



## Investigation of the Humidifier Performance of Adding Gas Diffusion Layers Around Membrane for Fuel Cell Application

M. Ghaedamini, E. Afshari\*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

**ABSTRACT:** Proton exchange membrane fuel cells requires humidification the reactive gases before entering the fuel cell for good performance. Using a planar membrane humidifier with important advantages such as simple building and no moving parts, is one of the best methods to humidification the reactive gases discussed in this paper. In this study, it is proposed to insert porous layers (gas diffusion layers) on both sides of the membrane, to increase the residence time gases. Therefore, by using three-dimensional and numerical modeling of the humidifier, the effect of porous layers and the effect of their properties on the humidifier performance are investigated. For this purpose, a non-porous humidifier is first modeled, and then the porous layer is inserting on the wet side, on the dry channel side, and on two sides of the membrane, and the performance of these models is compared. The results show that the highest dew point temperature of dry side outlet is related to the use of gas diffusion layers on both sides, on the dry side, on the wet side and humidifier without gas diffusion layers respectively. In all cases of laying gas, with increasing porosity coefficient and permeability, dew point increase and improve humidifier performance.

### Review History:

Received: Aug. 11, 2019

Revised: Oct. 04, 2019

Accepted: Dec. 09, 2019

Available Online: Dec. 26, 2019

### Keywords:

Membrane humidifier

Proton exchange membrane fuel cell

Gas diffusion layer

Dew point

Numerical modeling

### 1. Introduction

Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell has many advantages such as low start-up time, high efficiency, low noise level and zero emission. Therefore, it is applied in the stationary power plants, vehicles, portable systems and the like [1,2]. The balanced performance of the proton exchange membrane fuel cell significantly depends on the heat and water management. If the water removal rate in the PEM fuel cell does not keep up with the water generation rate, it will cause water flooding and thus hinder the transport of reactant gases by blocking the pores in the porous catalyst and Gas Diffusion Layers (GDL), consequently cover up active sites in the catalyst layer and plug the gas transport channels. Instead, the ionic conductivity of the membrane is strongly dependent on its degree of humidification, with high ionic conductivities at maximum humidification. When the water removal rate exceeds the water generation rate, membrane dehydration occurs, which can result in performance degradation due to the significant ohmic losses within the PEM fuel cell [3].

There are several methods to manage water inside the PEM fuel cell. These methods includes: bubble humidification, enthalpy wheel exchanger, and membrane humidification. The bubble humidification method has a high pressure drop. In the bubble humidification method at high flow rates, it is difficult to control the temperature and humidity [4]. The enthalpy wheel method, though, reduces concerns about system overweight; But high power loss, high system

complexity and high maintenance costs make it unsuitable for many applications such as cars [5].

Among these methods, the membrane humidification is the simplest and the most commonly applied one with the least energy consumption. This method reduces the complexity of fuel cell system and parasitic power. Therefore, a study on this topic is important. Numerical modeling of the membrane humidifier can help to analyze the phenomena of humidification-dominated transmission.

Various studies have been performed on the use of membrane humidifiers for PEM fuel cell systems. Most of the studies have been experimental and few studies have been performed numerically in the field of membrane humidifier. In this study, it is proposed to insert porous layers (gas diffusion layers) on both sides of membrane in order to increase the residence time of gases and by numerical and three-dimensional modeling of a humidifier, the effect of porous layers is investigated. For this purpose, a non-porous humidifier is first modeled, and then the porous layer is inserting on the wet side, on the dry channel side, and on two sides of the membrane, and the performance of these models is compared.

### 2. Governing Equations and Numerical Solution Method

The membrane humidifier that investigated in this study is planar type. Wet gas from the wet side and dry air through dry

\*Corresponding author's email: e.afshari@eng.ui.ac.ir



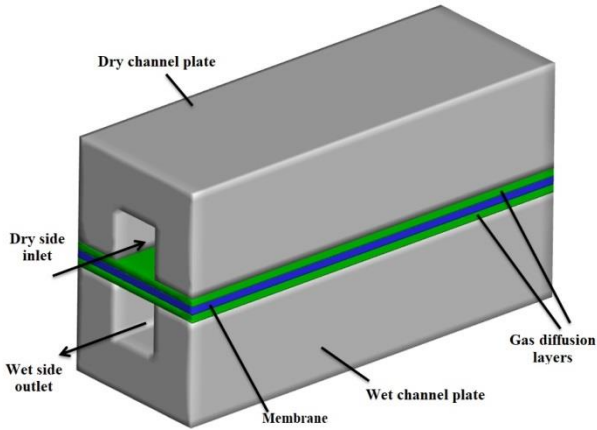


Fig. 1. Simulated three-dimensional humidifier model

channels are flow. These channels are machined into sheets of graphite or metal, their duty is to transfer dry and wet gases to / from the humidifier. Between these plates is a polymer membrane made of nafion. Due to the difference in water concentration between the two sides, water is transferred from wet side to the dry side via membrane through the diffusion process and humidifies dry gas. Fig. 1 shows a modeled three-dimensional model of membrane humidifier. Various humidifier components have been shown in Fig. 1. From the lower channel, humid air enters the humidifier and from the upper channel, dry air enters. The gas diffusion layers located on either side of the membrane are shown in Fig. 1. The cross section of the channels is square and the size of each side is 2 mm. The length of the humidifier channels is 82 mm. The distance between the channels is also 2 mm.

The governing equations include the conservations of mass, momentum, species and energy equations in the porous media with the equation of water passes through the membrane. This latter relation is derived from the following equation.

$$\dot{m}_m = \frac{\rho_{m,dry}}{W_{m,dry}} A_m M_{H_2O} D_m^{H_2O} \nabla \lambda \quad (1)$$

where the  $\dot{m}_m$  is the mass flow rate of water passes through the membrane,  $\rho_{m,dry}$  is the membrane dry density,  $W_{m,dry}$  is the membrane dry equivalent weight,  $A_m$  is area and  $M_{H_2O}$  is the water molar mass.

The governing equations are discretized using a finite volume method and solved using fluent software. In this model the pressure and velocity fields are treated using SIMPLE algorithm model. An iterative process is used to solve the set of equations and the solution of the equation of continuity and energy, respectively, has continued to achieve convergence with precision of  $10^{-4}$  and  $10^{-6}$ . The most important reason for choosing the repetition process for solving the equations is their coupling. Conservation equations in the humidifier are strongly coupled. This is due to the dependence of physical and chemical properties on the transfer parameters (such as temperature and concentration). For example, the diffusion coefficient is a function of temperature and pressure

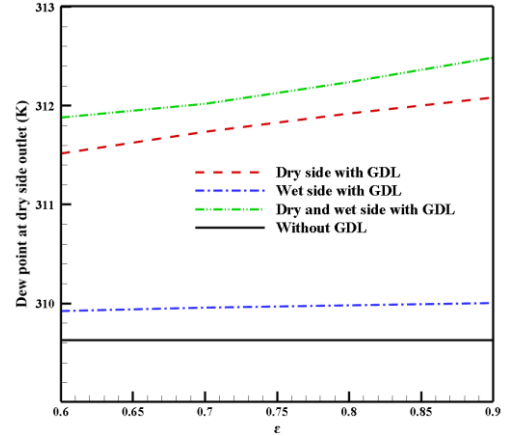


Fig. 2. Influence of porosity coefficient of porosity on dew point at dry side outlet

and viscosity is a function of temperature. A User-Defined Function (UDF) written in fluent software was used to solve the membrane governing equations to determine the amount of water transmitted through the membrane. A rectangular grid with a grid number of 61396 is used. With this number of grids, the results are independent of the number of grids.

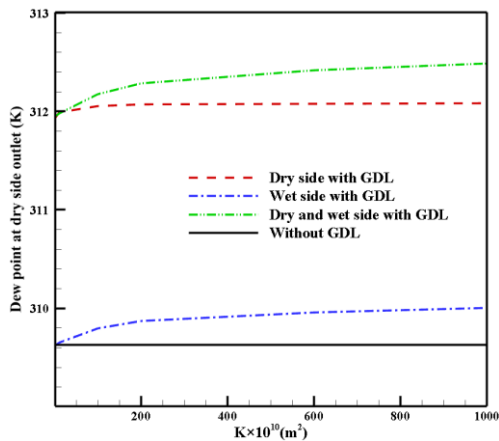
### 3. Results

The dew point is the temperature at which the air is saturated with water vapor at the same temperature. The dew point is an appropriate criterion for evaluating humidifier performance that includes the effects of heat transfer and mass transfer. The closer the dew point of the dry side outlet to the dew point of the wet side inlet, i.e. the dew point of dry side outlet increases, the humidifier performance improves. The dew point is obtained as follows [6].

$$T_{dp} = \frac{238.3 \times \ln\left(\frac{P_v}{0.61078}\right)}{17.2694 - \ln\left(\frac{P_v}{0.61078}\right)} \quad (2)$$

As shown in Fig. 2, the dew point of the dry side outlet is increased by placing the gas diffusion layer. Insert two gas diffusion layers on both dry and wet sides has the most positive effect. The reason for this is that the wet channel humidity in the gas diffusion layer has a longer residence time and over time it transfers this humidity to the membrane. This humidity enters the gas diffusion layer after passing through the membrane, and by storing this humidity in the gas diffusion layer; it causes the gas to remain in this layer and over time to transfer this humidity to the dry channel. In general, it increases dew point and water flow rate at dry side outlet. This is the same for all porosity coefficients and permeability of the gas diffusion layer. In all cases of laying gas, with increasing porosity coefficient, dew point of dry side outlet, increases and improve humidifier performance.

As shown in Fig. 3, the slope of the dew point diagram decreases with increasing permeability of the gas diffusion layer when using the gas diffusion layer on the dry side. When using the gas diffusion layer on the dry side, the dew point of the dry side outlet remains almost constant as the gas permeability increases. As permeability increases, the dew



**Fig. 3. Influence of porous layer permeability on dew point at dry side outlet**

point of the dry side outlet increases from 2.3 to 2.9 K when the gas diffusion layer is placed on both wet and dry sides.

