

# بررسی عددی تأثیر ابعاد هندسی مانع زانویی بر عملکرد مرطوبساز غشایی تخت در کاربرد پیل سوختی غشا پلیمری

**پدرام شمس‌زاده** کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، pedram.shamsizade@eng.ui.ac.ir  
**ابراهیم افشاری\*** دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، e.afshari@eng.ui.ac.ir

## چکیده

مرطوبسازی گازهای واکنشگر در پیل سوختی غشا پلیمری به دلیل حفظ رطوبت غشا امری حیاتی است. مرطوبسازهای غشایی به دلیل عملکرد مناسب، ساختار ساده و عمر بالا، کاربرد گسترده‌ای در مرطوبسازی گازهای واکنشگر دارند. در این تحقیق، عملکرد یک مرطوبساز غشایی در حضور موانع متقارن در هر دو کانال به صورت عددی، سه بعدی و دایم با نرم‌افزار Fluent بررسی شده و عملکرد آن با مرطوبساز ساده مقایسه گردیده است. سپس تأثیر ابعاد هندسی مانع زانویی با در نظر گرفتن پارامترهای نرخ بازیاب آب و دمای نقطه‌ی شبنم در خروجی کانال گاز خشک به عنوان معیارهای سنجش عملکرد بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی گاز خشک، عملکرد مرطوبساز کاهش می‌یابد. با نصب مانع دمای گاز خشک خروجی افزایش یافته که منتج از افزایش انتقال گرما در مرطوبساز است. در میان متغیرها، طول بال جلو، فواصل بین موانع، ارتفاع مانع، ارتفاع و فاصله‌ی مانع‌ها از سقف و کف کانال‌ها، فاصله از سقف و کف بیشترین تأثیر را بر عملکرد مرطوبساز دارد. حداکثر بهبود حاصل شده میان حالات بررسی شده برای نرخ بازیاب و دمای نقطه‌ی شبنم در خروجی کانال گاز خشک به ترتیب ۳ درصد و ۳/۵ درجه سلسیوس بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌سازی عددی، مرطوبساز غشایی، پیل سوختی غشا پلیمری، دمای نقطه‌ی شبنم، هندسه‌ی مانع، عملکرد.

## Numerical investigation of L-shaped obstacle geometrical parameters effects on the planar membrane humidifier performance in the PEM fuel cell application

**P. Shamsizadeh**  
**E. Afshari**

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

## Abstract

Humidification of polymer membrane fuel cell (PEMFC) reactant gases is necessary for keeping the membrane humidified. Planar membrane humidifiers are widely used for reactant gas humidification due to their proper performance, simple structure, and long life span. In this study performance of a planar membrane humidifier with symmetrical L-shaped obstacles in both channels is investigated numerically by ANSYS fluent and its performance is compared with a simple planar humidifier. The Effects of geometrical parameters are studied by 3D numerical modeling. Accordingly, two parameters of water recovery ratio (WRR) and dew point temperature at the dry channel outlet are considered the main performance criteria. Results show performance decreases with the increase of the gasses mass flow rates. Dry gas outlet temperature noticeably increases by the L-shaped obstacles insertion which indicates better heat transfer. The effect of four geometrical parameters of the obstacle consisting of obstacle length, height, the distance between the obstacles and the top and bottom of the channels, and their relative distance are investigated. Three values are considered for each geometrical variable, and the distance between the obstacles and the membrane exhibits more influence on the performance of the humidifier. The geometrical study improves the performance of the obstacles and raises the WRR and the dew point temperature by about 3% and 3.5 degrees, respectively.

**Keywords:** Numerical modeling, membrane humidifier, PEM fuel cell, dew point temperature, baffle geometry, performance.

کند. بنابراین هر دو مورد بالا و پایین بودن میزان آب غشا موجب کاهش عملکرد پیل سوختی خواهد شد. از این رو حفظ و کنترل رطوبت غشا در پیل‌های سوختی غشا پلیمری برای رسیدن به بازده بالا و عملکرد مناسب پیل را از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌سازد. برای این منظور پیش از ورود گازهای واکنشگر به پیل سوختی، آن‌ها توسط مرطوبساز مرطوب می‌شوند [۳]. میزان مرطوبسازی توسط مشخصات پیل و شرایط کاری آن تعیین می‌شود. بعضی تحقیقات نشان داده‌اند که در بسیاری مواقع مرطوبسازی ۱۰۰ درصدی گازهای واکنشگر پیل سوختی غشا پلیمری نیاز نیست و مرطوبسازی گازها با ۵۰ الی ۹۰ درصد کافی است [۴ و ۵]؛ بنابراین لازم است که گازهای واکنشگر قبل از ورود به پیل سوختی غشا پلیمری توسط مرطوبساز مرطوب شوند. امروزه انواع مختلفی از مرطوبسازها در دسترس هستند.

## ۱- مقدمه

امروزه پیل‌های سوختی غشا پلیمری به دلیل دمای عملکردی مناسب، چگالی توان بالا و زمان راه‌اندازی کوتاه‌تر نسبت به سایر پیل‌های سوختی، می‌تواند در طیف گسترده‌ای از وسایل مانند خودروها، تجهیزات الکترونیکی قابل‌حمل و فضاپیماها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱ و ۲]. مهم‌ترین بخش در پیل سوختی غشا پلیمری؛ غشای آن است که هادی پروتون است؛ اما در برابر عبور الکترون مانند یک سد عمل می‌کند. انتقال یون‌های مثبت در غشا زمانی امکان‌پذیر است که غشا مرطوب باشد. مقادیر کم آب در غشا به دلیل خشک شدن آن موجب کاهش هدایت یونی غشای پلیمری شده و مقادیر بیش از حد آب موجب غرق‌شدگی لایه نفوذ گاز و بسته شدن تخلخل‌های آن شده و در نتیجه انتقال گاز واکنشگر از کانال به لایه کاتالیست را مختل می‌

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: e.afshari@eng.ui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۶/۰۹/۲۰۲۰

تاریخ پذیرش: ۰۵/۳۰/۲۰۲۰

مرطوب‌سازهای حبایی، چرخ آنتالپی و مرطوب‌ساز غشایی در پیل‌های سوختی پرکاربردتر هستند. مرطوب‌سازهای حبایی دارای ساختمان ساده و کم‌هزینه هستند؛ اما از معایب آن می‌توان به افت فشار زیاد، نرخ رطوبت‌سازی غیریکنواخت و وابستگی شدید رطوبت‌زنی به ارتفاع ستون آب در مخزن مرطوب‌ساز اشاره کرد که در دبی‌ها بالا مدیریت رطوبت را مشکل می‌کند [۶]. مرطوب‌سازهای چرخ آنتالپی نیز با داشتن معایبی همچون پیچیدگی سیستم، توان مصرفی و هزینه‌ی نگهداری بالا برای برخی از کاربردها مناسب نیستند [۷]. مرطوب‌ساز غشایی بین همه‌ی روش‌ها مناسب‌تر است؛ زیرا مزایایی همچون ساختمان ساده، عمر طولانی و عدم مصرف توان اضافی به دلیل عدم وجود قطعه‌ی متحرک، کنترل مناسب بر نرخ مرطوب‌سازی و قابلیت یکپارچه‌سازی با پیل سوختی را دارا است. از این‌رو مطالعه راجع به این مرطوب‌ساز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در مرطوب‌سازهای غشایی گاز مرطوب با دما و رطوبت بالاتر و گاز خشک با رطوبت و دمای پایین‌تر وارد کانال‌های مرطوب‌ساز می‌شوند. غشا، گرما و رطوبت گاز مرطوب را به گاز خشک منتقل می‌کند. از این‌رو کانال‌ها، هندسه‌ی آن‌ها و هر عاملی که موجب افزایش برخورد و مجاورت بیشتر گاز مرطوب با غشا شود حائز اهمیت است. تعبیه موانع در داخل کانال‌ها نیز با تأثیر بر جریان سیال یک عامل بهبود در برخورد و افزایش زمان تبادل جرم و گرما بین کانال‌های گازهای مرطوب و خشک است.

