



## مطالعه پارامتری عملکرد مرطوب‌ساز غشایی برای پیل سوختی غشا پلیمری

ناصر بهارلو هوره<sup>۱</sup>، ابراهیم افشاری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

\* e.afshari@eng.ui.ac.ir، ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱ صندوق پستی

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۵ اردیبهشت ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۴ تیر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۳

کلید واژگان:

مرطوب‌ساز غشایی

پیل سوختی غشا پلیمری

مدل تحلیلی

نقطه شبنم

مرطوب‌سازی بهینه گازهای واکنشگر پیل سوختی غشا پلیمری تأثیر بسزایی در عملکرد آن دارد. در این مطالعه، یک مدل تحلیلی از مرطوب‌ساز غشایی برای پیل سوختی غشا پلیمری ارائه و تأثیر دبی‌ها، فشارها و دماهای ورودی مرطوب‌ساز بر عملکرد آن بررسی شده است. به این منظور، با نوشتن معادلات حاکم شامل: معادلات انتقال آب در غشا و قانون بقا انرژی در مرطوب‌ساز، یک دستگاه معادلات غیر خطی تشکیل شده که به روش تکرار، با استفاده از برنامه نویسی فرترن حل شده است. در هر مرحله، دماهای خروجی، نرخ انتقال آب از غشا، رطوبت نسبی و نقطه شبنم خروجی گاز خشک محاسبه و تحلیل شده‌اند. هر چه اختلاف نقطه شبنم ورودی سمت مرطوب و خروجی سمت خشک کمتر باشد، عملکرد مرطوب‌ساز بهتر است. نتایج نشان می‌دهد افزایش دبی ورودی سمت خشک، سبب افت عملکرد اما افزایش دبی ورودی در سمت مرطوب سبب بهبود عملکرد مرطوب‌ساز می‌شود. با افزایش فشار ورودی کانال خشک، عملکرد مرطوب‌ساز بهتر می‌شود؛ در حالی که فشار ورودی سمت مرطوب اثر قابل توجهی بر عملکرد آن ندارد. بررسی تأثیر دما نشان می‌دهد پیش گرم کردن گاز خشک ورودی ضروری به نظر نمی‌رسد و استفاده از گاز مرطوب سردتر عملکرد مرطوب‌ساز را بهبود می‌بخشد.

## A parametric study of the performance of a membrane humidifier for PEM fuel cell

Nasser Baharloo Hooreh, Ebrahim Afshari\*

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

\* P.O. Box 81746-73441, Isfahan, Iran. e.afshari@eng.ui.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 05 April 2013  
Accepted 25 June 2013  
Available Online 20 April 2014

## Keywords:

Membrane Humidifier  
PEM Fuel Cell  
Analytic Model  
Dew Point

## ABSTRACT

An optimum humidification of the reactant gases of proton exchange membrane (PEM) fuel cell extremely affects its performance. Here, an analytic model of a membrane humidifier for PEM fuel cell is proposed where the effect of mass flow rates, inlet temperatures and pressures are investigated. The governing equations: water transfer equation and the law of conservation of energy in whole humidifier are written, which form a Non-linear system of equations, solved through FORTRAN software. At each stage, the outlet temperatures, the water transfer rate, relative humidity and the dew point at dry side outlet are calculated and discussed. The closer the dry side outlet dew point to the wet side inlet dew point, leads to the better humidifier performance. The results show that an increase in mass flow rate at dry side inlet leads to the weaker humidifier performance; while, an increase in mass flow rate at wet side inlet leads to the better performance. An increase in the pressure at dry side inlet enhances humidifier performance; while, the pressure at wet side inlet does not affect significantly on humidifier performance. Here, preheating the dry gas is not essential and use the cooler wet gases recommended.

## ۱- مقدمه

پخش گاز را می‌بندد و از این‌رو مانع رسیدن گاز اکسیژن به لایه کاتالیست کاند می‌شود. این پدیده که شناوری نامیده می‌شود باعث می‌شود که نرخ واکنش‌های شیمیایی در پیل پایین بیاید و ولتاژ پیل افت کند. شناوری عموماً در دانسیته جریان‌های بالا، به خصوص در نرخ‌های پایین جریان ورودی و دمای پایین اتفاق می‌افتد [۳، ۴]. از این‌رو، برای دستیابی به عملکرد بالای پیل سوختی، لازم است میزان آب در غشا بهینه شود [۵]. این کار می‌تواند به وسیله مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر، قبل از وارد شدن به پیل و تنظیم میزان مرطوب‌سازی، به خصوص در سمت آند، انجام شود؛ هر چند که

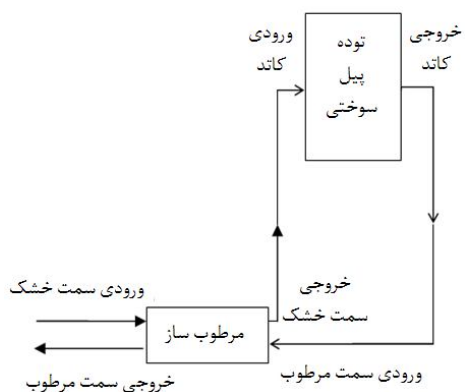
مدیریت آب نقش بسیار مهمی در تعادل عملکرد پیل سوختی دارد. برای اطمینان از هدایت بالای یونی در الکترولیت پیل سوختی غشا پلیمری، نیاز است که ظرفیت آب غشا، به خصوص در دانسیته جریان‌های بالا، به اندازه کافی بالا باشد. عملکرد پیل سوختی با شرایط خشک، طول عمر غشا را کم کرده و چسبندگی غشا به الکترود را در پی دارد [۱، ۲]. از طرفی آب منتقل شده به کاند می‌تواند باعث انباشتگی آب در لایه پخش گاز کاند شود. اگر آب بیش از حد در کاند جمع شود، چگالیده شده و بعضی از تخلخل‌های لایه

Please cite this article using:

N. Baharloo Hooreh, E. Afshari, A parametric study of the performance of a membrane humidifier for PEM fuel cell, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 107-116, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

N. Baharloo Hooreh, E. Afshari, A parametric study of the performance of a membrane humidifier for PEM fuel cell, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 107-116, 2014 (In Persian)



شکل ۲ سیستم مرطوب‌سازی چرخه‌ای

از نظر جهت جریان، همچون مبدل‌ها، مرطوب‌سازها به سه نوع جریان همسو، جریان مخالف و جریان متقاطع تقسیم می‌شوند. تحقیقات نشان می‌دهد مرطوب‌ساز غشایی با جریان مخالف بهترین عملکرد را دارد [۱۶-۱۸]. برای مرطوب‌سازی می‌توان از یک آرایش حلقه‌ای و یا سیستم چرخه‌ای استفاده کرد، به گونه‌ای که گاز مرطوب ورودی به مرطوب‌ساز همان گاز خروجی از کاتد است که به علت تولید آب در سمت کاتد، مرطوب شده است و گاز ورودی به کاتد یا آند پیل، همان گاز مرطوب شده خروجی از مرطوب‌ساز است [۱۹]. شکل ۲ شماتیکی از سیستم چرخه‌ای برای مرطوب‌سازی را نشان می‌دهد.

مطالعات انجام شده در زمینه مرطوب‌سازهای غشایی به دو دسته کلی آزمایشگاهی و عددی تقسیم می‌شود. از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی مرطوب‌ساز می‌توان به کار کیو و مریدا [۲۰] اشاره کرد. آنها شار جریان آب در یک مرطوب‌ساز غشایی گاز به گاز را به طریق آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند نقطه شبنم خروجی با کاهش نرخ جریان سمت خشک، افزایش می‌یابد. هویزینگ و همکارانش [۲۱] در یک مطالعه آزمایشگاهی پارامتر بی بعدی را معرفی کردند که ارتباط بین زمان اقامت و زمان نفوذ مولکول‌های آب در کانال‌های مرطوب‌ساز را بر قرار می‌کند. تحقیقات آزمایشگاهی متعدد دیگری انجام شده است که هدف عمده آن تحقیقات بررسی تأثیر پارامترهای گوناگون ابعادی و عملکردی مرطوب‌ساز بوده است.

