



مدل سازی جریان دوفازی در لایه نفوذ گاز کاتد پیل سوختی پلیمری

حسن حسن زاده^{۱*}، امین فردوس آرا^۲، محبوبه برزگری^۳

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲-۳ کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* h.hassanzadeh@birjand.ac.ir، ۹۷۱۷۵/۶۱۵ صندوق پستی

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۳۰ دی ۱۳۹۱

پذیرش: ۲۰ فروردین ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۴ فروردین ۱۳۹۳

کلید واژگان:

پیل سوختی پلیمری

لایه نفوذ گاز کاتد

جریان دوفازی

چکیده

در لایه نفوذ گاز کاتد پیل سوختی پلیمری، علاوه بر هوا، آب هم بصورت مایع و هم بصورت گاز جریان دارد. تماس دوفاز مایع و گاز از یک سو و تبادل جرم میان این دوفاز از سوی دیگر، بر پارامترهای اصلی جریان دوفازی و در نتیجه عملکرد پیل سوختی پلیمری اثر می‌گذارد. در این مقاله ضمن بررسی اثر تماس دوفاز و تبادل جرم میان آنها، نمودار پارامترهای اصلی جریان دوفازی از جمله فشار مویینگی، میزان اشباع، غلظت مولی گونه‌های گازی، سرعت مخلوط گازها، سرعت آب و غیره استخراج شده است. علاوه بر این، تأثیر تغییر رطوبت نسبی هوای ورودی به کاتد و همچنین تغییر دمای عملکرد پیل سوختی بر این پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور محاسبه دقیق میزان آب وارد شده از سمت غشا به لایه نفوذ گاز، جریان آب در غشا نیز مدل‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش رطوبت نسبی هوای ورودی به کاتد از ۹۰ درصد به ۷۰ درصد، سهم بخار آب در تخلیه آب از لایه نفوذ گاز کاتد را تا ۳۰۰ درصد افزایش می‌دهد. علاوه بر این به تبع این کاهش رطوبت سرعت آب، گرادین فشار مویینگی و گرادین اشباع کاهش می‌یابد. افزایش دمای عملکرد پیل سوختی نیز، افزایش نرخ تبخیر، کاهش سرعت توده گاز و کاهش گرادین فشار گاز را به دنبال دارد.

Modeling of two phase flow in the cathode of gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cell

Hassan Hassanzadeh*, Amin Ferdowsara, Mahboba Barzagary

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

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 19 January 2012

Accepted 09 April 2013

Available Online 13 April 2014

Keywords:

Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Gas Diffusion Layer

Two Phase Flow

ABSTRACT

There is not only air, but both gas and liquid phase of water in the cathode gas diffusion layer of polymer electrolyte fuel cell. The contact and mass transfer between these two phases influence main parameters of two phase flow in cathode gas diffusion layer and also fuel cell's performance. In this paper through the investigating of the impact of considering the contact and mass transfer between liquid and gas phase of water, the main parameters of two phases flow such as capillary pressure, saturation, mole concentrations of gas species, gas velocity and liquid velocity is evaluated. Besides, the impact of changing the value of cathode channel humidity and fuel cell temprature on the value of the named parameters is invetigated. In order to calculating the exact amount of water which passes throgh the membrane's boundry precisely, the water flow in the nafion membrane is modelled too. The results show that decreasing of relative humidity in the cathode channel from 90% to 70%, increase the amount of outlet vapor up to 300%. Beside that, decreasment in relative humedity leads to a decrease in the liquid water velocity, capillary pressure gradient and saturation gradient in the GDL. Increasing the temperature causes an increase in the rate of water vaporization and a decrease in the gas velocity and gas pressure gradient.

۱- مقدمه

در پیل‌های سوختی انرژی شیمیایی سوخت حین انتقال الکترون از الکتروند به الکتروکاتد، در یک مرحله دریافت می‌شود. این تبدیل مستقیم انرژی، بازده بالای پیل‌های سوختی را به دنبال دارد. علاوه بر این به دلیل نوع سوخت پیل‌های سوختی، میزان آلاینده‌گی آنها در مقایسه با مبدل‌های حرارتی کمتر می‌باشد. در پیل‌های سوختی نوع پلیمری، باید مزایای دمای عملکرد پایین، سرعت راه اندازی بالا و الکترولیت جامد را به دو مزیت بازده

