



## مدل سازی جریان دوفازی و غیر هم‌دما در پیل سوختی پلیمری

حسن حسن زاده<sup>1\*</sup>، سید هادی گل‌کار<sup>2</sup> و محبوبه برزگری<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2-دانش آموخته کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\*بیرجند، صندوق پستی 97175/615، h.hassanzadeh@birjand.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 آذر 1393

پذیرش: 07 دی 1393

ارائه در سایت: 20 دی 1393

کلید واژگان:

پیل سوختی پلیمری

جریان دوفازی

غیر هم‌دما

اشباع

## چکیده

در مقاله حاضر، جریان دوفازی و غیر هم‌دما در لایه نفوذی گاز کاتد پیل سوختی پلیمری مدل‌سازی شده است. جهت استفاده از شرایط مرزی دقیق، علاوه بر مدل‌سازی لایه نفوذی گاز کاتد، دیگر اجزای پیل سوختی (غشاء و لایه نفوذی گاز آنود) نیز مدل‌سازی شده‌اند. معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، بقای مومنتم و بقای انرژی و دیگر معادلات کمکی است که توسط روش‌های عددی حل شده است. همچنین اثر فشار و رطوبت نسبی، اثر تماس و تبادل جرم بین دوفاز روی عملکرد پیل سوختی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که جهت مدل‌سازی دقیق جریان دوفازی، لازم است هر دو اثر تماس و تبادل جرم بین دو فاز در نظر گرفته شود. به ازای رطوبت‌های مختلف کانال کاتد، منحنی عملکرد و منحنی توزیع دما در طول پیل سوختی در دو حالت دوفازی و تک‌فاز مقایسه شده‌اند، مقدار نسبی این دو برای دو جریان وابسته به مقدار رطوبت کانال کاتد است. با افزایش فشار گاز در کانال کاتد از 0/5 به 5 اتمسفر، محتوای آب در مرز غشاء و لایه نفوذی گاز کاتد در حدود 20% افزایش یافته و به تبع آن افت اهمی کاهش می‌یابد. با این کاهش افت اهمی درجه حرارت در طول پیل سوختی کاهش می‌یابد. ولی بر عکس با افزایش فشار گاز در کانال آنود، درجه حرارت در طول پیل سوختی افزایش می‌یابد.

## Modeling of two phase and non - isothermal flow in polymer electrolyte fuel cell

Hassan Hassanzadeh<sup>1\*</sup>, Seyed Hadi Golkar<sup>2</sup> and Mahboobeh Barzgary<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

2, 3- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

\*P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran, h.hassanzadeh@birjand.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 01 December 2014  
Accepted 28 December 2014  
Available Online 10 January 2015

## Keywords:

PEM Fuel cell  
Two-phase flow  
Non-isothermal  
Saturation

## ABSTRACT

In this paper, a non - isothermal and two-phase flow in the cathode gas diffusion layer (GDL) of PEM fuel cell is modeled. To achieve more accurate boundary conditions, other components of fuel cell (membrane and anode GDL) are modeled. Governing equations including energy, mass and momentum conservation and auxiliary equations are solved by numerical method and the effect of gas mixture pressure in channels, relative humidity and effect of contact and mass exchange between two phases are investigated. Results show, it is necessary that both the contact and mass exchange between the gas and liquid phase to be considered. The performance curve and temperature distribution for single and two phase flow are compared for different amount of cathode channel humidity. The relative value of performance and temperature for single and two phase flow depends on the humidity of cathode channel. With increasing the cathode pressure from 0.5 to 5atm the value of water content in membrane and gas diffusion interface will increase about 20%. With increasing the water content in the membrane therefore the ohmic loss is reduced. With the reduction in the ohmic loss the temperature distribution along the fuel cell decreases but if the anode pressure increases the temperature distribution along the fuel cell increases.

## 1- مقدمه

با وجود مزایای زیاد پیل‌های سوختی پلیمری، مدیریت دقیق آب در آن‌ها دشوار است؛ زیرا قابلیت هدایت یونی غشاء پلیمری به شدت به مقدار آب موجود در آن وابسته است؛ لذا لازم است سوخت و اکسید کننده قبل از ورود به پیل سوختی رطوبت‌زنی شوند. انتقال آب توسط واکنش‌گران و تولید آب در کاتالیست کاتد شرایط را برای وجود جریان دوفازی در الکترودها فراهم می‌کند؛ لذا با افزایش چگالی جریان و تولید بیشتر آب در کاتالیست کاتد، جریان در لایه نفوذی گاز کاتد دوفازی می‌شود. در جریان دوفازی،

پیل‌های سوختی وسایلی الکتروشیمیایی هستند که انرژی شیمیایی حاصل از یک واکنش شیمیایی را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل کرده و محدودیت سیکل کارنو را ندارند [1]. در میان پیل‌های سوختی مختلف، پیل‌های سوختی پلیمری به دلیل داشتن مزایایی چون دمای کاری پایین، بازده بالا، چگالی قدرت بالا، الکترولیت پلیمری جامد و شروع به کار سریع گزینه مناسبی جهت استفاده در حمل و نقل و وسایل قابل حمل می‌باشند [2].

Please cite this article using:

H. Hassanzadeh, S. H. Golkar, M. Barzgary, Modeling of two phase and non - isothermal flow in polymer electrolyte fuel cell, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 313-322, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Hassanzadeh, S. H. Golkar, M. Barzgary, Modeling of two phase and non - isothermal flow in polymer electrolyte fuel cell, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 313-322, 2015 (In Persian)

وجود آب در منفذهای الکترودها باعث کاهش سطح موثر انتقال جرم شده و مقاومت در مقابل آن افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت در مقابل انتقال جرم باعث کاهش غلظت واکنش‌گرها در محل‌های واکنش شده و افت فعال‌سازی در پیل سوختی افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر چگالی جریان ( $I > 1 A/cm^2$ ) آب تولید شده در کاتالیست کاتد زیادتر می‌شود؛ به طوری که منفذهای الکترودها به خصوص الکتروکاتد توسط آب مسدود می‌شود که به این حالت غرقاب شدگی می‌گویند. غرقاب شدگی پدیده مضر است که می‌تواند در چگالی جریان بالا در کاتد و در چگالی جریان کم در آند واقع شود [3]. وقوع غرقاب شدگی با کاهش شدید غلظت گونه‌ها در محل‌های واکنش و افت شدید ولتاژ پیل سوختی همراه است؛ لذا با توجه به بحث انجام شده مدیریت آب در پیل سوختی جهت تامین دو هدف متضاد آبدار بودن غشاء و عدم وقوع غرقاب شدگی دشوار است.

وقوع واکنش‌های الکتروشیمیایی در لایه‌های کاتالیست، وجود افت فعال‌سازی در کاتالیست‌ها و افت اهمی در الکترودها و غشاء، همچنین تبدیل بخار آب به آب مایع و برعکس در طول الکترودها و کاتالیست‌ها باعث تولید حرارت در پیل سوختی می‌شود؛ لذا توزیع دما در پیل سوختی غیر یکنواخت است. وجود جریان دوفازی و توزیع غیر یکنواخت دما در پیل سوختی، باعث تبخیر بیشتر آب در نواحی گرم‌تر و تقطیر آن در نواحی سردتر می‌شود؛ لذا بررسی تاثیر دما بر پارامترهای جریان دوفازی ضروری است. همچنین افزایش فشار گازهای ورودی به پیل سوختی از یک طرف باعث کاهش اندازه پیل سوختی به ازای یک قدرت معین شده و از طرف دیگر باعث افزایش حلالیت اکسیژن در آب به خصوص در کاتالیست کاتد می‌شود. لذا افزایش فشار باعث افزایش غلظت اکسیژن در محل‌های واکنش و افزایش کارایی پیل سوختی می‌شود. از طرف دیگر وجود افزایش فشار کاتد نسبت به آند باعث برگشت آب تولیدی از کاتد به آند شده و محتوای آب غشاء افزایش می‌یابد که این با کاهش افت اهمی و افزایش کارایی پیل سوختی همراه است؛ لذا بررسی وجود اختلاف فشار در کانال‌ها بر عملکرد پیل سوختی ضرورت دارد؛ لذا مدل ارائه شده دوفازی، غیر هم‌دما و غیر هم‌فشار است.

با توجه به چالش‌های پیش روی توسعه پیل‌های سوختی پلیمری، مدلسازی آن‌ها جهت افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های تولید ضروری است. مدل‌های اولیه مدلهایی تک‌فازند که در آن‌ها آب مایع از منفذهای ریز آب گریز نشده الکترودها عبور می‌کنند و گاز مرطوب از منفذهای بزرگتر آب گریز شده آن انتقال می‌یابند بدون اینکه با یکدیگر تماس داشته و جرمی مبادله کنند. مدل‌های برناردی و وربرگ [4, 5] یک‌بعدی و هم‌دما، مدل رو و لی [6]، مدل جلیلی و لو [7] یک‌بعدی و غیر هم‌دما و مدل افشاری و جزایری [8] دوبعدی و غیر هم‌دما هستند. این مدل‌ها هرچند اطلاعات ارزشمندی در مورد عملکرد پیل‌های سوختی پلیمری ارائه می‌کنند ولی تک‌فازند؛ لذا نمی‌توانند عملکرد پیل‌های سوختی پلیمری را به خصوص در چگالی جریان‌های بالا که جریان دوفازی است دقیق پیش بینی کنند. در چگالی جریان‌های بالا، وجود آب مایع در منفذهای الکترودها باعث افزایش افت انتقال جرم و افت فعال‌سازی می‌شود؛ لذا کارایی پیل سوختی به شدت متأثر از دوفازی بودن جریان است.