#### 4. Conclusions

In this study, it is proposed to increase the residence time of gases on both sides of the membrane of humidifier, gas diffusion layers are inserted and by numerical and three-dimensional modeling of a humidifier, the effect of gas diffusion layers is investigated. For this purpose, a non-porous humidifier is first modeled, and then the porous layer

is inserting on the wet side, on the dry channel side, and on two sides of the membrane, and the performance of these models is compared. The results show that in all cases of laying gas, with increasing porosity coefficient and permeability, dew point and water flow rate of dry side outlet increases.

#### References

- [1] Y. Wang, K.S. Chen, J. Mishler, S.C. Cho, X.C. Adroher, A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research, *Applied energy*, 88(4) (2011) 981-1007.
- [2] T. Wilberforce, A. Alaswad, A. Palumbo, M. Dassisti, A.-G. Olabi, *Advances in stationary and portable fuel cell applications*, *International journal of hydrogen energy*, 41(37) (2016) 16509-16522.
- [3] R. Huizing, *Design and Membrane Selection for Gas to Gas Humidifiers for Fuel Cell Applications*, University of Waterloo, 2007.
- [4] R. Glises, D. Hissel, F. Harel, M.-C. Pera, New design of a PEM fuel cell air automatic climate control unit, *Journal of Power Sources*, 150 (2005) 78-85.
- [5] D. Alan, *Dynamic Modeling of Two-Phase Heat and Vapor Transfer Characteristics in a Gas-to-Gas Membrane Humidifier for Use in Automotive PEM Fuel Cells*, 2009.
- [6] J.J. Hwang, W.R. Chang, J.K. Kao, W. Wu, Experimental study on performance of a planar membrane humidifier for a proton exchange membrane fuel cell stack, *Journal of Power Sources*, 215 (2012) 69-76.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Ghaedamini, E. Afshari, *Investigation of the Humidifier Performance of Adding Gas Diffusion Layers Around Membrane for Fuel Cell Application*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(3) (2021) 395-398.

DOI: [10.22060/mej.2019.16907.6465](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16907.6465)







## بررسی عملکرد اضافه کردن لایه‌های پخش گاز اطراف غشا مرطوب‌ساز غشایی برای کاربرد پیل سوختی

مرتضی قائدامینی هارونی، ابراهیم افشاری\*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۰  
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۱۲  
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۰/۰۵

### کلمات کلیدی:

مرطوب‌ساز غشایی  
پیل سوختی غشا پلیمری  
لایه‌های پخش گاز  
نقطه شبنم  
مدل‌سازی عددی

**خلاصه:** به منظور عملکرد بهتر پیل‌های سوختی غشا پلیمری، نیاز به مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر قبل از ورود به پیل است. استفاده از مرطوب‌ساز غشایی تخت با داشتن مزایای مهمی از قبیل ساختمان ساده و نداشتن قطعه متحرک، برای مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر یکی از بهترین روش‌ها بوده که در این مقاله به آن پرداخته شده است. در این مطالعه پیشنهاد شده به منظور افزایش زمان ماند گازها در دو طرف غشا، لایه‌های متخلخل (لایه‌های پخش گاز) قرار داده شود. با مدل‌سازی سه بعدی و عددی مرطوب‌ساز، به بررسی اثر قرار دادن لایه‌های متخلخل و تأثیر خواص این لایه‌ها بر عملکرد مرطوب‌ساز پرداخته شده است. بدین منظور، ابتدا یک مرطوب‌ساز بدون لایه متخلخل، مدل‌سازی شده و سپس لایه متخلخل در سمت کانال‌های مرطوب، سمت کانال‌های خشک و دو سمت غشا قرار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین دمای نقطه شبنم خروجی سمت خشک به ترتیب مربوط به حالت استفاده از لایه‌های پخش گاز در هر دو سمت غشا، در سمت خشک، در سمت مرطوب و مرطوب‌ساز بدون لایه پخش گاز می‌باشد. در تمامی حالت‌های گذاشتن لایه متخلخل، با افزایش ضریب تخلخل و میزان نفوذپذیری لایه پخش گاز، نقطه شبنم خروجی سمت خشک افزایش می‌یابد و عملکرد مرطوب‌ساز را بهبود می‌بخشد.

### ۱- مقدمه

است که رطوبت نسبی گازهای ورودی به پیل کمتر از اشباع و در محدوده ۷۵-۹۰ درصد نگه داشته شود [۳]. عملکرد پیل بدون مرطوب‌سازی کاتد و با اشباع کامل آند، کاهش ۶ درصدی عملکرد کلی پیل را در دانسیته جریان ۴۰۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع نشان می‌دهد [۴]. بنابراین باید با یک سیستم مرطوب‌ساز، مقدار بهینه رطوبت گازهای واکنشگر ورودی به پیل سوختی را برای عملکرد بهتر پیل سوختی فراهم کرد. روش‌های مختلفی برای مرطوب‌سازی گازهای ورودی به پیل سوختی وجود دارد. از جمله می‌توان به روش حبایی، روش چرخ آنتالپی و روش غشایی اشاره کرد. روش حبایی دارای افت فشار زیادی است. در روش حبایی در نرخ جریان بالا، کنترل دما و رطوبت مشکل است [۵]. روش چرخ آنتالپی اگر چه نگرانی در مورد اضافه وزن سیستم را کاهش می‌دهد؛ ولی افت توان بالا، پیچیدگی زیاد سیستم و هزینه نگهداری بالا سبب شده است که در بسیاری از کاربردها مانند خودرو مناسب نباشد [۶]. در میان این روش‌ها، استفاده از مرطوب‌ساز

پیل سوختی غشا پلیمری را می‌توان به عنوان منبع تولید توان برای سیستم‌های قابل حمل، سیستم‌های ثابت، سیستم‌های حمل و نقل، فضاپیما و برخی کاربردهای ویژه، به علت چگالی توان بالا، زمان راه اندازی کوتاه، دمای عملکرد پایین و راندمان بالا استفاده کرد [۱ و ۲]. در پیل سوختی غشا پلیمری، پایین بودن میزان رطوبت غشا سبب خشک شدن غشا و در نتیجه کاهش هدایت یونی غشا می‌شود. رطوبت زیاد نیز باعث شده که آب اشباع شده و بخشی از آن به مایع تبدیل شده و سبب پدیده شناوری در پیل (بستن بخشی از تخلخل‌های این لایه) می‌شود. هر دو پدیده، عملکرد پیل را دچار افت و اختلال می‌کند. از این رو به منظور کنترل رطوبت غشا در داخل پیل و مدیریت آب، مرطوب کردن گازهای واکنشگر ورودی به پیل روشی مناسب می‌باشد. از طرفی میزان رطوبت گازها نباید از مقدار معینی بیشتر باشد. این مقدار معین بستگی به اندازه پیل و شرایط کاری آن دارد؛ ولی معمولاً بهترین عملکرد پیل وقتی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: e.afshari@eng.ui.ac.ir



غشایی رایج‌ترین روش مرطوب‌سازی بوده و از حداقل مصرف انرژی برخوردار است. پیچیدگی سیستم پیل سوختی و توان پارازیتی آن را نیز کاهش می‌دهد. با توجه به مزایای مرطوب‌سازی غشایی از جمله مصرف کم انرژی، سادگی و در دسترس بودن، مطالعه در مورد این موضوع، دارای اهمیت می‌باشد. مدل‌سازی عددی مرطوب‌سازی غشایی می‌تواند به تحلیل پدیده‌های انتقال حاکم بر مرطوب‌سازی کمک کند. مطالعات مختلفی در مورد استفاده از مرطوب‌سازهای غشایی برای سیستم پیل سوختی غشاپلیمری انجام شده است. پارک و همکاران [۷] یک مدل دینامیکی برای یک مرطوب‌سازی غشایی پوسته-لوله ارائه کردند. آن‌ها به بررسی انتقال جرم و حرارت با رفتارهای استاتیکی و دینامیکی پرداختند. در ابتدا به شبیه‌سازی رفتار انتقال جرم و حرارت پرداختند و این نتایج را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند و در پایان با دبی‌های مختلف به بررسی عملکرد مرطوب‌سازی پرداختند. یان و همکاران [۸] یک مدل دینامیکی را برای بررسی انتقال حرارت و انتقال جرم مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به بررسی دما و رطوبت نسبی خروجی سمت خشک پرداختند. همچنین به این نتیجه رسیدند که اثرات انتقال حرارت در پاسخ دینامیکی بیشتر از انتقال جرم است. همچنین زمان استقرار دما و رطوبت نسبی در خروجی هوای سمت خشک با افزایش سرعت هوا کاهش می‌یابد. احمدی‌طبا و همکاران [۹] یک مرطوب‌سازی حبایی برای مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر پیل سوختی غشا پلیمری ساختند. آن‌ها اثرات دمای آب موجود در مخزن، سطح آب داخل مخزن و جریان آب ورودی به مرطوب‌سازی بر عملکرد آن را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی ورودی به مرطوب‌سازی رطوبت نسبی خروجی از مرطوب‌سازی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش دمای ورودی به مرطوب‌سازی و افزایش میزان آب داخل مخزن، باعث بهبود عملکرد مرطوب‌سازی می‌شود. چن و پنگ [۱۰] یک مدل ترمودینامیکی برای مرطوب‌سازی غشایی ارائه کردند. در این مدل علاوه بر کانال‌های اصلی ورودی گازهای مرطوب و خشک، برای کنترل رطوبت یا گرما، کانال سومی تعبیه شده است که عبور جریان از آن به وسیله یک صفحه‌ی لغزان قابل تنظیم است. آن‌ها به مطالعه غیر دائم مرطوب‌سازی پرداختند. یو و همکاران [۱۱] با ارائه یک مدل تحلیلی به مطالعه پارامتری مرطوب‌سازی غشایی پرداختند. آن‌ها مقدار آب مایع تولید شده در مرطوب‌سازی را در طی فعالیت، ارائه کرده‌اند و به بررسی و مطالعه نقطه شبنم خروجی پرداختند. افشاری