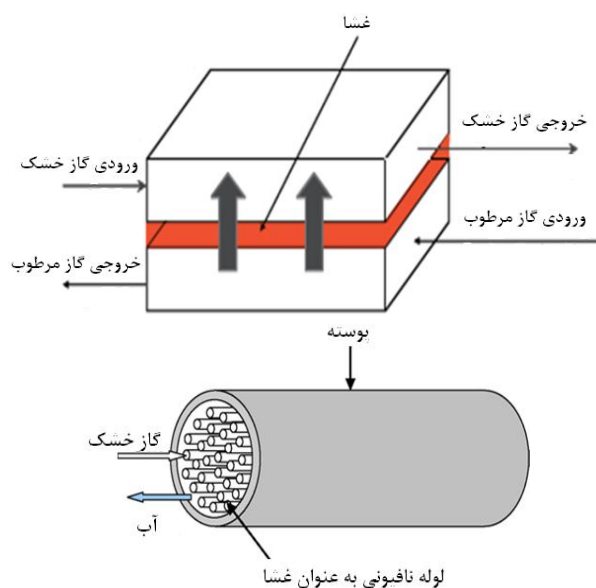
مطالعات عددی شامل مدل‌های تحلیلی، ترمودینامیکی و دو بعدی می‌شود. پارک و اه [۲۳] یک مدل تحلیلی از مرطوب‌ساز غشایی که با آب مایع کار می‌کند را ارائه دادند. در مدل آنها دمای کل مرطوب‌ساز ثابت فرض شده است. با توجه به نقش مهمی که دما و گرما در انتقال بخار دارد، این فرض، به خصوص در محاسبه رطوبت نسبی خروجی، ایجاد خطای شدیدی می‌کند. در معادله ارائه شده توسط آنها، تأثیر نرخ جریان جرمی ورودی سمت مرطوب و فشار ورودی گازها قابل مشاهده نیست. چن و پنگ [۲۲] یک مدل ترمودینامیکی از مرطوب‌ساز 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 صفحه لغزان قابل تنظیم است. آنها به مطالعه غیر دائم مرطوب‌ساز پرداختند و برخی پارامترهای ابعادی را بررسی کردند. ساب هاروال و همکاران [۲۴]، اگر چه به مطالعه دو بعدی مرطوب‌ساز پرداختند، ولی در نتایج آنها به نرخ انتقال گرما و دماهای خروجی در مطالعه پارامترها پرداخته نشده است. یو و همکارانش [۱۸] هم با ارائه یک مدل تحلیلی به مطالعه پارامتری مرطوب‌ساز غشایی پرداختند. آنها، اگرچه مقدار آب مایع تولید شده در مرطوب‌ساز را در طی فعالیت، ارائه کرده‌اند، ولی در مطالعه پارامترها به ارائه نقطه شبنم خروجی بسنده شده است.

مرطوب‌سازی هوا نیز ضروری است تا از خشک شدن بخشی از غشا در نزدیک ورودی آند جلوگیری شود. بدون مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر، عملکرد پیل بین ۲۰ تا ۴۰٪ پایین‌تر می‌باشد [۶].

روش‌های مختلفی برای مرطوب کردن گازهای واکنشگر وجود دارد که به دو دسته مرطوب‌سازی خارجی و مرطوب‌سازی داخلی تقسیم می‌شوند. روش‌های مرطوب‌سازی داخلی شامل: مرطوب‌ساز غشایی یکپارچه با توده پیل [۷]، استفاده از مکمل‌های غشایی [۸-۱۰]، استفاده از اسفنج جاذب متخلخل برای توزیع مناسب آب [۱۱، ۱۲] و تزریق مستقیم آب مایع یا بخار [۱۳] می‌باشد. روش‌های مرطوب‌سازی خارجی عمدتاً شامل: روش حبابی یا نقطه شبنم [۱۴]، روش چرخ آنتالپی [۱۵] و روش غشایی است.

در میان این روش‌ها، روش غشایی ساده‌ترین و رایج‌ترین روش مرطوب‌سازی بوده و از حداقل مصرف انرژی برخوردار است، پیچیدگی سیستم پیل سوختی و توان پارازیتی آن را نیز کاهش می‌دهد. در این روش از یک غشای نیمه تراوا استفاده می‌شود. از نظر هندسی دو نوع مرطوب‌ساز غشایی صفحه‌ای و پوسته لوله‌ای وجود دارد. شکل ۱ شماتیکی از این دو نوع مرطوب‌ساز را نشان می‌دهد. مطابق شکل، گاز مرطوب (یا آب مایع) و سوخت (یا هوا) از طریق کانال‌هایی در دو طرف غشا جریان می‌یابند. به دلیل اختلاف غلظت آب در دو سمت غشا، آب از طریق پخش، از سمت کانال آب به سمت گاز نفوذ می‌کند و با تبخیر در فصل مشترک غشا/گاز، گاز خشک را مرطوب می‌کند. با استفاده از گرما و آب تولیدی در داخل پیل حجم سیستم پیل سوختی کاسته می‌شود. در سیستم مرطوب‌ساز غشایی، افت فشار و افت دما که در سیستم‌های تبخیر گاز و روش پاشش با استفاده از نازل محسوس است، وجود ندارد. به همین دلیل این شیوه مرطوب‌سازی، بهترین انتخاب برای کنترل رطوبت ورودی به پیل سوختی است.

محدودیت این روش، عدم وجود کنترل کافی روی فرایند مرطوب کردن است. در مرطوب کردن با روش غشایی، میزان رطوبت جذب شده توسط گاز، تابع پارامترهای نفوذپذیری غشا، دما و فشار کاری مرطوب کننده و دی‌های جریان عبوری از مرطوب‌ساز است. با این وجود، روش غشایی همچنان یکی از رایج‌ترین روش‌های مرطوب‌سازی گازهای واکنش دهنده در سیستم پیل سوختی به شمار می‌رود.



شکل ۱ شماتیکی از دو نوع کلی مرطوب‌ساز غشایی

- 1- Membrane Additives
- 2- Porous Absorbent Sponges

$$\dot{m}_{2,air,out}h_{2,air,out} + \dot{m}_{2,v,out}h_{2,v,out} = -\dot{q} + \dot{m}_{2,air,in}h_{2,air,in} + \dot{m}_{2,v,in}h_{2,v,in} - \dot{m}_{v,mem}h_{mem} \quad (2)$$

در معادلات (۱) و (۲)  $\dot{m}_{1,air,out}$  و  $\dot{m}_{1,v,out}$  و  $\dot{m}_{1,air,in}$  و  $\dot{m}_{1,v,in}$  نرخ جریان جرمی ورودی و خروجی بخار آب و هوا به‌از حجم کنترل ۱ و  $\dot{m}_{2,air,out}$  و  $\dot{m}_{2,v,out}$  و  $\dot{m}_{2,air,in}$  و  $\dot{m}_{2,v,in}$  نرخ جریان جرمی ورودی و خروجی بخار آب و هوا به‌از حجم کنترل ۲ هستند.  $\dot{m}_{v,mem}$  جرم انتقال یافته بخار و  $\dot{q}$  نرخ انتقال گرما از حجم کنترل ۲ به حجم کنترل ۱ است. با نوشتن معادله بقای جرم، رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$\dot{m}_{2,v,in} - \dot{m}_{2,v,out} = \dot{m}_{v,mem} = \dot{m}_{1,v,out} - \dot{m}_{1,v,in} \quad (3)$$

پارامتر  $h$  بیانگر آنتالپی می‌باشد و  $h_{mem}$  آنتالپی غشا می‌باشد که توسط رابطه (۴) بیان می‌شود.

$$h_{mem} = C_{p,v} T_{mem} \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $C_{p,v}$  گرمای ویژه بخار و  $T_{mem}$  دمای غشا می‌باشد که به صورت رابطه (۵) تخمین زده می‌شود.

$$T_{mem} = \frac{T_{1,out} + T_{2,out}}{2} \quad (5)$$

به علت خواص ساختاری غشا می‌توان فرض کرد که انتقال آب از غشا تماماً از طریق پخش می‌باشد. رابطه (۶) نرخ انتقال بخار آب از میان غشا را به دست می‌دهد [۲۲].

$$\dot{m}_{v,mem} = D_w \frac{C_2 - C_1}{t_m} M_v A \quad (6)$$

در رابطه (۶)،  $M_v$  بیانگر جرم مولی آب و  $A$  بیانگر مساحت غشا می‌باشد. ضریب پخش  $D_w$  توسط معادله تجربی (۷) به‌دست می‌آید.

$$D_w = D_\lambda e^{2416 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T_{mem}} \right)} \quad (7)$$

که در آن  $D_\lambda$  توسط روابط تجربی (۸) بیان می‌شود [۲۵].

$$D_\lambda = \begin{cases} 10^{-6} \lambda_m < 2 \\ 10^{-6} (1 + 2(\lambda_m - 2)) & 2 \leq \lambda_m \leq 3 \\ 10^{-6} (3 - 1.67(\lambda_m - 3)) & 3 < \lambda_m < 4.5 \\ 1.25 \times 10^{-6} \lambda_m \geq 4 \end{cases} \quad (8)$$

در رابطه (۸)،  $\lambda_m$  ظرفیت آب غشا می‌باشد و از رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$\lambda_m = 0.043 + 17.81a_m - 39.85a_m^2 + 36.0a_m^3 \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $a_m$  رطوبت نسبی غشا بوده و به وسیله رابطه (۱۰) تخمین زده می‌شود.

$$a_m = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \quad (10)$$

۱ و ۲ رطوبت نسبی حجم کنترل‌های ۱ و ۲ می‌باشند.

$$\phi_1 = \phi_{1,out} = \frac{P_{1,out}\omega_{1,out}}{P_{1,sat}(\omega_{1,out} + \beta)} \quad (11)$$

$$\phi_2 = \phi_{2,out} = \frac{P_{2,out}\omega_{2,out}}{P_{2,sat}(\omega_{2,out} + \beta)} \quad (12)$$

