تولید آب شیرین با استفاده از سرمایش زیرزمینی هوای مرطوب و انرژی خورشید

مجید بازارگان [۱]، مریم احمدی علی بیگلویی [۲]

۱- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، bazargan@kntu.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، mahmadi@mail.kntu.ac.ir

چکیده

باتوجه به منابع آب موجود در جهان، تأمین آب شیرین یکی از مهم‌ترین مسائل پیش‌روی دولتمردان کشورهای خشک و کم آب است. متداول‌ترین روش‌های موجود برای شیرین‌سازی، روش‌های حرارتی و غشایی هستند که مناسب برای تولید آب در ظرفیت‌های بالا هستند. یکی دیگر از روش‌های تولید آب شیرین، استفاده از رطوبت هوا است که برای مناطق گرم و مرطوب و ظرفیت‌های پایین پیشنهاد شده‌اند. این سیستم‌ها که از انرژی خورشید برای تبخیر آب و افزایش رطوبت هوا و از سرمایش زمین برای رطوبت‌زدایی آن استفاده می‌کنند، به سیستم‌های تولید آب چگالشی معروف هستند و در کشورهای آفریقای شمالی توجه زیادی را به خود جلب کرده است و هم‌اکنون نمونه‌های کوچک آن در تونس و الجزیره استفاده می‌شوند. در این سیستم‌ها هوای گرم و مرطوب به داخل لوله های مدفون در زمین هدایت می‌شود و در آنجا به دلیل انتقال حرارت با زمین خنک می‌گردد و بخار موجود در هوا به صورت آب در می‌آید. با استفاده از لوله‌های سوراخ دار می‌توان از این سیستم‌ها برای مصارف کشاورزی و هوادهی خاک استفاده نمود. همچنین برای مصارف خوراکی می‌توان آب را در انتهای لوله جمع آوری نمود. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که در مناطق گرم و مرطوب می‌توان با استفاده از سیستم تولید آب چگالشی به طور میانگین ۱،۸ کیلوگرم آب در روز در یک متر (۹۰کیلوگرم آب در لوله ۵۰ متری) استحصال نمود.

کلید واژگان: آب‌شیرین‌کن، دستگاه تقطیرکن خورشیدی، آب خوراکی و کشاورزی، هوای مرطوب، سیستم تولید آب چگالشی

قالب پیش‌نویس مقالات مجله مهندسی مکانیک مدرس

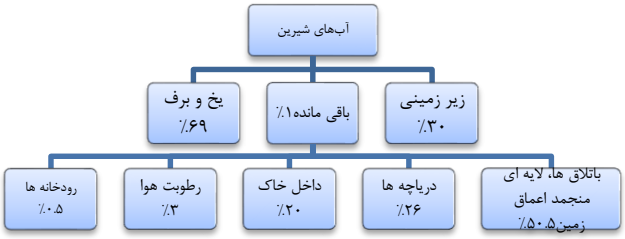
۱-مقدمه

آب ماده حیاتی است که به طور یکنواخت در سطح کره زمین موجود نیست و نقاط مختلف کره زمین با کمبود آب مواجه هستند. آب از دو بعد اقتصادی و بهداشتی حائز اهمیت است زیرا به حرکت درآورنده‌ی چرخ صنعت و رونق‌بخش فعالیت‌های کشاورزی می‌باشد و همچنین آب سالم تضمین‌کننده سلامت انسان است.

با توجه به رشد روزافزون جمعیت جهان و ثابت بودن منابع آبی می‌توان نتیجه گرفت که معضل کمبود آب به مشکل بزرگی در آینده تبدیل خواهد شد. باید راهکارهای جدید و مطمئنی برای حفظ منابع آبی در دسترس و همچنین تولید و تصفیه آب شیرین درپیش‌گرفته شود. براساس گزارش منتشر شده از موسسه پاسیفیک اوکلند کالیفرنیا در صورت عدم اتخاذ تصمیمی پیشگیرانه، بیش از ۷۶ میلیون نفر در سال ۲۰۲۰ در اثر بیماری‌های ناشی از آب‌های آلوده جان خود را از دست خواهند داد و بیماری‌های ناشی از آب‌های آلوده بیش‌تر از ایدز سلامت جامعه جهانی را تهدید می‌نماید. لذا استفاده از فن‌آوری‌ها و راهکارهای نوین جهت تهیه آب شیرین امری ضروری محسوب می‌گردد [۱].

۲-وضعیت آب در جهان

حجم آب‌های زمین در حدود ۱،۳۸۶ میلیارد متر مکعب است که حدود ۷۰ درصد از کره زمین را پوشانده است، ولی سهم کمی از آب‌های موجود برای مصارف بهداشتی و کشاورزی قابل استفاده می‌باشد. آب اقیانوس‌ها، دریاها و اغلب دریاچه‌ها به علت شوری بیش از حد و داشتن املاح معدنی، برای مقاصد بهداشتی، کشاورزی و صنعتی غیر قابل استفاده است. تنها ۲،۵ درصد از این آب‌ها، شیرین می‌باشد که توزیع آن در حوزه‌های مختلف در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۱: توزیع آب در حوزه‌های مختلف

در حال حاضر بیش از ۲۵ کشور در جهان با بحران کمبود آب مواجه هستند و حدود ۱،۵ میلیارد نفر به آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند و ۱،۷ میلیارد نیز در آستانه شرایط بحرانی کمبود آب قرار دارند و تا سال ۲۰۲۵ میلادی حدس زده می‌شود که ۲/۳ از جمعیت کل جهان با کمبود آب مواجه شوند [۲].

۳-طبقه‌بندی میزان آب شیرین

معمولاً مصارف آب شیرین را به سه دسته کلی زیر تقسیم‌بندی می‌کنند:

۱- مصارف خانگی (نوشیدن، پخت و پز و بهداشت): تنها ۸ تا ۱۰ درصد از مصرف جهانی را به خود اختصاص می‌دهد.

۲- مصارف صنعتی: حدود ۲۰ درصد از مصرف جهانی آب شیرین را به خود اختصاص داده‌است و از سال ۱۹۵۰مصرف این حوزه رو به افزایش است.

۳- مصارف کشاورزی: بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب شیرین دنیا است و از آغاز قرن ۲۰ تا کنون مصرف آب شیرین این حوزه در دنیا به علت افزایش جمعیت جهان تقریباً ۷ برابر شده‌است. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵ نیاز آب برای بخش کشاورزی ۲۰ درصد افزایش یابد [۳].

۴-وضعیت منابع و سرانه آب در ایران

کشور ایران ۱،۱ درصد از مساحت کل جهان را به خود اختصاص داده‌است اما فقط ۰،۳۴ درصد از آب‌های موجود در جهان را در اختیار دارد. ایران دارای اقلیم آب و هوایی خشک و نیمه خشک است و میزان بارندگی در آن یک‌چهارم بارندگی متوسط در جهان است. با توجه به ارقام بالا ایران یکی از فقیرترین کشورها از لحاظ منابع آبی سرانه در جهان می‌باشد[۳].

روش‌های مبارزه با بحران آب در کشور عبارتند از:

۱. اصلاح مصرف آب در کشور به گونه‌ای تغییر یابد که سهم مصرف آب کشاورزی از ۹۲ درصد به ۸۷ درصد در بیست سال آتی کاهش دهد.
۲. بازدهی آب در بخش کشاورزی به ازای هر متر مکعب آب از وضع فعلی به دو برابر در بیست سال آتی افزایش یابد.
۳. اولویت مصرف آب به ترتیب برای شرب، بهداشت، صنعت و کشاورزی اختصاص یابد.
۴. رعایت استانداردهای ملی حفاظت کیفی منابع آب توسط مصرف-کنندگان الزامی شود.
۵. استفاده از شیوه نمک‌زدایی و سایر روش‌های نوین برای تولید آب شیرین رایج گردد.
۶. آب شرب از سایر آب‌ها تفکیک شود [۳].