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه‌ی بررسی و بهبود عملکرد مرطوب‌سازهای غشایی صورت گرفته است. مدل‌سازی عددی عملکرد یک مرطوب‌ساز غشایی تخت نشان می‌دهد که با افزایش دبی گاز خشک ورودی به مرطوب‌ساز، عملکرد مرطوب‌سازی کاهش پیدا می‌کند [۳]. آرایش‌های مختلف میدان شامل میدان سینوسی، پله‌ای و زیگ‌زاگ توسط هاشمی و همکاران [۸] مورد مطالعه‌ی عددی قرار گرفته و نشان داده شده است که مدل پله‌ای بهترین عملکرد را بین سه مدل مورد تحقیق دارد. بررسی تأثیر نصب موانع با سه هندسه‌ی مستطیلی، مثلثی و نیم‌دایره‌ای در کانال‌های گاز مرطوب مرطوب‌ساز صفحه‌ای نشان داده است که نصب موانع زانویی در کانال‌های مرطوب‌ساز موجب افزایش نرخ بازیاب آب و دمای نقطه‌ی شبنم در خروجی کانال‌های گاز خشک می‌شود؛ اما با نصب مانع افت فشار افزایش خواهد داشت. مقایسه‌ی افزایش انتقال گرما و افت فشار به طور هم‌زمان برای این موانع نشان می‌دهد که مانع مستطیل‌شکل افت فشار و افزایش انتقال گرما را به یک اندازه افزایش می‌دهد؛ در حالی که در دو هندسه‌ی دیگر اثر افت فشار غالب بوده است [۹]. پارک و جونگ [۱۰] عملکرد مرطوب‌ساز غشایی از نوع پوسته - لوله را برای کاربرد در خودروهای برقی مورد بررسی قرار دادند. هدف این تحقیق تعیین زمان پاسخ‌گویی مرطوب‌ساز در شرایط گذرا بوده است؛ به این معنی که زمان لازم برای پایا و آماده‌به‌کار شدن مرطوب‌ساز برای پیل سوختی به‌کار رفته در خودرو معین شود. کنگ و همکاران [۱۱] نیز با یک مدل دوبعدی به بررسی آرایش جریان در مرطوب‌سازهای پوسته - لوله پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که برای مرطوب‌ساز بررسی شده با آرایش جریان مخالف، می‌توان در دبی ۳ لیتر بر دقیقه انتقال گرما را تا ۹۰ وات و دمای نقطه‌ی شبنم را حدود ۹ درجه افزایش داد. بررسی دوبعدی مرطوب‌ساز غشایی تخت نیز نشان داده است که با

افزایش فشار و دبی گاز مرطوب، گاز خشک با رطوبت نسبی بیشتری از سمت خشک خارج می‌شود. همچنین در نتایج این پژوهش بیان شده است که فشار گاز مرطوب ورودی و نرخ بازیاب آب در مرطوب‌ساز رابطه‌ی مستقیم دارند [۱۲]. کیو و مریدا [۱۳] به بررسی اثر قرارگیری کانال در یک مرطوب‌ساز تخت تک کانال پرداختند و نشان دادند که مؤثرترین پارامتر بر انتقال رطوبت در مرطوب‌ساز غشایی تخت دبی گازهای ورودی است. همچنین بیان داشتند که اتلاف گرما از مرطوب‌ساز به محیط تأثیر چشمگیری بر عملکرد مرطوب‌ساز خواهد داشت. چن و همکاران [۱۴] مطالعه‌ای روی تأثیر متغیرهای هندسی کانال‌های مرطوب‌ساز غشایی تخت داشتند. در نتایج این تحقیق بیان شده است که با افزایش پهنا و کاهش ارتفاع کانال عمل رطوبت‌زنی بهبود می‌یابد. در یک تحقیق عددی دیگر نشان داده شده است که با افزایش فشار عملکردی مرطوب‌ساز غشایی تخت در صورتی که سایر متغیرها ثابت باشند؛ سبب افزایش آهنگ انتقال گرما و نسبت در خروجی کانال گاز خشک می‌شود [۱۵]. یان و همکاران [۱۶] نشان دادند که با افزایش دمای گازهای ورودی، افت فشار در طول کانال‌های مرطوب‌ساز غشایی تخت افزایش خواهد یافت؛ اما این افزایش چشمگیر نخواهد بود. تأثیر نصب لایه‌ی نفوذ گاز در مجاورت غشا نیز نشان داده است که این لایه‌ها با ایجاد تماس بیشتر گازهای ورودی با غشا سبب افزایش انتقال گرما در غشا خواهند شد [۱۷]. یو و همکاران [۱۸] با بررسی اثر غشا بر عملکرد مرطوب‌ساز غشایی نشان دادند که افزایش ضخامت غشا به علت افزایش مقاومت آن در برابر عبور آب، موجب کاهش و افزایش طول کانال موجب افزایش عملکرد آن می‌شود.

در این پژوهش به مدل‌سازی سه‌بعدی و بررسی متغیرهای هندسی موانع زانویی شکل به‌منظور افزایش عملکرد موانع زانویی شکل در مرطوب‌ساز غشایی تخت گاز - گاز پرداخته شده است. چهار متغیر هندسی شامل: فاصله‌ی موانع، ارتفاع، طول و فاصله‌ی آن‌ها از کف کانال خشک و سقف کانال مرطوب برای این هدف در نظر گرفته شده است. با تغییر هر متغیر، این تغییر به‌صورت متقارن در هر دو کانال اعمال شده است و تأثیر آن در دبی‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر ثانیه بررسی شده است.

## ۲- بیان مسئله

### ۲-۱- هندسه

مرطوب‌سازهای غشایی تخت از سه قسمت اصلی شامل: دو مجموعه کانال برای عبور گازهای خشک و مرطوب و غشا پلیمری تشکیل می‌شوند. مرطوب‌سازهای به دو دسته‌ی آب - گاز و گاز - گاز تقسیم می‌شوند. در مرطوب‌ساز آب - گاز، آب به طور مستقیم به کانال مرطوب و گاز خشک به کانال خشک وارد می‌شود؛ اما در نوع گاز - گاز، گاز مرطوب جایگزین آب ورودی به کانال مرطوب می‌شود. به علت تولید آب در کاتد پیل‌های سوختی، گازهای خروجی از کاتد پیل سوختی مرطوب هستند و به‌عنوان ورودی مرطوب در مرطوب‌ساز استفاده می‌شوند و یک فرایند چرخه‌ای ایجاد می‌شود. سیستم چرخه‌ای با ایجاد بهره‌وری از رطوبت و گرمای گاز خروجی از کاتد توان اتلافی می‌کاهد. گازها توسط کانال‌ها به مرطوب‌ساز وارد و از آن خارج می‌شوند. غشا پلیمری انتقال جرم و گرما بین گازها در کانال مرطوب و

## ۲-۲ - معادلات

معادلات حاکم در این مقاله به روش تک دامنه‌ای حل شده است. در این روش تنها شرایط مرزهای خارجی مشخص می‌شوند. از این رو از تعداد شرایط مرزی (به‌خصوص مرزهایی که اطلاع دقیقی هم از شرایط آن‌ها وجود ندارد) کاسته شده و دقت حل افزایش پیدا می‌کند. معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و گونه‌ها معادلات حاکم بر مسئله هستند که کاملاً غیرخطی هستند. به‌منظور ساده‌سازی معادلات و فرایند حل مسئله مفروضاتی به شرح زیر اعمال شده است.

(۱) از میعان آب در کانال‌های مرطوب‌ساز صرف‌نظر و جریان تک‌فاز در نظر گرفته شده است. در نتیجه انتقال آب از غشا به‌صورت بخار است.

(۲) مخلوط گازها ایده‌آل در نظر گرفته شده است.

(۳) جریان سیال در کانال‌ها لایه‌ای، تراکم‌ناپذیر (رینولدز و ماخ به ترتیب کمتر از ۲۳۰۰ و ۰/۳) و پایا است.

(۴) غشا در مقابل گازهای ورودی نفوذناپذیر است.

(۵) مرزهای خارجی مرطوب‌ساز عایق هستند و انتقال گرما تنها از طریق غشا امکان‌پذیر است.

(۶) از اثر نیروی حجمی گرانش صرف‌نظر شده است.

با اعمال این مفروضات، معادلات حاکم به شرح زیر خواهند بود.