و هوره [۱۲] به شبیه‌سازی سه بعدی مرطوب‌سازی غشایی پرداختند. آن‌ها از فوم فلزی به جای کانال‌های خشک و مرطوب استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که اگر از این فوم‌ها در سمت مرطوب و یا هر دو سمت استفاده شود، در مقایسه با مرطوب‌سازی معمولی، نقطه شبنم خروجی افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین نشان دادند که اگر این فوم‌ها در سمت خشک قرار گیرند، هیچ اثر مثبتی ندارند. پارک و او [۱۳] یک مدل یک بعدی مرطوب‌سازی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نفوذپذیری غشا نافیون به ضخامت آن بستگی دارد. آن‌ها همچنین به بررسی رطوبت نسبی گاز حامل که از طریق مرطوب‌سازی غشایی عبور می‌کند پرداختند که با داده‌های تجربی همخوانی خوبی دارد. کانگ و همکاران [۱۴] عملکرد یک مرطوب‌سازی غشایی پوسته-لوله را برای وسایل نقلیه پیل سوختی بررسی کردند. با این حال، مرطوب‌کننده غشایی پوسته-لوله دارای معایب حجم زیاد و مشکل در تولید انبوه است. به همین ترتیب، مطالعات در مورد مرطوب‌سازی غشایی صفحه‌ای برای غلبه بر این اشکالات انجام شده است. آن‌ها به بررسی و مقایسه دو آرایش جریان هم جهت و خلاف جهت پرداختند و و این دو آرایش جریان را تحت شرایط عملیاتی متفاوت از لحاظ پارامترهای هندسه مقایسه کردند. کاهالن و همکاران [۱۵] با کاری آزمایشگاهی به بررسی غشاها پرداختند. غشاهای آزمایش شده آن‌ها در چهار طبقه و کلاس مختلف قرار دارند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که غشاهای فلئوئوره سولفوناته بیشترین میزان آب را منتقل می‌کنند و غشاهایی که کمترین میزان آب را منتقل می‌کنند، غشاهای سولفوناته نشده و غیرفلئوئوره هستند. لی و همکاران [۱۶] یک مدل ریاضی دینامیکی که اجزای اصلی این سیستم شامل مرطوب‌سازی غشایی و خشک‌کن هست ایجاد کردند. آن‌ها مدل مورد مطالعه خود را با کاری آزمایشگاهی صحنه‌گذاری کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که غشاهای دارای نفوذ رطوبت بیشتر و ضخامت کمتر می‌توانند عملکرد سیستم را بدون توجه زیاد به هدایت گرما بهبود بخشند. پاندی و لی [۱۷] یک مدل ریاضی از مرطوب‌سازی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به منظور پیش بینی عملکرد مرطوب‌سازی به عنوان تابعی از متغیرهای طراحی و عملیاتی، در طول مرطوب‌سازی از غشای دایره‌ای توخالی استفاده کردند. مدل آن‌ها نشان می‌دهد که در حالی که مقاومت متقاطع غشایی و گاز به تنهایی برای انتقال حرارت بسیار مهم است، انتقال بخار با مقاومت

## ۲- عملکرد مرطوب‌ساز غشایی

مرطوب‌ساز غشایی بررسی شده در این مطالعه از نوع تخت می‌باشد. باید توجه داشت هرچند که در مرطوب‌ساز غشایی لوله-پوسته دست‌یابی به مساحت سطح بالا به‌ترتیب و افت فشار پایین است؛ اما پیچیدگی ساخت و مونتاژ کردن و همچنین هزینه تولید غشاهای لوله‌ای، بالا می‌باشد. از نظر فاز ورودی در سمت مرطوب، مرطوب‌سازهای غشایی به دو نوع گاز به گاز و مایع به گاز تقسیم می‌شوند. در مورد اول، معمولاً از گاز مرطوب خروجی کاند پیل به عنوان مرطوب‌کننده استفاده می‌شود. در این حالت یک سیستم چرخه‌ای به وجود می‌آید. سیستم مرطوب‌سازی چرخه‌ای انرژی گرمایی بسیار کمتری برای گرم کردن گازهای ورودی مرطوب‌ساز نیاز دارد. چون از انرژی گرمایی گازهای خروجی استفاده می‌کند. در این سیستم از چگالش آب موجود در مرطوب‌ساز جلوگیری می‌شود که این سبب جلوگیری از شناوری می‌شود و کنترل دمای عملکردی پیل با کنترل دمای مرطوب‌ساز را میسر می‌سازد. شکل ۱ یک مرطوب‌ساز غشایی تخت را نشان می‌دهد. گاز مرطوب از سمت مرطوب و هوای خشک از طریق کانال‌های خشک در دو طرف غشا جریان می‌یابند. این کانال‌ها در داخل صفحاتی از جنس گرافیت یا فلز ماشین‌کاری می‌شوند و وظیفه آن‌ها انتقال گازهای خشک و مرطوب به / از مرطوب‌ساز می‌باشد. بین این صفحات یک غشا پلیمری از جنس نافیون قرار می‌گیرد. به دلیل اختلاف غلظت آب در دو سمت غشا، آب از طریق پخش، از سمت کانال مرطوب به سمت کانال خشک نفوذ کرده و گاز خشک را مرطوب می‌کند. در سیستم مرطوب‌ساز غشایی، افت فشار و افت دما نسبت

ترکیبی از انتشار درون غشاء و رابط غشاء-گاز کنترل می‌شود. چن و همکاران [۱۸] با انجام کاری آزمایشگاهی، انتقال حرارت و جرم را در یک مرطوب‌ساز غشایی مسطح مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش دبی موجب افزایش انتقال آب از میان غشا می‌شود. همچنین یک دبی بهینه وجود دارد که در آن حداکثر دمای نقطه شبنم خروجی سمت خشک به دست می‌آید. یان و همکاران [۱۹] تأثیر ابعاد کانال و تغییر شرایط ورودی هوای خشک، از قبیل دما و رطوبت را بر مرطوب‌ساز مسطح از نظر اختلاف درجه حرارت نقطه شبنم، نرخ بازیابی آب، افت فشار و ضریب عملکرد مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. بررسی تأثیر بعد کانال نشان می‌دهد که عرض و عمق کانال به طور قابل توجهی بر عملکرد مرطوب‌ساز تأثیر می‌گذارد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش دمای ورودی هوای خشک و مرطوب منجر به بهبود اختلاف درجه حرارت نقطه شبنم، کاهش نسبت بازیابی آب، افزایش اندک افت فشار و در نتیجه کاهش ضریب عملکرد می‌شود. در این مطالعه پیشنهاد شده به منظور افزایش زمان ماند گازها در دو طرف غشای مرطوب‌ساز غشایی، لایه‌های متخلخل (لایه‌های پخش گاز) قرار داده شود و با مدل‌سازی سه بعدی و عددی یک مرطوب‌ساز به بررسی اثر قرار دادن لایه‌های متخلخل پرداخته شده است. بدین منظور، ابتدا یک مرطوب‌ساز غشایی بدون هیچ لایه متخلخل مدل‌سازی شده و سپس یک بار لایه متخلخل در سمت کانال‌های مرطوب، بار دیگر در سمت کانال‌های خشک قرار گرفته است و در نهایت هم لایه‌های متخلخل در دو سمت غشا، قرار گرفته‌اند و عملکرد این مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

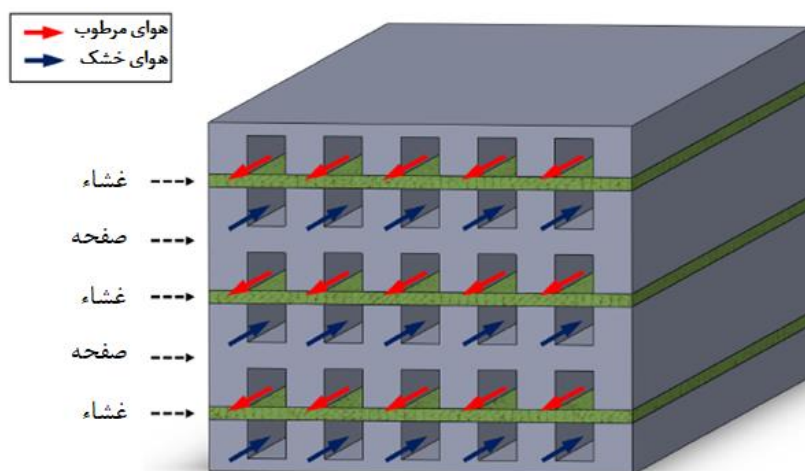


Fig. 1. Planar membrane humidifier

شکل ۱. مرطوب‌ساز غشایی تخت [۸]

الف) مخلوط گازها، گاز کامل هستند.  
 ب) جریان داخل کانال‌ها دائم، آرام و تراکم‌ناپذیر می‌باشد.  
 ج) ساختار متخلخل غشا یکنواخت و همگن است.  
 ه) از تأثیر گرانش صرف نظر می‌شود.  
 و) غشا در مقابل گازهای ورودی نفوذناپذیر است.  
 ز) لایه‌های پخش گاز در مقابل گازهای ورودی نفوذناپذیر هستند.

### معادله بقا جرم

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

در معادله بالا،  $\vec{u}$  بردار سرعت و  $\rho$  دانسیته مخلوط گاز است. این معادله در کانال‌ها، لایه‌های پخش گاز و در غشا به همین شکل برقرار می‌باشد [۲۰].

### معادله بقا مومنتم

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_{Dar} \quad (2)$$

در معادله بالا  $\rho$  و  $\mu$  به ترتیب فشار و ویسکوزیته مخلوط گاز می‌باشد. تنش برشی  $\tau$  و ضریب تخلخل محیط متخلخل می‌باشد که به صورت نسبت حجم خالی به حجم کل تعریف می‌شود. ضریب تخلخل در غشا ۰/۵، در لایه‌های پخش گاز از ۰/۶ تا ۰/۹ متغیر و در کانال‌های جریان برابر ۱ است. در نواحی متخلخل برای برقراری پیوستگی شار جرم در فصل مشترک ناحیه غشا و نواحی بدون تخلخل، از سرعت‌های ظاهری استفاده می‌شود و خواص انتقالی اصلی در نواحی متخلخل با خواص انتقالی مؤثر اصلاح می‌شود. از این رو در معادلات مومنتوم در غشا و لایه‌های پخش گاز ترم چشمه قرار می‌گیرد تا قانون داری را در جایی که سرعت بسیار کم است، اعمال کند [۲۱ و ۲۲].

$$S_u = -\frac{\mu}{K} \vec{u} \quad (3)$$

در این رابطه،  $K$  نفوذپذیری محیط متخلخل می‌باشد. لازم به ذکر است که در غشا فقط بخار آب منتقل می‌شود و ساختار غشا اجازه ورود گازهای دیگر را نمی‌دهد. ترم چشمه در کانال‌ها صفر است.

