



## Analysis and Investigation of Effective Parameters on Condensed Water Production System Using Solar Energy and Earth Cooling

S. Daneshmand<sup>1</sup>, I. Shamoradi<sup>2</sup>, and V. Monfared<sup>3\*</sup>

### Abstract

Nowadays, due to population growth, urban development and lack of fresh (drinking) water resources, the discovery of new ways of water production is of great importance. One of the new methods of producing the drinking (fresh) water at low capacities is the use of air humidity, which is known as condensed water production system. In the present research, drinking water production systems have been studied with the aim of obtaining the optimal length and evaluating the parameters affecting the amount of water produced in condensed systems. The obtained results show that 2.1 Kg water/day will be approximately extracted with considering  $D = 0.2$  m,  $y = 0.5$  m,  $L = 15$  m,  $T_i = 70$  °C,  $H_r = 70$  %. Sensitivity analysis has been also performed on various parameters and soil type. The obtained results of this analysis also show that air temperature and relative humidity have the greatest effect on the amount of produced water, and also sand, gravel, wet soil and clay produce the highest amount of water respectively. So, this research work may be beneficial and useful for human comfort and convenience. Finally, suitable and good results are obtained by the proposed method.

**Keywords:** Fresh Water, Condensed Water, Solar Energy, Earth Cooling.

Received: September 20, 2020

Accepted: March 7, 2021

## تحلیل و بررسی پارامترهای مؤثر بر سیستم تولید آب چگالشی با استفاده از انرژی خورشیدی و سرمایش زمین

سعید دانشمند<sup>۱</sup>، ایمان شامرادی<sup>۲</sup> و وحید منفرد<sup>۳\*</sup>

### چکیده

امروزه به دلیل افزایش جمعیت، گسترش شهرها و کمبود منابع آب شیرین، کشف روش‌های 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 تحقیق سیستم‌های تولید آب خوراکی با هدف به‌دست آوردن طول بهینه و ارزیابی پارامترهای مؤثر بر میزان آب تولید شده در سیستم‌های چگالشی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج عددی نشان می‌دهند که 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 ۲/۱ کیلوگرم آب در روز استحصال خواهد شد. آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مختلف و جنس خاک نیز انجام شده است. همچنین، نتایج تحلیل نشان می‌دهد 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.

**کلمات کلیدی:** آب چگالشی، انرژی خورشیدی، سرمایش زمین، هوای مرطوب، آب شیرین.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۶/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۲/۱۷

1- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. **E-mail:** s.daneshmand@iaumajlesi.ac.ir, **PO Box:** 8631656451

2- Department of Mechanical Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. **E-mail:** imanshamoradi@email.com, **PO Box:** 8631656451

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran. **E-mail:** yahid\_monfared@alum.sharif.edu, yahid\_monfared\_57@yahoo.com, **Postal Code:** 45156-58145

\*- Corresponding Author

۱- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۳- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

## ۱- مقدمه

ظرف قرار می‌گیرد و سپس بوسیله انرژی خورشیدی که از میان سطح شفاف پلاستیکی دریافت می‌کند تبخیر می‌شود و بر روی سطح پلاستیک‌ها چگالیده شده و از روی سرازیری آن به سمت پایین چکه می‌کند و در محل‌های مخصوص جمع‌آوری می‌شود. مدل‌های جعبه‌ای پیچیده‌تر و انواع گودالی آن پیچیدگی کمتری دارند.

یکی دیگر از روش‌های تولید آب شیرین، استفاده از رطوبت هوا است که برای مناطق گرم و مرطوب و ظرفیت‌های پایین پیشنهاد شده‌اند. این سیستم‌ها که از انرژی خورشید برای تبخیر آب و افزایش رطوبت هوا و از سرمای زمین برای رطوبت‌زدایی آن استفاده می‌کنند، به سیستم‌های تولید آب چگالشی معروف هستند و در کشورهای آفریقای شمالی توجه زیادی را به خود جلب کرده است و هم اکنون نمونه‌های کوچک آن در تونس و الجزیره استفاده می‌شوند (Bazargan et al., 2014).

در این سیستم‌ها هوای گرم و مرطوب مطابق شکل ۱ به داخل لوله‌های مدفون در زمین هدایت می‌شود و در آنجا به دلیل انتقال حرارت با زمین خنک می‌گردد و بخار موجود در هوا به صورت آب در می‌آید. با استفاده از لوله‌های سوراخ‌دار می‌توان از این سیستم‌ها برای مصارف کشاورزی و هوادهی خاک استفاده نمود. همچنین برای مصارف خوراکی می‌توان آب را در انتهای لوله جمع‌آوری نمود.

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که در مناطق گرم و مرطوب می‌توان با استفاده از سیستم تولید آب چگالشی به طور میانگین ۱/۸ کیلوگرم آب در روز در یک متر (۹۰ کیلوگرم آب در لوله ۵۰ متری) استحصال نمود (Hosseini and Sarhaddi, 2017). با توجه به اهمیت موضوع شیرین‌سازی آب تحقیقات زیادی انجام شده که به بررسی تعدادی از آنها پرداخته می‌شود. کارهای اولیه در زمینه چگالش آب شور برای آبیاری توسط بونوردل در دانشگاه فنی Luleå سوئد در سال ۱۹۸۵ آغاز و ایده او استفاده از انرژی خورشیدی برای اشباع هوا در لوله‌های سوراخ‌دار دفن شده برای تهیه آب تمیز بود (Lindblom and Nordell, 2006). بعداً این مورد توسط شرکت سویسی "Ingenieurbüro Ruess und Hausherr" مورد استفاده قرار گرفت و آزمایشات آنها نشان داد که مصرف آب گیاهان گوجه‌فرنگی با تحویل آب به زمین، نزدیک ۵۰٪ کاهش یافته است (Widgren, 1986).

Gustafsson and Lindblom (2006) برای رطوبت‌گیری هوا از دستگاه تقطیرکن خورشیدی استفاده کردند. آنها در مدل‌سازی عددی برای بدست آوردن مقدار آب تولیدی در مصارف کشاورزی معادلات

امروزه نیاز به آب شیرین به سرعت در حال افزایش است و منابع آب شیرین موجود نمی‌توانند تمام نیازهای بشر را برآورده نمایند. در حال حاضر با افزایش جمعیت و گسترش شهرها، دسترسی مردم به آب شیرین هر روز کمتر و کمتر می‌شود و تأمین آب شیرین یکی از مهمترین مسائل پیشروی دولتمردان برای مناطق خشک و کم آب است. یکی از گزینه‌های مطرح برای مقابله با بحران کم آبی، شیرین کردن آب دریاها و نمک زدایی از آنها است که البته راه حلی گران و پرهزینه است و به مقدار قابل توجهی انرژی نیاز دارد در نتیجه، با توجه به تلاش کشورها برای کاستن از مصرف انرژی و بحث گرمایش زمین و دفع نمک تولید شده ادامه دادن به طرح‌های شیرین‌سازی آب دریاها با استفاده از روش‌های سنتی و رایج توجیه اقتصادی چندانی برای مناطق کم جمعیت و امور کشاورزی ندارد. متداول‌ترین روش‌های موجود برای شیرین‌سازی آب، روش‌های حرارتی، غشایی و هیبریدی هستند که مناسب برای تولید آب در ظرفیت‌های بالا هستند. وجود بحران نفت و سوخته‌های فسیلی در جهان، ایجاب می‌کند که روش‌های دیگری برای تأمین انرژی دستگاه‌های آب شیرین‌کن معمولی که از سوخته‌های فسیلی انرژی دریافت می‌کنند، استفاده شوند. برای شیرین‌سازی آب شور امروزه از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود به عنوان نمونه به موارد استفاده از انرژی خورشیدی در فرایندهای آب شیرین‌کن حرارتی یا ترکیب روش‌ها و فنون نظیر آب شیرین‌کن چند مرحله‌ای (MSF)، فشرده‌سازی (VC)، اسمز معکوس (RO)، تقطیر غشایی (MD) و الکترو دیالیز با کلکتورهای خورشیدی برای تولید گرما را می‌توان اشاره نمود. کلکتورهای خورشیدی یک دستگاه بسیار مفید برای جمع‌آوری حرارت کم تا متوسط از خورشید است. آب شیرین‌سازی مستقیم خورشیدی در مقایسه با روش‌های غیر مستقیم نیازمند سطح وسیع‌تر بوده و دارای بازدهی نسبتاً کمتری است. با این حال نسبت به کارخانه‌های آب شیرین‌کن غیر مستقیم در تولید مقیاس کوچک به دلیل هزینه نسبتاً پایین و سادگی مناسب‌تر است. قابل ذکر است که روش استفاده از آب شیرین‌سازی مستقیم خورشیدی و چگالش آب شور از روش‌های سریع و ارزان برای مناطق کم جمعیت مثل جنوب ایران می‌باشد (Fallah Alamdari, 2009; Hamedi, 2010; Mohammadi, 2012; Amirabadi farahani, 2012).