### معادله بقای جرم

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

در این معادله،  $\rho$  چگالی و  $\vec{u}$  سرعت مخلوط گاز است.

### معادله بقای مومنتوم

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

در معادله (۲)،  $\varepsilon$  ضریب تخلخل غشا،  $\rho$  و  $\mu$  به ترتیب فشار و لزجت مخلوط گاز هستند. همچنین، جمله چشمه به‌منظور اطمینان از بقای مومنتوم و تعیین سرعت ظاهری در نواحی تماس مخلوط گاز و غشا به‌صورت زیر تعریف شده است [۱۹].

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

در معادله بالا،  $K$  ضریب عبوردهی غشا است. مقدار جمله چشمه در کانال‌ها صفر است؛ زیرا کانال‌ها محیط متخلخل نیستند.

### معادله بقای گونه‌ها

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

در معادله (۴)  $C^i$  و  $D^i$  به ترتیب غلظت و ضریب پخش جزء  $i$  هستند. غلظت بخار آب از معادله (۵) به دست می‌آید [۲۰].

$$C^{H_2O} = \frac{\lambda \rho_{mem,dry}}{W_{mem,dry}} \quad (5)$$

$\lambda$  و  $\rho_{mem,dry}$  چگالی و وزن معادل غشا خشک می‌باشند.

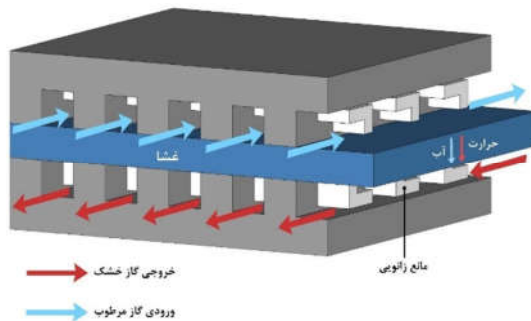
محتوی آب غشا است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۱].

$$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 33a^3 & 0 < a \leq 1 \\ 14 + 1.4(a-1) & 1 < a \leq 3 \end{cases} \quad (6)$$

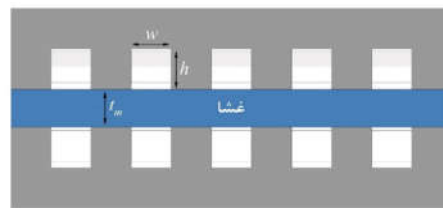
که  $a$  فعالیت بخار آب در غشا است و به طریق زیر محاسبه می‌شود.

$$a = \frac{C^{H_2O} RT}{P_{sat}} \quad (7)$$

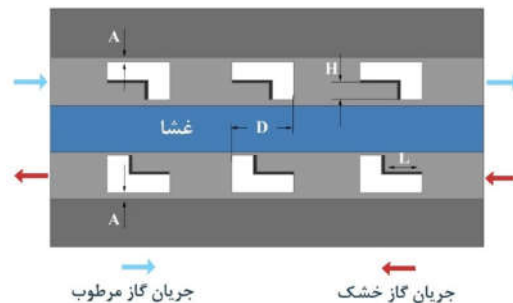
خشک توسط غشا صورت می‌پذیرد. غشا نسبت به عبور گازها مقاوم است؛ اما آب را از خود عبور می‌دهد. انتقال جرم و گرما در مرطوب‌ساز به ترتیب به دلیل اختلاف فشار جزئی بخار آب و گرادیان دما بین کانال‌های مرطوب و خشک است. از این رو غشا را می‌توان مهم‌ترین بخش در یک مرطوب‌ساز غشایی به‌حساب آورد. افزایش زمان ماند گاز در کانال‌ها و افزایش برخورد آن‌ها با غشا منجر به افزایش جرم و انتقال گرما در مرطوب‌ساز خواهد شد. افزودن مانع یک روش مناسب برای تقویت این امر است؛ زیرا موجب افزایش برخورد آن با غشا و زمان ماند گاز خواهد شد. موانع زانویی با توجه به شکل هندسی خود موجب هدایت و به‌دام‌اندازی بیشتر گاز در کانال‌ها و در مجاورت غشا خواهند شد و برخورد مناسبی را بین گاز و غشا ایجاد می‌کنند. در ناحیه‌ی زیرین موانع سرعت گاز به دلیل باریک شدن مجرای عبور گاز سرعت گاز افزایش پیدا می‌کند و از عملکرد موانع می‌کاهد. به همین منظور در تحقیق حاضر با بررسی ابعاد هندسی موانع زانویی سعی در بهبود عملکرد موانع شده است. شکل ۱ نشان‌دهنده هندسه مدل‌سازی شده و متغیرهای هندسی بررسی شده است. مرطوب‌ساز از نوع جریان مخالف بوده و موانع در هر دو کانال خشک و مرطوب تعبیه شده‌اند و تعداد آن‌ها در هر کانال ۱۰ عدد است.



(الف)



(ب)



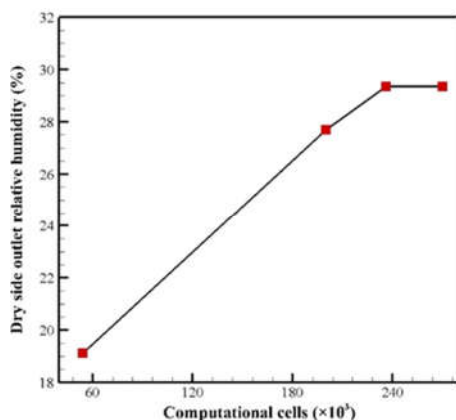
(ج)

شکل ۱- الف) مرطوب‌ساز غشایی تخت همراه با موانع زانویی در هر دو کانال، ب) متغیرهای هندسی مانع و ج) ابعاد کانال

۳۵۳/۱۵	K	T	دمای ورودی گاز مرطوب
۳۰۰	K	T	دمای ورودی گاز خشک
<b>پارامترهای انتقالی</b>			
$1/78 \times 10^{-5}$	Pa.s	$\mu$	لزجت هوا
$1/3 \times 10^{-5}$	Pa.s	$\mu$	لزجت بخار آب
$7/3 \times 10^{-5}$	$\text{sm}^2$	$D_{H_2O}$	ضریب پخش آب
<b>خواص مواد</b>			
۱۹۸۰	$\text{kg/m}^3$	$\rho$	چگالی غشا خشک
۰/۵	$\epsilon$		ضریب تخلخل غشا
$10^{-12}$	$\text{m}^2$	K	ضریب نفوذپذیری غشا
۰/۹۵	W/m.K	K	ضریب رسانایی گرمایی غشا
۰/۰۲۸	W/m.K	K	ضریب رسانایی گرمایی هوا
۱	kJ/kg	$c_p$	ظرفیت گرمایی هوا در ۳۰۰ کلوین
۱/۷۵	$\text{kg/m}^3$	$\rho$	چگالی هوا در ۳۰۰ کلوین
۰/۰۲۳۷	W/m.K	k	ضریب رسانایی گرمایی بخار آب

#### ۴-۲ - روش حل عددی

معادلات (۱)، (۲)، (۴) و (۱۰) با استفاده از روش تک دامنه‌ای و توسط نرم‌افزار Fluent برای این مسئله حل شده‌اند. در روش تک دامنه‌ای معادلات حاکم برای تمامی نواحی مرطوب‌ساز به طور یکسان حل می‌شوند؛ اما در غیاب برخی از گونه‌ها در برخی نواحی مانند گاز در غشا؛ از جملات چشمه‌ی بسیار بزرگ در معادله‌ی بقای گونه‌ها استفاده شده است تا از نبود گاز در غشا اطمینان حاصل شود [۲۵]. معادلات حاکم غیرخطی و کاملاً کوپل هستند. برای مثال دما بر لزجت سیال اثرگذار است و لزجت در معادله‌ی مومنتوم وارد می‌شود. دقت حل برای همه‌ی متغیرها حداقل  $10^{-5}$  در نظر گرفته شده است. استقلال نتایج از تعداد نقاط محاسباتی با در نظر گرفتن رطوبت نسبی در خروجی کانال گاز خشک به‌عنوان معیار بررسی شده است. در نواحی نزدیک به موانع از شبکه‌ی منسجم‌تری استفاده شده است؛ چراکه تغییرات سرعت و فشار در این نواحی شدید است. بررسی چهار شبکه‌ی محاسباتی با تعداد ۵۴۲۰۰، ۲۰۰۰۰۰، ۲۳۶۰۰۰ و ۲۷۰۰۰۰ سلول محاسباتی نشان داد که نتایج با استفاده از ۲۳۶۰۰۰ سلول محاسباتی از شبکه مستقل خواهند شد. شکل ۲ نشان‌دهنده‌ی این موضوع است.