۵-استفاده از شیوه نمک‌زدایی برای تأمین آب شیرین در کشور

برای مقابله با مشکل تأمین آب شرب ایران، برای مناطقی که نیاز به آب شرب دارند با روش‌های معمول نمی‌توان آب شیرین را از آب‌های سطحی و زیر زمینی تأمین کرد، زیرا در بسیاری موارد باید هزینه‌های زیادی صرف کرد.

امروزه برای شیرین‌کردن آب شور رودخانه، دریا و آب‌های زیرزمینی از آب‌شیرین‌کن‌ها استفاده می‌کنند. بخش‌هایی از جنوب کشور به خصوص استان‌های حاشیه خلیج فارس و دریای عمان از این آب‌شیرین‌کن‌ها به طور کامل استفاده می‌کنند و میزان قابل توجهی از آب مصرفی آن مناطق از این طریق تأمین می‌شود. درحال حاضر سیستم‌های بخار، مثل مجموعه‌های چابهار به شیرین‌سازی آب شور مبادرت می‌کنند و هم‌اکنون روش‌های جدید و پیشرفته‌ای در کشور برای شیرین‌سازی آب‌های شور در حال ساخت و راه اندازی است.

فناوری آب‌شیرین‌کن‌ها در حال حاضر با سه چالش تخریب محیط زیست، بالا بودن هزینه تمام شده و وابستگی تجهیزات به خارج از کشور مواجه است. تولید هر متر مکعب آب شیرین ۵۰ تا ۸۰ سنت هزینه دارد، که این مقدار به طور مستمر در حال کاهش است [۱].

۶-انواع روش‌های تولید آب شیرین

روش‌های مختلفی برای تولید آب شیرین وجود دارد که در این بخش به دو روش متداول نمک‌زدایی و استفاده از رطوبت هوا پرداخته می‌شود.

۶-۱-نمک زدایی

تولید آب شیرین از آب شور دریا به روش تبخیری، قدیمی‌ترین روشی است که در قرن ۱۷ میلادی برای تأمین آب مورد نیاز کشتی‌ها استفاده می‌شد. تکنولوژی نمک‌زدایی در سطح صنعتی از اواخر قرن ۱۹ میلادی آغاز شد و امروزه به یکی از شیوه‌های اساسی برای تولید آب شیرین در بسیاری از کشورها تبدیل شده است. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵ بیش از ۶۰ درصد آب مورد نیاز جمعیت کره زمین از طریق فرآیند نمک‌زدایی تأمین شود [۴].

۶-۱-۱-انواع روش‌های متداول نمک‌زدایی

شیوه‌های بسیار زیادی برای نمک‌زدایی وجود دارد و به روش‌های مختلف می‌توان آن‌ها را دسته‌بندی کرد. در متداول‌ترین تقسیم‌بندی آب‌شیرین‌کن‌ها را به دو گروه عمده حرارتی (توأم با تغییر فاز) و غشایی (بدون تغییر فاز) دسته‌بندی می‌کنند[۲].

حرارتی(تبخیری- تقطیری)

نمک‌زدایی بیش از ۶۰ درصد آب‌ها با این روش انجام می‌شود، در این روش همانند چرخه طبیعی آب در طبیعت، به آب شور گرما داده می‌شود و سپس بخار آن به آب خالص تبدیل می‌گردد. در صنعت و آزمایشگاه‌ها، به آب تا نقطه‌ی جوش گرما می‌دهند تا بیشترین بازده را داشته باشد. (نقطه‌ی جوش توسط تنظیم کردن فشار محیطی آب کنترل می‌شود. با توجه به این نکته که با کاهش فشار، دمای جوش آب کاهش می‌یابد). معروف‌ترین روش‌های حرارتی عبارتند از [۳]:

تقطیر موثر چندمرحله‌ای[۱]

این روش برای تولید مقادیر زیاد آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم‌ها مبتنی بر تولید آب در مراحل مختلف هستند. ساده‌ترین نوع آن‌ها، آب‌شیرین‌کن تک‌مرحله‌ای است که برای مصارف صنعتی کاربرد دارد. اصلی‌ترین اجزا این واحد شامل تبخیرکننده، چگالنده و پیش‌گرمکن آب تغذیه است. تبخیرکننده شامل مبدل حرارتی، فضای بخار، حوضچه آب تبخیر نشده، محل خروج گازهای غیرقابل چگالش، سیستم اسپری آب و یک فیلتر می‌باشد [۳].

تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای[۲]

پرکاربردترین شیوه نمک‌زدایی است و درصد زیادی از واحدهای تولید آب شیرین را به خود اختصاص داده‌است. این سیستم‌ها حالت خاصی از آب‌شیرین‌کن‌های موثر چندمرحله‌ای تبخیری هستند که در بخش قبل توضیح داده‌شد و بر این اساس کار می‌کنند که ابتدا آب دریا وارد پیش‌گرمکن شده و سپس در یک گرمکن توسط بخار افزایش دما می‌یابد (این مقدار دما بر حسب نوع پیش‌تصفیه می تواند تا ۱۲۰ درجه سانتی گراد برسد) [۳و۵]. بعد از این مرحله آب تغذیه وارد محفظه‌ای می‌شود که فشاری پایین‌تر از فشار دمای آب تغذیه دارد. آب تغذیه در رویارویی با این افت فشار ناگهانی، مافوق گرم شده و قسمتی از آن تبخیر می‌شود و غلظت باقی مانده آب شور افزایش می‌یابد. بخار تشکیل شده از یک فیلتر عبور کرده و در برخورد با لوله‌های پیش‌گرمکن چگالیده می‌شود [۵].

این سیستم‌ها شامل سه بخش ورودی حرارت، دفع حرارت و بازیافت حرارت است، بخش‌های دفع و بازیافت حرارت شامل تعدادی محفظه است که به هم مرتبط می‌باشند. آب دریا قبل از ورود به گرمکن از کویل‌های اتاقک خلأ می‌گذرد که این عمل به دو منظور انجام می‌شود:

۱- پیش‌گرمایش آب سرد دریا قبل از ورود به گرمکن
۲- چگالش بخار در اتاقک‌ها برای تهیه آب شیرین

انرژی مورد نیاز در این روش شامل انرژی الکتریکی برای پمپ کردن آب شور و انرژی حرارتی برای گرم کردن آب شور می‌باشد. لازم به ذکر است که تبخیر ناگهانی آب بر روی لوله‌های چگالنده ایجاد رسوب می‌کند، در نتیجه این قسمت نیاز به تعویض و تمیزکردن مکرر دارد [۳].

متراکم‌سازی بخار[۳]

این روش عموماً برای واحدهای نمک‌زدایی کوچک و یا متوسط کاربرد دارد. در این روش بر خلاف روش تقطیری چند مرحله‌ای، گرمای لازم برای تبخیر از مبادله مستقیم گرما با بخار آب تولیدی بویلر به‌دست نمی‌آید بلکه از طریق فشرده سازی بخار به‌دست می‌آید. از کمپرسورهای مکانیکی و حرارتی برای استفاده از گرمای حاصل از چگالش برای تبخیر آب شور استفاده می‌شود.

