



Numerical Simulation in Atmospheric Water Generator By Ansys Fluent

Mahdi Montazeri Saniji^{1*}, Sahar Noori², Amir AzadManesh³

1-BS Student, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

3- Sales Manager, Shole Sanat Manufacturing and Engineering Company, Tehran, Iran

* P.O.B. 1681717811 Tehran, Iran, m.montazeri78@aut.ac.ir

Received: 12 March 2022 Revised: 14 June 2022 Accepted: 04 July 2022

Abstract

Water crisis and providing water is one most essential problems that humans are facing. There are several ways for water extraction, depending on population and resources. In this simulation, water is extracted by a cooling tower from humid air. Humid air enters the buried pipes with fans. Then the air reaches the cooling tower. Because of the difference in temperature between air and pipes, air temperature decreases. After this process, there is an amount of residual water, extracted from humid air. The extracted water can be used as drinkable water or for agricultural purposes. In this project, we simulate airflow by Ansys Fluent. Then by using air condition relations, combined with the numerical solution, the amount of extracted water can be calculated. In addition, in the first half of the day, because the temperature difference between airflow and pipes' wall is more than at the end of the day, the amount of extracted water is different throughout the day. We can obtain that in the second half of the day, the airflow temperature is more than the tower's temperature, so the air is cooling the tower and preparing the system for the next day.

Keywords: Humid air, Cooling Tower, Atmospheric Water Generator, Ansys Fluent

1. Introduction

Fresh water supply is always one of the most critical issues facing humans. Depending on the population and available water resources, different methods were provided for water supply. Because in less populated areas, water desalination is not economical, other methods should apply in these areas. One of these methods is water extraction from humid air, which can only use in hot and humid areas [1]. In this case, water is extracted by reaching the air to its dew point conditions. If the air temperature is lower than the dew point temperature, liquid water is released from the humid air through a constant pressure process [3]. For this process, a large pipe is placed in the middle of the ground and around it at a certain distance; several smaller pipes are connected to the main pipe and are placed in the ground (Figure 1). The small tubes are for directing air into the main tube to perform the process. The airflow is directed into the pipes by placing a fan. If we consider the main pipe's length higher, the wind at the top of the pipe can suck the airflow and provide more flow speed. Then, due to the low temperature inside the main pipe, heat transfer starts between the humid air and the pipe. Also the air temperature decreases to the dew point temperature and liquid water can be extracted from humid air [2].

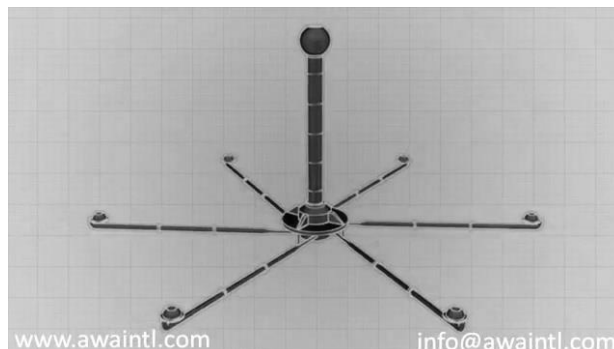


Figure 1. Atmospheric Water Plant

2. System Definition

According to Figure 2, air enters the buried pipes from the right through the inlet fans, after passing through the reducer (which is located in the middle of the pipe), enters the cooling tower at the left end of the pipe. In this simulation, there are 6 buried pipes that are connected to the cooling tower.

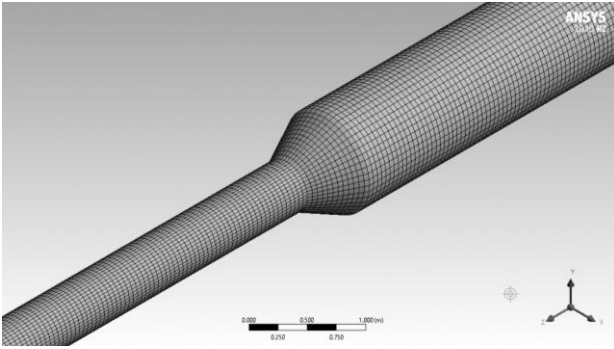


Figure 2. Geometry of the buried pipes

Due to the temperature difference between the underground and the surface, there is heat transfer between the pipe and the airflow. Thus, the first part of water extraction is in this part. Buried pipes consist of a pipe with a diameter of 1 meter and a length of 30 meters, which is connected to another pipe with a diameter of 0.5 meters and a length of 30 meters by a reducer. Air enters these pipes through the fan and enters the cooling tower through these pipes.

In the cooling tower (Figure 3), the inlet air enters the cooling tower from the buried pipe at a 3 degrees angle. For simplicity in simulation, the incoming air enters the tower from the bottom of the tower. Because of that, the vertical component is considered as the inlet velocity. The inlet air flows from the bottom to the top of the tower stages. In this simulation, there are three types of towers. In the 1st type, which includes a coil in the first stage (Figure 3 on the right) and a cone in other stages, inlet air cooling is available only on the first stage. In the other stages, heat transfer is only due to the temperature difference between the inlet air and the wall. In the 2nd type, instead of having a coil in the first stage, glass plates are used for cooling and water extraction (Figure 3 in the middle). These plates are similar in dimensions to the cones, and the cooling process is similar to the previous type. In the 3rd type of tower, the cooling process is quite different from the other two types. In this one, there are cones with similar dimensions in all stages, and cooling is available at all stages.

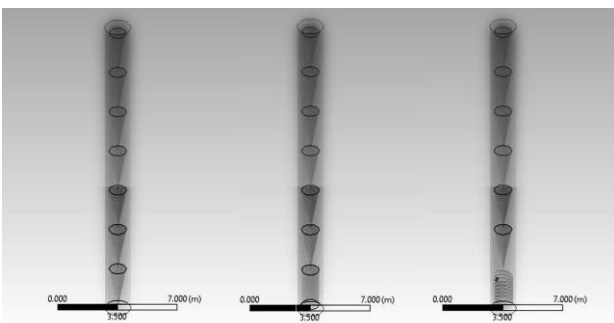


Figure 3. Three Types of Cooling Tower

The cooling tower consists of a pipe with a diameter

of 1.5 meters and a length of 20 meters. The inside of the cooling tower is divided into seven stages. In the first stage, three types of cooling process, glass plates, or cones are applied. In the remaining six stages in all three types, the cones are applied. The coil has a circular cross-section with a diameter of 0.2 m, which is about 2 m long and 1 m in diameter. Glass plates are also designed for more accessible in the simulation in the form of a cylinder with a diameter of 1 meter and a length of 2.45 meters. The cone inside the tower is 2.8 meters long and 1 meter in diameter.

3. Formulation

In buried pipe formulation, by using a 2-dimensional formulation for laminar flow, the approximate answers for pressure and velocity can be reached. In the reducer section, by having the velocity values from the previous section and by using convergent-divergent nozzle formulas, the pressure and velocity values after the reducer are calculated. In order to calculate the extraction rate, the air-condition formulation in references [4] and [2] is used.

3.1. Pressure and velocity in buried pipes

Assuming that the fan can rotate about 10,000 rpm, we can calculate the values of pressure and velocity for a 2-dimensional laminar flow in a pipe.

$$v = \frac{rpm}{A} \tag{1}$$

In this formula, rpm is the fan's rotation speed and A is the pipe's section area. [4]

$$v = \frac{10000}{\pi \times \frac{0.25^2}{4}} = 14.15 \frac{m}{s}$$

$$a_0 = \sqrt{\gamma RT} \approx 349 \frac{m}{s} \tag{2}$$

Assuming h as enthalpy, u as velocity and q as exchanged heat, the energy equation is

$$h_1 + \frac{u_1^2}{2} + q = h_2 + \frac{u_2^2}{2} \tag{3}$$

Assuming no exchanged heat an caloric perfect gas, equation 3 is rewritten as

$$c_p T_1 + \frac{u_1^2}{2} = c_p T_2 + \frac{u_2^2}{2} \tag{4}$$

Assuming $u_1 = u$, $T_1 = T$, $T_2 = T_0$ and $u_2 = 0$ we have

$$c_p T + \frac{u^2}{2} = c_p T_0 \tag{5}$$

Knowing that $c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$ and $a = \sqrt{\gamma RT}$, the equation is rewritten as