به دیگر روش‌های مرطوب‌سازی برای پیل سوختی وضعیت بهتری دارد. از جمله مشکلات و محدودیت‌های روش غشایی می‌توان به میزان رطوبت جذب شده توسط گاز اشاره کرد که تابع پارامترهای نفوذپذیری غشا، دما، فشار کاری مرطوب‌ساز و دبی‌های جریان است. با این وجود، روش غشایی یکی از رایج‌ترین روش‌های مرطوب‌سازی گازهای واکنش‌دهنده در سیستم پیل سوختی به شمار می‌رود.

### ۳- معادلات حاکم

در شکل ۲ یک مدل سه بعدی مرطوب‌ساز غشایی مدل‌سازی شده نشان داده شده است. اجزای مختلف مرطوب‌ساز در این شکل به نمایش درآمده است. از کانال پایینی، هوای مرطوب وارد مرطوب‌ساز می‌شود و از کانال بالایی هوای خشک وارد می‌شود. لایه‌های پخش گاز که در دو طرف غشا قرار گرفته‌اند، در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. مقطع کانال‌های جریان مربعی بوده و اندازه هر ضلع آن ۲ میلی‌متر می‌باشد. طول کانال‌های مرطوب‌ساز برابر ۸۲ میلی‌متر است. فاصله بین کانال‌ها هم برابر ۲ میلی‌متر است. در این تحقیق فرض شده جریان در مرطوب‌ساز تک فاز می‌باشد. از آنجایی که معمولاً گاز در سمت مرطوب مرطوب‌ساز با دمای کاری پیل سوختی (۸۰ درجه سلسیوس) وارد می‌شود، عمده رطوبت آن در فاز گازی است و آب مایع قابل صرف‌نظر است. همچنین به دلیل این که انتقال رطوبت از میان غشا فقط با بخار آب امکان‌پذیر است، تشکیل مقدار کم آب مایع تأثیر چندانی بر میزان انتقال رطوبت نخواهد داشت. دیگر فرضیات شامل موارد زیر است.

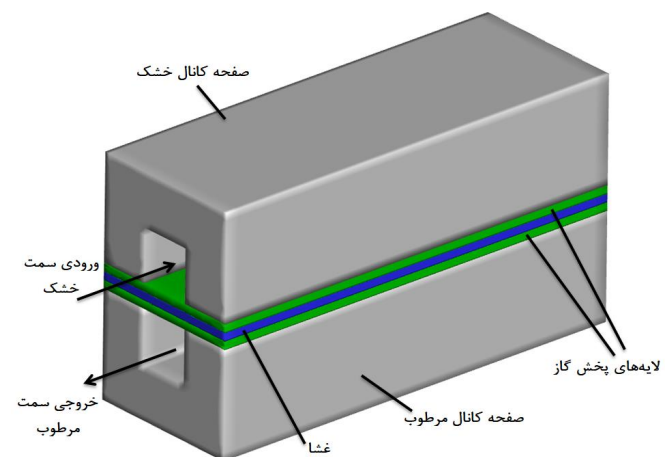


Fig. 2. Simulated three-dimensional humidifier model

شکل ۲: مدل مرطوب‌ساز سه بعدی شبیه‌سازی شده



## معادله بقاء گونه‌ها

$$k^{eff} = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon}{3k_s} + \frac{\varepsilon}{2k_s} + k_w} - 2k_s \quad (10)$$

که در آن  $k_s$  و  $k_w$  به ترتیب ضریب هدایت حرارتی پخش جامد (لایه‌های پخش‌گاز یا غشا) و ضریب هدایت حرارتی بخار آب هستند.

## ۴- روش حل عددی

معادلات حاکم بر مرطوب‌ساز همراه با شرایط مرزی مشخص شده با روش حجم محدود گسسته شده و با استفاده از نرم افزار فلونت، حل شده‌اند. در این مدل، میدان‌های سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل به دست آمده‌اند. برای حل مجموعه معادلات از یک روند تکراری استفاده شده و حل معادله پیوستگی و انرژی به ترتیب تا رسیدن به همگرایی با دقت  $10^{-6}$  و  $10^{-4}$  ادامه پیدا کرده است. مهم‌ترین علت انتخاب روند تکرار برای حل معادلات، کوپل بودن آن‌ها می‌باشد. معادلات بقا در مرطوب‌ساز به شدت با یکدیگر کوپل می‌باشند. علت این امر وابسته بودن خواص فیزیکی و شیمیایی به پارامترهای انتقال (مانند دما و غلظت) می‌باشد. به عنوان مثال ضریب نفوذ تابع دما و فشار، ظرفیت آب غشا تابع غلظت و ویسکوزیته تابع دما می‌باشد. برای حل معادلات حاکم بر غشا (رابطه ۶) و خواص غشا شامل رابطه‌های (۷) و (۸) و تعیین مقدار آب انتقالی از طریق غشا از یک تابع تعریف شده توسط کاربر در نرم افزار فلونت استفاده شده است. به منظور شبکه‌بندی مدل، از یک شبکه مستطیلی با تعداد ۳۰

گره در راستای  $z$ ، تعداد ۳۵ گره در راستای  $x$  و ۷ گره در هر کدام از نواحی کانال و لایه غشا در راستای  $y$  استفاده شده است. تعداد گره‌ها طوری تنظیم شده که نتایج مدل عددی مستقل از تعداد شبکه شود. عدم وابستگی به مش در هر سه راستا به طور جداگانه بررسی شده است. در راستاهای  $x$  و  $z$  حداقل تعداد شبکه که جواب مسئله را مستقل از تعداد شبکه می‌سازند، انتخاب شدند. به دلیل حساسیت بیشتر مسئله در راستای عرضی غشا، با تغییر تعداد شبکه عرض غشا (راستای  $y$ ) جواب‌ها بررسی شدند. مدل کلی استفاده شده دارای ۶۱۳۹۶ شبکه می‌باشد. در شکل ۳ فلوجارت حل آورده شده است.

## ۵- صحت‌گذاری نتایج

به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی عددی، منحنی تغییرات رطوبت نسبی خروجی سمت خشک بر حسب نرخ جریان جرمی

$$\nabla \cdot (\bar{u} C^i) = \nabla \cdot (D^{i,eff} \nabla C^i) \quad (4)$$

در این معادله  $C^i$  غلظت جزء  $i$  و  $D^{i,eff}$  ضریب پخش مؤثر جزء  $i$  در مخلوط گاز می‌باشد. ضریب پخش مؤثر در لایه‌های پخش‌گاز و کانال‌ها از رابطه (۵) به دست می‌آید [۲۳]. طبیعی است که در کانال‌ها ضریب تخلخل ۱ می‌باشد.

$$D^{i,eff} = \varepsilon^{1.5} D_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.5} \left(\frac{P_0}{P}\right) \quad (5)$$

در معادله بالا،  $D_0$  ضریب پخش در دمای  $T_0$  و  $P_0$  است. دبی آب عبوری از غشا از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\dot{m}_m = \frac{\rho_{m,dry}}{W_{m,dry}} A_m M_{H_2O} D_m^{H_2O} \nabla \lambda \quad (6)$$

که در آن  $\dot{m}_m$  دبی آب عبوری از غشا،  $\rho_{m,dry}$  دانسیته خشک غشا،  $W_{m,dry}$  وزن معادل خشک غشا،  $A_m$  مساحت غشا و  $M_{H_2O}$  جرم مولی آب می‌باشد. ضریب پخش آب در غشا توسط رابطه زیر بیان می‌شود [۲۴].

$$D_m^{H_2O} = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-7} \lambda (e^{0.28\lambda} - 1) e^{(-2346/T)} & \text{for } 0 < \lambda \leq 3 \\ 4.17 \times 10^{-8} \lambda (1 + 161e^{-\lambda}) e^{(-2346/T)} & \text{for } \lambda > 3 \end{cases} \quad (7)$$

که در آن  $\lambda$  ظرفیت آب غشا می‌باشد [۲۵].

$$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36.0a^3 & \text{for } 0 < a \leq 1 \\ 14 + 1.4(a-1) & \text{for } 1 < a \leq 3 \end{cases} \quad (8)$$

در رابطه بالا،  $a$  فعالیت بخار آب است.

## معادله انرژی

$$\nabla \cdot (\rho c_p \bar{u} T) = \nabla \cdot (k^{eff} \nabla T) \quad (9)$$

در معادله بالا،  $c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه و  $k^{eff}$  ضریب هدایت حرارتی مؤثر است که در کانال‌ها همان مقدار ضریب هدایت حرارتی هوا است و در لایه‌های متخلخل و غشا از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۶ و ۲۷].

بودن مدل عددی است. باید توجه داشت که هر چند میزان آب مایع با توجه به شرایط مرطوب‌ساز اندک است، اما این آب مایع اندک بر عملکرد مرطوب‌ساز تأثیر گذاشته و باعث اختلاف نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی گردیده است. در کار آزمایشگاهی انجام شده یک مرطوب‌ساز با کانال‌های موازی با دو توده (استک) ساخته شده است. در هر توده ۲۴ عدد

ورودی در حالی که مرطوب‌ساز لایه پخش گاز ندارد، با نتایج آزمایشگاهی یک مرطوب‌ساز مشابه مقایسه شده است. بدین منظور از شرایط یکسان ورودی و عملکردی استفاده شده است. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود توافق خوبی بین نتایج حاضر و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. حداکثر خطا برابر ۶ درصد می‌باشد. عمده ترین دلیل اختلاف نتایج با داده‌های آزمایشگاهی فرض تک فاز

