

مقاله پژوهشی

آبیاری چگالشی در نمک‌زدایی خورشیدی از آب‌های شور و استفاده مجدد از آن‌ها در آبیاری زیرسطحی

باقر یوسفی^{۱*}، سعید برومندنسب^۲، هادی معاضد^۲

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۱

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۷/۰۷

۱-دکتری مهندسی آب، آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲-استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Bagher.yousefi@gmail.com

چکیده

با توجه به افزایش جمعیت و کمبود منابع آب شیرین، این ضرورت ایجاد شده است که می‌توان با نمک‌زدایی و شیرین کردن آب دریا، کمبودها را جبران کرد. اما نمک‌زدایی آب‌های شور و یا آب دریا نیاز به انرژی دارد که تأمین آن، خود یک چالش جدید خواهد بود. پس فرآیندهای نمک‌زدایی می‌بایست با استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر صورت گیرد. آبیاری چگالشی ترکیبی از نمک‌زدایی و آبیاری می‌باشد که انرژی مورد نیاز آن می‌تواند از تابش خورشیدی تامین شود. این آزمایش به منظور امکان‌سنجی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گرفت که با عبور جریان هوا از روی سطح آب در تقطیرکننده، جریان هوا از بخار آب اشباع گردید و به درون لوله‌زهکش با طول ۲۵ متردمیده شد. قطرات آب با سرد شدن هوای گرم و مرطوب، در دیواره داخلی لوله زهکش تشکیل یافته و خاک اطراف را آبیاری کردند. در حین آزمایش میدانی به دلیل تاثیر محیط اطراف بر دمای ورودی تغییراتی در تولید روزانه آب چگالشی مشاهده گردید اما متوسط روزانه تولید آب شیرین ۶ لیتر در روز بود. پس در جهت مشاهده و درک بهتر تاثیر دمای ورودی بر عملکرد آبیاری چگالشی، یک مدل آزمایشگاهی در دو دمای ورودی مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل نشان داد که تغییر اندک دمای ورودی تاثیر بزرگی را بر عملکرد آبیاری چگالشی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، آزمایش میدانی، تولید آب، مدل آزمایشگاهی، نمک‌زدایی.

Condensation Irrigation in Solar Desalination of Saline Waters and Reuse in Subsurface Irrigation

Bagher Yousefi^{1*}, Saeed Boroomand Nasab², Hadi Moazed²

Received: 2019-09-29

Accepted: 2021-01-10

1-PhD of Water Engineering, Dept. of Irrigation and Drainage Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

2- Prof. Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

*Corresponding Author's E-mail: bagher.yousefi@gmail.com

Abstract

As the world's population continues to increase and fresh water decreases, the need for desalination of sea water is increasing. Therefore, the desalination process has become a new challenge as the earth's resources must find sustainable solutions through renewable energies. Condensation irrigation (CI) combines desalination and irrigation, which can produce required energy by solar power. This research was conducted for feasibility study in Research Station of Ahvaz University. The air flow was saturated by passing over the saline water surface in the solar still. Then the saturated airflow was driven into buried drainage pipes (25 m), where the humid airflow cools gradually, and the humidity condenses along the inner pipe surface. This condense water penetrates the soil via drainage pipe perforations, and irrigates the surrounding soil. During the field test, changes in the daily production of condensation water were observed due to the surrounding environment influenced on the input temperature but the average daily fresh water production was 6 L day⁻¹. In addition, a laboratory model was built to identify the effective two entrance temperatures on the performance of condensation irrigation. The result showed that changing the flow temperature has a great impact on the performance of condensation irrigation.

Keywords: Irrigation, Desalination, Field Test, Laboratory Model, Water Production.

مقدمه

اهمیت موضوع

هدررفت آب و توسعه روش‌های آبیاری کارآمد، یک راه مقرون به صرفه و پایدار در مقابله با کمبود آب است اما اجرای چنین پیشرفت‌هایی آهسته می‌باشد و برای توسعه پایدار مناطقی که از کمبود آب رنج می‌برند، مناسب نمی‌باشد. بنابراین منابع آب به طور فزاینده‌ای از طریق بهره‌برداری از منابع آب غیرمتعارف از قبیل بازیافت آب، آب‌های زیرزمینی با کیفیت کم، نمک‌زدایی آب‌های شور و همچنین ذخیره آب باران تقویت شده- است (قرماندی و مسالم ۲۰۰۹).

آبیاری با آب‌های کیفیت پایین تا حد زیادی در خاورمیانه و هند انجام شده است اما توانایی بالقوه این روش به وسیله انواع اشکالات محدود شده است (قدیر و

کمبود آب به شدت بر بخش‌های مختلف کشاورزی در کشورهای خاورمیانه، شمال آفریقا و بسیاری از نقاط دنیا تأثیرگذار است. با افزایش تقاضا در مصارف خانگی و صنعتی، یک رقابت شدید در دستیابی به منابع کمیاب آب شیرین ایجاد شده که منجر به تخصیص آب بیشتری از سهم کشاورزی به بخش‌های با اولویت بالاتر شده است. لازم به ذکر است که این اختصاص آب به بخش‌های مهمتر، افزایش هزینه در کشاورزی را به دنبال خواهد داشت (قدیر و همکاران ۲۰۰۷). به طور کلی بهبود مدیریت تقاضای آب در جلوگیری از

کشورهای گرم و خشک خواهد بود (السايد و همکاران ۱۹۷۶، کالیگيرو ۲۰۰۵). به طور مثال هر روز ۲۳ میلیون متر مکعب آب شیرین از آب دریا با اسمز معکوس^۱ (RO)، فلش چند مرحله‌ای^۲ (MSF) و تقطیر چند مرحله‌ای^۳ (ME) تولید می‌شود که اکثر این تأسیسات به وسیله سوخت‌های فسیلی و فقط ۰/۰۲ درصد از آنها با انرژی‌های تجدید شونده کار می‌کنند (رزگران ۲۰۰۲).

آبیاری چگالشی یک روش توسعه یافته نوین است که برای این نیازها معرفی شده است. در این روش با استفاده از انرژی حاصل از تابش خورشید، آب شیرین از آب‌های شور حاصل می‌شود و به طور مستقیم به ناحیه ریشه منتقل می‌شود. در نتیجه به وسیله سیستم آبیاری چگالشی، آب‌های شور را می‌توان منبع جدیدی از آب‌های شیرین در نظر گرفت (لیندبلوم و نوردل ۲۰۰۶، یوسفی و همکاران ۲۰۱۱ الف، ۲۰۱۱ ب).