که در آن‌ها:

$$\beta = \frac{M_v}{M_{air}} \quad (13)$$

$C_1$  و  $C_2$  غلظت آب در دو طرف غشا می‌باشند.

$$C_1 = \frac{\rho_{m,dry}}{W_{m,dry}} \lambda_1 \quad (14)$$

$$C_2 = \frac{\rho_{m,dry}}{W_{m,dry}} \lambda_2 \quad (15)$$

$\rho_{m,dry}$  چگالی خشک غشا و  $W_{m,dry}$  وزن معادل خشک غشا هستند.  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  ظرفیت آب در حجم کنترل‌های ۱ و ۲ را نشان می‌دهند.

$$\lambda_1 = 0.043 + 17.81\phi_1 - 39.85\phi_1^2 + 36.0\phi_1^3 \quad (16)$$

$$\lambda_2 = 0.043 + 17.81\phi_2 - 39.85\phi_2^2 + 36.0\phi_2^3 \quad (17)$$

نرخ انتقال حرارت بین دو حجم کنترل از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$\dot{q} = UA\Delta T \quad (18)$$

در این مقاله، یک مدل ترمودینامیکی از مرطوب‌ساز غشایی صفحه‌ای ارائه شده و معادلات ترمودینامیکی و معادله انتقال جرم از غشا حل شده‌اند. در این مطالعه، سعی شده است که کاستی‌های ذکر شده در مطالعات عددی گذشته برطرف شود؛ از جمله این که تأثیر بارز دما در معادلات اعمال شده است و تأثیر تمام پارامترهای دبی‌های ورودی، فشارها و دماهای ورودی هر دو سمت خشک و مرطوب بر عملکرد مرطوب‌ساز بررسی شده است؛ به گونه‌ای که در هر مرحله، دمای خروجی سمت خشک، دمای خروجی سمت مرطوب، نرخ انتقال بخار آب از غشا، رطوبت نسبی و نقطه شبنم خروجی گاز خشک و شار گرمایی مبادله شده از غشا محاسبه و تحلیل شده است. به این صورت می‌توان شرایط عملکردی مناسب و بهینه در کاربردهای مختلف مرطوب‌ساز و پیل سوختی را تشخیص داد و برقرار کرد.

## ۲- مدل ترمودینامیکی

ساختمان و دامنه مدل محاسباتی مرطوب‌ساز در شکل ۳ نشان داده شده است. از حجم کنترل ۱ جریان گاز خشک و از حجم کنترل ۲ جریان گاز مرطوب، در جهت مخالف عبور می‌کنند. آب و گرما، توسط غشا از کانال مرطوب به کانال خشک انتقال می‌یابند.

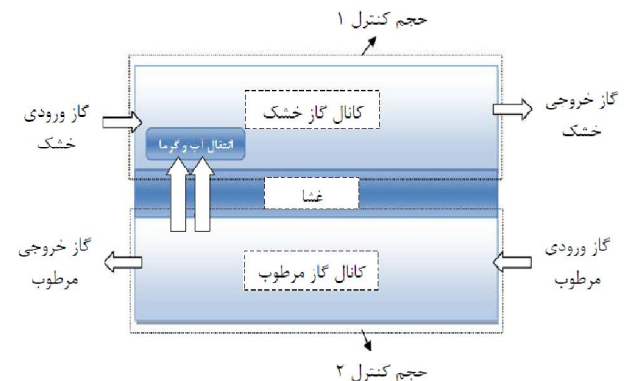
### ۱-۲- فرضیات

- ۱- رفتار گاز و بخار به صورت رفتار گاز ایده‌آل است.
- ۲- نفوذپذیری آب ثابت است.
- ۳- جریان در کانال‌ها آرام و کاملاً توسعه یافته است (رینولدز کمتر از ۲۰۰۰ است).
- ۴- مرطوب‌ساز کاملاً عایق است و انتقال حرارت فقط از میان غشا اتفاق می‌افتد.
- ۵- انرژی جنبشی و پتانسیل گازها ناچیز فرض شده است.
- ۶- کار خارجی بر روی سیستم وجود ندارد.
- ۷- گرماهای ویژه ثابت‌اند.
- ۸- ضریب کلی انتقال حرارت جابجایی ثابت است.
- ۹- مرطوب‌ساز در یک سیستم چرخه‌ای فرض شده است که خروجی کاتد پیل در حالت اشباع و در دمای ۸۰ درجه سلسیوس است.
- ۱۰- افت فشار در طول کانال به علت کوچک بودن کانال، از روابط تحلیلی برابر ۱۰۰ پاسکال به دست می‌آید.

### ۲-۲- معادلات حاکم

قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل ۱ و ۲ به ترتیب توسط روابط (۱) و (۲) بیان شده است.

$$\dot{m}_{1,air,out}h_{1,air,out} + \dot{m}_{1,v,out}h_{1,v,out} = \dot{q} + \dot{m}_{1,air,in}h_{1,air,in} + \dot{m}_{1,v,in}h_{1,v,in} + \dot{m}_{v,mem}h_{mem} \quad (1)$$

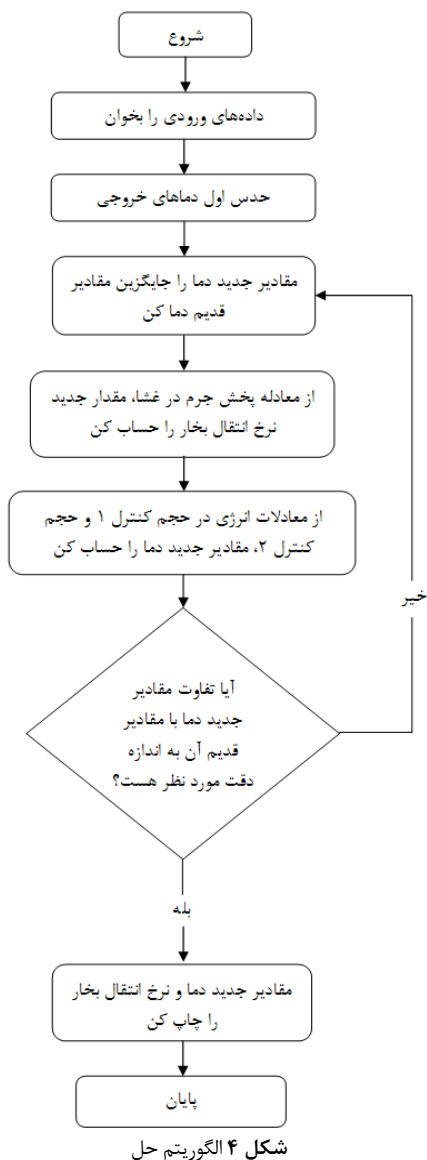


شکل ۳ ساختمان و دامنه مدل ترمودینامیکی مرطوب‌ساز غشایی

آنچه که مطلوب عملکرد مرطوب‌ساز است، نزدیک شدن شرایط خروجی گاز خشک به شرایط پیل می باشد. از این رو گاز خروجی از سمت خشک، علاوه بر دارا بودن رطوبت نسبی بالا بهتر است از دمای بالایی نیز برخوردار باشد. لذا در تحقیقات هوانگ و همکاران [۲۶]، کیو و مریدا [۲۰] و یو همکاران [۱۸] از معیار نقطه شبنم برای سنجش عملکرد مناسب مرطوب‌ساز استفاده شده است؛ به طوری که هر چه نقطه شبنم خروجی سمت خشک به نقطه شبنم ورودی سمت مرطوب نزدیک‌تر شود، عملکرد مرطوب‌ساز به حالت ایده ال نزدیک‌تر است. با توجه به تعریف نقطه شبنم، این معیار شامل تأثیر دما و رطوبت نسبی توأم می‌باشد. نقطه شبنم در خروجی سمت خشک از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$p_{sat,(T=Dew\ Point)} = p_{sat,(T=T_{1,out})} \times \phi_{1,out} \quad (21)$$

در این مطالعه، فرض شده است که مرطوب‌ساز در سیستم چرخه‌ای قرار دارد (شکل ۲) و دمای ورودی سمت مرطوب، همان دمای عملکرد پیل، یعنی ۳۵۳ کلوین و رطوبت نسبی گاز مرطوب ورودی به مرطوب‌ساز در حالت اشباع فرض شده است. لذا نقطه شبنم ورودی سمت مرطوب همان دمای ورودی یعنی ۳۵۳ کلوین می‌باشد؛ از این رو هر چه نقطه شبنم در خروجی سمت خشک به این مقدار (۳۵۳ کلوین) نزدیک‌تر شود، عملکرد مرطوب‌ساز بهتر است.



شکل ۴ الگوریتم حل

$\Delta T$  اختلاف دمای میانگین لگاریتمی است و برای مرطوب‌ساز با جریان مخالف از رابطه (۱۹) قابل محاسبه است.

$$\Delta T = \frac{(T_{2,in} - T_{1,out}) - (T_{2,out} - T_{1,in})}{\ln((T_{2,in} - T_{1,out}) / (T_{2,out} - T_{1,in}))} \quad (19)$$

$U$ ، ضریب کلی انتقال حرارت است و به کمک عدد ناسلت تعیین می‌شود.

$$U = \frac{kNu}{2D_h} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰)  $k$ ، ضریب رسانایی،  $Nu$ ، عدد ناسلت و  $D_h$ ، قطر هیدرولیکی کانال است.