در سیستم های متراکم ساز با کمپرسورهای مکانیکی ابتدا کمپرسور، خلأیی را در محفظه اصلی ایجاد می‌کند و بخار را از محفظه به داخل مکیده و سپس آن را فشرده می‌کند، در نتیجه دمای بخار بالا می‌رود و بعد به داخل دسته لوله‌هایی که در داخل همین محفظه تعبیه شده است هدایت می‌شود که باعث داغ شدن سطح لوله‌ها می‌گردد، آن‌گاه آب دریا بر روی این دسته لوله‌های داغ اسپری می‌شود که در نتیجه قسمتی از آب دریا تبخیر می‌گردد و بخار آب حاصل به آب خالص تبدیل می‌شود.

در سیستم‌های متراکم ساز با کمپرسورهای حرارتی ابتدا بخار ورودی از طریق نازل وارد کمپرسور می‌شود و انبساط آن باعث می‌شود تا در لوله اصلی فشار پایین آید و بخار از محفظه به داخل کمپرسور مکیده شود. حال این دو بخار با هم ترکیب شده و سپس فشرده می شوند و بعد وارد دسته لوله‌ها می‌شوند که در اثر تقطیر گرمای لازم برای تبخیر آب دریا که با سطح لوله‌ها در تماس است را ایجاد می‌کنند [۳] و [۵].

غشایی

در طبیعت، غشاها نقش مهمی در جداسازی یون‌های نمک از آب ایفا می‌کنند و در دو روش تجاری به نام الکترودیالیز و اسمز استفاده می‌شوند [۳].

اسمز معکوس[۴]

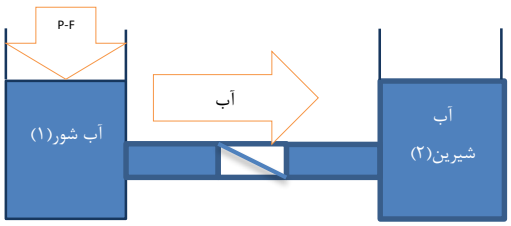
دو ظرف مطابق شکل زیر یکی حاوی آب نمک و دیگری حاوی آب خالص که توسط یک لوله به یکدیگر متصل بوده و هر دو دارای ارتفاع مساوی از آب باشند فرض کنید. برای برقراری تعادل در یون‌های سدیم و کلرید از ظرف آب نمک، یون‌های نمک به صورت نفوذ مولکولی به ظرف آب خالص انتقال یافته تا تعادل غلظت بین هر دو ظرف برقرار گردد. اما اگر بین این دو ظرف و در مسیر جریان آب، یک غشا قرار گیرد که فقط اجازه عبور مولکول‌های آب را دهد، یون‌های نمک اجازه عبور نخواهند داشت. لذا برای برقراری تعادل در غلظت، آب خالص از ظرف شماره دو به ظرف شماره یک انتقال می‌یابد و این عمل تا آن جا ادامه می‌یابد که افزایش ارتفاع حاصله در ظرف آب نمک، فشار مضاعف ایجاد کرده و اجازه انتقال آب از ظرف شماره دو به شماره یک را ندهد، این فشار را فشار اسمزی می‌گویند.

۱. Multi Effect Distillation(MED)
۲. Multi Stage Flash Distillation(MSF)
۳. Vap (VC)
۴. Revers Osmosis

قالب پیش‌نویس مقالات مجله مهندسی مکانیک مدرس

شکل ۲: تعادل یون‌های نمک و آب

چنان‌چه جریان را برعکس کرده یعنی از ظرف شماره یک به ظرف شماره دو انتقال دهیم لازم است فشاری بیشتر از فشار اسمزی به محلول آب نمک اعمال کنیم که این فشار را فشار عملیاتی می‌گویند و آنرا با P نمایش می دهند. لذا مقدار فشار خالص که باعث می‌گردد آب از ظرف آب نمک به ظرف آب خالص انتقال یابد برابر با $P - F$ است و فشار محرکه نامیده می‌شود.



شکل ۳: اسمز معکوس

در مثال مذکور فرآیند اسمز معکوس تشریح شد، اما در صنعت لازم است تصفیه آب به صورت پیوسته انجام شود و اگر بخواهیم مطابق با این مثال عمل تصفیه را انجام دهیم، افزایش غلظت نمک در ظرف یک باعث ازدیاد فشار اسمز معکوس می‌شود، لذا بایستی دائماً فشار عملیاتی را زیاد کرده و برای جلوگیری از این مشکل همواره جریانی از قسمت محلول غلیظ از دستگاه خارج می‌کنیم تا غلظت ثابت بماند [۶].

الکترودیالیز

در روش الکترودیالیز از پتانسیل الکتریکی برای جداسازی آب و نمک استفاده می‌شود به‌طوری که نمک را از یک غشا عبور داده و آب در پشت غشا باقی بماند. در حالی که در روش اسمز همان‌طور که گفته‌شد به جای پتانسیل الکتریکی از فشار استفاده می‌شود.

در این روش از ورقه‌های فلزی استفاده می‌گردد که نقش رزین‌های تبادل-کننده‌های یونی را بازی می‌کنند؛ یعنی ورقه‌هایی نقش آنیون و ورق هایی نقش کاتیون را به عهده دارند. اصل اساسی در این فرآیند، انتخاب یون‌های موجود در آب است و با پیل‌های راه انداز جریان الکتریسته مستقیم کار می‌کنند. بدین صورت که اگر آب نمک از بین دو ورقه آنیون و کاتیون عبور کند و جریان الکتریسیته مستقیمی از محلول عبور داده‌شود، کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در آب شور جذب ورقه‌ها شده و آب ما بین دو ورقه نمک زدایی می‌گردد [۷].

استفاده از روش اسمز معکوس نسبت به روش‌های دیگر دارای مزایایی است که عبارتند از:

- اقتصادی بودن نسبت به روش‌های دیگر
- مصرف انرژی کم نسبت به روش تقطیری
- امکان کار مداوم بدون نیاز به توقف دوره‌ای
- بهره‌برداری آسان، کنترل کاملاً اتوماتیک و کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری
- میزان بازدهی بالا در کل سیستم
- حذف باکتری و ویروس‌ها
- عدم استفاده از مواد شیمیایی مضر برای انسان
- تولید آب با کیفیت مطابق استانداردها

یکی از معایب استفاده از روش اسمز معکوس این است که معمولاً برای خروج ذرات بسیار ریز آب ورودی باید از پیش تصفیه استفاده شود [۳].

روش‌های ترکیبی

در روش‌های ترکیبی روش اسمز معکوس و روش تقطیری با هم ترکیب می‌شوند تا مجموعه‌ای را بهینه کنند که به آن تأسیسات هیبریدی می‌گویند. روش‌های ترکیبی تولید آب شیرین، در راستای بهینه‌کردن هزینه‌ها می‌باشد.

علاوه بر دسته‌بندی‌های فوق سیستم‌های تولید آب شیرین را می‌توان بر مبنای منبع انرژی نیز دسته بندی کرد که عبارتند از نمک زدایی با انرژی خورشیدی، زمین گرمایی، تبادل یونی، غشایی، انجمادی و ... [۳].

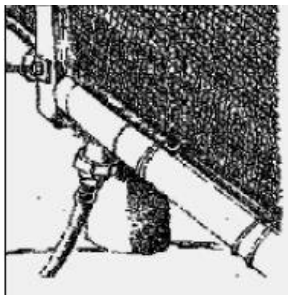
۶-۲-تولید آب شیرین از رطوبت هوا

یکی دیگر از راه‌های تولید آب شیرین استفاده از رطوبت هوا است که در قسمت‌های بعد به بررسی این موضوع پرداخته می‌شود.