شرایط اقلیمی کشور ایران نیز به گونه‌ای است که بخش کشاورزی آن به شدت، به آب برای تولید محصولات کشاورزی وابسته است. در چنین شرایطی تأثیرات اقلیمی ناشی از پدیده خشکسالی و یا ترسالی می‌تواند اثر منفی یا مثبت زیادی بر تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی داشته باشد (آذری و همکاران ۲۰۰۵). همچنین ایران کشوری است که منابع عظیمی از آب‌های شور و لبشور، به خصوص در مناطق مرکزی و جنوبی، که از نعمت آب شیرین بی‌بهره یا کم بهره‌اند، در اختیار دارد. اغلب این آب‌ها به شکل فعلی قابل استفاده نبوده و فناوری نمک‌زدایی یکی از روش‌های مؤثر در بهره‌گیری از آن منابع خواهد بود (پانکراتز و تونر، ۲۰۰۳). پس با بهره‌گیری از این فناوری‌ها و روش‌هایی مانند آبیاری چگالشی، می‌توان آب‌های شور دریاها و زهکش‌ها را به عنوان منبع کمکی و یا اصلی آب در کشاورزی معرفی کرد (برومندنسب و یوسفی ۲۰۱۶).

همکاران (۲۰۰۷). اولین محدودیت این است که سطوح شوری بالا، عدم تعادل اسمزی در خاک و کاهش جذب آب و تعرق توسط گیاه را به دنبال دارد که منجر به کاهش محصول در مقایسه با آبیاری با آب شیرین می‌شود (ساده و راوینا ۲۰۰۰). همچنین، با توجه به تحمل شوری گیاهان، انتخاب آنها صورت می‌گیرد که محدودیت دوم می‌باشد. و محدودیت سوم بیان می‌کند، حتی زمانی که مدیریت آبیاری به خوبی اجرا شود، نمک در ناحیه ریشه تجمع می‌یابد مگر این که حجم زیادی از آب جهت آبخوبی خاک استفاده شود. بنابراین می‌توان گفت که کشاورزی با آب‌های لب‌شور بسیار ناپایدار می‌باشد (بنگال و همکاران ۲۰۰۸).

آبیاری با نمک‌زدایی (شیرین کردن) آب‌های شور این توانایی را دارد که به عنوان یک روش کارآمد و اقتصادی جایگزین آبیاری با آب‌های لب‌شور شود (قرماندی و همکاران ۲۰۰۹، لیندبلوم ۲۰۱۲، برومندنسب و یوسفی ۲۰۱۶). اگرچه تنها ۳٪ از تولید سالانه آب در دنیا به وسیله نمک‌زدایی صورت می‌پذیرد، اما این آب نمک‌زدایی شده در کشورهایی مانند اسپانیا (مارتینز و اوشیما ۲۰۰۶، دی‌کیه ۲۰۰۷، دون‌وارد و تیلور ۲۰۰۷)، امارات متحده عربی (سانز و همکاران ۲۰۰۸) و فلسطین اشغالی به صورت گسترده تحویل کشاورزان داده می‌شود. ایران نیز جدیداً طرح‌هایی را در این زمینه اجرا کرده است. دستگاه‌های آب شیرین‌کن در امتداد ساحل‌ها واقع شده‌اند تا تأمین آب مورد نیاز کشاورزان را تضمین کنند (السايد و همکاران ۱۹۷۶، یرمیا هو و همکاران ۲۰۰۷). همچنین از جمله مواردی که از دستیابی گسترده آب شیرین‌کن‌ها در بخش کشاورزی جلوگیری می‌کند، می‌توان به هزینه‌های بالای آبیاری با آب شیرین‌شده نسبت به دیگر منابع آب اشاره کرد. این هزینه انرژی مورد نیاز در فناوری‌های متعارف، ۴۰ تا ۴۵ درصد از هزینه‌های کل نمک‌زدایی را شامل می‌شود (بتس ۲۰۰۴). پس در جهت رفع این مشکلات، ترکیب انرژی خورشیدی و نمک‌زدایی راه‌حل مناسبی در

1- Reverse osmosis

2- Multi stage flash

3- Multi effect distillation

آبیاری چگالشی

آبیاری چگالشی (CI¹) یک سیستم آبیاری زیرسطحی است که همزمان نمک زدایی و شیرین کردن آب را نیز انجام می‌دهد و با استفاده از آن می‌توان آب‌های شور و نامتعارف را به‌عنوان منبع جدید آب برای کشاورزی در نظر گرفت. این سیستم به دو بخش تقسیم می‌شود: در بخش اول با استفاده از انرژی گرمایی خورشیدی، آب غیر آشامیدنی و شور در تقطیرکننده خورشیدی گرم می‌شود و سپس هوای اطراف و محیط با عبور از سطح آب گرم‌شده در تقطیرکننده خورشیدی گرم و اشباع از بخار آب می‌شود. پس از آن هوای گرم و مرطوب به درون بخش دوم، سیستم لوله‌های زیرزمینی، دمیده می‌شود. در این بخش هوای گرم و مرطوب خنک می‌شود و بخار به‌صورت قطرات آب، بر روی دیواره داخلی لوله‌ها چگالش می‌یابد (شکل ۱). این آب از طریق سوراخ‌های ایجاد شده بر بدنه لوله (زهکش) وارد خاک اطراف می‌شود. همچنین در صورتی که از لوله‌های معمولی و بدون روزنه استفاده شود می‌توان آب تولیدی را در انتهای لوله جمع‌آوری کرد (لیندبلوم ۲۰۰۶، ۲۰۱۲، یوسفی و همکاران ۲۰۱۲، یوسفی و برومند نسب ۲۰۱۵).

تاکنون مطالعات علمی چندان زیادی در سیستم CI انجام نشده است. مطالعه تئوری این سیستم برای اولین بار توسط ویچ‌گرن (۱۹۸۶) انجام و نشان داده شد که آبیاری زمینی به مساحت یک هکتار، نیاز به یک دمنده با قدرت ۳ تا ۱۰ کیلووات دارد. همچنین نوردل (۱۹۸۷) از سیستم آبیاری چگالشی در یک گلخانه در جهت کاهش تفاوت در دمای شب و روز گلخانه استفاده کرد که این سیستم بیش از ۲۰ سال فعال بود. گلن (۱۹۸۷) مطالعه‌ای بر روی انتقال گرمایی در لوله‌های معمولی و لوله‌های روزنه‌دار انجام داد تا دریابد که عملکرد تولید آب که وابسته به انتقال گرمایی می‌باشد در کدام نوع لوله بیشتر است که نتایج نشان دادند انتقال گرمایی از

طریق لوله‌های روزنه‌دار تقریباً دو برابر لوله‌های معمولی می‌باشد.