شکل ۲- بررسی استقلال از شبکه با معیار رطوبت نسبی در خروجی کانال خشک مرطوب‌ساز

در رابطه‌ی (۷)، R ثابت جهانی گاز و T دما بر حسب کلوین است. همچنین ضریب پخش جز i از رابطه‌ی (۸) قابل محاسبه است [۲۲].

$$D^i = D_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.5} \left(\frac{P_0}{P}\right) \quad (8)$$

در رابطه‌ی (۸)،  $D_0$  ضریب پخش در دما و فشار استاندارد ( $T_0$  و  $P_0$ ) است. نفوذ آب در غشا از رابطه‌ی (۹) به دست می‌آید [۲۳].

$$D_{mem}^{H_2O} = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-7} \lambda (e^{0.28\lambda} - 1) e^{(-2346/T)}, & 0 < \lambda \leq 3 \\ 4.17 \times 10^{-7} \lambda (1 + 161e^{-\lambda}) e^{(-2346/T)}, & \lambda > 3 \end{cases} \quad (9)$$

#### معادله‌ی بقای انرژی

$$\nabla \cdot (\rho c_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \quad (10)$$

در رابطه‌ی (۱۰)،  $c_p$  ظرفیت گرمایی و  $k_{eff}$  ضریب رسانایی گرمایی مؤثر هستند. در نواحی متخلخل از ضریب رسانایی گرمایی مؤثر و در کانال‌ها از ضریب رسانایی گرمایی مخلوط گاز استفاده شده است. این ضریب در غشا که تنها ناحیه‌ی متخلخل در این مسئله است به روش زیر قابل دستیابی است [۲۴].

$$k_{eff} = \frac{1}{\frac{1-\epsilon}{3k_{mem}} + \frac{\epsilon}{2k_{mem} + k_w}} - 2k_{mem} \quad (11)$$

که  $k_w$  و  $k_{mem}$  ضرایب هدایت گرمایی غشا و بخار آب هستند.

#### ۳-۲ - شرایط مرزی

به علت انتخاب روش تک دامنه‌ای، نیازی به تعریف شرایط مرزی در مرزهای تماس اجزای مرطوب‌ساز با یکدیگر نیست و تنها شرایط مرزهای خارجی باید مشخص شوند. مرزهای ورودی کانال‌ها با دما، رطوبت نسبی و دبی جرمی ثابت تعیین شده‌اند. دیواره‌های خارجی مرطوب‌ساز عایق و با شار گرمایی صفر هستند. همچنین دیواره‌های کانال نیز عایق در نظر گرفته شده‌اند تا انتقال گرما تنها از طریق غشا صورت گیرد. همچنین در خروجی‌های کانال شرط مرزی فشار ثابت در نظر گرفته شده است و فشار عملکردی مرطوب‌ساز ۱ اتمسفر است. مشخصات هندسی و پارامترهای انتقالی مرطوب‌ساز در جدول ۱ مشخص شده است.

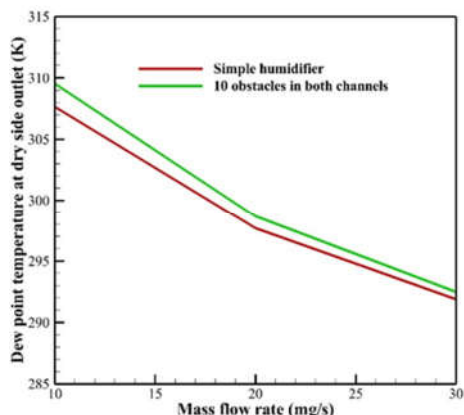
جدول ۱- مشخصات هندسی و پارامترهای انتقالی مرطوب‌ساز

تعریف	نماد	واحد	مقدار
<b>پارامترهای هندسی</b>			
ارتفاع کانال	$h$	mm	۲
پهنای کانال	$w$	mm	۲
طول کانال	$l$	mm	۱۰۰
ضخامت غشا	$t_m$	mm	۰/۲
ارتفاع مانع	H	mm	۰/۶
طول مانع	L	mm	۲
فاصله‌ی اولیه‌ی مانع از غشا	-	mm	۰/۵
فاصله‌ی نسبی موانع	D	mm	۱/۵
مساحت غشا	A	$\text{m}^2$	۲۰۰
<b>شرایط عملیاتی</b>			
دبی گاز مرطوب و خشک	$\dot{m}$	mg/s	۱۰
فشار عملیاتی	P	atm	۱
رطوبت نسبی گاز مرطوب ورودی	$\phi$	%	۱۰۰
رطوبت نسبی گاز خشک ورودی	$\phi$	%	۰

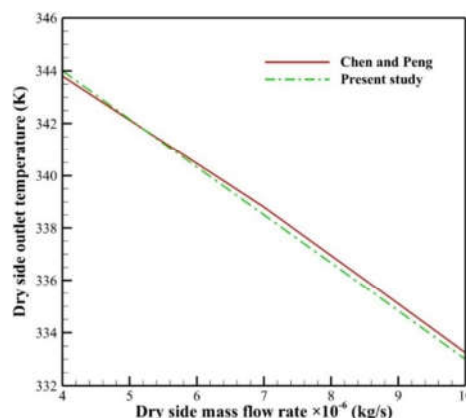
### ۳- نتایج

#### ۳-۱- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی نتایج، مقایسه‌ای بین دما در خروجی گاز خشک مرطوب‌ساز غشایی در مدل حاضر و تحقیق انجام شده بر عملکرد مرطوب‌ساز غشایی توسط چن و پنگ [۲۶] صورت گرفته است. شکل ۳ نشان‌دهنده دماهای خروجی است. با توجه به شکل ۳ می‌توان دریافت که تطابق مناسب بین نتایج برقرار است.



شکل ۴- دمای نقطه‌ی شبنم در خروجی کانال خشک



شکل ۳- دمای خروجی از کانال خشک مرطوب‌ساز تحقیق حاضر و تحقیق چن و پنگ [۲۶]

#### ۳-۲- تأثیر طول مانع بر عملکرد

با تغییر پارامترهای هندسی موانع، عملکرد مرطوب‌ساز تغییر می‌کند. در مرطوب‌ساز غشایی عوامل تأثیرگذار بر عملکرد زمان ماند گاز در کانال‌ها و میزان برخورد گازها با غشا هستند. با ایجاد هرگونه تغییر در ساختمان مرطوب‌ساز که بر این دو عامل تأثیر داشته باشد، عملکرد مرطوب‌ساز تغییر خواهد داشت. در شرایطی که گاز مرطوب با دمای ۳۵۳/۱۵ کلوین و گاز خشک با دمای ۳۰۰/۱۵ وارد مرطوب‌ساز شوند با تغییر طول مانع زانویی، عملکرد مرطوب‌ساز تغییر می‌کند، اما با کاهش یا افزایش طول مانع (L) تغییرات عملکرد روند یکنواختی ندارند. شکل ۵ نشان‌دهنده تغییرات شاخص‌های عملکردی مرطوب‌ساز با تغییر طول موانع است. در این حالت فاصله از سقف و کف کانال (A) ۰/۴ میلی‌متر، ارتفاع (H) ۰/۴ میلی‌متر و فاصله‌ی نسبی (D) ۱/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه شکل ۵ می‌توان دریافت که افزایش طول مانع، نرخ بازیاب آب را کاهش می‌دهد. طول مانع تأثیر مشابهی بر دمای نقطه‌ی شبنم دارد. با مقایسه‌ی اثر طول بر رطوبت نسبی و دمای خروجی گاز خشک دریافت می‌شود که تأثیر طول مانع بیشتر بر افزایش انتقال جرم مشهود است؛ زیرا بر دمای خروجی گاز خشک تأثیر ناچیزی دارد.