آب شیرین‌کن‌های خورشیدی راه بسیار ساده‌ای جهت نمک‌زدایی است که با انرژی گرمای خورشید کار می‌کند و مخصوصاً برای هنگامی که تجهیزات نمک‌زدایی در دسترس نمی‌باشد. یکی از انواع اصلی دستگاه‌های آب شیرین‌کن خورشیدی مخروطی شکل، جعبه‌ای شکل و گودالی هستند. برای دستگاه‌های مخروطی شکل آب شور در ته

در این راستا ابتدا نسبت به تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر سیستم‌های تولید آب چگالشی اقدام شده و سپس سیستم مورد نظر را که در دو بخش انرژی خورشیدی و سرمایه‌ش زمین می‌باشد مورد ارزیابی قرار می‌دهیم تا میزان خروجی سیستم را به صورت بهینه تعیین کنیم. تحقیق حاضر بر مبنای شبیه‌سازی عددی است. در ابتدا معادلات حاکم بر انتقال حرارت و انتقال جرم در فرایند رطوبت زن، رطوبت‌زدا و کلکتور PV/T معرفی خواهند شد سپس اعتبارسنجی نتایج عددی صورت می‌گیرد و در نهایت به مطالعات پارامتری پرداخته می‌شود و تأثیر پارامترهای مختلف طراحی و عملکردی بر بازده سیستم بررسی می‌شوند. همچنین مدل‌سازی خنک‌کاری سیستم‌های چگالشی در طول شب نیز نشان‌دهنده آن است که خاک می‌تواند پس از ۱۲ ساعت خنک‌کاری شبانه تقریباً به دمای اولیه روز قبل برسد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای انجام تحلیل و شبیه‌سازی از 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 مطابق شکل ۱ استفاده شده است. با توجه به تحقیقات انجام شده در ایران دمای اولیه خاک ۲۰ درجه سانتیگراد ضریب انتقال حرارت هدایت خاک ۲ وات بر متر بر درجه سانتیگراد و فشار هوا ۱ اتمسفر در نظر گرفته شده است (Fallah Alamdari, 2009).

### ۲-۱- معادلات انتقال حرارت هوای مرطوب و خاک

در این قسمت معادلات انتقال حرارت هوای مرطوب و خاک در سیستم‌های تولید آب چگالشی خوراکی بررسی خواهد شد. جهت انتقال حرارت هوا، با تقسیم کردن لوله به بازه‌های دمایی به اندازه کافی کوچک و فرض شار حرارت سطحی یکنواخت درون هر بازه می‌توان معادله موازنه حرارتی را بیان نمود. معادلات حاکم عبارت است از:

انتقال جرم و حرارت و در مصارف خوراکی فقط معادلات انتقال حرارت را مورد استفاده قرار دادند و مقدار آب تولیدی برای مصارف کشاورزی را  $3/8 \text{ Kg/m/d}$  به دست آوردند.

(Lindblom and Nordell 2006) در تحقیقی دیگر مطالعه تئوری بر روی سیستم‌های تولید آب چگالشی خوراکی را انجام دادند آنها با مدل‌سازی عددی معادلات انتقال حرارت در نرم‌افزار متلب مقدار آب تولیدی را  $1/8 \text{ Kg/m/d}$  به دست آوردند و آب تولیدی را در انتهای لوله جمع‌آوری کردند.

(Kandelous and Simunek 2010) نشان دادند عملکرد آبیاری چگالشی به پارامترهایی مانند پیکربندی لوله، آب و هوا، نوع خاک و خصوصیات جریان هوای مرطوب بستگی دارد. در ادامه تحقیقات تولید منابع آب، مدل‌سازی جریان ناشی از ذوب برف با استفاده از مدل هیدرولوژیکی و همچنین هم‌بست آب و انرژی در نمک‌زدایی آب دریا با استفاده از فناوری اسمز معکوس RO انجام شده‌اند (Miryaghoobzadeh et al., 2011; Mohammadi Jouzdani et al., 2019). قابل ذکر است که پیشرفت‌ها و پژوهش‌های کاربردی و مفیدی در زمینه‌های تولید، مدیریت منابع آب، بهینه‌سازی و استفاده از آب‌های مجازی، انجام شده‌اند (Baghestany et al., 2010; Banihabib et al., 2019; Omid et al., 2019). همچنین محمدی در سال ۲۰۱۲ نشان داد ظرفیت بخار هوا به شدت به دما بستگی دارد. در هوای گرم‌تر می‌توان بخار آب بیشتری را ذخیره کرد با این حال، ذخیره بخار آب در هوا محدود است و هنگامی که وارد هوا می‌شود، به شکل ذرات ریز آب یا بخار آب اشباع در می‌آید (Mohammadi, 2012).

هدف تحقیق حاضر تعیین تأثیر انرژی خورشیدی و سرمایه‌ش زمین و لوله‌های جداسازی شده زیر سطحی بر چگالش هوای مرطوب می‌باشد.

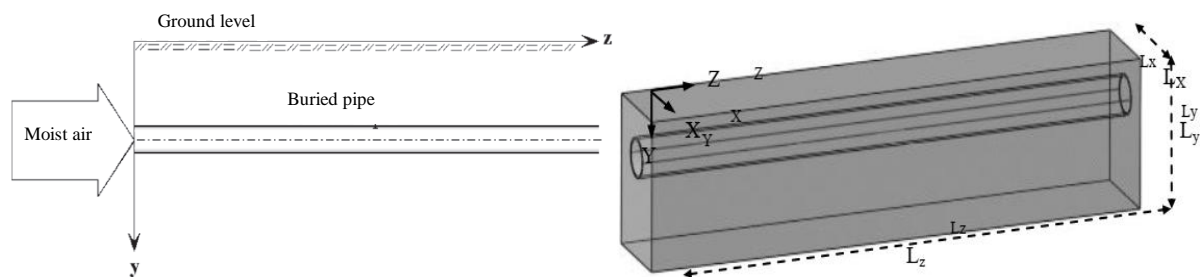


Fig. 1- Production system of condensed water using wet air and earth cooling

شکل ۱- سیستم تولید آب چگالشی با استفاده از هوای مرطوب و سرمایه‌ش زمین

$$\alpha_s = k_s / \rho_s C_s \quad (9)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\alpha_s \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

دما در معادلات بالا مجهول است که می‌توان توزیع آن را با حل عددی معادله انرژی به دست آورد. در این معادلات فرض بر این است که خواص حرارتی خاک ثابت است. برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسأله از روش حجم محدود باید مشتق‌های پاره‌ای 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.

### ۳- تجزیه و تحلیل پارامترهای مؤثر بر چگالش هوای مرطوب

شکل ۲ تغییرات دمای هوای مرطوب در طول لوله در اولین ساعت کارکرد را نشان می‌دهد. در طول‌های کمتر از ۳ متر، دما بالاتر از نقطه شبنم (برای شرایط اولیه بیان شده در این تحقیق  $6.2^\circ\text{C}$ ) 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.

شکل ۳ مقدار آب تولید شده در لوله‌های به طول ۳، ۵ و ۷ متر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل در طول‌های کمتر از ۳ متر با توجه به این که دمای هوا به نقطه شبنم نرسیده 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.

شکل ۴ تأثیر طول لوله بر مقدار انتقال حرارت و چگالش را نشان می‌دهد. 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.

شکل ۵ کانتور دمای خاک و هوای مرطوب برای طول‌های ۲.۵، ۱.۵، ۵۰ و ۱۰۰ متر لوله را نشان می‌دهد. با پیش روی هوای مرطوب در طول لوله، دمای هوای خروجی کاهش می‌یابد. 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

$$q_t = q_{\text{cond}} + q_{\text{conv}} = -k_s \nabla T \cdot \hat{n} \quad (1)$$

که در آن  $q_{\text{conv}}$  و  $q_{\text{cond}}$  به ترتیب شار حرارت چگالشی و جابه‌جایی و  $q_t$  شار حرارت کلی انتقال یافته از لوله به خاک می‌باشد. همچنین،  $k_s$  ضریب رسانندگی خاک و  $\nabla T \cdot \hat{n}$  تغییرات دما در جهت عمود بر دیواره‌های لوله است. همچنین جهت انتقال حرارت جابه‌جایی  $q_{\text{conv}}$  به دلیل اختلاف دما بین جریان هوای مرطوب و سطح لوله انتقال حرارت به وسیله جابه‌جایی اجباری از منطقه گرم به سرد انتقال یافت. همچنین نرخ انتقال حرارت به اختلاف دمای بین دو محیط، سطح تماس و ضریب جابه‌جایی وابسته می‌باشد که طبق رابطه ۲ به دست می‌آید:

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

در معادله فوق  $T_a$  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، پرانتل، ناسلت و ثابت‌های وابسته دمایی بیان می‌گردد و از رابطه گنیلینسکی ۳ محاسبه می‌شود:

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

ضریب افت فشار بی‌بعد برای جریان داخلی،  $f$  است و توسط رابطه پتوخوف به شکل معادله ۴ بیان می‌گردد:

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (4)$$

جهت انتقال حرارت چگالشی  $q_{\text{cond}}$ ، زمانی که هوای مرطوب در طول لوله سرد می‌شود، در دمایی کمتر از نقطه شبنم چگالش خواهد یافت و مقداری از حرارت که به صورت گرمای نهان در بخار ذخیره شده است آزاد می‌گردد که مقدار گرمای حاصل از چگالش طبق رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$q_{\text{cond}} = L_f \cdot h_m \cdot (\rho_{(T_a)} - \rho_{(T_p)}) = L_f \cdot h_m \cdot (\rho_{(T_a)} - \rho_{(T_p)}) \quad (5)$$

که 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 و  $h_m$  ضریب جابه‌جایی جرمی است. این ضریب تابعی از ضریب هدایت و جابه‌جایی هوا، ضریب پخش آب و هوا و عدد بی‌بعد لوئیس است که طبق رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$h_m = \frac{h \alpha^{1/3} \cdot D_{as}^{2/3}}{k_a} = \frac{h \cdot Le^{1/3} \cdot D_{aw}}{k_a} \quad (6)$$

که در آن،  $k_a$  ضریب هدایت هوا است. از رابطه ۷ نیز می‌توان میزان آب تولیدی را محاسبه کرد:

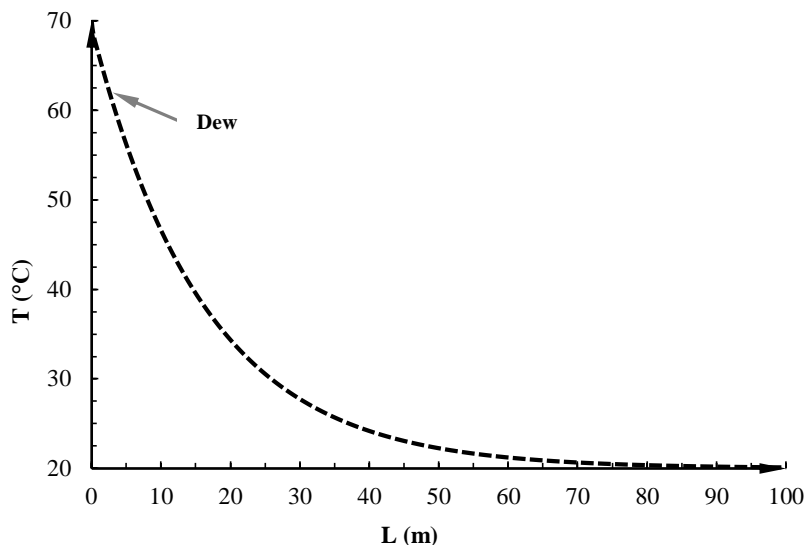
$$m_w = \frac{Q_{\text{cond}}}{L_f} \quad (7)$$

جهت 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 روابط ۸ تا ۱۰ می‌باشد:

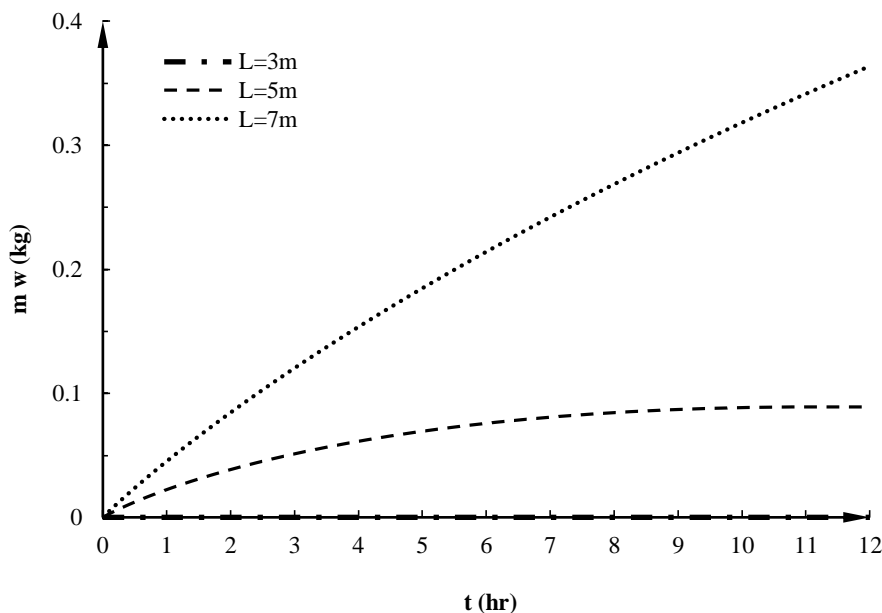
$$k_s \nabla^2 T = \rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

شکل ۶ میزان آب استحصالی در سیستم‌های چگالشی را برای طول‌های ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ متر لوله را 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.

۲۰°C تا ۴۵°C می‌باشد و در طول ۲۵ متر بین ۲۰°C تا ۳۵°C است و نهایتاً در مقطعی به طول ۱۰۰ متر این اختلاف دما از ۳°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.



**Fig. 2- The change of wet air in the pipe length in the first hour of working**  
 شکل ۲- تغییر دمای هوای مرطوب در طول لوله در اولین ساعت کارکرد



**Fig. 3- The amount of produced water for short length for 12 hours**  
 شکل ۳- مقدار آب تولید شده برای طول‌های کوتاه لوله در ۱۲ ساعت کارکرد سیستم

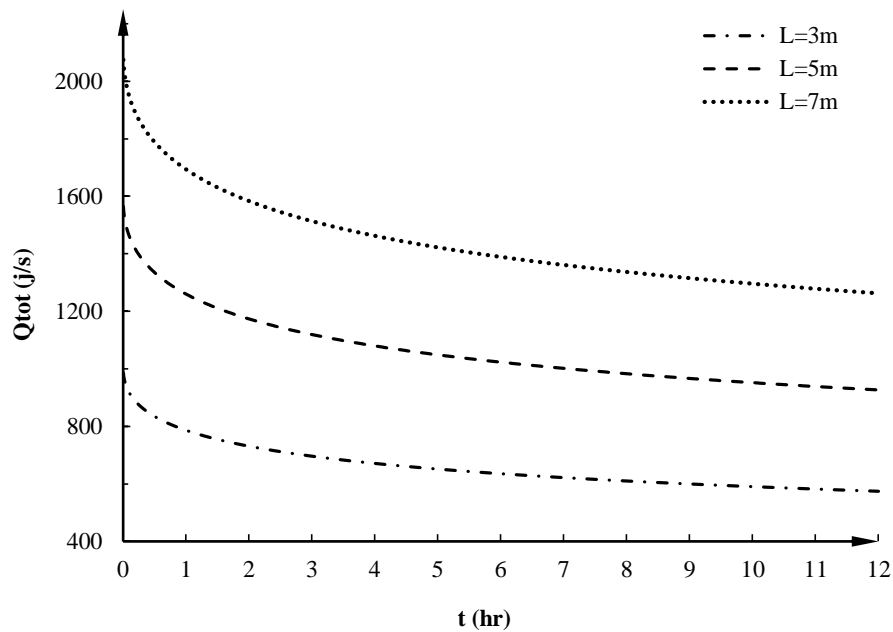


Fig. 4- Comparison between heat transfer and condensation in the short length  
 شکل ۴- مقایسه انتقال حرارت جابه‌جایی و چگالش در لوله‌های طول کوتاه

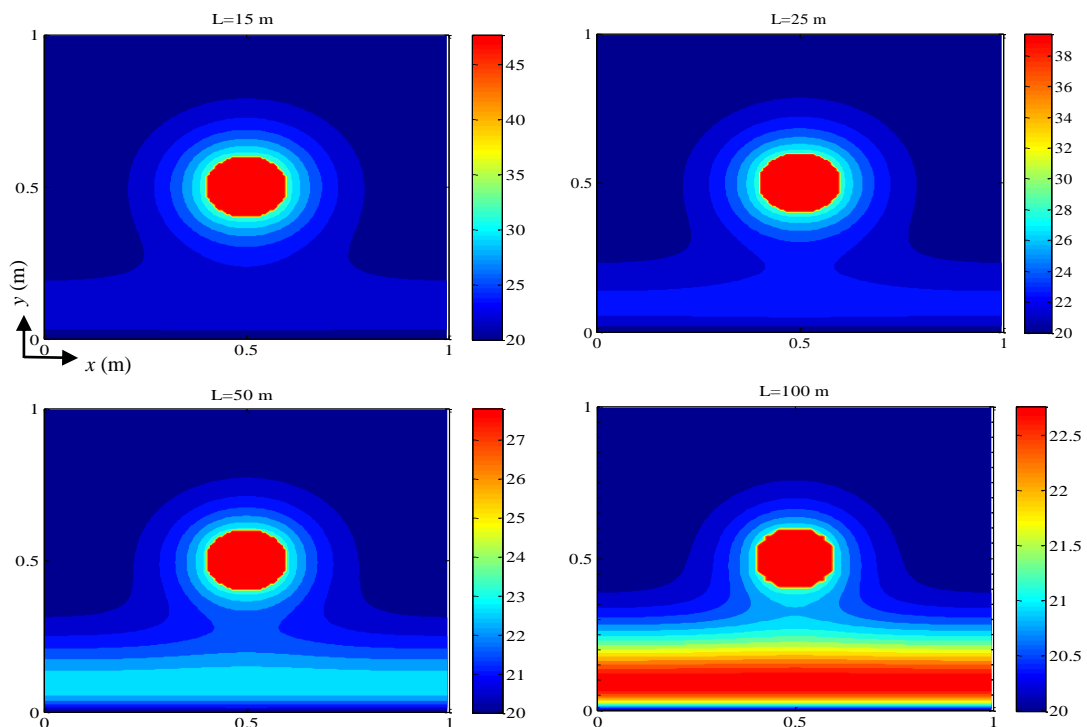


Fig. 5- Soil temperature contour and wet air for various lengths of pipe at the last hour of working  
 شکل ۵- کانتور دمای خاک و هوای مرطوب برای طول‌های مختلف لوله در آخرین ساعت کارکرد سیستم

با خاک کاهش می‌یابد. از آنجا که خاک قادر به انتقال گرما با نرخی برابر با گرمای تولید شده توسط هوا نمی‌باشد، حرارت در خاک جمع می‌شود و دمای خاک اطراف لوله افزایش می‌یابد. در نتیجه با گذشت

شکل ۷ 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

زمان افت دمای هوای مرطوب در طول لوله کاهش و میانگین دمای انتقال حرارت چگالشی نقش مؤثری در مقدار آب تولید شده دارد اما آن در طول زمان افزایش می‌یابد. در مقایسه با انتقال حرارت جابه‌جایی ناچیز است (شکل ۸).