در سال ۲۰۰۱ گوستافسون و لیندبلوم با یک آزمایش میدانی و تئوری، امکان‌سنجی روش CI را مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که از لحاظ فنی و اقتصادی می‌توان از این سیستم در آبیاری زیرسطحی استفاده کرد که مطالعه پیش‌رو نیز با تفاوت‌هایی در سیستم، محیط، قطر لوله و نوع خاک در ادامه کار ایشان بوده است. همچنین مطالعه این دو الهام بخش سازمان‌هایی در شمال آفریقا بود که در تونس نیز یک مدل میدانی ساخته شد. در ادامه این بررسی‌ها لیندبلوم (۲۰۱۲) یک مدل عددی با عنوان CI2D را تهیه کرد که توانایی شبیه‌سازی گرما و آب را در این سیستم دارد. همچنین یوسفی و برومند نسب (۲۰۱۵) در مطالعه ای میدانی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید چمران اهواز بر روی سیستم CI در جهت تولید آب آشامیدنی به عملکرد ۴۰ درصد در تولید آب شیرین به نسبت حجم آب شور اولیه دست‌یافتند.

هدف این مطالعه ساخت و اجرای سیستم آبیاری چگالشی در جهت امکان‌سنجی آن در منطقه اهواز و بدست آوردن عملکرد تولید آب شیرین نسبت به کل آب شور بخار شده و همچنین درک بهتر تاثیر دمای ورودی سیال بر عملکرد تولید آب آبیاری با استفاده از این سیستم بوده است. بنابراین در این راستا، یک آزمایش میدانی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد و در جهت شناخت بهتر و تاثیر دمای ورودی سیال بر عملکرد سیستم، یک مدل فیزیکی آزمایشگاهی ساخته و مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل ۱- نمای کلی سیستم آبیاری چگالشی (لیندبلوم ۲۰۱۲).

مواد و روش

مطالعه میدانی

مطالعه میدانی زمینی با ابعاد ۳۰*۶ متر و به مساحت ۱۸۰ متر مربع انتخاب و سیستم آبیاری چگالشی در آن اجرا گردید که مشخصات خاک آن در لایه‌های مختلف در جدول ۱، نشان داده شده‌است.

مطالعه میدانی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید چمران اهواز (31°20'N, 48°40'E)، انجام شد. جهت

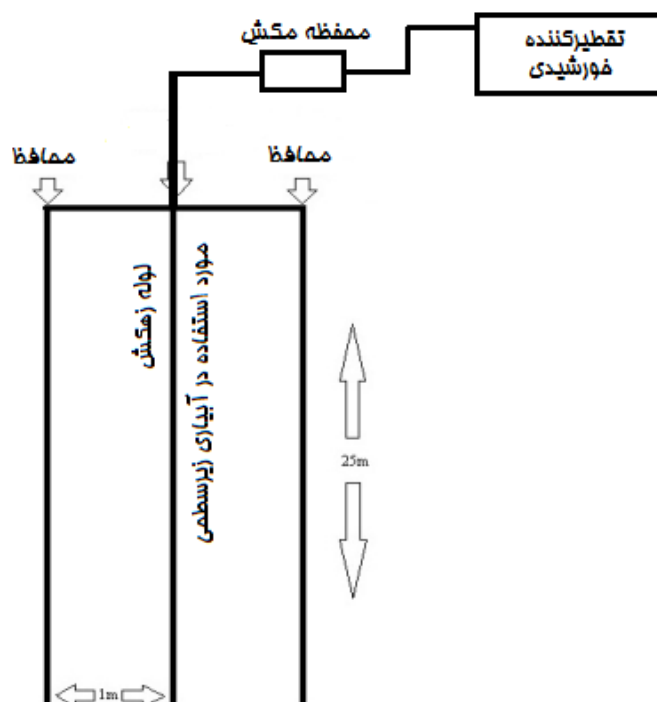
جدول ۱- مشخصات خاک مزرعه در لایه‌های مختلف.

چگالی ظاهری (g cm ⁻³)	تخلخل (%)	بافت خاک	ذرات خاک (%)			عمق خاک (cm)
			ماسه	سیلت	رس	
۱/۵۹	۳۹/۵	لوم	۲۲	۳۴	۴۴	۰-۲۸
۱/۶۲	۳۸/۴	لوم	۲۲	۳۴	۴۴	۲۸-۴۹

بود مطابق طرح کلی سیستم نصب گردیدند (شکل ۲). باید در نظر داشت که انتخاب این پنکه براساس سرعت ورودی حاصل از آن و اطلاعات سازنده آن صورت گرفت. در ساخت تقطیرکننده خورشیدی هدف داشتن بیشترین سطح بخار است و حجم آب در صورتی که سطح مورد نظر را دربر گیرد کافیتست، بنابراین از یک نیم استوانه عایق‌بندی شده به حجم ۸۰ لیتر استفاده شد که روی آن با پوششی شفاف و دولایه پوشیده شده بود تا بتواند در کنار گرمایش ناشی از الکتریسیته از انرژی تابش خورشیدی نیز استفاده کند و نیز فضایی جهت عبور جریان هوا و مرطوب شدن آن فراهم گردد. محفظه تقطیرکننده و محفظه مکش با یک لوله عایق به یکدیگر و سپس به لوله زهکش متصل شدند (شکل ۲).

برای راه‌اندازی سیستم آبیاری چگالشی، در ابتدا سه ترانشه با طول ۲۵ متر و عمق ۰.۴ متر و ۱ متر فاصله از یکدیگر در زمین مشخص شده، حفر گردید. سپس لوله زهکشی از جنس پی‌وی‌سی با قطر ۶۳ میلی‌متر که برای آبیاری زیرسطحی فراهم شده بود، در ترانشه وسطی قرار گرفت. سپس در ترانشه‌های کناری نیز لوله‌های محافظ یا زهکش قرار داده شد تا از سیستم در برابر ورود جریان‌های احتمالی خارجی، محافظت کند (شکل ۲). پس از حفر ترانشه‌ها و قرار دادن لوله‌ها در آنها مجدداً با خاک مزرعه پر شدند. قابل ذکر است که سطح آب زیرزمینی در محدوده آزمایش میدانی بیش از ۳/۵ متر بود و همچنین یک پوشش پلاستیکی آماده شده بود تا در صورت وقوع باران بر روی سطح سیستم کشیده شود.