بالا و آلاینده‌گی کم افزود. این مزیت‌های پیل سوختی پلیمری، آن را به گزینه ای مناسب برای به کارگیری در عرصه حمل و نقل تبدیل نموده است [۱-۴]. برای رقابت پذیر بودن پیل‌های سوختی پلیمری با سایر مبدل‌های انرژی و به کارگیری آنها در عرصه حمل و نقل، افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های آن ضروری است و در میان مؤلفه‌های مؤثر بر این دو، مدیریت آب پارامتری کلیدی به شمار می‌آید [۵]. جریان آب تأثیر زیادی بر عملکرد پیل سوختی پلیمری دارد. رسانایی غشا نفیونی با میزان آب موجود در غشا ارتباط مستقیم

با استفاده از این روش لیو ولو [۱۳، ۱۴] به مدل سازی دوفازی پیل سوختی پلیمری مبادرت ورزیدند، اما از آنجا که روش M^2 برای سطوح آب دوست تدوین شده بود امکان بررسی تأثیر میزان آب گریزی لایه نفوذ گاز بر عملکرد پیل سوختی در این مدل سازی ها وجود ندارد. نام و کاویانی [۱۵] رابطه لورت را برای به کارگیری در سطوح آب گریز توسعه دادند و اثر زاویه تماس را در این رابطه وارد نمودند. پاساگولاری و ونگ [۱۶] با استفاده از رابطه لورت و بهره گیری از رابطه داریسی به عنوان رابطه مومنتم مدلی ساده تر برای جریان دوفازی را ارائه کردند. آنها در مدل خود اثر تبادل جرم میان فازها را لحاظ نکردند. شی و همکاران [۱۷] با استفاده از سیستم معادلات مشابه [۱۶] در مدلی دو فازی و یک بعدی تأثیر تغییر دما بر فشار مویینگی و اشباع را مورد بررسی قرار دادند. مدل آنها اثر تماس میان دو فاز آب و بخار آب را لحاظ نموده است. اما این مدل به محاسبه تبادل جرم میان دو فاز و همچنین پارامترهای جریان در فاز گازی نپرداخته است. ژان و همکاران [۱۸] در مدلی یک بعدی و دو فازی به بررسی تأثیر تغییر ضریب تخلخل بر پارامترهای جریان دو فازی پرداختند و اثر توزیع ضریب تخلخل خطی و سهمی بر تخلیه آب از لایه نفوذ گاز را بررسی نموده اند. آنها نیز همانند مدل شی و کوریها تنها تأثیر تماس دو فاز بایکدیگر را در مدل خود لحاظ نمودند. چن و همکاران [۱۹] نیز تأثیر توزیع ضریب تخلخل خطی لایه نفوذی گاز بر جریان دو فازی لایه نفوذ گاز را مورد بررسی قرار دادند. تفاوت مدل آنها با مدل ژان و همکاران در محاسبه توزیع غلظت اکسیژن در طول لایه نفوذ گاز می باشد. در این مدل تبادل جرم میان فازها و همچنین تغییر فشار گاز در طول لایه نفوذی گاز در نظر گرفته نشده است. همان طور که ذکر شد مدل های فوق الذکر دارای ضعف مشترکی هستند و آن عدم مدل نمودن تبادل جرم میان دو فاز می باشد. علاوه بر این در برخی از این مدل ها از تغییر فشار گاز در طول لایه نفوذ گاز صرف نظر شده است.

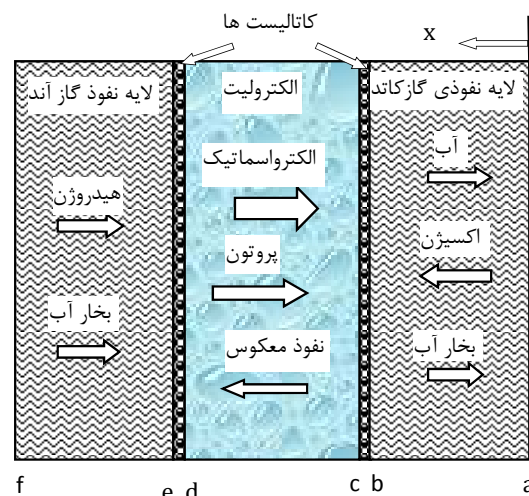
در تحقیق سانگ و همکاران [۲۰] مدل سازی یک بعدی و غیر هم دمای جریان دوفازی در لایه نفوذ گاز صورت گرفته است و بر خلاف مدل های پیشین تبادل جرم میان فازها و همچنین اثر تغییر فشار گاز را در نظر گرفته است. سیستم معادلات و روش مدل سازی مراجع [۱۶-۲۰]، بدون نیاز به الگوریتم های پیچیده، امکان محاسبه پارامترهای جریان دوفازی را فراهم می سازد و با بهره گیری از آن امکان محاسبه اثر تماس و تبادل جرم میسر می شود. علاوه بر این ها، در این سیستم معادلات می توان اثر آب گریزی لایه نفوذ گاز را منظور کرد. اما مدلهایی که تاکنون بر اساس این سیستم ارائه شده اند [۱۶-۲۲] به دلیل عدم مدل سازی جریان آب در غشای پلیمری، به مقدار آب وارد شده از غشا به لایه نفوذ گاز کاتد، مقداری فرضی را نسبت می دهند. برای توضیح بیشتر در این باره معرفی پارامتر α ضرورت دارد. α عدد بدون بعدی است که در صورتی که مقدار آن معلوم باشد شار مولی آب عبوری از غشا به لایه نفوذ گاز با استفاده از رابطه $N_{H_2O} = \alpha J / 2F$ قابل قبول محاسبه است. در این رابطه F عدد فارادی i ، چگالی جریان خروجی پیل سوختی و N_{H_2O} شار مولی آب عبوری از غشا به لایه نفوذ گاز می باشد. مراجع ذکر شده در فوق، به دلیل عدم مدل سازی جریان در غشا، به α مقداری فرضی را نسبت داده اند که در جدول ۱ مقادیر فرضی مربوط به برخی از این مقالات آورده شده است. نسبت دادن مقداری فرضی به α به معنای نسبت دادن مقداری فرضی به یکی از شرایط مرزی مورد نیاز برای حل جریان دو فازی در لایه نفوذ گاز است.

