

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

تولید آب شیرین با استفاده از سرمایه‌های زیرزمینی

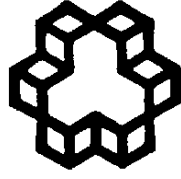
هوای مرطوب و انرژی خورشید

استاد راهنما

دکتر مجید بازارگان

دانشجو

مریم احمدی علی بیگلویی



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

تولید آب شیرین با استفاده از سرمایه‌های زیرزمینی

هوای مرطوب و انرژی خورشید

استاد راهنما

دکتر مجید بازارگان

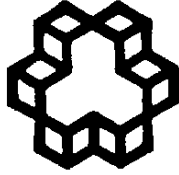
استاد مشاور

دکتر مصطفی مافی

دانشجو

مریم احمدی علی بیگلویی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی ارشد

هیئت داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان "تولید آب شیرین با استفاده از سرمایه‌ش زیرزمینی هوای مرطوب و انرژی خورشید" توسط مریم احمدی‌علی‌بیگلویی، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی مورد تأیید قرار می‌دهند.

۱. استاد راهنما: جناب آقای دکتر مجید بازارگان
۲. استاد مشاور: جناب آقای دکتر مصطفی مافی
۳. ممتحن داخلی اول: جناب آقای دکتر سیروس آقاجفی
۴. ممتحن داخلی دوم: جناب آقای دکتر علی کشاورز ولیان
۵. نماینده تحصیلات تکمیلی: جناب آقای دکتر سیروس آقاجفی

تأییدیه صحت و اصالت نتایج

به نام خدا

موضوع پایان‌نامه: تولید آب شیرین با استفاده از سرمایه‌ش زیرزمینی هوای مرطوب و انرژی

خورشید

استاد راهنما: دکتر مجید بازارگان

استاد مشاور: دکتر مصطفی مافی

دانشجو: مریم احمدی علی بیگلویی

شماره دانشجویی: ۹۱۲۱۰۵۴

این جانب مریم احمدی علی بیگلویی به شماره دانشجویی ۹۱۲۱۰۵۴ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه توسط شخص این جانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید می‌باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ مدرک یا امتیازی توسط این جانب در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب مصوب دانشگاه به‌طور کامل رعایت شده است.

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری به صورت

پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد. ضمناً متن این صفحه نیز باید در

نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و

بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع، مجاز نمی باشد.

تشکر و قدردانی

سپاس خداوند مهربان را که در انجام این پایان نامه و در تمام مراحل زندگی همواره یاری گر من

بوده است و هر چه دارم از اوست.

بر خود لازم می دانم از زحمات و راهنمایی های سازنده و موثر استادان بزرگوام جناب آقای

مجید بازارگان و جناب آقای دکتر مصطفی مافی تشکر و قدردانی نمایم که با صبر و حوصله ی فراوان

راهنمای من بوده اند.

همچنین از پدر و مادر عزیزم و دوستان مهربانم به پاس فداکاری ها و حمایت های بی دریغشان

کمال قدردانی را دارم که وجودشان همواره مایه ی دلگرمی و آرامش است.

چکیده

به دلیل کمبود منابع آب شیرین کشف راه‌های جدید تولید آب از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از روش‌های نوین تولید آب شیرین در ظرفیت‌های پایین، استفاده از رطوبت هوا است که به عنوان سیستم تولید آب چگالشی شناخته می‌شود. در این روش، جریان هوای گرم و مرطوب به درون لوله‌های مدفون در زمین هدایت می‌شود، هوا در طول لوله به دلیل انتقال حرارت با خاک به تدریج خنک شده و در دمایی کمتر از نقطه شبنم، بخار موجود در آن به صورت قطرات آب، روی سطح لوله ظاهر می‌گردد. در این پژوهش سیستم‌های تولید آب خوراکی با هدف به دست آوردن طول بهینه و ارزیابی پارامترهای موثر بر میزان آب تولید شده در سیستم‌های چگالشی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند. بدین منظور ابتدا معادلات حاکم بر مسئله، شرایط مرزی و اولیه آن برای یک سیستم تولید آب چگالشی نمونه، استخراج گردید و سپس با استفاده از روش حجم محدود، گسسته‌سازی آن تشریح می‌شود. در ادامه یک نمونه سیستم تولید آب خوراکی در نرم‌افزار متلب در یک شبانه‌روز مدل‌سازی می‌شود. نتایج عددی نشان می‌دهند، در لوله‌ای به قطر ۰/۲ متر، در عمق نیم متری زمین و طول پانزده متر که دمای هوای ورودی ۷۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۷۰ درصد است، تقریباً ۱,۲ کیلوگرم آب در روز استحصال خواهد شد. آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مختلف و جنس خاک نیز انجام شده است. نتایج آنالیز نشان می‌دهند که دمای هوا و رطوبت نسبی بیش‌ترین تأثیر را بر میزان آب تولید شده دارند و به ترتیب ماسه، شن، خاک مرطوب و خاک رس بیشترین آب را تولید می‌کنند. مدل‌سازی خنک‌کاری سیستم‌های چگالشی در طول شب نیز نشان دهنده آن است که خاک می‌تواند پس از ۱۲ ساعت خنک‌کاری شبانه تقریباً به دمای اولیه روز قبل برسد.

کلمات کلیدی: سیستم‌های تولید آب چگالشی، هوای گرم و مرطوب، خاک، آنالیز حساسیت، خنک‌کاری در

طول شب

۱-مقدمه	۱
۱-۱ وضعیت آب در جهان	۳
۲-۱ طبقه‌بندی مصارف آب شیرین	۳
۳-۱ وضعیت منابع و سرانه آب در ایران	۴
۴-۱ مروری بر روش‌های متداول شیرین‌سازی آب در کشور	۵
۱-۴-۱ نمک‌زدایی	۶
۵-۱ تولید آب شیرین از رطوبت هوا	۱۲
۱-۵-۱ سیستم‌های تولید آب چگالشی	۱۴
۲-۵-۱ پژوهش‌های پیشین	۱۵
۶-۱ اهداف پژوهش کنونی	۱۷
۲- توصیف سیستم تولید آب چگالشی مورد مطالعه	۱۸
۱-۲ ماهیت و رفتار بخار آب	۱۹
۱-۲-۱ مفاهیم اولیه ترکیبات جو	۱۹
۲-۱-۲ توزیع زمانی و مکانی رطوبت هوا	۲۱
۳-۱-۲ توزیع دما در خاک	۲۱
۲-۲ انواع سیستم‌های تولید آب چگالشی	۲۲
۱-۲-۲ سیستم‌های تولید آب خوراکی	۲۲
۲-۲-۲ سیستم‌های تولید آب کشاورزی	۲۳
۳-۲ دستگاه تقطیرکن خورشیدی	۲۴
۴-۲ تشریح مدل مورد مطالعه	۲۴
۳- معادلات حاکم بر مسئله، مدل‌سازی و اعتبارسنجی	۲۶
۱-۳ معادلات حاکم	۲۷
۱-۱-۳ انتقال حرارت هوا	۲۷
۲-۱-۳ انتقال حرارت خاک	۲۹
۲-۳ تحلیل جریان	۲۹
۱-۲-۳ شبکه‌بندی میدان حل	۳۱
۲-۲-۳ الگوریتم حل عددی	۳۲
۳-۳ گسسته‌سازی معادلات حاکم	۳۳
۱-۳-۳ معادله انرژی خاک	۳۳
۲-۳-۳ معادله انرژی برای هوا	۳۴
۴-۳ شرایط مرزی و اولیه	۳۶
۱-۴-۳ شرایط مرزی خاک	۳۶

- ۳۷..... ۲-۴-۳ شرایط مرزی هوا.
- ۳۸..... ۳-۴-۳ شرایط اولیه.
- ۳۸..... ۵-۳ فرآیند ترمودینامیکی در طول لوله.
- ۳۹..... ۶-۳ جنس لوله.
- ۴۰..... ۷-۳ بازده سیستم.
- ۴۰..... ۸-۳ فرضیات ساده سازی.
- ۴۱..... ۹-۳ تحلیل پایداری.
- ۴۳..... ۱۰-۳ خنک کاری در طول شب.
- ۴۴..... ۱۱-۳ اعتبارسنجی مدل عددی.
- ۴۴..... ۱-۱۱-۳ استقلال از شبکه.
- ۴۵..... ۲-۱۱-۳ مقایسه با نتایج تحقیقات پیشین.
- ۴۸..... ۴- نتایج مدل سازی.
- ۴۹..... ۱-۴ تولید آب شیرین از سیستم های چگالشی در طول روز.
- ۴۹..... ۱-۴-۱ دمای هوا در طول لوله.
- ۵۰..... ۲-۴-۱ طول های کوتاه لوله.
- ۵۱..... ۳-۴-۱ طول های بلند لوله.
- ۵۴..... ۴-۴-۱ مقایسه انتقال حرارت جابه جایی و چگالشی.
- ۵۵..... ۵-۴-۱ تاثیر سرعت ورودی.
- ۵۵..... ۶-۴-۱ تاثیر دمای هوا.
- ۵۶..... ۷-۴-۱ تاثیر رطوبت نسبی.
- ۵۷..... ۸-۴-۱ تاثیر دمای خاک.
- ۵۷..... ۹-۴-۱ تاثیر قطر لوله.
- ۵۸..... ۱۰-۴-۱ تاثیر جنس لوله.
- ۵۹..... ۱۱-۴-۱ تاثیر جنس خاک.
- ۶۰..... ۱۲-۴-۱ آنالیز حساسیت.
- ۶۱..... ۱۳-۴-۱ بازده سیستم.
- ۶۲..... ۲-۴-۲ خنک کاری سیستم های چگالشی در طول شب.
- ۶۳..... ۱-۲-۴ دمای هوا و خاک در طول لوله.
- ۶۵..... ۲-۲-۴ میزان انتقال حرارت جابه جایی.
- ۶۶..... ۳-۲-۴ کانتور دمای هوا و خاک در طول و زمان های مختلف.
- ۶۹..... ۳-۴ نتیجه گیری.
- ۷۱..... ۴-۴ پیشنهادهایی برای پژوهش های آینده.
- ۷۲..... منابع.

- شکل ۱-۱ توزیع آب‌های شیرین ۳
- شکل ۲-۱ دستگاه آب‌شیرین‌کن موثر تک مرحله‌ای ۸
- شکل ۳-۱ تعادل یون‌های نمک و آب ۱۰
- شکل ۴-۱ فرآیند اسمز معکوس ۱۱
- شکل ۵-۱ نمونه‌ای از دستگاه تولید آب از رطوبت هوا ۱۳
- شکل ۱-۲ سیستم تولید آب چگالشی برای مصارف خوراکی ۲۲
- شکل ۲-۲ سیستم تولید آب چگالشی برای مصارف کشاورزی ۲۳
- شکل ۳-۲ دستگاه تقطیرکن خورشیدی ۲۴
- شکل ۴-۲ شماتیک سیستم مدل‌سازی شده ۲۵
- شکل ۱-۳ شماتیک سه بعدی از قرارگیری لوله در خاک ۲۹
- شکل ۲-۳ شبکه اطراف لوله ۳۲
- شکل ۳-۳ شماتیک سلول خاک برای گسسته‌سازی معادله انرژی ۳۳
- شکل ۴-۳ شماتیک سلول هوا برای گسسته‌سازی معادله انرژی ۳۵
- شکل ۵-۳ شماتیک کاهش دما در طول لوله ۳۹
- شکل ۶-۳ مقدار آب تولید شده در ۹۰ روز در حل عددی لیندبلام و همکارش ۴۶
- شکل ۷-۳ مقدار آب تولید شده در طول‌های مختلف در حل عددی لیندبلام و نوردل ۴۶
- شکل ۸-۳ مقدار آب تولید شده در ۵ روز اول در حل تجربی یوسفی و همکارانش ۴۷
- شکل ۱-۴ نمودار دمای هوای مرطوب در طول لوله در اولین ساعت کارکرد ۴۹
- شکل ۲-۴ نمودار مقدار آب تولید شده برای طول‌های کوتاه لوله در ۱۲ ساعت کارکرد سیستم ۵۰
- شکل ۳-۴ نمودار مجموع انتقال حرارت جابه‌جایی و چگالش برای طول‌های کوتاه ۵۱
- شکل ۴-۴ کانتور دمای خاک و هوای مرطوب برای طول‌های مختلف لوله در آخرین ساعت کارکرد سیستم ۵۲
- شکل ۵-۴ نمودار میزان آب تولید شده برای طول لوله‌های بلند در ۱۲ ساعت کارکرد ۵۳
- شکل ۶-۴ نمودار دمای میانگین برای طول لوله‌های بلند در ۱۲ ساعت کارکرد سیستم ۵۳
- شکل ۷-۴ مقایسه انتقال حرارت جابه‌جایی و چگالشی در طول ۱۵ متر ۵۴
- شکل ۸-۴ طول لوله برای اشباع شدن هوای مرطوب ۵۴
- شکل ۹-۴ تاثیر سرعت ورودی هوای مرطوب بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر ۵۵
- شکل ۱۰-۴ تاثیر دمای هوای ورودی بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر ۵۶
- شکل ۱۱-۴ تاثیر رطوبت نسبی هوای ورودی بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر ۵۶
- شکل ۱۲-۴ تاثیر دمای خاک بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر ۵۷
- شکل ۱۳-۴ نمودار تاثیر قطر لوله بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر ۵۸

- شکل ۴-۱۴ کانتور دمای خاک برای جنس‌های مختلف در آخرین ساعت کارکرد سیستم در ورودی لوله ۶۰
- شکل ۴-۱۵ آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر ۶۱
- شکل ۴-۱۶ بازده سیستم‌های چگالشی بر اساس طول لوله ۶۲
- شکل ۴-۱۷ دمای خاک اطراف لوله و هوا برای اولین ساعت خنک‌کاری شب ۶۳
- شکل ۴-۱۸ دمای هوا در اولین، سومین و ششمین ساعت بعد از خنک‌کاری ۶۴
- شکل ۴-۱۹ دمای هوا در هشتمین، دهمین و دوازدهمین ساعت بعد از خنک‌کاری ۶۴
- شکل ۴-۲۰ دمای خاک اطراف لوله در اولین، ششمین و دوازدهمین ساعت بعد از خنک‌کاری ۶۵
- شکل ۴-۲۱ مقدار انتقال حرارت جابه‌جایی در طول شب برای ۱۵ متر لوله ۶۵
- شکل ۴-۲۲ کانتور دمای خاک و هوا در آخرین ساعت کارکرد سیستم در طول شب ۶۶
- شکل ۴-۲۳ کانتور دمای خاک و هوا در ساعات مختلف کارکرد سیستم در ورودی لوله ۶۸

پایانه
پژوهش

جدول ۱-۱	مصارف بخش‌های مختلف آب در کشورها.....	۴
جدول ۱-۲	درصد گازهای موجود در جو.....	۲۰
جدول ۱-۳	مقایسه روش‌های مختلف حل.....	۳۱
جدول ۲-۳	شرایط مرزی در اطراف استوانه.....	۳۷
جدول ۳-۳	مشخصات هوای ورودی و هندسه مدل.....	۴۴
جدول ۴-۳	استقلال از شبکه در لوله ۱۵ متری.....	۴۵
جدول ۵-۳	مقایسه پژوهش‌های انجام شده در زمینه سیستم‌های تولید آب چگالشی خوراکی.....	۴۷
جدول ۱-۴	ضریب انتقال حرارت هدایتی برای جنس‌های مختلف لوله.....	۵۸
جدول ۲-۴	ضریب هدایت و پخش حرارتی انواع خاک و مقدار آب تولید شده.....	۵۹

پایان
پژوهش

\bar{T}	دمای میانگین زمین ($^{\circ}\text{C}$)
A	دامنه سالانه دمای سطح زمین ($^{\circ}\text{C}$)
t	زمان (s)
t	تاخیر زمانی (s)
k	میانگین ضریب هدایت گرمایی ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$)
L	ضریب پخش هوا-آب (m^2/s)
q	شار حرارتی (W/m^2)
C	ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت ($\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)
c	سرعت (m/s)
h	ضریب جابه‌جایی گرمی (m/s)
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$)
h	آنتالپی (kJ/kg)
m	جرم (kg)
L	طول (m)
D	قطر (m)
w	رطوبت مطلق
C	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)
T	دما ($^{\circ}\text{C}$)
Nu	عدد ناسلت
f	ضریب افت فشار
Re	عدد رینولدز
Pr	عدد پرانتل
Le	عدد لوئیس
Lf	گرمای نهان تبخیر آب
Q	گرمای انتقال یافته (J)
dx	طول سلول در جهت محور x (m)
dy	طول سلول در جهت محور y (m)
dz	طول سلول در جهت محور z (m)
Δt	بازه زمانی (s)
P	فشار (pa)
P	محیط (m)
R	ثابت جهانی گاز

C	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ($W/m^2\text{C}$)
A	مساحت (m^2)
V	حجم (m^3)
M_{cw}	دبی آب برگشتی به دریا
M_f	دبی آب شور ورودی به تبخیرکننده
T_{cw}	دمای آب دریا (ورودی به پیش گرم کن)
X_f	غلظت آب شور
T_f	دمای خروجی از پیش گرم کن
M_g	دبی آب در مولد بخار
T_g	دمای آب در مولد بخار
M_d	دبی آب تغذیه
T_c	دمای آب تغذیه
T_b	دمای جوش آب تغذیه
M_d	دبی آب شیرین تولید شده با استفاده از جداسازی نمک
T_d	دمای آب شیرین تولید شده با استفاده از جداسازی نمک
F	نیرو
m_w	جرم
L_f	گرمای نهان بخار اب
C_s	ظرفیت گرمایی ویژه خاک
PW	فاصله گره مرکزی از گره شرقی
EP	فاصله گره غربی از گره مرکزی
SP	فاصله گره جنوبی از گره مرکزی
PN	فاصله گره مرکزی از گره شمالی
BP	فاصله گره پشتی از گره مرکزی
PU	فاصله گره مرکزی از گره جلویی
w	رطوبت مخصوص
U	ضریب انتقال حرارت کلی
C_{in}	سرعت ورودی هوا
A	سطح مقطع لوله
L	طول مدل خاک (m)
η	بازده
d_x	عدد انتشار در راستای x
d_y	عدد انتشار در راستای y

d_z	عدد انتشار در راستای Z
P	عدد موج در راستای X
q	عدد موج در راستای Y
R	عدد موج در راستای Z
U^n	دامنه موج

علامت یونانی

α	ضریب پخش گرمایی (m^2/s)
ρ	چگالی (kg/m^3)
φ	رطوبت نسبی
θ	زاویه فاز در راستای X
ϕ	زاویه فاز در راستای Y
φ	زاویه فاز در راستای Z

بالانویس

n	پیمایش در زمان
---	----------------

زیرنویس

s	خاک
a	هوا
v	بخار آب
w	آب
P	لوله
v	هوا
tot	انتقال حرارات کل
c	انتقال حرارت جابه‌جایی
c	انتقال حرارت چگالشی
max	ماکزیمم
min	مینیمم
in	داخل

out
E
W
N
S
B
U
P
e
w
n
s
b
u
i
j
k

بیرون
گره شرقی
گره غربی
گره شمالی
گره جنوبی
گره پشت
گره روبرو
گره مرکزی
گره شرقی
دیوار غربی
دیوار شمالی
دیوار جنوبی
دیوار پشت
دیوار روبرو
موقعیت گره در راستای X
موقعیت گره در راستای Y
موقعیت گره در راستای Z

پایان
پروژه

فصل اول

مقدمه

منابع
پرس
پژوهش

آب منشأ حیات و سرچشمه زندگی است. یکی از راه‌های توسعه کشورها استفاده بهینه از منابع طبیعی خدادادی می‌باشد. از منابع بسیار مهم و حیاتی که در زندگی روزمره انسان‌ها، کشورها و تداوم تولیدات نقش فوق‌العاده دارد، منابع آبی است. آب ماده حیاتی است که به‌طور یکنواخت در سطح کره زمین موجود نیست و بسیاری از نقاط مختلف کره زمین با کمبود آب مواجه هستند. آب از دو بعد اقتصادی و بهداشتی دارای اهمیت است زیرا به حرکت درآورنده‌ی چرخ صنعت و رونق‌بخش فعالیت‌های کشاورزی می‌باشد. همچنین، آب سالم تضمین‌کننده سلامت انسان است.

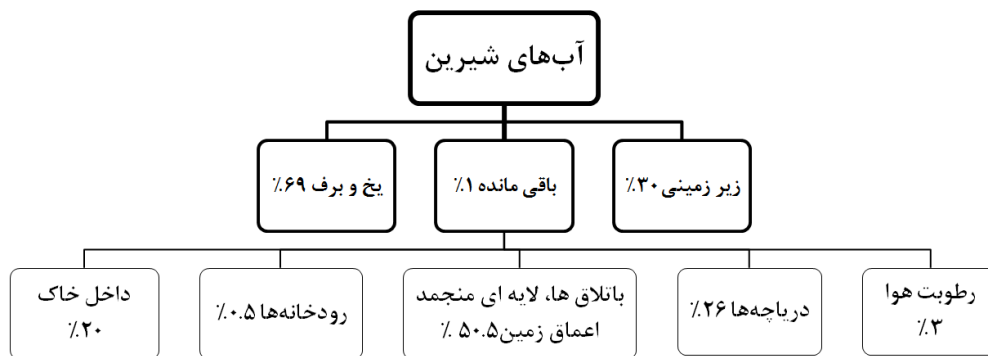
در دو دهه‌ی اخیر، به ویژه سال‌های پایانی قرن بیستم، آب به عنوان موضوعی مهم در کانون مباحث و مذاکرات بین‌المللی قرار گرفته است. پدیده‌های ناشی از نحوه بهره‌برداری و مدیریت منابع آب، به بالاترین رده‌های تصمیم‌گیری در سطوح ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی رسیده است. کشورهای در حال توسعه، سهم زیادی از جمعیت جهان را به خود اختصاص داده‌اند. در اواخر قرن بیستم در این کشورها کمبود آب به یکی از مسائل مهم تبدیل شده است. به دلیل شرایط اقلیمی، بخش وسیعی از مساحت آن‌ها به‌طور طبیعی از کمبود بارندگی رنج می‌برند. بسیاری از مشکلات بهداشتی کشورهای در حال توسعه، عدم برخورداری از آب آشامیدنی سالم است. بدون تأمین آب سالم، سلامت و رفاه جامعه به خطر می‌افتد [۱].

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. در نتیجه باید راه‌کارهای جدید و مطمئنی برای حفظ منابع آبی در دسترس و همچنین تولید و تصفیه آب شیرین در پیش گرفته شود. بر اساس گزارش منتشر شده از موسسه پاسیفیک اوکلند کالیفرنیا [۲] 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.

۱-۱ وضعیت آب در جهان

حجم آب‌های زمین در حدود ۱,۳۸۶ میلیارد کیلومتر مکعب است که حدود ۷۰ درصد از کره زمین را پوشانده است. بخش اندکی 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 [۱ و ۳].