در دهه اخیر، مدل‌های دوفازی مختلفی ارائه شده است که هر کدام جنبه‌های مختلفی از پیل‌های سوختی را مدلسازی کرده‌اند. مدل‌های مورد بحث اطلاعات ارزشمندی در مورد مدلسازی دوفازی ارائه کرده‌اند ولی ملاک قضاوت در این مقاله در نظر گرفتن اثر تماس و تبادل جرم بین دوفاز

همچنین هم‌دما و غیر هم‌دما بودن مدل، هم‌فشار و غیر هم‌فشار بودن و نهایتاً تخمین مقدار  $\alpha$  (به صورت نسبت مقدار آب ورودی به کاتالیست کاتد از طریق غشاء به مقدار آب تولیدی در آن در اثر واکنش تعریف می‌شود) در فصل مشترک غشاء و کاتالیست کاتد است که در این مقاله مورد توجه است. پاساگولاری و ونگ [9] در مدلی دوفازی، هم‌دما و یک‌بعدی و تحلیلی به بررسی غرقاب شدگی و تاثیر میزان اشباع بر عملکرد پیل سوختی پرداخته‌اند. نتایج تحقیق مذکور از جنبه نشان دادن تاثیر مدلسازی دوفازی بر عملکرد پیل سوختی با اهمیت است؛ اما استفاده از مفروضاتی مانند یکنواخت بودن میزان اشباع در لایه کاتالیست و نادیده گرفتن اثر تبادل جرم بین دوفاز، از دقت مدلسازی آن‌ها می‌کاهد. ژان و همکاران [10] در مدلی دوفازی، هم‌دما و یک‌بعدی به بررسی اهمیت توزیع غیر یکنواخت ضریب تخلخل در لایه نفوذی گاز پرداخته‌اند. در این تحقیق، اثر تماس دوفاز در نظر گرفته شده است؛ اما به  $\alpha$  مقداری فرضی نسبت داده شده و اثر تبادل جرم بین دو فاز حین عبور از لایه نفوذی گاز در نظر گرفته نشده است. چن و همکاران [11] مدلی دوفازی با ضریب تخلخل خطی ارائه کرده‌اند. در این مدل گاز موجود در لایه نفوذی کاتد اشباع فرض شده است؛ لذا با فاز مایع تبادل جرم ندارد همچنین به  $\alpha$  مقداری فرضی نسبت داده شده است. پاساگولاری و ونگ [12] به مقایسه دو روش مدلسازی جریان دوفازی در لایه نفوذی گاز پرداخته‌اند. روش  $UTF$  مبتنی بر فرض فشار ثابت در فاز گاز و روش  $M^2$  از فرمول‌بندی مجدد مدلسازی کلاسیک حاصل شده است که در آن به جای حل دو دسته معادلات برای فازهای مایع و گاز، یک دسته معادله حل می‌شود. در این مدلسازی از تبادل جرم بین دو فاز صرف نظر شده و به  $\alpha$  عددی فرضی نسبت داده شده است. داس و همکاران [13] در مدلی دوفازی و یک‌بعدی، به بررسی جریان آب در لایه کاتالیست کاتد پیل سوختی پلیمری پرداخته‌اند. این مدلسازی تحلیلی هر چند مبتنی بر فرض‌های ساده کننده بسیاری است ولی تاثیر زاویه تماس بر جریان آب موجود در لایه کاتالیست مورد بررسی قرار گرفته است که قبل از آن کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ منتها در این مدلسازی مقداری فرضی به  $\alpha$  نسبت داده شده است. وینکی [14] در مدلی دوبعدی و دوفازی با در نظر گرفتن هر دو اثر تماس و تبادل جرم، مدل جدیدی ارائه کرده است. وی با فرض وجود تعادل ترمودینامیکی بین فازهای گاز و مایع کمیتی تحت عنوان  $\delta$  را به عنوان مکانی در لایه نفوذ گاز تعریف می‌کند که در آن تبدیل فاز متوقف می‌شود؛ لذا بدین ترتیب با نوشتن معادلات جریان تک‌فاز برای ناحیه تک‌فاز و معادلات جریان دوفازی برای نواحی دوفازی بر دقت مدلسازی افزوده است؛ منتها پیچیدگی‌های مش‌بندی از نقاط ضعف تحقیق وی محسوب می‌شود. در همه مدل‌های فوق علاوه بر موارد ذکر شده، فقط لایه نفوذی گاز کاتد مدلسازی شده‌اند؛ لذا از شرایط مرزی تقریبی جهت مدلسازی استفاده شده است.

یو و لیو [15] در مدلی دوفازی، هم‌دما و دوبعدی معادلات انتقال آب را در اجزای مختلف پیل سوختی در نظر گرفته و به بررسی اثر افزایش چگالی جریان بر روی پارامترهایی چون غلظت اکسیژن، محتوای آب غشاء و ولتاژ خروجی از پیل سوختی پرداخته‌اند. در این تحقیق، عدد  $\alpha$  به ازای چگالی جریان‌های معین در مرز غشاء و لایه کاتالیست محاسبه شده است. در این مقاله اثر تماس بین دو فاز در نظر گرفته شده؛ اما از اثر تبادل جرم صرف نظر شده است. حسن زاده و همکاران [16] مدلی دوفازی ارائه کردند که در آن هر دو اثر تماس و تبادل جرم در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به

که در رابطه 1،  $\rho_g$  چگالی مخلوط گاز،  $U_g$  سرعت ظاهری مخلوط گاز و  $Y_{O_2}$  کسر جرمی اکسیژن است. همچنین  $s$  مقدار اشباع است که بیانگر کسری از حجم حفره‌های لایه نفوذی گاز است که توسط آب اشغال شده است.  $\varepsilon$  ضریب تخلخل الکتروود است که به صورت نسبت حجم حفره‌ها به حجم الکتروود تعریف می‌شود.  $D_{eff}^{O_2}$  ضریب نفوذ موثر گاز اکسیژن در مخلوط گاز است که برای محیط‌های متخلخل توسط رابطه بریگمن اصلاح شده است [16]:

$$D_{eff}^{O_2} = D_{mix}^{O_2}(\varepsilon)^{1.5} \quad (2)$$

جریان در لایه نفوذی گاز کاتد دوفازی است؛ لذا بین آب مایع و مخلوط گاز تماس و تبادل جرم وجود دارد. بنابراین بر خلاف اکسیژن، شار جرمی آب مایع و بخار آب در طول لایه نفوذی گاز کاتد ثابت نیستند. تغییرات شار بخار آب و آب مایع به ترتیب از روابط 3 و 4 محاسبه می‌شوند:

$$\frac{d}{dz} \left( \rho_g U_g Y_{H_2O} - \varepsilon \rho_g (1-s) D_{eff}^{H_2O} \frac{dY_{H_2O}}{dz} \right) = -\dot{m}_{H_2O}'' \quad (3)$$

$$\frac{d}{dz} (\rho_l U_l) = \dot{m}_{H_2O}'' \quad (4)$$

که در روابط فوق،  $\dot{m}_{H_2O}''$  نشان دهنده نرخ تبدیل بخار آب به آب مایع بر واحد حجم است. در رابطه 4،  $\rho_l$  چگالی آب و  $U_l$  سرعت ظاهری آب مایع در محیط متخلخل است.

اگر کسر مولی بخار آب از کسر مولی آن در حالت اشباع بیشتر شود میعان واقع می‌شود که شار آن می‌تواند از رابطه 5 محاسبه شود [16]:

$$\dot{m}_{H_2O}'' = k_{cond} \varepsilon (1-s) \frac{M_{H_2O} P_g}{RT} (X_{H_2O} - X_{H_2O}^{sat}) \quad (5)$$

همچنین وقتی که کسر مولی بخار آب از کسر مولی آن در حالت اشباع کمتر شود، تبخیر واقع می‌شود که شار آن می‌تواند از رابطه 6 محاسبه شود [16]:

$$\dot{m}_{H_2O}'' = k_{vap} \varepsilon s \rho_l P_g (X_{H_2O} - X_{H_2O}^{sat}) \quad (6)$$

در روابط 5 و 6،  $X_{H_2O}$  کسر مولی بخار آب،  $X_{H_2O}^{sat}$  کسر مولی بخار آب در حالت اشباع،  $k_{cond}$  ثابت میعان بخار آب،  $k_{vap}$  ثابت تبخیر آب،  $P_g$  فشار مخلوط گاز و  $R$  ثابت جهانی گازها است.