۶-۲-۱-شناسایی و بررسی اولیه تولید آب شیرین از رطوبت هوا

در دهه‌های اخیر، دانشمندان برای پاسخگویی به نیازهای آبی ناشی از رشد جمعیت همواره در فکر بهبود استفاده از منابع موجود و بهره‌برداری از آن‌ها بوده‌اند. بارش‌های جوی هر ساله میلیون‌ها مترمکعب آب منابع سطحی و زیرزمینی کره زمین را تغذیه می‌کنند، اما بهره‌برداری به صورت کامل از این منابع به دلیل پراکندگی زمانی و مکانی نامناسب، ممکن نیست.

به‌ندرت به این موضوع توجه می‌شود که در دنیا مخازن طبیعی آب زیادی به شکل بخار آب وجود دارد. در چرخه هیدرولوژیکی تمام بخار آب ناشی از تابش انرژی خورشید، به باران تبدیل نمی‌شود بلکه بخشی از بخار آب به دلیل پایین بودن تراکم به بارش تبدیل نگردیده و به صورت مرئی یا نامرئی در فضا پراکنده می‌شود. حال مسئله مهم این است که چگونه می‌توان بخار آب موجود در هوا را به آب شیرین تبدیل کرد. در سال‌های اخیر پژوهشگران با استفاده از قوانین ساده فیزیکی موفق به جمع‌آوری مه و رطوبت بالای هوا و تبدیل آن‌ها به آب شیرین شده‌اند.



شکل ۳: نمونه‌ای از دستگاه تولید آب از رطوبت هوا[۳]

ایده تولید آب از رطوبت موجود در هوا از قرن‌ها پیش، شاید از آغاز زراعت و کشاورزی ذهن بشر را به خود مشغول کرده است. مشاهده گیاهانی که به طور طبیعی، رطوبت هوا را به صورت شبنم بر روی برگ‌های خود ظاهر می-کردند و یا در زمان مه‌های غلیظ، باریکه ای از جریان آب بر روی تنه آن‌ها قابل مشاهده بود، امکان تهیه آب از هوای مرطوب را در اذهان قوت می‌بخشد.

جمع آوری مه توسط گیاهان و انجام آزمایشات علمی و تجربی بر پوشش گیاهی از اواخر قرن هجدهم شروع شده است. از طرف دیگر جمع‌آوری مه‌های وزشی توسط جمع کننده‌های مصنوعی ساخت بشر یک زمینه نسبتاً جدید تحقیقات را ایجاد کرده‌است. در جاهایی که تهیه آب به مقادیر کم، حتّی با هزینه زیاد توجیه پذیر است، طراحی و ساخت دستگاه هایی که با مصرف انرژی، یک سیستم خنک کننده ایجاد و با استخراج رطوبت از هوا و تراکم آن به آب، مقادیری آب شیرین تولید می کند، عملاً رایج گردیده است.

در شرایط آب و هوایی ایران علیرغم وجود مکان هایی که آن را در بعضی از ماه ها قطب رطوبتی کره زمین دانسته‌اند تا کنون در خصوص تولید آب از رطوبت هوا به جز کوشش‌های فردی و پراکنده‌ای که بعضی افراد با انگیزه شخصی انجام داده‌اند، فعالیتی سازمان یافته و برنامه ریزی شده که نهادی مسئول و پیگیر آن باشد، صورت نگرفته است.

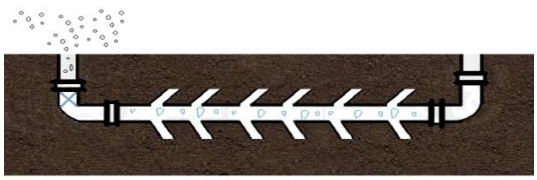
یکی از اولین کارهایی که در زمینه گرفتن آب از رطوبت هوا استفاده شده است، در روسیه انجام شد. این سیستم شامل کانال‌های قائم و شیب‌دار در زمین برای جمع آوری آب از هوای اتمسفر توسط خنک کاری هوای مرطوب تا دمایی پایین‌تر از دمای نقطه شبنم در زیر خاک بود. این سیستم ها به سیستم‌های تولید آب چگالشی۱ معروف هستند [۱].

۶-۲-۲سیستم‌های تولید آب چگالشی

طرح کلی این سیستم‌ها به گونه‌ای است که به وسیله انتقال هوای مرطوب در سطح زمین، به لوله‌هایی که در زیر خاک مدفون می‌باشند، هوا چگالش می‌یابد (به علت خنک تر بودن زیر زمین نسبت به سطح آن، زمین همانند چگالنده عمل می‌کند) و آب شیرین تولید می‌شود، آب حاصل برای مصارف خوراکی و آبیاری زمین های کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مصارف خوراکی از لوله‌های بدون سوراخ استفاده می‌شود و در انتهای این لوله‌ها، مکانی برای جمع‌آوری آب چگالیده شده وجود دارد، اما برای آبیاری زمین‌های کشاورزی از لوله‌های سوراخ‌داری استفاده می‌شود که به طور مستقیم به وسیله‌ی سوراخ‌های مدفون در زیرزمین آن‌ها، آب شیرین تولیدی به اطراف زمین تغذیه می‌شود و این عمل همانند آبیاری قطره‌ای است و مصرف آب را حداقل و اتلافات حاصل از تبخیر آب را حذف می‌کند [۸].

شکل۴: سیستم تولید آب چگالشی برای مصارف خوراکی



شکل۵: سیستم تولیدآب چگالشی برای مصارف کشاورزی

آب شیرین تولیدشده در مصارف خوراکی باید در برگیرنده‌ی املاح و عناصر معدنی برای بدن باشد که کمبود برخی از آن‌ها باعث ایجاد بیماری‌های مختلف می‌شود. بنابراین باید قبل از مصرف، مواد معدنی لازم به آن‌ها اضافه گردد، بدین‌گونه که آب را از یک فیلتر خاک و شن عبور می‌دهند، این روش اغلب برای آب‌های معدنی تجاری نیز استفاده می‌شود. در ضمن آب تولیدی اسیدی می‌باشد و باید تصفیه گردد که این عمل با اضافه کردن قرص هایی به آب انجام می‌شود [۱].

برای افزایش بازدهی سیستم‌های تولید آب چگالشی از دستگاه تقطیرکن-خورشیدی[۲] استفاده می‌شود. در این دستگاه با تبخیر آب شور دریا به وسیله‌ی انرژی خورشید، هوا با رطوبت کم یا خشک وارد آن می‌شود و به وسیله‌ی بخار آب موجود در آن، رطوبت زایی و گرم می‌گردد و سپس توسط فن وارد لوله های مدفون در زیر خاک می‌شود. دستگاه های تقطیرکن‌خورشیدی به وسیله‌ی افزایش رطوبت موجود در هوا و افزایش دمای هوای ورودی به لوله (افزایش اختلاف دمای هوا و زیر زمین) نرخ چگالش و در نتیجه مقدار آب تولیدی را افزایش می‌دهد [۸].

از آنجایی که دمای سطح زمین در طول روز از دمای زیر زمین کمتر است، از این سیستم در طول روز برای سرمایش هوای مرطوب استفاده می‌کنند. ولی در طول شب، دمای زیر زمین، به علت گرمایش خاک در طول روز و سرد شدن هوای محیط در شب، بیشتر از دمای سطح زمین است بنابراین از هوای محیط برای سرمایش خاک استفاده می‌کنند [۸].

سیستم‌های تولید آب چگالشی در کشورهای شمال آفریقا و نمونه‌های آزمایشگاهی آن در تونس و الجزایر (نزدیک دریای مدیترانه) توجه زیادی را به خود جذب کرده‌است [۹].