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} = 1 + \frac{0.4}{2} = 1.20$$

$$\rightarrow T = 252.5K \tag{6}$$

$$a = 318.5 \frac{m}{s}$$

$$M = \frac{v}{a} = 0.041$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_0}{T_1} = \frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_2^2} \quad (7)$$

$$\frac{T}{T^*} = \frac{2 + (0.4)}{2 + (0.4)0.041^2} \rightarrow \quad (8)$$

$$T^* = 210.4 \text{ K} \rightarrow a^* = 290.8 \frac{m}{s}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = (M_1/M_2) \left(\frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_2^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$\frac{p}{p^*} = (1/0.041) \left(\frac{2 + (0.4)}{2 + (0.4)0.041^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\rightarrow p^* = 0.03 \text{ bar}$$

$$\frac{dA}{A} = (M^2 - 1) \frac{du}{u} \quad (10)$$

Assuming changes in the section area is small compared to the pipe's length, the equation can rewrite as

$$\frac{\Delta A}{A} = (M^2 - 1) \frac{\Delta u}{u} \quad (11)$$

$$\frac{\pi(0.25^2 - 0.5^2)}{4} =$$

$$\frac{\pi 0.5^2}{4} =$$

$$(0.041^2 - 1) \left(\frac{du}{14.15} \right) \rightarrow$$

$$du = +10.63 \rightarrow$$

$$u_2 = 24.78 \frac{m}{s}$$

Assuming $c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$ and $a = \sqrt{\gamma RT}$ and drive into equation 4 we have

$$\frac{a^2}{\gamma - 1} + \frac{u^2}{2} = \frac{a^{*2}}{\gamma - 1} + \frac{a^{*2}}{2} \quad (12)$$

$$\rightarrow a_2 = 318.4 \frac{m}{s} \rightarrow M_2 = 0.078$$

$$T_2 = 252.3 \text{ K}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = (M_1/M_2) \left(\frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_2^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$\frac{p}{p^*} = \left(\frac{1}{0.078} \right) \left(\frac{2 + (0.4)}{2 + (0.4)0.078^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\rightarrow p_2 = 0.42 \text{ bar}$$

3.2. Amount of extracted water

By using the air-condition formulation [4] we have:

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} \quad (14)$$

$$P_a = P - P_v \quad (15)$$

$$\omega = 0.622 \times \frac{P_v}{P_a} \quad (16)$$

$$m_a = \frac{P_a V}{R_a T} \quad (17)$$

$$M_w = m_a (\omega_1 - \omega_2) \quad (18)$$

4. Numerical Solution

The numerical solution is divided into four steps of 6 hours, in which according to time, the variables change. This solution includes underground pipes and the cooling tower. Each of the solutions is steady state, and the flow regime is laminar. In addition, the heat transfer process is included. After the solution is performed by Ansys Fluent, by applying a cross-section in each stage, the information about that stage is gathered for calculations. By extracting temperature and pressure data in all parts of the pipes and then averaging the data in each stage, the mean values are considered as the reference data, and calculations are performed with this data.

For the next time step calculations, the temperature of the previous time step is used as a reference.

First, the flow is solved for the buried pipes. According to the results of this solution, by averaging the air temperature at the outlet section of the pipe, the inlet temperature of the tower is calculated for each step.

5. Results

According to the calculations, the results are sorted for each part of the system.

5.1. Buried Pipe

Using the air-condition formulation obtained in the relations extraction section and according to the obtained temperature values, the amount of water extracted in the buried pipe is calculated. As shown in Figure 1, by reaching the middle of the day, the water extraction rate reaches its maximum and then decreases. The cause of this phenomenon is a decrease in heat transfer due to a decrease in temperature. Over time, the temperature difference between the inlet air and the average temperature of the outlet air in the buried pipe decreases, and in the last time step, the temperature difference between the inlet air to the pipe and the outlet air is minimized. For this reason, the efficiency of the system in the first half of the day is higher than in the second half of the day.

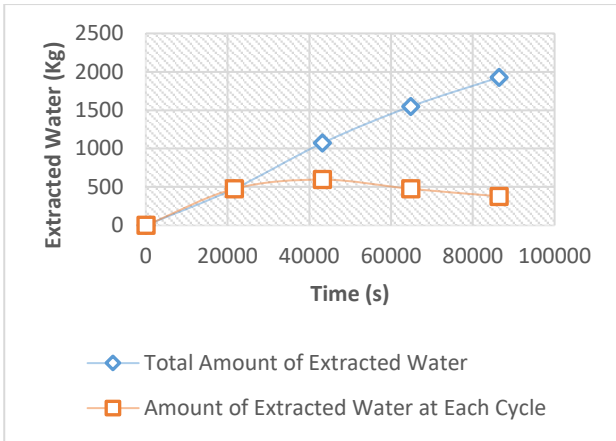


Figure 4. Solutions for the buried pipe

5.2. 1st Type tower

The 1st type of tower includes a cooling coil in the first stage and cones on other stages. In addition, in this tower, cooling takes place only on the first stage and in the cooling coil, while on the other floors, the heat transfer is only due to the difference in air temperature in two different time steps.

The cooling process is only fully available in the first stage and in other stages, the heat transfer in the first half of the day is favorable. By using the extracted formulas, the rate of water extraction is 1337 kg per day.

$$M_{coil} = 0.061906 \times 6 \times 3600 = 1337 \frac{Kg}{day}$$

$$M_{other\ stages} = 0.06944 \times 6 \times 3600 = 150 \frac{Kg}{day}$$

$$M_{total} = 11564 + 1337 + 900 = 13801 \frac{Kg}{day} \text{ (Buried pipes included)}$$

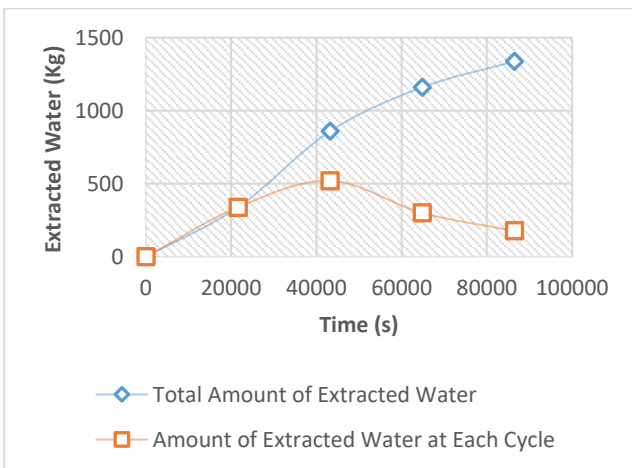


Figure 5. Solution for the first stage of the 1st type tower

5.3. Second type tower

On the first floor of the 2nd type tower, unlike the 1st,

glass plates are used for cooling. The use of glass plates increases the amount of heat transfer and the rate of water production in the system. The rest of the tower floors are the same as the 1st type of tower, and its conditions are similar to the previous.

According to the calculations of the amount of water extracted in the glass plates in one day is more than the cooling coil, it can be concluded that the efficiency of the glass plates is more than that of the cooling coil.

$$M_{glass} = 0.78945 \times 6 \times 3600 = 1705.2 \frac{Kg}{day}$$

$$M_{other\ stages} = 0.006789 \times 6 \times 3600 = 147 \frac{Kg}{day}$$

$$M_{total} = 11564 + 1705 + 880 = 14149 \frac{Kg}{day} \text{ (Buried pipes included)}$$

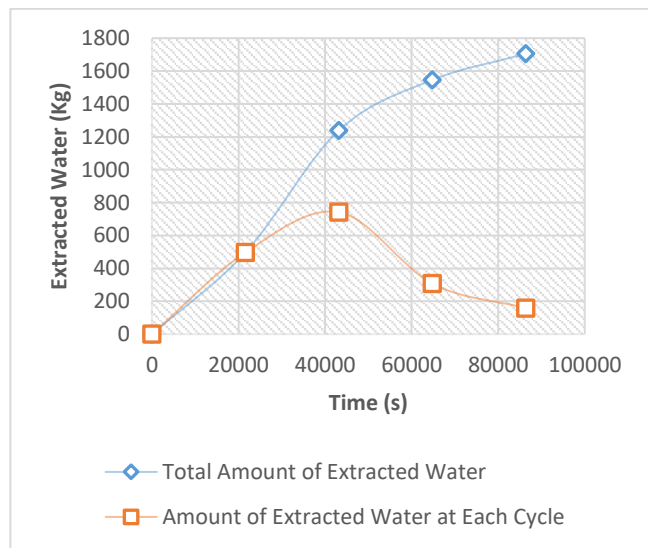


Figure 6. Solutions for the glass plates

5.4. Third type tower

In the 3rd type of tower, cones are used instead of coils and glass plates, and heat transfer is included in all stages. According to this assumption, the efficiency of this cycle all day and at all stages is favorable. Due to the difference between the values of water production rate in different stages in this tower, the results of each stage are examined separately. In this case, due to the heat transfer in all stages, the difference between the inlet and outlet air temperature compared to the other two types is significant. With these results, 3rd type tower has the highest rate of water extraction among the other two types.