گاز نیتروژن در لایه کاتالیست کاتد مصرف نمی‌شود؛ لذا شار خالص آن در لایه نفوذی گاز کاتد صفر است:

$$N_{N_2} = 0 \quad (7)$$

در جریان دوفازی، بخشی از منفذهای الکتروود کاتد توسط آب اشغال می‌شود و سطح موثر انتقال جرم کاهش می‌یابد؛ لذا لازم است رابطه داری برای محاسبه سرعت ظاهری آب و بخار آب در لایه نفوذی گاز کاتد توسط کمیت اشباع  $s$  اصلاح شود [16]:

$$U_l = \frac{-k_{abs} s^3 dP_l}{\mu_l dz} \quad (8)$$

$$U_g = \frac{-k_{abs} (1-s)^3 dP_g}{\mu_g dz} \quad (9)$$

برای محاسبه سرعت ظاهری آب مایع، ابتدا لازم است توزیع فشار آب مایع،  $P_l$  در لایه نفوذی گاز محاسبه شود. در لایه‌های نفوذی گاز شعاع حفره‌ها ناچیز است؛ لذا تاثیر فشار موئینگی قابل توجه است. فشار موئینگی به اختلاف فشار بین دو فاز مایع و گاز در مسیری با قطر ناچیز گفته

اهمیت مقدار دقیق  $\alpha$  روی محتوی آب غشاء و افت اهمی با مدل‌سازی دیگر اجزای پیل سوختی مقدار نسبتاً دقیقی برای آن محاسبه کردند ولی عیب این مدل، هم‌دما و هم‌فشار بودن آن است.

همان‌طور که اشاره شد، وقوع واکنش الکتروشیمیایی در لایه کاتالیست و وجود افت‌های فعال‌سازی، اهمی و تغییر فاز باعث تولید حرارت در پیل سوختی می‌شود. مجموعه این عوامل باعث ایجاد گرادیان دما در پیل سوختی شده و باعث تغییر پارامترهای جریان دوفازی می‌شود؛ لذا مدل‌سازی دوفازی و غیر هم‌دما ضرورت دارد. بر این اساس، شی و همکاران [17] در مدلی دوفازی، غیر هم‌دما و یک‌بعدی با در نظر گرفتن اثر تماس بین دو فاز و معرفی پارامتر اشباع  $s$ ، منحنی تغییر فشار موئینگی را در طول لایه نفوذی گاز کاتد ترسیم کرده‌اند. اما این منحنی بدون در نظر گرفتن تبادل جرم بین دو فاز، نمی‌تواند دقیق باشد. سانگ و همکاران [18] در مدل‌سازی دوفازی و غیر هم‌دما علاوه بر اثر تماس، اثر تبادل جرم بین دوفاز گاز و مایع را در نظر گرفته‌اند. فرض غیر دائمی بودن، این مدل را از سایر مدل‌ها متمایز کرده است. در این مقاله مقدار فرضی به  $\alpha$  نسبت داده شده و همچنین اثر تغییر فشار کانال‌های گاز بر عملکرد جریان دوفازی بررسی نشده است. صدوقی و همکاران [19] مدلی دوبعدی و غیر هم‌دما از پیل سوختی ارائه کردند. در مدل‌سازی که توسط نرم افزار فلونتت انجام شده است لایه‌های نفوذی گاز کاتد و آند و غشاء مدل‌سازی شده است. در این مدل‌سازی علاوه بر بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر توان خروجی پیل سوختی، شرایط کاری بهینه را برای پیل سوختی مورد مطالعه ارائه کرده‌اند.

در مقاله حاضر، جریان دوفازی غیر هم‌دما در لایه نفوذی گاز کاتد پیل سوختی مدل‌سازی شده است. در این مدل‌سازی هر دو اثر تماس و تبادل جرم در جریان دوفازی لایه نفوذی گاز کاتد در نظر گرفته شده و اثر هر کدام روی عملکرد پیل سوختی بررسی شده است. همچنین جهت محاسبه نسبتاً دقیق پارامتر  $\alpha$  سایر اجزای پیل سوختی نیز مدل‌سازی شده است. علاوه بر تاثیر دما روی پارامترهای جریان دوفازی، اثر فشار در کانال‌های آند و کاتد بر عملکرد جریان دوفازی و منحنی عملکرد پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفته است.

## 2- مفروضات و معادلات حاکم

مدل کنونی مدلی یک‌بعدی، پایا، غیر هم‌دما و غیر هم‌فشار است که در آن هر دو اثر تبادل جرم و تماس بین دو فاز در نظر گرفته شده است. گازها ایده‌آل و ساختار لایه نفوذی گاز یکنواخت و همگن است. جریان گاز تراکم‌ناپذیر است. لایه‌های کاتالیست به صورت سطح مشترک فرض شده است که در این صورت واکنش‌های الکتروشیمیایی در مرز غشاء و لایه‌های کاتالیست واقع می‌شوند. به دلیل عدم تولید آب در کاتالیست آند و جهت جریان آب (از آند به طرف کاتد) در محدوده چگالی جریان عملی، جریان در لایه نفوذی گاز آند تک‌فاز فرض شده است. معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، ممنتوم و انرژی و معادلات کمکی است که برای جریان در لایه‌های نفوذی گاز کاتد و آند و غشای پلیمری ارائه می‌شود.

### 2-1- معادلات بقاء در لایه نفوذی گاز کاتد

اکسیژن در طول لایه نفوذی گاز کاتد مصرف نمی‌شود؛ لذا شار مولی آن ثابت بوده و تغییرات آن در طول لایه نفوذی گاز صفر است [16]:

$$\frac{d}{dz} \left( \rho_g U_g Y_{O_2} - \varepsilon \rho_g (1-s) D_{eff}^{O_2} \frac{dY_{O_2}}{dz} \right) = 0 \quad (1)$$

می‌شود:

$$P_c = P_g - P_l \quad (10)$$

در جریان دوفازی در محیط‌های متخلخل، از رابطه لورت برای محاسبه فشار مویینگی استفاده می‌شود [9]:

$$P_c = \delta \cos \theta_c \left( \frac{\varepsilon}{K_{abs}} \right)^{0.5} j(s) \quad (11)$$

که در رابطه 11،  $\theta_c$  زاویه تماس و  $\delta$  کشش سطحی است. کشش سطحی تابع دما است که وابستگی آن به صورت رابطه 12 بیان می‌شود [18]:

$$\delta = -1.78 \times 10^{-4} \times T + 0.1214 \quad (12)$$

در رابطه 11،  $j(s)$  وابسته به اشباع است که رابطه آن برای سطوح آب‌دوست و آب‌گریز متفاوت است. برای سطوح آب‌دوست ( $\theta_c < 90^\circ$ )،  $j(s)$  از رابطه 13 محاسبه می‌شود [17]:

$$j(s) = 1.417(1-s) - 2.210(1-s)^2 + 1.263(1-s)^3 \quad (13)$$

در حالی که برای سطوح آب‌گریز ( $\theta_c > 90^\circ$ ) که مورد بحث مقاله حاضر است،  $j(s)$  از رابطه 14 محاسبه می‌شود [17].

$$j(s) = 1.417s - 2.210s^2 + 1.263s^3 \quad (14)$$

با انتخاب یک حجم کنترل و تعیین فرایندهای انتقال انرژی، معادله بقای انرژی برای لایه نفوذی گاز کاتد به صورت رابطه 15 بیان می‌شود:

$$\frac{d}{dz} \left[ -(\varepsilon k_l + (1-s)\varepsilon k_g + (1-\varepsilon)(k_s) \frac{dT}{dz}) \right] + [\rho_l U_l c_l + \rho_g U_g c_g] \frac{dT}{dz} = h_{vap} \dot{m}_{H_2O} + \dot{q} \quad (15)$$

در رابطه 15،  $k_l$ ،  $k_g$ ،  $k_s$  به ترتیب ضرایب هدایت حرارتی فازهای گاز، مایع و جامد،  $c_l$  و  $c_g$  به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه فازهای گاز و آب مایع،  $h_{vap}$  انتالپی تبخیر و  $\dot{q}$  چشمه حرارت ناشی از مقاومت‌های اهمی هستند.

## 2-2- معادلات بقاء در غشای پلیمری

جهت استفاده از شرط مرزی دقیق در مرز لایه نفوذی گاز کاتد و غشاء، لازم است معادلات حاکم بر غشاء و لایه نفوذی گاز آند نیز حل شوند. یون‌های پروتون حین عبور از غشاء، تعدادی مولکول آب را از آند به کاتد انتقال می‌دهند (پدیده الکترواسموتیک) که شار آن برابر است با [20]:

$$N_{H_2O,E} = n_{drag}^{sat} \frac{\lambda j}{22F} \quad (16)$$

که در رابطه 16،  $\lambda$  محتوای آب غشاء است که در طول آن متغیر است، چگالی جریان و  $F$  عدد فارادی است.