۷-منابع رطوبت در ایران

در کشور ما دو منطقه اقلیمی مرطوب وجود دارد:

۱. منطقه گرم و مرطوب سواحل و جزایر جنوب کشور
۲. منطقه معتدل و مرطوب شمالی

منطقه اول، خشک و کم باران و منطقه دوم پر باران می‌باشد. نوار ساحلی جنوب ایران که از دماغه گواتر در سرحد پاکستان شروع شده و تا اروند ادامه دارد، از منطقه رطوبتی نوع اول می‌باشد. این نوار مسافتی برابر با ۲۰۰۰ کیلومتر را در بر می‌گیرد که به دو بخش سواحل خلیج فارس و دریای عمان قابل تفکیک است.

مهم‌ترین ویژگی‌های این منطقه عبارت‌اند از:

- میزان کم ریزش‌های جوی سالیانه
- عدم جریان‌های سطحی دائمی (رودخانه‌ها)
- سیلاب‌های فصلی و غیرقابل کنترل در اثر رگباری بودن بارش در کوتاه‌مدت، که حجم بسیار زیادی از آب‌های روان را به وجود آورده و در نتیجه از دسترس خارج شده و به دریا منتقل می‌گردد.
- در هنگام آبیاری زمین‌های کشاورزی، حجم بالایی از آب‌ها در اثر تبخیر تلف می‌شود.

۱. Condensation Irrigation (CI)

۲. Solar Still

قالب پیش‌نویس مقالات مجله مهندسی مکانیک مدرس

از دیگر ویژگی‌های اقلیمی این منطقه وجود رطوبت نسبی بالای هوا به خصوص نزدیک به ساحل است که در دماهای زیر نقطه شبنم باعث تغذیه خاک از رطوبت هوا می‌شود. این مقدار رطوبت به باران جن(پنهان) موسوم است و تا حدی جبران کمبود باران می‌نماید. در نواحی ساحلی، رطوبت نسبی هوا بالا بوده و با توجه به این‌که جهت بادهای غالب جنوبی است و دامنه نوسان آن نیز زیاد نمی‌باشد، چنان‌چه منابع آبی این مناطق برای مصارف کشاورزی و شرب کفایت نکند، می‌توان از رطوبت هوا به‌خصوص در فصل تابستان که به آب بیش‌تری نیاز بوده آب قابل توجهی جمع‌آوری کرد و مورد استفاده قرار دارد. در فصل گرما، رطوبت نسبی هوا در این منطقه به‌ویژه با تاثیر جریان‌های موسمی هندوستان به حدود ۸۰٪ می‌رسد و می‌توان از این موقعیت استفاده نمود [۱].

ماهیت و رفتار بخار آب

همان‌طور که می‌دانیم هوای بدون بخار آب را هوای خشک می‌گویند. این نوع هوا حتی در جو بیابان‌ها و عرض‌های بالای جغرافیایی هم وجود ندارد. بخار آب نقش بسیار مهمی در بیان گرما و پدیده‌های مختلف جوی زمین به عهده دارد. زیرا بخار آب، امواج تشعشعی با طول موج بلند جو را جذب می‌کند و اگر مقدار آن کم باشد، اختلاف دما بسیار زیاد می‌شود.

منبع عمده رطوبت جو، اقیانوس‌ها هستند که تقریباً سطح زمین را پوشانده‌اند. بخار آب تبخیرشده از سطح اقیانوس‌ها به وسیله بادها به داخل قاره‌ها حمل می‌شود. سایر منابع رطوبت جوی به ترتیب عبارتند از منابع آب کوچکتر از اقیانوس، پوشش‌های گیاهی و سطوح مرطوب زمین، که نسبت به اقیانوس‌ها از اهمیت کمتری برخوردار بوده ولی قابل توجه‌اند.

بخار آب جو، همواره در حال تبدیل و تغییر است، با تبخیر آب در حالت‌های جامد و مایع به مقدار بخار آب افزوده می‌شود. در حالی‌که از طریق تراکم و ریزش جوی از مقدار بخار آب کاسته می‌شود. هم‌چنان‌که بادها رطوبت را به شکل گاز از اقیانوس‌ها به خشکی حمل می‌کنند، به همین ترتیب بادها، رودخانه‌ها و یخچال‌ها آن را دوباره به شکل گاز، مایع یا جامد به دریاها رها می‌کنند.

ظرفیت هوا در نگهداری بخار آب به شدت به دمای آن بستگی دارد، هرچه 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، به صورت ذرات ریز آب (بخار آب اشباع) ظاهر می‌شود [۱].

مفاهیم اولیه ترکیبات جو

ترکیب هوای خشک و بخار آب با تغییر حالت خود به مایع و جامد در فرآیندهای ترمودینامیکی نقش عمده‌ای را در آب و هوا ایفا می‌نماید. به‌همین منظور در این قسمت به شناخت ترکیبات جو و متغیرهایی که در تعیین وضعیت هوا تأثیر دارند می‌پردازیم.

جو زمین لایه‌ای از گازها است که زمین را احاطه کرده است. اگرچه جو زمین ظاهراً به دلیل ماهیت گازی شکل خود بی‌وزن به نظر می‌رسد، ولی دارای جرم هستند. این گازها به‌وسیله نیروی ثقل یا جاذبه زمین نگه داشته‌شده‌اند. ترکیبات تشکیل دهنده جو هوای خشک و بخار آب می باشد [۱].

هوای خشک:

جو زمین مخلوطی از گازها است. حدود ۹۹ درصد حجم هوای زمین را دو گاز عمده ازت و اکسیژن تشکیل می‌دهد که ازت با ۷۸ درصد، پیکره اصلی جو زمین می‌باشد، بعد از آن اکسیژن قرار دارد و سایر گازها فقط یک درصد حجم آن را شامل می‌شوند. گازهای تشکیل‌دهنده جو در هوای خشک (بدون بخار آب و آلاینده ها) بصورت حجمی در سطح دریا در جدول زیر نشان داده شده است [۱].

بخار آب:

به طور میانگین ۱درصد حجم جو زمین را بخار آب تشکیل می‌دهد. اما عملاً ممکن است در یک مکان، هوا فاقد بخار آب و در نقطه دیگر(مناطق ساحلی) تا ۴ درصد بخار آب وجود داشته باشد. گرچه وزن مولکولی بخار آب از وزن سایر عناصر تشکیل‌دهنده جو کمتر است، با این وجود بخار آب عمدتاً در لایه‌های پایین جو متمرکز می‌باشد. بیشترین مقدار بخار آب در لایه مجاور سطح زمین بوده و با افزایش ارتفاع، به شدت از میزان آن کاسته می شود. بالا بودن مقدار بخار آب در نزدیکی سطح زمین دارای دو علت اصلی بوده که عبارتند از:

۱- وجود دریا و اقیانوس‌ها که منبع اصلی تأمین بخار آب است.

۲- سرد بودن لایه‌های فوقانی جو که مانع از نفوذ و نگه داشتن بخار آب می‌شوند [۱].

توزیع زمانی و مکانی رطوبت هوا

توزیع رطوبت در جو به توزیع دمای هوا بستگی دارد. به همین دلیل مقدار بخار آب موجود جو، در استوا به مراتب بیشتر از مقدار آن در قطبین زمین است. توزیع بخار آب با توجه به گرادیان مداری دمای هوا در دو نیمکره صورت می‌گیرد.

همچنین توزیع افقی رطوبت با توجه به جنس و وضعیت سطحی که هوا روی آن قرار می‌گیرد، متغیر است. به همین دلیل هوای روی دریاها معمولاً تا ۸۰ درصد رطوبت را به خود می‌گیرند، در حالی که هوای روی قاره‌ها، مثل نواحی کویری، ممکن است فقط تا ۲۰ درصد رطوبت داشته باشند. همچنین به این علت که دما در فصل های سال و مکان های مختلف متغیر می‌باشد، رطوبت نیز در فصل‌ها و محل‌های مختلف متغیر است. مسئله فوق با توجه به روزهای گرم و مرطوب تابستان و هوای سرد و خشک زمستان قابل درک می‌باشد.