پس از نصب لوله زهکش (جهت آبیاری زیرسطحی) و لوله‌های محافظ، تجهیزات مورد نیاز دیگر از جمله تقطیرکننده خورشیدی^۱ و محفظه مکش که شامل یک پنکه با قدرت ۱۶ وات و جریان ۶۵ متر مکعب در ساعت



شکل ۲- طرح کلی سیستم آبیاری چگالشی (راست) و ترانشه‌های حفر شده به طول ۲۵ متر و عمق ۴۰ سانتیمتر (چپ).

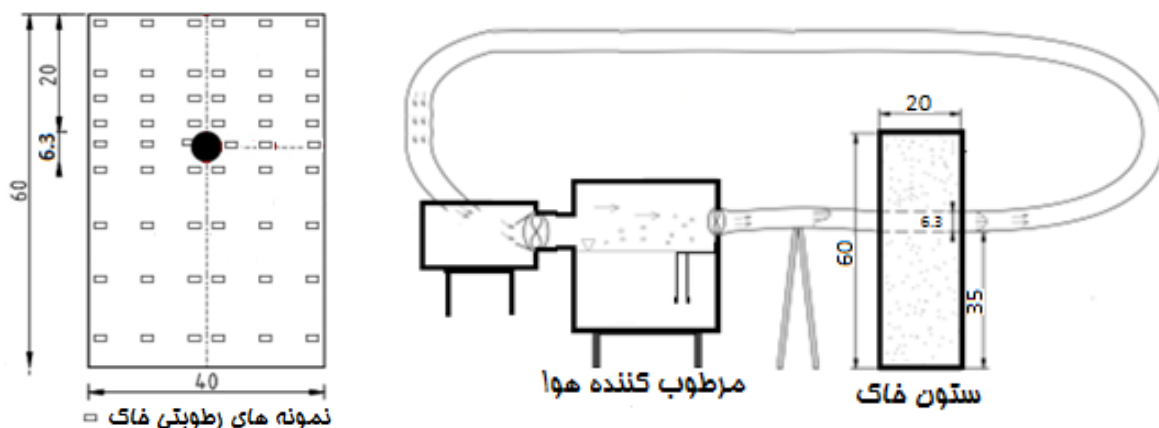
مدل آزمایشگاهی

در آزمایشگاه یک مدل فیزیکی به نحوی ساخته شد که بتوان سیستم آبیاری چگالشی را به صورت دوبعدی در نظر گرفت و اثر تغییر دمای ورودی را به طور مستقل از آزمایش میدانی مشاهده کرد که مشخصات آن در شکل ۳، مشاهده می‌شود. این مدل فیزیکی شامل یک ستون خاک، با ارتفاع ۰/۶ متر، عرض ۰/۴ متر و طول ۰/۲ متر می‌باشد که لوله زهکش نیز به طول ۰/۲ متر و با قطر ۶۳ میلی‌متر در راستای طول آن قرار گرفته است. همچنین شامل مرطوب‌کننده‌ای بود که وظیفه رطوبت‌زنی به جریان هوا را داشت و از یک گرمکن برقی در جهت افزایش دمای آب و از یک دمنده جهت برقراری جریان استفاده می‌کرد. این تجهیزات توسط یک‌سری لوله به یکدیگر متصل شدند و تشکیل یک حلقه بسته را دادند. لازم به ذکر است کلیه مشخصات جریان از قبیل دما، سرعت و رطوبت نسبی و نیز دمای مخزن و مرطوب‌کننده مرتباً کنترل می‌شد تا جریانی با شرایط دمایی و رطوبتی مشخص را فراهم کرد. این سیستم نیز

راه‌اندازی و شروع به کار سیستم

آب در تقطیرکننده خورشیدی تا ۷۰ درجه سانتیگراد توسط انرژی خورشیدی و حمایت یک گرمکن برقی گرم گردید تا بتواند مادامی‌که جریان هوا از روی سطح آب عبور می‌کند، شرایط تقریباً ثابتی را فراهم کند. این جریان هوا که توسط یک دمنده ایجاد شده است باعث تبخیر از سطح آب و مرطوب شدن جریان هوا می‌شود. سپس این جریان هوای اشباع از رطوبت به درون لوله زهکش به مدت ۸ ساعت (از ساعت ۹ تا ۱۷) دمیده می‌شود. همان‌طور که قبلاً بیان شد رطوبت موجود با از دست دادن گرمای خود به خاک اطراف به صورت آب شیرین در دیواره داخلی لوله زهکش چگالش می‌یابد. این آب چگالش‌یافته و مقداری از هوای مرطوب از طریق روزنه‌های موجود بر دیواره لوله زهکش در خاک نفوذ می‌کنند. در نتیجه این چگالش، خاک اطراف لوله زهکش با افزایش دما مواجه شده و همچنین تحت آبیاری و هوادهی قرار می‌گیرد. این مطالعه به مدت ۱۵ روز در بهمن ماه ۱۳۹۰ ادامه داشت.

ساخته شد تا این نظریه بررسی شود. در آزمایش‌های انجام شده، پس از پایان هر آزمایش، نمونه‌های خاک (ماسه) از شش موقعیت افقی و در نه ارتفاع برداشت شدند و در تعیین رطوبت وزنی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین خاک استفاده شده در آزمایش اول با یک خاک جدید خشک و کاملاً یکسان جایگزین گردید و در آزمایش دوم مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که از ماسه استفاده گردید تا بتوان تا حدودی از پدیده مویینگی جلوگیری کرد و سرعت انجام آزمایش را نیز افزایش داد. در شکل ۳، محل جمع‌آوری نمونه ماسه‌ها قابل مشاهده است.



شکل ۳- شمای کلی سیستم آزمایشگاهی (راست) و مکان برداشت نمونه‌های رطوبتی خاک در مرکز مقطع عرضی ستون خاک که مکان قرارگیری لوله با دایره سیاه‌رنگ نشان داده شده است (چپ). کلیه اندازه‌ها بر حسب cm می‌باشد.