#### ۳-۲- تأثیر نصب مانع بر عملکرد مرطوب‌ساز

دو پارامتر نرخ بازیاب آب و دمای نقطه‌ی شبنم در خروجی کانال گاز خشک به‌عنوان معیارهای اصلی عملکرد مرطوب‌ساز در نظر گرفته شده است. نرخ بازیاب آب تعیین‌کننده‌ی انتقال جرم و دمای نقطه‌ی شبنم اثر هم‌زمان انتقال جرم و افزایش انتقال گرما در مرطوب‌ساز را نشان می‌دهند. این دو پارامتر و معادلات وابسته‌ی آن‌ها به‌صورت معادلات ۱۲ تا ۱۵ مشخص شده‌اند.

$$WRR = \frac{M_{v,mem}}{M_{v,wet\_in}} \quad (12)$$

جرم آب منتقل شده توسط غشا توسط رابطه‌ی (۱۲) محاسبه شده و به‌صورت زیر است.

$$M_{v,mem} = M_{v,dry\_out} - M_{v,dry\_in} \quad (13)$$

دمای نقطه‌ی شبنم نیز توسط رابطه‌ی زیر محاسبه شده است.

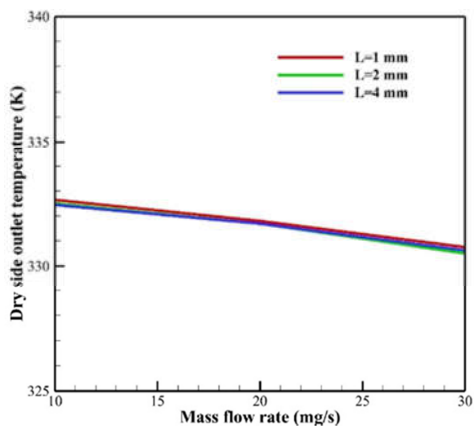
$$P_{sat}(T = T_{dp}) = P_{sat}(T = T_{out}) \times \varphi_{out} \quad (14)$$

$\varphi_{out}$  رطوبت نسبی در خروجی کانال خشک مرطوب‌ساز و فشار اشباع در دمای T بر حسب درجه‌ی سلسیوس است که به‌صورت زیر به دست می‌آید.

$$P_{sat} = 0.61078 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (15)$$

در این روابط،  $M_{v,mem}$  و  $T_{dp}$  به ترتیب جرم آب منتقل شده توسط غشا و دمای نقطه‌ی شبنم در خروجی کانال هستند. همچنین  $M_{v,dry\_in}$  و  $M_{v,dry\_out}$  جرم بخار موجود در گاز خشک ورودی و جرم بخار موجود در گاز خشک خروجی هستند.

مقایسه‌ی عملکرد مرطوب‌سازهای همراه با مانع زانویی و ساده



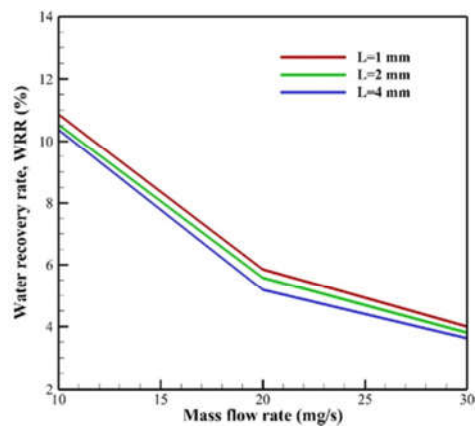
(د)

شکل ۵- الف) نرخ بازیاب آب، ب) دمای نقطه‌ی شبنم در خروجی کانال خشک، ج) رطوبت نسبی و د) دمای گاز خشک خروجی از مرطوب‌ساز همراه با مانع زائویی در طول‌های مختلف مانع

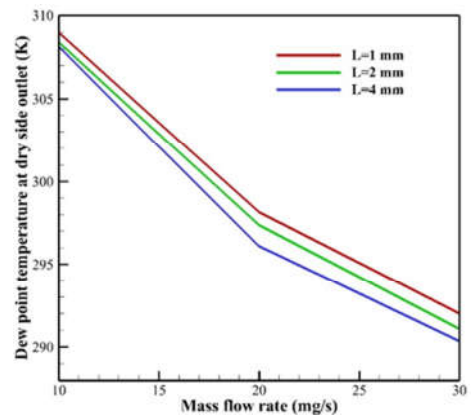
هنگام عبور گاز چنان‌چه فاصله‌ی مانع‌ها از یکدیگر در یک کانال تغییر نکند؛ با افزایش طول مانع فضای کمتری در اختیار گاز برای عبور و رسیدن به غشا خواهد بود. نتیجه‌ی این امر کاهش عملکرد مرطوب‌ساز با افزایش طول در شرایط عملیاتی است؛ زیرا مانع قابلیت خود را برای هدایت بیشتر گاز از بالای کانال به سمت غشا از دست می‌دهد که موجب عبور بیشتر گاز از بالای موانع زائویی خواهد شد. این امر موجب می‌شود که میزان گاز مرطوب در مجاورت غشا کمتر شود. کاهش گاز مرطوب در مجاورت غشا، کاهش اختلاف غلظت را به دنبال خواهد داشت و این امر دلیل اصلی کاهش عملکرد مرطوب‌ساز با افزایش طول موانع است.

### ۳-۴- تأثیر ارتفاع مانع بر عملکرد مرطوب‌ساز

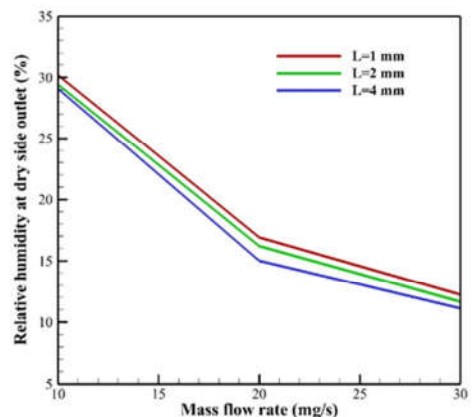
بررسی اثر ارتفاع مانع در شرایطی که سایر پارامترها ثابت باشند نیز نشان داده است که با افزایش ارتفاع مانع عملکرد مرطوب‌ساز بهبود می‌یابد. با افزایش ارتفاع مانع در فاصله‌ی یکسان از سقف و کف کانال‌ها، مانع توان بیشتری در افزایش زمان ماند توده‌ی گاز در مجاورت با غشا خواهد داشت. با افزایش زمان ماند گاز انتقال گرما و انتقال جرم افزایش می‌یابد و عملکرد مرطوب‌ساز بالا خواهد رفت. در نواحی زیرین موانع به علت باریک بودن مجرای عبور؛ گاز سرعت بیشتری می‌گیرد؛ اما اثر مثبت افزایش زمان ماند زیر مانع و برخورد گاز با غشا بسیار بیشتر از اثر منفی ناحیه‌ی با سرعت بالا خواهد بود. شکل ۶ نشان‌دهنده‌ی تأثیر تغییر ارتفاع مانع در حالتی است که طول مانع و فاصله از سقف به ترتیب ۱ و ۰/۴ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع کانال، عملکرد مرطوب‌ساز بهبود یافته است. اما با مقایسه‌ی نمودارهای تغییرات نرخ بازیاب آب و دمای خروجی دریافت می‌شود که افزایش عملکرد ناشی از افزایش انتقال گرما بوده است و تغییرات انتقال جرم با ارتفاع مانع قابل چشم‌پوشی است. تقریباً در همه‌ی دبی‌ها، رطوبت نسبی با افزایش ارتفاع مانع کاهش می‌یابد؛ اما دمای خروجی مخصوصاً در دبی‌های بالا افزایش داشته است. به عبارتی در دبی‌های پایین، تأثیر تغییر ارتفاع مانع بر



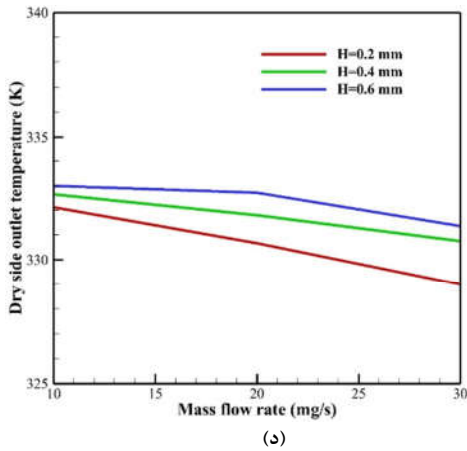
(الف)