تنها ۲/۵ درصد از کل آب‌های جهان، شیرین می‌باشد که بیش‌تر آن‌ها به صورت یخ و برف در کوهستان‌ها و قطب‌ها واقع شده‌اند. انسان آب شیرین مورد نیاز خود را از رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و آب‌های زیرزمینی تأمین می‌نماید. آب در دسترس برای بشر حدود ۱۱ میلیون کیلومتر مکعب است [۱ و ۳]. توزیع آب‌های شیرین در شکل (۱-۱) نشان داده شده است [۴].



شکل ۱-۱ توزیع آب‌های شیرین [۴]

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

۲-۱ طبقه‌بندی مصارف آب شیرین

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

۱- مصارف خانگی (نوشیدن، پخت و پز و بهداشت): 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 داده است و از سال ۱۹۵۰ مصرف این حوزه رو به افزایش است.

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

به منظور تأمین غذا برای جمعیت روبه‌رشد جهان، توسعه‌ی زمین‌های کشاورزی لازم است. با توسعه زمین‌های کشاورزی، آبیاری و شیوه‌های نوین آن مهم می‌گردد. روش‌های سنتی همانند غرق‌آب کردن علاوه بر افزایش هزینه، باعث تخریب زمین‌های کشاورزی می‌شود [۱].

مصارف بخش‌های مختلف آب در برخی کشورها در جدول (۱-۱) ارایه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود کشورهایی همانند هند و مصر که دارای سرزمین‌های خشک هستند، بیش‌ترین مصرف آب را در حوزه‌ی کشاورزی دارند [۵].

جدول ۱-۱ مصارف بخش‌های مختلف آب در کشورها [۵]

نام کشور	عمومی (خانگی)	صنعتی	سرمایش الکتریکی	کشاورزی
کانادا	٪۱۳	٪۳۹	٪۳۹	٪۱۰
آمریکا	٪۱۰	٪۱۱	٪۳۸	٪۴۱
فنلاند	٪۷	٪۸۵	٪۰	٪۸
هلند	٪۱۴	٪۲۱	٪۴۰	٪۲۵
هند	٪۳	٪۱	٪۳	٪۹۳
مصر	٪۱	٪۰	٪۰	٪۹۸

۳-۱ وضعیت منابع و سرانه آب در ایران

کشور ایران ۱٫۱ درصد از مساحت کل جهان را به خود اختصاص داده است اما فقط ۰/۴۳ 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 ۰/۲۵ بارندگی متوسط در جهان و سهم سرانه مصرف هر ایرانی ۰/۲۵ سرانه جهانی است. با

توجه به ارقام بالا ایران یکی از فقیرترین کشورها از لحاظ منابع آبی سرانه در جهان می‌باشد. 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 مصرف‌کنندگان الزامی شود.
۵. استفاده از شیوه نمک‌زدایی و سایر روش‌های نوین برای تولید آب شیرین رایج گردد.
۶. آب شرب از سایر مصارف تفکیک شود [۱۱].

۴-۱ مروری بر روش‌های متداول شیرین‌سازی آب در کشور

با توجه به اقلیم کشور، تامین آب شیرین یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های کشور، مخصوصاً در مناطق خشک به شمار می‌رود. برای مقابله با مشکل تامین آب شرب ایران، برای مناطقی که نیاز به آب شرب دارند با روش‌های معمول نمی‌توان آب شیرین را از آب‌های سطحی و زیرزمینی تامین کرد زیرا در بسیاری موارد باید هزینه‌های زیادی صرف کرد.

امروزه برای شیرین کردن آب شور رودخانه، دریا و آب‌های زیرزمینی از آب‌شیرین‌کن‌ها در ظرفیت بالا استفاده می‌کنیم. بخش‌هایی از جنوب کشور به خصوص استان‌های حاشیه خلیج فارس و دریای عمان از این آب‌شیرین‌کن‌ها به‌طور کامل استفاده می‌کنند و میزان قابل توجهی از آب مصرفی آن مناطق از این طریق تامین می‌شود. در حال حاضر سیستم‌های بخار، مثل مجموعه‌های چاپهار به شیرین‌سازی آب شور مبادرت می‌کنند و هم‌اکنون روش‌های جدید و پیشرفته‌ای در کشور برای شیرین‌سازی آب‌های شور در حال ساخت و راه‌اندازی است.

فن‌آوری آب‌شیرین‌کن 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 به‌طور مستمر در حال کاهش است [۱]. روش‌های مختلفی برای تولید آب شیرین وجود دارد که در این بخش به دو روش متداول نمک‌زدایی و استفاده از رطوبت هوا پرداخته می‌شود.

۱-۴-۱ نمک‌زدایی

یکی از شیوه‌های تولید آب شیرین استفاده از روش نمک‌زدایی است. نمک‌زدایی، تبدیل آب شور یا آب دریا به آب شیرین برای مصارف صنعتی، کشاورزی و آشامیدنی می‌باشد. در جایی که آب دریا در دسترس می‌باشد و آب با کیفیت بالا نیاز است نمک‌زدایی می‌تواند راه‌حل مناسبی برای مسائل مربوط به کمبود آب باشد [۱].

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 [۶].

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 [۱].

۱-۴-۱-۱ حرارتی (تبخیری - تقطیری)

نمک‌زدایی بیش از ۶۰ درصد آب‌ها با این روش انجام می‌شود، در این روش همانند چرخه 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. با توجه به این نکته که با کاهش فشار، دمای جوش آب کاهش می‌یابد، نقطه‌ی جوش توسط تنظیم کردن فشار محیطی آب کنترل

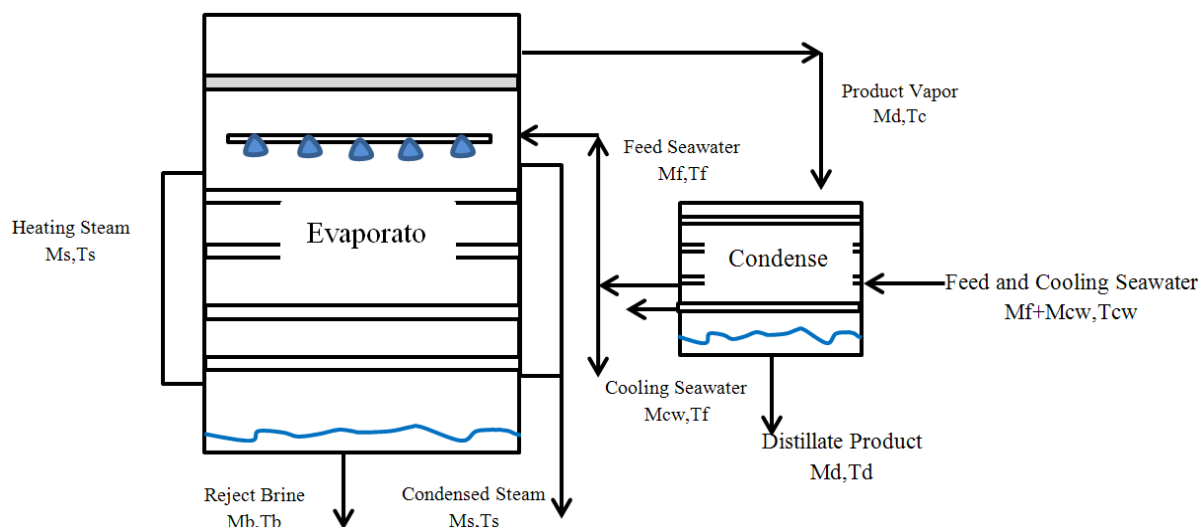
می‌شود. معروف‌ترین روش‌های حرارتی شامل تقطیر موثر چند مرحله‌ای، تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای و متراکم سازی بخار است که در ظرفیت‌های بالا استفاده می‌شود [۷ و ۸]:

تقطیر موثر چند مرحله‌ای^۱ (MED)

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. اجزای اصلی این واحد شامل تبخیرکننده، چگالنده و پیش‌گرم‌کن آب تغذیه است. تبخیرکننده شامل مبدل حرارتی، فضای بخار، حوضچه آب تبخیرنشده، محل خروج گازهای غیرقابل چگالش، سیستم اسپری آب و فیلتر می‌باشد. پیش‌گرم‌کن آب تغذیه، یک مبدل پوسته-لوله با جهت جریان مخالف می‌باشد. آب شور دریا با دبی $M_{cw} + M_f$ در دمای T_{cw} و با غلظت X_f وارد پیش‌گرم‌کن می‌شود و دمای آن به T_f افزایش می‌یابد و قسمتی از آن با دبی M_{cw} به دریا برگشت داده می‌شود.

چگالنده در واقع وظیفه چگالش بخار ورودی از تبخیرکننده را دارد و گرمای اضافی را از سیستم خارج می‌کند. سپس آب شور با دبی M_f وارد تبخیرکننده می‌شود و توسط سیستم پاشش، روی لوله‌های تبخیرکننده پاشیده می‌شود. داخل این لوله‌ها بخار حاصل از یک مولد بخار با دبی M_s و دمای T_s در جریان است. در اثر تبادل حرارت قسمتی از آب تغذیه با دبی M_d و دمای T_c در اثر رسیدن به دمای جوش T_b تبخیر می‌شود و پس از گذشتن از فیلتر، به پیش‌گرم‌کن می‌رود و در نهایت آن‌جا چگالنده و به عنوان آب شیرین از سیستم خارج می‌شود. باقی‌مانده آب تغذیه در حوضچه تبخیرکننده جمع و به خارج از سیستم هدایت می‌شود. همچنین بخار داخل لوله‌های تبخیرکننده پس از تبادل حرارت از اواپراتور خارج می‌شود. آب تغذیه قبل از ورود به سیستم، نیازمند هوازدایی و تصفیه شیمیایی می‌باشد.

^۱-Multi Effect Distillation(MED)



شکل ۱-۲ دستگاه آب شیرین کن موثر تک مرحله‌ای

آب شیرین کن‌های چندمرحله‌ای از ترکیب چند واحد متوالی تشکیل می‌شوند، به طوری که بخار ورودی در هر مرحله، در مرحله‌ی بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم‌ها از لحاظ چگونگی آب تغذیه به سه نوع تغذیه پس‌رو، پیش‌رو و موازی تقسیم می‌شوند.

لازم به ذکر است که به دلیل افت فشار ناشی از خطوط و فیلتر، دمای وارد شونده به پیش‌گرم‌کن پایین‌تر از دمای بخار قبل از ترک تبخیرکننده است. یکی دیگر از نکات مهم در عملکرد این سیستم‌ها تخلیه گازهای قابل چگالش می‌باشد، وجود این گازها باعث کاهش سطح انتقال حرارت می‌شود [۹].

تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای^۱ (MSF)

این روش پرکاربردترین شیوه نمک‌زدایی است و درصد زیادی از واحدهای تولید آب شیرین را به خود اختصاص داده است. این سیستم‌ها حالت خاصی از آب شیرین کن‌های موثر چندمرحله‌ای تبخیری هستند که در بخش قبل توضیح داده شد و بر این اساس کار می‌کنند که ابتدا آب دریا وارد پیش‌گرم‌کن می‌شود و سپس در یک گرم‌کن توسط بخار افزایش دما می‌یابد (این مقدار دما بر حسب نوع پیش‌تصفیه می‌تواند تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد برسد) [۹ و ۱].

²- Multi Stage Flash Distillation(MSF)

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 و قسمتی از آن تبخیر می‌شود و غلظت باقی‌مانده آب شور افزایش می‌یابد. بخار تشکیل شده از یک فیلتر عبور می‌کند و در برخورد با لوله‌های پیش‌گرم‌کن چگالیده می‌شود [۹].

سیستم‌های MSF 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 اتا‌فک خلأ می‌گذرد که این عمل به دو منظور انجام می‌شود:

الف: پیش‌گرمایش آب سرد دریا قبل از ورود به گرمکن

ب: چگالش بخار در اتا‌فک‌ها 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 تمیز کردن مکرر دارد [۱۱].

متراکم‌سازی بخار^۱ (VC)

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

در سیستم‌های VC 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

³ - Vapor Compression (VC)

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.

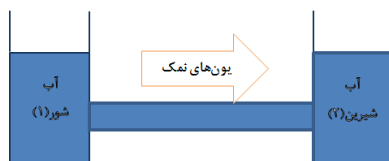
در سیستم‌های VC با کمپرسورهای حرارتی ابتدا بخار ورودی از طریق نازل وارد کمپرسور می‌شود و انبساط آن باعث می‌شود تا در لوله اصلی فشار پایین آید و بخار از محفظه به داخل کمپرسور مکیده شود. حال این دو بخار با هم ترکیب شده و سپس فشرده می‌شوند و بعد وارد دسته لوله‌ها می‌گردند که در اثر تقطیر، گرمای لازم برای تبخیر آب دریا که با سطح لوله‌ها در تماس است را ایجاد می‌کنند [۹ و ۱].

۱-۴-۲ غشایی

در طبیعت، غشاها نقش مهمی در جداسازی یون‌های نمک از آب ایفا می‌کنند و در دو روش تجاری به نام اسمز و الکترودیالیز استفاده می‌شوند [۱].

اسمز معکوس^۱

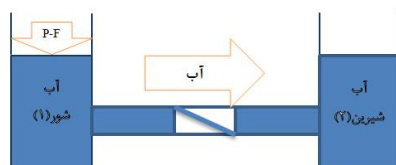
دو ظرف مطابق شکل (۱-۳) یکی حاوی آب نمک و دیگری حاوی آب خالص که توسط یک لوله به یکدیگر متصل بوده و هر دو دارای ارتفاع مساوی از آب باشند فرض کنید. برای برقراری تعادل در یون‌های سدیم و کلرید از ظرف آب نمک، یون‌های نمک به صورت نفوذ مولکولی به ظرف آب خالص انتقال یافته تا تعادل غلظت بین هر دو ظرف برقرار گردد. 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.



شکل ۱-۳ تعادل یون‌های نمک و آب

^۱ - Revers Osmosis

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 می‌دهند. 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 ۱-۴ فرآیند 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 [۱۰].

الکترودیالیز

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

در این روش از ورقه‌های فلزی استفاده می‌گردد که نقش رزین‌های تبادل‌کننده‌های یونی را بازی می‌کنند؛ یعنی ورقه‌هایی نقش آنیون و ورقه‌هایی 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 الکتریسته مستقیمی از محلول عبور داده‌شود، کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در آب شور جذب ورقه‌ها شده و آب ما بین دو ورقه نمک زدایی می‌گردد [۱۱].

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 استانداردهای مود تایید NASA و WHO

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 [۱].

۱-۴-۳ 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.

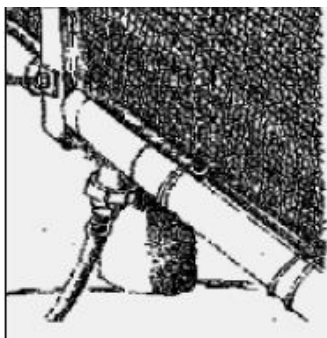
علاوه بر دسته‌بندی‌های فوق سیستم‌های تولید آب شیرین را می‌توان بر مبنای منبع انرژی نیز دسته‌بندی کرد که عبارت از نمک‌زدایی با انرژی خورشیدی، زمین گرمایی، تبادل یونی، غشایی، انجمادی و مانند این‌ها می‌باشد.

۱-۵ 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 ۱-۵ 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 به‌طور طبیعی، رطوبت هوا را به صورت شبنم بر روی برگ‌های خود ظاهر می‌کردند و یا در زمان مه‌های غلیظ، باریکه‌ای از جریان آب بر روی تنه آن‌ها قابل مشاهده بود، امکان تهیه آب از هوای مرطوب را در اذهان قوت می‌بخشد. جمع‌آوری 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 جمع‌کننده‌های مصنوعی ساخت بشر یک زمینه نسبتاً جدید تحقیقات را ایجاد کرده است.

استحصال آب از رطوبت هوا به عنوان یک منبع جدید آب که هزینه آن نسبت به سایر روش‌ها، کمتر است و در ظرفیت‌های پایین می‌تواند توجیه اقتصادی نیز داشته‌باشد، مطرح است. تولید آب از رطوبت هوا در مناطق زیر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد:

الف: منابع آبی موجود، همانند آب‌های سطحی، چاه‌ها و آب حاصل از بارندگی نتواند پاسخگوی نیازهای مردم باشد.

ب: مکان‌هایی که انتقال خط لوله و تصفیه کردن آب برای مصارف عمومی و کشاورزی، غیرممکن و پرهزینه باشد.

پ: مناطقی که دارای آب و هوایی گرم و مرطوب است.

استخراج آب از رطوبت هوا می‌تواند با استفاده از روش‌های مختلف مکانیکی، جذبی و تراکم کردن هوای مرطوب انجام شود. در این سیستم‌ها خنک‌کننده‌ها با مصرف انرژی، با استفاده از مواد جاذب و تراکم هوای مرطوب و ... می‌توان آب شیرین تولید کرد [۱۲ و ۱۳].

تکنولوژی ساده و قابل دسترس، استحصال آب با کیفیت خیلی خوب و پایداری منبع آب برای سال‌های متمادی، از عواملی است که باعث شده است این فن‌آوری جدید مورد توجه قرار گیرد. 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 جمع‌آوری آب از هوای اتمسفر توسط خنک‌کاری هوای مرطوب تا دمایی پایین‌تر از دمای نقطه شبنم در زمین بود [۳].

۱-۵-۱ سیستم‌های تولید آب چگالشی

در زمینه استفاده از انرژی سرمایی و گرمایی نهفته در زمین، ابداعات و پژوهش‌های فراوانی اعم از استفاده پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی، تولید الکتريسته در نیروگاه‌ها، گرم کردن آب استخرها، پرورش آبزیان، ذوب برف و یخ در معابر و ... صورت پذیرفته است [۱۴ و ۱۵]، اما استفاده از پتانسیل زمین به‌عنوان منبعی برای سرمایش و چگالش رطوبت موجود در هوا، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از روش‌های استحصال آب از رطوبت هوا، استفاده از سرمایش زیرزمینی هوای مرطوب است. برای تولید آب شیرین از رطوبت هوا، از انرژی خورشید برای رطوبت‌زنی هوا و از سرمایش زمین برای رطوبت‌زدایی آن استفاده می‌کنند که این سیستم‌ها به سیستم‌های تولید آب چگالشی^۱ معروف هستند. نمونه‌های عملیاتی آن در کشورهای شمال آفریقا، تونس و الجزایر (نزدیک دریای مدیترانه) توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱۴ و ۱۵].

^۱ - Condensation irrigation

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 خنک‌تر بودن زیرزمین نسبت به سطح آن، زمین همانند چگالنده عمل می‌کند) و آب شیرین تولید می‌شود. آب حاصل برای مصارف خوراکی و آبیاری زمین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۶].

۱-۵-۲ پژوهش‌های پیشین

متأسفانه منابع در دسترس، در حوزه استحصال آب شیرین از رطوبت هوا محدود است. سیستم‌های تولید آب چگالی در قالب پایان‌نامه‌هایی در مقطع کارشناسی ارشد در دانشگاه لولی سوئیس^۱ مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفت و قابل استنادترین نتایج تئوری آن‌ها در سال ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ توسط لیندبلاد و نوردل [۱۶ و ۱۷] در قالب مقاله منتشر شد که خلاصه‌ای از آن‌ها به شرح زیر است:

ویدگرن^۲ در سال ۱۹۸۶: مطالعات اولیه در زمینه‌ی سیستم‌های تولید آب چگالی (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.

نوردل^۳ در 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 زیرزمین 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 زیرزمین، باعث سرمایش آن شده و بدین ترتیب خاک برای انجام سرمایش زیرزمینی هوا در روز بعد آماده می‌گردد. این سیستم بعد از سال ۱۹۸۷ نیز با موفقیت کار کرد.

^۱ -Luleå(LTU)

^۲ -Widgren

^۳ - Nordell

شرکت سوئسی اینجینیررو^۱ در سال ۱۹۹۳: سیستم‌هایی مورد بررسی قرار گرفت که در آن آب دریا توسط لوله‌های پلاستیکی به وسیله 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 قرار گرفت.

گولامان^۲ در سال ۱۹۸۶: انتقال حرارت در لوله‌های صاف (تولید آب شیرین خوراکی) و لوله‌های سوراخ دار (تولید آب کشاورزی) را مطالعه کرد. نتایج بیانگر این موضوع است که در لوله‌های سوراخ دار انتقال گرما ۵۰ درصد بیش‌تر از لوله‌های صاف است. در نتیجه سرعت چگالش (تولید آب شیرین)، در لوله‌های سوراخ‌دار بیش‌تر از لوله‌های صاف است.

گاستافن^۳ و همکارش در سال ۱۹۹۹: مطالعه تئوری و آزمایشگاهی بر روی سیستم‌های چگالشی را ادامه دادند و نتایج آن تولید آب به میزان 4.6 mm/day با مصرف انرژی 1.6kwh/m³ برای سیستم‌های کشاورزی بود.

لیندبلاد و نوردل در سال ۲۰۰۶ به صورت عددی، کارایی سیستم تولید آب چگالشی خوراکی را مورد مطالعه و ارزیابی قرار دادند، که در سیستم‌های خوراکی در روزهای اول در ۵۰ متر لوله طی ۱۲ ساعت حدود ۲۵۰ کیلوگرم و در روزهای بعدی (سیستم حالت پایدار) حدود ۹۰ کیلوگرم آب به دست آمده است (تقریباً ۱/۸ Kgr/m.day). از این مدل‌سازی نتیجه می‌شود در روزهای اول سیستم ناپایدار بوده و آب بیش‌تری تولید شده است. البته در این مدل‌سازی معادلات، شرایط مرزی و زمانی فقط برای روز اول ذکر شده است [۱۶].

لیندبلاد و نوردل در سال ۲۰۰۷، در ادامه‌ی مطالعه‌ی قبل با روش عددی کارایی سیستم تولید آب چگالشی کشاورزی را مورد مطالعه و ارزیابی قرار دادند. برای رطوبت زنی هوا از دستگاه تقطیرکن خورشیدی استفاده کردند. در مصارف کشاورزی معادلات انتقال جرم و حرارت مدل‌سازی شد، در حل عددی برای مصارف کشاورزی 3.1 kg/(day.m) که برابر 2.3 mm/day آب شیرین به دست آوردند [۱۷].

¹ - Ingenieurbüro

² - Göhlman

³ - Gustafsson

یوسفی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ در دانشگاه شهید چمران ایران مطالعه تجربی بر روی سیستم‌های چگالشی انجام دادند که در ۲۵ متر لوله طی ۸ ساعت در روز اول حدود ۲ کیلوگرم و در روزهای بعدی در حالت پایدار ۴ کیلوگرم آب تولید شد که می‌توان نتیجه گرفت با گذشت زمان که سیستم پایدار شده است آب بیش‌تری تولید می‌شود [۱۸].