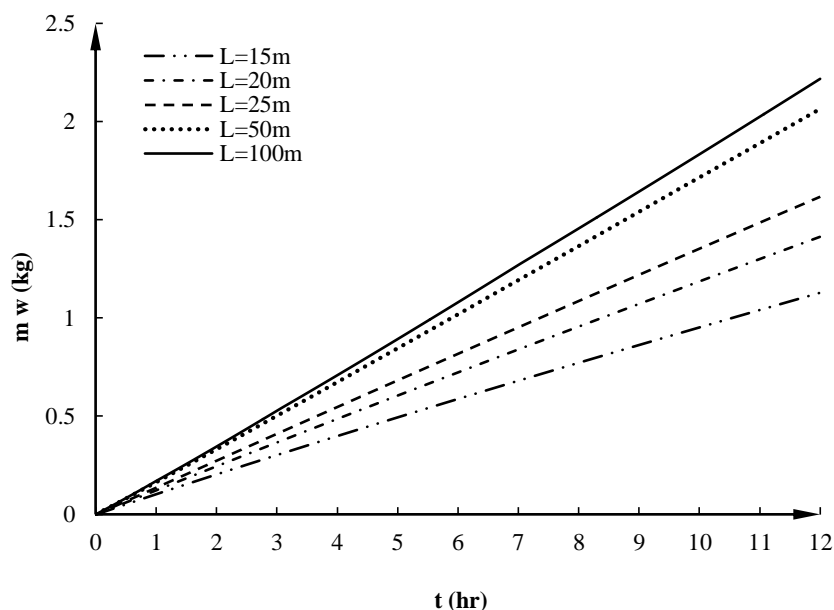


Fig. 6- The amount of produced water in the long pipe for 12 hours  
شکل ۶- مقدار آب تولید شده در لوله‌های بلند در ۱۲ ساعت کارکرد

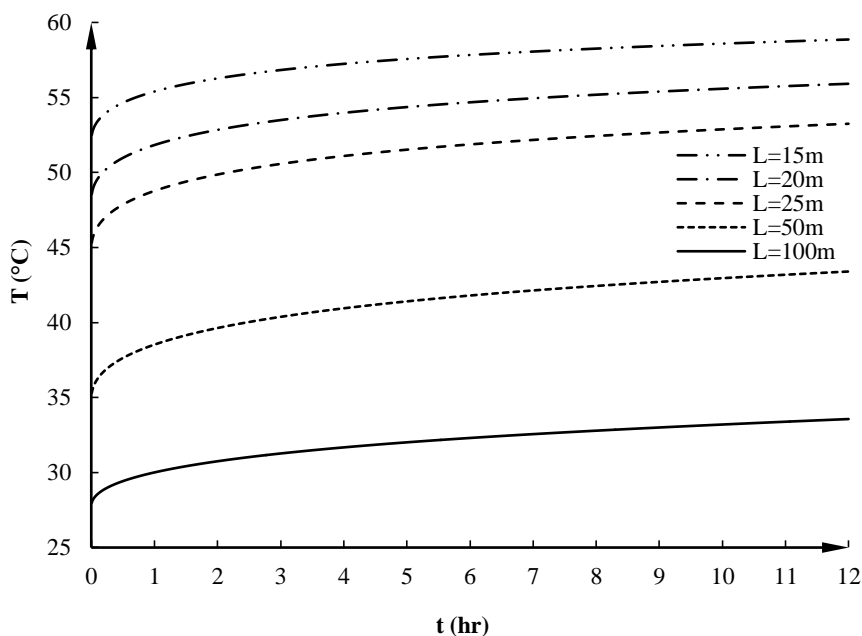


Fig. 7- The changes of wet air temperature in the length of long pipes within 12 hours  
شکل ۷- تغییرات دمای هوای مرطوب در طول لوله‌های بلند در ۱۲ ساعت کارکرد سیستم

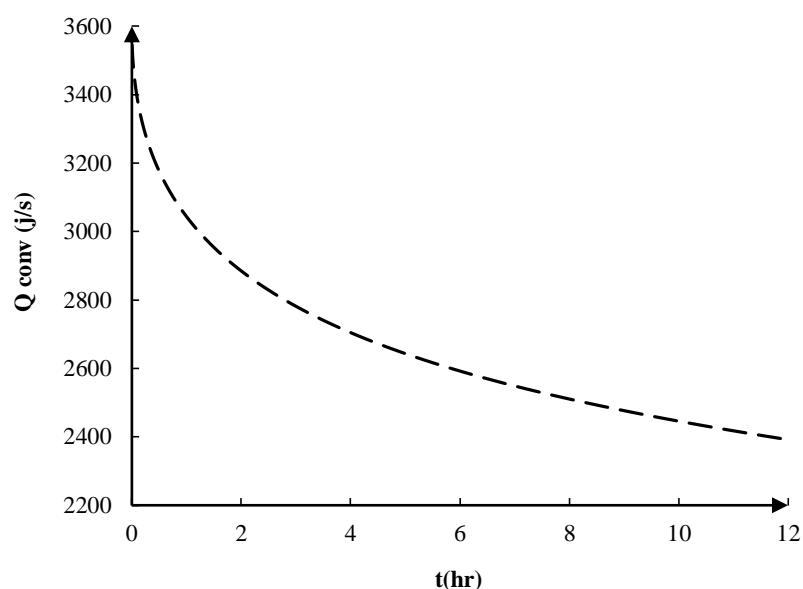


Fig. 8- Comparison between convective and condensed heat transfers with L=15m

شکل ۸- مقایسه انتقال حرارت جابه‌جایی و چگالشی در طول ۱۵ متر

شکل ۱۰ تأثیر سرعت ورودی هوای مرطوب بر میزان آب تولیدی را نشان می‌دهد. 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 ۹ مقدار طول لوله مورد نیاز، برای اشباع شدن هوای مرطوب را نشان می‌دهد. 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.

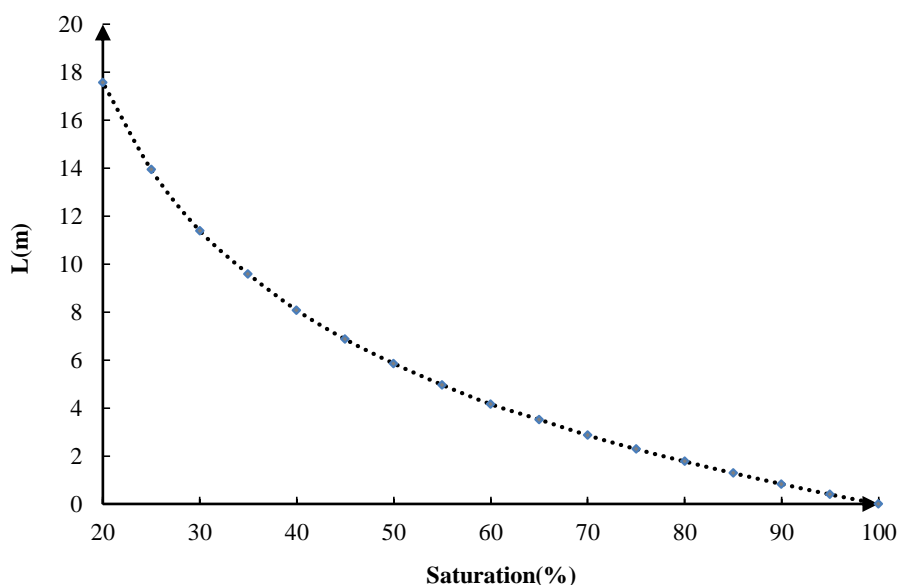


Fig. 9- The length of pipe for saturating the wet air

شکل ۹- طول لوله برای اشباع شدن هوای مرطوب



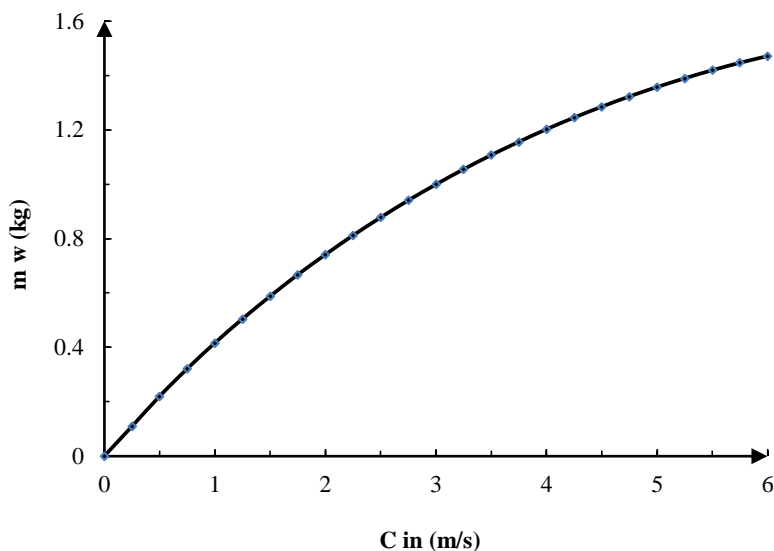


Fig. 10- The effect of input velocity of wet air on amount of produced water for L=15m

شکل ۱۰- تأثیر سرعت ورودی هوای مرطوب بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر

افزایش می‌یابد (تغییرات آب تولید شده در دماهای بالاتر بیش تر است).

شکل ۱۲ تأثیر رطوبت نسبی بر میزان آب استحصالی از لوله ۱۵ متری را نشان می‌دهد. با توجه به این که انتقال حرارت چگالشی (میزان آب تولید شده) به طور مستقیم به رطوبت نسبی وابسته می‌باشد بنابراین بازده سیستم‌های چگالشی را می‌توان با رطوبت‌زنی مناسب و رساندن هوای مرطوب به حالت اشباع، افزایش داد.

