 2002. World water and food to 2025: dealing with scarcity. International Food Policy Research Institute, 338 pages.
 15. Tortora, G.P. 1978. Understanding textiles. Prentice Hall, 600 pages.
 16. Zamil, S.S., Q.F. Qadir, M.A.H. Chowdhury and A. Al Vahid. 2004. Effects of different animal manure on yield quality and nutrient uptake by Mustard. BRAC University Journal, 1(2): 59-66.