In this cycle (with buried pipe), there is a total of 18054kg of water extraction in 24 hours, which is the highest value among these three types.

$$M_{last\ stage} = 0.03437 \times 6 \times 3600 = 742 \frac{Kg}{day}$$

$$M_{total} = 11564 + 617 + 1304 + 563 + 1165 + 659 + 1440 + 742 = 18054 \frac{Kg}{day}$$

6. Conclusions

In this project, a numerical simulation of water extraction rate from the atmospheric water system has been done. This heat transfer simulation was performed for three different geometries for a full-day simulation. According to the results, the highest rate of extraction is in buried pipes. The rate of water extraction in a buried pipe depends on factors such as the number of pipes, the length of the pipe, the volume of the pipe, the dimensions, the reducer and the depth that the pipes are placed. Among these factors, the most important are the number of pipes, the location of the pipe and the length and volume of the pipe. The location of the pipe and the length of the pipe due to the temperature difference between the fluid and the wall affect the increase and decrease of heat transfer rate. Also, the volume of the pipe and the number of pipes affect the amount of fluid entering the pipe. In addition, there is heat transfer in the cooling tower due to the temperature difference, but this temperature difference is not as significant as the buried pipe. It should be noted that in the cooling tower, in stages where there is no cooling process, in the second half of the day, the temperature of the fluid is higher than the temperature of the tower wall. Therefore, water extraction is possible only in the first half of the day and in the next half, the cycle is being prepared and returning to the initial conditions for the next day.

According to the results, the highest rate of water extraction in this system is related to the buried pipes. The reason is that the buried pipes have more temperature differences and contact surfaces than other parts of the system. For maximum utilization of the water production cycle from humid air, cooling can be used in the whole tower so that water can be produced throughout the day (3rd type). If cooling is not possible in the whole tower, using glass plates is more efficient than the cooling coil due to the higher contact surface.

Placing pipes buried deeper in the soil, increasing the

cooling rate in the tower, increasing the size of the tower to increase the contact surface, increasing the air inlet pipes, increasing the fan speed and changing the size of the cone to reduce pressure in the tower are all solutions to increase the efficiency of this system.

7. References

- [1] M. Bazargan, M. Ahmadi, Production of fresh water or use of underground cooling of humid air and solar energy, *Journal of Renewable and New Energies*, Vol. 1, pp. 5-15, 2014. (in Persian)
- [2] C. Borgnakke, GJ. Van Wylen, RE. Sonntag, *Fundamentals of Thermodynamics*, 7th Edition, pp. 530–548, 2009.
- [3] A. JanZadeh, Extraction of AI from the Air Using the Temperature of Depth of Earth, *Journal of water and Soil Conservation*, Vol. 25, No. 2, 2018. (in Persian)
- [4] JD. Anderson.; *Fundamentals of Aerodynamics*, 7nd Edition, pp. 475–564, 2001.



شبیه‌سازی عددی میزان استحصال آب در سامانه آب اتمسفریک توسط نرم‌افزار فلوئنت

مهدی منتظری سانجی^{۱*}، سحر نوری^۲، امیر آزادمنش^۳

۱- دانشجوی کارشناسی، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳- مدیر مهندسی فروش، مهندسی هوافضا، شرکت تولیدی و مهندسی شعله صنعت، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۶۸۱۷۱۷۸۱۱، m.montazeri78@aut.ac.ir

چکیده

تأمین آب شیرین همواره یکی از مهم‌ترین مسائل پیش روی انسان است. باتوجه به جمعیت و منابع آب موجود، روش‌های مختلفی برای تأمین آب ارائه می‌شود، در این مقاله به بررسی یکی از این روش‌ها پرداخته می‌شود. در این روش هوا از طریق فن‌های ورودی وارد لوله‌های زیرزمینی شده و از طریق این لوله‌ها وارد برج خنک‌کن می‌شود. با کاهش دمای هوا از طریق خنک‌کاری، آب اضافی موجود در هوای مرطوب از حالت بخار به مایع تبدیل می‌شود. از آب حاصل می‌توان به‌عنوان آب شرب و یا برای مصارف کشاورزی استفاده کرد. شبیه‌سازی عددی این سامانه برای حالت‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت برای هر قسمت از فرایند به‌صورت مجزا انجام می‌گیرد. باتوجه به نتایج حل عددی، با استفاده از روابط تهویه مطبوع نرخ استحصال آب محاسبه می‌شود. در نیمه ابتدایی روز نرخ استحصال آب مقدار قابل توجهی است. این مقدار در نیمه دوم روز به صفر می‌رسد. علت این امر، بالاتر بودن دمای بدنه برج نسبت به هوای ورودی است. با این فرض در نیمه دوم روز، هوای ورودی وظیفه خنک‌کاری سیکل و آماده‌سازی آن برای روز بعد را برعهده دارد. **کلیدواژه‌ها:** هوای مرطوب، برج خنک‌کن، استحصال آب، حل عددی، آب اتمسفریک

Numerical Simulation in Atmospheric Water Generator By Ansys Fluent

Mahdi Montazeri Saniji^{1*}, Sahar Noori², Amir AzadManesh³

1-BS Student, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

3- Sales Manager, Shole Sanat Manufacturing and Engineering Company, Tehran, Iran

* P.O.B. 1681717811 Tehran, Iran, m.montazeri78@aut.ac.ir

Received: 12 March 2022 Accepted: 04 July 2022

Abstract

Water crisis and providing water is one of the most important problems that humans are facing. There are several ways for water extraction, depending on population and resources. In this simulation, water is extracted by a cooling tower from humid air. Humid air enters the buried pipes with fans. Then the air reaches the cooling tower. Because of the difference in temperature between air and pipes, air temperature decreases. After this process, there is an amount of water extracted from humid air. The extracted water can be used as drinkable water or for agricultural purposes. In this project, we simulate air flow by Ansys Fluent. Then, by using air condition formulas, combined with the numerical solution, the amount of extracted water can be calculated. In addition, in the first hours of the day, because the temperature difference is more than at the end of the day, the amount of extracted water is different throughout a day. We can find out that in the second half of the day, the air is cooler than the tower, so the air is cooling the tower and preparing the system for the next day.

Keywords: Humid air, Cooling Tower, Atmospheric Water Generator, Ansys Fluent

می‌شود. به دلیل اینکه در مناطق کم‌جمعیت، استفاده از دستگاه آب‌شیرین‌کن صرفه اقتصادی ندارد، باید از روش‌های دیگر آب شیرین منطقه تأمین شود. یکی از این روش‌ها، استحصال آب از رطوبت هوا است که از آن در مناطق گرم

۱- مقدمه

تأمین آب شیرین همواره یکی از مهم‌ترین مسائل پیش‌روی انسان است. باتوجه به جمعیت و منابع آب موجود، روش‌های مختلفی برای تأمین آب ارائه

برای استحصال آب، میزان استحصال آب را ۳.۱ کیلوگرم در روز برای مصارف کشاورزی با استفاده از حل عددی به دست آورد [۱۰].

در سال ۲۰۱۴، مصطفی مافی در مطالعاتش در حوزه آب اتمسفریک اثر پارامترهای مختلف مانند نوع خاک، دمای خاک، سرعت سیال و رطوبت نسبی بر سامانه آب اتمسفریک را بررسی کرد. او به این نتیجه رسید که دمای سیال ورودی و رطوبت نسبی، بیشترین اثر بر روی نرخ استحصال آب دارند. به همین منظور برای افزایش کارایی سامانه می‌توان از دستگاه رطوبت زن خورشیدی استفاده کرد تا با تبخیر آب دریا با استفاده از انرژی خورشید، اقدام به افزایش رطوبت هوا کرد و با هزینه کم‌بازدهی سامانه را افزایش داد [۴].

در سال ۲۰۱۴، در تحقیقات مجید بازگان و مریم احمدی در زمینه حل عددی میزان آب استحصال‌شده در لوله‌های مدفون و آنالیز حساسیت نسبت به پارامترهای مختلف صورت‌گرفته است. در این تحقیق نرخ استحصال آب با گذشت زمان کاهش یافته و به مقدار ثابتی در روز نزدیک می‌شود. باید در نظر داشت که دمای هوای ورودی نسبتاً بالا و سرعت جریان نسبتاً کم است [۳].

در سال ۲۰۱۶ در تحقیقی با محوریت استحصال آب از رطوبت هوا در دانشگاه جیمز مدیسون در آمریکا به بررسی میزان استحصال در نمونه اولیه با مقیاس کوچک پرداخته است. در این مقاله هندسه مکعبی شکل به ابعاد ۴ اینچ در رطوبت ۹۰ درصد، میزان ۰.۷۵ لیتر در روز آب از رطوبت هوا استحصال می‌شود [۱۲].

در سال ۲۰۱۸ توسط امیرحسین جان‌زاده در مقاله تحقیقاتی که در نشریه پژوهش حفاظت آب و خاک منتشر شده به بررسی میزان آب استخراج‌شده از طریق روش آماری و با داده‌های جمع‌آوری‌شده از روش کتابخانه‌ای و با استفاده از نمودار سایکرومتریک پرداخته است. میزان آب حاصل در فصول آبان تا اردیبهشت در عمق ۵ متری در زیر خاک صفر بوده و فقط از خرداد تا مهر، استحصال آب وجود دارد. با کاهش عمق خاک، نرخ استحصال در فصول مختلف تغییر می‌کند. در عمق ۴ متری بیشترین نرخ استحصال (۷۳.۱۶ مترمکعب در ۱۲ ساعت) و در عمق ۵ متری کمترین میزان استحصال (۶۲.۰۵ مترمکعب در ۱۲ ساعت) است [۵].