۱-۶ اهداف پژوهش کنونی

با وجود سادگی سیستم‌های تولید آب چگالشی، تاکنون تحقیقاتی جامع و وسیع در این حوزه انجام نشده است. بدیهی است توجه اقتصادی استفاده از سیستم‌های چگالشی، بستگی شدید به میزان آب تولید شده دارد. ناسازگاری نتایج مدل‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی تحقیقات پیشین که در داده‌های لیندبلاد و نوردل [۱۶] و یوسفی و همکارانش [۱۸] آشکار است، ضرورت مطالعه و بررسی دقیق پدیده استحصال آب از رطوبت هوا با استفاده از سرمایش زیرزمینی را بیش از پیش نمایان می‌سازد. در راستای رفع ابهام فوق و دستیابی به نتایج معتبر و قابل قبول، تحقیق حاضر بر روی برآورد میزان استحصال آب در سیستم‌های چگالشی و خنک‌کاری آن‌ها در طول شب هدف‌گذاری شده است.

در این تحقیق، ابتدا روابط و معادلات حاکم استخراج گردیده‌اند و براساس آن‌ها یک مدل عددی جامع با در نظر گرفتن پارامترهای موثر بر انتقال حرارت و چگالش ارائه شده است. نوآوری پژوهش کنونی و عمده تفاوت آن با مدل عددی ارائه شده در تحقیقات لیندبلاد و نوردل [۱۶]، استخراج معادلات لازم جهت مدل‌سازی سه بعدی انتقال حرارت و چگالش گذرا با شرایط مرزی و اولیه واقعی و با لحاظ نمودن طول لازم در ورودی لوله، جهت شبیه‌سازی کاهش دمای هوای مرطوب ورودی به دمای نقطه شبنم است. در این قسمت از طول لوله، چگالش بخار آب غیرممکن است و تمامی انتقال حرارت انجام شده از هوا به خاک اطراف لوله مدفون در زمین، صرف کاهش دمای هوا تا رسیدن به دمای نقطه شبنم می‌شود. استخراج طول بهینه لوله با توجه به ماهیت گذرا بودن انتقال حرارت در طول لوله در طی روز، از دستاوردهای مهم تحقیق حاضر است. یکی دیگر از نوآوری‌های پژوهش فعلی مدل‌سازی دمای خاک و هوا در طول شب برای خنک‌سازی سیستم‌های تولید آب چگالشی می‌باشد.

فصل دوم

توصیف سیستم تولید آب چگالشی

مورد مطالعه

با توجه به این که ماهیت و رفتار بخار آب، دمای خاک و توزیع رطوبت در سیستم‌های تولید آب چگالشی مهم است در ابتدای این فصل به آن پرداخته شده و سپس انواع سیستم‌های تولید آب چگالشی و مدل مورد مطالعه تشریح گردیده است.

۱-۲ 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 بادهای 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.

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 [۳].

۱-۱-۲ 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 جرمی به مقدار تقریباً ۶۲۰۰ تن می‌باشد. این گازها

به وسیله نیروی ثقل یا جاذبه زمین نگه داشته شده‌اند. ترکیبات تشکیل دهنده جو هوای خشک و بخار آب می‌باشد [۳].

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 تشکیل دهنده جو در هوای خشک (بدون بخار آب و آلاینده‌ها) بصورت حجمی در سطح دریا در جدول زیر نشان داده شده است [۳].

جدول ۱-۲ درصد گازهای موجود در جو [۳]

گازهای موجود در جو	درصد
نیتروژن	۷۸,۰۸۲۶۸۷
اکسیژن	۲۰,۹۴۵۶۴۸
آرگون	۰,۹۳۳۹۸۴
دی اکسید کربن	۰,۰۳۴۹۹۹
نئون	۰,۰۰۱۸۱۸
هلیوم	۰,۰۰۰۵۲۴
متان	۰,۰۰۰۱۷۰
کریپتون	۰,۰۰۰۱۱۴
هیدروژن	۰,۰۰۰۰۵۵

بخار آب: در مقیاس جهانی به‌طور میانگین یک درصد 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 تشکیل دهنده 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 می‌شود. بالا بودن مقدار بخار آب در نزدیکی سطح زمین دارای دو علت اصلی بوده که عبارتند از:

۱. به دلیل وجود دریا و اقیانوس‌ها که منبع اصلی تأمین بخار آب است.
۲. سرد بودن لایه‌های فوقانی جو که مانع از نفوذ و نگه‌داشتن بخار آب می‌شوند [۳].

۲-۱-۲ 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 فصل‌های سال و مکان‌های 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 [۳].

۳-۱-۲ توزیع دما در خاک

درجه حرارت زمین تحت تاثیر دمای اطراف و تابش خورشید می‌باشد. بر همین اساس، درجه حرارت زمین در سال تغییر می‌کند. برای به دست آوردن دمای خاک در یک عمق خاص شخصی به نام کاسودا^۱ رابطه‌ای را پیشنهاد کرده است که در آن توزیع دمای عمودی خاک مطرح شده است و نشان می‌دهد که دمای سطح زمین تابعی از زمان و عمق زیرزمین است. اساس و پایه آن از حل معادله انرژی گذرا با زمان، در یک جسم نیمه بی‌نهایت یک بعدی به دست آمده است که به شرح زیر است.

$$T(y,t) = \bar{T}_G + A_{Gs} e^{-y(\sqrt{\frac{365}{\pi K_s}})} \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t-t_0 - \frac{y}{2}\sqrt{\frac{365}{\pi K_s}})\right) \quad ۱-۲$$

^۱ -Kasouda

که در $T(y, t)$ آن توزیع دما خاک بر اساس زمان و عمق است و \bar{T}_G دمای میانگین زمین، A_{Gs} دامنه سالانه دمای سطح زمین، t_0 تاخیر زمانی از تاریخ شروع دلخواه (روز) و K_s میانگین ضریب هدایت گرمایی خاک است [۱۹].

تغییر دمای سطح زمین می‌تواند بر اساس تابع سینوسی زیر محاسبه شود [۱۹]:

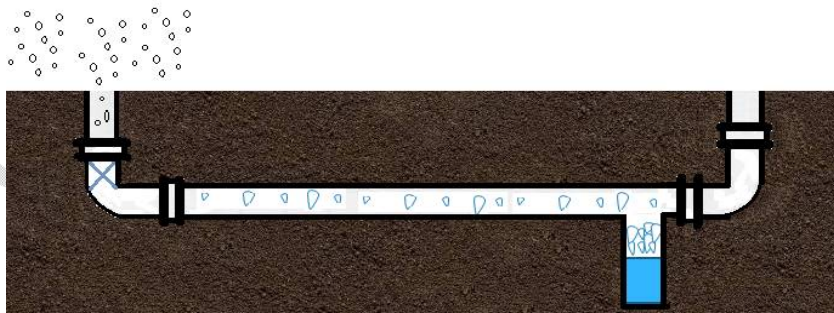
$$T(0, t) = \bar{T}_G + A_{Gs} \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t - t_0)\right) \quad ۲-۲$$

۲-۲ انواع سیستم‌های تولید آب چگالشی

سیستم‌های تولید آب چگالشی داری دو نوع، برای مصارف خوراکی و کشاورزی می‌باشد که به شرح زیر است:

۱-۲-۲ سیستم‌های تولید آب خوراکی

در مصارف خوراکی از لوله‌های بدون سوراخ استفاده می‌شود و در انتهای این لوله‌ها مکانی برای جمع‌آوری آب چگالیده شده وجود دارد، که در شکل (۱-۲) می‌توان مشاهده کرد. 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.



شکل ۱-۲ سیستم تولید آب چگالشی برای مصارف خوراکی

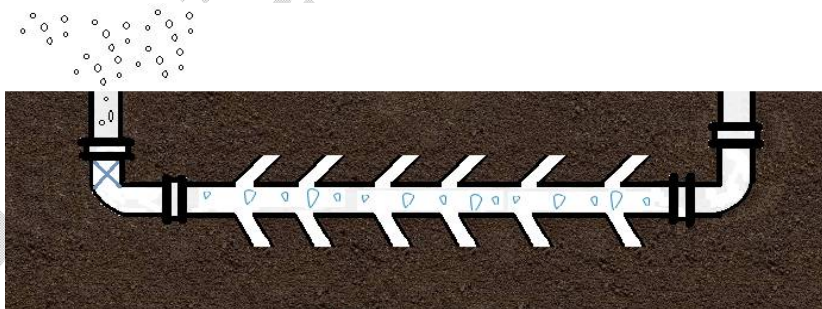
در این سیستم‌ها گرمای محسوس و نهان از هوای مرطوب به لوله انتقال داده می‌شود و این گرما در محیط خاک انباشته می‌شود. سرعت چگالش در طول لوله به جنس خاک، خواص هوای مرطوب ورودی، جنس و شکل لوله وابسته است.

جاگذاری لوله‌ها با توجه به مصارف منطقه و مساحت زمین در دسترس انجام می‌شود. 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 [۱۶].

آب شیرین تولیدشده در مصارف خوراکی باید دربرگیرنده‌ی 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 قرص‌هایی به آب انجام می‌شود [۳].

۲-۲-۲ سیستم‌های تولید آب کشاورزی

برای آبیاری زمین‌های کشاورزی از لوله‌های سوراخ‌داری استفاده می‌شود، که به‌طور مستقیم به‌وسیله‌ی سوراخ‌های مدفون در زیرزمین، 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، که در شکل (۲-۲) می‌توان مشاهده کرد [۱۷].



شکل ۲-۲ سیستم تولید آب چگالشی برای مصارف کشاورزی

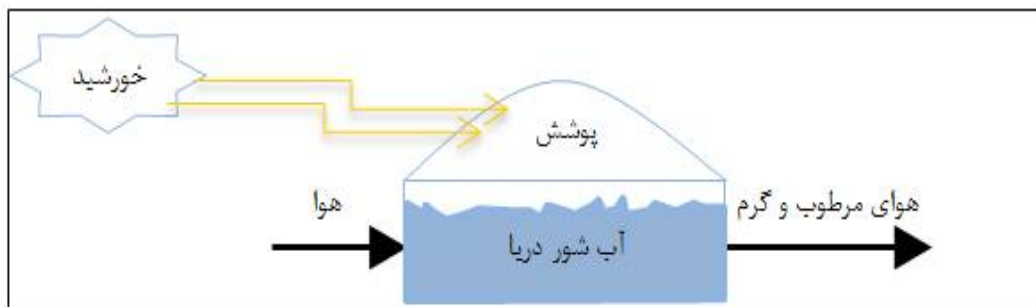
طراحی و عملکرد آن با توجه به شرایط آب و هوایی هر منطقه و محصولات خاص کشاورزی انجام می‌شود. افزایش دمای خاک تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد برای اغلب محصولات کشاورزی و تحریک ریشه آن‌ها برای رشد مناسب است. درحالی که دمای بالاتر از این مقدار می‌تواند به محصولات آسیب برساند، که با

کنترل خواص ورودی هوا، می‌توان از افزایش آن از مقدار بحرانی جلوگیری کرد. بنابراین باید طوری طراحی شوند که در پایان هر روز دمای خاک 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 [۱۷].

۳-۲ دستگاه تقطیرکن خورشیدی

برای افزایش بازدهی سیستم‌های تولید آب چگالشی از دستگاه تقطیرکن خورشیدی^۱ 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 لوله‌های مدفون در زیر خاک می‌شود. دستگاه‌های تقطیرکن خورشیدی به وسیله‌ی افزایش رطوبت موجود در هوا و افزایش دمای هوای ورودی به لوله (افزایش اختلاف دمای هوا و زیرزمین) نرخ چگالش و در نتیجه مقدار آب تولیدی را افزایش می‌دهد [۱۶].



شکل ۳-۲ دستگاه تقطیرکن خورشیدی

۴-۲ تشریح مدل مورد مطالعه

در این پژوهش سیستم‌های چگالشی خوراکی در طول یک شبانه روز مدل‌سازی شده است.

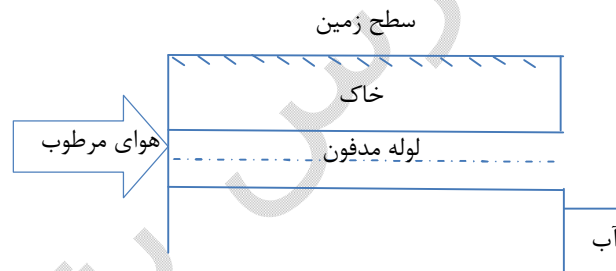
^۱ -Solar Still

در طول روز:

همانند شکل (۲-۴) هوای گرم و مرطوب (هوا با رطوبت و دمای کم به وسیله دستگاه تقطیرکن خورشیدی گرم و مرطوب می‌گردد) با خواص ورودی ثابت (رطوبت نسبی، دمای ورودی، فشار، سرعت و...) توسط فن مکیده می‌شود و وارد لوله مدفون در خاک می‌گردد. در اثر انتقال حرارت با خاک اطرافش خنک می‌شود و بخار آب در دمایی کمتر از نقطه شبنم شروع به چگالش می‌کند و نهایتاً بخار آب به صورت قطرات آب ظاهر می‌شود.

در طول شب:

در پایان روز دمای خاک در زیرزمین، به علت تبادل حرارت با هوای گرم در طول روز و همچنین سردتر شدن هوا در شب، بیشتر از دمای سطح زمین می‌شود، بنابراین از هوای خنک بیرون در طول شب برای سرمایش خاک استفاده می‌کنند تا بتوان در آغاز روز بعد، مجدداً چرخه استحصال آب را از سر گرفت.



شکل ۲-۴ شماتیک سیستم مدل‌سازی شده

معادلات حاکم بر مسئله،

مدل سازی و اعتبارسنجی

در این فصل ابتدا معادلات حاکم، گسسته‌سازی، شرایط مرزی و اولیه بر سیستم‌های تولید آب چگالشی بیان شده و در انتها نتایج مدل‌سازی اعتبارسنجی گردیده است.

۱-۳ معادلات حاکم

در این بخش معادلات انتقال حرارت هوای مرطوب و خاک در سیستم‌های تولید آب چگالشی خوراکی بررسی خواهد شد.

۱-۱-۳ انتقال حرارت هوا

با تقسیم کردن لوله به بازه‌های دمایی به اندازه کافی کوچک و فرض شار حرارت سطحی یکنواخت درون هر بازه می‌توان موازنه حرارتی را به شکل رابطه (۱-۳) نوشت [۱۶].

$$q_t = q_{\text{cond}} + q_{\text{conv}} \quad 1-3$$

که در آن q_{cond} و q_{conv} به ترتیب شار حرارت چگالشی و جابه‌جایی و q_t شار حرارت کلی انتقال یافته از لوله به خاک می‌باشد.

۱-۱-۳-۱ انتقال حرارت جابه‌جایی q_{conv}

به دلیل اختلاف دما بین جریان هوای مرطوب و سطح لوله انتقال حرارت به وسیله جابه‌جایی اجباری از منطقه گرم به سرد انتقال خواهد یافت. نرخ انتقال حرارت به اختلاف دمای بین دو محیط، سطح تماس و ضریب جابه‌جایی وابسته می‌باشد که طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۲۰].

$$q_{\text{conv}} = h(T_a - T_p) \quad 2-3$$

در معادله بالا T_a دمای هوا، T_p دمای دیواره لوله و h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوای مرطوب است که تابع خواص هوا می‌باشد و توسط سه عدد بی‌بعد رینولدز^۱، پرانتل^۲، ناسلت^۳ و ثابت‌های وابسته دمایی بیان می‌گردد که از رابطه گنیلینسکی [۲۰] محاسبه می‌شود.

¹Reynolds

²Prandtl

³Nusseelt

$$Nu = \frac{hD}{K_a} = \frac{((f/8)(Re-1000)Pr)}{1+12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3}-1)} \quad ۳-۳$$

ضریب افت فشار بی بعد برای جریان داخلی، f ، است و توسط رابطه پتوخوف [۲۰] به شکل معادله (۳-۴) بیان می گردد.

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad ۴-۳$$

۳-۱-۱-۳ انتقال حرارت چگالشی q_{cond}

زمانی که هوای مرطوب در طول لوله سرد می شود، در دمایی کمتر از نقطه شبنم چگالش خواهد یافت و مقداری از حرارت که به صورت گرمای نهان در بخار ذخیره شده است آزاد می گردد که مقدار گرمای حاصل از چگالش طبق رابطه زیر محاسبه می شود [۱۶].

$$q_{cond} = L_f h_m (\rho_{(T_a)} - \rho_{(T_p)}) \quad ۵-۳$$

در آن L_f گرمای نهان بخار آب، $\rho_{(T_a)}$ و $\rho_{(T_p)}$ به ترتیب چگالی بخار آب اشباع در دمای دیواره لوله و هوای در حال جریان است. h_m ضریب جابه جایی جرمی است. این ضریب تابعی از ضریب هدایت و جابه جایی هوا، ضریب پخش آب و هوا و عدد بی بعد لوئیس است که طبق رابطه (۳-۶) به دست می آید [۱۶].

$$h_m = \frac{h \cdot Le^{1/3} \cdot D_{aw}}{k_a} \quad ۶-۳$$

k_a ضریب هدایت هوا است. مطابق معادله (۳-۷)، D_{aw} ضریب پخش هوا-آب محاسبه می شود [۲۱].

$$D_{aw} = 1.87 \times 10^{-10} \left(\frac{T^{2.072}}{P} \right) \quad ۷-۳$$

P ، فشار بر حسب اتمسفر و T ، دما بر حسب کلوین می باشد. Le عدد لوئیس بیانگر نسبت ضریب

پخش حرارت به جرم می باشد [۱۶].

$$L \quad ۸-۳$$

α_s ضریب پخش گرمایی خاک است.

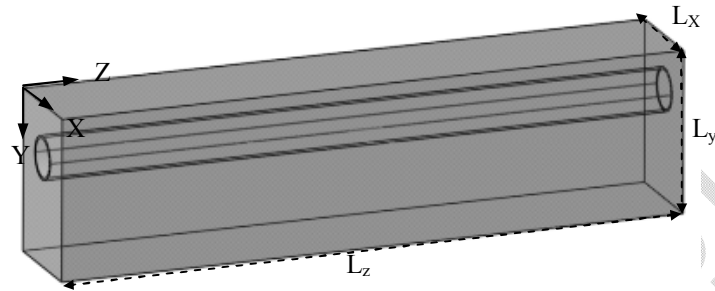
از رابطه زیر نیز می توان میزان آب تولیدی را محاسبه کرد [۱۶].

$$m_w = \frac{Q_{\text{cond}}}{L_f}$$

۹-۳

۲-۱-۳ انتقال حرارت خاک

در طول روز گرما از هوا به خاک منتقل می‌شود و باعث افزایش دمای خاک می‌گردد که در آن معادله انرژی گذرای سه‌بعدی به صورت رابطه (۱۰-۳) می‌باشد [۱۶].



شکل ۱-۳ شماتیک سه بعدی از قرارگیری لوله در خاک

$$k_s \nabla^2 T = \rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t}$$

۱۰-۳

با فرض:

$$\alpha_s = k_s / \rho_s c_s$$

۱۱-۳

بنابراین معادله (۱۰-۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\alpha_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}$$

۱۲-۳

دما در معادلات بالا مجهول است که می‌توان توزیع آن را با حل عددی معادله انرژی به دست آورد. در

معادلات بالا فرض بر این است که خواص حرارتی خاک ثابت می‌باشد.

۲-۳ تحلیل جریان

برای تحلیل رفتار سیالات و انتقال حرارت آن‌ها، می‌توان مطالعات آزمایشگاهی و تجربی را به کار برد.

از سال‌ها و قرن‌های گذشته دانشمندان زیادی از جمله اویلر، نیوتن، پراوتل، استوکس، ناویر و ... تلاش‌های

فراوانی جهت مطالعه، بررسی و شناخت رفتار جریان‌های سیالات و انتقال حرارت آن‌ها انجام دادند. به عبارت دیگر مکانیک سیالات شالوده نتایج و یافته‌های مطالعه شده می‌باشد که به صورت آزمایشگاهی و در اثر سعی و خطا و تکرارهای گسترده به دست آمده است. با استفاده از نتایج حاصل شده از آزمایشات مختلف و استفاده گسترده معادلات دیفرانسیل و روابط ریاضی معادلات حاکم تئوری، کاربردی و امروزی به دست آمدند. پس به‌طور کلی می‌توان برای تحلیل رفتار سیال سه روش موجود می‌باشد:

روش‌های آزمایشگاهی و تجربی

روش‌های تحلیلی (استفاده از معادلات حاکم)

روش‌های عددی (استفاده از کامپیوتر و برنامه نویسی عددی)

روش‌های آزمایشگاهی، عددی و همچنین روش‌های تحلیلی دارای مزایا و معایبی هستند که در ادامه به آن می‌پردازیم. امروزه استفاده از روش‌های عددی در محاسبات کامپیوتری اهمیت زیادی داشته و به عنوان ابزاری کارآمد در مهندسی به کار می‌رود. علم دینامیک سیالات محاسباتی^۱ به صورت یک ابزار توانا برای تحلیل انتقال حرارت و رفتار جریان سیال در سیستم‌هایی با هندسه‌های سخت و معادلات حاکم پیچیده برای محققان و مهندسان درآمده است و در دهه گذشته پیشرفت چشم‌گیری داشته است.

در جدول (۱-۳) مقایسه‌ای بر روش‌های مختلف صورت گرفته و به مزایا و معایب هر روش اشاره شده است. عوامل گفته شده باعث پیشرفت و استقبال از روش‌های عددی در مقایسه با سایر روش‌های آزمایشگاهی و یا تحلیلی شده است که از آن میان می‌توان به هزینه کم، دقت مناسب، سرعت بالا و توانایی شبیه‌سازی شرایط واقعی و شرایط ایده‌آل اشاره کرد [۳].

^۱- Computational Fluid Dynamics(CFD)

جدول ۱-۳ مقایسه روش‌های مختلف حل

معایب	مزایا	روش حل مسئله
محدودیت محیط آزمایشگاه بالابودن هزینه ساخت مدل صرف زمان زیاد جهت مدل‌سازی	نتایج دقیق و معتبر دقت مناسب نتایج واقعی	آزمایشگاهی و تجربی
محدودیت در حل مسائل مختلف عدم کاربرد در مسائل پیچیده (هندسه پیچیده، جریان دوفازی و ...)	استفاده از معادلات کاملاً دقیق جهت حل نتایج کاملاً دقیق و معتبر هزینه کم	تحلیلی
وجود خطاهای عددی (خطای قطع و ...) نیاز به کامپیوتر با حافظه بالا و پردازش‌گر قوی دقت پایین‌تر نتایج نسبت به روش‌های قبلی	کاهش زمان دستیابی به نتایج کاهش هزینه ساخت قابلیت حل تمام مسائل حل مسائل به صورت وابسته به زمان سهولت در حل مسائل مشابه و شرایط مرزی مختلف	عددی

در این پژوهش نیز از روش حل عددی استفاده شده است. برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسئله از روش حجم محدود^۱ می‌بایست مشتق‌های پاره‌ای^۲ را به صورت تقریبی محاسبه کرد. با استفاده از این تقریب‌ها، معادلات دیفرانسیل پاره‌ای تبدیل به عبارت جبری می‌شوند و در نهایت با حل دستگاه معادلات جبری مواجه هستیم. در مکانیک سیالات محاسباتی شبکه‌بندی میدان حل و الگوریتم حل عددی دو عامل مهم می‌باشد.