انتقال آب توسط پروتون‌ها و وقوع واکنش الکتروشیمیایی در کاتالیست کاتد، باعث افزایش غلظت آب در غشاء سمت کاتد می‌شود. اختلاف غلظت آب موجود در دو سمت غشاء، باعث برگشت آب از کاتد به آند می‌شود که به آن نفوذ معکوس می‌گویند. شار مولی آب، ناشی از نفوذ معکوس از رابطه 17 محاسبه می‌شود [20]:

$$N_{H_2O,backdiff} = \frac{-\rho_{dry}}{M_m} D_\lambda(\lambda) \frac{d\lambda}{dz} \quad (17)$$

در رابطه 17،  $\rho_{dry}$  چگالی نیون خشک،  $M_m$  جرم مولکولی غشاء و  $D_\lambda(\lambda)$  ضریب نفوذ آب در غشاء است که تابعی از محتوای آب در غشاء  $\lambda$  است. علاوه بر دو عامل عبور پروتون‌ها و نفوذ معکوس روی انتقال آب غشاء،

اختلاف فشار گازها در کانال‌های کاتد و آند عامل دیگری است که باعث انتقال آب در غشاء می‌شود که شار ناشی از آن توسط رابطه 18 محاسبه می‌شود [20]:

$$N_{H_2O,hyd} = -\lambda \frac{\rho_{dry} K_m}{M_m \mu_l} \frac{dP_l}{dz} \quad (18)$$

بنابراین شار خالص آب در غشاء، ناشی از سه عامل فوق عبارتند از:

$$N_{H_2O,net} = n_{drag}^{sat} \frac{\lambda j}{22F} - \frac{\rho_{dry}}{M_m} D_\lambda(\lambda) \frac{d\lambda}{dz} - \lambda \frac{\rho_{dry} K_m}{M_m \mu_l} \frac{dP_l}{dz} \quad (19)$$

با انتخاب یک حجم کنترل و مشخص کردن فرایندهای انتقال انرژی، معادله بقای انرژی در غشاء به صورت زیر بیان می‌شود:

$$-k \frac{d^2 T}{dz^2} + \frac{d}{dz} (N_{H_2O,net} h_{H_2O} M_{H_2O}) = \frac{j^2}{\sigma} \quad (20)$$

که در رابطه 20،  $k$ ،  $h_{H_2O}$ ،  $M_{H_2O}$  و  $\sigma$  به ترتیب ضریب هدایت حرارتی نیون خشک، انتالپی آب مایع، جرم مولکولی آب و قابلیت هدایت یونی غشاء است. قابلیت هدایت یونی غشاء وابسته به دمای  $T$  و محتوای آب  $\lambda$  است که از رابطه 21 محاسبه می‌شود [20]:

$$\sigma = (0.005193 \lambda - 0.00326) \exp \left[ 1268 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (21)$$

## 2-3- معادلات بقاء در لایه نفوذی گاز آند

شار هیدروژن و بخار آب در لایه نفوذی گاز آند، ناشی از دو پدیده جابجایی و نفوذ است. این گونه‌ها در طول لایه نفوذی گاز آند مصرف نمی‌شوند؛ لذا شار جرمی آن‌ها ثابت و تغییرات آن در طول لایه نفوذی گاز آند صفر است [21]:

$$\frac{d}{dz} \left( \rho_g U_g Y_{H_2O} - \varepsilon \rho_g D_{eff}^{H_2O} \frac{dY_{H_2O}}{dz} \right) = 0 \quad (22)$$

$$\frac{d}{dz} \left( \rho_g U_g Y_{H_2} - \varepsilon \rho_g D_{eff}^{H_2} \frac{dY_{H_2}}{dz} \right) = 0 \quad (23)$$

برای محاسبه سرعت ظاهری مخلوط گاز در لایه نفوذی گاز آند از رابطه دارسی استفاده می‌شود.

مشابه کاتد، با انتخاب یک حجم کنترل و مشخص کردن فرایندهای انتقال انرژی، معادله بقای انرژی در لایه نفوذی گاز آند به دست می‌آید.

$$\frac{d}{dz} \left[ -(\varepsilon k_g + (1-\varepsilon)k_s) \frac{dT}{dz} \right] + [\rho_g U_g c_g] \frac{dT}{dz} = \dot{q} \quad (24)$$

## 2-4- محاسبه افت‌های سه گانه

برای محاسبه افت فعال‌سازی از رابطه 25 استفاده شده است. این رابطه با ساده‌سازی معادله باتلر-ولمر به دست می‌آید [21]:

$$\eta_{act} = \frac{RT}{anF} \ln \left( \frac{j c_R^0}{(1-s)^8 j_0 c_R^*} \right) \quad (25)$$

در رابطه 25،  $c_R^*$  غلظت واکنش‌گرها در محل واکنش و در شرایطی است که  $j_0$  در آن محاسبه شده است.

برای تعیین افت غلظتی از رابطه 26 استفاده شده است [21]:

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{c_R^0}{c_R^*} \right) \quad (26)$$

برای آن که بتوان افت اهمی در غشاء را محاسبه کرد ابتدا لازم است

دما (کلوین)	$\alpha$	خطا (%)
333	1/278	0
338	1/290	0/9
343	1/301	1/8
348	1/309	2/4
353	1/314	2/8

تعیین شود؛ لذا با نسبت دادن حدس اولیه به آن، شرایط مرزی در سمت کاتد تکمیل می‌شود. صحت این حدس با محاسبه درجه حرارت در فصل مشترک کانال آند و لایه نفوذی گاز آند مشخص می‌شود.

در شکل 1 فلوجارت حل عددی جریان در پیل سوختی ترسیم شده است. برای محاسبه دقیق  $\alpha$  فلوجارت دیگری وجود دارد که در مرجع [21] آورده شده است. برای حل معادلات حاکم بر اجزای پیل سوختی از روش تفاضل محدود استفاده شده است. مشتقات موجود در معادلات به روش تیلور پیشروی مرتبه اول و انتگرال‌ها با روش مجموع حاصل ضرب عبارت داخل انتگرال در گام مکانی به یک کد عددی در زبان فرترن تبدیل شده است.

### 2-3- اعتبار سنجی

در جدول 2 مقادیر کمیت‌های مورد استفاده در این مدلسازی، در حالت پایه آورده شده است. این مقادیر از مرجع [18] گرفته شده است.

جهت اعتبارسنجی حل عددی، مطابق شکل 2 منحنی عملکرد پیل سوختی در تحقیق حاضر با داده‌های تجربی موجود در مرجع [22] مقایسه شده است که نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار است. در این حالت، حداکثر خطا 3/1% است. با کم کردن مجموع افت‌های سه گانه از ولتاژ ترمودینامیکی پیل سوختی، ولتاژ خروجی آن بدست می‌آید.

علاوه بر این، در شکل 3 توزیع درجه حرارت در لایه نفوذی گاز کاتد با داده‌های موجود در مرجع [18] مقایسه شده است که از دقت خوبی برخوردار است.

### 3-3- استقلال حل از تعداد گره شبکه

در شکل 4، تاثیر تعداد گره‌های شبکه بر منحنی توزیع اشباع در طول لایه نفوذی گاز کاتد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد گره‌ها، وابستگی حل به تعداد گره‌های شبکه کمتر و کمتر دشواری است.

مقدار	عنوان
333	دمای گازهای ورودی (K)
1	فشار آند و کاتد (atm)
300	ضخامت الکترودها ( $\mu\text{m}$ )
175	ضخامت غشاء ( $\mu\text{m}$ )
0/4	ضریب تخلخل
75	رطوبت نسبی ورودی به آند (%)

مقاومت اهمی در برابر عبور پروتون‌ها در غشاء محاسبه شود. مقاومت اهمی در غشاء از رابطه 27 محاسبه می‌شود [21]:

$$R_{ohmic} = \int_0^{t_m} \frac{dz}{\sigma(\lambda(z))} \quad (27)$$

که با ضرب کردن چگالی جریان در مقاومت اهمی در غشاء، افت اهمی نیز محاسبه می‌شود.

### 3- روش حل عددی و اعتبار سنجی

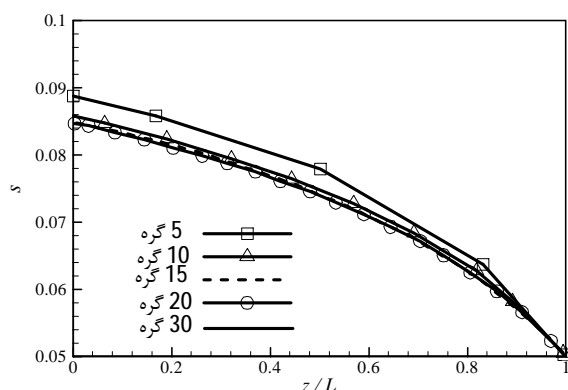
#### 3-1- شرایط مرزی و روش حل

هدف اصلی در این مقاله، مدلسازی جریان دوفازی غیر هم‌دما و غیر هم‌فشار در لایه نفوذی گاز کاتد پیل سوختی پلیمری است؛ اما برای تعیین دقیق میزان آب وارد شده به این لایه و استفاده از شرایط مرزی صحیح‌تر، دیگر اجزای پیل سوختی (غشاء و لایه نفوذی گاز آند) نیز مدلسازی شده‌اند. به دلیل عدم تولید آب در لایه کاتالیست آند و جهت جریان آب در محدوده چگالی جریان‌های عملی، جریان در لایه نفوذی گاز آند، تک‌فاز فرض شده است. با توجه به دامنه حل، شرایط مرزی فقط در فصل مشترک دو کانال و لایه‌های نفوذی گاز کاتد و آند اعمال شده است تا شرایط مرزی دقیق‌تری در فصل مشترک لایه نفوذی گاز کاتد و غشاء، جهت مدلسازی جریان دوفازی لایه نفوذی گاز کاتد، وجود داشته باشد.