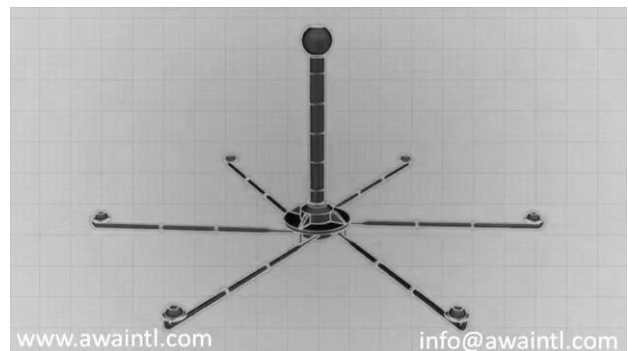
در سال ۲۰۱۹، در تحقیقات منتشرشده توسط شرکت AWA آمریکا محاسبات میزان آب استحصال‌شده در هر ساعت در ابعاد مختلف باتوجه به دمای هوا و رطوبت نسبی صورت‌گرفته است. در این تحقیق به‌ازای دمای مختلف (از صفر تا ۳۳ درجه) و رطوبت ثابت، محاسبات نرخ استحصال آب در یک ساعت و در طول یک روز برای برج خنک‌کن با ابعاد مشخص صورت‌گرفته است [۶].

در سال ۲۰۲۰، در تحقیقاتی که توسط آقایان پتل و راوال در سنگاپور انجام‌شده، باتوجه به میانگین داده در سه سال، در بهار و تابستان به علت اختلاف دمای بیشتر بین هوا و چگالنده در مقایسه با دیگر فصول سال، در این دو فصل میزان استحصال آب به حداکثر می‌رسد. باتوجه به محاسبات انجام‌شده با افزایش میزان رطوبت، نرخ استحصال آب افزایش و هزینه استحصال کاهش می‌یابد [۱۳].

۲- تعریف مسأله

مطابق شکل ۲، هوا از سمت راست از طریق فن‌های ورودی وارد لوله‌های مدفون شده و بعد از عبور از کاهنده (که در وسط هندسه قرار دارد) در انتهای لوله در سمت چپ وارد برج خنک‌کن می‌شود. در این شبیه‌سازی ۶ لوله مدفون وجود دارد که در نهایت بعد از تجمیع ورودی‌ها وارد برج خنک‌کن می‌شوند.

و مرطوب می‌توان استفاده کرد [۳]. در این حالت استخراج آب از طریق رساندن هوای مرطوب به شرایط نقطه شبنم است. در صورتی که دمای هوا از دمای نقطه شبنم کمتر باشد، آب از طریق یک فرایند فشار ثابت از هوای مرطوب خارج می‌شود [۱۷]. طرز کار این سامانه به این نحو است که یک لوله بزرگ در داخل زمین قرار گرفته و حول آن بافاصله مشخص، چند لوله کوچک‌تر که در انتها به لوله اصلی متصل است، در زمین قرار می‌گیرد (شکل ۱). لوله‌های کوچک وظیفه هدایت هوا به داخل لوله اصلی جهت انجام فرایند میعان را بر عهده دارند. جریان هوا از طریق مکش در انتهای لوله و یا با قراردادن فن، به داخل لوله‌ها هدایت می‌شود. در صورتی که لوله اصلی را بلندتر در نظر بگیریم، جریان باد عبوری از بالای لوله اصلی می‌تواند مکش لازم برای هدایت جریان هوا را بر عهده گیرد. سپس در داخل لوله اصلی باتوجه به پایین بودن دما در داخل زمین، انتقال حرارت بین هوای مرطوب و لوله (خاک) انجام می‌گیرد و دمای هوا تا دمای نقطه شبنم کاهش یافته و رطوبت آن به‌صورت آب شیرین استحصال می‌شود.



شکل ۱ نمای کلی سامانه آب اتمسفریک [۶]

آب حاصل از این فرآیند در انتهای لوله اصلی جمع می‌شود. از آب تولیدشده می‌توان در مصارف کشاورزی و تأمین آب شرب استفاده کرد. در صورتی که این سامانه برای آبیاری و مصارف کشاورزی در نظر گرفته شده باشد، می‌توان از لوله‌های سوراخ‌دار به جای لوله مدفون متداول استفاده کرد تا آبیاری به‌صورت مستقیم انجام گیرد و تبخیر آب به حداقل برسد. در صورتی که آب حاصل به‌عنوان آب شرب استفاده شود، باید در نظر داشت که ماحصل این سامانه فاقد املاح و عناصر معدنی لازم برای بدن انسان است. کمبود این املاح باعث ایجاد بیماری‌های مختلف می‌شود. لذا افزودن این املاح به فرآورده این سامانه لازم است. از طرفی این آب حالت اسیدی دارد و باید تصفیه شود [۳]. باتوجه به اینکه بعد از مدتی دمای لوله (خاک) به‌مرور زمان بالا می‌رود، نرخ استحصال آب کاهش یافته و تا اواسط روز به حداقل می‌رسد. در شب به دلیل پایین‌تر بودن دما نسبت به روز، دمای لوله (خاک) کاهش یافته و سامانه برای روز بعد آماده می‌شود.

۱-۱- پیشینه پژوهش

در سال ۲۰۰۶، لیندبلاد مطالعاتی در حوزه استحصال آب خوراکی انجام داد. او با حل عددی به این نتیجه رسید که نرخ استحصال آب حدود ۱.۸ کیلوگرم در روز است [۹].

در سال ۲۰۰۷، لیندبلاد در ادامه تحقیقات پیشین با رطوبت زنی هوا با استفاده از دستگاه رطوبت زن خورشیدی و استفاده از هوای مرطوب حاصل

باقی‌مانده، همگی به‌صورت مخروط هستند. کویل خنک‌کن به‌صورت یک مقطع دایره شکل به قطر ۰.۲ متر است که حول محوری به طول ۲ متر و به قطر ۱ متر است. صفحات شیشه‌ای نیز برای شبیه‌سازی آسان‌تر به‌صورت استوانه‌ای به قطر ۱ متر و طول ۲.۴۵ متر در نظر گرفته شده است. مخروط داخل برج به طول ۲.۸ متر و قطر ۱ متر است.

۲-۱- شرایط اولیه

هوا از طریق فن با ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه وارد لوله مدفون می‌شود. باتوجه‌به اطلاعات استخراج‌شده آب‌وهوایی شهر مدنظر (چابهار) که همان بیشینه و کمینه دما در طول یک سال به‌صورت میانگین است [۱۴]، می‌توان حل جریان را به‌صورت ۴ گام به مدت‌زمان ۶ ساعت در نظر گرفت که در آن پس از اتمام هر گام زمانی، مقادیر دما تغییر می‌کند. علاوه‌برآن باید انتقال حرارت ناشی از اختلاف دما در زیر خاک نیز در نظر گرفته شود. برای قسمت خنک‌کاری، از آب به‌عنوان سیال کاری استفاده می‌شود و به‌صورت دما ثابت در نظر گرفته می‌شود. جدول مقادیر دما در هر گام زمانی به شرح زیر است.

جدول ۱ شرایط اولیه مسأله در هر گام زمانی

دیواره بیرونی	مایع خنک‌کننده (آب)	هوای ورودی	زمان/دما (°C)
۲۱	۵	۲۵.۵	از ساعت ۰۰:۰۰ تا ۰۶:۰۰
۲۵.۵	۵	۳۰	از ساعت ۰۶:۰۰ تا ۱۲:۰۰
۳۰	۵	۲۵.۵	از ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۸:۰۰
۲۵.۵	۵	۲۱	از ساعت ۱۸:۰۰ تا ۰۰:۰۰

درنهایت با فرض اینکه در انتهای هر گام زمانی به علت انتقال حرارت بین سیال و دیواره، دمای دیواره و هوای ورودی یکسان می‌شود می‌توان از دمای سیال در گام قبل به‌عنوان دیواره در گام حاضر استفاده کرد.

۳- روابط حاکم

در محاسبات لوله مدفون، ابتدا مقادیر سرعت و فشار در انتهای بخش اول لوله (قبل از کاهنده) را با استفاده از روابط جریان یک‌بعدی و بدون اصطکاک محاسبه می‌شود. در قسمت کاهنده با داشتن مقادیر سرعت از بخش قبل با استفاده از روابط نازل همگرا، مقادیر ثانویه سرعت و فشار در انتهای کاهنده محاسبه می‌شود. به‌منظور محاسبه نرخ استحصال از روابط موجود در مرجع [۷] و [۱۱] استفاده می‌شود.