میدانی، در فاصله ۵ سانتیمتری بالای لوله زهکش و در ابتدا، وسط و انتهای آن نصب شدند تا تغییرات دمایی را در طول بررسی کنند و همچنین اندازه‌گیری رطوبت در ۵ سانتیمتری بالای لوله زهکش و در فواصل ۵ متری پس از پایان آزمایش میدانی توسط دستگاه TDR ثبت گردید و در مطالعه آزمایشگاهی رطوبت در اطراف لوله زهکش و مکان‌های مشخص، مطابق شکل ۳ سمت چپ، با نمونه‌گیری مستقیم از ستون خاک به دست آمد. در محاسبه مقدار آب چگالشی و ذخیره شده در خاک می‌توان نتیجه گرفت که این مقدار برابر با تفاوت در مقدار آب جریان ورودی و جریان خروجی هوا از لوله می‌باشد. برای این کار کافی است که فرض کنید که

به مدت ۸ ساعت و تحت شرایط کاملاً ثابت و کنترل- شده مشغول به کار بود و شامل دو آزمایش مجزای بررسی رطوبت خاک بود. در اولین آزمایش سیستم به مدت سه روز و ۸ ساعت در هر روز و با دمای ورودی ۴۹ درجه سانتیگراد مشغول به کار بود و آزمایش دوم نیز با تغییر دمای ورودی به ۴۱ درجه سانتیگراد توسط ترموستات و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها مانند آزمایش اول در ۳ روز انجام شد. دلیل طراحی این آزمایش آن بود که در آزمایش میدانی، تولید روزانه متفاوت بود و فرض اولیه بر آن بود که محیط اطراف بر دمای ورودی تأثیرگذار است، بنابراین این مدل

اندازه‌گیری‌ها و محاسبات آب چگالشی پس از نصب و راه‌اندازی سیستم آبیاری چگالشی، دسته‌ای از پارامترهای جریان می‌بایست هر ساعت، در ورودی و خروجی لوله در آزمایش میدانی و بلافاصله قبل و بعد از ستون خاک در مدل آزمایشگاهی اندازه- گیری شوند. این اندازه‌گیری‌ها شامل رطوبت نسبی، دما و سرعت جریان هوا بودند که برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی از دماسنج تر و خشک و برای سرعت جریان از لوله پیتوت استفاده گردید. همچنین پارامترهای دما در آزمایش میدانی و رطوبت خاک در هر دو آزمایش میدانی و آزمایشگاهی اندازه- گیری شدند. حسگرهای اندازه‌گیری دما در آزمایش

نسبی (%) در ورودی و خروجی لوله زهکش می‌توان مقدار آب چگالش‌یافته را محاسبه کرد.

نتایج و بحث

مطابق آنچه قبلاً گفته شد، این آزمایش به مدت ۸ ساعت در روز ادامه داشت و نرخ جریان هوا $65 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ بود. قطر لوله زهکش ۶۳ میلی‌متر و طول آن نیز ۲۵ متر بود. همان‌طور که در جدول ۲، مشاهده می‌شود، متوسط اندازه پارامترهای جریان در روز هفتم به عنوان مثال نشان داده شده است. اندازه‌های مشابهی در روزهای باقیمانده تکرار می‌شود که از بیان آن‌ها خودداری می‌گردد. در میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده، تنها در دمای ورودی تغییراتی وجود داشت که در شکل ۷ قابل مشاهده است.

رفتار بخار آب و هوا همانند گاز کامل می‌باشد. بنابراین مقدار آب چگالش یافته را می‌توان با استفاده از قانون گاز کامل بدست آورد (لیندبلوم و نوردل ۲۰۰۶):

$$m = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \quad [۱]$$

در این رابطه m (kg)، جرم، p (Pa)، فشار جزئی، V (m^3)، حجم مشخص، T (K)، دما و R ($\text{J kg}^{-1} \text{K}$)، ثابت جهانی گازها می‌باشد. از معادله ۱ قابل بیان است که جرم بخار، m_v ، نسبت به جرم هوای خشک، m_{da} ، جرم آبی که در یک واحد جرم هوای خشک وجود دارد را توصیف می‌کند. به عبارت دیگر نسبت m_v/m_{da} برابر رطوبت مخصوص^۱، x ($\text{kg water kg}^{-1} \text{ dry air}$)، می‌باشد. زمانی که رطوبت نسبی جریان هوا، ϕ ، و فشار کل بخار آب و هوا در لوله، p_{tot} ، مشخص باشند، رطوبت مخصوص، x ، توسط معادله ۲ بیان می‌شود (لیندبلوم و نوردل ۲۰۰۶).

$$x = 0.622 \frac{p_{v,sat} \cdot \phi / 100}{(p_{tot} - p_{v,sat} \cdot \phi / 100)} \quad [۲]$$

که در این معادله $p_{v,sat}$ فشار بخار اشباع (Pa) و ϕ رطوبت نسبی (%) می‌باشند. تفاوت در رطوبت مخصوص بین ورودی و خروجی برابر با جرم آب چگالش‌یافته می‌باشد. با دانستن نرخ جریان هوای مرطوب، (kg s^{-1}) ، و رطوبت مخصوص، تعیین نرخ جریان هوای خشک (kg s^{-1}) امکان‌پذیر خواهد بود (لیندبلوم و نوردل ۲۰۰۶):

$$\dot{m}_{da} = \frac{\dot{m}_a}{1+x} \quad [۳]$$

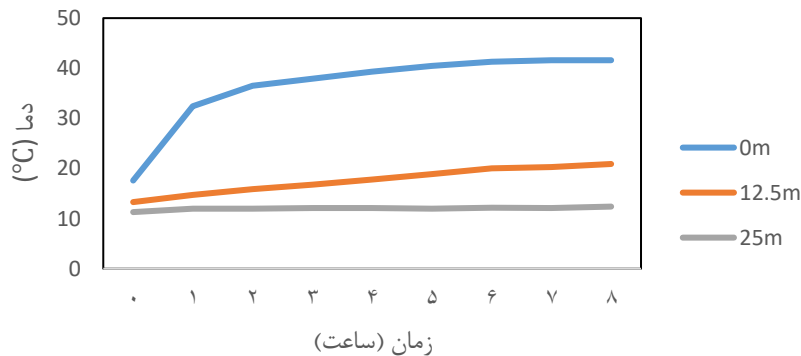
در این رابطه، \dot{m}_a نرخ جریان هوای مرطوب (kg s^{-1}) و x رطوبت مخصوص ($\text{kg water kg}^{-1} \text{ dry air}$) می‌باشد. بنابراین نرخ چگالش (kg s^{-1}) برابر با حاصل ضرب جرم هوای خشک در تفاوت رطوبت مخصوص در ورودی و خروجی لوله می‌باشد. بنابراین در این مطالعه با داشتن مدت زمان آزمایش، دما (C)، سرعت (m s^{-1}) و رطوبت

جدول ۲- میانگین مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده توده هوا در ورودی و خروجی لوله در سیستم آبیاری چگالشی در روز هفتم در آزمایش میدانی.