### ۳-۲- روش حل عددی

از حل ۳ معادله (۱)، (۲) و (۶)، سه مجهول دمای خروجی سمت خشک، دمای خروجی سمت مرطوب و نرخ انتقال بخار آب از غشا، به دست می‌آید، که از طریق این پارامترها و پارامترهای ورودی دیگر، رطوبت نسبی خروجی سمت خشک و نرخ گرمای مبادله شده از میان غشا بین دو کانال محاسبه و گزارش می‌شود. برای حل این سه معادله و سه مجهول کاملاً غیرخطی، از روش تکرار با استفاده از نرم‌افزار برنامه‌نویسی فرترن استفاده شده است. الگوریتم حل، در شکل ۴ نشان داده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- صحنه‌گذاری نتایج

پارامترهای هندسی و فیزیکی مرطوب‌ساز مدل شده در جدول ۱ ارائه شده است. از آنجا که، دما در این مدل ترمودینامیکی به شدت بر پارامترهای دیگر تأثیرگذار است و در واقع مجهول اصلی مسأله است، به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی، منحنی تغییرات دمای خروجی سمت خشک بر حسب نرخ جریان جرمی ورودی در کار حاضر، با نتایج چن و پنگ [۲۲] مقایسه شده است. در مطالعه آنها نقطه شبنم و رطوبت نسبی خروجی ارائه نشده است. بدین منظور از شرایط یکسان ورودی و عملکردی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود توافق خوبی بین نتایج حاضر و نتایج چن و پنگ وجود دارد.

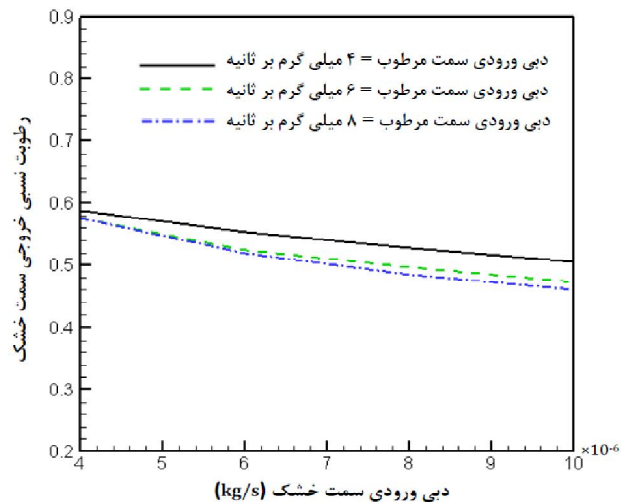
جدول ۱ پارامترهای هندسی، عملکردی، انتقالی و خواص مواد مرطوب‌ساز غشایی

پارامتر	واحد	مقدار
طول کانال‌ها	سانتی‌متر	۳۰
عرض کانال	میلیمتر	۱
عمق کانال	میلیمتر	۱
ضخامت غشا	میکرومتر	۲۵
گرمای ویژه هوا	ژول بر گرم کلوین	۱/۰۰۷
گرمای ویژه بخار	ژول بر گرم کلوین	۱/۸۸
ضریب رسانایی گرمایی هوا	وات بر متر کلوین	۰/۰۲۸
عدد ناسلت	-	۳/۵
لزجت گاز	پاسکال.ثانیه	$1/88 \times 10^{-5}$
دانسیته خشک غشا	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۱
وزن معادل خشک غشا	کیلوگرم بر مول	۱
دمای ورودی سمت خشک	کلوین	۳۰۳
دمای ورودی سمت مرطوب	کلوین	۳۵۳
فشار ورودی سمت خشک	کیلو پاسکال	۱۰۱/۳۲۵
فشار ورودی سمت مرطوب	کیلو پاسکال	۱۰۱/۳۲۵
رطوبت نسبی ورودی سمت خشک	-	۰
رطوبت نسبی ورودی سمت مرطوب	-	۱
دبی ورودی به هر کانال	میلیگرم بر ثانیه	۴

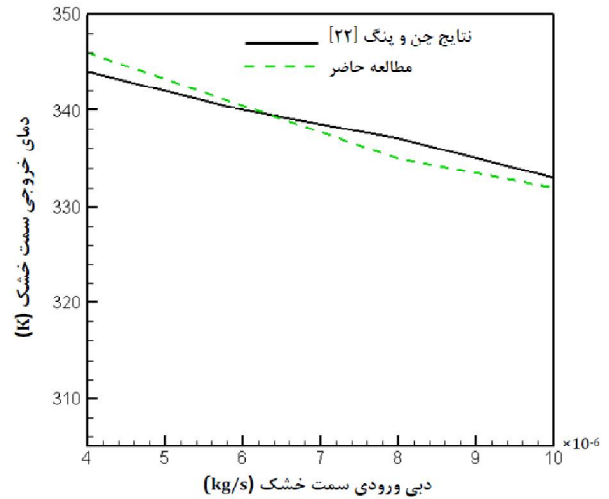
پارامتر اول، دبی ورودی سمت مرطوب ثابت نگه داشته می‌شود.

شکل‌های ۶ و ۷ تغییرات دمای خروجی سمت خشک و نرخ انتقال بخار آب از غشا را بر حسب دبی‌های جریان ۴ تا ۱۰ میلی‌گرم بر ثانیه در سه دبی مختلف سمت مرطوب نشان می‌دهند. مطابق شکل ۶، با افزایش دبی گاز خشک، دمای خروجی این سمت مرطوب‌ساز کاهش می‌یابد. تغییر شیب ناگهانی و ناپیوستگی‌هایی که در این نمودار و نمودارهای بعدی مشاهده می‌شود ناشی از کم بودن تعداد نقاط محاسباتی به علت صرفه‌جویی در وقت است. از آنجا که با تعداد کم‌تری از نقاط، نتیجه مورد نظر به درستی به دست می‌آید، نیازی به استفاده از نقاط بیشتر و به تبع آن زمان زیاد محاسبات نیست. کاهش دما ناشی از افزایش دبی و گرم شدن گاز بیشتر با مقدار ثابت گرم‌است. با افزایش دبی جریان گاز خشک، مدت زمان اقامت گاز در مرطوب‌ساز کاهش پیدا می‌کند و گاز فرصت کافی برای جذب رطوبت را ندارد. از این رو مطابق شکل ۷، نرخ انتقال آب کاهش می‌یابد. این نتیجه با نتایج چن و پنگ [۲۲] همخوانی خوبی دارد.

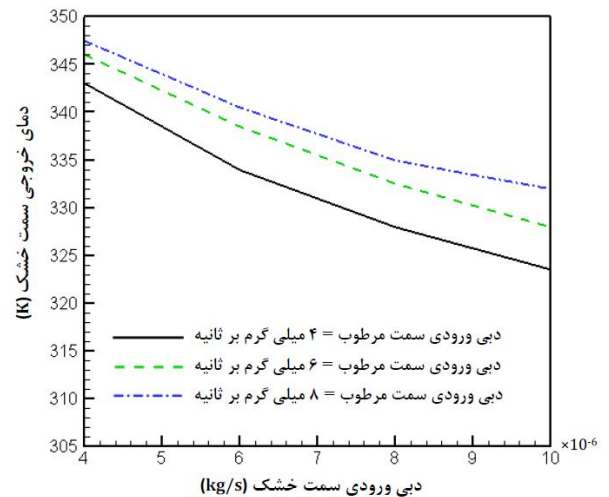
کاهش دما سبب کاهش فشار اشباع در خروجی می‌شود و طبق رابطه (۱۱) می‌تواند با افزایش رطوبت نسبی همراه باشد. از طرفی کاهش نرخ انتقال آب سبب کاهش رطوبت نسبی در خروجی سمت خشک می‌شود. در مجموع، دو عامل مخالف، یعنی کاهش دما و کاهش نرخ انتقال آب بر رطوبت نسبی گاز خروجی تأثیر می‌گذارند و باید دید کدام عامل غالب است. شکل ۸ تأثیر دبی ورودی سمت خشک بر رطوبت نسبی خروجی سمت خشک در سه نرخ جریان ورودی سمت مرطوب را نشان می‌دهد. وقتی دبی جریان گاز افزایش می‌یابد، مقدار گازی که بایستی توسط مرطوب‌ساز مرطوب شود، افزایش می‌یابد؛ در حالی که آب انتقالی از غشا و نرخ تبخیر آن محدود است. در این حالت اثر کاهش نرخ انتقال آب بر اثر افزایش دما غالب است و همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش دبی ورودی در سمت خشک در هر ۳ نرخ جریان مرطوب، رطوبت نسبی در خروجی سمت خشک کاهش می‌یابد؛ اگرچه به علت اثر مخالف افزایش دما، شیب کاهش منحنی بسیار کم می‌باشد، به طوری که مقدار رطوبت نسبی با دو برابر شدن دبی جریان تنها ۶ درصد تغییر می‌کند. این نتیجه با نتایج ارائه شده توسط پارک و اه [۲۳] و ساب هاروال و همکاران [۲۴] همخوانی دارد؛ اگرچه شیب کاهش رطوبت نسبی در نمودار ارائه شده توسط پارک بسیار بیشتر است که ناشی از نادیده گرفتن اثر دما در مدل پارک است.