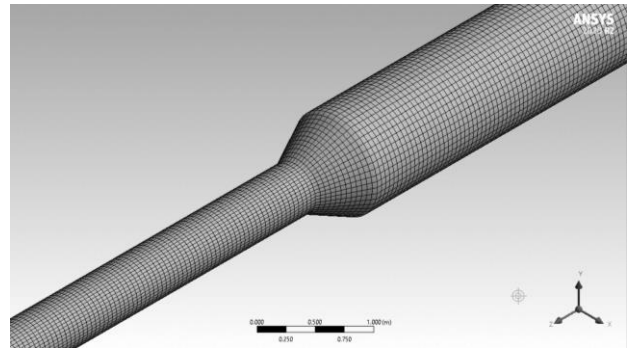
۳-۱- سرعت و فشار در لوله مدفون

باتوجه‌به اینکه سرعت فن در ورودی لوله‌های مدفون ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه است، محاسبات برای حالت دوبعدی به شرح زیر است [۱۱].

$$v = \frac{rpm}{3600} \frac{A}{\pi} \quad (1)$$

در رابطه فوق rpm دور موتور فن و A سطح مقطع است.

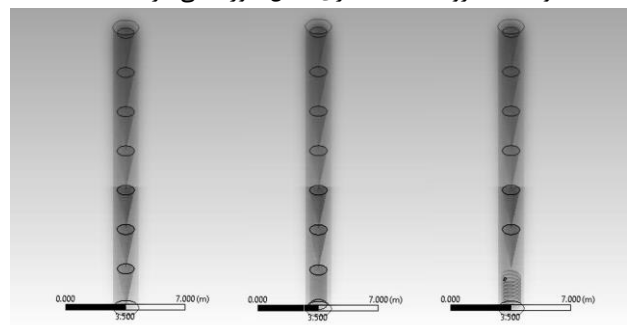
$$v = \frac{10000}{3600} \frac{\pi \times \frac{0.25^2}{4}}{\pi} = 14.15 \frac{m}{s}$$



شکل ۲ هندسه لوله مدفون در خاک

باتوجه‌به اختلاف دما در زیر خاک و سطح زمین، بین لوله و هوای ورودی انتقال حرارت وجود دارد و بخش اول استخراج آب در این قسمت صورت می‌گیرد. لوله‌های مدفون شامل یک لوله به قطر ۱ متر و طول ۳۰ متر است که توسط یک کاهنده به لوله دیگری به قطر ۰.۵ متر و طول ۳۰ متر متصل شده است. هوا از طریق فن وارد این لوله‌ها شده و از طریق این لوله‌ها وارد برج خنک می‌شود.

در قسمت برج خنک‌کن (شکل ۳)، هوای ورودی از لوله مدفون با زاویه ۳ درجه وارد برج خنک‌کن می‌شود. برای سادگی در شبیه‌سازی، هوای ورودی از پایین برج وارد برج شده مؤلفه عمودی آن به‌عنوان سرعت ورودی در نظر گرفته می‌شود. هوای ورودی از پایین به‌بالا، طبقات برج را طی می‌کند. در طول برج بسته به نوع آن، خنک‌کاری و انتقال حرارت وجود دارد. در برج نوع ۱ که شامل کویل خنک‌کن در طبقه اول (شکل ۳ سمت راست) و مخروط در باقی طبقات است، خنک‌کاری هوای ورودی فقط در طبقه اول وجود دارد و در باقی طبقات صرفاً به جهت اختلاف دمای بین هوای ورودی و برج، انتقال حرارت وجود دارد. در برج نوع ۲ به‌جای کویل خنک‌کن، از صفحات شیشه‌ای جهت استحصال آب استفاده شده است (شکل ۳ در وسط). این صفحات از نظر ابعادی مشابه مخروط‌ها هستند و فرایند خنک‌کاری مشابه نوع قبل فقط در طبقه اول اجرایی می‌شود و مابقی طبقات صرفاً به‌واسطه اختلاف دما، انتقال حرارت وجود دارد. در برج نوع ۳، فرایند خنک‌کاری کاملاً متفاوت با دو حالت دیگر است. در این برج در تمامی طبقات مخروط‌ها با ابعاد مشابه وجود دارد و در تمامی طبقات به‌واسطه مخروط‌ها خنک‌کاری سیال صورت می‌گیرد.



شکل ۳ مشخصات برج خنک‌کن در نوع ۳

برج خنک‌کن شامل لوله اصلی برج به قطر ۱.۵ متر و طول ۲۰ متر است. داخل برج خنک‌کن به ۷ قسمت تقسیم می‌شود. در قسمت اول سه حالت کویل خنک‌کن، صفحات شیشه‌ای و یا مخروط مدنظر است و در ۶ مرحله

$$a_0 = \sqrt{\gamma RT} \approx 349 \frac{m}{s} \quad (2)$$

در صورت کوچک بودن تغییرات سطح مقطع نسبت به طول لوله

مدفون در زمین رابطه (۷) به رابطه زیر تبدیل می‌شود.

$$\frac{\Delta A}{A} = (M^2 - 1) \frac{\Delta u}{u} \quad (11)$$

$$\frac{\frac{\pi(0.25^2 - 0.5^2)}{4}}{\frac{\pi 0.5^2}{4}} = (0.041^2 - 1) \left(\frac{du}{14.15} \right) \rightarrow du = +10.63 \rightarrow u_2 = 24.78 \frac{m}{s}$$

با دانستن روابط $a = \sqrt{\gamma RT}$ و $c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$ و قرار دادن روابط در

رابطه ۴، رابطه به صورت زیر تبدیل می‌شود.

$$\frac{a^2}{\gamma - 1} + \frac{u^2}{2} = \frac{a^{*2}}{\gamma - 1} + \frac{a^{*2}}{2} \quad (12)$$

$$\rightarrow a_2 = 318.4 \frac{m}{s} \rightarrow M_2 = 0.078$$

$$\frac{p_2}{p_1} = (M_1/M_2) \left(\frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_2^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$p/p^* = (1/0.078) \left(\frac{2 + (0.4)}{2 + (0.4)0.078^2} \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow p_2 = 0.42 \text{ bar}$$

$$\phi = \frac{P_v}{P_g}$$

۳-۱- محاسبات میزان استحصال آب

برای محاسبه میزان استخراج آب

لازم است تا با داشتن میزان

رطوبت، فشار و دمای سیال، طبق

روابط زیر عمل کرد [۷]. با فرض

فرآیند فشار ثابت داریم:

$$(14)$$

$$P_a = P - P_v \quad (15)$$

$$\omega = 0.622 \times \frac{P_v}{P_a} \quad (16)$$

معادله انرژی به فرم زیر است.

$$h_1 + \frac{u_1^2}{2} + q = h_2 + \frac{u_2^2}{2} \quad (3)$$

با فرض نداشتن گرمای ورودی و گاز کامل کالریک داریم:

$$c_p T_1 + \frac{u_1^2}{2} = c_p T_2 + \frac{u_2^2}{2} \quad (4)$$

با فرض $u_2 = 0$, $T_2 = T_0$ و $T_1 = T$, $u_1 = u$ داریم:

$$c_p T + \frac{u^2}{2} = c_p T_0 \quad (5)$$

با دانستن روابط $a = \sqrt{\gamma RT}$ و $c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$ رابطه فوق به صورت زیر

تبدیل می‌شود.

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} = 1 + \frac{0.4}{2} = 1.20 \quad (6)$$

$$\rightarrow T = 252.5 \text{ K}$$

$$a = 318.5 \frac{m}{s}$$

$$M = \frac{v}{a} = 0.041$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_0}{T_1} = \frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_2^2} \quad (7)$$

$$\frac{T}{T^*} = \frac{2 + (0.4)}{2 + (0.4)0.041^2} \rightarrow \quad (8)$$

$$T^* = 210.4 \text{ K} \rightarrow a^* = 290.8 \frac{m}{s}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = (M_1/M_2) \left(\frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_2^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$\frac{p}{p^*} = (1/0.041) \left(\frac{2 + (0.4)}{2 + (0.4)0.041^2} \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow p^* = 0.03 \text{ bar}$$

برای محاسبه سرعت و فشار در قسمت کاهنده داریم:

$$\frac{dA}{A} = (M^2 - 1) \frac{du}{u} \quad (10)$$

مقادیر میانگین به‌عنوان داده‌های مرجع در نظر گرفته شده و محاسبات با این داده‌ها صورت می‌گیرد.

برای محاسبات گام بعدی، از دمای گام قبلی به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. برای اعمال دمای دیواره بیرونی برج در گام بعدی، از دمای هوا در گام فعلی و برای دمای دیواره داخلی (مخروط) از دمای هوای ورودی به برج در گام فعلی استفاده شده است. در محاسبات برج خنک‌کن داده‌های بالاترین نقطه در طبقه قبلی به‌عنوان داده‌های مرجع و داده‌های حاصل از حل در آن طبقه به‌عنوان داده ثانویه در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا حل جریان برای قسمت لوله‌های مدفون صورت می‌گیرد. با توجه به نتایج حاصل از این حل، با میانگین‌گیری از دمای هوا در خروجی لوله، دمای ورودی به برج برای هر گام محاسبه می‌شود.