شکل ۱۱ تأثیر دمای هوای ورودی بر میزان آب تولیدی در لوله ۱۵ متری را نشان می‌دهد. با افزایش دمای سیال مقدار آب تولیدی را می‌توان افزایش داد، پس اگر به طریقی، مانند پیش گرم 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

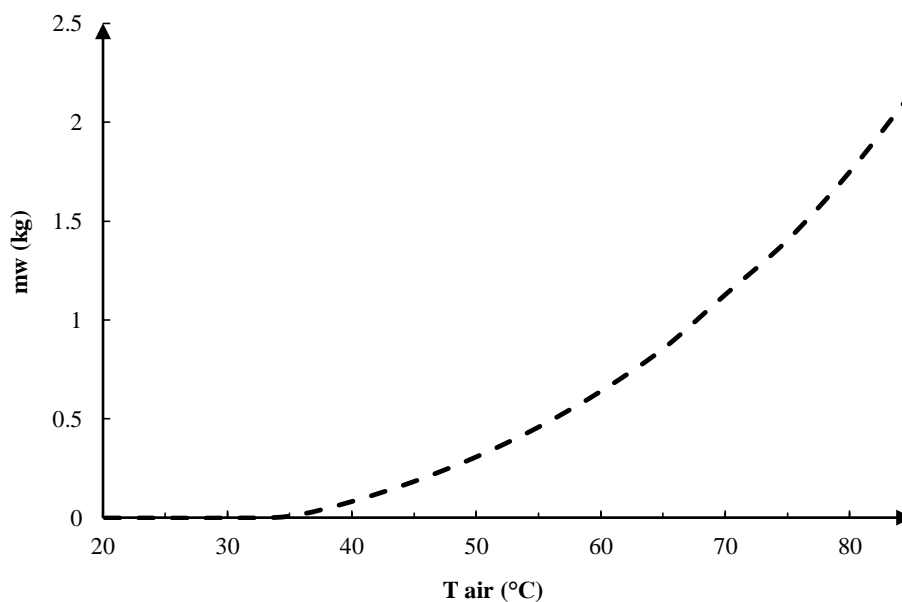
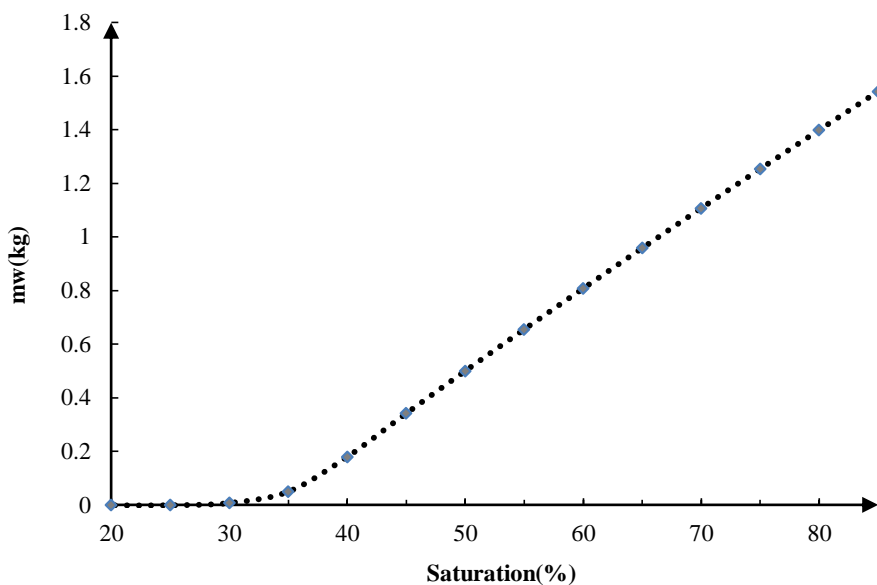


Fig. 11- The effect of input temperature of air on amount of produced water for L=15m

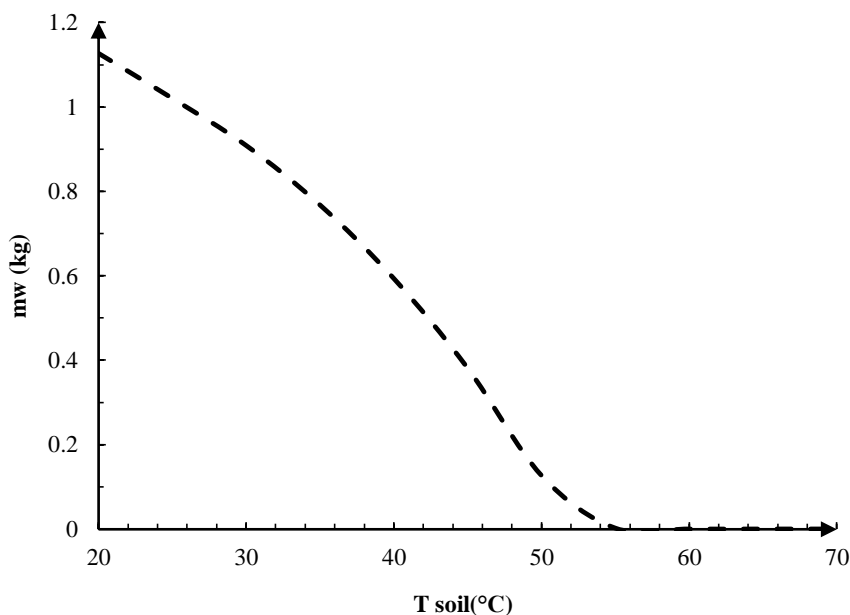
شکل ۱۱- تأثیر دمای هوای ورودی بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر



**Fig. 12- The effect of relative humidity of input air on amount of produced water for L=15m**  
 شکل ۱۲- تأثیر رطوبت نسبی هوای ورودی بر میزان آب تولیدی در لوله طول ۱۵ متر

با توجه به شکل ۱۴ با افزایش قطر، عدد رینولدز و ناسلت 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 ۱۳ تأثیر دمای خاک بر مقدار آب تولید شده در یک لوله ۱۵ متری را نشان می دهد. 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.



**Fig. 13- The effect of soil temperature on the amount of produced water for L=15m**  
 شکل ۱۳- تأثیر دمای خاک بر مقدار آب تولیدی در لوله طول ۱۵ متر

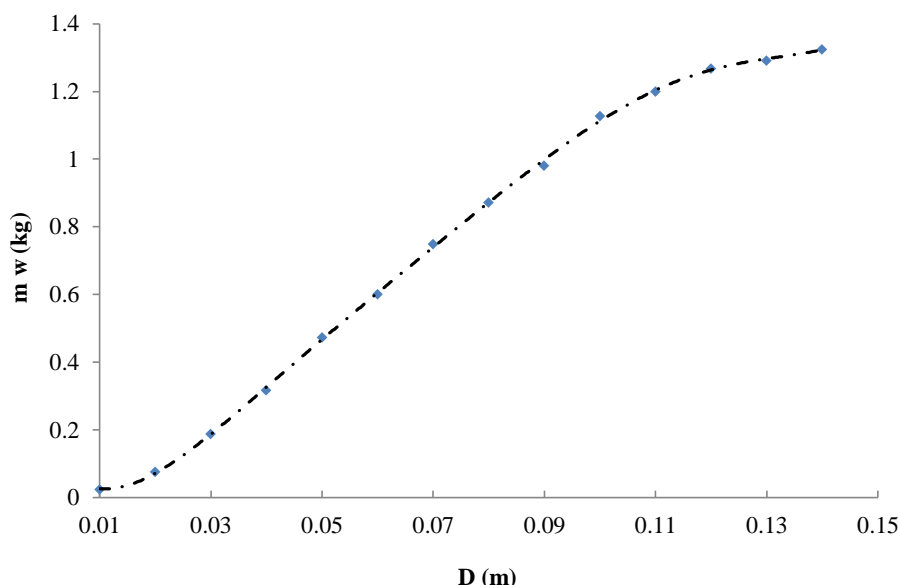


Fig. 14- The effect of the pipe length on the amount of produced water for L=15m

شکل ۱۴- تأثیر قطر لوله بر مقدار آب تولیدی در طول ۱۵ متر

برای مناطقی که خاک شور دارند مناسب تر می باشد. مقدار آب تولید شده به نوع خاک وابسته است. مقادیر ضریب هدایت و پخش حرارتی که در انتقال حرارت مؤثر می باشند برای خاک های مختلف در جدول ۲ بیان شده است. همان طور که پیش بینی می شود 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 می کنند.

در جدول ۱ مقاومت حرارتی و ضریب انتقال حرارت برای جنس های 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.

همان طور که ملاحظه می شود در لوله های مس، فولاد، پی.وی.سی و پلی اتیلن به ترتیب بیشترین مقدار آب به دست آمده است. گرچه لوله های پی.وی.سی و پلی اتیلن مقدار آب کمتری تولید می کنند اما

Table 1- Conductive heat transfer coefficient for the different types of the pipes

جدول ۱- ضریب انتقال حرارت هدایتی برای جنس های مختلف لوله

Produced water Kg	Total heat transfer coefficient W/m <sup>2</sup> . K	Thermal resistance m <sup>2</sup> . K/W	Conduction heat transfer coefficient W/m. K	Pipe types
1.12	12.30	1.21E-5	420	Copper
1.12	12.26	2.84e-4	18	Steel
0.98	10.33	0.015	0.33	PVC
0.85	8.82	0.032	0.16	PE

Table 2- Conductive heat transfer coefficient, soil types, and the amount of produced water

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

Soil Type	Properties	Heat transfer coefficient (W/m. °C)	$\alpha$ (m/s <sup>2</sup> )	Produced water (Kg)
Sand		0.9	2.72E-5	0.78
Sandstone		1.9	1.35E-6	1.44
Wet Soil		2	4E-7	1.13
Clay		3	8.39E-7	1.45

رس خطوط توزیع دما متراکم‌تر می‌باشند. با افزایش ضریب هدایت گرمایی دمای اطراف لوله کاهش می‌یابد.

شکل ۱۶ میزان تأثیر پارامترهای مهم بر میزان آب تولید شده در سیستم‌های چگالشی را نشان می‌دهد. 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.