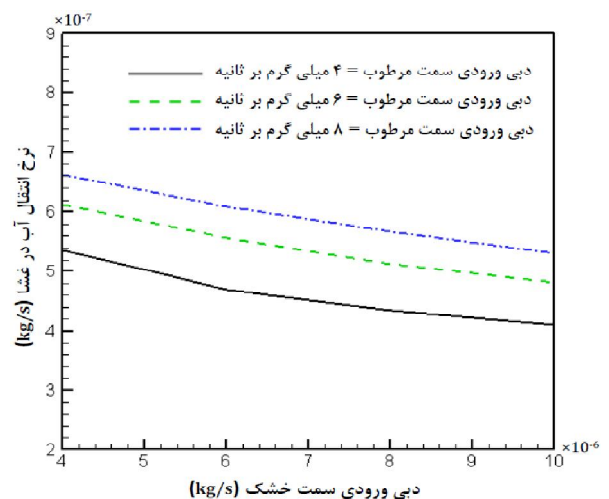
شکل ۸ تأثیر نرخ جریان جرمی ورودی سمت خشک و سمت مرطوب بر رطوبت نسبی گاز خروجی سمت خشک



شکل ۵ مقایسه منحنی تغییرات دمای خروجی سمت خشک بر حسب نرخ جریان جرمی ورودی با مرجع [۲۲]



شکل ۶ تأثیر نرخ جریان جرمی ورودی سمت خشک و سمت مرطوب بر دمای خروجی گاز سمت خشک

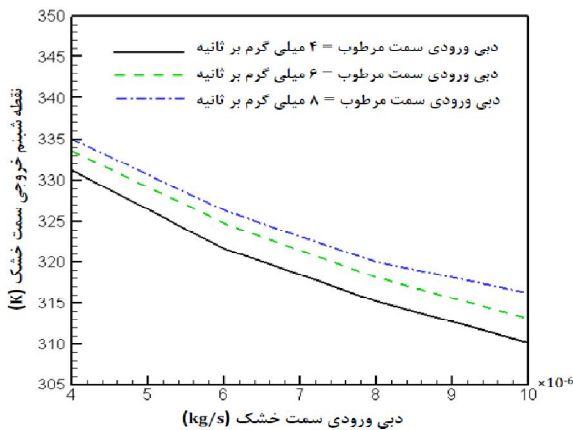


شکل ۷ تأثیر نرخ جریان ورودی سمت خشک و سمت مرطوب بر نرخ انتقال آب

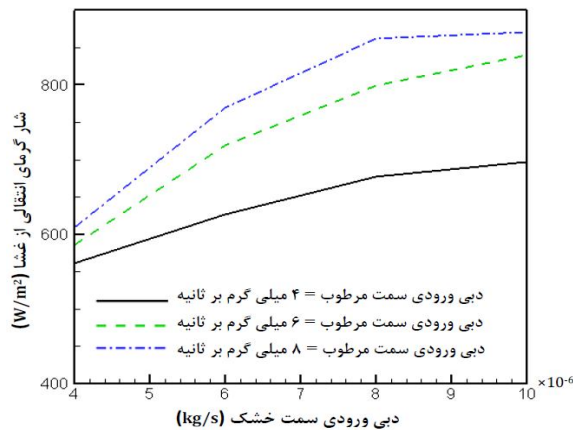
### ۳-۲- تأثیر دبی ورودی سمت خشک

به منظور بررسی تأثیر دبی‌های ورودی بر میزان مرطوب‌سازی گازهای خشک، تمام پارامترها ثابت نگه داشته می‌شود؛ از جمله هنگام بررسی تأثیر

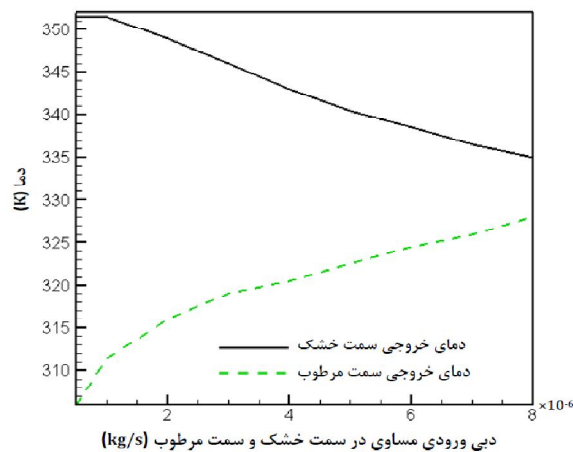
چندانی ندارد، رطوبت نسبی تنها متأثر از فشار و غلظت آب خواهد بود. افت فشار در طول کانال به علت طول کوچک کانال و سرعت کم در محدوده ۱۰۰ پاسکال است، لذا فشار خروجی هم مرتبه با فشار ورودی است. از این رو تأثیر فشار غالب است و با افزایش فشار ورودی کانال خشک، اگرچه نرخ انتقال آب کاهش می‌یابد، اما رطوبت نسبی افزایش چشم‌گیری دارد. در این حالت نقطه شبنم خروجی سمت خشک از ۳۳۱/۲ کلون به ۳۳۹/۹۴ کلون افزایش می‌یابد. از این رو استفاده از فشار بالاتر مطلوب است. به دلیل ثابت بودن تقریبی دما، شار گرمایی تقریباً ثابت و برابر ۵۳۳ وات بر متر مربع می‌باشد.



شکل ۹ تأثیر نرخ جریان جرمی ورودی سمت خشک و سمت مرطوب بر نقطه شبنم خروجی سمت خشک



شکل ۱۰ تأثیر نرخ جریان جرمی ورودی سمت خشک و سمت مرطوب بر شار گرمایی انتقالی از غشا



شکل ۱۱ تأثیر نرخ جریان جرمی ورودی مساوی در هر دو سمت بر دماهای خروجی

شکل ۹ اثر افزایش دبی بر نقطه شبنم خروجی سمت خشک را نشان می‌دهد. افزایش دبی سمت خشک سبب کاهش شدید نقطه شبنم می‌شود؛ از این رو استفاده از دبی خشک کم‌تر، عملکرد بهتر مرطوب‌ساز را در پی دارد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش دبی سمت خشک نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. گرمای مبادله شده بر چگالش یا تغییر فاز آب تأثیر گذار است. در این مطالعه از تغییر فاز آب در کانال‌ها صرف‌نظر شده است.

### ۳-۳- تأثیر دبی ورودی سمت مرطوب

شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش دبی هوای مرطوب، دمای خروجی سمت خشک افزایش می‌یابد. از طرفی مطابق شکل ۷ با افزایش دبی گاز مرطوب، غلظت آب در سمت کانال مرطوب بیشتر می‌شود و به تبع آن، اختلاف غلظت بین دو کانال افزایش می‌یابد که سبب افزایش نرخ انتقال جرم می‌شود. با افزایش دبی ورودی مرطوب اگرچه نرخ انتقال بخار آب افزایش می‌یابد، اما رطوبت نسبی در خروجی سمت خشک کاهش می‌یابد (شکل ۸). این امر به دلیل آن است که اثر افزایش دما بر اثر افزایش غلظت غالب است. این نتیجه همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی اچ وانگ و همکارانش [۲۶] دارد. قابل ذکر است در دبی‌های بالاتر از ۶ میلی‌گرم بر ثانیه، تغییر دبی مرطوب بر رطوبت نسبی اثر چندانی ندارد.