۵- میدان حل و شرایط مرزی

میدان حل در قسمت لوله‌های مدفون در داخلی‌ترین قسمت لوله قرار دارد. در این حالت از انتقال حرارت ناشی از هدایت حرارتی صرف‌نظر شده و دمای در نظر گرفته برای دیواره، دمای داخلی‌ترین قسمت لوله در نظر گرفته شده است. در قسمت کویل خنک‌کن، فرض بر این است که دمای دیواره بیرونی کویل برابر دمای آب در جریان در داخل کویل است و از انتقال حرارت از طریق هدایت حرارتی صرف‌نظر می‌شود. به علت فرض ثابت بودن دما در دیواره، نیازی در حل جریان در داخل کویل خنک‌کن نیست. در دیگر طبقات برج نیز دامنه حل جریان شامل استوانه داخلی برج اصلی است که شامل مخروطها نیز می‌شود. مخروطها نیز به‌صورت دما ثابت و با دمای گام قبلی در نظر گرفته شده‌اند.

شرایط مرزی به شرح زیر است. با توجه به تحقیقات صورت گرفته، در عمق ۶ متر در زیرزمین اختلاف دما بین هوای سطح زمین و زیرزمین حدود ۱۰ درجه سلسیوس است. بنابراین با توجه به مقادیر دمای هوای ورودی در هر گام زمانی، دمای دیواره لوله مدفون محاسبه می‌شود. با توجه به مقادیر دما در قسمت دیواره و هوای ورودی، حل جریان در حالت پایا با احتساب انتقال حرارت صورت می‌گیرد و با استفاده از نتایج، میزان نرخ تولید آب محاسبه می‌شود. بعلاوه از نتایج حاصل در لوله مدفون به‌عنوان داده ورودی مسئله در حل در قسمت برج خنک‌کن استفاده می‌شود.

با توجه به اطلاعات استخراج شده آب‌وهوایی شهر مدنظر (چابهار) که همان بیشینه و کمینه دما در طول یک سال به‌صورت میانگین است، می‌توان حل جریان را به‌صورت ۴ گام به مدت زمان ۶ ساعت در نظر گرفت که در آن پس از اتمام هر گام زمانی، مقادیر دما تغییر می‌کند. علاوه بر آن باید انتقال حرارت ناشی از اختلاف دما در زیر خاک نیز در نظر گرفته شود. برای قسمت خنک کاری، از آب به‌عنوان سیال کاری استفاده می‌شود و به‌صورت دما ثابت در نظر گرفته می‌شود. جدول مقادیر دما در هر گام زمانی به شرح زیر است.

در نهایت با فرض اینکه در انتهای هر گام زمانی به علت انتقال حرارت بین سیال و دیواره، دمای دیواره و هوای ورودی یکسان می‌شود می‌توان از دمای سیال در گام قبل به‌عنوان دیواره در گام حاضر استفاده کرد.

شرایط مرزی در قسمت برج خنک‌کن به شرح زیر است. دمای دیواره بیرونی برج در هر گام زمانی، برابر دمای هوای آزاد در بیرون از برج و دمای هوای دیواره داخلی برج (مخروطها) در هر گام زمانی، برابر دمای هوای داخل برج در گام زمانی قبل در نظر گرفته شده است. در صورت وجود خنک کاری

$$m_a = \frac{P_a V}{R_a T} \quad (17)$$

در اینجا با داشتن مقدار دما و مراجعه به جدول آب اشباع، مقدار P_g از جدول قرائت می‌شود. مقدار P نیز همان مقدار فشار در آن نقطه است. بعد از محاسبه مقادیر فوق برای هر دو گام، جرم بخار مایع شده برحسب کیلوگرم از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$M_w = m_a (\omega_1 - \omega_2) \quad (18)$$

به‌عنوان مثال برای هوای ورودی با رطوبت ۷۰ درصد و دمای ۲۹۷.۵ درجه سلسیوس و فشار ۱۰۲.۴ کیلوپاسکال و هوای خروجی با دمای ۲۹۶.۷ درجه سلسیوس و در فشار ثابت با توجه به روابط فوق داریم:

$$T_1 = 297.5 \rightarrow P_{g_1} = 3.04 \text{ KPa}$$

$$\phi = 0.7 \rightarrow P_{v_1} = 2.13 \text{ KPa}$$

$$T_2 = 296.7 \rightarrow P_{g_2} = 2.90 \text{ KPa}$$

$$\phi = 0.7 \rightarrow P_{v_2} = 2.03 \text{ KPa}$$

$$P_{a_1} = 102.4 - 3.04 = 99.36 \text{ KPa}$$

$$\omega_1 = 0.622 \times \frac{2.13}{99.36} = 0.0132$$

$$P_{a_2} = 102.4 - 2.90 = 99.5 \text{ KPa}$$

$$\omega_2 = 0.622 \times \frac{2.03}{99.5} = 0.0126$$

در نهایت با داشتن ابعاد حجم کنترل ($V = 0.23 \text{ m}^3$) و محاسبه جرم هوا از رابطه ۱۲-۲ و سپس میانگین‌گیری جرم هوا در دو حالت، می‌توان از رابطه ۱۳-۲ جرم رطوبت خارج شده به صورت مایع را بدست آورد.

$$m_{a_1} = 8.22 \text{ Kg}$$

$$m_{a_2} = 8.25 \text{ Kg}$$

$$m_{a_{av}} = 8.235 \text{ Kg} \rightarrow M = 8.235(0.0132 - 0.0126) = 0.000169 \text{ Kg/s}$$

به دلیل اینکه این نتایج برای یک لحظه در نظر گرفته شده است واحد جرم آب استحصال شده به‌صورت کیلوگرم در هر ثانیه است و برای محاسبه جرم کل، باید مقدار به‌دست آمده در مدت گام زمانی ضرب شود.

۴- حل عددی

حل عددی به‌صورت ۴ گام به مدت زمان ۶ ساعت است که با توجه به شرایط زمانی، متغیرهای آن در طول زمان جاگذاری می‌شود. این حل شامل لوله‌های زیرزمینی، محل تجمع لوله‌های زیرزمینی و برج خنک‌کن است. هر کدام از حل‌ها به‌صورت پایا بوده و رژیم جریان به دلیل پایین بودن سرعت جریان به‌صورت آرام در نظر گرفته می‌شود. بعلاوه فرایند انتقال حرارت نیز لحاظ شده است. بعد از انجام حل توسط نرم‌افزار، از مقطع زدن در یکی از صفحات، اطلاعات مربوط به آن صفحه برای محاسبات در نظر گرفته می‌شود. با استخراج داده‌های دما و فشار در تمامی نقاط صفحه و سپس میانگین‌گیری این داده‌ها،

قسمت کوپل خنک کن به علت پایین تر بودن دمای دیواره کوپل نسبت به هوای ورودی در تمامی گام‌های زمانی، در کل روز استخراج آب مقدور است. با استفاده از روابط استخراج شده، نرخ استحصال آب ۱۳۳۷ کیلوگرم در روز است.

$$M = 0.061906 \times 6 \times 3600 = 1337 \frac{Kg}{day}$$



شکل ۵ نمودار میزان استحصال آب در کوپل خنک کن

در قسمت مخروطها باتوجه به اینکه دمای هوای ورودی در ۱۲ ساعت دوم از دمای دیواره بیشتر است و در این حالت میزان استحصال آب به صفر می‌رسد، از محاسبات نتایج ۱۲ ساعت پایانی چرخه نظر شده است. در این زمان، هوا سعی در خنک کاری دیواره و آماده‌سازی سیکل برای روز بعد است. در مجموع ۱۲ ساعت برای یک مخروط، نزدیک به ۱۵۰ کیلوگرم است. باتوجه به اینکه در نتایج، این مقادیر برای مخروطهای دیگر نیز نزدیک به همین مقدار است، در مجموع مخروطها میزان ۹۰۰ کیلوگرم آب و در کل مجموعه (شامل لوله‌های مدفون) میزان ۲۳۲۶ کیلوگرم آب در روز به دست می‌آید.

$$M = 0.06944 \times 6 \times 3600 = 150 \frac{Kg}{day}$$

$$M_{total} = 11564 + 1337 + 900 = 13801 \frac{Kg}{day}$$

۳-۶- برج نوع ۲

در طبقه اول برج نوع ۲ برخلاف برج نوع ۱ از صفحات شیشه‌ای برای خنک کاری استفاده شده است. استفاده از صفحات شیشه‌ای سطح تماس بین سیال و دیواره داخلی برج را افزایش داده و باعث افزایش نرخ تولید آب در سامانه می‌شود. باقی طبقات برج همانند برج نوع ۱ مخروط قرار گرفته است و شرایط آن مشابه برج نوع ۱ است.