اگر چه بخار آب بسیار سبک‌تر از هوا می‌باشد ولی چنان که قبلاً نیز بیان شد، چون دمای هوا در نزدیک زمین و سطح اقیانوس‌ها بیشتر است، رطوبت در سطح پایین زمین و نزدیک سطح دریا دیده می‌شود.

توزیع زمانی و مکانی دمای خاک:

درجه حرارت زمین تحت تاثیر دمای اطراف و تابش خورشید می‌باشد. بر همین اساس، درجه حرارت زمین در سال تغییر می‌کند. تغییر دمای سطح زمین می‌تواند بر اساس تابع سینوسی محاسبه شود:

$$T(0,t) = \overline{T}_G + A_{Gs}\ cos(\frac{2\pi}{365}(t - t_0)) \quad (۱)$$

اساس و پایه فرمول بالا از حل معادله انرژی گذرا با زمان، در یک جسم نیمه بی‌نهایت یک بعدی به دست آمده است که به شرح زیر است:

$$T(y,t) = \overline{T}_G + A_{Gs}\, e^{-y(\sqrt{\frac{365}{\pi K_s}})}\ cos(\frac{2\pi}{365}(t - t_0 - \frac{y}{2}\sqrt{\frac{365}{\pi K_s}})) \quad (۲)$$

که در $T(y,t)$ آن توزیع دما خاک بر اساس زمان و عمق است و $\overline{T}_G$ دمای میانگین زمین، A_{Gs} دامنه سالانه دمای سطح زمین، t تاخیر زمانی از تاریخ شروع دلخواه (روز) و K_s میانگین ضریب هدایت گرمایی خاک است. تقریبا از عمق ۱۰متر به بعد دمای خاک ثابت در نظر گرفته می‌شود[۱۰].

۸-پژوهش‌های پیشین در این زمینه

سیستم‌های تولید آب چگالشی در قالب پایان‌نامه‌هایی در مقطع کارشناسی‌ارشد در دانشگاه لولی سوئیس[۱] مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفت و نتایج تئوری و عملی آن‌ها در سال ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ در قالب مقاله ارائه شده است که خلاصه‌ای از آن‌ها به شرح زیر است:

ویدگرن[۲] سال۱۹۸۶: مطالعات اولیه در زمینه‌ی سیستم‌های تولید آب چگالشی (CI) را انجام داد. این سیستم دارای ۲۰۰ لوله به قطر ۱۰ سانتی‌متر و طول ۵۰ متر بود. هوای مرطوب توسط یک فن با توان ۱۰-۳ کیلو وات به لوله‌های مدفون سوراخ‌دار، به زیرزمین هدایت شد[۸].

نوردل[۳] سال ۱۹۸۷: یک نمونه کوچک آزمایشگاهی، در کشور سوئد برای آبیاری گل‌خانه ساخت. این سیستم براساس اختلاف دمای شب و روز کار می‌کرد.

در طول روز، دمای هوای مرطوب از زیر زمین بالاتر است در نتیجه به وسیله‌ی انتقال حرارت، زیرزمین گرم شده و هوای مرطوب خنک و چگالیده می‌شود.

اما در طول شب هوای گلخانه سردتر از زیرزمین است، زیرا زیرزمین به وسیله‌ی هوای مرطوب در طول روز گرم شده است. در نتیجه در شب با به گردش درآوردن هوای سرد محیط در زیر زمین، باعث سرمایش آن شده و بدین ترتیب خاک برای انجام سرمایش زیر زمینی هوا در روز بعد آماده می‌گردد. این سیستم بعد از سال ۱۹۸۷ نیز با موفقیت کار کرد.

شرکت سوئیسی اینجنیربرو[۴] سال ۱۹۹۳: در این مطالعه سیستم‌هایی مورد بررسی قرار گرفت که در آن آب دریا توسط لوله‌های پلاستیکی به‌وسیله انرژی خورشید تبخیر و هوای جو در اثر گذر از این بخار مرطوب می‌شد. آب تولیدی در این سیستم برای پرورش گوجه فرنگی مورد استفاده قرارگرفت.

گولامان[۵] سال ۱۹۸۶: انتقال حرارت در لوله‌های صاف (تولید آب شیرین خوراکی) و لوله‌های سوراخ دار(تولید آب کشاورزی) را مقایسه کرد. نتایج نشان داد که در لوله‌های سوراخ‌دار انتقال گرما ۵۰ درصد بیش‌تر از لوله‌های صاف است و در نتیجه سرعت چگالش (تولید آب شیرین)، در این لوله ها بیش‌تر از لوله‌های صاف است.

گاستافن[۶] و همکارش سال ۱۹۹۹: مطالعه تئوری و آزمایشگاهی بر روی این سیستم‌ها برای سیستم‌های کشاورزی ادامه دادند.

جنی لیندبلام[۷] و همکارش سال ۲۰۰۶: مطالعه تئوری بر روی سیستم‌های تولید آب چگالشی خوراکی را انجام دادند و آب تولیدی را در انتهای لوله جمع‌آوری کردند. با مدلسازی عددی معادلات انتقال حرارت در نرم افزار متلب مقدار $1.8\ kg/(day.m)$ آب تولیدی را با استفاده از حل عددی به دست آوردند.

جنی لیندبلام و همکارش در سال۲۰۰۷، برای رطوبت زنی هوا از دستگاه تقطیرکن‌خورشیدی استفاده کردند. در مصارف کشاورزی معادلات انتقال جرم و حرارت و در مصارف خوراکی فقط معادلات انتقال حرارت، برای به دست آوردن مقدار آب تولیدی در مدلسازی عددی مورد توجه قرارگرفت. در ادامه‌ی مطالعه‌ی قبل با حل عددی برای مصارف کشاورزی $3.1\ kg/(day.m)$ به دست‌آوردند. در این مطالعه نمونه آزمایشگاهی برای مصارف کشاورزی و خوراکی نیز ساخته شد[۸].

۹-نکاتی درباره‌ی سیستم‌های تولید آب کشاورزی

در این سیستم‌ها گرمای محسوس و نهان از هوای مرطوب به لوله انتقال داده می‌شود و از دیواره‌ی لوله‌ها این گرما در محیط خاک انباشته می‌شود. سرعت چگالش در طول لوله به جنس خاک، خواص ورودی هوای مرطوب، جنس و شکل لوله وابسته است.

طراحی و عملکرد این سیستم‌ها با توجه به شرایط آب و هوایی هر منطقه و محصولات خاص کشاورزی انجام می‌شود.

افزایش دمای خاک تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد برای اغلب محصولات کشاورزی و تحریک ریشه آن‌ها برای رشد مناسب است. درحالی که دمای بالاتر از این مقدار می‌تواند به محصولات آسیب برساند، که با کنترل خواص ورودی هوا، می‌توان از افزایش آن از مقدار بحرانی جلوگیری کرد. بنابراین باید طوری طراحی شوند که در پایان هر روز دمای آن‌ها حداکثر ۴۵ درجه سانتی‌گراد شود.

فضای بین لوله‌ها بر اساس نرخ آبیاری محصولات مختلف و دمای خاک طراحی می‌شود. لوله‌ها باید در فاصله‌ی مناسبی از گیاهان قرار بگیرند تا آب نفوذی در خاک، بتواند توسط ریشه‌ی آن‌ها مکیده شود. علاوه بر این باید مکانیزم مناسبی برای این سیستم‌ها طراحی شود تا بر نیروی جاذبه غلبه کند [۹].