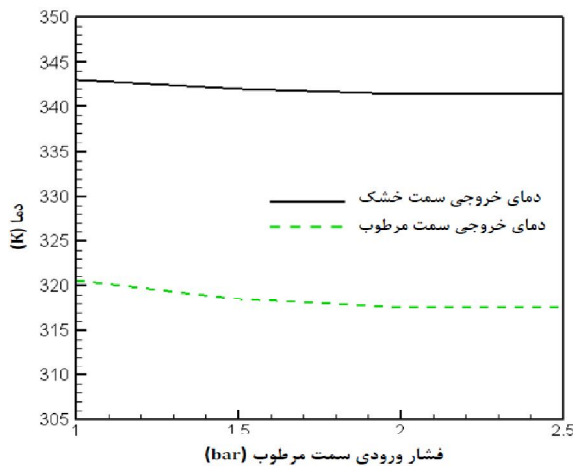
مطابق شکل ۹، افزایش دبی سمت مرطوب سبب افزایش نقطه شبنم خروجی است. این افزایش در دبی‌های بالاتر، کمتر است. از این رو استفاده از دبی مرطوب بالاتر، مطلوب است. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش دبی سمت مرطوب نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

### ۳-۴- تأثیر دبی مساوی در سمت خشک و مرطوب

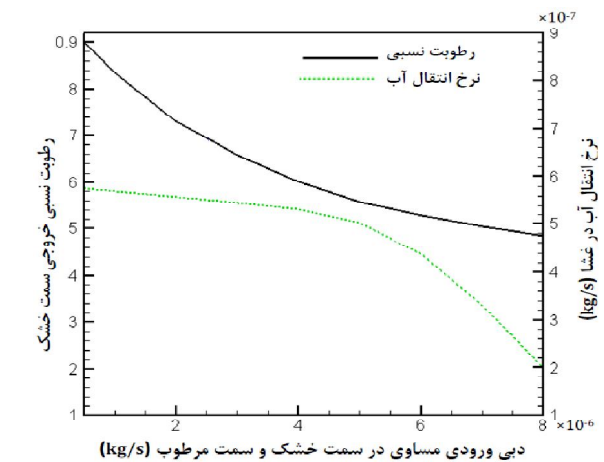
در مرطوب‌ساز گاز به گاز، به خصوص در پیل‌های با نسبت استوکیومتری بالا، در بیشتر اوقات از سیستم چرخه‌ای استفاده می‌شود (شکل ۲). در این حالت دبی جرمی ورودی به دو کانال مرطوب‌ساز تقریباً برابر می‌باشد. البته به دلیل مصرف اکسیژن در کاتد، دبی ورودی سمت مرطوب مقداری کمتر از ورودی سمت خشک است. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ دبی سمت خشک و مرطوب مساوی در نظر گرفته شده و تأثیر آن بر دماهای خروجی، نرخ انتقال بخار آب و رطوبت نسبی نشان داده شده است. بدین منظور مقادیر دبی را بین ۰/۵ تا ۸ میلی‌گرم بر ثانیه اختیار می‌کنیم. افزایش دبی‌های ورودی سبب کاهش دمای خروجی سمت خشک و افزایش دمای سمت مرطوب می‌شود (شکل ۱۱). این امر سبب افزایش قابل توجه نرخ انتقال حرارت خواهد شد. در این حالت شار گرمایی از ۸۸ وات بر متر مربع به ۸۶۲ وات بر متر مربع می‌رسد. با افزایش دبی‌های ورودی، علاوه بر کاهش رطوبت نسبی خروجی که از نتایج شکل ۸ قابل پیش‌بینی بود، نرخ انتقال آب نیز کاهش می‌یابد (شکل ۱۲). این کاهش در دبی‌های بالاتر از ۵ میلی‌گرم بر ثانیه بیشتر است. در این حالت نقطه شبنم خروجی سمت خشک از ۳۴۸/۹۵ به ۳۱۹/۹ کلون کاهش یافته که به منزله افت شدید عملکرد مرطوب‌ساز است. از این رو در پیل‌های با جریان پایین بهتر است از دبی‌های کمتر استفاده شود.

### ۳-۵- تأثیر فشار ورودی سمت خشک

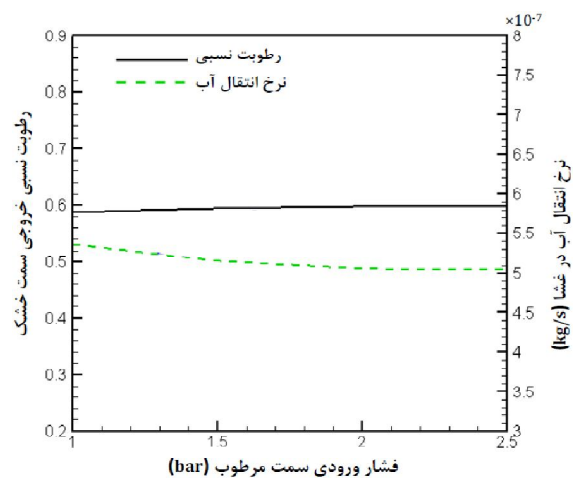
شکل ۱۳ تأثیر فشار ورودی سمت خشک بر دماهای خروجی و شکل ۱۴ تأثیر این پارامتر بر رطوبت نسبی خروجی و نرخ انتقال آب را نشان می‌دهد. در این حالت فشار سمت خشک بین ۱ تا ۲/۵ بار تغییر داده شده است؛ در حالی که فشار سمت مرطوب ثابت نگه داشته شده است. از آنجاکه دما تغییر



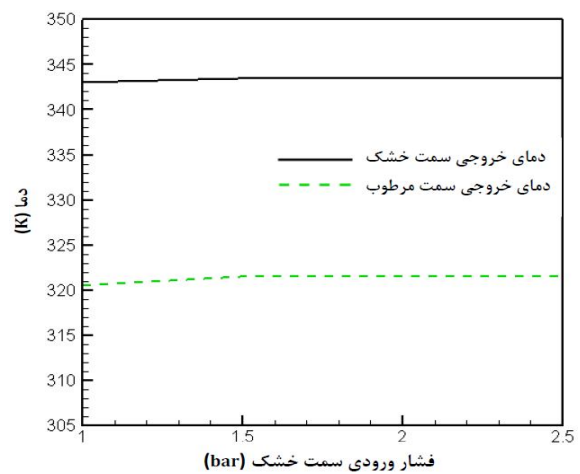
شکل ۱۵ تأثیر فشار ورودی سمت مرطوب بر دماهای خروجی



شکل ۱۲ تأثیر نرخ جریان ورودی مساوی در هر دو سمت بر نرخ انتقال آب و رطوبت نسبی خروجی گاز سمت خشک



شکل ۱۶ تأثیر فشار ورودی سمت مرطوب بر نرخ انتقال آب از غشا و رطوبت نسبی خروجی گاز سمت خشک



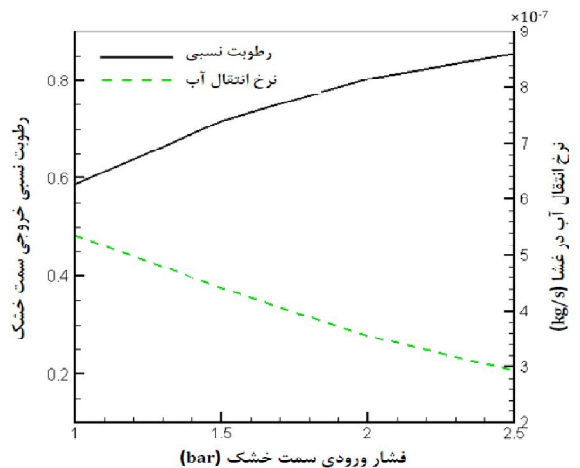
شکل ۱۳ تأثیر فشار ورودی سمت خشک بر دماهای خروجی

با تغییر فشار از ۱ تا ۲/۵ بار، نقطه شبنم خروجی تنها ۱ درجه تغییر می‌کند و از ۳۳۱/۲ به ۳۳۰/۲ کاهش می‌یابد. از این رو نیازی به افزایش فشار ورودی سمت مرطوب نیست و هزینه اضافی و وسایل جانبی نیز به سیستم تحمیل نمی‌شود. باید توجه داشت که در سیستم چرخه‌ای، هوای مرطوب گذرنده از کاند با افت فشاری که در طول کاند دارد، با فشار پایین‌تری وارد مرطوب‌ساز می‌شود.

### ۳-۷- تأثیر دمای ورودی سمت خشک

دما مهم‌ترین پارامتر عملکردی در مرطوب‌ساز غشایی است؛ زیرا دما به طور مستقیم بر نرخ انتقال گرما، رطوبت نسبی و نرخ انتقال جرم تأثیر می‌گذارد. شکل ۱۷ تأثیر دمای ورودی خشک بر دماهای خروجی را نشان می‌دهد. در این حالت با ثابت نگه داشتن دمای ورودی مرطوب، دمای خروجی مرطوب، دمای ورودی مرطوب خشک بین ۲۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس تنظیم می‌شود. با افزایش دمای ورودی مرطوب، دمای خروجی این سمت نیز افزایش می‌یابد. شکل ۱۸ نیز تأثیر دمای ورودی خشک بر رطوبت نسبی خروجی مرطوب، دمای ورودی مرطوب خشک و نرخ انتقال آب را نشان می‌دهد. اگر چه با افزایش دما، نرخ انتقال آب افزایش می‌یابد؛ ولی رطوبت نسبی تقریباً ثابت می‌ماند. ترکیب دو اثر متضاد هم (افزایش غلظت آب و افزایش دما) تأثیر ناچیز دما را بر رطوبت نسبی نتیجه می‌دهد.

نقطه شبنم در این بازه از مقدار ۳۲۹/۸۲ به مقدار ۳۳۵/۸۷ کلون افزایش می‌یابد. از این رو گرم کردن گاز خشک ورودی سبب بهبود نسبی



شکل ۱۴ تأثیر فشار ورودی سمت خشک بر نرخ انتقال آب از غشا و رطوبت نسبی خروجی گاز سمت خشک

### ۳-۶- تأثیر فشار ورودی سمت مرطوب

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تأثیر فشار ورودی مرطوب را بر دماهای خروجی، رطوبت نسبی خروجی مرطوب و نرخ انتقال آب را در دبی‌های ثابت ورودی نشان می‌دهد. در این حالت فشار ورودی مرطوب، ثابت نگه داشته می‌شود. فشار ورودی مرطوب اثر قابل توجهی بر هیچ یک از پارامترهای ذکر شده ندارد.