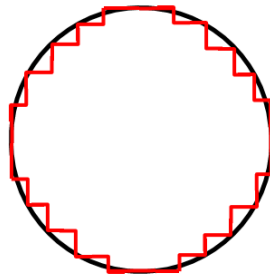
۱-۲-۳ شبکه‌بندی میدان حل

به‌طور کلی الگوریتم‌های تولید شبکه را می‌توان به دو دسته شبکه‌های منطبق بر بدنه و شبکه‌های غیرمنطبق بر بدنه طبقه‌بندی کرد. در شبکه‌های منطبق بر بدنه عموماً ایجاد شبکه به علت آن که شرایط هندسی مسائل مختلف متفاوت بوده و در اغلب مسائل فیزیکی با هندسه‌های غیر مستطیلی مواجه هستیم، ایجاد شبکه مشکل می‌باشد، اما به علت در اختیار داشتن نقاط شبکه بر روی بدنه اعمال شرایط مرزی آسان می‌باشد.

^۱-Finite Volume Method (FVM)

^۲-Partial Differential Equations (PDE)

در شبکه‌های غیرمنطبق بر بدنه با توجه به این‌که دامنه فیزیکی در داخل یک شکل (عموماً مستطیلی) قرار می‌گیرد، ایجاد شبکه فارغ از پیچیدگی‌های هندسی مسأله، آسان است اما اعمال شرایط مرزی با توجه به این‌که در این روش شناخت و تعیین مرز ضروری می‌باشد امری مشکل و دارای دقت کم‌تری است [۲۲]. برای حل مسئله حاضر، از یک شبکه غیرمنطبق بر بدنه استفاده گردیده است که همانند شکل (۲-۳) است.



شکل ۲-۳ شبکه اطراف لوله

۲-۲-۳ الگوریتم حل عددی

معادلات حاکم در مکانیک سیالات اغلب به صورت سهموی^۱ می‌باشند. نمونه‌هایی از این فرمول‌بندی معادلات لایه مرزی، ناویراستوکس و انتقال حرارت هدایتی در حالت گذرا هستند. دو روش کلی، صریح^۲ و ضمنی^۳ برای حل معادلات مورد نظر وجود دارد.

در روش صریح، هنگامی‌که ابعاد شبکه تعیین می‌گردد، گام زمانی دیگر مقدار مستقل نخواهد بود، بلکه می‌بایست برابر یا کمتر از مقدار معینی که توسط معیارهای پایداری تعیین می‌شود، باشد. اگر گام زمانی بزرگ‌تر از حد تعیین شده توسط معیارهای پایداری در نظر گرفته شود روش زمان پیمایشی فوراً ناپایدار خواهد شد و برنامه کامپیوتری به دلایلی از قبیل این‌که اعداد به سمت بی‌نهایت میل می‌کنند و یا از اعداد منفی ریشه دوم گرفته می‌شود، متوقف خواهد شد. در بسیاری حالات گام زمانی باید بسیار کوچک باشد تا سیستم پایدار بماند و این امر باعث می‌شود که محاسبات کامپیوتری برای یک فاصله زمانی معین در زمان طولانی انجام شود.

^۱-Parabolic equation

^۲-Explicit method

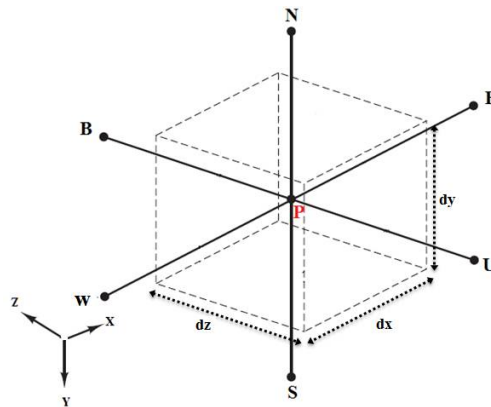
^۳-Implicit method

با توجه به این که در روش ضمنی، گام زمانی مقادیر بزرگتری را نسبت به روش صریح دارد، بنابراین تعداد کمتری گام زمانی لازم است تا بتوان خواص سیستم را پس از زمان معینی به دست آورد. اما در مسئله حاضر با توجه به این که معادله گذرای انتقال حرارت در حالت سه بعدی می بایست حل می گردید از این رو از روش صریح استفاده گردیده است [۳].

۳-۳ گسسته سازی معادلات حاکم

۱-۳-۳ معادله انرژی خاک

برای حل معادله (۳-۹) از روش حجم محدود سه بعدی استفاده می کنیم که با انتگرال گیری بر روی حجم کنترل شکل (۳-۳) و زمان به صورت زیر در می آید [۲۳].



شکل ۳-۳ شماتیک سلول خاک برای گسسته سازی معادله انرژی

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{Cv} \alpha_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dx dy dz \Delta t = \int_{dt}^{t+\Delta t} \int_{Cv} \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \Delta t \quad ۱۳-۳$$

سمت چپ معادله (۱۳-۳)، با استفاده از روش تفاضل مرکزی، به شکل زیر گسسته سازی می شود.

$$\begin{aligned} \alpha_s \int_t^{t+\Delta t} \int_{Cv} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dz \Delta t &= \alpha_s \int_t^{t+\Delta t} \left(\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right) dy dz \Delta t \\ &= \left(\frac{T_E^n - T_P^n}{\delta x_{EP}} - \frac{T_P^n - T_W^n}{\delta x_{PW}} \right) dy dz \Delta t \end{aligned} \quad ۱۴-۳$$

α

۱۵-۳

 α

۱۶-۳

برای گسسته‌سازی سمت راست معادله (۳-۱۳)، از تقریب زمانی تفاضل پسر مرتبه اول استفاده

می‌کنیم.

 \int

۱۷-۳

با جاگذاری معادلات (۳-۱۴) تا (۳-۱۶) در معادله (۳-۱۳)، معادله انرژی به صورت زیر ساده‌سازی

می‌گردد.

T

۱۸-۳

به ترتیب فاصله گره مرکزی از گره‌های شرقی، غربی، جنوبی، شمالی، پستی و روبرو EP، PW، SP،

PN، BP و PU می‌باشد. با توجه به این که از روش پیمایش در زمان استفاده شده است مقادیر متغیر وابسته

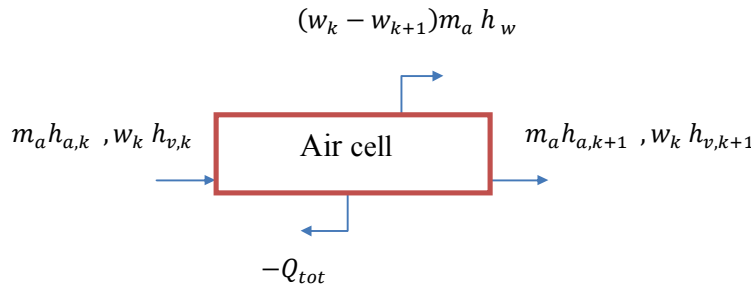
در مقطع زمانی n از حل گام قبلی یا شرایط اولیه معلوم است می‌توان مقادیر آن را در مقطع زمانی n+1

به دست آورد.

۳-۳-۲ معادله انرژی برای هوا

برای محاسبه دمای هوای خروجی، معادله انرژی هوا را به شکل رابطه (۳-۱۹) می‌توان نوشت [۲۴].

$$-Q_t + m_a h_{a,k} + w_k m_a h_{v,k} = m_a h_{a,k+1} + w_{k+1} m_a h_{v,k+1} + (w_k - w_{k+1}) m_a h_w \quad ۱۹-۳$$



شکل ۳-۴ شماتیک سلول هوا برای گسسته‌سازی معادله انرژی

که در آن کل گرمای انتقال یافته از خاک به هوا از معادله (۲۰-۳) محاسبه می‌شود.

۲۰-۳ c

P محیط اطراف لوله و dz طول المان در راستای z و q_h شار کل می‌باشد که طبق رابطه (۲۱-۳)

به دست می‌آید.

۲۱-۳ q

با توجه به این که هوا گاز ایده‌آل است جرم آن، m_a ، را می‌توان از رابطه (۲۲-۳) محاسبه کرد.

۲۲-۳ n

که در آن حجم هوای ورودی طبق رابطه (۲۳-۳) بیان می‌شود.

۲۳-۳ v

C_{in} سرعت ورودی هوا و A سطح مقطع لوله می‌باشد.

برای محاسبه آنتالپی هوا، می‌توان هوا را در گستره دمایی ۱۰- تا ۵۰ درجه سانتیگراد، گاز ایده‌آل با

در نظر گرفت (با خطایی کم‌تر از ۲ درصد)، اگر صفر درجه سانتیگراد را به عنوان مرجع

در نظر بگیریم، بنابراین آنتالپی هوا را می‌توان از رابطه (۲۴-۳) به دست آورد [۲۵]:

۲۴-۳ h

آنتالپی بخار آب در صفر درجه سانتیگراد $h_0=2501.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$ و مقدار متوسط گرمای ویژه را می توان

$C_{p,v}=1.82 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$ فرض کرد، در نتیجه آنتالپی بخار آب طبق رابطه زیر محاسبه می شود [۲۵]:

$$h \quad 25-3$$

w_k جز شرایط ورودی به هر سلول در راستای Z معلوم می باشد. رطوبت نسبی خروجی، w_{k+1} ، طبق

رابطه (۲۶-۳) به دست می آید [۱۶]:

$$w \quad 26-3$$

که m_w از معادله شماره (۹-۳) به دست می آید، بنابراین می توان دمای هوای خروجی هوا را از رابطه

(۲۷-۳) محاسبه کرد:

$$T \quad 27-3$$

دمای هوای خروجی از المان، برای یافتن مقدار گرمای آزاد شده از طریق جابه جایی و چگالش کاربرد

دارد. لازم به ذکر است که معادله انرژی هوا و خاک به صورت کوپل حل می شوند.

۴-۳ شرایط مرزی و اولیه

با توجه به مدل و هندسه مسئله، برای حل معادلات حاکم لازم است شرایط مرزی حاکم بر مسئله

مشخص باشند. برای حل معادله انتقال حرارت گذرا در حالت سه بعدی به هفت شرط مرزی نیاز داریم که

در ادامه به تفصیل بیان خواهد شد.

۱-۴-۳ شرایط مرزی خاک

درجه حرارت زمین تحت تاثیر دمای هوای اطراف و تابش خورشید است. بنابراین، تغییر دمای سطح

زمین در سال را می توان بر اساس تابع سینوسی طبق رابطه (۲۸-۳) بیان کرد [۱۶].

$$T \quad 28-3$$

در این پژوهش $\bar{T}_G=20$ و $A_{Gs}=8$ می باشد، بنابراین شرایط دمایی در سطح زمین طبق معادله (۳-۳)

(۲۹) تغییر می کند [۱۶].

۲۹-۳ y

شرایط مرزی در عمق $y = L_y$ ثابت و برابر با دمای میانگین هوا در نظر گرفته شده است [۱۶].

۳۰-۳ y

با توجه به این که ابتدا و انتهای لوله را می توان عایق فرض کرد، شرایط مرزی طبق معادله (۳-۳۱)

بیان می شود [۱۶].

۳۱-۳ z

خاک را نیز می توان در راستاهای $L_x, x = 0$ ، به علت پایین بودن ضریب انتقال حرارت هدایتی عایق

فرض کرد [۱۶].

۳۲-۳ x

۳-۴-۲ شرایط مرزی هوا

همان طور که در تولید شبکه بیان شد ساختار غیر منطبق بر بدنه برای اطراف دایره انتخاب شده است.

شرایط مرزی مطابق شکل (۳-۲) برای سلول های اطراف لوله با توجه به این که کدام وجه سلول در تماس

با آن قرار دارد، در جدول (۳-۲) تعیین می شود.

جدول ۳-۲ شرایط مرزی در اطراف استوانه

شرط مرزی	جهت قراگیری سلول
	شمال
	جنوب
	شرق
	غرب

شمال شرقی

شمال غربی

جنوب شرقی

جنوب غربی

۳-۴-۳ شرایط اولیه

برای به دست آوردن جواب یگانه برای معادله دیفرانسیل پاره‌ای، به مجموعه‌ای از شرایط مکمل نیاز است تا توابع اختیاری حاصل از انتگرال‌گیری معادله دیفرانسیل پاره‌ای را معین کنیم. یکی از شرایط یاد شده شرایط اولیه می‌باشد و به معنی معلوم بودن مقدار متغیر وابسته در حالت اولیه است. در این مساله دمای اولیه خاک به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شده است.

۳-۵ فرآیند ترمودینامیکی در طول لوله

فرآیند ترمودینامیکی در طول لوله، برای به دست آوردن گرمای حاصل از چگالش و جابه‌جایی، را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد:

۱- طول‌های اولیه لوله که در آن دمای هوا بیش‌تر از نقطه شبنم است. انتقال حرارت به خاک فقط از طریق جابه‌جایی است و گرمای حاصل از چگالش نداریم. در این صورت رطوبت مطلق هوا ثابت و رطوبت نسبی آن طبق معادله (۳-۳۳) به دست می‌آید [۲۵].

۳۳-۳

۴

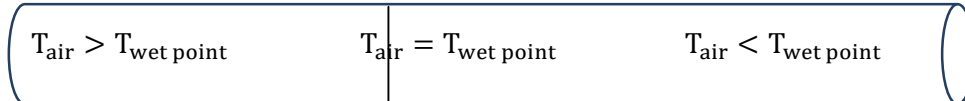
که در آن فشار اشباع، P_g ، از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۰].

۳۴-۳

P

و فشار جزئی بخار آب ثابت در نظر گرفته می‌شود.

۲- طولی که در آن دمای هوا کمتر از نقطه شبنم است و گرمای حاصل از چگالش و جابه‌جایی داریم، در این طول رطوبت نسبی هوا برابر ۱۰٪ می‌باشد و رطوبت مطلق آن طبق معادله (۳-۲۶) به دست می‌آید. فشار جزئی بخار آب برابر با فشار اشباع آب در آن دما است که از معادله (۳-۳۴) به دست می‌آید.



شکل ۳-۵ شماتیک کاهش دما در طول لوله

بنابراین در نمودار سایکرومتریک فرآیند در طول لوله، دو مرحله‌ای (رطوبت مطلق ثابت- رطوبت نسبی ثابت (۱۰٪)) است.

۳-۶ جنس لوله

یکی از عوامل موثر در انتقال حرارت، جنس لوله مدفون است که باعث ایجاد مقاومت حرارتی بین خاک و هوا می‌شود. مقاومت حرارتی لوله را می‌توان با توجه به جنس لوله از معادله (۳-۳۵) محاسبه کرد [۲۱].

$$r_1 \quad 35-3$$

بنابراین شار حرارت جابه‌جایی (q_{conv}) را با در نظر گرفتن جنس لوله از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$q \quad 36-3$$

که در آن ضریب انتقال حرارت کلی، U را می‌توان طبق معادله (۳-۳۷) بیان کرد [۲۱].

$$U \quad 37-3$$

۷-۳ بازده سیستم

از روابط بیان شده در بخش‌های قبل می‌توان نتیجه گرفت بازده سیستم‌های تولید آب چگالشی به

عوامل زیر بستگی دارد:

۱- شرایط آب و هوایی، خاک منطقه

۲- طول و جنس لوله

۳- سرعت، رطوبت نسبی و دمای هوای ورودی و ...

با توجه به این که ماکزیمم انتقال حرارت چگالشی را می‌توان طبق معادله (۳۸-۳) محاسبه کرد.

$$Q_{\max, \text{cond}} = q_{\max, \text{cond}} \times \Delta t \times A = L_f \times h_m \times (\rho_{(T_{\max, a})} - \rho_{(T_{\min, p})}) \times \Delta t \times \pi \times D \times L_z \quad 38-3$$

و می‌دانیم:

$$C \quad 39-3$$

بنابراین ماکزیمم آب قابل استحصال را با توجه به معادله (۳۸-۳) و (۳۹-۳) می‌توان به شکل زیر

به دست آورد.

$$m_{\max, w} = h_m \times (\rho_{(T_{\max, a})} - \rho_{(T_{\min, p})}) \times \Delta t \times \pi \times D \times L \quad 40-3$$

با تعریف بازده سیستم به صورت مقدار آب تولید شده به ماکزیمم آبی که می‌تواند در اثر انتقال

حرارت ماکزیمم تولید شود، بازده سیستم‌های تولید آب چگالشی طبق معادله (۴۱-۳) محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{m_w}{m_{w, \max}} \quad 41-3$$

۸-۳ فرضیات ساده سازی

فرض‌های ساده شونده زیر در معادلات بالا به کار گرفته شده است.

۱- هوا و بخار آب گاز ایده آل در نظر گرفته می‌شود.

۲- خواص خاک، هوا و آب به جز موارد ذکر شده در معادلات، در دمای میانگین محاسبه شده‌اند.

۳- سرعت در طول لوله ثابت است.

۳-۹ تحلیل پایداری

با فرض یکنواخت بودن شبکه در معادله هدایت سه بعدی گذرا، معادله (۳-۱۸) را می توان به شکل

معادله (۳-۴۲) نوشت.

$$T \quad ۴۲-۳$$

اعداد انتشار را نیز می توان طبق رابطه (۳-۴۳) تقریب زد.

$$d \quad ۴۳-۳$$

با جایگذاری اعداد انتشار در معادله (۳-۴۲) معادله انتقال حرارت خاک به شکل رابطه (۳-۴۴)

به دست می آید.

$$T \quad ۴۴-۳$$

حال اگر معادله (۳-۴۴) را بر اساس اندیس های i ، j و k بنویسیم داریم:

$$T \quad ۴۵-۳$$

عبارت فوریه ای به صورت معادله (۳-۴۶) در نظر می گیریم.

$$T \quad ۴۶-۳$$

P ، q و R اعداد موج به ترتیب در جهت های x, y, z می باشند. که برای زوایای فاز مختلف می توان

نوشت.

۴۷-۳ θ

بنابراین معادله (۴۶-۳) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد که در آن مقدار دامنه در مقطع زمانی n است.

۴۸-۳ T

دما در گره‌های مختلف را با توجه به روابط (۴۶-۳) تا (۴۸-۳) می‌توان به شکل زیر نوشت.

۴۹-۳ T
 T
 T

با جایگزین نمودن معادله (۴۹-۳) در معادله (۴۵-۳) معادله زیر به دست می‌آید.

$$d_x \left(U^n e^{I(\theta(i+1)+\phi_j+\phi_k)} - 2U^{n+1} e^{I(\theta i+\phi_j+\phi_k)} + U^n e^{I(\theta(i-1)+\phi_j+\phi_k)} \right) +$$

$$d_y \left(U^n e^{I(\theta i+\phi(j+1)+\phi_k)} - 2U^{n+1} e^{I(\theta i+\phi_j+\phi_k)} + U^n e^{I(\theta i+\phi(j-1)+\phi_k)} \right) +$$

$$d_z \left(U^n e^{I(\theta i+\phi_j+\phi(k+1))} - 2U^{n+1} e^{I(\theta i+\phi_j+\phi_k)} + U^n e^{I(\theta i+\phi_j+\phi(k-1))} \right)$$

۵۰-۳

و در ادامه داریم:

۵۱-۳ U

با جاگذاری رابطه مثلثاتی (۵۲-۳) در معادله (۵۱-۳) معادله انرژی به صورت رابطه (۵۳-۳) ساده می‌شود.

۵۲-۳ C

۵۳-۳ \bar{t}

برای داشتن جواب پایدار می‌بایست شرط (۵۴-۳) برقرار باشد:

۵۴-۳ \bar{t}

بنابراین داریم:

۵۵-۳ $\frac{2}{2}$

شرط اول همواره برقرار است و شرط دوم به رابطه (۵۶-۳) می‌انجامد.

۵۶-۳ d

و در نهایت شرط پایداری معادله هدایت حرارت سه بعدی در حالت گذرا به صورت زیر تعریف می‌شود

[۳] و [۲۲].

۵۷-۳ α

لازم به ذکر است که المان‌های زمانی و مکانی باید طوری در نظر گرفته شوند که شرط (۵۷-۳) ارضا

شود.

۳-۱۰ خنک‌کاری در طول شب

برای مدل‌سازی و استخراج معادلات در طول شب باید به نکات زیر توجه کرد:

۱- انتقال حرارت فقط به صورت جابه‌جایی صورت می‌گیرد و انتقال حرارت حاصل از چگالش صفر است.

۲- شرایط مرزی همانند کارکرد در طول روز می‌باشد.

۳- شرایط اولیه برای توزیع دمای خاک برابر با دمای آخرین ساعت کارکرد خاک در طول روز است.

۳-۱۱ اعتبارسنجی مدل عددی

در این بخش نتایج مدل سازی اعتبارسنجی می شود. معادلات گسسته شده هوا و خاک در نرم افزار متلب ۲۰۱۲ کدنویسی شده است که نتایج ارائه شده برای شرایط زیر به دست آمده است.

جدول ۳-۳ مشخصات هوای ورودی و هندسه مدل

مقادیر	خصوصیات
۷۰ درجه سانتی گراد	دمای ورودی به لوله
۷۰ درصد	رطوبت نسبی
۳/۵ متر بر ثانیه	سرعت
۱ اتمسفر	فشار
۲۰ سانتی متر	قطر لوله
۵۰ سانتی متر	عمق خاک
۲ وات بر متر بر درجه سانتیگراد	ضریب انتقال حرارت هدایت خاک
۲۰ درجه سانتیگراد	دمای اولیه خاک
۱ متر و ۲۰۰ گره	طول و تعداد گرهها در راستای X
۱ متر و ۲۰۰ گره	طول و تعداد گرهها در راستای Y

لازم به ذکر است که تعداد گرهها در راستای Z متناسب با طول لوله و گرهها در راستاهای دیگر انتخاب شده است و گام زمانی با توجه به شرط معادله (۳-۵۷) به دست آمده است.

۳-۱۱-۱ استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال از شبکه، شاخص میزان آب تولید شده در نظر گرفته شده است زیرا معادلات گسسته شده انرژی خاک و هوا که به صورت کوپل حل می گردند، به طور مستقیم بر این معیار تاثیر می گذارند. همان طور که در جدول (۳-۴) ملاحظه می شود با افزایش گره از $۵۰ \times ۵۰ \times ۱۵۰$ به $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۳۰۰$ ، ۶/۷ درصد خطا در میزان آب تولید شده به دست می آید و با ریزتر کردن شبکه از

۱۰۰×۱۰۰×۳۰۰ به ۲۰۰×۲۰۰×۶۰۰، میزان خطا به ۱/۶ درصد کاهش می‌یابد که می‌توان از این مقدار خطا صرف‌نظر کرد و این تعداد گره را مبنای محاسبات قرار داد. بدیهی است با ریزتر کردن شبکه این میزان خطا کاهش می‌یابد اما با توجه به افزایش هزینه محاسباتی توصیه نمی‌شود.