(ب)



(ج)



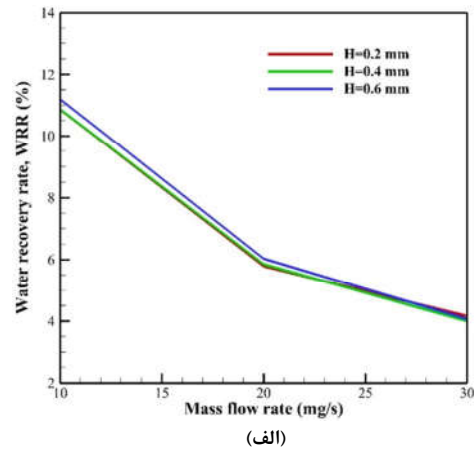
شکل ۶- الف) نرخ باز یاب آب، ب) دمای نقطه‌ی شبنم در خروجی کانال خشک، ج) رطوبت نسبی و د) دمای گاز خشک خروجی از مرطوب‌ساز همراه با مانع زائویی در ارتفاع‌های مختلف مانع

### ۳-۵- تأثیر فاصله‌ی موانع از سقف و کف کانال‌ها

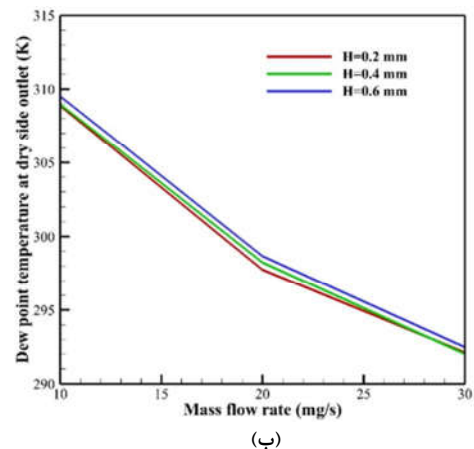
با بررسی تأثیر تغییرات فاصله‌ی موانع از سقف و کف کانال‌ها مشاهده می‌شود که تأثیر این متغیر از دو پارامتر پیشین بیشتر است. مقایسه‌ی عملکرد مرطوب‌ساز در فواصل مختلف مانع‌ها از سقف و کف در حالتی که ارتفاع و طول آن‌ها ۰/۶ و ۱ میلی‌متر است در شکل ۷ نشان داده شده است. عملکرد مرطوب‌ساز با افزایش فاصله از ۰/۲ به ۰/۴ تغییر خواهد داشت. با افزایش فاصله از ۰/۴ به ۰/۶ عملکرد افزایش چشمگیری داشته است. با افزایش فاصله، موانع به غشا نزدیک‌تر می‌شوند که افزایش برخورد گاز به غشا را به دنبال خواهد داشت. افزایش عملکرد در این حالت بیشتر توسط انتقال جرم صورت گرفته است؛ اما انتقال گرما نیز در مرطوب‌ساز بهبود یافته است که تأثیر این متغیر را بر عملکرد آن دوچندان ساخته و دمای نقطه‌ی شبنم را بیش از ۲/۵ درجه افزایش داده است. شکل ۷ بیانگر این موضوع است. با افزایش ارتفاع مانع قسمتی پایینی مانع به غشا نزدیک می‌شود؛ اما تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد ندارد. دلیل این امر این است که در افزایش فاصله، نواحی با سرعت بالا تنها به ناحیه‌ی زیرین مانع محدود می‌شود؛ اما در افزایش ارتفاع علاوه بر نواحی زیرین سرعت گاز در نواحی بالای مانع افزایش می‌یابد که در مرطوب‌ساز امر مطلوبی نیست. به همین دلیل در طراحی موانع باید از ایجاد نواحی که سرعت گاز را افزایش می‌دهند پرهیز کرد.

بررسی هم‌زمان تأثیر سه مقدار بررسی شده برای متغیرهای هندسی طول مانع، ارتفاع و فاصله‌ی آن‌ها از سقف و کف که در مجموع ۲۷ حالت مختلف است نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن تأثیر هم‌زمان این متغیرها، عملکرد مرطوب‌ساز در صورتی که طول مانع ۲ میلی‌متر و ارتفاع و فاصله‌ی آن از سقف و کف ۰/۶ باشد عملکرد بهتری در بین این حالات حاصل خواهد شد. افزایش دمای نقطه‌ی شبنم در این حالت نسبت به حالتی که طول مانع ۱ میلی‌متر باشد در بیشترین دبی بررسی شده (۳۰ میلی‌گرم بر ثانیه) ۰/۱۲ درجه است و به ۲۹۹/۹ کلوین می‌رسد.

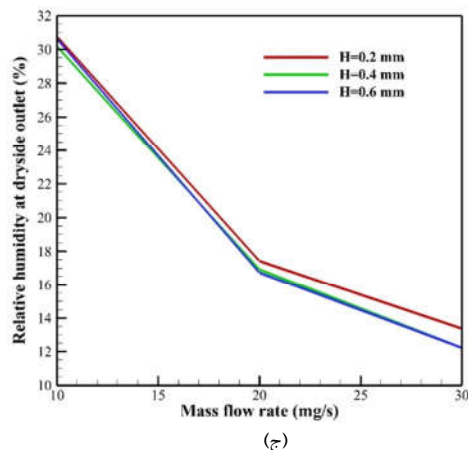
انتقال جرم محسوس‌تر است. در دبی‌های پایین گاز؛ با قرار دادن مانع و تغییر ارتفاع آن زمان ماند گاز داخل کانال بیشتر بوده و فرصت تبادل گرما بین گازها در دو سمت خشک و مرطوب افزایش می‌یابد. با افزایش دمای گاز، ظرفیت گاز برای ذخیره‌ی بخار افزایش می‌یابد و باعث می‌شود که رطوبت نسبی به‌تنهایی معیار مناسبی برای سنجش عملکرد مرطوب‌ساز نباشد؛ زیرا ممکن است گاز در دمای بالاتر و رطوبت نسبی پایین‌تر نسبت به گاز با دمای پایین و رطوبت نسبی بالاتر حاوی بخار آب بیشتری باشد. به همین منظور دمای نقطه‌ی شبنم و نرخ باز یاب آب معیارهای مناسب‌تری برای سنجش عملکرد یک مرطوب‌ساز هستند؛ زیرا اثر هم‌زمان انتقال جرم و گرما در آن‌ها دیده می‌شود.



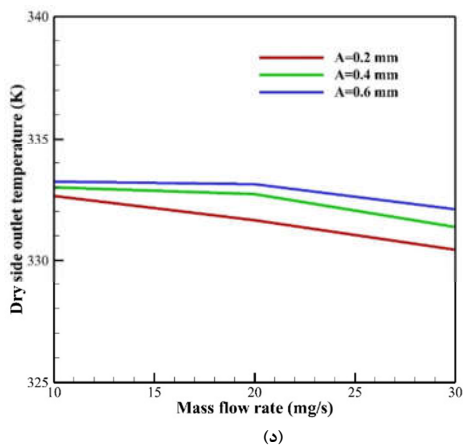
الف)



ب)



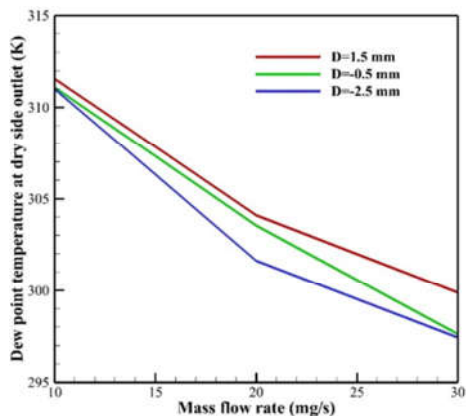
ج)