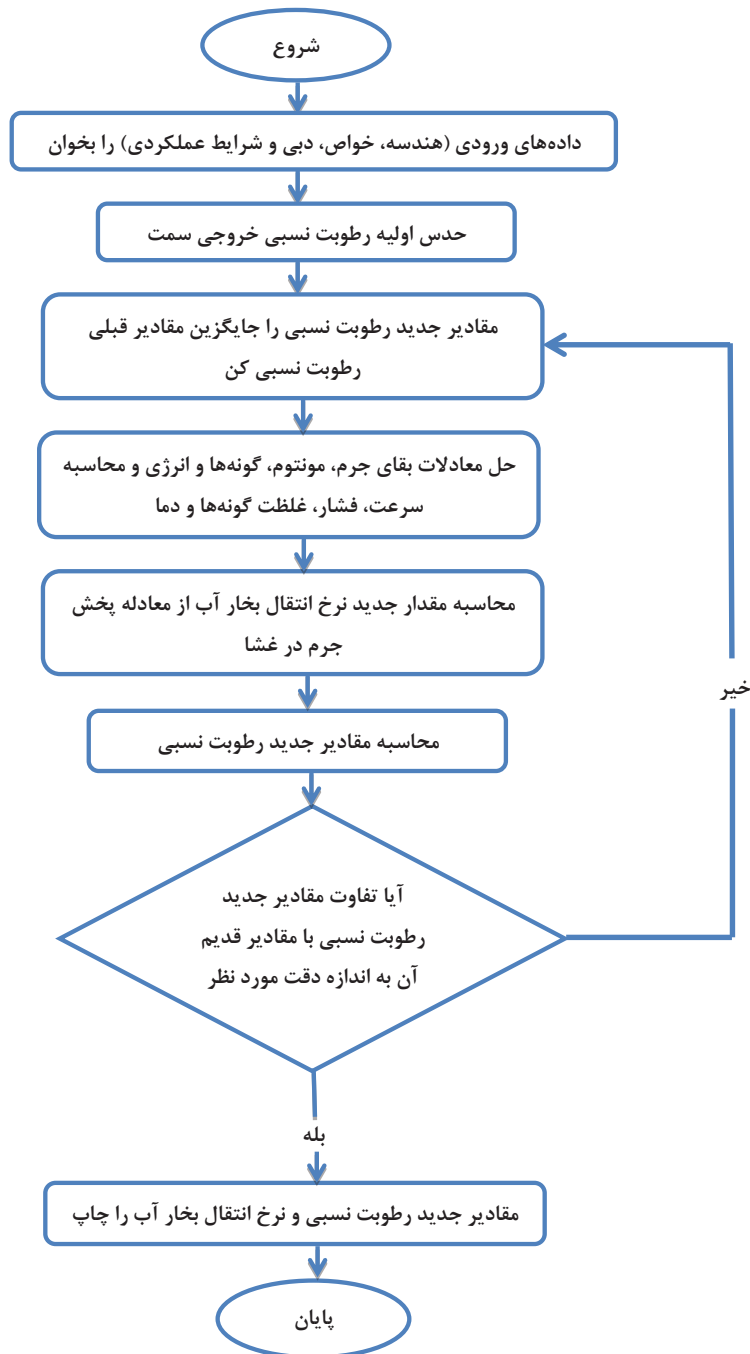
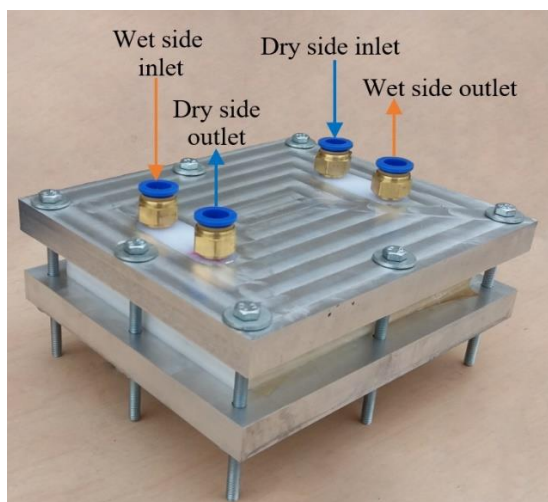


Fig. 3. Numerical solution flowchart

شکل ۳: فلوچارت حل عددی

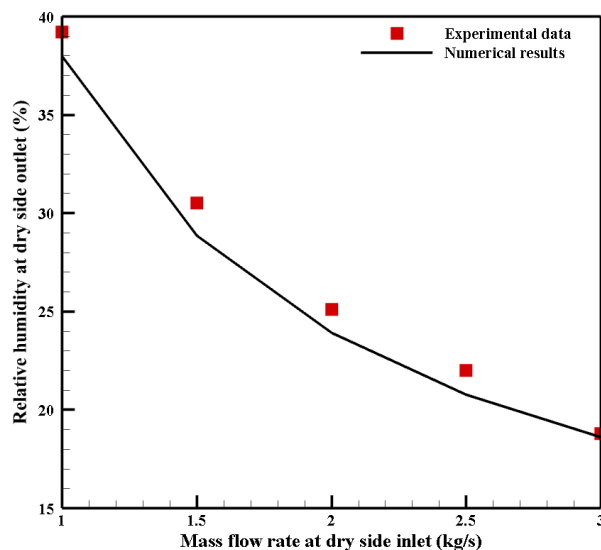


**Fig. 5. Experimental humidifier manufactured and tested**  
شکل ۵: مرطوب‌ساز آزمایشگاهی ساخته و تست شده

دیگر جهت پیش‌گرمایش وارد هیتر الکتریکی می‌شود که این بخش نیز همانند سمت خشک دارای یک مدار فرعی جهت تنظیم دما است. هوای مرطوب ورودی به مرطوب‌ساز غشایی وارد کانال‌های سمت مرطوب شده و رطوبت از طریق غشای نافیون وارد هوای خشک ورودی به کانال‌های سمت خشک شده و باعث افزایش رطوبت آن می‌گردد. این تجهیزات قابلیت ایجاد هوا با هر درجه حرارت و میزان رطوبت درخواستی جهت ورود به پیل سوختی را دارا می‌باشند.

#### ۶- نتایج و بحث

برای محافظت بهتر از غشا، توزیع بهتر گازهای خشک و مرطوب در دو سمت غشا و همچنین عملکرد بهتر مرطوب‌ساز از یک لایه پخش‌گاز در سمت خشک و از یک لایه پخش‌گاز در سمت مرطوب استفاده شده است. بررسی انجام شده به این صورت می‌باشد که در یک حالت فقط لایه متخلخل در سمت کانال خشک قرار داده شده است. در مورد بعدی لایه پخش‌گاز تنها در سمت مرطوب قرار داده شده است. مورد سوم به این صورت می‌باشد که لایه پخش‌گاز در هر دو سمت خشک و مرطوب قرار گرفته است. این سه مورد با حالتی که اصلاً لایه پخش‌گاز به‌کار برده نشده است مقایسه شده است. نقطه شبنم به دمایی گفته می‌شود که در آن دما، هوا با استفاده از بخار آب اشباع می‌شود. در واقع با سرد کردن هوا در فشار ثابت، به دمایی می‌رسیم که در آن، هوا توسط بخار آب اشباع می‌شود. این دما، دمای نقطه شبنم نامیده می‌شود. مرطوب‌ساز باید از انتقال گرما و انتقال آب بالایی برخوردار باشد. نقطه شبنم یک



**Fig. 4. Comparison of the relative humidity curve of dry side outlet in terms of inlet mass flow rate with experimental work**

شکل ۴: مقایسه منحنی تغییرات رطوبت نسبی خروجی سمت خشک بر حسب نرخ جریان جرمی ورودی با کار آزمایشگاهی

کانال قرار دارد. شکل ۵ نمای کلی از این مرطوب‌ساز را نشان می‌دهد. در کار آزمایشگاهی، هوای خروجی از یک کمپرسور به وسیله یک تله آبگیر رطوبت‌زدایی شده و به دلیل وجود قطرات روغن در هوای خروجی از کمپرسور از دو میکرو فیلترکربن اکتیو استفاده شده است که در خروجی کمپرسور نصب گردیده‌اند. فشار کاری سیستم، فشار اتمسفر است؛ به همین دلیل از یک شیر تنظیم فشار جهت کاهش فشار ۸ بار هوای خروجی از کمپرسور به فشار ۱ بار استفاده گردیده است. هوای خروجی از شیر تنظیم فشار به دو بخش تقسیم شده و وارد دو خط خشک و مرطوب می‌شوند. ابتدای هر دو خط یک روتامتر جهت اندازه‌گیری میزان دبی هوای ورودی استفاده شده است. در سمت خشک پس از فشار سنج، یک هیتر الکتریکی جهت پیش‌گرم کردن هوای ورودی به مرطوب‌ساز غشایی استفاده شده و یک خط فرعی نیز در زیر هیتر جهت تنظیم میزان دمای هوای ورودی تعبیه شده است. هوای گرم شده وارد سنسور دما-رطوبت شده که میزان دما و رطوبت ورودی به مرطوب‌ساز غشایی اندازه‌گیری می‌شود. در ادامه هوای خشک وارد مرطوب‌ساز غشایی شده و هوای خروجی از مرطوب‌ساز غشایی وارد یک سنسور دما رطوبت می‌شود تا دما و رطوبت آن اندازه‌گیری شود. در سمت مرطوب، هوای خروجی از فشار سنج به دو بخش تقسیم می‌شود که یک بخش جهت رطوبت زنی، وارد مرطوب‌ساز حبایی شده و بخش