باتوجه به محاسبات میزان آب استحصال شده در صفحات شیشه‌ای در یک روز نسبت به کوپل خنک کن می‌توان نتیجه گرفت که بازدهی صفحات شیشه‌ای نسبت به کوپل خنک کن بیشتر است.

$$M = 0.78945 \times 6 \times 3600 = 1705.2 \frac{Kg}{day}$$

افزایش اختلاف دما در ورودی و خروجی سیال در طبقه اول برج در نوع ۲ نسبت به نوع ۱ دلیلی افزایش نسبی نرخ استحصال آب در برج نوع ۲

در تمامی طبقات برج (نوع ۳)، دمای دیواره داخلی برابر مقدار ثابتی در نظر گرفته می‌شود.

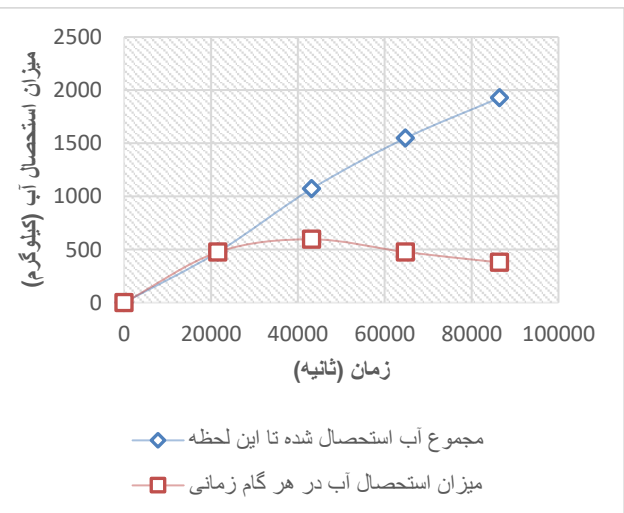
با فرض فوق، در نیمه اول روز که دمای دیواره در تمامی قسمت‌ها از دمای سیال ورودی کمتر است، در نتیجه در دیواره برج نیز در نیمه اول روز انتقال حرارت و خنک کاری وجود دارد. در نیمه دوم به علت بالاتر بودن دمای دیواره از سیال ورودی، انتقال حرارت در جهت عکس رخ می‌دهد و هوای ورودی وظیفه خنک کاری دیواره و آماده‌سازی سیکل برای روز بعد را برعهده دارد. در این حالت استحصال آب وجود ندارد و تنها در قسمت‌هایی که خنک کاری رخ می‌دهد مانند طبقه اول برج خنک کن و لوله‌های مدفون است که در تمام طول ۲۴ ساعت روز امکان استحصال آب وجود دارد.

۶- نتایج

نتایج حاصل از حل عددی و محاسبات صورت‌گرفته به تفکیک قسمت‌های مختلف و نوع برج به شرح زیر است.

۶-۱- لوله مدفون

با استفاده از روابط تهویه مطبوع به‌دست‌آمده در قسمت استخراج روابط و باتوجه به مقادیر دمای به‌دست‌آمده محاسبات میزان آب استحصال شده در لوله مدفون صورت می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، باگذشت زمان و رسیدن به اواسط روز نرخ استحصال آب به مقدار بیشینه رسیده و پس از آن کاهش می‌یابد. علت این پدیده کاهش اثر خنک کاری به علت کاهش دما است. باگذشت زمان اختلاف دما بین هوای ورودی و دمای میانگین هوای خروجی در لوله مدفون کاهش می‌یابد و در آخرین گام زمانی میزان اختلاف دما بین هوای ورودی به لوله و هوای خروجی به حداقل می‌رسد. به همین دلیل بازده سامانه در نیمه ابتدایی روز بیشتر از نیمه دوم روز است.



شکل ۴ نمودار میزان استحصال آب در لوله مدفون

۶-۲- برج نوع ۱

برج نوع ۱ شامل کوپل خنک کن در طبقه اول و مخروط در دیگر طبقات است. بعلاوه در این برج خنک کاری صرفاً در طبقه اول و در کوپل خنک کن صورت می‌گیرد و در باقی طبقات، انتقال حرارت صرفاً به علت اختلاف دمای هوا در دو گام زمانی مختلف است.

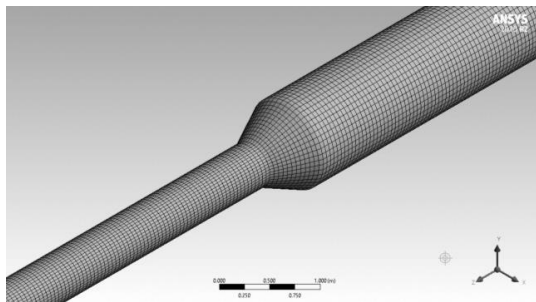
$$M = 0.03437 \times 6 \times 3600 = 742 \frac{Kg}{day}$$

$$M_{total} = 11564 + 617 + 1304 + 563 + 1165 + 659 + 1440 + 742 = 18054 \frac{Kg}{day}$$

۷- استقلال از شبکه

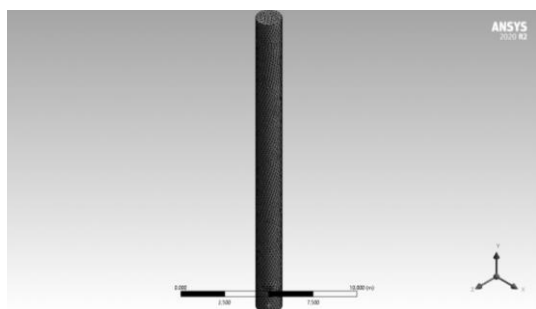
برای این مسأله سه نوع شبکه درشت، متوسط و ریز در نظر گرفته شده است. باتوجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه نوع شبکه درشت، متوسط و ریز برای هر قسمت از سامانه، شبکه متوسط نسبت به شبکه درشت از دقت بیشتری برخوردار است. بعلاوه درصد خطا بین نتایج دو شبکه درشت و متوسط از درصد خطای بین نتایج شبکه متوسط و ریز بیشتر است. از طرفی، زمان لازم برای حل شبکه ریز بسیار بیشتر از زمان حل دو شبکه دیگر است، بنابراین بهترین شبکه برای این حل شبکه متوسط است و باتوجه به نتایج ارائه شده در قسمت نتایج حل جریان از دقت کافی برخوردار است و این حل مستقل از شبکه است. لازم به ذکر است در برج نوع ۱ به علت وجود کویل خنک‌کن اختلاف زیادی بین تعداد سلول‌ها نسبت به دو نوع دیگر وجود دارد. شبکه نهایی موردنظر در بخش‌های مختلف هندسه به شکل زیر است.

در قسمت لوله مدفون به علت سادگی هندسه از مش منظم با الگوی مربع شکل استفاده شده تا با کمترین تعداد سلول‌های شبکه، به نزدیک‌ترین حل به حل واقعی رسید.



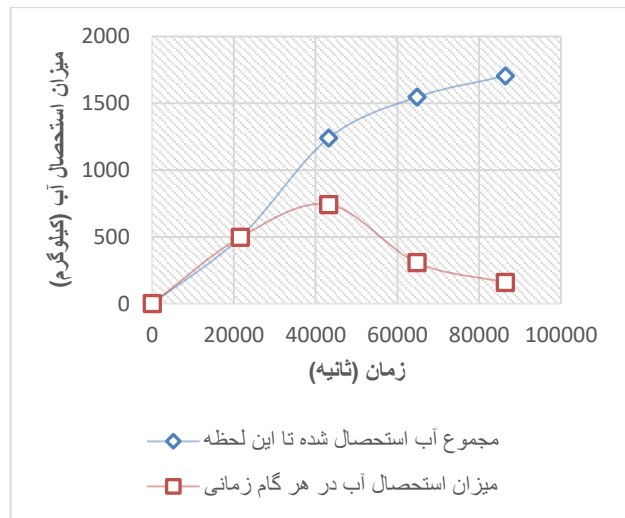
شکل ۷ شبکه تولیدشده در لوله مدفون

در قسمت برج خنک‌کن، به جهت سهولت در تولید شبکه از شبکه مثلثی شکل به صورت پیش‌فرض استفاده شده است. در برج نوع ۱ (کویل خنک‌کن) در طبقه اول برج، به دلیل وجود کویل خنک‌کن و پیچیدگی کویل در تولید شبکه، شبکه تولیدشده در طبقه اول در برج نوع ۱ ریزتر از دیگر طبقات برج است.



شکل ۸ شبکه تولیدشده در برج خنک‌کن

نسبت به برج نوع ۱ است. افزایش شیب نمودار استحصال آب در هر لحظه در شکل ۶ در مقایسه با شکل ۵، مهر تأییدی برای تصدیق تحلیل ذکر شده است.