دما در مرز کانال و لایه نفوذی گاز کاتد، 333 کلوین در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی تاثیر فشار بر عملکرد پیل سوختی، به فشار مخلوط گاز در مرز کانال و لایه نفوذی گاز آند و کاتد چهار مقدار 0/5، 1، 3 و 5 اتمسفر نسبت داده شده است. اطلاع از مقدار دقیق اشباع در فصل مشترک کانال و لایه نفوذی گاز کاتد مستلزم مدلسازی جریان در کانال کاتد است؛ اما با توجه به این که در تحقیق حاضر، جریان در کانال کاتد گاز مدل نشده است؛ لذا به اشباع در این مرز مقدار فرضی 0/05 نسبت داده شده است. به رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد دو مقدار 85% و 100% نسبت داده شده تا رفتار پیل سوختی در دو حالت وقوع میعان و تبخیر بررسی شود.

با توجه به این که در حل دائم، شار آب عبوری از غشاء ثابت و وابسته به  $\alpha$  است؛ لذا با در نظر گرفتن مقداری حدسی برای  $\alpha$ ، می‌توان جریان در غشاء را حل کرده و صحت این حدس را با محتوای آب  $\lambda$  در مرز کاتد و غشاء ارزیابی کرد. اما برای محاسبه محتوای آب در این مرز لازم است که جریان دوفازی در کاتد حل شود. از طرفی حل جریان در کاتد، جز با در نظر گرفتن دو حدس اولیه برای شار بخار آب و گرادیان دما میسر نیست. با در نظر گرفتن مقدار حدسی برای  $\alpha$  تعداد این حدس‌ها به سه افزایش می‌یابد و بدیهی است که یافتن سه حدس اولیه درست به طور هم‌زمان کار بسیار دشواری است.

در جدول 1 مقدار  $\alpha$  از حل هم‌دما در پنج دمای کاری محاسبه و خطای آن نسبت به کمترین مقدار  $\alpha$  محاسبه شده است. مطابق این جدول مقدار خطا ناچیز است؛ لذا می‌توان  $\alpha$  را در یک حل عددی هم‌دما محاسبه کرده و از آن در حل عددی غیر هم‌دما استفاده کرد که در این صورت تعداد حدس اولیه به دو کاهش می‌یابد. شار مولی بخار آب در فصل مشترک کانال و لایه نفوذی کاتد مشخص نیست؛ لذا لازم است که مقداری به عنوان حدس اولیه به آن نسبت داده شود. صحت این حدس با مقدار شار مولی آب در فصل مشترک غشاء و لایه نفوذی گاز کاتد مشخص می‌شود. علاوه بر این، لازم است که گرادیان دما نیز در فصل مشترک کانال و لایه نفوذی گاز کاتد



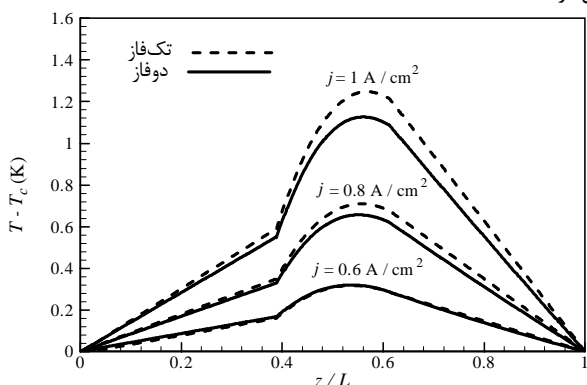
شکل 4 نمودار توزیع اشباع در لایه نفوذی گاز کاند به ازای تعداد گره مختلف می‌شود به طوری که برای تعداد 20 و 30 گره، جواب‌ها بر هم منطبق هستند؛ لذا از شبکه‌ای با 20 گره در کاند و 52 گره در کل دامنه حل استفاده شده است.

#### 4- نتایج

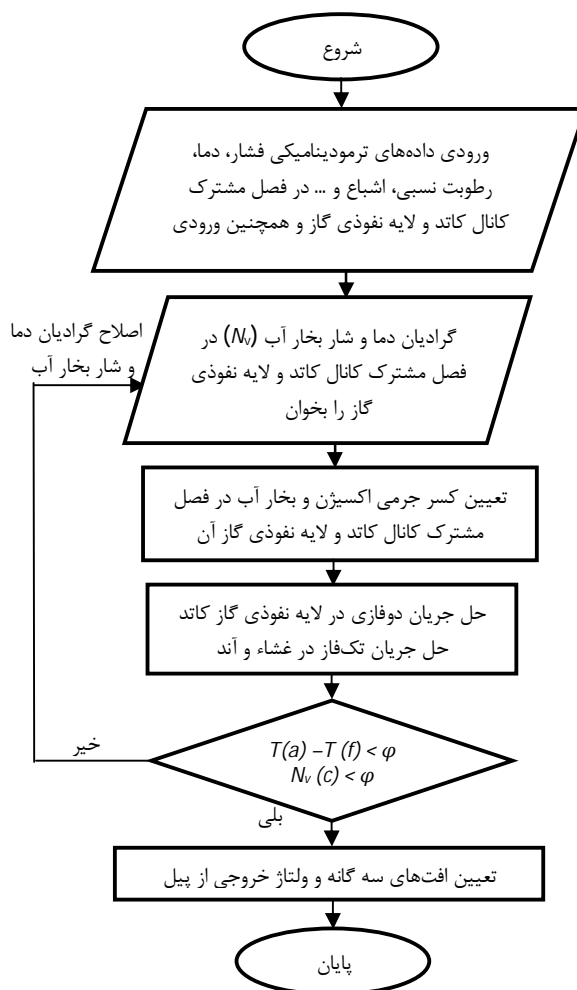
نتایج به چند قسمت تقسیم شده است. ابتدا جریان تک‌فاز و دوفاز مقایسه شده‌اند تا بر ضرورت تحلیل جریان دوفازی تاکید شود سپس تاثیر در نظر گرفتن تماس بین دو فاز و انتقال جرم بین آن دو بررسی شده است تا اهمیت نسبی این دو مشخص شود. در ادامه اثر توزیع درجه حرارت روی مدل جریان دوفازی مورد بررسی قرار گرفته و با جریان دوفازی هم‌دما مقایسه شده است تا بر تاثیر تغییرات دما در طول پیل سوختی بر مدل‌سازی دوفازی تاکید شود و نهایتاً تاثیر اختلاف فشار در کانال‌های آند و کاتد بر عملکرد پیل سوختی بررسی شده است.

#### 4-1- مقایسه جریان تک‌فاز با دوفاز

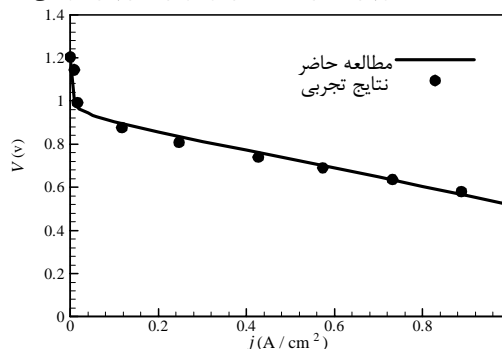
در شکل 5 منحنی تغییرات درجه حرارت در طول پیل سوختی برای دو جریان دوفازی و تک‌فاز نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در چگالی جریان‌های کم، توزیع درجه حرارت تک‌فاز و دوفاز بسیار به هم نزدیکند ولی با افزایش چگالی جریان، اختلاف آن‌ها بیشتر و بیشتر می‌شود. چنانچه گازهای ورودی به پیل سوختی در حالت اشباع نباشند امکان تبخیر آب در طول کاند وجود دارد و تبخیر آب مانع از افزایش دما در پیل سوختی نسبت به حالت تک‌فاز می‌شود. مطابق شکل درجه حرارت در جریان تک‌فاز بیشتر از جریان دوفازی است چرا که رطوبت نسبی در کانال کاند کمتر از حالت اشباع است و بخشی از گرما صرف تبخیر آب مایع می‌شود.



شکل 5 منحنی توزیع درجه حرارت در سراسر پیل سوختی به ازای چگالی جریان‌های مختلف در دو حالت تک‌فاز و دوفاز در رطوبت نسبی ورودی به کاند 85% می‌شود.