شده و گرمای کمتری از سمت مرطوب به سمت خشک مرطوب‌ساز منتقل می‌شود. این امر سبب می‌شود که دمای پایین‌تر سمت خشک با ضریب تخلخل‌های بالا حاصل شود. اما با افزایش ضریب تخلخل لایه پخش گاز، مطابق رابطه (۵) ضریب پخش گاز (هوا و بخار آب) داخل این لایه به شدت افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود که با افزایش ضریب تخلخل لایه پخش گاز، بخار آب بیشتری از طریق این لایه(ها) به سمت غشا منتقل شده و روی سطح غشا پخش گردد. نتیجه این امر پخش بیشتر بخار آب روی غشا و در نتیجه انتقال بیشتر آب از سمت مرطوب غشا به سمت خشک آن است. اثر افزایش انتقال رطوبت از سمت مرطوب به سمت خشک نسبت به کاهش دمای سمت خشک بیشتر بوده و نتیجه این امر افزایش نقطه شبنم در سمت خشک می‌باشد. در هنگام استفاده از یک لایه پخش گاز چه در سمت مرطوب و چه در سمت خشک نسبت به حالتی که در هر دو سمت لایه پخش گاز باشد عملکرد کاهش می‌یابد. دلیل آن ذخیره شدن کمتر رطوبت در یک لایه پخش گاز می‌باشد. در مورد مقایسه قرار دادن لایه پخش گاز در سمت مرطوب و در سمت خشک، عملکرد در حالتی که لایه پخش گاز در سمت خشک قرار داشته باشد، بالاتر می‌باشد. دلیل آن ارتباط مستقیم لایه پخش گاز موجود در سمت خشک با کانال سمت خشک می‌باشد که با ذخیره رطوبت در خود، این رطوبت را مستقیم و بدون واسطه به کانال خشک می‌دهد؛ در حالی که وقتی لایه پخش گاز در سمت مرطوب باشد به دلیل فاصله‌ی بیشتری که نسبت به لایه پخش گاز در سمت خشک با کانال خشک دارد، عملکرد پایین‌تری را از خود نشان می‌دهد. در مجموع قرار دادن لایه متخلخل نسبت به حالتی که لایه پخش‌گازی وجود نداشته باشد، عملکرد را بهبود می‌بخشد. این روند در تمام ضرایب تخلخل و نفوذپذیری لایه متخلخل به همین گونه می‌باشد. در همه‌ی حالت‌های گذاشتن لایه پخش گاز، با افزایش ضریب تخلخل لایه پخش گاز، نقطه شبنم خروجی سمت خشک و میزان دبی آب موجود در خروجی سمت خشک افزایش پیدا می‌کند. در واقع با افزایش تخلخل لایه پخش گاز، حجم فضای ذخیره آب بیشتر شده و به مرور زمان رطوبت بیشتری را منتقل می‌کند، که این امر باعث افزایش دبی آب موجود در خروجی سمت خشک و نقطه شبنم خروجی سمت خشک می‌شود. مطابق شکل ۶ با افزایش ضریب تخلخل لایه پخش گاز، افزایش شیب نمودار نقطه شبنم به ترتیب مربوط به حالت

معیار مناسب برای ارزیابی عملکرد مرطوب‌ساز است که تأثیرات انتقال حرارت و انتقال جرم را نیز شامل می‌شود. هرچه نقطه شبنم خروجی سمت خشک به ورودی سمت مرطوب نزدیک‌تر باشد، عملکرد مرطوب‌ساز بهتر است. پس هرچه نقطه شبنم خروجی سمت خشک افزایش پیدا کند عملکرد مرطوب‌ساز بهبود پیدا می‌کند. نقطه شبنم مطابق رابطه زیر به دست می‌آید [۲۸].

$$T_{dp} = \frac{238.3 \times \ln\left(\frac{P_v}{0.61078}\right)}{17.2694 - \ln\left(\frac{P_v}{0.61078}\right)} \quad (11)$$

که در این رابطه  $T_{dp}$  دمای نقطه شبنم و  $p_v$  فشار بخار می‌باشد. فشار بخار از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$P_v = P_{sat} \phi \quad (12)$$

در این رابطه  $\phi$  رطوبت نسبی و  $P_{sat}$  فشار اشباع در دمای اشباع می‌باشد. فشار اشباع از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۹].

$$p_{sat} = 0.61078 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (13)$$

که  $T$  دما برحسب درجه سلسیوس می‌باشد همان‌طور که در شکل‌های ۶ تا ۹ مشخص است؛ نقطه شبنم و دبی آب موجود در خروجی سمت خشک با گذاشتن لایه پخش گاز افزایش می‌یابد. گذاشتن دو لایه پخش گاز، در هر دو سمت خشک و مرطوب بیشترین اثر مثبت را دارد. دلیل این امر این است که رطوبت کانال مرطوب در لایه پخش گاز زمان ماند طولانی‌تری در غشا دارد و به مرور زمان این رطوبت را به غشا منتقل می‌کند. این رطوبت پس از عبور از غشا وارد لایه پخش گاز می‌شود و با ذخیره این رطوبت در محیط متخلخل باعث ماند رطوبت در خود می‌شود و به مرور زمان این رطوبت را به کانال خشک منتقل می‌کند. در مجموع باعث افزایش نقطه شبنم و میزان دبی آب موجود در خروجی سمت خشک می‌شود. در واقع افزایش ضریب تخلخل لایه پخش گاز دو تأثیر متضاد بر نقطه شبنم سمت خشک دارد. تأثیر اول آن این است که با افزایش ضریب تخلخل، به دلیل این که حجم فضای خالی این محیط زیاد می‌شود؛ انتقال حرارت ناشی از هدایت حرارتی کم

را برای دبی آب خروجی سمت خشک هم داریم. یعنی مطابق شکل ۷ با افزایش ضریب تخلخل لایه پخش گاز، افزایش شیب نمودار دبی آب خروجی سمت خشک به ترتیب مربوط به حالت استفاده از دو لایه پخش گاز، استفاده از لایه پخش گاز در سمت خشک و در سمت مرطوب می‌باشد. مطابق شکل ۷ در حالتی که از لایه پخش گاز در سمت مرطوب استفاده کنیم، با افزایش ضریب تخلخل لایه پخش گاز، دبی آب موجود در خروجی سمت خشک تقریباً ثابت می‌ماند. مطابق شکل ۶، با افزایش ضریب تخلخل، در حالت قرار دادن لایه پخش گاز در دو سمت مرطوب و خشک، نقطه شبنم خروجی سمت خشک بین  $2/2$  تا  $2/9$  کلوین افزایش پیدا می‌کند. با افزایش ضریب تخلخل، در حالت قرار دادن لایه پخش گاز در سمت خشک، نقطه شبنم خروجی سمت خشک بین  $1/9$  تا  $2/5$  کلوین افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش ضریب تخلخل، در حالت قرار دادن لایه پخش گاز در سمت مرطوب، نقطه شبنم خروجی سمت خشک بین  $0/3$  تا  $0/4$  کلوین افزایش پیدا می‌کند. در همه‌ی حالت‌های گذاشتن لایه پخش گاز، با افزایش میزان نفوذپذیری لایه پخش گاز، نقطه شبنم خروجی سمت خشک و میزان دبی آب موجود در خروجی سمت خشک افزایش پیدا می‌کند. در واقع با افزایش نفوذپذیری لایه پخش گاز، میزان آب بیشتری از لایه پخش گاز منتقل می‌شود که این امر باعث افزایش دبی آب موجود در خروجی سمت خشک و نقطه شبنم خروجی سمت خشک می‌شود. مطابق شکل ۸ با افزایش میزان نفوذ پذیری لایه پخش گاز در حالتی که از لایه پخش گاز در سمت خشک استفاده کنیم، افزایش شیب نمودار نقطه شبنم کم می‌باشد. در واقع در حالتی که از لایه پخش گاز در سمت خشک استفاده کنیم، با افزایش نفوذپذیری لایه پخش گاز، نقطه شبنم خروجی سمت خشک تقریباً ثابت می‌ماند. مطابق شکل ۹ با افزایش میزان نفوذپذیری لایه پخش گاز از  $200 \times 10^{-10}$  مترمربع به بعد، در حالتی که از لایه پخش گاز در سمت مرطوب استفاده کنیم، افزایش شیب نمودار دبی آب خروجی سمت خشک کم است. در واقع در حالتی که از لایه پخش گاز در سمت مرطوب استفاده کنیم، با افزایش نفوذپذیری لایه پخش گاز، دبی آب خروجی سمت خشک تقریباً ثابت می‌ماند. مطابق شکل ۸، با افزایش نفوذپذیری، در حالت قرار دادن لایه پخش گاز در دو سمت مرطوب و خشک، نقطه شبنم

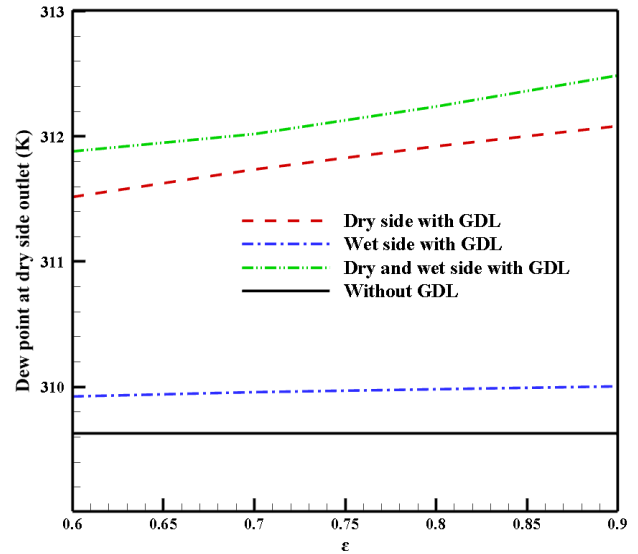


Fig. 6. Influence of porosity coefficient of porous layer on dew point at dry side outlet

شکل ۶: تأثیر ضریب تخلخل لایه متخلخل بر نقطه شبنم در خروجی سمت خشک

استفاده از دو لایه پخش گاز، استفاده از لایه پخش گاز در سمت خشک و در سمت مرطوب می‌باشد. مطابق شکل ۶ در حالتی که از لایه پخش گاز در سمت مرطوب استفاده کنیم، افزایش شیب نمودار نقطه شبنم کم می‌باشد. در واقع در حالتی که از لایه پخش گاز در سمت مرطوب استفاده کنیم، با افزایش ضریب تخلخل لایه پخش گاز، نقطه شبنم خروجی سمت خشک تقریباً ثابت می‌ماند. همین روال

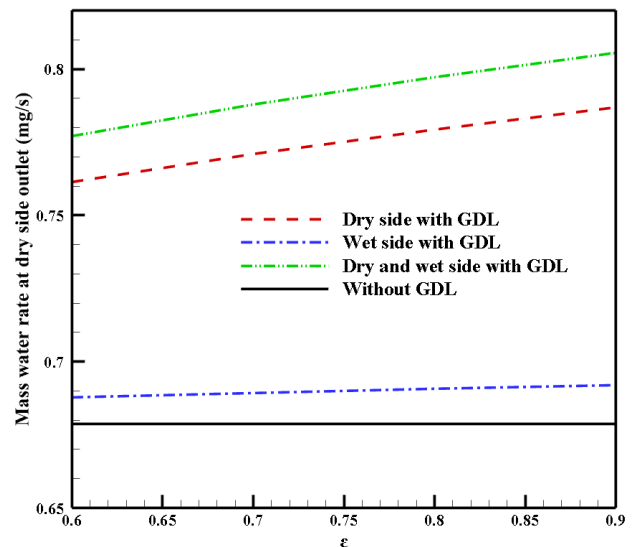


Fig. 7. Influence of porosity coefficient of porous layer on water mass flow rate at dry side outlet