شکل ۱۹ تغییرات دماهای خروجی را بر حسب دمای ورودی سمت مرطوب نشان می‌دهد. دمای خروجی سمت خشک با افزایش دمای ورودی سمت مرطوب افزایش قابل توجهی می‌یابد که افزایش فشار اشباع و به تبع آن کاهش رطوبت نسبی خروجی را نتیجه می‌دهد. شکل ۲۰ تأثیر دمای ورودی مرطوب، بر رطوبت نسبی خروجی خشک و نرخ انتقال آب را نشان می‌دهد. اگرچه با افزایش دما، نرخ انتقال آب افزایش می‌یابد؛ ولی رطوبت نسبی کاهش می‌یابد. به عبارتی، تأثیر دما بر تأثیر غلظت غالب است.

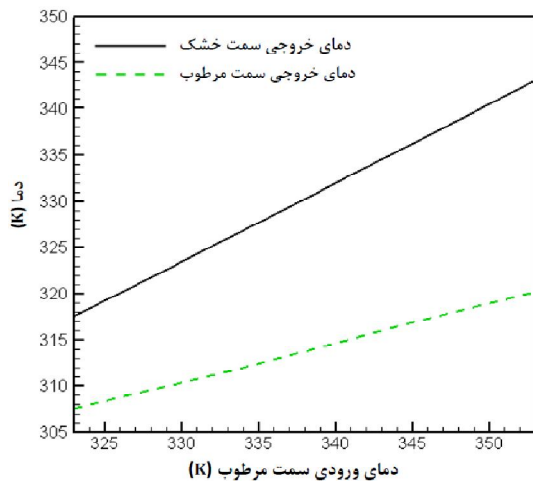
مطابق شکل ۲۱ افزایش دمای خروجی سمت خشک ناشی از افزایش دمای ورودی سمت مرطوب، به حدی هست که سبب افزایش نقطه شبنم خروجی سمت خشک شود. از آنجا که دمای ورودی سمت مرطوب همان نقطه شبنم است، تغییر در دمای ورودی به منزله تغییر در نقطه شبنم است. با افزایش نقطه شبنم ورودی سمت مرطوب از ۳۲۳ تا ۳۵۳ کلوین، نقطه شبنم خروجی سمت خشک از ۳۱۳/۹ به ۳۳۱/۲۱ می‌رسد. اختلاف نقطه شبنم ورودی سمت مرطوب و خروجی سمت خشک از ۹/۱ به ۲۱/۷۹ درجه می‌رسد. از این رو با افزایش دمای ورودی سمت مرطوب اگر چه نقطه شبنم افزایش می‌یابد، اما به علت بزرگ‌تر شدن مقدار اختلاف نقطه شبنم ورودی سمت مرطوب و خروجی سمت خشک، مرطوب‌ساز عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهد. در این حالت شار گرما از ۲۰۰ به ۵۶۷ وات بر متر مربع افزایش می‌یابد.

عملکرد مرطوب‌ساز می‌شود. با افزایش دمای ورودی سمت خشک، نرخ انتقال حرارت به شدت کاهش می‌یابد؛ به طوری که شار گرمایی از مقدار ۶۵۳ وات بر متر مربع در ۲۰ درجه سلسیوس به ۲۲۰ وات بر متر مربع در ۵۰ درجه سلسیوس می‌رسد.

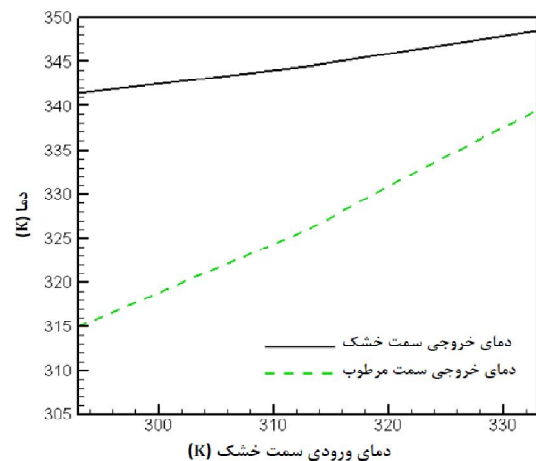
در مرطوب‌ساز غشایی، زمانی که گاز مولکول‌های آب را جذب می‌کند، دمای آن کاهش می‌یابد. این کاهش دما ممکن است باعث چسبیدن مولکول‌های آب به یکدیگر و موجب تقطیر آب شود. این امر در کارکرد مناسب پیل سوختی اثر منفی دارد و لذا برای رسیدن به دمای مورد نیاز پیل سوختی بهتر است گاز ورودی تا حدی گرم شود؛ اگر چه گرم کردن گاز ورودی نیاز به پیش گرم کن و صرف انرژی دارد.

### ۳-۸- تأثیر دمای ورودی سمت مرطوب

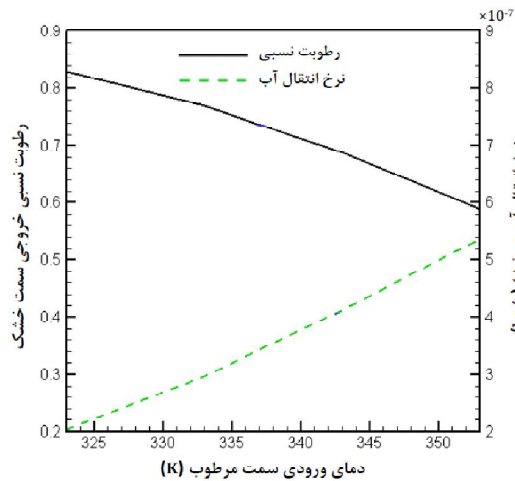
در حالتی که از سیستم چرخه‌ای برای مرطوب‌سازی استفاده شود، گازهای مرطوب خروجی کاتد پیل وارد سمت مرطوب مرطوب‌ساز می‌شود و دمایی نزدیک به دمای عملکرد پیل خواهد داشت؛ در غیر این صورت دمای ورودی سمت مرطوب قابل تنظیم خواهد بود. حتی در حالت اول می‌توان با استفاده از تجهیزات اضافی دمای ورودی گاز مرطوب را کنترل کرد. به منظور بررسی تأثیر دمای ورودی سمت مرطوب، با ثابت نگه داشتن دمای ورودی خشک، دمای ورودی سمت مرطوب بین ۳۲۳ تا ۳۵۳ کلوین تغییر داده می‌شود.



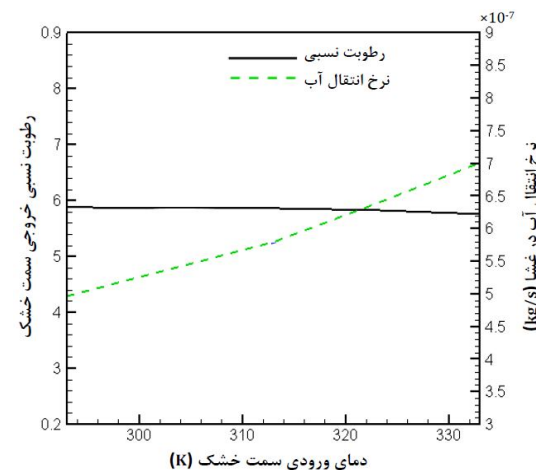
شکل ۱۹ تأثیر دمای ورودی سمت مرطوب بر دماهای خروجی



شکل ۱۷ تأثیر دمای ورودی سمت خشک بر دماهای خروجی



شکل ۲۰ تأثیر دمای ورودی سمت مرطوب بر نرخ انتقال آب از غشا و رطوبت نسبی خروجی گاز سمت خشک



شکل ۱۸ تأثیر دمای ورودی سمت خشک بر نرخ انتقال آب از غشا و رطوبت نسبی خروجی گاز سمت خشک



## ۶- فهرست علائم

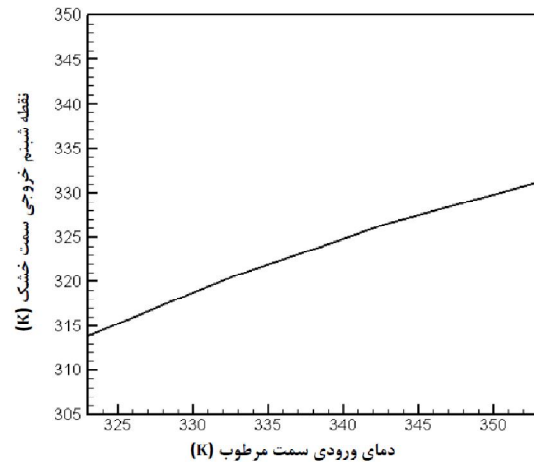
A	مساحت (m <sup>2</sup> )
c	غلظت آب (molm <sup>-3</sup> )
D	ضریب پخش (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
D <sub>h</sub>	قطر هیدرولیکی (m)
h	آنتالپی (kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
k	ضریب رسانایی (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
L	طول (m)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kgs <sup>-1</sup> )
Nu	عدد ناسلت
P	فشار (Pa)
R	ثابت عمومی گاز (8.314 Jmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
W <sub>m,dry</sub>	وزن معادل خشک غشا (kgmol <sup>-1</sup> )