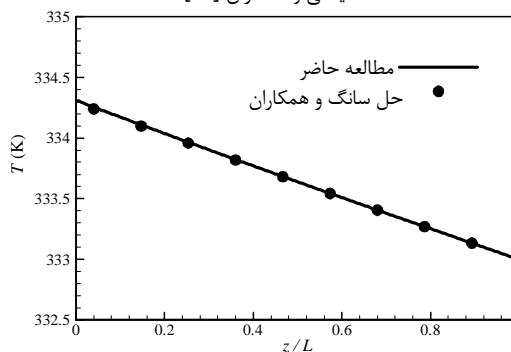


شکل 1 فلوجارت حل عددی جریان دوفازی در پیل سوختی



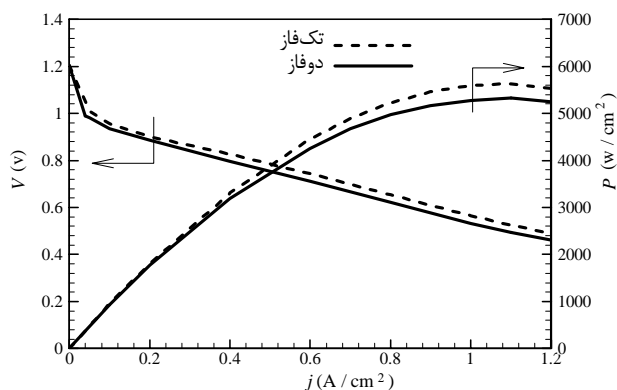
شکل 2 مقایسه منحنی عملکرد پیل سوختی حاضر با داده‌های تجربی

تسیلانی و همکاران [22]



شکل 3 مقایسه منحنی توزیع درجه حرارت در کاند پیل سوختی حاضر

با داده‌های سانگ و همکاران [18]



شکل 8 مقایسه منحنی عملکرد و چگالی قدرت پیل سوختی در دو حالت تکفاز و دوفاز در رطوبت نسبی 100% گازهای ورودی به کاتد

#### 4-2- اثر تماس و انتقال جرم

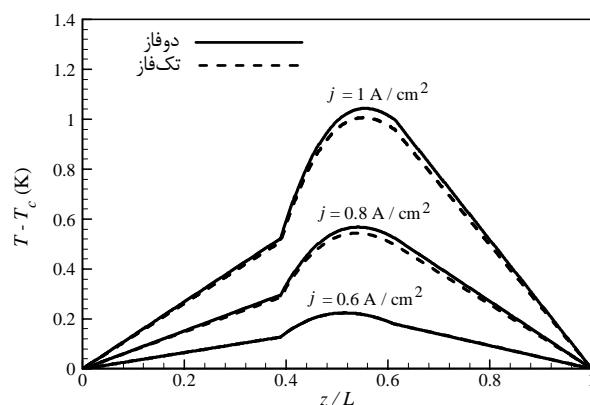
در این قسمت از نتایج، منحنی‌های غلظت اکسیژن و غلظت بخار آب در طول لایه نفوذی گاز کاتد در دو حالت جریان تکفاز و جریان دوفاز ترسیم شده است. منحنی‌ها در حالت دوفاز با در نظر گرفتن فقط اثر تماس ( $\dot{m} = 0$ )، در نظر گرفتن فقط اثر تبادل جرم بین دو فاز ( $s = 0$ ) و نهایتاً در نظر گرفتن هر دو اثر تماس و تبادل جرم ( $s, \dot{m} \neq 0$ ) ترسیم شده‌اند تا اهمیت نسبی آن‌ها روی عملکرد پیل سوختی بهتر مشخص شود.

در شکل 9 تغییرات غلظت اکسیژن و غلظت بخار آب در طول لایه نفوذی گاز کاتد به ازای رطوبت نسبی 85% گازهای ورودی به کاتد نشان داده شده است. مطابق این شکل غلظت اکسیژن در لایه کاتالیست که محل وقوع واکنش الکتروشیمیایی است کمترین مقدار را دارد و با دور شدن از لایه کاتالیست مقدار آن افزایش می‌یابد. همچنین مشخص می‌شود غلظت بخار آب در لایه کاتالیست بیشترین مقدار را دارد. مطابق این شکل، غلظت اکسیژن در حالت تکفاز بیشتر از حالت دوفازی است که این امر موجب افزایش افت فعال‌سازی و غلظتی می‌شود. اگر در مدل‌سازی دوفازی، فقط اثر تبخیر لحاظ شود غلظت اکسیژن بر مقدار آن در حالت تکفاز منطبق می‌شود زیرا در این حالت در حقیقت آب در منفذها وجود ندارد و دو فاز از مسیرهای متفاوتی جریان می‌یابند. اما وقتی که فقط اثر تماس لحاظ شود غلظت اکسیژن کمتر از مقدار آن در حالت تکفاز می‌شود. چنانچه هر دو اثر تماس و تبخیر با هم لحاظ شود مقدار غلظت اکسیژن کمتر از حالت‌های دیگر است. بنابراین اثر تماس اهمیت بیشتری نسبت به اثر تبادل جرم در جریان دوفازی دارد.

در شکل 10 تغییرات غلظت اکسیژن و غلظت بخار آب در طول لایه نفوذی گاز کاتد در رطوبت نسبی 100% گازهای ورودی به کاتد نشان داده شده است. مطابق شکل 10، غلظت بخار آب در لایه کاتالیست بیشترین مقدار را دارد زیرا محل وقوع واکنش الکتروشیمیایی است. در این حالت (میعان)، بر خلاف حالت قبل (تبخیر)، غلظت اکسیژن در حالت تکفاز بر حالتی که فقط انتقال جرم در نظر گرفته شده است بر یکدیگر منطبق نیست؛ اما مانند حالت قبل همچنان اثر تماس اهمیت بیشتری نسبت به اثر تبادل جرم در جریان دوفازی دارد.

#### 4-3- اثر توزیع درجه حرارت

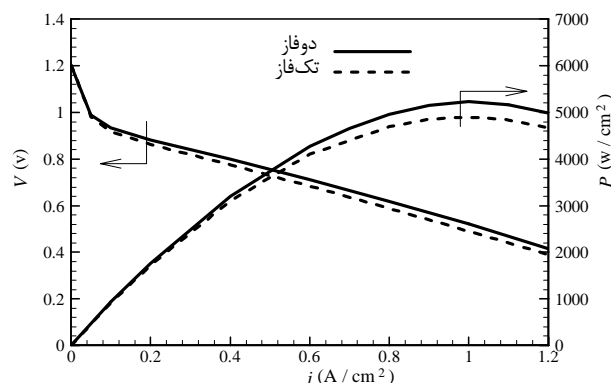
در شکل 11 منحنی تغییرات نرخ تبخیر آب در طول لایه نفوذی گاز در دو حالت هم‌دما و غیرهم‌دما ترسیم شده است. مطابق این شکل، نرخ تبخیر



شکل 6 منحنی توزیع درجه حرارت در سراسر پیل سوختی به ازای چگالی جریان‌های مختلف در دو حالت تکفاز و دوفاز در رطوبت نسبی 100% گازهای ورودی به کاتد

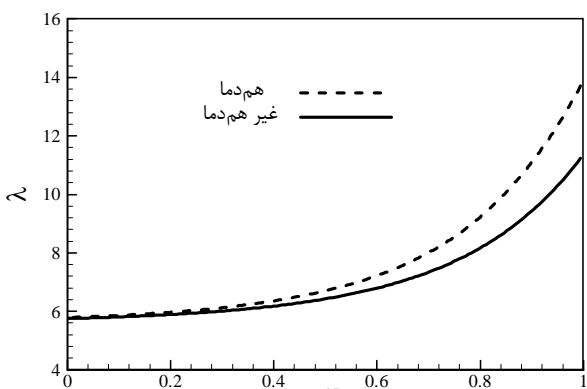
در شکل 6 منحنی تغییرات درجه حرارت در صورت وقوع میعان نشان داده شده است. در چگالی جریان‌های کم، توزیع درجه حرارت جریان تکفاز و دوفاز بسیار به هم نزدیکند ولی با افزایش چگالی جریان، اختلاف آن‌ها بیشتر و بیشتر می‌شود. بر خلاف منحنی قبل (تبخیر)، اختلاف این دو به دلیل تبدیل فاز بخار آب به آب مایع است که حرارت تولید می‌شود؛ لذا درجه حرارت در حالت تکفاز کمتر است. در نتیجه مقدار نسبی دما در جریان دوفاز و تکفاز وابسته به رطوبت نسبی کانال کاتد است.

در شکل 7 منحنی عملکرد و چگالی قدرت پیل سوختی در دو حالت تکفاز و دوفاز در رطوبت نسبی 85% گازهای ورودی به کاتد ترسیم شده است. مطابق این شکل، چگالی قدرت و ولتاژ خروجی از پیل سوختی با فرض دوفازی بیشتر از تکفاز است که این خود لزوم مدلسازی دوفازی را آشکار می‌کند. با فرض جریان دوفازی، محتوای آب در غشاء بیشتر است که این کاهش افت اهمی را به همراه دارد، هرچند که غلظت اکسیژن در کاتالیست کاتد در جریان دوفازی نسبت به جریان تکفاز اندکی کمتر است. در صورتی که رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد 100% باشد ولتاژ خروجی پیل در حالت دوفازی کمتر از تکفاز است چرا که در این حالت، وقوع میعان در الکتروکاتد تاثیر روی محتوای آب غشاء ندارد؛ ولی در این حالت مقدار اشباع  $s$  افزایش می‌یابد که این باعث کاهش غلظت اکسیژن در کاتالیست می‌شود که نتیجه آن کاهش ولتاژ خروجی است که در شکل 8 نشان داده شده است.