۱۰-نکاتی درباره‌ی سیستم‌های تولید آب خوراکی

در این سیستم‌ها انتقال حرارت کم‌تری نسبت به سیستم‌های تولید آب کشاورزی صورت می‌گیرد زیرا انتقال جرم نداریم، در نتیجه سرعت چگالش و مقدار آب تولیدی کم‌تر است.

نرخ چگالش به طول و قطر لوله وابسته است. جاگذاری لوله‌ها با توجه به مصارف منطقه و مساحت زمین در دسترس انجام می‌شود. نرخ چگالش با عمق خاک رابطه مستقیم دارد (در عمق‌های خیلی کم، نرخ چگالش کاهش می‌یابد)، علاوه بر این در عمق های کم، نیروهای سطحی باعث از بین رفتن لوله‌ها می‌شود. از طرفی با افزایش عمق لوله‌ها هزینه جاگذاری لوله‌ها و فن (برای مکش هوا به داخل لوله‌های مدفون) افزایش می‌یابد. بنابراین باید عمق بهینه با توجه به نکات ذکر شده انتخاب شود.

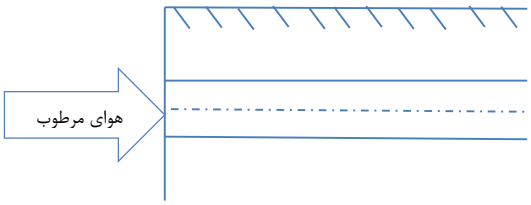
ماکزیمم دمای خاک در این سیستم‌ها مطرح نیست اما اختلاف دمای بین هوای در حال جریان و خاک، نرخ چگالش را تعیین می‌کند، افزایش بیش از اندازه دمای خاک باعث می‌شود نرخ چگالش کاهش یابد [۸].

۱۱-مدلسازی انتقال حرارت در خاک و مقدار آب تولیدی در سیستم‌های تولید آب خوراکی

در این قسمت با توجه به شکل زیر معادلات حاکم برای سیستم‌های تولید آب خوراکی به دست آورده می‌شود.

۱. Luleå(LTU)
۲. Widegren
۳.Nordell
۴. Ingenieurbüro
۵.Göhlman
۶. Gustafson
۷. Jenny Lindlom

قالب پیش‌نویس مقالات مجله مهندسی مکانیک مدرس



شکل ۶: لوله مدفون در خاک

در این مدلسازی فرض می‌شود:

- شرایط هوای ورودی به لوله همانند سرعت، فشار، دما، رطوبت هوا معلوم در نظر گرفته می‌شود.
- بخار آب و هوا گاز ایده آل در نظر گرفته می‌شود.

انتقال حرارت از دیواره‌های لوله به خاک به دو صورت انتقال حرارت جابه-جایی(q_{conv}) و گرمای نهان برای چگالش بخار آب موجود در هوای مرطوب (q_{cond}) صورت می‌گیرد:

$$q_{conv} = h_a.(T_a - T_p) \quad (۳)$$

که در آن h_a ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوای مرطوب است که تابع خواص هوا می باشد. T_a دمای هوا و T_p دمای دیواره لوله است.

$$q_{cond} = L\,.h_m.\left(\varphi\,.\rho_{(T_a)} - \rho_{(T_p)}\right) \quad (۴)$$

که در آن $\mathbf{L}$ گرمای نهان بخار آب، $\mathbf{h_m}$ ضریب جابه‌جایی جرمی، $\boldsymbol{\varphi}$ رطوبت نسبی، $\boldsymbol{\rho_{(T_a)}}$ و $\boldsymbol{\rho_{(T_p)}}$ به ترتیب چگالی بخار اشباع در دمای هوای در حال جریان و دمای دیواره لوله است.

و h_m را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$h_m = \frac{h\,.\alpha^{1/3}\,.D_{as}^{2/3}}{k_a} \quad (۵)$$

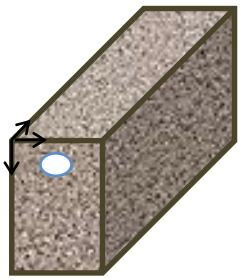
αضریب پخش‌گرمایی خاک و D_{as} ضریب پخش هوا − آب و k_a ضریب هدایت هوا است.

انتقال حرارت از دیواره لوله به خاک از طریق موازنه انرژی برابر است با:

$$q_{conv} + q_{cond} = -k_s\,\nabla T.\hat{n} \quad (۶)$$

که در آن $\mathbf{k_s}$ ضریب رسانندگی خاک و $\boldsymbol{\nabla T.\hat{n}}$ تغییرات دما در جهت عمود بر دیواره‌های لوله است.

دما در معادلات بالا مجهول است که با حل معادله انرژی می‌توان توزیع آن را به‌دست آورد. با فرض خواص حرارتی ثابت برای خاک، معادله انتقال حرارت گذرا به صورت زیر می‌باشد:



شکل ۷: مدل سه بعدی لوله مدفون در خاک

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \quad (۷)$$

حل معادله بالا با استفاده از روش‌های عددی (حجم کنترل یا تفاضل محدود) با شش شرط مکانی و یک شرط زمانی به شکل زیر به دست آید:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad @\ x = 0, L_x$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad @\ z = 0, L_z$$

$$Y = Cte \quad @y = L_y \quad (۸)$$

دمای سطح زمین طبق معادله (۱) با زمان تغییر می‌کند و حول لوله شار ثابتی مطابق زیر برقرار است:

$$q_{conv} + q_{cond} = m_c\,C\,(T_{in} - T_{out}) \quad (۹)$$

در یک حجم کنترل در طول لوله مقدار گرمای مبادله شده برابر است با:

$$\begin{aligned} q = \dot{m}_i\,.\left[T_{a,i}\,.c_{v,i} + \frac{L_i\,.w_i}{1+w_i} + \frac{p_i}{\rho_i} + \frac{{c_i}^2}{2}\right] \\ + \dot{m}_{w,i}\,.c_p.T_i \\ - \dot{m}_{i+1}\,.\left[T_{a,i+1}\,.c_{v,i+1}\right. \\ \left. + \frac{L_{i+1}\,.w_{i+1}}{1+w_{i+1}} + \frac{p_{i+1}}{\rho_{i+1}} + \frac{{c_{i+1}}^2}{2}\right] \\ - \dot{m}_{w,i+1}\,.c_p.T_{i+1} \end{aligned} \quad (۱۰)$$

و در نهایت در طول یک حجم کنترل، نرخ تغییرات دبی جرمی بخار برابر است با:

$$\dot{m}_w = \pi.D.\Delta z.\frac{q}{L} \quad (۱۱)$$

لازم به ذکر است از انتقال جرم در این مساله می‌توان صرف نظر کرد زیرا مقدار آب تولیدی در مقایسه با هوای مرطوب ورودی قابل صرف نظر کردن است. معادلات حاکم بر سیستم‌های کشاورزی به دلیل اضافه شدن معادلات انتقال جرم خاک در طول لوله، پیچیده‌تر است[۸].

۱۲-بحث و نتیجه گیری

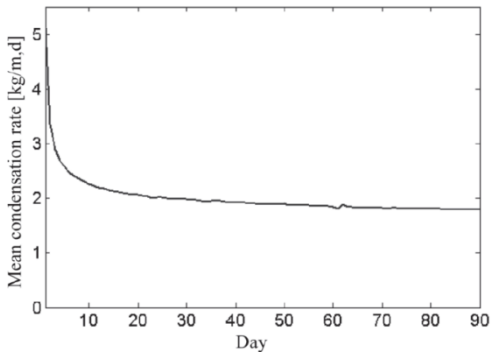
مطالعات انجام شده در مجموعه پژوهش‌های ذکر شده برای سیستم‌های تولید آب چگالشی خوراکی، با شرایط آب و هوایی مطابق جدول زیر بیانگر این موضوع

است که به ازای هر متر لوله، تقریباً ۲ لیتر آب در شبانه روز تولید می‌گردد. در مناطق کم‌آب و دور افتاده، این مقدار آب تولیدی، قابل توجه می‌باشد.