با توجه به شکل ۱۵ خاک رس کمترین ضریب پخش حرارتی و ضریب هدایت حرارتی را دارد. شن بیشترین ضریب انتقال حرارت هدایتی را دارد و ضریب پخش بالایی نسبت به سایر دیگر خاک‌ها را دارد، بنابراین سرعت انتقال حرارت در طول خاک شن 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

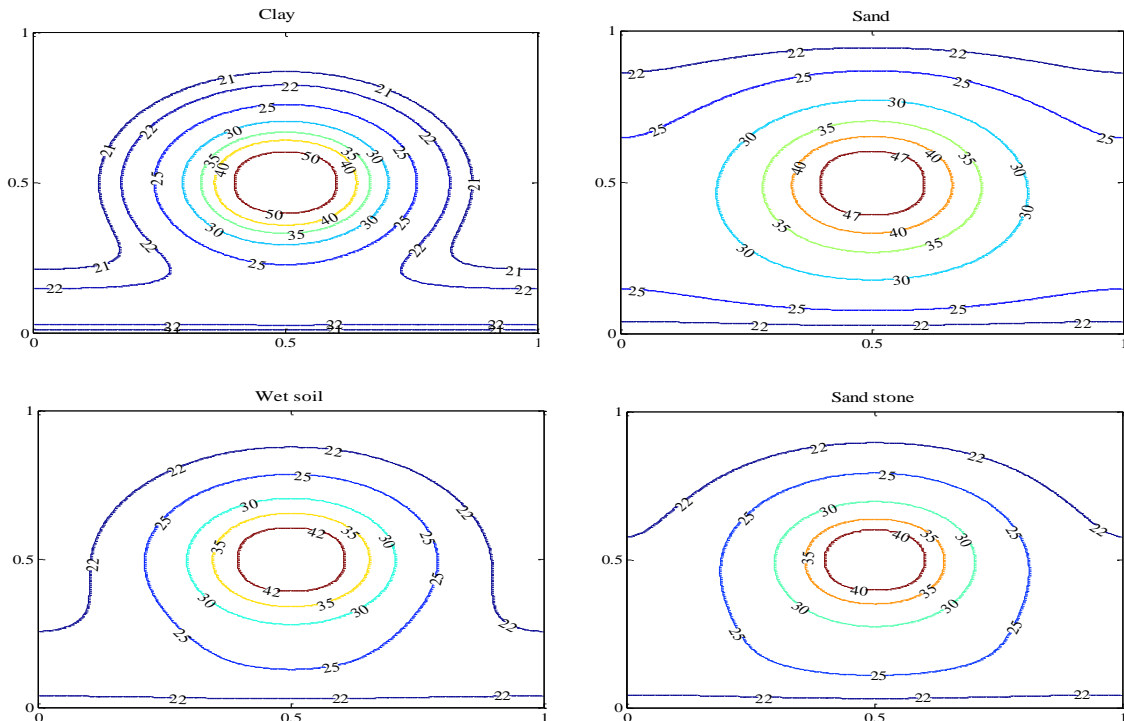


Fig. 15- Soil temperature contour for different types of the pipes at the last hours of working in the pipe inlet  
شکل ۱۵- کانتور دمای خاک برای جنس‌های مختلف در آخرین ساعت کارکرد سیستم در ورودی لوله

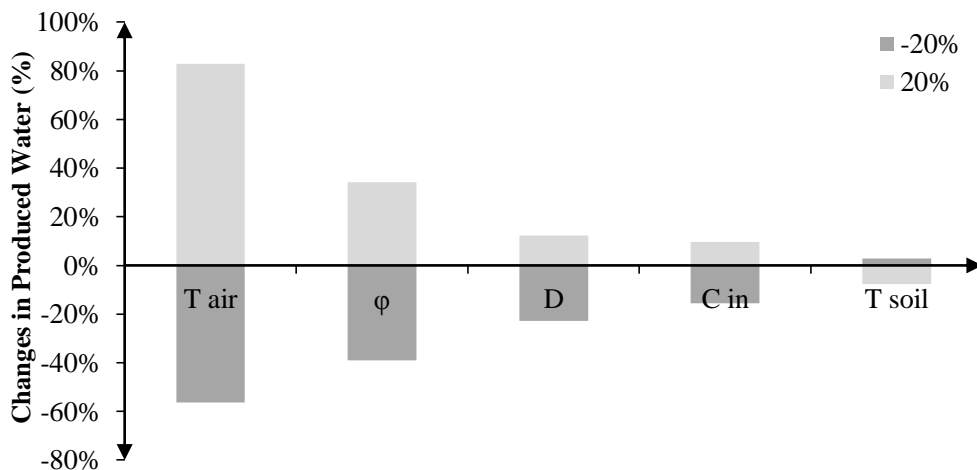


Fig. 16- Sensitivity analysis of various parameters on the amount of produced water for L=15m  
شکل ۱۶- آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف بر میزان آب تولیدی در طول ۱۵ متر

#### ۴- بررسی تأثیر دمای هوا و خاک اطراف لوله بر مقدار آب تولیدی

که برای سیستم‌های چگالشی نامطلوب است. بنابراین برای خنک‌سازی در شب نیز طول بحرانی وجود دارد.

شکل‌های ۱۸ و ۱۹ دمای هوا، در طول لوله برای ساعت‌های مختلف خنک‌کاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار داریم با گذشت زمان در سیستم‌های چگالشی، طول متناسب با ماکزیمم دمای هوا افزایش می‌یابد. ملاحظه می‌شود در آخرین ساعت کارکرد تغییرات دمای هوا بین  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $22^{\circ}\text{C}$  می‌باشد که نشان‌دهنده آن است دمای خاک اطراف لوله تقریباً برابر با دمای اولین ساعت کارکرد روز قبل شده است.

شکل ۱۷ دمای خاک اطراف لوله و هوا، در طول لوله برای اولین ساعت خنک‌کاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در طول‌های کمتر از ۲۵ متر، به علت انتقال حرارت خاک با هوا، دمای هوا افزایش می‌یابد. این افزایش دما تا زمانی ادامه دارد که دمای هوا با خاک تقریباً یکسان شود. بدین ترتیب در طول‌های بیش‌تر از ۲۵ متر، با پیش‌روی هوا، به دلیل اینکه دمای خاک کمتر از هوا می‌گردد، انتقال حرارت معکوس و باعث خنک شدن هوا به جای خاک می‌شود.

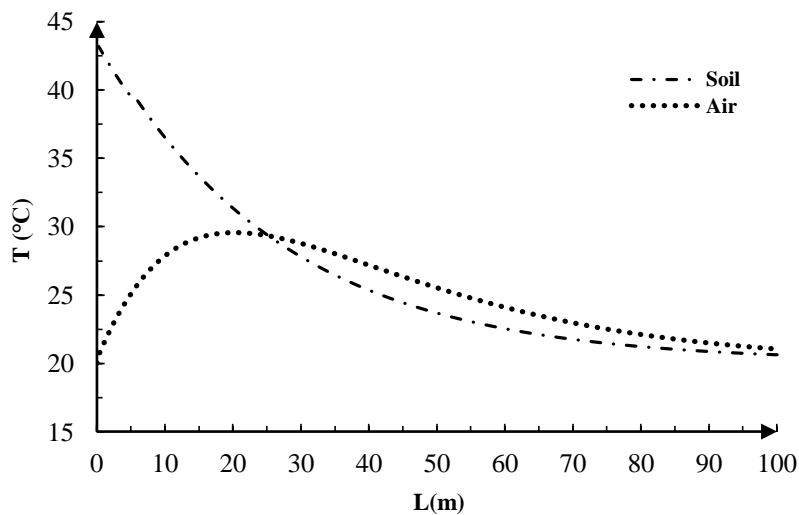


Fig. 17- The temperature of soil in the outer surface of the pipe and air for the first hour (cooling at the night)

شکل ۱۷- دمای خاک اطراف لوله و هوا برای اولین ساعت خنک‌کاری شب

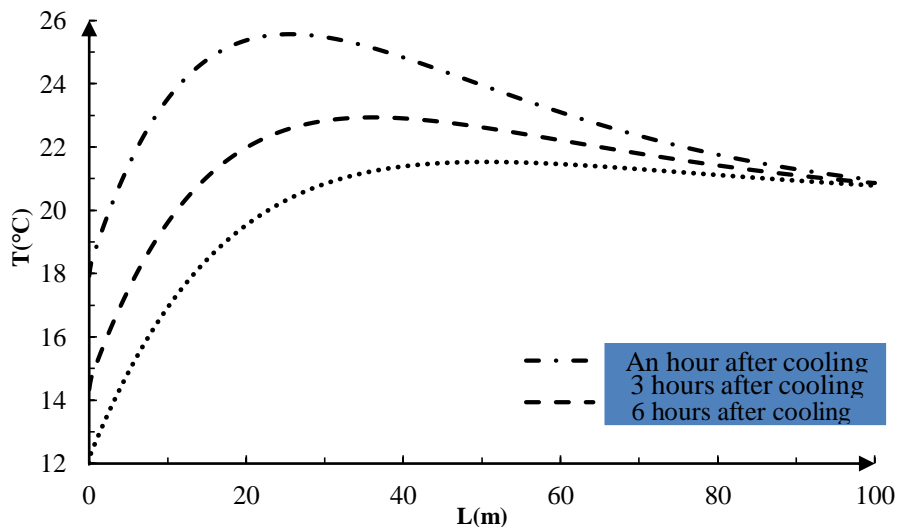
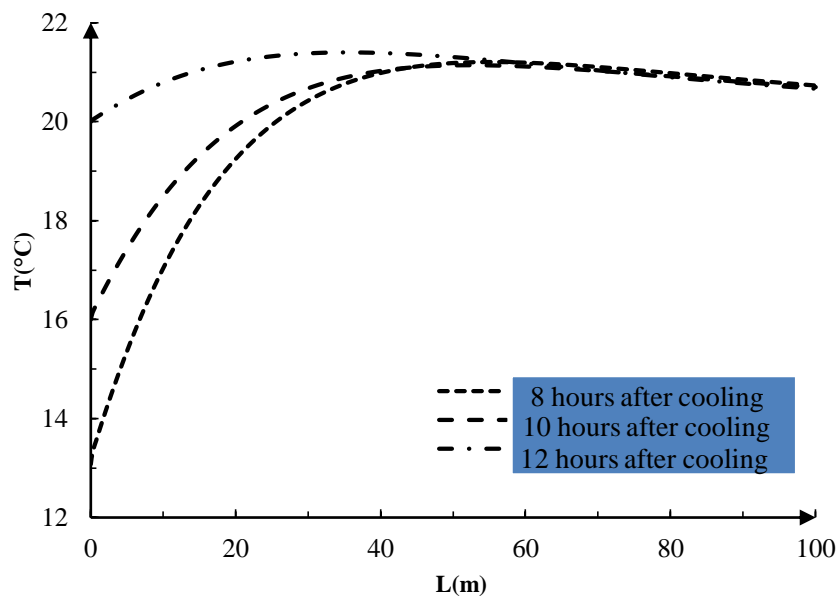