شکل ۶ نمودار میزان استحصال آب در صفحات شیشه‌ای

در این قسمت، مانند نوع ۱ بازدهی برج در ۱۲ ساعت ابتدایی مطلوب است و نیمه دوم، جهت آماده‌سازی سیکل برای روز بعد است. در مجموعه مخروطها در طول ۱۲ ساعت، میزان ۸۸۰ کیلوگرم آب از رطوبت هوا استخراج می‌شود که این میزان نسبت به نتایج نوع ۱ اندکی کمتر است. در کل مجموعه میزان ۲۶۷۴ کیلوگرم آب از رطوبت هوا استخراج می‌شود. در کل مجموعه در نوع ۲ نرخ استحصال آب در یک روز از نرخ استحصال در نوع ۱ بیشتر است. بعلاوه باید در نظر داشت که در این شبیه‌سازی به جای صفحات شیشه‌ای از استوانه استفاده شده است که سطح تماسی کمتر از صفحات شیشه‌ای دارد، پس می‌توان گفت نرخ استحصال در واقعیت، می‌تواند از مقدار به دست آمده بیشتر باشد.

$$M = 0.006789 \times 6 \times 3600 = 147 \frac{Kg}{day}$$

$$M_{total} = 11564 + 1705 + 880 = 14149 \frac{Kg}{day}$$

۴-۶- برج نوع ۳

در برج نوع ۳، به جای کویل و استوانه از مخروط استفاده شده و خنک کاری و انتقال حرارت در تمامی مخروطها لحاظ شده است. باتوجه به این فرض، بازده این سیکل در تمام ۲۴ ساعت مطلوب است و محاسبات برای ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. به دلیل اختلاف بین مقادیر نرخ تولید آب در طبقات مختلف در برج نوع ۳ نتایج هر طبقه به صورت مجزا بررسی می‌شود. در این حالت، به علت وجود انتقال حرارت در تمامی طبقات، اختلاف بین دمای هوای ورودی و خروجی نسبت به دو نوع دیگر قابل ملاحظه است. با این تفاسیر برج نوع ۳ بیشترین نرخ استحصال آب در بین دو نوع دیگر را دارا است. در این سیکل (به همراه لوله مدفون) در مجموع ۲۴ ساعت میزان ۱۸۰۵۴ کیلوگرم استحصال آب وجود دارد. که در بین این ۳ نوع، بیشترین مقدار است.

۸- جمع‌بندی

قراردادن لوله‌های مدفون در عمق بیشتر در خاک، افزایش میزان خنک کاری در برج، افزایش ابعاد برج جهت تماس بیشتر، افزایش لوله‌های ورودی هوا، افزایش دور موتور فن و تغییر در ابعاد مخروط در جهت کاهش فشار در برج همگی راهکارهایی در جهت افزایش بازدهی این سامانه است. در صورتی که از افزایش عمق لوله مدفون برای افزایش بازده سامانه استفاده می‌شود باید در نظر داشت که عمق قرارگیری لوله مدفون نباید از حد مشخصی بیشتر شود. زیرا در این صورت لوله‌های مدفون تحت تأثیر انرژی زمین گرمایی قرار گرفته و بازدهی سامانه کاهش می‌یابد.

۱۱- فهرست علائم

علائم لاتین	
v	سرعت
a	سرعت صوت
T	دما
M	عدد ماخ
p	فشار
m_a	جرم هوای مرطوب
M_w	جرم آب استخراج‌شده

علائم یونانی

ϕ	رطوبت نسبی
ω	رطوبت مطلق

بالانویس‌ها

* شرایط صوت (عدد ماخ برابر یک)

زیرنویس‌ها

v	شرایط بخار
g	آب با شرایط اشباع
a	هوا
w	آب

۱۲- مراجع

- [1] J. JanatKhah, A Review of the process of water extraction from air humidity, a new and practical method for drinking water supply, *Scientific Journal of Engineering Studies*, Vol. 38, pp. 63-72, 2018. (in Persian)
- [2] Sh. Heydari, F. Imani, A Study of the Energy Consumption of an Underground Building in Comparison with a Similar Model on the Surface in Tehran, Yazd, and Tabriz, *Iranian Architecture Studies Quarterly*, No. 13, Spring and Summer 2019. (in Persian)
- [3] M. Bazargan, M. Ahmadi, Production of fresh water or use of underground cooling of humid air and solar energy, *Journal of Renewable and New Energies*, Vol. 1, pp. 5-15, 2014. (in Persian)
- [4] M. Mafi, Evaluation of fresh water extraction from air humidity using the cooling system of buried pipes, *22nd Annual International Conference on Mechanical Engineering*, 2014. (in Persian)
- [5] A. JanZadeh, Extraction of AI from the Air Using the Temperature of Depth of Earth, *Journal of water and Soil Conservation*, Vol. 25, No. 2, 2018. (in Persian)

در این پروژه شبیه‌سازی عددی میزان استحصال آب از سامانه آب اتمسفریک صورت گرفته است. این شبیه‌سازی انتقال حرارت در سه هندسه مختلف برای مدت یک روز کامل صورت گرفته است. باتوجه به نتایج به دست آمده، بیشترین میزان استحصال در لوله‌های مدفون است. نرخ استحصال آب در لوله مدفون به عواملی مانند تعداد لوله‌ها، طول لوله، حجم لوله، ابعاد، کاهنده و محل دفن لوله (عمق قرارگیری لوله) بستگی دارد. در بین این عوامل مهم‌ترین آن‌ها تعداد لوله‌ها، محل دفن لوله، طول و حجم لوله است. محل دفن لوله و طول لوله به علت وجود اختلاف دما بین سیال و دیواره لوله مدفون بر روی افزایش و کاهش نرخ انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد. طبق نتایج و محاسبات صورت گرفته در این تحقیق، سامانه آب اتمسفریک شامل این سامانه در مناطق دارای رطوبت ۷۰٪ به بالا عملکرد مناسبی را ارائه می‌دهد.

۹- نتایج محاسبات شرکت AWA

در محاسبات انجام شده توسط شرکت AWA آمریکا، به صورت میانگین در طول ۱۲ ساعت با شرایط و ابعاد مشابه، میزان ۹۹۷۸ کیلوگرم و در طول ۲۴ ساعت، میزان ۱۷۶۰۴ کیلوگرم آب استخراج می‌شود (جدول ۲).

جدول ۲ نتایج محاسبات شرکت AWA

دما ($^{\circ}C$)	نرخ استحصال آب ($\frac{Kg}{Hour}$)
19	560
20	599
21	634
22	672
23	711
24	756
25	805
26	858
27	910
28	952
29	994
30	1050
31	1120
32	1183

۱۰- نتیجه‌گیری

باتوجه به نتایج، بیشترین نرخ استحصال آب در سامانه مربوط به مجموعه لوله‌های مدفون است. علت آن است که لوله‌های مدفون اختلاف دما و سطح تماس بیشتر نسبت به سایر قسمت‌های سامانه را دارا است. برای حداکثر بهره‌برداری از سیکل تولید آب از رطوبت هوا، می‌توان از خنک کاری در تمام برج استفاده کرد تا در تمام طول روز امکان تولید آب وجود داشته باشد (نوع ۳). در صورتی که خنک کاری در کل برج امکان‌پذیر نیست، استفاده از صفحات شیشه‌ای نسبت به کویل خنک‌کن به علت سطح تماس بیشتر به صرفه‌تر بوده و بازدهی بیشتری دارد. از طرفی، باید در نظر داشت که این سامانه نیازمند هوای ورودی با رطوبت حدود ۷۰٪ باشد تا بازدهی مناسب را به عمل آورد.

- [6] *Water production calculation table*, Accessed 15 September 2020; www.awaintl.com.
- [7] C. Borgnakke, GJ. Van Wylen , RE. Sonntag, *Fundamentals of Thermodynamics*, 7th Edition, pp. 530–548, 2009.
- [8] H. Jarimi, R. Powell and S. Riffat; Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 15, pp. 253-276 2019.
- [9] J. Lindblom, B. Nordell; Water production by underground condensation of humid air, *Desalination*, Vol. 189, pp. 248-260, 2006.
- [10] J. Lindblom, B. Nordell; Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation, *Desalination*, Vol. 203, pp. 417-434, 2007.
- [11] JD. Anderson.; *Fundamentals of Aerodynamics*, 7nd Edition, pp. 475–564, 2001.
- [12] K. Pontious, B. Weidner, N. Guerin, A. Dates, O. Pierrakos and K. Altaii; Design of an Atmospheric Water Generator: Harvesting Water Out of Thin Air, *IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium*, 2016.
- [13] K. Patel, J. Patel, H. Raval, Potential Study of Atmospheric Water Generator (AWG) for Humid Climatic Conditions of Eastern States in India, *Renewable Energy and Climate Change*, pp. 239-248, 2020.
- [14] Weather Atlas, *Weather forecast and Climate information*, Accessed 15 September 2020; weather-atlas.com.