پارامترهای جریان	ورودی لوله	خروجی لوله
دما (C)	۵۴/۶۲	۱۴/۴۶
سرعت ($m s^{-1}$)	۵/۵	۰/۱
رطوبت (%)	۹۰	۷۳

می‌دهد که در طول لوله، افزایش دما کاهش می‌یابد، پس در طول لوله از مقدار آب تولیدی و افزایش رطوبت در خاک کاسته می‌شود، به طوری که در پایان لوله افزایش شیب خط، تقریباً افقی است و نشان از افزایش رطوبت ناچیز است. لازم به ذکر است که خاک این سیستم در طول شب با تبادل گرمایی با هوای اطراف به دمای اولیه خود بازمی‌گردد، بنابراین نیازی به استفاده از پنکه برای دمیدن هوای خنک شب به درون لوله زهکش نمی‌باشد. البته در سایر سیستم‌های آبیاری چگالشی اگر دمای خاک در شب به صورت طبیعی کاهش نیابد، نیاز به استفاده از پنکه و یا هر وسیله دیگری برای کاهش دمای خاک می‌باشد.

در سیستم آبیاری چگالشی، گرمای چگالش نه تنها از طریق هدایت گرمایی بلکه از طریق همرفتی نیز به خاک اطراف منتقل می‌شود. گرمای همرفتی توسط هوای مرطوب و آب از طریق روزنه‌های لوله زهکش به خاک اطراف منتقل می‌شود و عمل آبیاری نیز همزمان صورت می‌گیرد. بنابراین افزایش دمای خاک در طول روز هفتم که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نشان از چگالش بخار آب و انتقال گرما به خاک اطراف از طریق هدایت گرمایی و همرفتی می‌باشد. پس با توجه به شکل ۴، افزایش رطوبت در خاک در ابتدای لوله بیشتر خواهد بود چراکه افزایش دما بیشتر است و با گذشت زمان از شدت افزایش آن کاسته می‌شود. همچنین شکل ۴ نشان

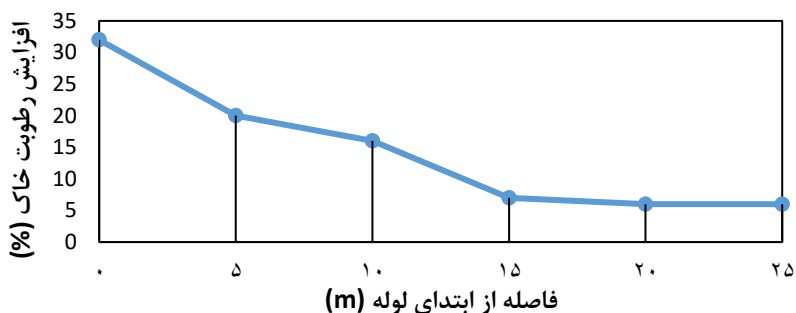


شکل ۴- بررسی دمای خاک در طول لوله در فاصله ۵ سانتیمتری از لوله در روز هفتم.

افزایش رطوبت در ۱۵ متر اولیه لوله بسیار بیشتر از افزایش رطوبت در ۱۰ متر باقیمانده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که طول لوله می‌بایست کمتر و یا دمنده قویتری انتخاب می‌گردد.

تغییرات رطوبتی در خاک

شکل ۵ نشان می‌دهد که پس از پایان آزمایش میدانی و اندازه‌گیری میدانی رطوبت خاک، افزایش رطوبت حجمی خاک در طول لوله کاهش می‌یابد، به طوری که این

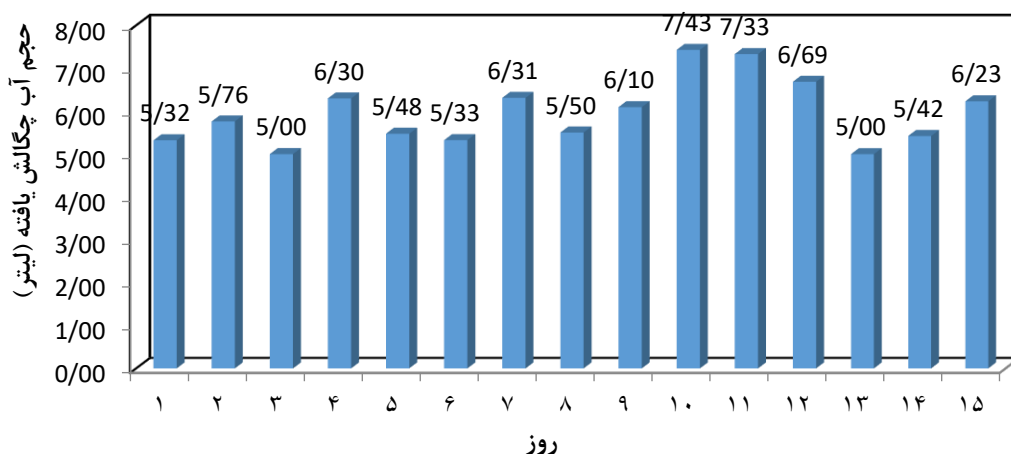


شکل ۵- افزایش رطوبت خاک در ۵ سانتیمتری و در طول لوله زهکش پس از ۱۵ روز در مزرعه.

دست آمده و مشاهده می‌شود که این مقدار آب چگالش‌یافته بین روزهای مختلف متغیر است.