جدول ۱ : شرایط هوای مرطوب ورودی

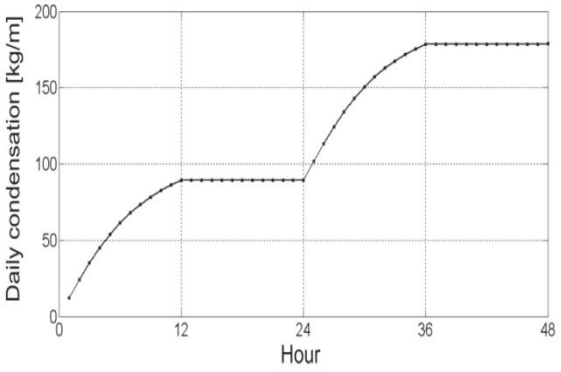
خصوصیات	مقادیر
دمای ورودی به لوله	۶۰ درجه سانتی گراد
رطوبت نسبی	۷۰ درصد
سرعت	۳،۵ متر بر ثانیه
فشار اولیه	۱ اتمسفر
قطر لوله	۲۰ سانتی متر
طول لوله	۵۰ متر
عمق خاک	۵۰ سانتی متر

در نمودار شکل ۸ میانگین مقدار آب تولید شده در طی ۹۰ روز بر متر لوله در هر روز نمایش داده شده است. همان طور که ملاحظه می کنید در روزهای اولیه مقدار آب تولیدی بیش‌تری داریم زیرا بر اساس گذشت زمان دمای خاک افزایش می‌یابد و بعد از ۹۰ روز به یک حالت پایدار در مقدار دبی آب تولیدی می رسیم.



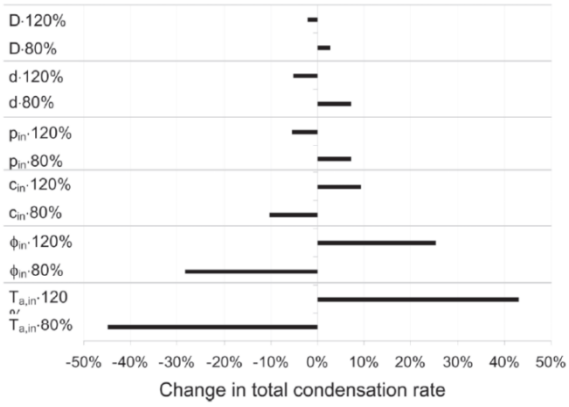
شکل ۸: مقدار دبی آب تولیدی در ۹۰روز

در نمودار شکل ۹ مقدار آب تولیدی در روزهای ۹۰ و ۹۱ که پایدار است ملاحظه می‌شود. نرخ آب تولیدی با گذشت زمان، کاهش می‌یابد که نشان دهنده آن است که دمای خاک افزایش یافته است و همان طور که ذکر شده در شب آبی تولید نمی‌شود و زمین خنک می‌شود.



شکل ۹: مقدار دبی آب تولیدی در حالت پایدار

در نمودار شکل ۱۰، آنالیز حساسیت نسبت به شرایط هوای ورودی مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار آب تولیدی بیش‌تر تحت تاثیر دما و رطوبت ورودی است.



شکل۱۰: آنالیز حساسیت

۱۳-پیشنهاد برای تحقیقات آتی

مدلسازی و ساخت سیستمی با شرایط آب و هوایی مناطق جنوبی ایران در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود که لحاظ نمودن مراحل زیر در آن، توصیه می‌گردد:

- حل معادله انرژی، یافتن مقدار انتقال حرارت و به دست‌آوردن مقدار آب تولیدی با استفاده از روش‌های عددی
- بهینه‌سازی سیستم چگالشی با شرایط اقلیمی ایران
- ساخت نمونه آزمایشگاهی
- آنالیز فنی و اقتصادی استحصال آب شیرین با روش چگالشی و مقایسه آن با سایر سیستم‌های آب‌شیرین‌کن موجود در بازار

۱۴-فهرست علائم

$\overline{T_G}$	دمای میانگین زمین (°C)
A_{Gs}	دامنه سالانه دمای سطح زمین (°C)
t	زمان (s)
k	ضریب هدایت ($W/m^{۲}°C$)
D_{as}	ضریب پخش هوا _ آب ($m^{۲}/s$)
q	شار ($W/m^{۲}$)
C_v	ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت ($j/kg°C$)
c	سرعت (m/s)
h_m	ضریب جابه‌جایی جرمی (m/s)
h	ضریب انتقال حرارت جابه جایی($W/m^{۲}°C$)
m	جرم(kg)
L	طول (m)
D	قطر(m)
w	رطوبت مطلق

علایم یونانی

قالب پیش‌نویس مقالات مجله مهندسی مکانیک مدرس

α	ضریب پخش‌گرمایی خاک(m^2/s)
ρ	چگالیkg/m^3
φ	رطوبت نسبی

زیرنویس‌ها

s	خاک
a	هوا
P	لوله
w	آب
conv	انتقال حرارت جابه جایی
cond	انتقال حرارت چگالشی
in	ورودی لوله
out	خروجی لوله
x	محوردر جهت افقی
y	محور در راستای عمق زمین
z	محور در طول لوله

۱۵-مراجع

[۱] علی محمدی، *تولید آب با استفاده از تقطیر هوا در لوله‌های مدفون در زیر زمین*، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۱

[۲] M.W. Rosegrant X. Cai and S.A. Cline, *World Water and Food to ۲۰۲۵: Dealing with Scarcity*, International Food Policy Research Institute, ۲۰۰۲.

[۳] A.Fallahmadar, *Study Type of common seawater Desalination and modeling a solar desalination system,* Department of Mechanical Engineering, K.N.T.U University, Iran, B.Sc Thesis ۲۰۰۹. (In Persian)

[٤] Soteris A.Kalogirou, *Seawater Desalination using renewable energy sources. Progress in Energy and Combustion Science ۲۰۰۵.*

[٥] MM.Amirabadi farahani, *Technical and Economic Assessment reverse osmosis desalination,* Department of Mechanical Engineering, K.N.T.U University, Iran, M.Sc Thesis ۲۰۱۲. (In Persian)

[٦] R.Hosseini, *Thermo economic Optimization Of a Combined Power With Desalination plant taking equipment Reliability into consideration*, Department of Mechanical Engineering, K.N.T.U , Iran, Master Thesis ۲۰۱۱. (In Persian)

[۷] H.Hamedi, *Simulation and Analysis solar Desalination*, Department of Mechanical Engineering, K.N.T.U , Iran, M.Sc Thesis ۲۰۱۱. (In Persian)

[۸]. Jenny Lindblom, Bo Nordell, *Water production by underground condensation of humid air*, Desalination ۱۸۹ (۲۰۰٦) ۲٤۸-۲٦۰

[۹]. Jenny Lindblom, Bo Nordell, *Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation*, Desalination ۲۰۳ (۲۰۰۷) ٤۱۷-٤۳٤

[۱۰]. Vahid Khalajzadeh, Moien Farmahini, Ghassem Heidarinejad, *A novel integrated system of ground heat exchanger and indirect evaporative cooler* , Energy and Buildings ٤۹ (۲۰۱۲) ٦۰٤-٦۱۰