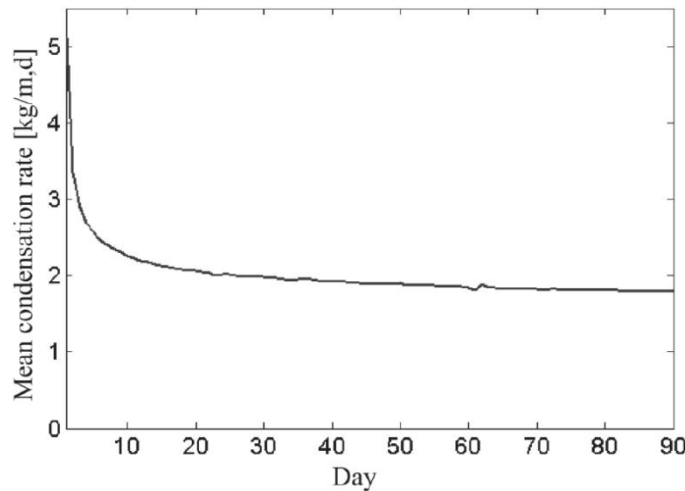
جدول ۳-۴ استقلال از شبکه در لوله ۱۵ متری

تعداد گره‌ها (dx×dy×dz)	مقدار آب تولید شده (kg)
۵۰×۵۰×۱۵۰	۱/۲۰۱
۱۰۰×۱۰۰×۳۰۰	۱/۱۲۵
۲۰۰×۲۰۰×۶۰۰	۱/۱۰۷

۳-۱۱-۲ مقایسه با نتایج تحقیقات پیشین

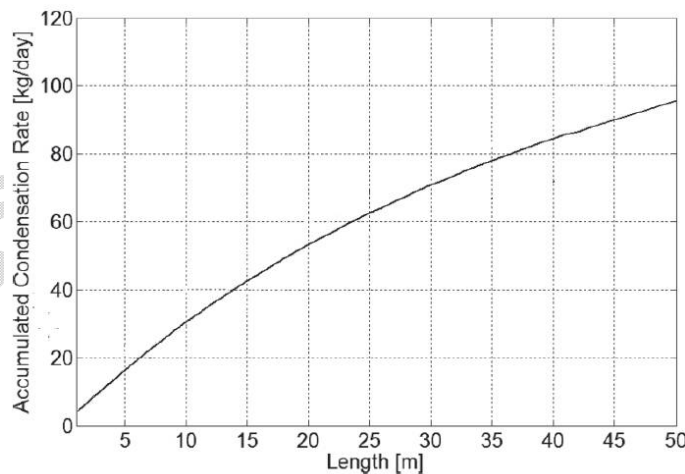
ابتدا لازم است ذکر شود که مشخصات هوای ورودی و هندسه در حل عددی لیندبلاد و حل تجربی یوسفی همانند جدول (۳-۳) است با این تفاوت که دمای هوای ورودی در حل عددی لیندبلاد 60°C می‌باشد.

در شکل (۳-۶) نتایج حل عددی سیستم‌های تولید آب خوراکی توسط لیندبلاد و نوردل [۱۶] نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در روزهای اول تقریباً 5 kg/m.day به دست می‌آید. در روزهای بعد که سیستم پایدار می‌شود می‌توان از رطوبت هوا تقریباً $1/8\text{ kg/m.day}$ آب به دست آورد. از این مدل‌سازی نتیجه می‌شود در روزهای اول که سیستم ناپایدار می‌باشد آب بیش‌تری تولید شده است. استنباط فیزیکی از پایدار شدن این نمودار و کاهش آب تولید شده بعد از تقریباً ۳۰ روز کارکرد این است که در روزهای اولیه با خنک‌کاری در شب، خاک به دمای اولیه روز قبل نرسیده است.



شکل ۳-۶ مقدار آب تولید شده در ۹۰ روز در حل عددی لیندبلاد و همکارش [۱۶]

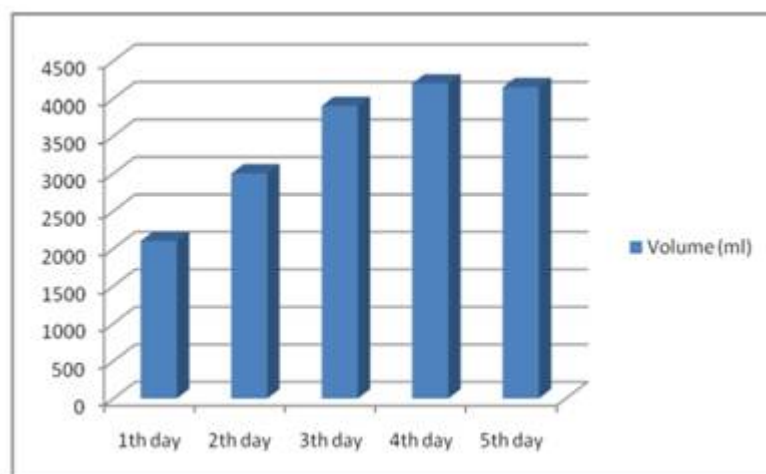
در شکل (۷-۳) مقدار آب تولید شده براساس طول‌های مختلف لوله در طول روز نمایش داده شده است. همان‌طور که در فصل سوم بیان شد در قسمت‌های اولیه لوله دمای هوای مرطوب به نقطه شبنم نمی‌رسد و آب شیرین تولید نمی‌گردد در حالی که در شکل زیر در طول‌های اولیه مقداری آب تولید شده است که نامفهوم می‌باشد. نکته دیگر این که با افزایش طول لوله تغییرات میزان آب تولید شده نباید خیلی محسوس باشد زیرا در قسمت‌های انتهایی لوله اثر انتقال حرارت در طول لوله، دمای خاک و هوا تقریباً یکسان می‌گردد.



شکل ۳-۷ مقدار آب تولید شده در طول‌های مختلف در حل عددی لیندبلاد و نوردل [۱۶]

در شکل (۸-۳) نتایج تجربی یوسفی و همکارانش [۱۸] در دانشگاه شهید چمران نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در ۲۵ متر لوله طی ۸ ساعت در روز اول، حدود ۲ کیلوگرم و در

روزهای بعد در حالت پایدار ۴ کیلوگرم آب تولید می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با گذشت زمان سیستم پایدار شده است و آب بیش‌تری تولید می‌شود.



شکل ۳-۸ مقدار آب تولید شده در ۵ روز اول در حل تجربی یوسفی و همکارانش [۱۸]

با توجه به این‌که تنها پژوهش تجربی در دسترس نتایج یوسفی و همکارانش [۱۸] است، در جدول (۳-۵) نتایج پژوهش کنونی با نتایج تجربی برای ۲۵ متر لوله و طی ۸ ساعت مقایسه شده است.

جدول ۳-۵ مقایسه پژوهش‌های انجام شده در زمینه سیستم‌های تولید آب چگالشی خوراکی

مقدار آب تولید شده (Kg)	نام پژوهش
۲	یوسفی و همکارانش (۲۰۱۲ تئوری)
۱/۲	تحقیق حاضر (۲۰۱۵ عددی)

این نتایج برای اولین روز کارکرد سیستم می‌باشد، حل عددی حاضر با داده‌های تجربی هم‌خوانی و تطابق دارد و اختلاف اندک بین نتایج حاضر و داده‌های تجربی می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی همانند تفاوت شرایط محیطی و ثابت نبودن مشخصات ترموفیزیکی خاک منطقه آزمایش شده می‌باشد.

فصل چهارم

نتایج مدل سازی

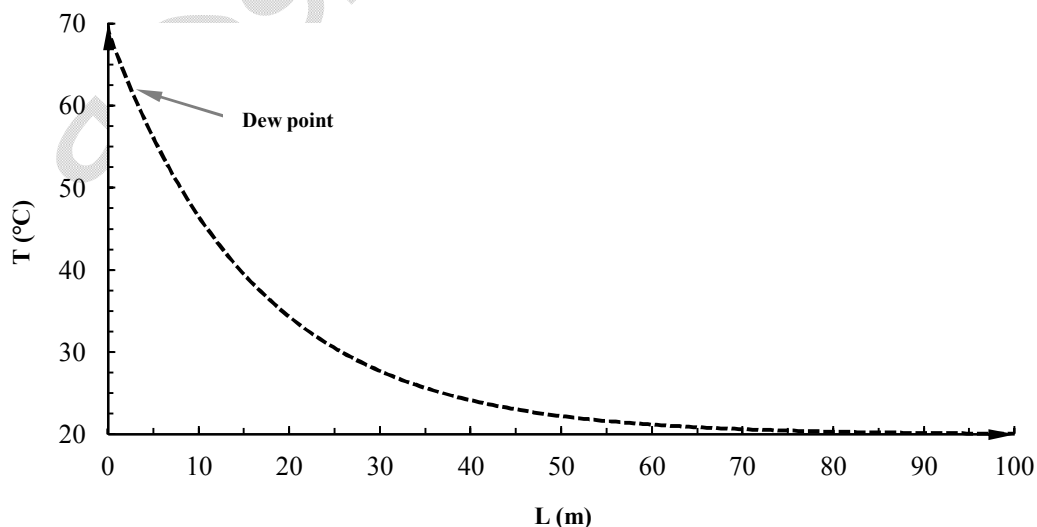
در این فصل مقدار آب شیرین استحصالی از رطوبت هوا در طول روز و سپس نتایج خنک‌کاری سیستم‌های چگالشی در طول شب بررسی می‌گردد.

۱-۴ تولید آب شیرین از سیستم‌های چگالشی در طول روز

در این بخش ابتدا، نتایج به دست آمده برای طول‌های مختلف لوله ارائه و بر اساس آن طول بهینه‌ای معرفی می‌شود. در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف (دما و نوع خاک، میزان دما و رطوبت نسبی هوای مرطوب، قطر لوله و سرعت ورودی) بر مقدار آب تولید شده محاسبه می‌گردد. در انتها نیز آنالیز حساسیت نسبت به خواص ورودی هوای مرطوب و هندسه لوله بررسی و بازده این سیستم‌ها بر حسب طول تعیین شده است.

۱-۱-۴ دمای هوا در طول لوله

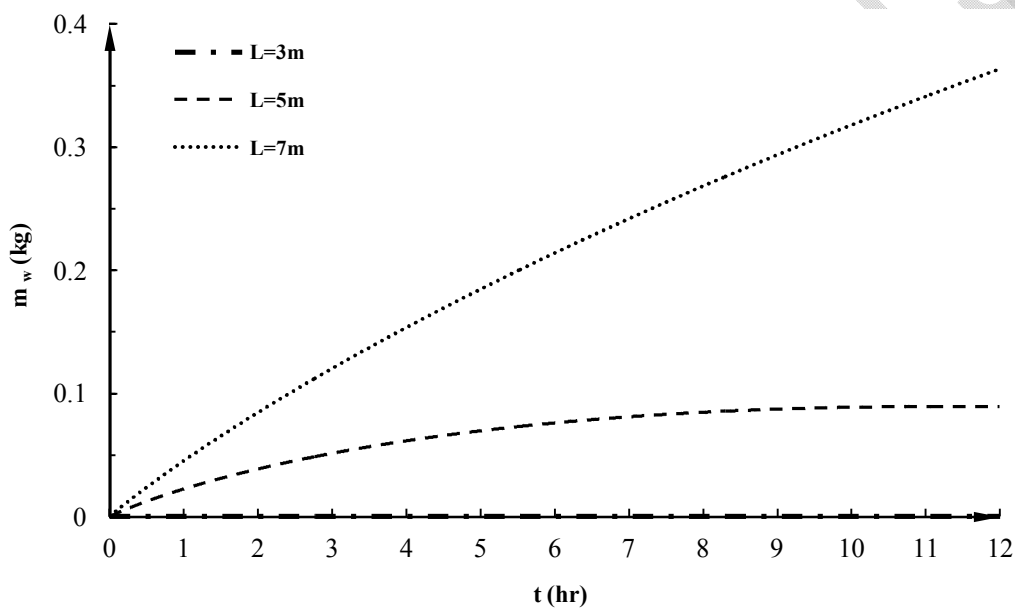
شکل (۱-۴) تغییرات دمای هوای مرطوب در طول لوله را نشان می‌دهد. در طول‌های کمتر از ۳ متر، دما بالاتر از نقطه شبنم (برای شرایط اولیه بیان شده در این پژوهش 62°C) و انتقال حرارت فقط به صورت جابه‌جایی می‌باشد. در طول‌های بیش‌تر از ۳ متر دما کمتر از نقطه شبنم و انتقال حرارات به صورت چگالش و جابه‌جایی است. افت دما در طول‌های اولیه لوله نسبت به انتهای آن بیشتر است بنابراین انتقال حرارت و میزان آب تولید شده بر واحد طول در قسمت ابتدایی لوله بیش‌تر می‌باشد.



شکل ۱-۴ نمودار دمای هوای مرطوب در طول لوله در اولین ساعت کارکرد

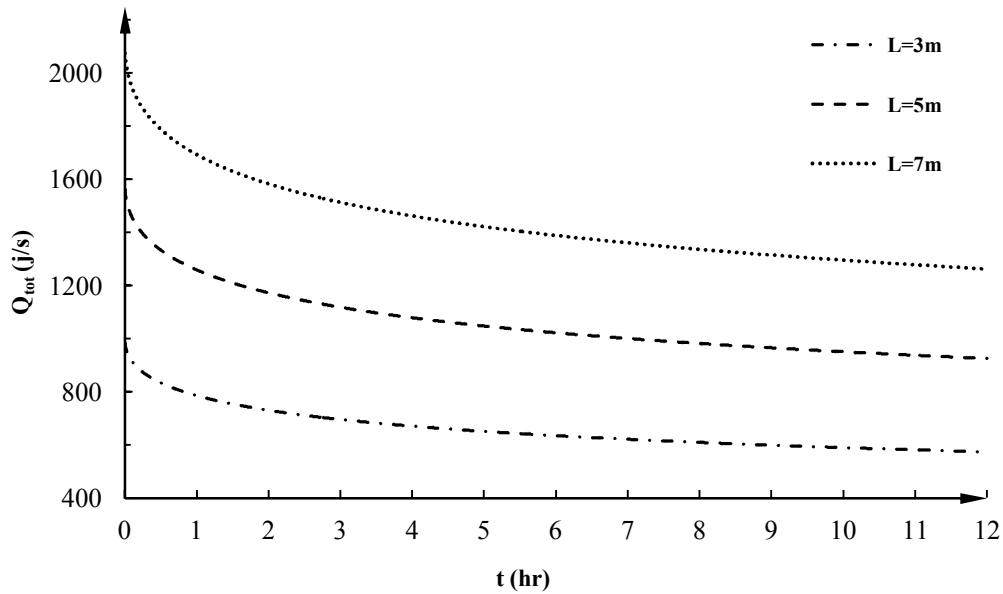
۲-۱-۴ طول‌های کوتاه لوله

شکل (۲-۴) نشان می‌دهد که در طول‌های کم‌تر از ۳ متر با توجه به این که دمای هوا به نقطه شبنم نرسیده‌است، آب تولید نمی‌شود. اما با افزایش طول لوله و کاهش دمای آن، هوا اشباع می‌گردد بنابراین ظرفیت هوا برای نگه داشتن بخار آب کاهش و مقداری از بخار آب موجود در هوا تقطیر و به صورت آب ظاهر می‌شود. با گذشت زمان نیز، میزان آب تولید شده به علت انتقال حرارت خاک با هوا و افزایش دمای آن، کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۴ نمودار مقدار آب تولیدشده برای طول‌های کوتاه لوله در ۱۲ ساعت کارکرد سیستم

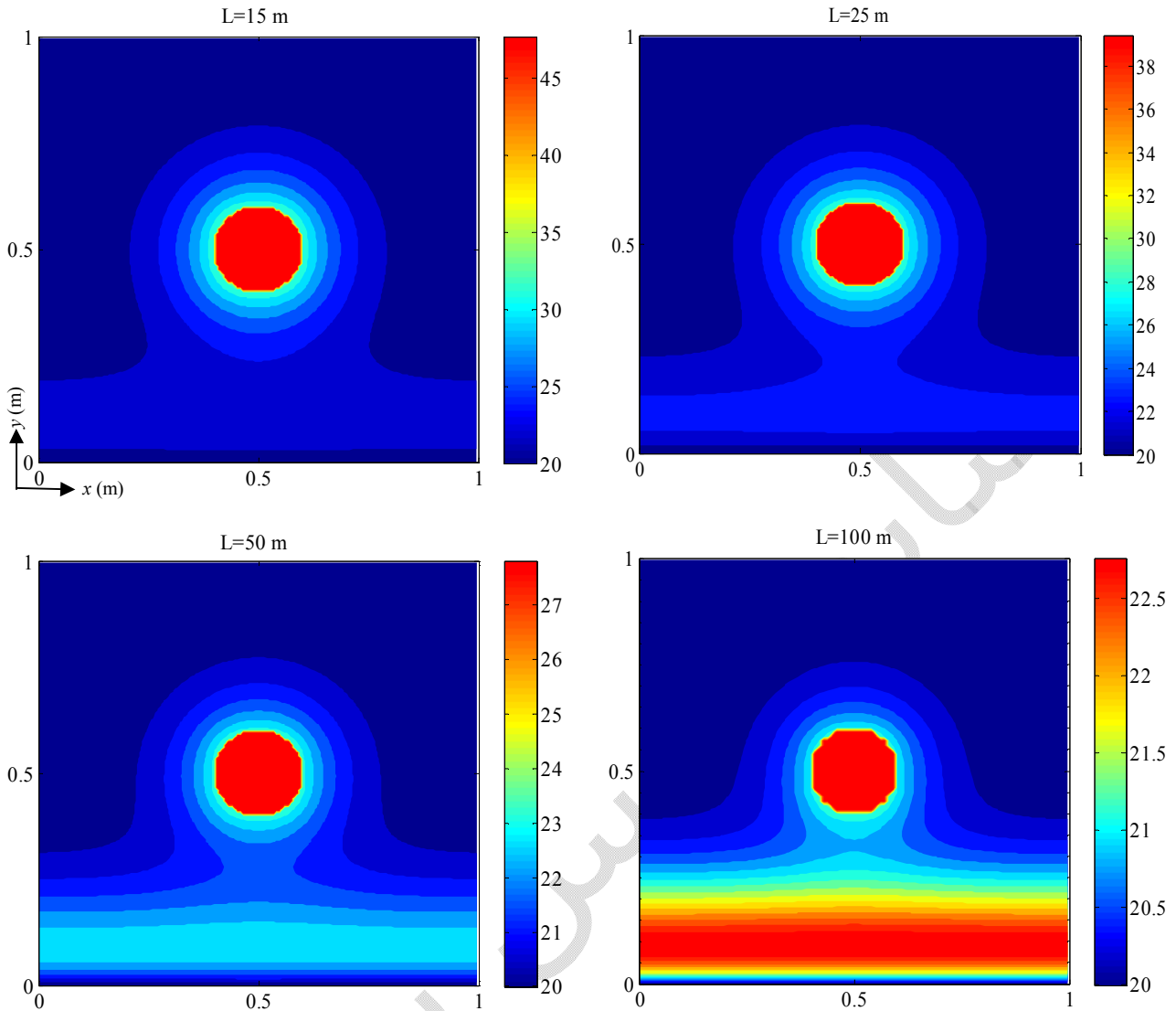
در شکل (۳-۴) همان‌طور که ملاحظه می‌شود با گذشت زمان، نرخ انتقال حرارت به دلیل کاهش اختلاف دمای بین هوا و خاک (افزایش دمای خاک) کم می‌شود، بنابراین میزان آب تولید شده نیز با گذشت زمان کاهش می‌یابد که آن را در شکل (۲-۴) نیز می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۳-۴ نمودار مجموع انتقال حرارت جابه‌جایی و چگالش برای طول‌های کوتاه

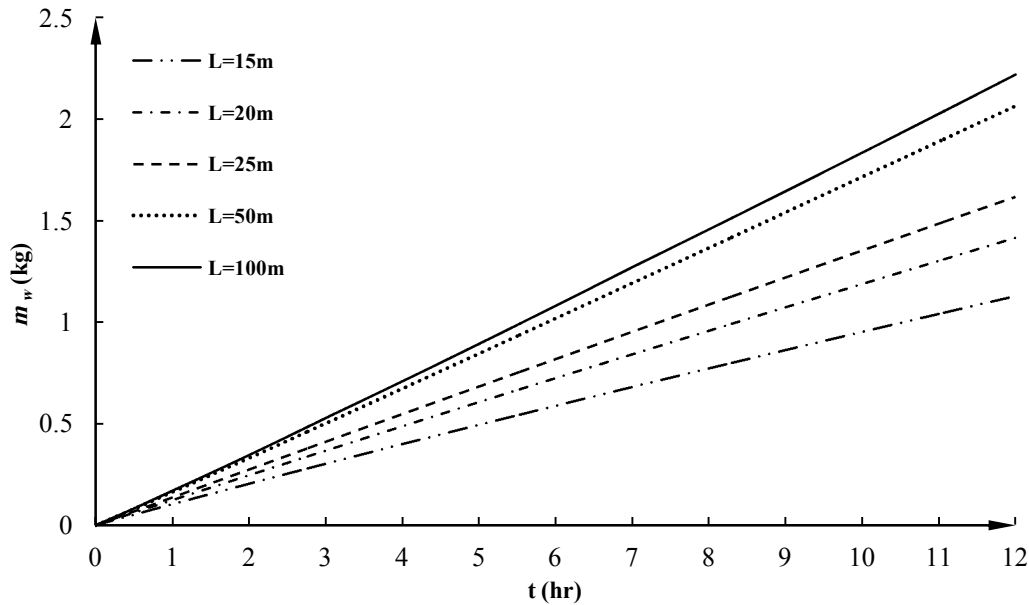
۳-۱-۴ طول‌های بلند لوله

همان‌طور که در شکل (۴-۴) ملاحظه می‌شود با پیش‌روی هوای مرطوب در طول لوله، دمای هوای خروجی کاهش می‌یابد. اما این کاهش دما تا زمانی مطلوب است که اختلاف دمای بین خاک و هوای مرطوب محسوس باشد (در مقطعی که طول لوله ۱۵ متر است تغییرات دما تقریباً از 20°C تا 45°C می‌باشد و در طول ۲۵ متر بین 20°C تا 35°C است و نهایتاً در مقطعی به طول ۱۰۰ متر این اختلاف دما از 3°C تجاوز نمی‌کند). بنابراین همواره طول بهینه‌ای وجود دارد که افزایش طول لوله بیش از آن به سبب افزایش ناچیز در مقدار آب تولیدی، مقرون به صرفه نمی‌باشد.