شکل ۷: تأثیر ضریب تخلخل لایه متخلخل بر دبی جرمی آب در خروجی سمت خشک

مطابق شکل ۱۰ تغییرات چگالی مخلوط گازها در سمت مرطوب در راستای طول کانال و همچنین با اضافه شدن لایه‌های پخش گاز به مرطوب‌ساز تغییر چندانی نداشته است (از ۰/۸۲۵ تا ۰/۸۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب) اما در سمت خشک تغییرات چگالی مخلوط گاز هم در راستای طول کانال و هم با اضافه شدن لایه پخش گاز به مرطوب‌ساز، تغییر بیشتری می‌یابد. دلیل این موضوع این است که چگالی مخلوط قبل از ورود بخار آب برابر با چگالی هوای خشک است. با اضافه شدن بخار آب به سمت خشک، چون چگالی بخار آب کمتر از چگالی هوا است (۱/۱۶ کیلوگرم بر مترمکعب برای هوا در مقایسه با ۰/۶ کیلوگرم بر مترمکعب برای بخار آب)، چگالی مخلوط کاهش می‌یابد. ذکر این نکته نیز لازم است که در طول کانال خشک در راستای کاهش چگالی در سمت خشک است. در سمت مرطوب، دما در طول کانال مرطوب کاهش می‌یابد و این امر باعث افزایش چگالی می‌شود. با اضافه کردن لایه پخش گاز، عملکرد مرطوب‌ساز طبق شکل‌های ۶ تا ۹ بهبود پیدا می‌کند بدین معنی که آب بیشتری از طریق غشا به سمت کانال خشک انتقال می‌یابد. این بدین معنی است که در مرطوب‌ساز با لایه پخش گاز، دبی سمت مرطوب در طول کانال کاهش بیشتری نسبت به مرطوب‌ساز ساده می‌یابد. دبی کمتر باعث کاهش افت فشار می‌گردد. باید توجه داشت که اضافه کردن لایه پخش گاز به

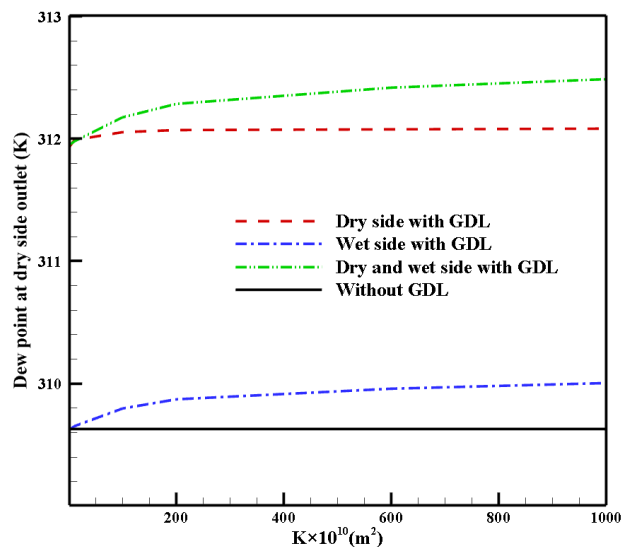


Fig. 8. Influence of porous layer permeability on dew point at dry side outlet

شکل ۸: تأثیر نفوذپذیری لایه متخلخل بر نقطه شبنم در خروجی سمت خشک

خروجی سمت خشک بین ۲/۳ تا ۲/۹ کلوین افزایش پیدا می‌کند. با افزایش میزان نفوذپذیری، در حالت قرار دادن لایه پخش گاز در سمت خشک، نقطه شبنم خروجی سمت خشک بین ۲/۳ تا ۲/۵ کلوین افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش نفوذپذیری، در حالت قرار دادن لایه پخش گاز در سمت مرطوب، نقطه شبنم خروجی سمت خشک تا ۰/۴ کلوین افزایش پیدا می‌کند.

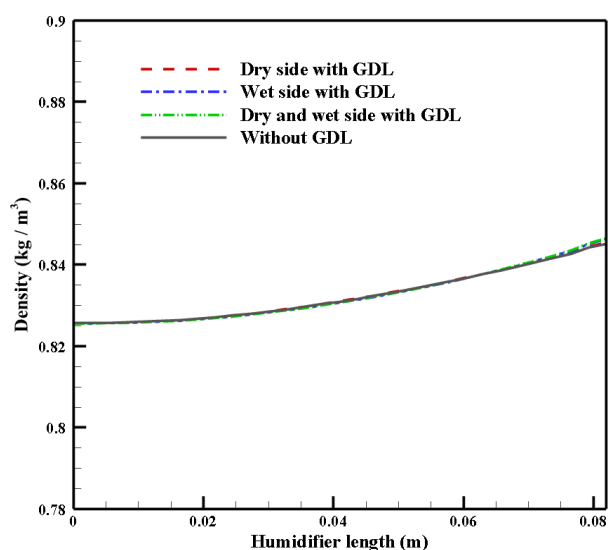


Fig. 10. Density variation along the humidifier length at wet side channel

شکل ۱۰: نحوه تغییرات چگالی در طول کانال مرطوب مرطوب‌ساز

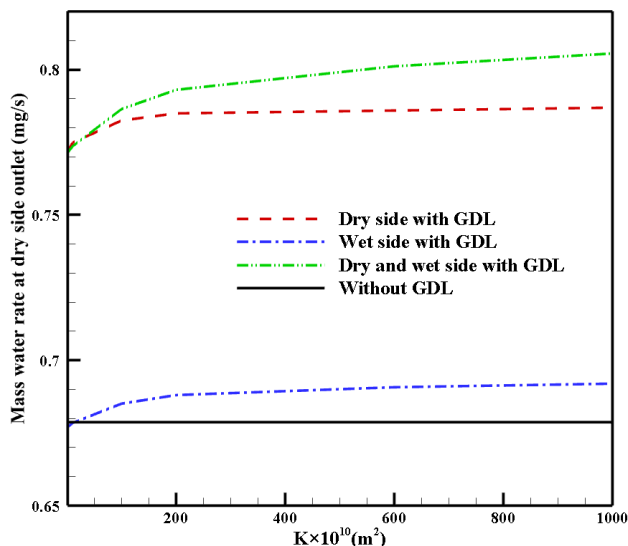


Fig. 9. Influence of porous layer permeability on water mass flow rate at dry side outlet

شکل ۹: تأثیر نفوذپذیری لایه متخلخل بر دبی جرمی آب در خروجی سمت خشک

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه پیشنهاد شده به منظور افزایش زمان ماند گازها در دو طرف غشای مرطوب‌سازغشایی، لایه‌های پخش گاز قرار داده شده و با مدل‌سازی سه بعدی و عددی یک مرطوب‌ساز به بررسی اثر قرار دادن لایه‌های متخلخل پرداخته شده است. بدین منظور، ابتدا یک مرطوب‌ساز غشایی بدون هیچ لایه متخلخل مدل‌سازی شده و سپس یک بار لایه متخلخل در سمت کانال‌های مرطوب، بار دیگر در سمت کانال‌های خشک قرار گرفته است و در نهایت هم لایه‌های متخلخل در دو سمت غشا، قرار گرفته‌اند و عملکرد این مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حاصل بدین شرح می‌باشند.

- (۱) در همه‌ی حالت‌های گذاشتن لایه پخش گاز، با افزایش ضریب تخلخل لایه پخش گاز، نقطه شبلم خروجی سمت خشک و میزان دبی آب موجود در خروجی سمت خشک افزایش پیدا می‌کند.
- (۲) در همه‌ی حالت‌های گذاشتن لایه پخش گاز، با افزایش میزان نفوذپذیری لایه پخش گاز، نقطه شبلم خروجی سمت خشک و میزان دبی آب موجود در خروجی سمت خشک افزایش پیدا می‌کند.
- (۳) در حالتی که از لایه پخش گاز فقط در سمت مرطوب استفاده شود؛ با افزایش ضریب تخلخل لایه پخش گاز، نقطه شبلم خروجی سمت خشک تقریباً ثابت می‌ماند.
- (۴) با افزایش ضریب تخلخل لایه پخش گاز، افزایش شیب نمودار دبی آب خروجی سمت خشک به ترتیب مربوط به حالت استفاده از دو لایه پخش گاز، استفاده از لایه پخش گاز در سمت خشک و در سمت مرطوب می‌باشد.
- (۵) با افزایش ضریب تخلخل، در حالت قرار دادن لایه پخش گاز در دو سمت مرطوب و خشک، نقطه شبلم خروجی سمت خشک بین ۲/۲ تا ۲/۹ کلوین افزایش پیدا می‌کند.
- (۶) از میزان نفوذپذیری  $10^{-10} \times 100$  مترمربع به بعد در حالتی که از لایه پخش گاز در سمت خشک استفاده کنیم، با افزایش نفوذپذیری لایه پخش گاز، نقطه شبلم خروجی سمت خشک تقریباً ثابت می‌ماند.
- (۷) از میزان نفوذپذیری  $10^{-10} \times 200$  مترمربع به بعد در حالتی که از لایه پخش گاز در سمت مرطوب استفاده کنیم، با افزایش نفوذپذیری لایه پخش گاز، دبی آب خروجی سمت خشک تقریباً ثابت می‌ماند.
- (۸) ترتیب اثرگذاری مطلوب بر عملکرد مرطوب‌ساز مربوط به قرار دادن دو لایه پخش گاز در دو سمت خشک و مرطوب، قرار دادن لایه پخش

سمت مرطوب هرچند که خود باعث افت فشار می‌گردد ولی کم شدن دبی در مرطوب‌ساز با لایه پخش گاز بر این افت فشار غلبه کرده و افت فشار نهایی مرطوب‌ساز با لایه متخلخل کمتر از مرطوب‌ساز ساده است (۴۶/۲ پاسکال در مقایسه با ۵۲ پاسکال). باید توجه داشت که مطابق شکل ۱۰، چگالی مخلوط گاز در سمت مرطوب در طول کانال تغییرات بسیار کمی دارد و با اضافه کردن لایه پخش گاز به مرطوب‌ساز نیز تغییر نمی‌کند. در سمت خشک نیز مرطوب‌ساز با لایه پخش گاز افت فشار کمتری دارد. دلیل این موضوع این است که سه عامل مختلف بر افت فشار سمت خشک موثر است. عامل اول اضافه کردن لایه پخش گاز به مرطوب‌ساز است که با اضافه کردن لایه پخش گاز عامل دوم دبی سمت خشک است که با اضافه کردن لایه پخش گاز دبی این سمت نیز نسبت به مرطوب‌ساز ساده افزایش یافته و باعث افت فشار بیشتر می‌شود اما عامل سومی که افت فشار را کم می‌کند چگالی مخلوط است که مطابق شکل ۱۱، با اضافه کردن لایه پخش گاز به مرطوب‌ساز و همچنین در راستای طول کانال چگالی کاهش داشته است که این عامل بر دو عامل اول غلبه کرده و باعث کاهش افت فشار می‌شود. ذکر این نکته نیز لازم است که افت فشارها در مرطوب‌ساز با لایه پخش گاز و بدون لایه پخش گاز، در هر دو سمت خشک و مرطوب تفاوت چشمگیری ندارند و این تفاوت معنی دار نیست.