Fig. 18- The air temperature in the 1<sup>st</sup>, 3<sup>rd</sup>, and 6<sup>th</sup> hour after cooling

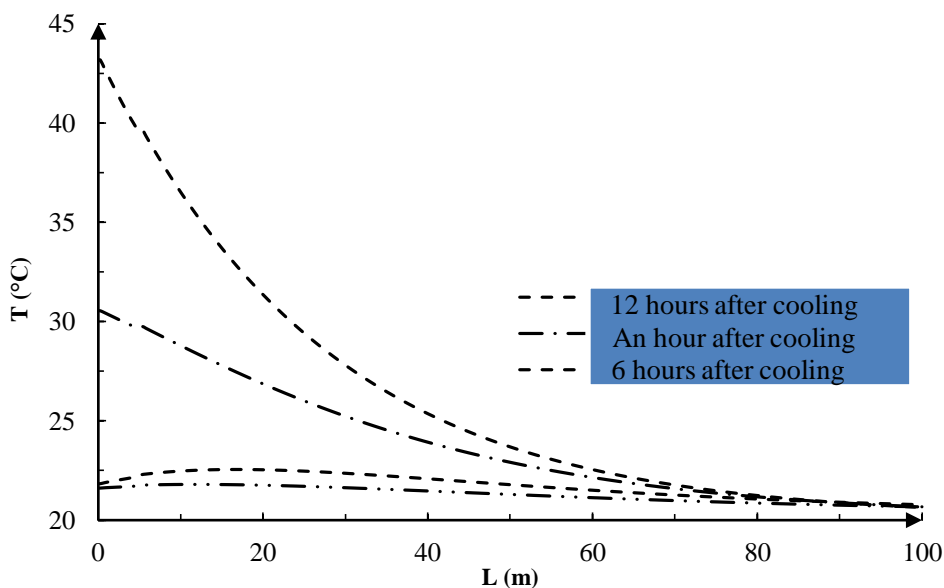
شکل ۱۸- دمای هوا در اولین، سومین و ششمین ساعت بعد از خنک‌کاری



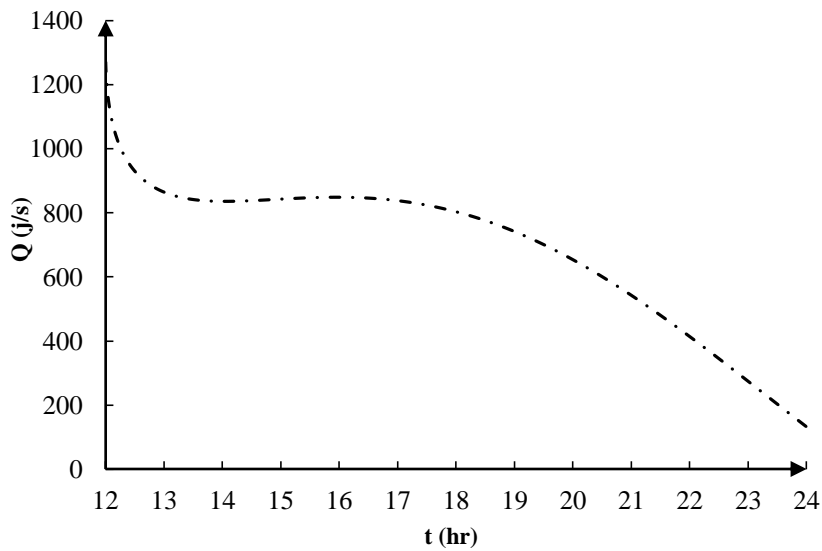
**Fig. 19- The air temperature in the 8<sup>th</sup>, 10<sup>th</sup>, and 12<sup>th</sup> hour after cooling**  
 شکل ۱۹- دمای هوا در هشتمین، دهمین و دوازدهمین ساعت بعد از خنک کاری

شکل ۲۱ مقدار گرمای انتقال یافته از خاک به هوا را نشان می‌دهد. 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 می‌یابد تا هنگامی که انتقال حرارت در انتهای شب ناچیز (نزدیک به صفر) گردد، بنابراین دمای خاک اطراف لوله و هوا تقریباً یکسان می‌شود.

شکل ۲۰ دمای خاک اطراف لوله برای ساعات مختلف خنک کاری را نشان می‌دهد. تغییرات دمای خاک در ساعت اول نسبت به ساعت ششم بیشتر است زیرا اختلاف دمای خاک و هوا در ساعات‌های اولیه ماکزیمم است. از ساعت ششم تا دوازدهم همان‌طور که ملاحظه می‌شود دمای خاک اطراف لوله تقریباً ثابت است و تغییرات محسوسی ندارد.



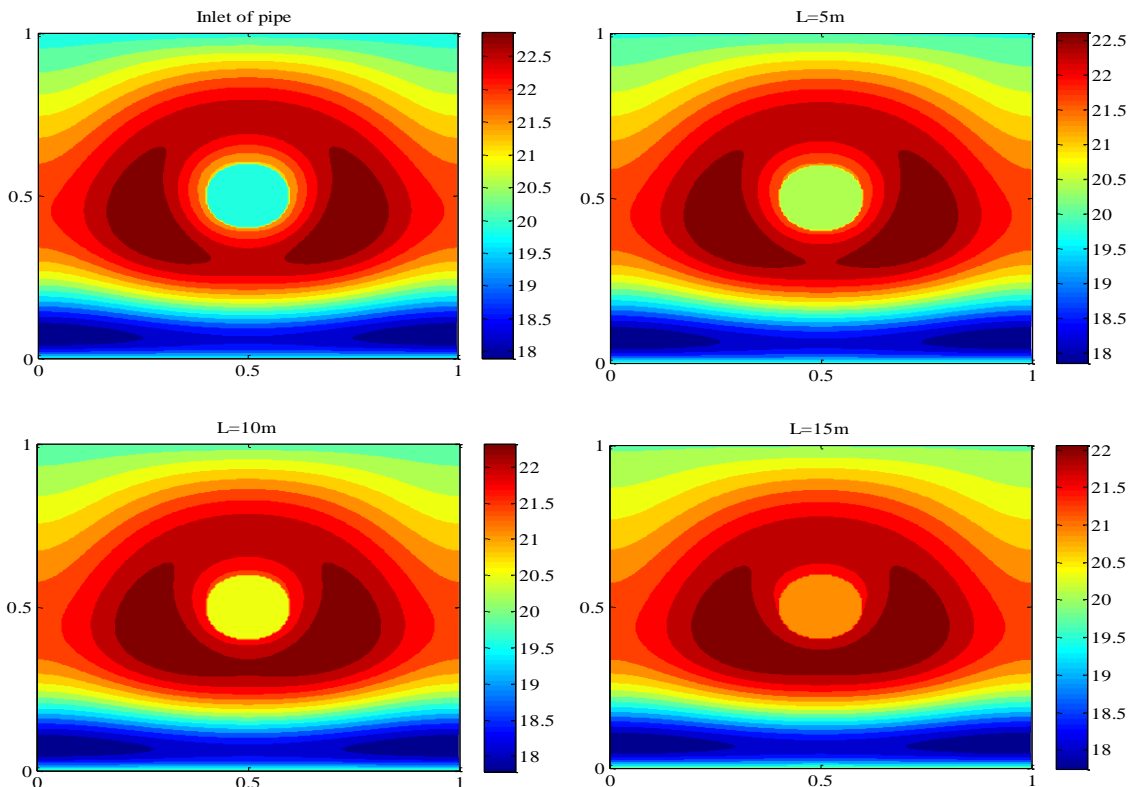
**Fig. 20- The soil temperature in the 1<sup>st</sup>, 6<sup>th</sup>, and 12<sup>th</sup> hour after cooling**  
 شکل ۲۰- دمای خاک اطراف لوله در اولین، ششمین و دوازدهمین ساعت بعد از خنک کاری



**Fig. 21- Conductive heat transfer during the night for L=15 m**  
 شکل ۲۱- مقدار انتقال حرارت جابه‌جایی در طول شب برای ۱۵ متر لوله

نشده است و دقیقاً به شرایط اولین روز کارکرد (دمای خاک در آغاز روز  $20^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفته شده است که تقریباً پس از خنک‌سازی  $33^{\circ}\text{C}$  می‌گردد) نرسیده است.

شکل ۲۲ کانتور دمای خاک و هوا برای طول‌های مختلف در آخرین ساعت کارکرد را نشان می‌دهد. 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 به طور کامل خنک‌سازی



**Fig. 22- Soil and air temperature contour at the last hour of working during the night**  
 شکل ۲۲- کانتور دمای خاک و هوا در آخرین ساعت کارکرد سیستم در طول شب

اولیه میزان خنک‌کاری خاک بیشتر می‌باشد و از ساعت ششم به بعد تقریباً تغییرات دمای خاک ناچیز است بنابراین بر خلاف تصور نمی‌توان با افزایش بیش از حد زمان خاک را خنک کرد در نتیجه پیشنهاد می‌گردد با ایجاد سوراخ‌هایی در اطراف لوله (مکان‌هایی که دما ماکزیمم است) خنک‌سازی به صورت کامل و سریع‌تر انجام شود.