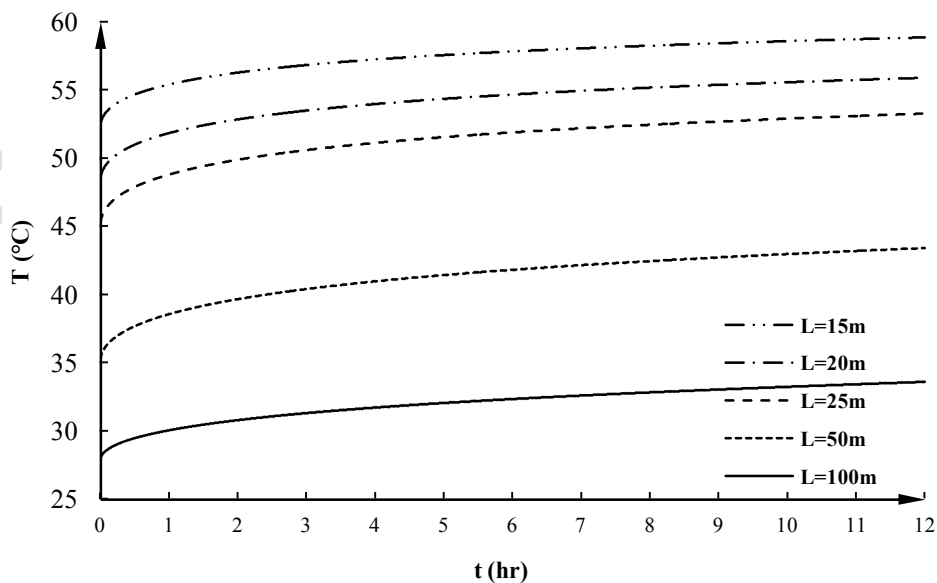
شکل ۴-۴ کانتور دمای خاک و هوای مرطوب برای طول‌های مختلف لوله در آخرین ساعت کارکرد سیستم

شکل (۴-۵) میزان آب استحصالی در سیستم‌های چگالشی را برای طول‌های مختلف لوله نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، استفاده از پنج لوله به طول ۲۰ متر، آب بیشتری نسبت به یک لوله به طول ۱۰۰ متر تولید می‌کند. زیرا در طول‌های بلند، در قسمت‌های انتهایی لوله، اختلاف دمای خاک و هوای مرطوب (نیروی محرکه) به شدت کاهش می‌یابد و انتقال حرارت به صورت چگالش بسیار ناچیز می‌گردد. به عبارتی در محدوده‌ای از طول لوله، میزان آب تولید شده بر واحد طول بیشینه می‌باشد که این طول را می‌توان به عنوان طول بهینه در نظر گرفت.



شکل ۴-۵ نمودار میزان آب تولیدشده برای طول لوله‌های بلند در ۱۲ ساعت کارکرد

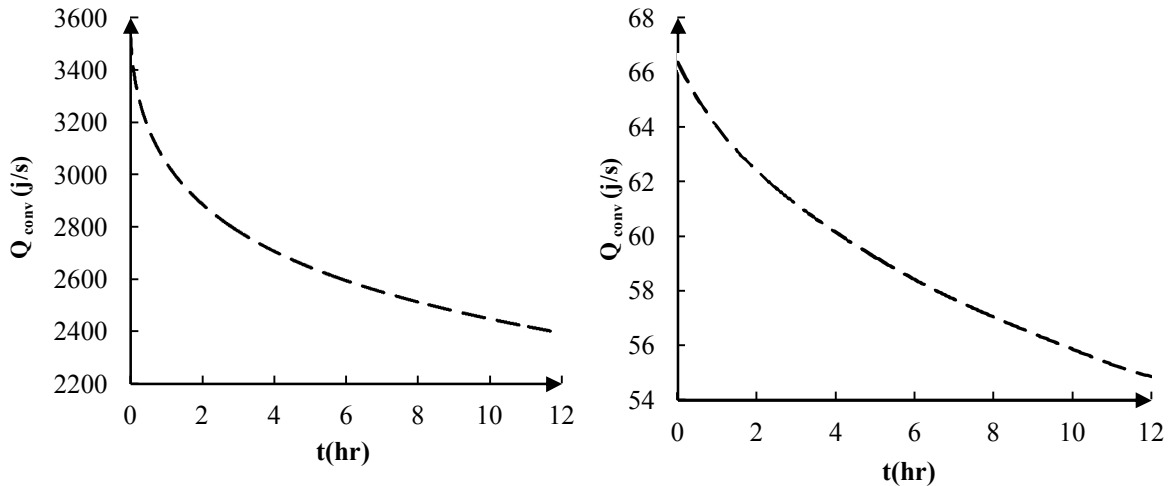
شکل (۴-۶)، تغییرات میانگین دمای هوای مرطوب را طی زمان، در طول‌های مختلف لوله نشان می‌دهد. زمانی که هوای گرم و مرطوب از درون لوله جریان می‌یابد دمای آن به تدریج به دلیل انتقال حرارت با خاک کاهش می‌یابد. از آنجا که خاک قادر به انتقال گرما با نرخ برابر با گرمای تولید شده توسط هوا نمی‌باشد، حرارت در خاک جمع می‌شود و دمای خاک اطراف لوله افزایش می‌یابد. در نتیجه با گذشت زمان افت دمای هوای مرطوب در طول لوله کاهش و میانگین دمای آن در طول زمان افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۶ نمودار دمای میانگین برای طول لوله‌های بلند در ۱۲ ساعت کارکرد سیستم

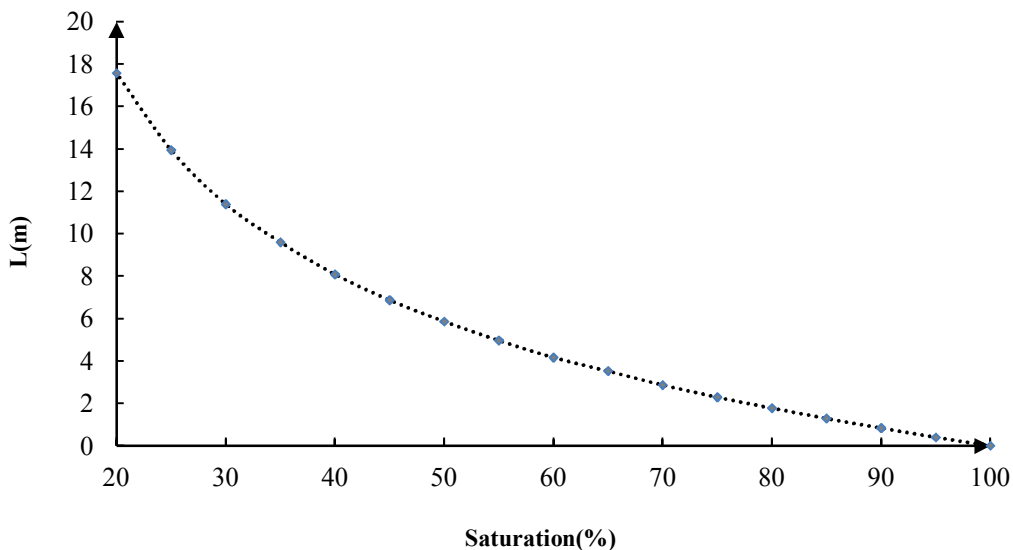
۴-۱-۴ مقایسه انتقال حرارت جابه‌جایی و چگالشی

همان‌طور که در شکل (۷-۴) ملاحظه می‌شود گرچه انتقال حرارت چگالشی نقش موثری در مقدار آب تولید شده دارد اما در مقایسه با انتقال حرارت جابه‌جایی ناچیز است.



شکل ۷-۴ مقایسه انتقال حرارت جابه‌جایی و چگالشی در طول ۱۵ متر

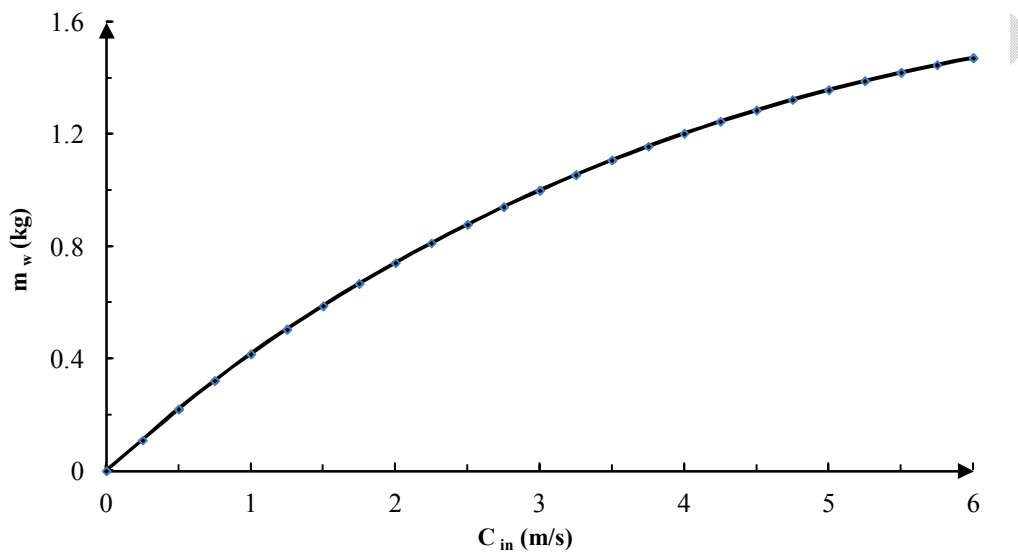
در شکل (۸-۴) مقدار طول لوله مورد نیاز، برای اشباع شدن هوای مرطوب رسم شده است، همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شیب نمودار با افزایش رطوبت نسبی کاهش می‌یابد، بنابراین در رطوبت نسبی پایین طول بیشتری نسبت به رطوبت نسبی بالا، برای اشباع شدن هوا نیاز است. در حالی در نتایج لیندبلاد و نوردل این طول در نظر گرفته نشده است.



شکل ۸-۴ طول لوله برای اشباع شدن هوای مرطوب

۴-۱-۵ تاثیر سرعت ورودی

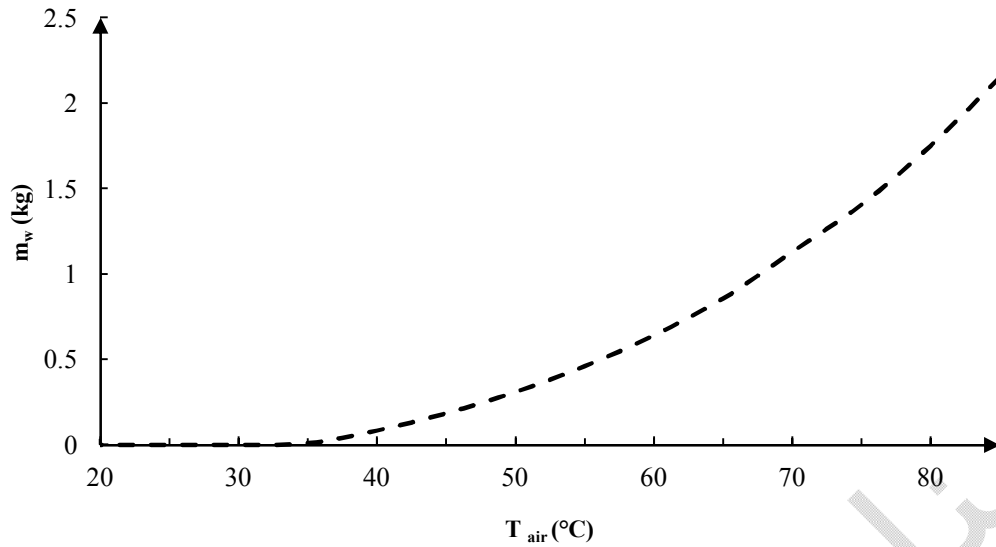
در شکل (۴-۹) مقدار آب تولید شده برای سرعت‌های مختلف نمایش داده شده است. با افزایش سرعت مقدار آب تولیدی افزایش می‌یابد. همان‌طور که از روابط فصل سوم مشخص است با افزایش سرعت، عدد رینولدز و متعاقباً عدد ناسلت افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار انتقال حرارت افزایش یافته و نهایتاً مقدار آب تولیدی بیش‌تر می‌شود.



شکل ۴-۹ تاثیر سرعت ورودی هوای مرطوب بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر

۴-۱-۶ تاثیر دمای هوا

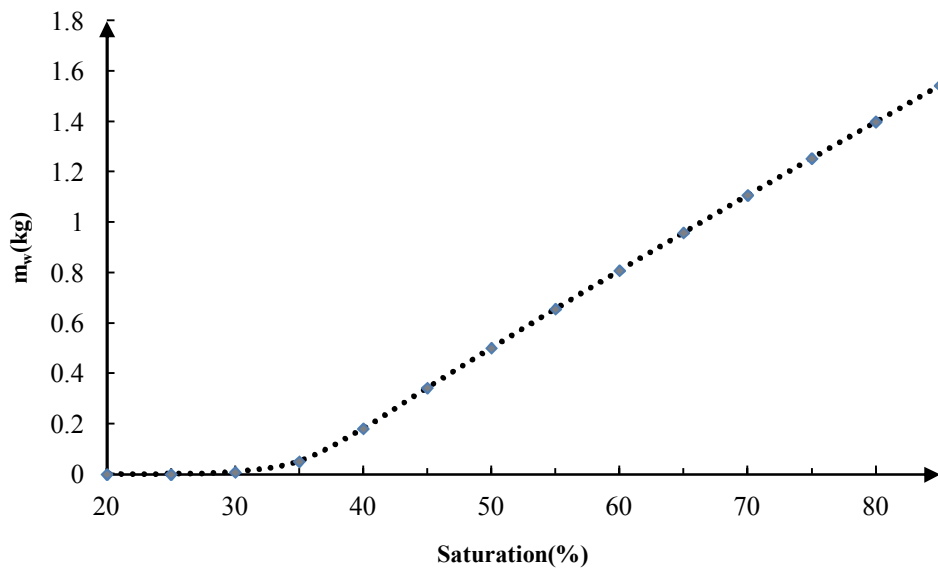
همان‌طور که از شکل (۴-۱۰) مشخص است با افزایش دمای سیال مقدار آب تولیدی را می‌توان افزایش داد، پس اگر به طریقی، مانند پیش‌گرم کردن هوای مرطوب با دستگاه تقطیرکن خورشیدی، دمای هوا را افزایش دهیم می‌توان مقدار آب تولیدی را به مقدار قابل توجهی بالا برد. با افزایش دمای سیال ورودی اختلاف دما بین دیواره لوله و سیال بیشتر شده و انتقال حرارت نیز متعاقباً افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار آب تولید شده بیشتر می‌گردد. با افزایش دمای هوای ورودی شیب نمودار افزایش می‌یابد (تغییرات آب تولید شده در دماهای بالاتر بیش‌تر است).



شکل ۴-۱۰ تاثیر دمای هوای ورودی بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر

۴-۱-۷ تاثیر رطوبت نسبی

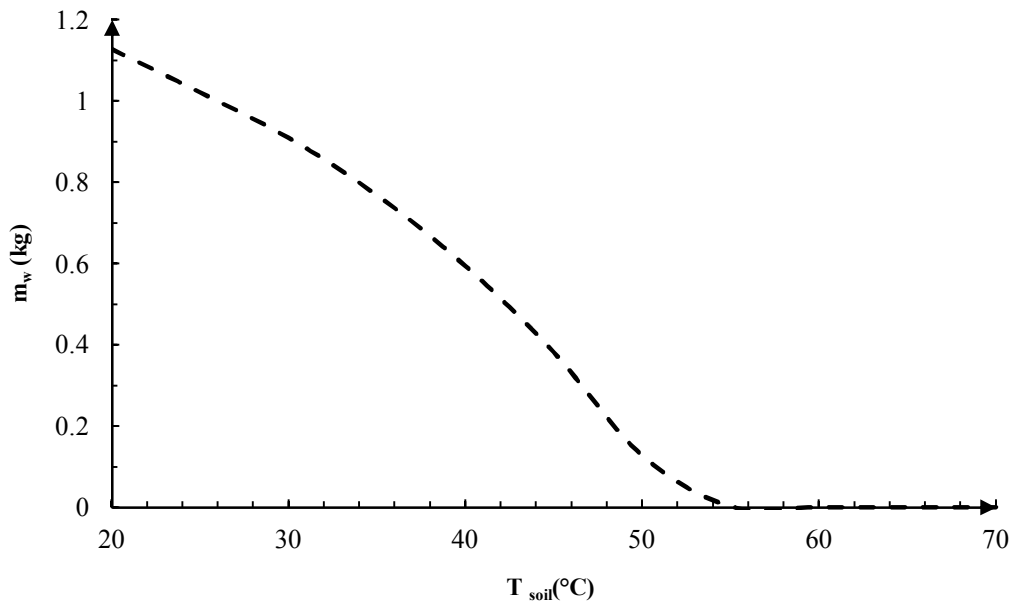
در شکل (۴-۱۱) تاثیر رطوبت نسبی بر میزان آب استحصالی رسم شده است. با توجه به این که انتقال حرارت چگالشی (میزان آب تولید شده) به طور مستقیم به رطوبت نسبی وابسته می باشد بنابراین بازده سیستم های چگالشی را می توان با رطوبت زنی مناسب و رساندن هوای مرطوب به حالت اشباع، افزایش داد.



شکل ۴-۱۱ تاثیر رطوبت نسبی هوای ورودی بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر

۸-۱-۴ تأثیر دمای خاک

در شکل (۴-۱۲) تأثیر دمای خاک بر میزان آب تولید شده رسم گردیده همان طور که ملاحظه می شود با افزایش دمای خاک، به دلیل کاهش اختلاف دمای هوا و خاک مقدار آب تولیدی نیز کاهش می یابد.

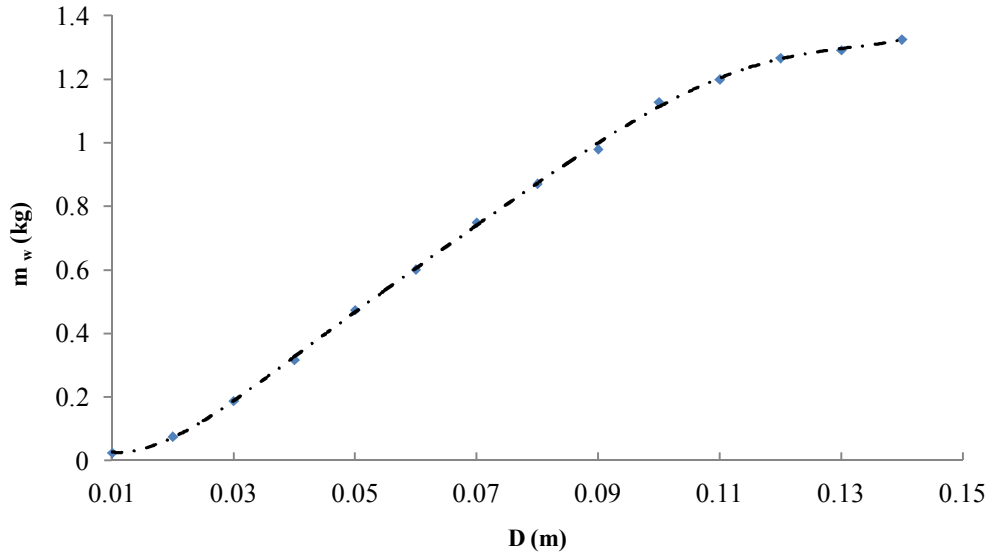


شکل ۴-۱۲ تأثیر دمای خاک بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر

۹-۱-۴ تأثیر قطر لوله

در شکل (۴-۱۳) با افزایش قطر، عدد رینولدز و ناسلت افزایش یافته که باعث می شود مقدار انتقال حرارت و در نتیجه مقدار آب تولیدی بیش تر شود.

از طرفی افزایش قطر باعث افزایش مساحت و انتقال حرارت می گردد، اما این افزایش قطر تا حدی مطلوب است که افت دمای هوای مرطوب در طول لوله به اندازه ای نشود که در قسمت های انتهایی آن انتقال حرارت کمی صورت پذیرد. در نتیجه برای قطر لوله نیز مقدار بهینه ای وجود دارد.



شکل ۴-۱۳ نمودار تاثیر قطر لوله بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر

۴-۱۰-۱ تاثیر جنس لوله

در جدول (۴-۱) مقاومت حرارتی و ضریب انتقال حرارت برای جنس‌های مختلف لوله با ضخامت ۵ میلیمتر نشان داده شده و میانگین آب تولیدی طی ۱۲ ساعت کارکرد برای ۱۵ متر لوله به دست آمده است.

جدول ۴-۱ ضریب انتقال حرارت هدایتی برای جنس‌های مختلف لوله

جنس لوله	ضریب انتقال حرارت هدایتی	مقاومت حرارتی	ضریب انتقال حرارت کلی $W/m^2 \cdot K$	مقدار آب تولید شده Kg
مس	۴۲۰	$1/21 \times 10^{-5}$	۱۲/۳۰	۱/۱۲
فولاد	۱۸	$2/84 \times 10^{-4}$	۱۲/۲۶	۱/۱۲
پی.وی.سی	۰/۳۳	۰/۰۱۵	۱۰/۳۳	۰/۹۸
پلی اتیلن	۰/۱۶	۰/۰۳۲	۸/۸۲	۰/۸۵

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در لوله‌های مس، فولاد، پی.وی.سی و پلی اتیلن به ترتیب بیشترین مقدار آب به دست آمده است. گرچه لوله‌های پی.وی.سی و پلی اتیلن مقدار آب کمتری تولید می‌کنند اما برای مناطقی که خاک شور دارند مناسب‌تر می‌باشد.

۴-۱۱ تاثیر جنس خاک

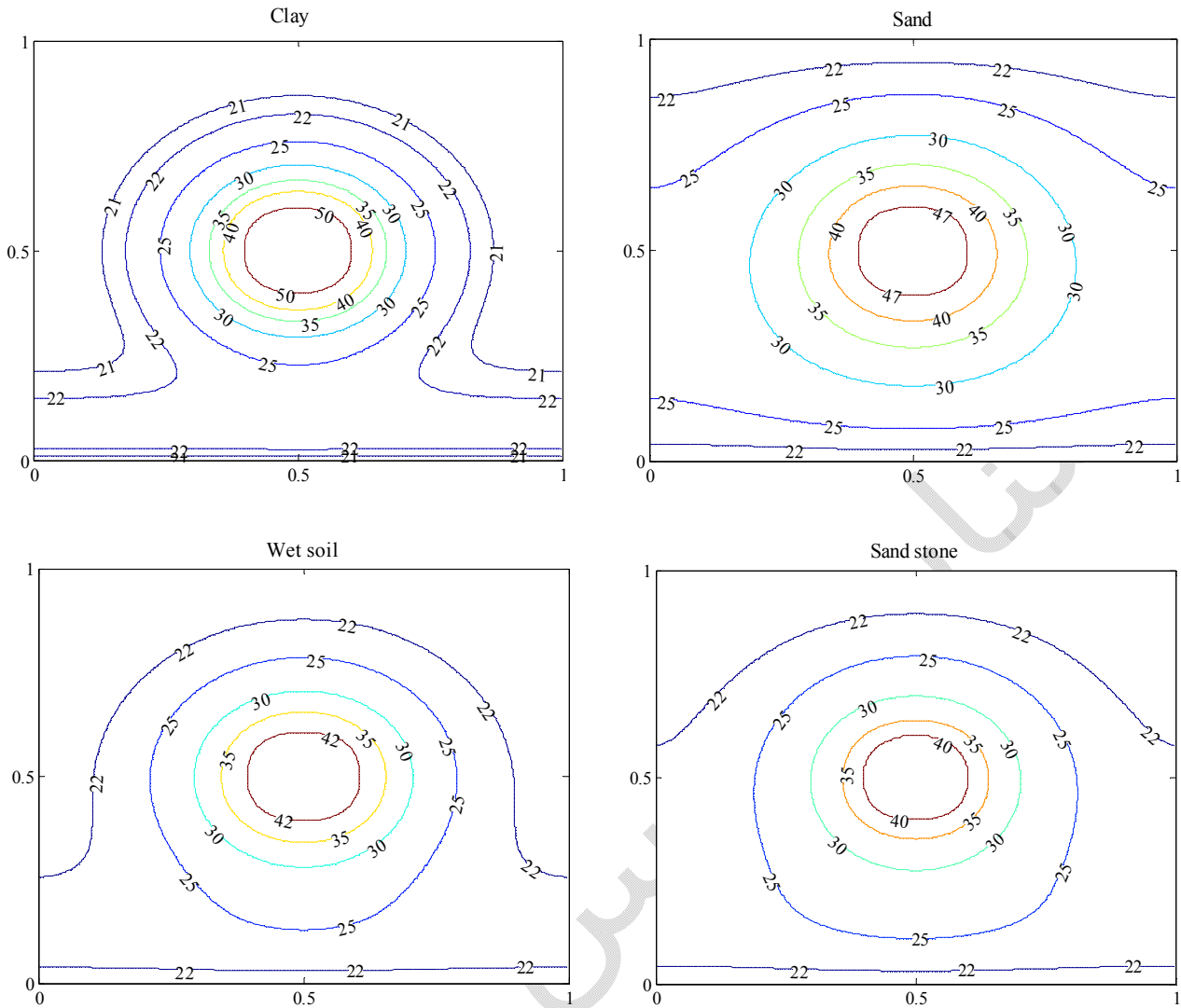
مقدار آب تولید شده به نوع خاک وابسته است. مقادیر ضریب هدایت و پخش حرارتی که در انتقال حرارت مؤثر می‌باشند برای خاک‌های مختلف در جدول (۴-۲) بیان شده است [۲۶]. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شود خاکی که بیشترین ضریب پخش حرارتی و هدایت گرمایی را دارد بیشترین مقدار آب تولیدی را خواهد داشت. بنابراین به ترتیب ماسه، شن، خاک مرطوب و خاک رس بیشترین آب را تولید می‌کنند.