آبیاری چگالشی (میدانی)

در شکل ۶، مقدار آب چگالش یافته در ۱۵ روز متوالی با استفاده از داده‌های ثبت شده از آزمایش میدانی به

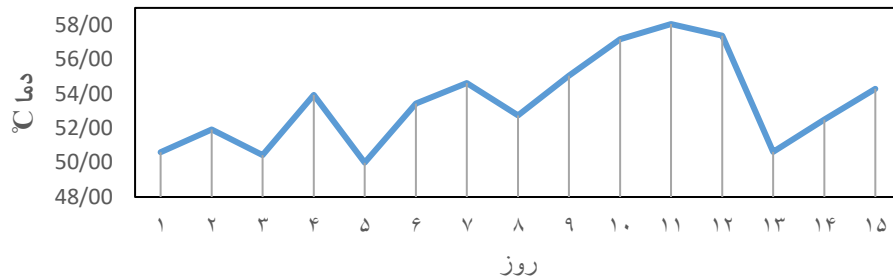


شکل ۶- محاسبه حجم آب چگالش‌یافته توسط آبیاری چگالشی طی روزهای مورد مطالعه در آزمایش میدانی.

روز دهم که ماکزیم تولید را داشت تا ۷۴٪ نیز می‌رسد.

همچنین بررسی شکل ۶ و میانگین دمای ورودی روزانه (شکل ۷) نشان می‌دهد که در روزهای با بیشترین عملکرد تولید، متوسط دمای ورودی جریان هوای گرم و مرطوب نیز بالاتر از سایر روزها بوده است و نیز در روزهایی با کمترین عملکرد تولید، دمای جریان ورودی به نسبت سایر روزها کمتر بوده است.

با توجه به شکل ۶، نرخ چگالش از ۵ تا نزدیک ۷/۵ لیتر در روز متغیر است که مینیمم نرخ تولید (0.6 L h^{-1}) در روز سوم و سیزدهم و ماکزیم نرخ تولید در روزهای دهم، یازدهم و دوازدهم رخ داده است. همچنین متوسط نرخ محاسباتی تولید آب در آبیاری چگالشی در پانزده روز متوالی، ۶ لیتر در روز به دست آمده که با توجه به این‌که متوسط روزانه تبخیر آب در تقطیرکننده خورشیدی ۱۰ لیتر در روز بوده است، متوسط عملکرد آبیاری زیرسطحی ۶۰٪ محاسبه می‌شود که این نرخ در



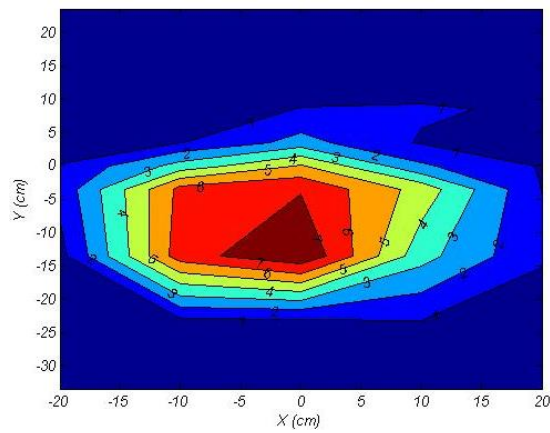
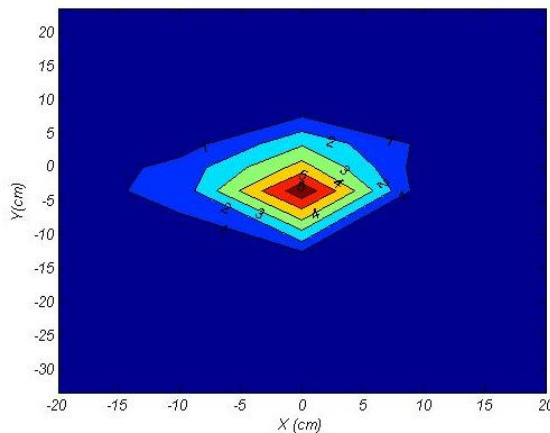
شکل ۷- میانگین دمای ورودی هوای گرم و مرطوب در سیستم آبیاری چگالشی طی روزهای مورد مطالعه.

محیط اطراف بر دمای ورودی جریان می‌باشد، بنابراین در مدل آزمایشگاهی دو آزمایش با تغییر دمای ورودی جریان، انجام گرفت و با استفاده از نمونه‌های رطوبتی حاصل از هر آزمایش نمودار گسترش رطوبتی در اطراف لوله زهکش رسم گردید که در شکل ۸، این تأثیر دمای ورودی به تنهایی بر گسترش رطوبتی در خاک، نشان داده شده‌است.

بنابراین با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان بیان کرد که از مهمترین دلایل این تغییرات در متوسط تولید روزانه می‌توان به تأثیرات محیط اطراف، بر روی دمای جریان ورودی اشاره کرد.

بررسی افزایش رطوبت در مدل آزمایشگاهی

همان‌طور که قبلاً بیان شده است از مهمترین دلایل اختلاف تولید آب آبیاری در آزمایش میدانی، تأثیر



شکل ۸- افزایش و گسترش رطوبتی خاک اطراف لوله در سیستم آبیاری چگالشی با دمای ورودی 49°C (سمت راست) و 41°C (سمت چپ). X و Y به ترتیب فاصله افقی و عمودی از مرکز لوله (۰،۰) را نشان می‌دهند.

توجه به شکل ۶، ۷ و ۸ می‌توان نتیجه گرفت که متغیر بودن تولید آب چگالش یافته در آزمایش میدانی، به دلیل تأثیر محیط بر روی دمای ورودی جریان، بیانی صحیح بوده است که مطابق با مطالعات تئوری لیندبلوم (۲۰۱۲) می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

آبیاری چگالشی (CI) با تولید آب شیرین و استفاده در آبیاری زیرسطحی، پتانسیل تبدیل شدن به یک سیستم

همان‌طور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، شکل سمت راست با دمای بیشتر نسبت به شکل سمت چپ، گسترش رطوبتی بیشتری را نیز در خاک نشان می‌دهد که نتیجه آن تولید آب چگالش یافته بیشتر در خاک است. چراکه کاهش دمای جریان ورودی به معنی کاهش رطوبت مخصوص موجود در جریان هوا و کاهش اختلاف دمایی بین خاک و هوا خواهد شد که نتیجه‌ای جز کاهش در تولید آب نخواهد داشت (شکل ۸). پس با

دمای ورودی می‌تواند بر روی تولید سیستم آبیاری چگالشی اثر گذار باشد.

نیروی محرکه و گرمایشی این سیستم می‌بایست به طور کامل توسط انرژی خورشیدی تامین شود. با این حال می‌توان از انرژی‌های ارزان از قبیل انرژی‌های در دسترس تولید شده و هدر رفته صنعتی استفاده کرد که این انرژی‌های در دسترس مزیت و صرفه‌های اقتصادی زیادی را در بخش نمک‌زدایی و تقطیرکننده سیستم به همراه دارند.