### ۵- نتیجه‌گیری

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 تولید می‌شود. بنابراین همواره طول بهینه‌ای وجود دارد که در آن میانگین آب تولید شده بر واحد طول لوله ماکزیمم و بیشترین بازده را دارد.

از آنجایی که دمای اطراف لوله یکی از مهمترین پارامترها در مقدار آب به دست آمده می‌باشد، دمای این حفره‌ها پس از چندین روز کارکرد افزایش می‌یابد و باعث می‌شود کارایی سیستم در طول روز کاهش یابد. بنابراین برای رسیدن به دمای روز قبل پیشنهاد می‌شود سرعت هوای ورودی افزایش یابد یا لوله‌های کوچکی در مکان‌هایی که ماکزیمم دما رخ می‌دهد قرار داده شود تا خنک‌سازی به طور کامل انجام شود. البته این امر باعث تغییر شرایط مدل‌سازی و نتایج میزان آب به دست آمده نیز می‌گردد.

شکل ۲۳ کانتور دمای خاک و هوا برای ساعات مختلف خنک‌سازی در ورودی لوله رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، در ابتدا ماکزیمم دمای خاک  $41^{\circ}\text{C}$ ، یک ساعت پس از خنک‌کاری  $31^{\circ}\text{C}$ ، بعد از شش ساعت  $25^{\circ}\text{C}$  و نهایتاً پس از ۱۲ ساعت خنک‌کاری  $23^{\circ}\text{C}$  می‌گردد که نشان‌دهنده آن است در ساعات‌های

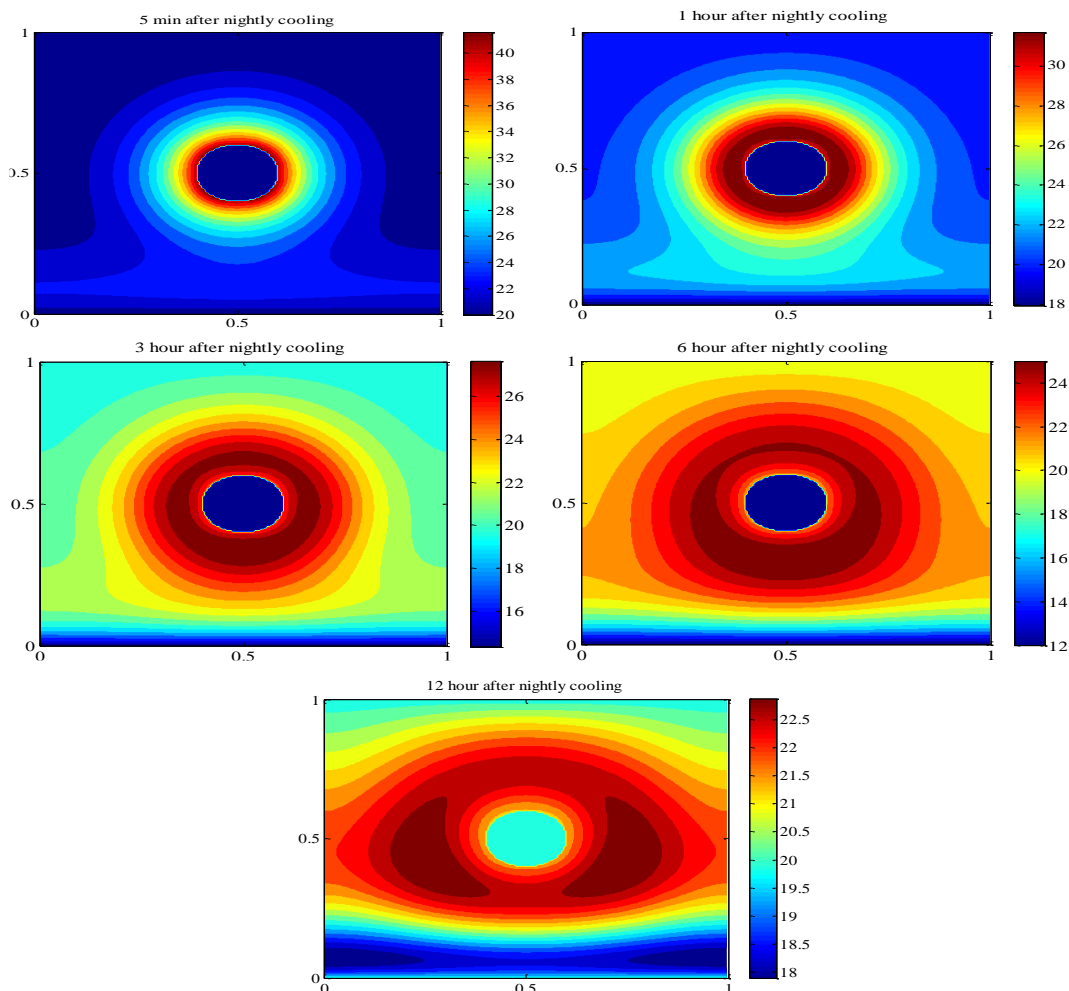


Fig. 23- Soil and air temperature contour at various hours of working in the pipe inlet

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



می‌تواند پس از ۱۲ ساعت خنک‌کاری شبانه تقریباً به دمای اولیه روز قبل برسد.

## ۶- مراجع

- Amirabadi farahani MM (2012) Technical and economic evaluation of desalination combinatorial system with reverse osmosis RV. M.Sc Thesis, Department of Mechanical Engineering, KNTU (In Persian)
- Baghestany A, Mehrabi Boshrabadi H, Zare Mehrjerdi M, Sherafatmand H (2010) Application of the concept of virtual water in water resources management of Iran. *Iran-Water Resources Research* 6(1):28-38 (In Persian)
- Banihabib M, Azadkhorasani M, Oladgaragoz M, Mohammadi A (2019) Optimization of virtual water exchange for different price elasticity of agricultural products (Case study: Urmia Lake Basin). *Iran-Water Resources Research* 15(4):107-123 (In Persian)
- Bazargan M, Ahmadi Ali Biglouei M (2014) Production of fresh (drinking) water using underground cooling of humid/wet air and solar energy. *Journal of Renewable and New Energy* 1(1):1-10 (In Persian)
- Fallah Alamdari A (2009) Investigation of the types of ordinary desalination devices and designing a sample of solar desalination devices. M.Sc Thesis, Department of mechanical engineering, KNTU (In Persian)
- Gustafsson A-M and Lindblom J (2001) Underground condensation of humid air: a solar driven system for irrigation and drinking-water production. Luleå University of Technology, M.Sc. thesis No 2001:140 CIV
- Hosseini SMA, Sarhaddi F (2017) Performance assessment of a humidification-dehumidification desalination unit connected to photovoltaic thermal collectors. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 49(3):653-662 (In Persian).
- Hamed H (2010) Simulation and analysis of the structure of solar desalination plants. M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, KNTU (In Persian)
- Kandelous M, Simunek J (2010) Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management* 97(7):1070-1076
- Lindblom J, Nordell B (2006) Water production by underground condensation of humid air. *Desalination* 189(1-3):248-260

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 شود.

یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان آب تولید شده جنس خاک است، 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 نمود.

در مناطق کم‌آب، سیستم‌های تولید آب چگالشی با افزایش بازدهی (افزایش قدرت فن (سرعت)، افزایش دما، رطوبت نسبی هوای ورودی و غیره) می‌توانند برای مصارف کشاورزی نیز مورد استفاده قرار گیرند. 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.

در طول روز، دمای خاک در اثر کارکرد افزایش می‌یابد. در طول شب نیز دمای محیط کمتر از خاک می‌باشد به همین دلیل از هوا برای خنک‌کاری خاک استفاده می‌شود. در طول‌های اولیه لوله به علت انتقال حرارت از خاک به 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.

در نهایت، نتایج عددی نشان می‌دهند که 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 ۲/۱ کیلوگرم آب در روز استحصال خواهد شد. آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مختلف و جنس خاک نیز انجام شده است. همچنین نتایج تحلیل نشان می‌دهد 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. همچنین مدل‌سازی خنک‌کاری سیستم‌های چگالشی در طول شب نیز نشان دهنده آن است که خاک

- cooling system. M.Sc Thesis, Department of mechanical engineering, KNTU (In Persian)
- Mohammadi AS (2012) Water production using distillation of air in buried pipes in the basement. Faculty of Mechanical Engineering, Khaje Nasir-e-Din Tusi University of Technology, M.Sc. Thesis (In Persian)
- Omidi T, Bagheri A, Heydari N (2019) Water footprint analysis of sugar export/import and production in Iran for the period of 2005-2014. Iran-Water Resources Research 15(3):78-90 (In Persian)
- Widegren M (1986) Condensation irrigation: A desalination-irrigation system. M.Sc. Thesis No 1986:002E, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden
- Lindblom J, Nordell B (2006) Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation. Desalination 203(1-3):417-434
- Miryaghoobzadeh M, Ghanbarpour M, Habibnejad Roshan M (2011) Snow melt river flow modeling using SRM model (Case Study: Karaj Dam Basin). Iran-Water Resources Research 7(3):40-52 (In Persian)
- Mohammadi Jouzdani S, Vagharfard H, Daneshkar Arasteh P, Zerafat M (2019) Water-energy nexus at reverse osmosis seawater desalination technology. Iran-Water Resources Research 15(3):324-338 (In Persian)
- Mohammadi A (2012) Production of fresh (drinking) water using humid (wet) air with underground