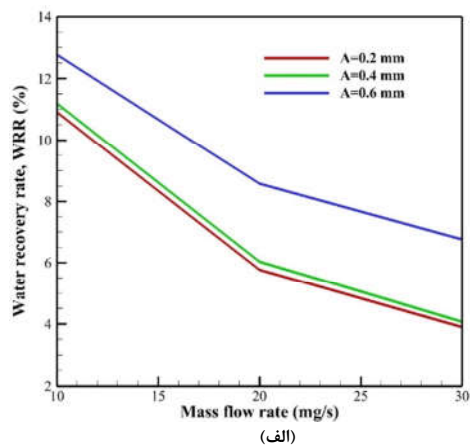
شکل ۷- الف) نرخ باز یاب آب، ب) دمای نقطه‌ی شبنم در خروجی کانال خشک، ج) رطوبت نسبی و د) دمای گاز خشک خروجی از مرطوب‌ساز همراه با مانع زائویی

### ۳-۶- تأثیر فاصله‌ی نسبی موانع

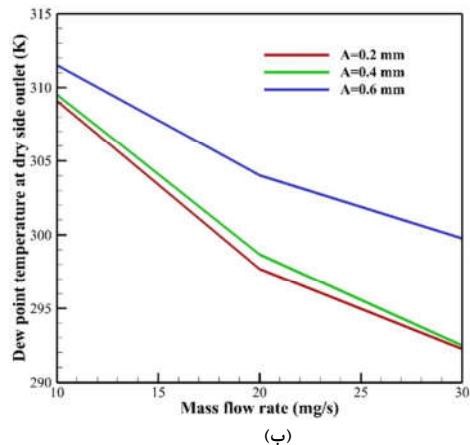
با توجه به جدول ۱، در همه‌ی نتایج بررسی شده، فاصله‌ی نسبی موانع (D) مشابه و برابر ۱/۵ میلی‌متر بوده است. بررسی فاصله‌ی نسبی موانعها در شرایطی که طول مانع برابر ۲ میلی‌متر و دو پارامتر دیگر برابر ۰/۶ میلی‌متر باشند؛ نشان می‌دهد که عملکرد در حالتی که فاصله‌ی نسبی ۱/۵ میلی‌متر باشد؛ بهتر از سایر حالات است و دو مقدار بررسی‌شده‌ی دیگر یعنی ۰/۵- و ۲/۵- میلی‌متر کاهش عملکرد را نشان دادند. علامت منفی به معنی است که موانع یکدیگر عبور کرده‌اند. شکل ۸ نشان‌دهنده‌ی دمای نقطه‌ی شبنم در این حالات است. با توجه به شکل ۸ مشخص می‌شود که بین سه حالت بررسی شده در فاصله‌ی نسبی ۱/۵ میلی‌متری عملکرد موانع به‌ویژه در دبی‌های بالا (بیشتر از ۲۰ میلی‌گرم بر ثانیه) بهتر می‌شود. این بهبود در بالاترین دبی بررسی شده (۳۰ میلی‌گرم بر ثانیه) به بیش از ۲/۴ درجه می‌رسد. با تغییر این فاصله، نحوه‌ی برخورد گازهای مرطوب و خشک با غشا تغییر می‌کند و موجب این می‌گردد که نواحی با سرعت بالا در کانال در مجاورت یکدیگر قرارگیرند و موجب افزایش عملکرد می‌شود.



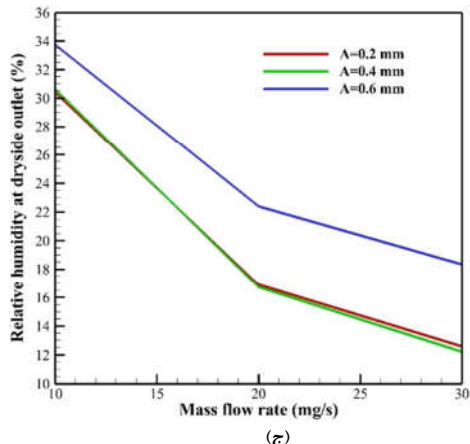
شکل ۸- دمای نقطه‌ی شبنم در خروجی کانال گاز خشک در مقادیر مختلف فاصله‌ی نسبی مانع‌ها



الف)



ب)



ج)



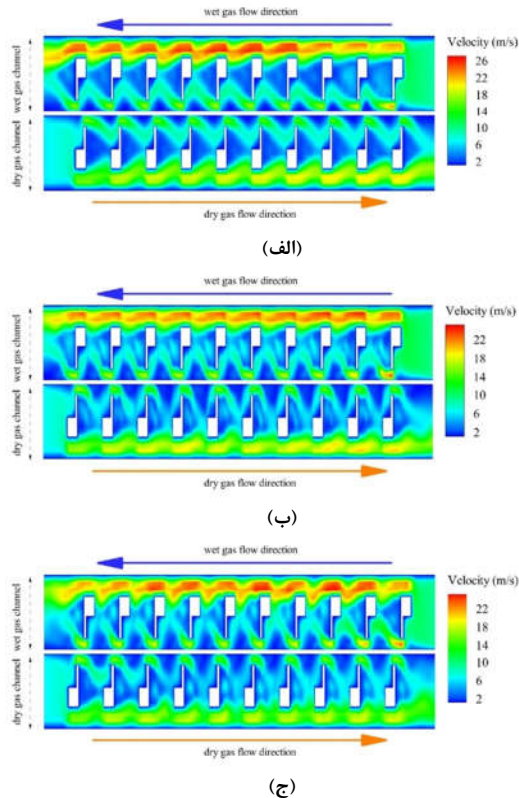
کانال‌ها موازی هستند، افت فشار داخل کانال‌ها ناچیز است و با اضافه شدن مانع هر چند که افت فشار بالاتر از کانال‌های موازی ساده است؛ اما باز هم نسبتاً پایین است. به عنوان نمونه اگر از کانال‌های مارپیچی در مرطوب‌ساز استفاده شود؛ به دلیل افت فشارهای کلی (افت‌های اصطکاکی) و جزئی (ناشی از خم‌ها)، افت فشار بسیار بالا می‌باشد [۲۷].

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل‌سازی عددی یک مرطوب‌ساز غشایی همراه با موانع زانویی در کانال‌های آن، باهدف بهبود عملکرد مانع انجام شده است. گاز مرطوب ورودی در این مدل‌سازی کاملاً مرطوب و در دمای ۳۵۳/۱۵ کلوین به‌عنوان گاز دریافتی از کاند پیل سوختی در نظر گرفته شده است. تأثیر چهار متغیر هندسی طول، ارتفاع، فاصله از سقف و کف کانال و فاصله‌ی نسبی موانع بر عملکرد مرطوب‌ساز بررسی شده است و نرخ بازیاب آب و دمای نقطه‌ی شبنم به‌عنوان معیارهای اصلی عملکرد در نظر گرفته شده است. دمای گاز سمت مرطوب از گاز سمت خشک بالاتر است. از این‌رو به دلیل این اختلاف دما، گرما از گاز سمت مرطوب به گاز سمت خشک منتقل می‌شود. از آنجایی که مرطوب‌ساز عایق می‌باشد؛ انتقال گرما صرفاً از گاز مرطوب به سمت گاز خشک است و گرما به محیط منتقل نمی‌شود. افزودن مانع زانویی در کانال‌های مرطوب‌ساز به دلیل افزایش زمان ماند گازها در کانال‌های مجاورت غشا و برخورد بیشتر با آن، نرخ بازیاب آب و دمای نقطه‌ی شبنم را در خروجی کانال خشک افزایش داده که نتیجه‌ی آن بهبود انتقال گرما و جرم بین سمت مرطوب و خشک و افزایش دمای گاز خروجی سمت خشک و افزایش بازده مرطوب‌ساز است. نتایج حاصل به شرح زیر خلاصه شده است:

- ۱) افزودن مانع زانویی در کانال‌های مرطوب‌ساز نرخ بازیاب آب و دمای نقطه‌ی شبنم را در خروجی کانال خشک با افزایش زمان ماند گازها در کانال در مجاورت غشا و برخورد با آن افزایش داده و در نتیجه عملکرد مرطوب‌ساز را بهبود می‌بخشد.
- ۲) تغییر طول مانع و افزایش آن موجب کاهش عملکرد مانع خواهد شد. عمده‌ی تأثیر طول مانع بر میزان انتقال جرم است و بر انتقال گرما تأثیر چندانی ندارد.
- ۳) افزایش ارتفاع مانع بر خلاف طول آن، تأثیر بیشتری بر انتقال گرما دارد؛ زیرا موجب هدایت بیشتر گاز به سمت غشا می‌شود. اما با بیشتر شدن ارتفاع نواحی پر سرعت در مجاورت غشا ایجاد می‌شود و از تأثیر این متغیر بر انتقال جرم می‌کاهد.
- ۴) با افزایش فاصله‌ی موانع از سقف و کف کانال‌های مرطوب و خشک عملکرد به طور قابل توجهی افزایش خواهد داشت.
- ۵) با بررسی هم‌زمان ۲۷ حالت برای سه متغیر هندسی مشخص گردید که عملکرد مانع در حالتی که طول، ارتفاع و فاصله‌ی آن از سقف و کف کانال به ترتیب ۰/۶، ۰/۶ و ۰/۶ میلی‌متر باشد بهتر است.
- ۶) تغییر فاصله‌ی نسبی موانع در کانال‌های مرطوب و خشک در صورتی که نواحی پر سرعت مجاور غشا را در کانال‌ها برهم منطبق کند از تأثیر مانع بر افزایش عملکرد می‌کاهد.

برای درک بهتر این موضوع، شکل ۹ نشان دهنده‌ی توزیع سرعت در کانال‌ها در حالات بیان شده است. در حالت فاصله‌ی ۱/۵ میلی‌متر، نواحی سرعت بالا در کانال مرطوب، بیشتر در مجاورت نواحی سرعت پایین در کانال خشک هستند. به عبارت دیگر سرعت نسبی گازها در این حالت کمتر از سایر حالات بوده که امری مطلوب است.



شکل ۹- اثر فاصله‌ی نسبی موانع بر توزیع سرعت در کانال‌های مرطوب‌ساز (الف) ۱/۵، (ب) ۰/۵ و (ج) ۲/۵ میلی‌متر

شکل ۹ نشان می‌دهد که نواحی سرعت بالایی که در مجاورت غشا در یک کانال وجود دارند نباید در مجاورت نواحی مشابه در کانال دیگر مرطوب‌ساز باشند. به‌عنوان مثال در شکل ۹ الف با نظر گرفتن کانال گاز مرطوب و نواحی سرعت بالا در قسمت زیرین مانع مشاهده می‌شود که این نواحی در مجاورت با نواحی کم‌سرعت در کانال خشک قرار دارند. با انطباق هرچه بیشتر این نواحی طبق اشکال ۹ ب و ۹ ج عملکرد کاهش می‌یابد. عدم زمان کافی در این شرایط برای تبادل جرم و گرما بین گازها از طریق غشا در این شرایط به علت سرعت بالای گازها می‌تواند دلیل این امر باشد. با افزایش دبی گازها، میزان ورود بخار آب به مرطوب‌ساز (گردابان غلظت) افزایش می‌یابد. اما میزان افزایش انتقال بخار آب توسط غشا به نسبت کمتری افزایش خواهد داشت؛ که طبق تعریف نرخ بازیاب، در دبی‌های بالاتر به رغم افزایش اختلاف غلظت بخار آب، مرطوب‌ساز نرخ بازیاب کمتری خواهد داشت که این امر به دلیل افزایش سرعت گاز و کاهش زمان ماند گاز در مجاورت غشا است. لازم به ذکر است که با افزودن موانع زانویی افت فشار در بیشترین حالت ۱۰۵۰ پاسکال افزایش خواهد داشت. چون

- [19] Shamsizadeh P, Afshari E, Dehkordi MM. Design of membrane humidifier using obstacles in the flow channels for ventilator. *Applied Thermal Engineering*. 2021;117265.
- [20] Chen C-Y, Chang Y-H, Li C-H, Chang C-C, Yan W-M. Physical properties measurement and performance comparison of membranes for planar membrane humidifiers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;136:393–403.
- [21] Meng H, Wang C-Y. Model of two-phase flow and flooding dynamics in polymer electrolyte fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*. 2005;152(9):A1733.
- [22] Wang Y, Wang C-Y. Simulation of flow and transport phenomena in a polymer electrolyte fuel cell under low-humidity operation. *Journal of Power Sources*. 2005;147(1–2):148–61.
- [23] Meng H, Wang C-Y. Electron transport in PEFCs. *Journal of the Electrochemical Society*. 2004;151(3):A358.
- [24] Gurau V, Liu H, Kakac S. Two-dimensional model for proton exchange membrane fuel cells. *AIChE Journal*. 1998;44(11):2410–22.
- [25] Patankar S. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Taylor & Francis; 2018.
- [26] Chen D, Peng H. A Thermodynamic Model of Membrane Humidifiers for PEM Fuel Cell Humidification Control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* [Internet]. 2004 Oct 22;127(3):424–32
- [27] Masaeli N, Afshari E, Baniasadi E, Baharlou-Houreh N. Performance studies of a membrane-based water and heat exchanger using serpentine flow channels for polymer electrolyte membrane fuel cell application. *Applied Thermal Engineering*. 2023;222:119950.
- [1] Wilberforce T, Alaswad A, Palumbo A, Dassisti M, Olabi A-G. Advances in stationary and portable fuel cell applications. *International journal of hydrogen energy*. 2016;41(37):16509–22.
- [2] Wang Y, Chen KS, Mishler J, Cho SC, Adroher XC. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. *Applied energy*. 2011;88(4):981–1007.
- [3] Yan W-M, Li C-H, Lee C-Y, Rashidi S, Li W-K. Numerical study on heat and mass transfer performance of the planar membrane-based humidifier for PEMFC. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;157:119918.
- [4] Huizing R. Design and membrane selection for gas to gas humidifiers for fuel cell applications. University of Waterloo; 2007.
- [5] Wang Y, Wang S, Liu S, Li H, Zhu K. Optimization of reactants relative humidity for high performance of polymer electrolyte membrane fuel cells with co-flow and counter-flow configurations. *Energy Conversion and Management*. 2020;205:112369.
- [6] Amir Hossein A, Ebrahim A, Saeed A. An experimental study on the bubble humidification method of polymer electrolyte membrane fuel cells. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 40(12):1508–19.
- [7] Alan D. 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.
- [8] Hashemi-Valikboni SZ, Ajarostaghi SSM, Delavar MA, Sedighi K. Numerical prediction of humidification process in planar porous membrane humidifier of a PEM fuel cell system to evaluate the effects of operating and geometrical parameters. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020;141:1687–701.
- [9] Sabek S, Tiss F, Chouikh R, Guizani A. Numerical investigation of heat and mass transfer in partially blocked membrane based heat exchanger: effects of obstacles forms. *Applied Thermal Engineering*. 2018;130:211–20.
- [10] Park S-K, Choe S-Y, Choi S. 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*. 2008;33(9):2273–82.
- [11] Kang S, Min K, Yu S. 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*. 2010;35(4):1727–41.
- [12] Sabharwal M, Duell C, Bhatia D. Two-dimensional modeling of a cross flow plate and frame membrane humidifier for fuel cell applications. *Journal of Membrane Science*. 2012;409:285–301.
- [13] Cave P, Merida W. Water flux in membrane fuel cell humidifiers: flow rate and channel location effects. *Journal of Power Sources*. 2008;175(1):408–18.
- [14] Chen C-Y, Su J-H, Ali HM, Yan W-M, Amani M. Effect of channel structure on the performance of a planar membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;163:120522.
- [15] Tan Z, Jia L, Zhang Z. Water vapor transport with condensation in a gas diffusion layer of a proton exchange membrane fuel cell. *Heat Transfer Research*. 2012;43(2).
- [16] Yan W-M, Lee C-Y, Li C-H, Li W-K, Rashidi S. Study on heat and mass transfer of a planar membrane humidifier for PEM fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;152:119538.
- [17] Shamsizadeh P, Afshari E. Numerical modeling of a membrane humidifier for mechanical ventilation. *International Communications in Heat and Mass Transfer* [Internet]. 2022;132:105931.
- [18] Yu S, Im S, Kim S, Hwang J, Lee Y, Kang S, et al. 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*. 2011;54(7–8):1344–51.