تقدیر و تشکر

در پایان از پروفیسور نوردل و دکتر لیندبلوم از سوئد که مخترع و تکمیل‌کننده این روش و همچنین استاد الشایبی از تونس که در این زمینه صاحب نظر هستند و همواره با راهنمایی‌های خود در کنار گروه مطالعاتی ما بودند، کمال تشکر را داریم.

تأثیرگذار و مهم را در جهت داشتن کشاورزی پایدار خواهد داشت. تاکنون مطالعات بسیار کمی بر روی آبیاری چگالشی صورت گرفته است که در مطالعه حاضر این سیستم در مناطق گرم و خشک ایران مورد ارزیابی و امکان‌سنجی قرار گرفت. نتایج ارزیابی نشان دادند که برخی از تجهیزات سیستم آبیاری چگالشی کوچک انتخاب شده‌اند و اندازه دمنده برخلاف مطالعات اولیه مناسب طول لوله زهکش نبوده است. چراکه مقدار جریان هوای مرطوب تولیدی در عمل به دلیل تاثیر محیط اطراف، کمتر از مقدار مورد نظر شده بود. همچنین نتایج و ارزیابی‌ها نشان دادند که می‌توان طول لوله را کمتر انتخاب کرد. با این حال بازده عملی آبیاری چگالشی به طور متوسط ۶۰ درصد بود که می‌توان با ثابت نگه‌داشتن مشخصات جریان و جلوگیری از تاثیر محیط بر جریان ورودی، آن را تا ۷۴ درصد افزایش داد. همچنین نشان داده شد که محیط اطراف با تاثیر بر

منابع مورد استفاده

- Azari A, Pazira E, Liaghat A, Vaziri J, Ehsani M and Bakhtiari Z, 2005. Subsurface drainage practices: guidelines for the implementation operation and maintenance. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage, IRNCID.
- Ben-Gal A, Ityel E, Dudley L, Cohen S, Yermiyahu U, Presnov E, Zigmond L and Shani U, 2008. Effect of irrigation water salinity on transpiration and on leaching requirements: A case study for bell peppers. *Agricultural Water Management* 95(5):587-597.
- Betts K, 2004. Desalination, desalination everywhere. *Environmental Science and Technology* 38(13):246-247.
- Boroomand Nasab S and Yousefi B, 2016. Condensation irrigation, solar technologies for drinking water and irrigation. Shahid Chamran University of Ahvaz Pub, Ahvaz.
- Dickie P, 2007. Making Water. Desalination: option or distraction for a thirsty world. WWF's Global Freshwater Program.
- Downward SR and Taylor R, 2007. An assessment of Spain's Programa AGUA and its implications for sustainable water management in the province of Almeria, southeast Spain. *Journal of Environmental Management* 82(2):277-289.
- El-Sayed YM, Shakshooki SK, Jawad JA and Matar Y, 1976. Desalting saline ground water for agriculture. *Desalination*, 19:175-188.
- Ghermandi A and Messalem R, 2009. The advantages of NF desalination of brackish water for sustainable irrigation: The case of the Arava Valley. *Desalination and Water Treatment* 10:101-107.
- Göhlman A, 1987. Heating of frozen ground. (Uppvärmning av frusen mark), Master Thesis. Luleå University of Technology, Sweden (in Swedish). E 030.
- Gustafsson A-M and Lindblom J, 2001. Underground condensation of humid air: a solar driven system for irrigation and drinking-water production. Luleå University of Technology, MSc thesis No 2001:140 CIV.
- Kalogirou S, 2005. Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science*. 31(3):242-81.
- Lindblom J and Nordell B, 2006. Water production by underground condensation of humid air. *Desalination*. 189:248-260.

- Lindblom J, 2006. Condensation irrigation: simulations of heat and mass transfer. Licentiate thesis, Luleå University of Technology, Sweden.
- Lindblom J, 2012. Condensation irrigation: A combined system for desalination and irrigation. Doctoral thesis, Luleå University of Technology, Sweden.
- Martínez Beltrán J and Koo-Oshima S, 2006. Water Desalination for Agricultural Applications. FAO Land and Water Discussion Paper 5.
- Nordell B, 1987. Design of Climate System for Greenhouse in the North of Sweden. (Dimensionering av klimatsystem vid Hietalas växthus i Övertorneå), Luleå University of Technology, Sweden (in Swedish).
- Pankratz T and Tonner J, 2003. Desalination an environmental primer. Lone Oak Pub., Glens Falls, NY.
- Qadir M, Sharma BR, Bruggeman A, Choukr-Allah A and Karajeh F, 2007. Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. *Agricultural Water Management* 87(1):2–22.
- Rosegrant MW, Cai X and Cline SA, 2002. World Water and Food to 2025: Dealing with Scarcity. International Food Policy Research Institute.
- Sadeh A and Ravina I, 2000. Relationships between yield and irrigation with low-quality water — a system approach. *Agricultural Systems*. 64(2):99–113.
- Sanz MA, Bonnelye V and Cremer G, 2008. Fujairah reverse osmosis plant: 2 years of operation. *Desalination* 203:91–99.
- Widegren M, 1986. Condensation Irrigation, a desalination-irrigation system. Master Thesis, Luleå University of Technology, Sweden.
- Yermiyahu U, Tal A, Ben-Gal A, Bar-Tal A, Tarchitzky J and Lahav O, 2007. Rethinking desalinated water quality and agriculture. *Science* 318(5852):920.
- Yousefi B and Boroomand Nasab S, 2015. Desalination using the condensation irrigation system (A case study of the Research Farm of Shahid Chamran University of Ahvaz). *Water and Wastewater* 26(3):127-133.
- Yousefi B, Behzad M and Boroomand Nasab S, 2011. Condensation and distillation irrigation. The 3rd National Conference of Irrigation and Drainage Networks Management. 1-3 March, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz.
- Yousefi B, Behzad M, Boroomand Nasab S and Rahamanshahi M, 2011. Condensation Irrigation is a new method to use saline and uncommon water. 4th Iran Water Resources Management Conference. 3-4 may, Amirkabir University of Technology, Tehran.
- Yousefi B, Boroomandnasab S and Chaibi MT, 2012. Assessment of the performance of condensation irrigation system: First results. *World Rural Observations*. 4(3):14-17.