جدول ۲-۴ ضریب هدایت و پخش حرارتی انواع خاک و مقدار آب تولید شده

property Type of soil	Thermal conductivity (W/m.°C)	ALFA (m/s ²)	Mass of water(kg)
Clay	0.9	2.72×10^{-7}	0.78
Sand	1.9	1.35×10^{-6}	1.44
Wet soil	2	4×10^{-7}	1.13
Sandstone	3.0	8.39×10^{-7}	1.45

با توجه به شکل (۴-۱۴) می‌توان نتیجه گرفت:

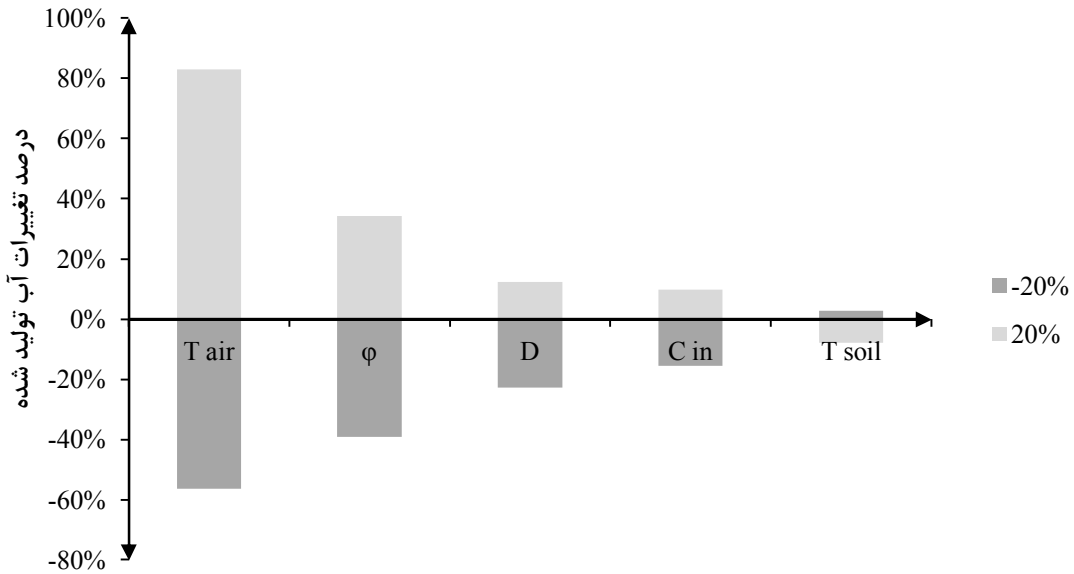
- ✓ خاک Clay کمترین ضریب پخش حرارتی و ضریب هدایت حرارتی را دارد به همین دلیل در انتهای کارکرد، دمای اطراف لوله در آن، بیشتر از بقیه خاک‌ها می‌باشد.
- ✓ خاک Sand stone بیشترین ضریب انتقال حرارت هدایتی را دارد و ضریب پخش بالایی نسبت به دیگر خاک‌ها برخوردار است، بنابراین سرعت انتقال حرارت در طول خاک بیش‌تر است و دمای اطراف لوله کمتر است و انتقال حرارت آن در طول ۱۲ ساعت نسبت به خاک‌های دیگر بیشتر می‌باشد در نتیجه ماکزیمم آب تولیدی را خواهد داشت.
- ✓ با توجه به این که ضریب پخش حرارتی در Sand بیشتر از بقیه خاک‌ها است خطوط توزیع دما از هم فاصله بیشتری دارند و در Clay خطوط توزیع دما متراکم‌تر می‌باشند.
- ✓ با افزایش ضریب هدایت گرمایی دمای اطراف لوله کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۱۴ کانتور دمای خاک برای جنس‌های مختلف در آخرین ساعت کارکرد سیستم در ورودی لوله

۴-۱-۱۲ آنالیز حساسیت

در شکل (۴-۱۵) میزان تأثیر پارامترهای مهم بر میزان آب تولید شده در سیستم‌های چگالشی بررسی شده است. آنالیز انجام شده نشان می‌دهد با تغییر $\pm 20\%$ درصدی این پارامترها، به ترتیب دمای هوای ورودی، رطوبت نسبی، قطر لوله، سرعت و دمای خاک بیشترین تأثیر را دارند.



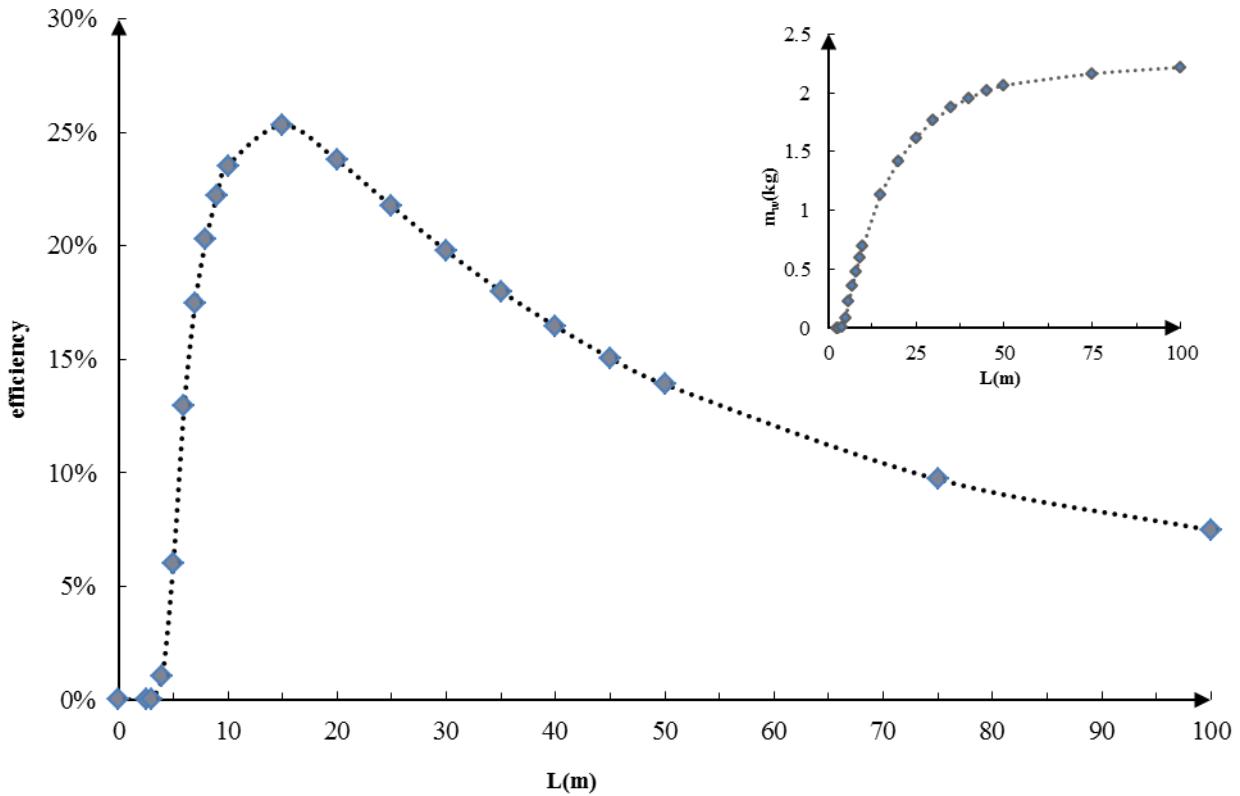
شکل ۴-۱۵ آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر

۴-۱-۱۳ بازده سیستم

بازده سیستم‌های چگالشی با توجه به روابط فصل سوم به عواملی مختلفی همانند دمای اولیه، رطوبت نسبی هوای مرطوب ورودی، قطر، طول لوله، جنس خاک و... بستگی دارد. در شکل (۴-۱۶) بازده بر حسب طول لوله رسم شده است. بدیهی است که در طول‌های اولیه (کمتر از ۳ متر) هوای مرطوب اشباع نشده است، بازده سیستم صفر می‌باشد و با افزایش طول و تولید آب شیرین بازده آن افزایش می‌یابد تا به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد.

در این پژوهش مقدار طول بهینه که ماکزیمم بازده بر اساس طول را دارد، برای شرایط اولیه بیان شده ۱۵ متر است.

همان‌طور که پیش‌بینی می‌گردد برای طول‌های بیشتر از طول بهینه به علت کاهش اختلاف دمای هوای مرطوب و خاک (کاهش انتقال حرارت که باعث کاهش مقدار آب تولیدی می‌گردد) بازده کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۱۶ بازده سیستم‌های چگالشی بر اساس طول لوله

۴-۲ خنک کاری سیستم‌های چگالشی در طول شب

همان‌طور که در بخش‌های قبل گفته شد سیستم‌های چگالشی در طول شب برای تولید آب در روز بعد باید خنک کاری شوند.

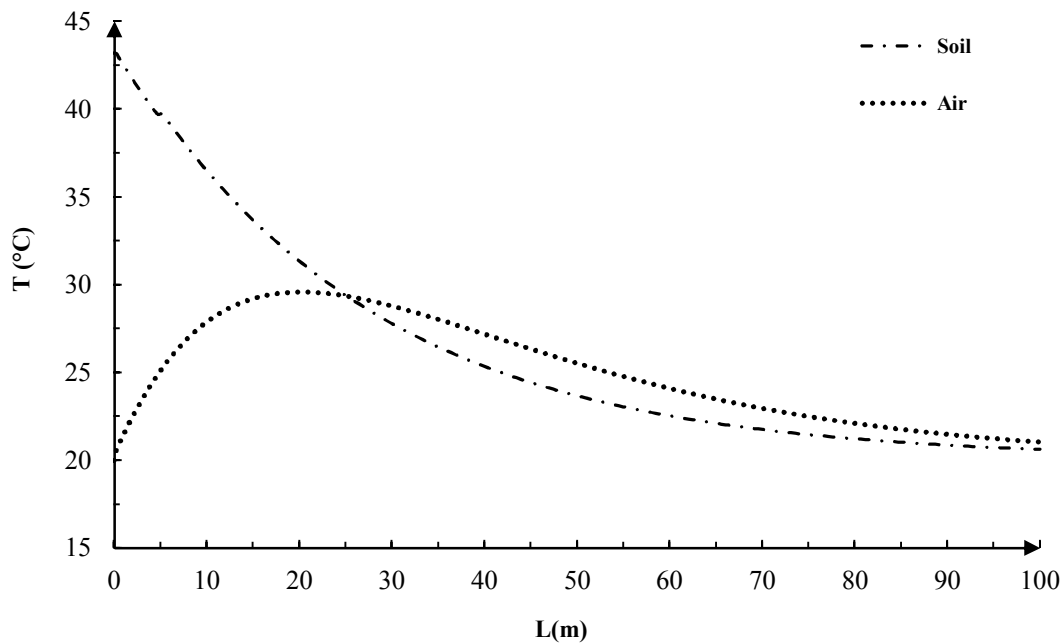
در طول روز شرایط مرزی برای سطح خاک برابر با دمای هوای محیط فرض شده است، بنابراین برای خنک شدن خاک اطراف لوله فرض می‌کنیم دمای هوا مطابق معادله زیر در طول شب، وارد لوله‌های مدفون در خاک شود:

$$T(t) = 20 + 8 \sin(\dots)$$

در ادامه این بخش نتایج مدل سازی دمای هوا، خاک و میزان انتقال حرارت در طول شب بررسی و بحث شده است.

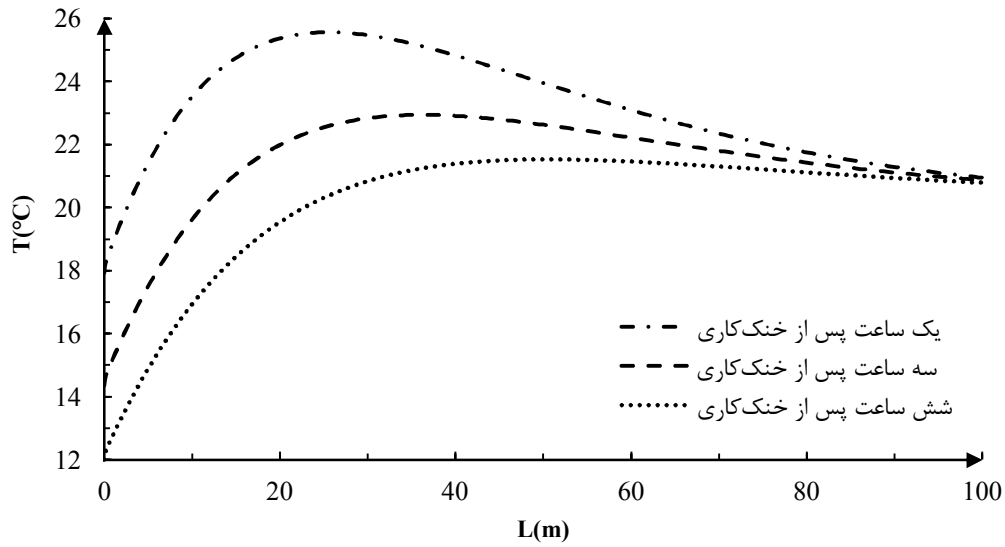
۴-۲-۱ دمای هوا و خاک در طول لوله

در شکل (۴-۱۷) دمای خاک اطراف لوله و هوا، در طول لوله برای اولین ساعت خنک کاری رسم شده است. همان طور که ملاحظه می شود، در طول های کم تر از ۲۵ متر، به علت انتقال حرارت خاک با هوا، دمای هوا افزایش می یابد. این افزایش دما تا زمانی ادامه دارد که دمای هوا با خاک تقریباً یکسان شود. بدین ترتیب در طول های بیش تر از ۲۵ متر، با پیش روی هوا، به دلیل اینکه دمای خاک کم تر از هوا می گردد، انتقال حرارت معکوس و باعث خنک شدن هوا به جای خاک می شود که برای سیستم های چگالشی نامطلوب است. بنابراین برای خنک سازی در شب نیز طول بحرانی وجود دارد.

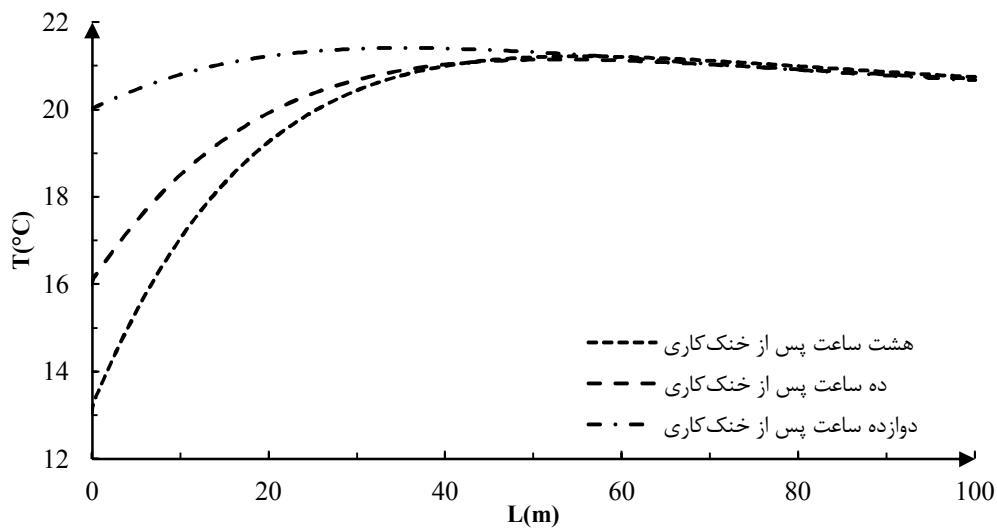


شکل ۴-۱۷ دمای خاک اطراف لوله و هوا برای اولین ساعت خنک کاری شب

در شکل های (۴-۱۸) و (۴-۱۹) دمای هوا، در طول لوله برای ساعات های مختلف خنک کاری رسم شده است. همان طور که انتظار داریم با گذشت زمان در سیستم های چگالشی، طول متناسب با ماکزیمم دمای هوا افزایش می یابد. ملاحظه می شود در آخرین ساعت کارکرد تغییرات دمای هوا بین 20°C تا 22°C می باشد که نشان دهنده آن است دمای خاک اطراف لوله تقریباً برابر با دمای اولین ساعت کارکرد روز قبل شده است.

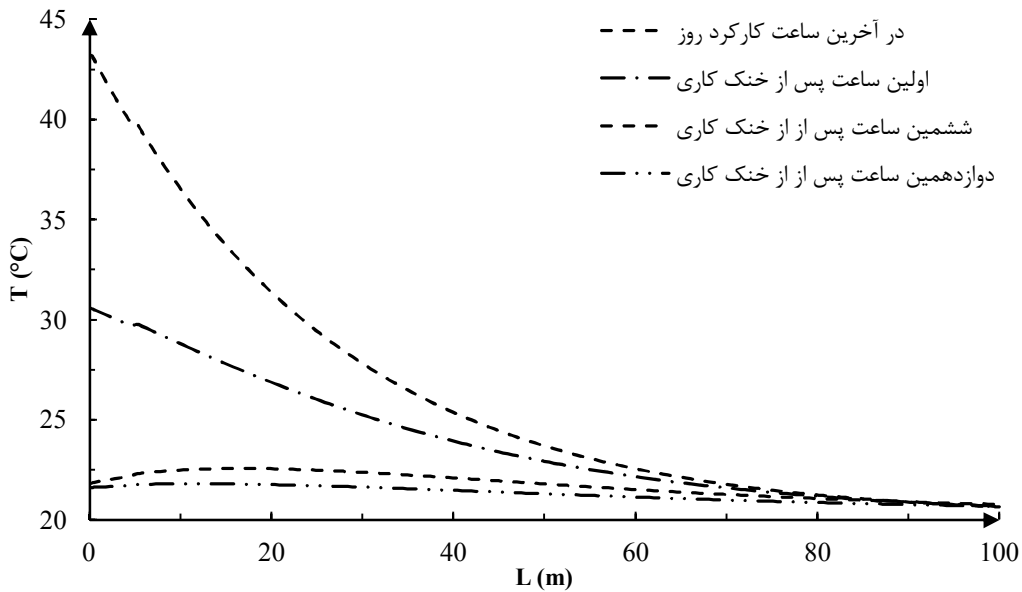


شکل ۴-۱۸ دمای هوا در اولین، سومین و ششمین ساعت بعد از خنک کاری



شکل ۴-۱۹ دمای هوا در هشتمین، دهمین و دوازدهمین ساعت بعد از خنک کاری

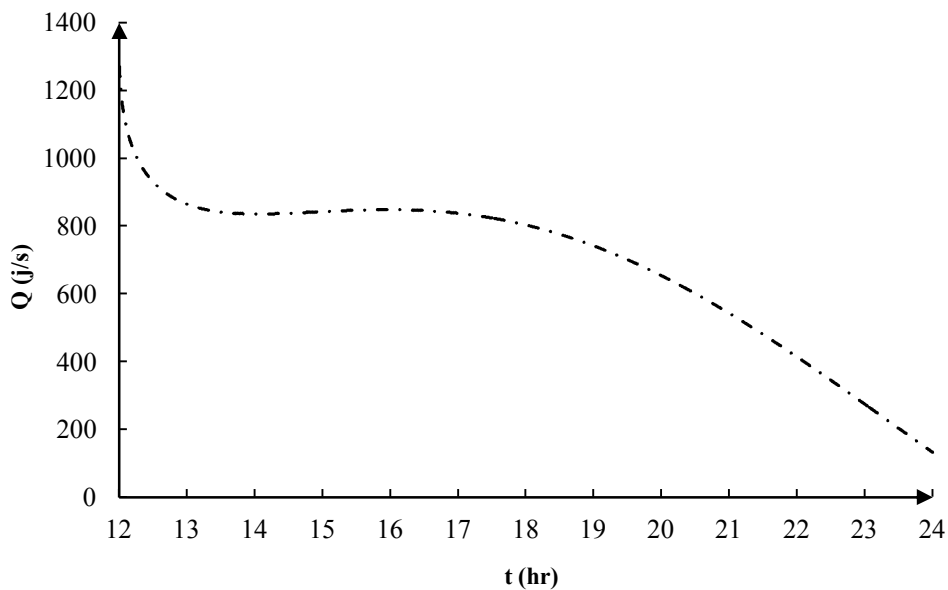
در شکل (۴-۲۰) دمای خاک اطراف لوله برای ساعت‌های مختلف خنک کاری رسم شده است. تغییرات دمای خاک در ساعت اول نسبت به ساعت ششم بیشتر است زیرا اختلاف دمای خاک و هوا در ساعت‌های اولیه ماکزیمم است. از ساعت ششم تا دوازدهم همان‌طور که ملاحظه می‌شود دمای خاک اطراف لوله تقریباً ثابت است و تغییرات محسوسی ندارد.