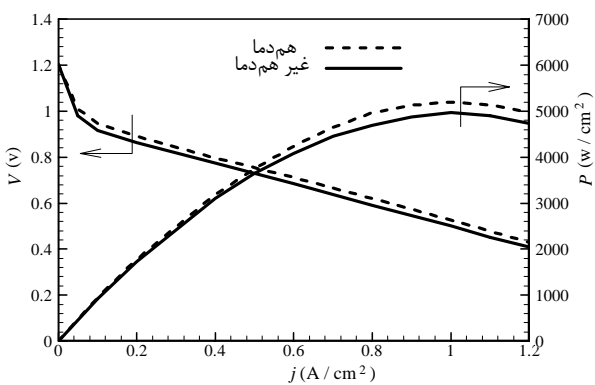


شکل 7 مقایسه منحنی عملکرد و چگالی قدرت پیل سوختی در دو حالت تکفاز و دوفاز در رطوبت نسبی 85% گازهای ورودی به کاتد

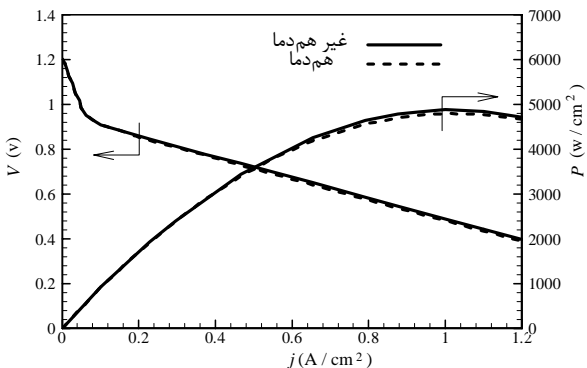
در شکل 13 منحنی عملکرد و چگالی قدرت پیل سوختی در جریان دوفازی در دو حالت هم‌دم‌ها و غیر هم‌دم‌ها برای رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد 85% ترسیم شده است. مطابق شکل 13، در این حالت چگالی قدرت و ولتاژ خروجی از پیل سوختی در حل هم‌دم‌ها بیشتر از غیر هم‌دم‌ها است که دلیل آن بالاتر بودن محتوای آب در غشاء پلیمری است. این نتیجه خود لزوم مدل‌سازی غیر هم‌دم‌ها را بیشتر آشکار می‌کند. در شکل 14 منحنی عملکرد و چگالی قدرت پیل سوختی در جریان دوفازی در دو حالت هم‌دم‌ها و غیر هم‌دم‌ها برای رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد 100% ترسیم شده است. بر خلاف حالت قبل، در این حالت چگالی قدرت و ولتاژ خروجی از پیل سوختی در حل غیر هم‌دم‌ها بیشتر از حل هم‌دم‌ها است و این اختلاف نسبت به حالت قبل کمتر است.



شکل 12 منحنی تغییرات محتوای آب در غشاء در دو حالت هم‌دم‌ها و غیر هم‌دم‌ها در چگالی جریان  $1 A/cm^2$



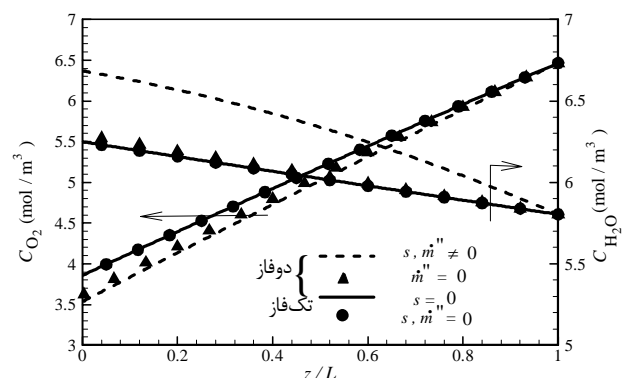
شکل 13 منحنی عملکرد و چگالی قدرت پیل سوختی در دو حالت هم‌دم‌ها و غیر هم‌دم‌ها برای رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد 85%



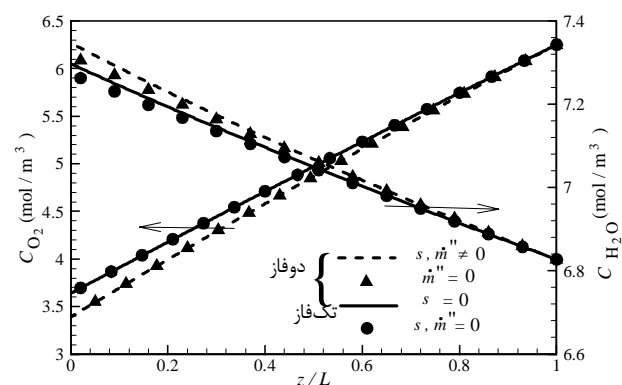
شکل 14 منحنی عملکرد و چگالی قدرت پیل سوختی در دو حالت هم‌دم‌ها و غیر هم‌دم‌ها برای رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد 100%

آب در حالت غیر هم‌دم‌ها بیشتر از حالت هم‌دم‌ها است. در نظر گرفتن گرمای تولیدی در حل غیر هم‌دم‌ها، بخش بیشتری از آب موجود در کاتد پیل سوختی را تبخیر می‌کند. این موضوع به خصوص در نزدیک کانال کاتد که دمای کمتری دارد و در آن میعان واقع می‌شود محسوس‌تر است. تفاوت نرخ تبخیر آب در دو حالت هم‌دم‌ها و غیر هم‌دم‌ها باعث تفاوت در کسر مولی بخار آب در طول لایه نفوذی کاتد پیل سوختی می‌شود.

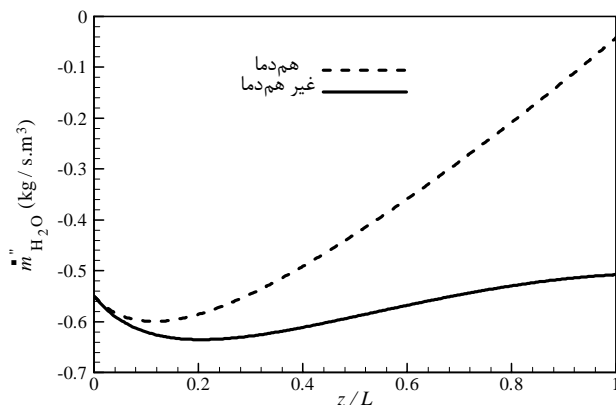
در شکل 12 منحنی تغییرات محتوای آب در غشاء در دو حالت هم‌دم‌ها و غیر هم‌دم‌ها ترسیم شده است. اولاً با دور شدن از آند مقدار محتوای آب غشاء برای دو حالت هم‌دم‌ها و غیر هم‌دم‌ها افزایش می‌یابد. ثانیاً مطابق این شکل به علت کمتر بودن رطوبت نسبی در مرز کاتد و غشاء، محتوای آب غشاء در حل هم‌دم‌ها بیشتر از حل غیر هم‌دم‌ها است.



شکل 9 منحنی تغییرات غلظت اکسیژن و بخار آب در کاتد برای رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد 85%



شکل 10 منحنی تغییرات غلظت اکسیژن و بخار آب در کاتد برای رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد 100%



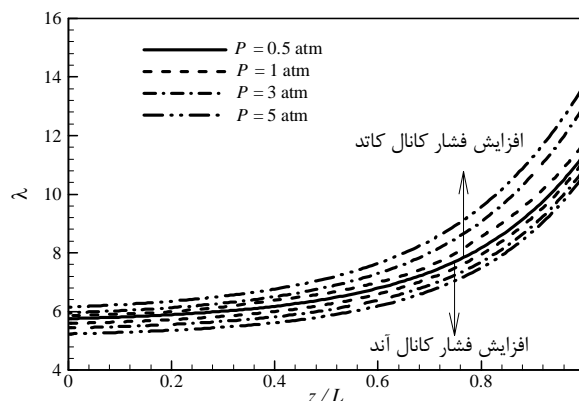
شکل 11 منحنی تغییرات نرخ تبخیر آب در طول لایه نفوذی گاز کاتد در دو حالت هم‌دم‌ها و غیر هم‌دم‌ها در چگالی جریان  $1 A/cm^2$



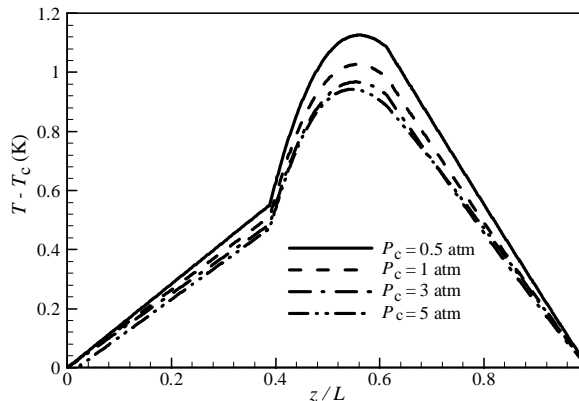
## 4-4- اثر فشار کانال‌ها

در شکل 15 منحنی تغییرات محتوای آب غشاء به ازای فشارهای مختلف کانال‌های آند و کاتد نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش فشار گاز در کانال کاتد نسبت به آند، برگشت آب به غشاء بیشتر شده و به تبع آن محتوای آب غشاء افزایش می‌یابد. با افزایش محتوای آب، انتقال پروتون‌ها در غشاء پلیمری بهتر شده و به تبع آن افت اهمی کاهش می‌یابد. با کاهش افت اهمی در غشاء انتظار می‌رود که درجه حرارت در پیل سوختی کاهش یابد. برعکس، با افزایش فشار گاز در کانال آند غلظت بخار آب همراه هیدروژن کاهش می‌یابد که به تبع آن محتوای آب در غشاء کاهش می‌یابد. در نتیجه افت اهمی افزایش می‌یابد و باعث می‌شود که درجه حرارت در پیل سوختی افزایش یابد.