## علائم یونانی

$\rho_{m,dry}$	دانسیته خشک غشا (kgm <sup>-3</sup> )
$\lambda$	ظرفیت آب
$\omega$	نسبت رطوبت
$\Phi$	رطوبت نسبی

## ۷- مراجع

- [1] E. Afshari, S. A. Jazayeri, Analyses of heat and water transport interactions in a proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 194, pp. 423-432, 2009.
- [2] Z. M. Wan, J. H. Wan, J. Liu, Z. K. Tu, M. Pan, Z. C. Liu, W. Liuc, Water recovery and air humidification by condensing the moisture in the outlet gas of a proton exchange membrane fuel cell stack, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 42, pp. 173-178, 2012.
- [3] I. S. Hussainia, C. Y. Wang, Visualization and quantification of cathode channel flooding in PEM fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 187, pp. 444-451, 2009.
- [4] U. Pasaogullari, P. P. Mukherjee, C. Y. Wang, K. S. Chen, Anisotropic heat and water transport in a PEFC cathode gas diffusion layer, *Journal Electrochemical Society*, Vol. 154, pp. B823-B834, 2007.
- [5] E. Afshari, N. Baharloo Houreh, Analysis of oxygen transport and pressure drop in a PEM fuel cell cathode with partially blocked flow channel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 43-58, 2012. (In Persian)
- [6] K. Ramya, J. Sreenivas, K. S. Dhathathreyan, Study of a porous membrane humidification method in polymer electrolyte fuel cells, *International Journal of hydrogen energy*, Vol. 36, pp. 1-7, 2011.
- [7] K. H. Choi, D. J. Park, Y. W. Rho, Y. T. Kho, T. H. Lee, A study of the internal humidification of an integrated PEMFC stack, *Journal of Power Sources*, Vol. 74, pp. 146-150, 1998.
- [8] M. Han, S. Chan, S. Jiang, Investigation of self-humidifying anode in polymer electrolyte fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 385-391, 2007.
- [9] Y. Liu, B. Yi, Z. Shao, L. Wang, D. Xing, H. Zhang, Pt/CNTs-Nafion reinforced and self-humidifying composite membrane for PEMFC applications, *Journal of Power Sources*, Vol. 163, pp. 807-813, 2007.
- [10] L. Wang, D. M. Xing, Y. H. Liu, Pt/SiO<sub>2</sub> catalyst as an addition to Nafion/PTFE self-humidifying composite membrane, *Journal of Power Sources*, Vol. 161, pp. 61-67, 2006.
- [11] S. Ge, X. Li, I. Hsing, Internally humidified polymer electrolyte fuel cells using water absorbing sponge, *Electrochimica Acta*, Vol. 50, pp. 1909-1916, 2005.
- [12] S. Litster, J. G. Santiago, Dry gas operation of proton exchange membrane fuel cells with parallel channels: Non-porous versus porous plates, *Journal of Power Sources*, Vol. 188, pp. 82-88, 2009.
- [13] D. L. Wood, J. S. Yiand, T. V. Nguyen, Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells, *ElectrochimicaActa*, Vol. 43, pp. 3795-3809, 1998.



شکل ۲۱ تأثیر دمای ورودی سمت مرطوب بر نقطه شبنم خروجی سمت خشک

## ۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، یک مدل ترمودینامیکی دائم از مرطوب‌ساز غشایی صفحه‌ای با جریان مخالف، ارائه شده که تأثیر بارز دما را در حل معادلات اعمال می‌کند. تأثیر پارامترهای عملکردی و انتقالی مرطوب‌ساز بر دماهای خروجی، نرخ انتقال بخار آب از غشا، رطوبت نسبی و نقطه شبنم خروجی گاز خشک بررسی شده است. دستاوردهای مطالعه بدین قرار می‌باشند.

۱- با افزایش دبی ورودی در سمت خشک، رطوبت نسبی در خروجی سمت خشک کاهش می‌یابد؛ اگرچه به علت اثر مخالف افزایش دما، شیب کاهش منحنی بسیار کم می‌باشد؛ به طوری که مقدار رطوبت نسبی با دو برابر شدن دبی جریان، تنها ۶ درصد کاهش می‌یابد. افزایش دبی ورودی سمت خشک، سبب کاهش نقطه شبنم خروجی سمت خشک می‌شود که به معنی افت عملکرد مرطوب‌ساز است.

۲- افزایش دبی ورودی در سمت مرطوب، به خصوص در دبی‌های بالای گاز مرطوب، تأثیر چندانی بر رطوبت نسبی در خروجی سمت خشک ندارد، اما سبب افزایش نقطه شبنم می‌شود که به منزله بهبود عملکرد مرطوب‌ساز است.

۳- در صورت استفاده از دبی مساوی از گازهای خشک و مرطوب (سیستم چرخه‌ای)، افزایش دبی سبب کاهش شدید نقطه شبنم خروجی سمت خشک می‌شود که افت شدید عملکرد مرطوب‌ساز را در پی دارد.

۴- با افزایش فشار ورودی کانال خشک، رطوبت نسبی و نقطه شبنم افزایش پیدا می‌کنند. از این رو بهتر است از فشارهای بیش‌تر از ۱ اتمسفر برای ورود گاز خشک استفاده کرد. این در حالی است که فشار ورودی سمت مرطوب اثر قابل توجهی بر رطوبت نسبی و نقطه شبنم خروجی سمت خشک ندارد.

۵- با افزایش دمای ورودی سمت خشک به اندازه ۳۰ درجه، نقطه شبنم خروجی سمت خشک تنها ۵ درجه افزایش می‌یابد و رطوبت نسبی خروجی سمت خشک نیز تغییر چندانی پیدا نمی‌کند. لذا پیش گرم کردن گاز خشک ورودی به مرطوب‌ساز ضروری به نظر نمی‌رسد.

۶- با افزایش دمای ورودی سمت مرطوب اگرچه نقطه شبنم افزایش می‌یابد، اما به علت بزرگ‌تر شدن مقدار اختلاف نقطه شبنم ورودی سمت مرطوب و خروجی سمت خشک، مرطوب‌ساز عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهد.

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) کمال تشکر و قدردانی را دارند.

- [20] P. Cave, W. Merida, Water flux in membrane fuel cell humidifiers: Flow rate and channel location, effects, *Journal of Power Sources*, Vol. 175, pp. 408-418, 2008.
- [21] R. Huizing, M. Fowler, W. Merida, J. Dean, Design methodology for membrane-based plate-and-frame fuel cell humidifiers, *Journal of Power Sources*, Vol. 180, pp. 265-275, 2008.
- [22] D. Chen, H. Peng, A thermodynamic model of membrane humidifiers for PEM fuel cell humidification control, *Journal of Dynamic systems, Measurement and Control*, Vol. 127, pp. 424-432, 2005.
- [23] S. Park, I. H. Oh, An analytical model of Nafion membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 188, pp. 498-501, 2009.
- [24] M. Sabharwal, C. Duelk, D. Bhatia, Two-dimensional modeling of a cross flow plate and frame membrane humidifier for fuel cell applications, *Journal of Membrane Science*, Vol. 409, pp. 285-301, 2012.
- [25] T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, S. Gottesfeld, Polymer Electrolyte Fuel Cell Model, *Journal Electrochemical Society*, Vol. 138, pp. 2334-2342, 1991.
- [26] 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*, Vol. 215, pp. 69-75, 2012.
- [14] G. Vasua, A. K. Tangirala, B. Viswanathan, K. S. Dhathathreyan, Continuous bubble humidification and control of relative humidity of H<sub>2</sub> for a PEMFC system, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 4640-4648, 2008.
- [15] A. Casalegno, S. D. Antonellis, L. Colombo F. Rinaldi, Design of an innovative enthalpy wheel based humidification system for polymer electrolyte fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 5000-5009, 2011.
- [16] D. Bhatia, M. Sabharwal, C. Duelk, Analytical model of a membrane humidifier for polymer electrolyte membrane fuel cell systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 58, pp. 702-717, 2013.
- [17] D. Chen, W. Li, H. Peng, An experimental study and model validation of a membrane humidifier for PEM fuel cell humidification control, *Journal of Power Sources*, Vol. 180, pp. 461-467, 2008.
- [18] 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*, Vol. 54, pp. 1344-1351, 2011.
- [19] B. J. Kim, M. S. Kim, Studies on the cathode humidification by exhaust gas recirculation for PEM fuel cell, *International Journal of hydrogen energy*, Vol. 37, pp. 4290-4299, 2012.