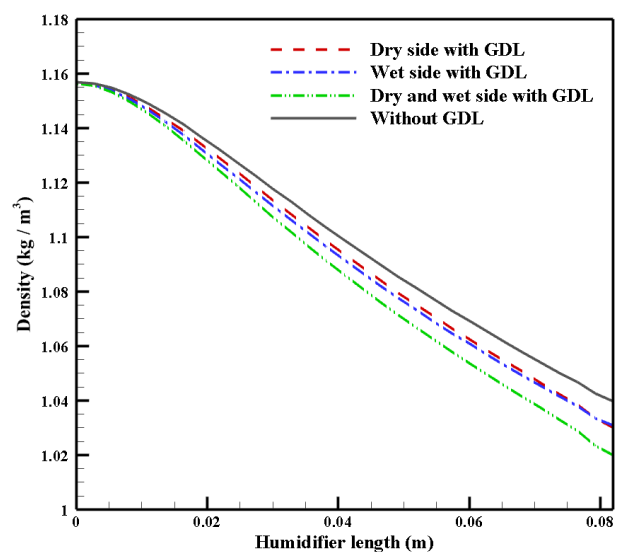


Fig. 11. Density variation along the humidifier length at dry side channel

شکل ۱۱: نحوه تغییرات چگالی در طول کانال خشک مرطوب‌ساز

### منابع

- [1] Y. Wang, K.S. Chen, J. Mishler, S.C. Cho, X.C. Adroher, A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research, *Applied energy*, 88(4) (2011) 981-1007.
- [2] T. Wilberforce, A. Alaswad, A. Palumbo, M. Dassisti, A.-G. Olabi, Advances in stationary and portable fuel cell applications, *International journal of hydrogen energy*, 41(37) (2016) 16509-16522.
- [3] R. Huizing, Design and Membrane Selection for Gas to Gas Humidifiers for Fuel Cell Applications, University of Waterloo, 2007.
- [4] M.V. Williams, H.R. Kunz, J.M. Fenton, Operation of Nafion®-based PEM fuel cells with no external humidification: influence of operating conditions and gas diffusion layers, *Journal of Power Sources*, 135(1-2) (2004) 122-134.
- [5] R. Glises, D. Hissel, F. Harel, M.-C. Pera, New design of a PEM fuel cell air automatic climate control unit, *Journal of Power Sources*, 150 (2005) 78-85.
- [6] D. Alan, Dynamic Modeling of Two-Phase Heat and Vapor Transfer Characteristics in a Gas-to-Gas Membrane Humidifier for Use in Automotive PEM Fuel Cells, 2009.
- [7] S.-K. Park, S.-Y. Choe, S.-h. Choi, Dynamic modeling and analysis of a shell-and-tube type gas-to-gas membrane humidifier for PEM fuel cell applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(9) (2008) 2273-2282.
- [8] S. Yun, D. Cha, K.S. Song, S.H. Hong, S.H. Lee, W. Yang, Y. Kim, Numerical analysis on the dynamic response of a plate-and-frame membrane humidifier for PEMFC vehicles under various operating conditions, *Open Physics*, 16(1) (2018) 641-650.
- [9] A.H. Ahmaditaba, E. Afshari, S. Asghari, An experimental study on the bubble humidification

گاز در سمت خشک و قرار دادن لایه پخش گاز در سمت مرطوب است. (۹) افت فشار در هر دو سمت خشک و مرطوب، با اضافه کردن لایه پخش گاز تغییر محسوسی ندارد.

### فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

$A_m$	مساحت غشا، $m^2$
$a$	فعالیت بخار آب
$C$	غلظت، $kmol/m^3$
$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه، $J/kg.K$
$D$	ضریب پخش، $m^2/s$
$e$	تابع نمایی
$K$	نفوذپذیری محیط متخلخل، $m^2$
$k$	ضریب هدایت حرارتی، $W/m.K$
$M_{H_2O}$	جرم مولی آب، $g/mol$
$\dot{m}_m$	دبی آب عبوری از غشا، $kg/s$
$P$	فشار، $Pa$
$S$	ترم چشمه
$T$	دما، $K$
$u$	سرعت، $m/s$
$W_{m,dry}$	وزن معادل خشک غشا

#### علائم یونانی

$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\varepsilon$	ضریب تخلخل
$\mu$	ضریب لزجت دینامیکی، $Pa.s$
$\lambda$	ضریب آب غشا
$\tau$	تنش برشی، $Pa$
$\rho_{m,dry}$	دانسیته خشک غشا، $kg/m^3$
$\varphi$	رطوبت نسبی
$\nabla$	عملگر

#### زیرنویس

$Dar$	قانون دارسی
$dp$	نقطه شبنم
$eff$	موثر
$s$	جامد
$sat$	اشباع
$v$	بخار
$w$	بخار آب

#### بالانویس

*	فرد عهده‌دار مکاتبات
$H_2O$	آب
$i$	جزء



- [17] R. Pandey, A. Lele, Modelling of water-to-gas hollow fiber membrane humidifier, *Chemical Engineering Science*, 192 (2018) 955-971.
- [18] C.-Y. Chen, W.-M. Yan, C.-N. Lai, J.-H. Su, Heat and mass transfer of a planar membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109 (2017) 601-608.
- [19] W.-M. Yan, C.-Y. Chen, Y.-k. Jhang, Y.-H. Chang, P. Amani, M. Amani, Performance evaluation of a multi-stage plate-type membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cell, *Energy conversion and management*, 176 (2018) 123-130.
- [20] H. Sun, H. Liu, L.-j. Guo, PEM fuel cell performance and its two-phase mass transport, *Journal of Power Sources*, 143(1-2) (2005) 125-135.
- [21] S.A. Atyabi, E. Afshari, Three-dimensional multiphase model of proton exchange membrane fuel cell with honeycomb flow field at the cathode side, *Journal of cleaner production*, 214 (2019) 738-748.
- [22] N.B. Houreh, E. Afshari, Three-dimensional CFD modeling of a planar membrane humidifier for PEM fuel cell systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(27) (2014) 14969-14979.
- [23] Y. Wang, C.-Y. Wang, Simulation of flow and transport phenomena in a polymer electrolyte fuel cell under low-humidity operation, *Journal of Power Sources*, 147(1-2) (2005) 148-161.
- [24] H. Meng, C.-Y. Wang, Electron transport in PEFCs, *Journal of the Electrochemical Society*, 151(3) (2004) A358-A367.
- [25] H. Meng, C.-Y. Wang, Model of two-phase flow and flooding dynamics in polymer electrolyte fuel cells, *Journal of the Electrochemical Society*, 152(9) (2005) A1733-A1741.
- [26] V. Gurau, H. Liu, S. Kakac, Two-dimensional model for proton exchange membrane fuel method of polymer electrolyte membrane fuel cells, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40(12) (2018) 1508-1519.
- [10] D. Chen, H. Peng, A thermodynamic model of membrane humidifiers for PEM fuel cell humidification control, *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 127(3) (2005) 424-432.
- [11] S. Yu, S. Im, S. Kim, J. Hwang, Y. Lee, S. Kang, K. Ahn, A parametric study of the performance of a planar membrane humidifier with a heat and mass exchanger model for design optimization, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(7-8) (2011) 1344-1351.
- [12] E. Afshari, N.B. Houreh, Performance analysis of a membrane humidifier containing porous metal foam as flow distributor in a PEM fuel cell system, *Energy conversion and management*, 88 (2014) 612-621.
- [13] S. Park, I.-H. Oh, An analytical model of Nafion™ membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 188(2) (2009) 498-501.
- [14] S. Kang, K. Min, S. Yu, Two dimensional dynamic modeling of a shell-and-tube water-to-gas membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cell, *international journal of hydrogen energy*, 35(4) (2010) 1727-1741.
- [15] T. Cahalan, S. Rehfeldt, M. Bauer, M. Becker, H. Klein, Experimental set-up for analysis of membranes used in external membrane humidification of PEM fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(31) (2016) 13666-13677.
- [16] G.-P. Li, R.-h. Qi, L.-Z. Zhang, Performance study of a solar-assisted hollow-fiber-membrane-based air humidification-dehumidification desalination system: Effects of membrane properties, *Chemical Engineering Science*, 206 (2019) 164-179.

- membrane humidifier for a proton exchange membrane fuel cell stack, *Journal of Power Sources*, 215 (2012) 69-76.
- [29] J. Monteith, M. Unsworth, *Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere*, Academic Press, 2013
- cells, *AIChE Journal*, 44(11) (1998) 2410-2422.
- [27] H. Ju, H. Meng, C.-Y. Wang, A single-phase, non-isothermal model for PEM fuel cells, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(7) (2005) 1303-1315.
- [28] J.J. Hwang, W.R. Chang, J.K. Kao, W. Wu, Experimental study on performance of a planar

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Ghaedamini, E. Afshari, *Investigation of the Humidifier Performance of Adding Gas Diffusion Layers Around Membrane for Fuel Cell Application*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(3) (2021) 1653-1666.

DOI: [10.22060/mej.2019.16907.6465](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16907.6465)