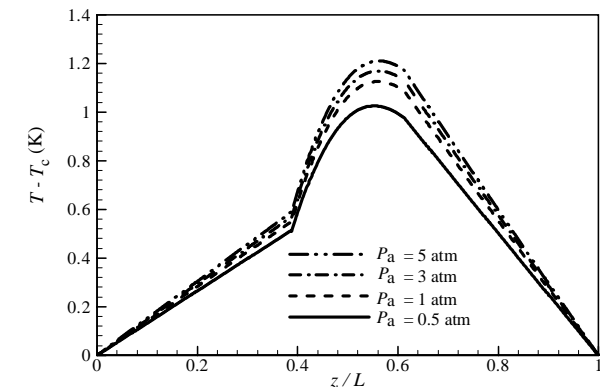
در شکل 16 منحنی تغییرات درجه حرارت در سراسر پیل سوختی به ازای فشارهای مختلف مخلوط گاز در کانال کاتد نشان داده شده است. همان‌طور که در قسمت قبل بحث شد با افزایش فشار کاتد غلظت اکسیژن حل شده در کاتالیست کاتد و محتوای آب غشاء افزایش می‌یابند. افزایش محتوای آب باعث کاهش مقاومت اهمی شده در نتیجه درجه حرارت در طول پیل سوختی کاهش می‌یابد. در شکل 17 منحنی تغییرات درجه حرارت در سراسر پیل سوختی به ازای فشارهای مختلف مخلوط گاز در کانال آند نشان داده شده است. مطابق شکل 17 با افزایش فشار گاز در کانال آند، درجه حرارت در طول پیل سوختی افزایش یافته است. با افزایش فشار گاز در کانال آند، محتوای آب در غشاء کاهش داشته است؛ لذا با افزایش افت اهمی در غشاء درجه حرارت در پیل سوختی افزایش می‌یابد.



شکل 15 منحنی تغییرات محتوای آب غشاء به ازای فشار گاز ورودی به کاتد و آند متفاوت در چگالی جریان  $1 A/cm^2$



شکل 16 منحنی توزیع درجه حرارت در سراسر پیل سوختی به ازای فشار گاز ورودی به کاتد متفاوت و در فشار آند 0/5 اتمسفر



شکل 17 منحنی توزیع درجه حرارت در سراسر پیل سوختی به ازای فشار گاز ورودی به آند متفاوت و در فشار کاتد 0/5 اتمسفر

## 5- نتیجه گیری و جمع بندی

در مقاله حاضر، مدل‌سازی جریان دوفازی و غیر هم‌دما در پیل سوختی پلیمری انجام شده است. ارزیابی نسبتاً دقیقی از پارامتر  $\alpha$  انجام شده و اثر تغییر فشار کانال‌های گاز نیز بر منحنی عملکرد پیل سوختی بررسی شده است. نتایج نشان داده است که:

- برای مدل‌سازی دقیق جریان دوفازی، لازم است هر دو اثر تماس دو فاز و تبادل جرم بین آن‌ها در نظر گرفته شود.

- ولتاژ خروجی از پیل سوختی در حل هم‌دما بیشتر از مقدار واقعی آن است که این خود لزوم مدل‌سازی غیر هم‌دما را آشکار می‌کند.

- در چگالی جریان‌های کم، توزیع درجه حرارت تک‌فاز و دوفاز بسیار به هم نزدیکند ولی با افزایش چگالی جریان اختلاف آن‌ها بیشتر و بیشتر شده است. در صورت وقوع تبخیر در کاتد درجه حرارت در حالت تک‌فاز بیشتر از دوفاز است؛ ولی در صورت وقوع میعان، درجه حرارت در حالت دوفاز بیشتر از تک‌فاز است.

- با افزایش فشار گاز در کانال کاتد، محتوای آب غشاء بیشتر می‌شود که این باعث افت اهمی کمتر و به تبع آن کاهش درجه حرارت در پیل سوختی می‌شود. بر خلاف کاتد، با افزایش فشار گاز در کانال آند، درجه حرارت در طول پیل سوختی افزایش می‌یابد.

## 6- مراجع

- [1] H. Hassanzadeh, S. H. Mansouri, Efficiency of ideal fuel cell and carnot cycle from a fundamental perspective, *Journal of Power and Energy*, Vol. 219, pp. 245-254, 2005.
- [2] J. J. Baschuk, X. Li, Modelling of polymer electrolyte membrane fuel cells with variable degrees of water flooding, *Journal of Power Sources*, Vol. 86, pp. 181-196, 2000.
- [3] U. Pasaogullari, C. Y. Wang, Two-Phase Modeling and Flooding Prediction of Polymer Electrolyte Fuel Cells, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 152, pp. 380-390, 2005.
- [4] D. M. Bernardi, M. W. Verbrugge, Mathematical Model Of a Gas Diffusion Electrode Bonded to a Polymer Electrolyte, *Journal of AIChE*, Vol. 37, pp. 1151-1163, 1991.
- [5] D. M. Bernardi, M. W. Verbrugge, A mathematical model of the solid-polymer-electrolyte fuel cell, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 139, pp. 2477-2491, 1992.
- [6] A. Rowe, X. Li, Mathematical Modeling of proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 102, pp. 82-96, 2001.
- [7] N. Djilali, D. Lu, Influence of heat transfer on gas and water transport in fuel cells, *International Journal of Thermal Science*, Vol. 41, pp. 20-49, 2002.
- [8] E. Afshari, S. A. Jazayeri, Heat and Water Management in PEM Fuel Cell, *Journal of WSEAS Transactions on fluid mechanics*, Vol. 3, pp. 137-142, 2008.
- [9] U. Pasaogullari, C. Y. Wang, Liquid Water Transport in Gas Diffusion Layer of Polymer Electrolyte Fuel Cells, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 151, pp. 399-406, 2004.

- [17] W. Shi, E. Kurihara, N. Oshima, Effects of capillary pressure on liquid water removal in the cathode gas diffusion layer of a polymer electrolyte fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 182, pp. 112-118, 2008.
- [18] D. Song, Q. Wang, Z. S. Liu, C. Huang, Transient analysis for the cathode gas diffusion layer of PEM fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 159, pp. 928-942, 2006.
- [19] A. H. Sadoughi, A. Ansaghi, M. J. Kermani, Performance Analysis of a Two phase Non-isothermal PEM fuel cell, in *15<sup>th</sup> annual conference of the CFD society of Canada*, Toronto, Ontario, Canada, 2007.
- [20] R. P. O'hayre, S. W. Cha, W. G. Collela, F. B. Printz, *Fuel Cell Fundamentals*, pp. 111-158, New Jersey: Wiley, 2006.
- [21] S. H. Golkar, *Two Phase and Non-isothermal modeling and optimization of PEM Fuel cell*, M.Sc Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, 2014. (In Persian)
- [22] E. A. Ticianelli, C. R. Derouin, A. Redondo, S. Srinivasan, Methods to Advance Technology of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 135, pp. 2209-2214, 1988.
- [10] Z. Zhan, J. Xiao, D. Li, M. Pan, Y. Runzhang, Effects of porosity distribution variation on the liquid water flux through gas diffusion layers of PEM fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 160, pp. 1041-1048, 2006.
- [11] F. Chen, M. H. Chang, P. T. Hsieh, Two-phase transport in the cathode gas diffusion layer of PEM fuel cell with a gradient in porosity, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 2525-2529, 2008.
- [12] U. Pasaogullari, C. Y. Wang, Two-Phase transport and the role of microporous layer in polymer electrolyte fuel cells, *Electrochimica Acta*, Vol. 49, pp. 4359-4369, 2004.
- [13] P. K. Das, X. Li, Z. S. Liu, Analysis of liquid water transport in cathode catalyst layer of PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, pp. 2403-2416, 2010.
- [14] M. Vynnycky, On the modeling of two-phase flow in the cathode gas diffusion layer of a polymer electrolyte fuel cell, *Applied Mathematical and Computation*, Vol. 189, pp. 1560-1575, 2007.
- [15] L. You, H. Liu, A two-phase flow and transport model for the cathode of PEM fuel cells, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 2277-2287, 2002.
- [16] H. Hassanzadeh, A. Ferdowsara, M. Barzagary, Modeling of two phase flow in the cathode of gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cell, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 55-62, 2014. (In Persian)