شکل ۴-۲۰ دمای خاک اطراف لوله در اولین، ششمین و دوازدهمین ساعت بعد از خنک کاری

۴-۲-۲ میزان انتقال حرارت جابه جایی

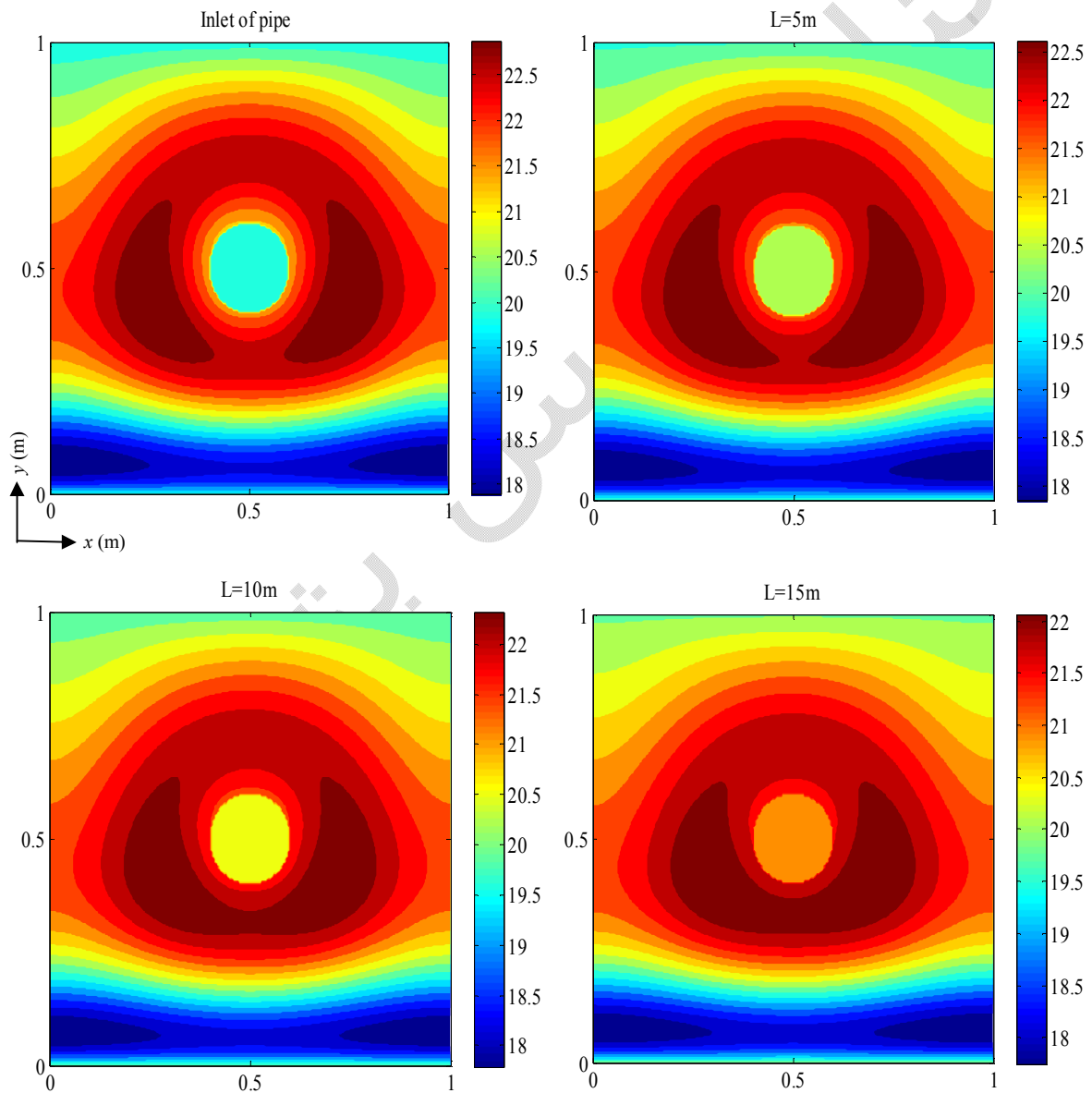
در شکل (۴-۲۱) مقدار گرمای انتقال یافته از خاک به هوا رسم شده است. انتقال حرارت در ساعات اولیه شب به دلیل اینکه اختلاف دمای خاک و هوا ماکزیمم است، بیشترین مقدار را دارد و این مقدار با گذشت زمان کاهش می یابد تا هنگامی که انتقال حرارت در انتهای شب ناچیز (نزدیک به صفر) گردد، بنابراین دمای خاک اطراف لوله و هوا تقریباً یکسان می شود.



شکل ۴-۲۱ مقدار انتقال حرارت جابه جایی در طول شب برای ۱۵ متر لوله

۳-۲-۴ کانتور دمای هوا و خاک در طول و زمان‌های مختلف

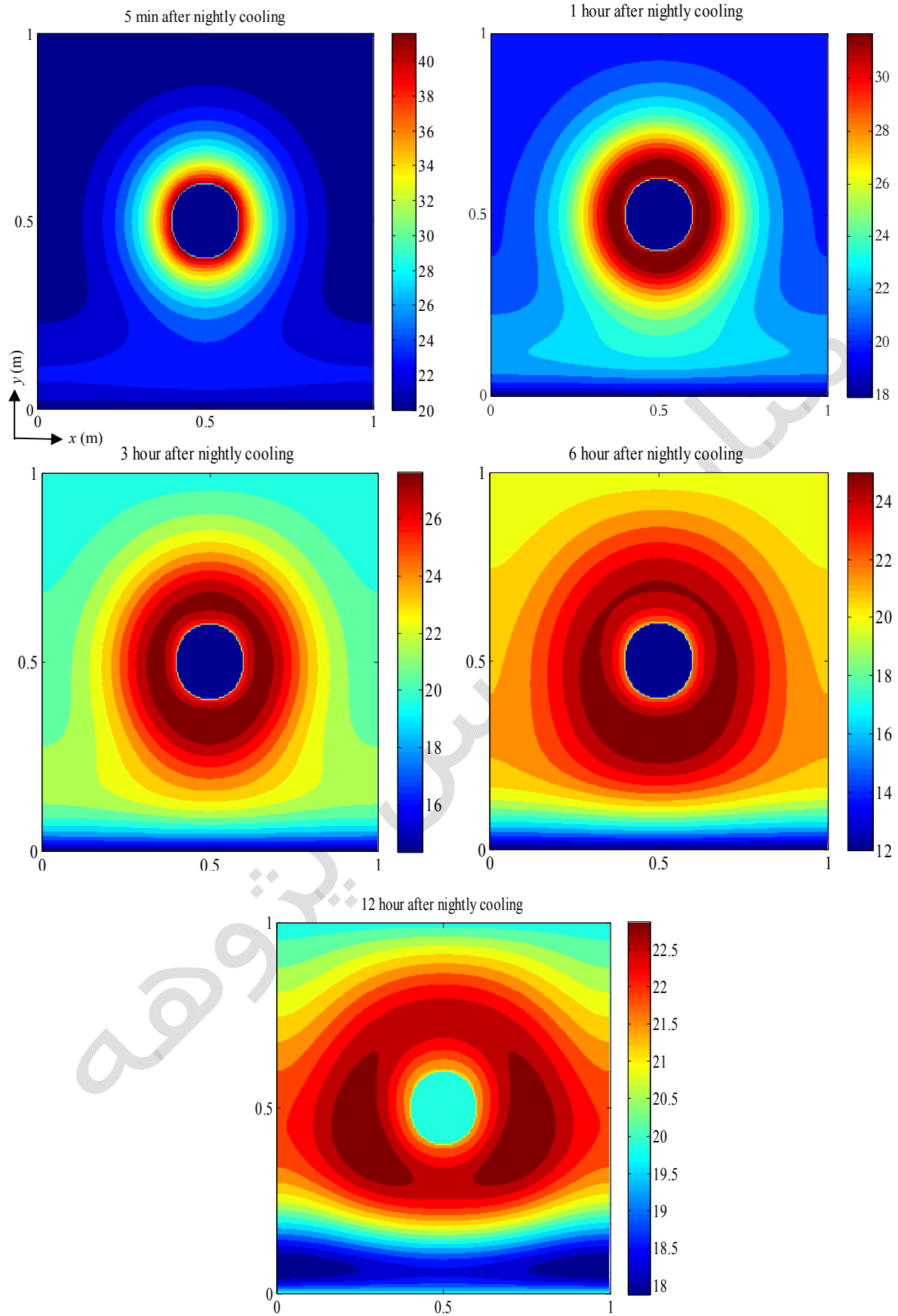
در شکل (۲۲-۴) کانتور دمای خاک و هوا برای طول‌های مختلف در آخرین ساعت کارکرد ترسیم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در اطراف لوله و کمی دورتر از آن حفره‌هایی ایجاد شده است که ماکزیمم دما را دارند که نشان‌دهنده آن است که خاک به‌طور کامل خنک‌سازی نشده است و دقیقاً به شرایط اولین روز کارکرد (دمای خاک در آغاز روز 20°C در نظر گرفته شده است که تقریباً پس از خنک‌سازی 23°C می‌گردد) نرسیده است.



شکل ۲۲-۴ کانتور دمای هوا و خاک در آخرین ساعت کارکرد سیستم در طول شب

از آنجایی که دمای اطراف لوله یکی از مهمترین پارامترها در مقدار آب به دست آمده می باشد، دمای این حفره ها پس از چندین روز کارکرد افزایش می یابد و باعث می شود کارایی سیستم در طول روز کاهش یابد. بنابراین برای رسیدن به دمای روز قبل پیشنهاد می شود سرعت هوای ورودی افزایش یابد یا لوله های کوچکی در مکانهایی که ماکزیمم دما رخ می دهد قرار داده شود تا خنک سازی به طور کامل انجام شود. البته این امر باعث تغییر شرایط مدل سازی و نتایج میزان آب به دست آمده نیز می گردد.

در شکل (۴-۲۳) کانتور دمای خاک و هوا برای ساعت های مختلف خنک سازی در ورودی لوله رسم شده است. همان طور که ملاحظه می گردد، در ابتدا ماکزیمم دمای خاک 41°C ، یک ساعت پس از خنک کاری 31°C ، بعد از شش ساعت 25°C و نهایتاً پس از ۱۲ ساعت خنک کاری 23°C می گردد که نشان دهنده آن است در ساعت های اولیه میزان خنک کاری خاک بیشتر می باشد و از ساعت ششم به بعد تقریباً تغییرات دمای خاک ناچیز است بنابراین بر خلاف تصور نمی توان با افزایش بیش از حد زمان خاک را خنک کرد در نتیجه پیشنهاد می گردد با ایجاد سوراخ هایی در اطراف لوله (مکان هایی که دما ماکزیمم است) خنک سازی به صورت کامل و سریع تر انجام شود.



شکل ۴-۲۳ کانتور دمای خاک و هوا در ساعات مختلف کارکرد سیستم در ورودی لوله

۳-۴ نتیجه گیری

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که:

۱- متوسط آب شیرین استحصالی از رطوبت هوا در سیستم‌های چگالشی برای لوله‌ای مدفون در عمق ۰/۵ متری زمین با قطر ۰/۲ متر و طول ۱۵ متر برای هوای ورودی با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۷۰ درصد، ۱/۲ کیلوگرم است. میزان آب به‌دست آمده در این سیستم قابل رقابت با روش‌های مرسوم تولید آب شیرین مانند MSF و MED نمی‌باشد، ولی در مناطق کم‌جمعیت و دورافتاده جنوب که با مشکل کمبود آب شیرین روبرو هستند، این سیستم‌ها کارآیی خوبی دارند و می‌توانند قسمتی از مشکل کمبود آب را برطرف نماید.

۲- با پیش‌روی هوای مرطوب در طول لوله دمای آن کاهش می‌یابد تا به نقطه شبنم برسد که این امر باعث می‌شود در طول‌های اولیه آب تولید نگردد. در طول‌های بلند لوله، در قسمت‌های انتهایی تقریباً دمای هوا و خاک یکسان و آب ناچیزی تولیدی می‌گردد. بنابراین همواره طول بهینه‌ای وجود دارد که در آن میانگین آب تولید شده بر واحد طول لوله ماکزیمم است و ماکزیمم بازده را دارد. در این پژوهش با توجه به شرایط اولیه و هندسه لوله این طول ۱۵ متر به‌دست آمده است. در حالی که در پژوهش انجام شده توسط لیندبلاد و نوردل طول اولیه برای اشباع شدن هوای مرطوب در نظر گرفته نشده بود و با افزایش طول نیز میزان آب تولید شده نیز افزایش قابل توجهی داشت.

۳- با توجه به نتایج آنالیز حساسیت می‌توان بیان کرد که دما و رطوبت نسبی هوای ورودی به ترتیب از عوامل مهمی در میزان آب تولیدی می‌باشند. لذا با توجه به وضعیت اقلیمی کشور و در راستای افزایش کارایی سیستم پیشنهاد می‌گردد که سیستم مذکور به دستگاه رطوبت‌زن خورشیدی که روشی ارزان و مناسب برای اشباع کردن هوا است، مجهز گردد.

۴- یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان آب تولید شده جنس خاک است، به عنوان مثال با تغییر جنس خاک از رس به شن و ماسه می‌توان میزان آب تولید شده را دو برابر کرد، در نتیجه برای تولید آب بیش‌تر می‌توان از خاک با ضریب پخش حرارتی و هدایتی بیش‌تر استفاده کرد.

۵- در مناطق کم آب، سیستم‌های تولید آب چگالشی با افزایش بازدهی (افزایش قدرت فن (سرعت)، افزایش دما، رطوبت نسبی هوای ورودی و...) می‌توانند برای مصارف کشاورزی نیز مورد استفاده قرار بگیرند. لازم به ذکر است در مصارف کشاورزی الزاماً آب بیش‌تری تولید می‌شود زیرا علاوه بر انتقال حرارت، انتقال جرم نیز داریم و با افزایش رطوبت خاک، ضریب هدایت گرمایی آن افزایش می‌یابد که باعث می‌شود انتقال حرارت بیش‌تری نیز انجام گردد.

۶- در طول روز، دمای خاک در اثر کارکرد در طول روز افزایش می‌یابد. در طول شب نیز دمای محیط کمتر از خاک می‌باشد به همین دلیل از هوا برای خنک‌کاری خاک استفاده می‌گردد. در طول‌های اولیه لوله به علت انتقال حرارت از خاک به هوا دمای هوا افزایش می‌یابد اما افزایش دما تا زمانی ادامه می‌یابد که دمای خاک با هوا تقریباً برابر شده و پس از آن به علت توزیع دمای اولیه خاک انتقال حرارت به صورت معکوس از هوا به خاک صورت می‌گیرد که در خنک‌کاری سیستم‌های چگالشی مطلوب نمی‌باشد. بنابراین برای خنک‌کاری شب نیز طول بحرانی وجود دارد.

۷- در ساعت‌های اولیه شب به دلیل اینکه اختلاف دمای هوا و خاک ماکزیمم است، خنک‌کاری بیشتر می‌باشد و پس از شش ساعت تقریباً تغییرات دمای خاک ناچیز و قابل صرف‌نظر است.

۸- در اطراف لوله و کمی دورتر از آن حفره‌هایی وجود دارد که پس از ۱۲ ساعت خنک‌کاری نیز دمای آن به شرایط روز قبل نمی‌رسد و باعث می‌شود بعد از مدتی بازده سیستم کاهش یابد. بنابراین با افزایش مدت زمان خنک‌کاری نمی‌توان خاک را به شرایط اولیه رساند، پیشنهاد می‌شود در اطراف لوله اصلی، لوله‌هایی با قطر کمتر برای خنک‌کاری استفاده شود.

۴-۴ پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده

بنابراین می‌توان مطالعه‌ها و پژوهش‌هایی بسیاری در این حوزه انجام داد، از جمله پیشنهاد می‌شود:

- ۱- طراحی و ساخت سیستم‌های تولید آب چگالشی خوراکی مطابق با شرایط اولیه این پژوهش و مقایسه آن با نتایج به‌دست آمده
- ۲- بهینه‌سازی سیستم‌های خوراکی با استفاده از پارامترهای موثر در انتقال حرارت و میزان آب تولید شده
- ۳- مدل‌سازی سیستم‌های تولید آب چگالشی کشاورزی و بهینه‌سازی آن
- ۴- ساخت نمونه آزمایشگاهی خوراکی و کشاورزی با شرایط جنوب و شمال کشور ایران
- ۵- مقایسه هزینه آب شیرین‌تولید شده در سیستم‌های تولید آب چگالشی با آب‌شیرین‌کن‌های موجود در بازار

منابع

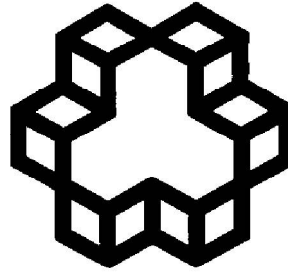
- [۱]. علی، فلاح علمداری. ۱۳۸۸ تابستان. بررسی انواع آب شیرین کن‌های متداول و طراحی یک نمونه آب شیرین کن خورشیدی. کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- [2]. Jenny Lindblom, “ Solar Thermal Technologies for Seawater Desalination: state of the art”, Renewable Energy systems, Luleå University of Technology, SE-97187 Luleå, Sweden
- [۳]. علی، محمدی. ۱۳۹۱ آذر. تولید آب شیرین از هوای مرطوب با سیستم سرمایه‌گذاری زیرزمینی. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- [4]. A.M. Gustafsson, J. Lindblom, 2001. “Underground Condensation of humid air –a Solar Driven System for irrigation and Drinking-water Production”. MS Thesis, Luleå University of Technology, Sweden.
- [5]. M.W. Rosegrant X. Cai and S.A. Cline, World Water and Food to 2025: Dealing with Scarcity, International Food Policy Research Institute, 2002.
- [6]. Soteris A.Kalogirou, Seawater Desalination using renewable energy sources. Progress in Energy and Combustion Science 2005
- [7] M.G. Marcovecchio, S.F. Mussati, P.A. Aguirre, N.J. Scenna, Optimization of hybrid desalination processes including multi stage flash and reverse osmosis systems, Desalination Journal, Vol. 182, pp. 111–122, 2005.
- [8] N. Lukic, L.L. Diezel, A.P. Fröba, A. Leipertz, Economical aspects of the improvement of a mechanical vapour compression desalination plant by dropwise condensation, Desalination Journal, Vol. 264, pp. 173–178, 2010.
- [۹]. محمد مهدی، امیرآبادی فراهانی. ۱۳۹۱ تابستان. ارزیابی فنی و اقتصادی سیستم ترکیبی آب شیرین کن اسمز معکوس. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- [۱۰]. سیدرضا، حسینی. ۱۳۸۹ زمستان. بررسی قابلیت اطمینان در کویلینگ آب شیرین کن‌های ترکیبی. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- [۱۱]. حسام، حامدی. ۱۳۸۹ اسفند. شبیه‌سازی و تحلیل آب شیرین کن خورشیدی. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- [12] A. A. Al-Farayedhi, N. I. Ibrahim, P. Gandhidasan, Condensate as a water source from vapor compression systems in hot and humid regions, Desalination Journal, Vol. 349, pp. 60–67, 2014
- [13] B. A. Habeebullah, Potential use of evaporator coils for water extraction in hot and humid areas, Desalination Journal, Vol. 237, pp. 330–345, 2009.
- [14] P. Blum, G. Campillo, T. Kölbl, Techno-economic and spatial analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany, Energy Journal, Vol. 36, pp. 3002–3011, 2011.
- [15] W. Zhang, J. Wei, Source Heat Pump System in High Temperature and High Humidity Areas, Energy Procedia Journal, Vol. 14, pp. 198–204, 2012.
- [16]. Jenny Lindblom, Bo Nordell, “Water production by underground condensation of humid air”, Desalination 189 (2006) 248–260

- [17]. Jenny Lindblom, Bo Nordell, "Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation", *Desalination* 203 (2007) 417–434
- [18] B. Yousefi, S. Boroomandnasab, M. ThameurChaibi, Assessment of the Performance of Condensation Irrigation System. *World Rural Observations*, Vol.4, pp. 14-17, 2012.
- [19] V. Khalajzadeh, M. Farmahini-Farahani, G. Heidarinejad, A novel integrated system of ground heat exchanger and indirect evaporative cooler, *Energy and Buildings*, Vol. 49, pp. 604–610, 2012.
- [20] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 5th ed, Wiley & Sons, New York, pp. 465-532 , 2002.
- [21] J.H. Lienhard IV and J.H. Lienhard V, *Heat transfer textbook*, 3th ed, 2008.
- [22] K.A. Haffman, S.T. Chiang, *Computational fluid dynamic for engineers*, 4th ed, volume one, Engineering education system, chapter. 4,9, 2007.
- [23] K.H. Versteeg, W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics (The finite volume method)*, Second edition, Bell & Bain. London, pp. 243-266, 2007.
- [24] Van Wylen, G.J and Sonntag, R.E and Borgnakke, C. *Fundamentals of classical thermodynamics*, 4th ed, Wiley. New York, pp. 438-472 , 2002.
- [25] Y.A. Cengel, A.B. Michael, *Thermodynamic an engineering approach*. 4th edition . McGraw/Higher education, PP. 668-700 , 2002.
- [26] X. Li, J. Zhao and Q. Zhou, Inner heat source model with heat and moisture transfer in soil around the underground heat exchanger, *Applied Thermal Engineering* pp. 1565–1577, 2005

Abstract

The development of new technologies for producing desalinated water is essential. A recent investigation is introduced a low capacity desalinated water production system by condensing of humid air, and called them condensation drinking water production system. In this systems, warm and humid airflow is leaded through the buried pipes, then air gradually cools and condenses when its temperature became less than the exist vapor temperature in the humid air, i.e. at dew point temperature, so fresh water will precipitate. According to the pipe types, these systems can be applied for drinking water production or irrigation applications. Evaluation of critical length and assessment of the parameters influences on the desalinated water production amount is the aim of this investigation. For a typical condensation drinking water production system, the governing equations and their initial and boundary conditions and also discretization using the finite volume method is described first. Then a computational model is developed by using MATLAB software to evaluate the water amount in the period of one day. Numerical results indicate that the water production capacity is approximately 1.2 kg per day over a pipe with 15-m length, 0.2-m diameter and 0.5-m depth for entering air with 70°C temperature and 70% relative humidity. Also, the sensitivity analysis has been done on different parameters and soil types. Sensitivity analysis results show that the air temperature and relative humidity have the most influence on the amount of produced water; also soil type is one of the important parameters in the air heat transfer that can influence the amount of produced water. Sandstone, sand, wet soil and clay produces more water respectively. Soil temperature almost reaches to the initial temperature after nightly cooling operation.

Keywords: condensation drinking water production systems, hot and humid air, soil, sensitivity analysis, nightly cooling



1928

K. N. Toosi University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
in Mechanical Engineering.

**Water production by underground condensation of humid air
and solar still**

Supervisor

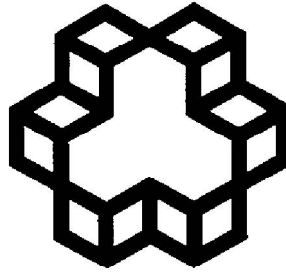
Majid Bazargan

Mostafa mafi

By

Mayam Ahmadi

Winter 2015



1928

K. N. Toosi University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
in Mechanical Engineering.

**Water production by underground condensation of humid air
and solar still**

Supervisor

Majid Bazargan

By

Mayam Ahmadi

Winter 2015