دارد. کاهش آب غشا، افزایش مقاومت یونی و در نتیجه افزایش دما و حتی تخریب غشا را به دنبال دارد.

پروتون حین انتقال از آند به کاتد، تعدادی مولکول آب را با خود حمل می نماید و جریانی از آب، موسوم به جریان الکترواسموتیک را ایجاد می کند (شکل ۱). در پی افزایش میزان آب در سمت کاتد، جریان نفوذ معکوس در غشا پدید می آید. در چگالی جریان های بالا، جریان الکترواسموتیک بر جریان نفوذ معکوس غلبه دارد و شار خالص آب از سمت آند به سمت کاتد می باشد. علاوه بر آب جریان یافته به لایه کاتالیست کاتد، آب تولید شده در آن نیز سبب افزایش میزان آب سمت کاتد می شود. در صورت عدم تخلیه آب از کاتد، پدیده غرقاب شدگی رخ می دهد و وصول واکنش دهنده ها به محل واکنش کند و عملکرد پیل سوختی مختل می شود. آب در حین جریان در لایه نفوذ گاز کاتد (مرز a تا b) با هوا در تماس است (شکل ۱). تماس و تبادل جرم میان آب و هوا، بر پارامترها جریان آنها و در نتیجه عملکرد پیل سوختی تأثیر می گذارد. لذا مدل سازی دقیق تر عملکرد پیل سوختی مستلزم لحاظ نمودن تأثیر تماس و تبادل جرم میان این دو فاز است.

در دو دهه قبل مدل سازی های تک فاز متعددی برای بررسی عملکرد پیل سوختی پلیمری انجام شده است که برای نمونه می توان به مراجع [۶-۱۰] اشاره کرد. این مدل سازی ها اطلاعات ارزشمندی برای درک بهتر پدیده های پیل سوختی پلیمری ارائه کرده اند، اما عموماً در آنها فرض می شود که دو فاز مایع و گاز، از مسیرهای مجزا حرکت کرده و با هم در تماس نیستند، بنابراین این مدل ها قابلیت بررسی تأثیر تماس و تبادل جرم میان فازها را ندارند. برای برطرف شدن این نقایص، رو آوردن به مدل سازی های دو فازی جریان در لایه نفوذ گاز کاتد ضرورت دارد. جنگ و همکاران [۱۱] در مدلی کلی، دوبعدی و دوفازی که با روش کلاسیک انجام شده است، به بررسی تأثیر پارامترهای لایه نفوذ گاز بر عملکرد پیل سوختی پرداخته اند. مدل آن ها مدلی کامل و با ارزش است اما به طور کلی مدل سازی های دوفازی که با روش کلاسیک صورت می گیرد دو نقص عمده دارد: اول این که حل معادلات مستلزم الگوریتم های پیچیده است و دوم این که مدل ریاضی آن توان بررسی اثر میزان آب گریزی لایه نفوذ گاز بر عملکرد پیل سوختی را ندارد.

برای ساده کردن حل معادلات کلاسیک، ونگ و چنگ [۱۲] به ارائه روشی ساده تر برای مدل سازی دوفازی موسوم به روش M^2 برای سطوح آب دوست پرداختند.



شکل ۱ تصویر شماتیکی از پیل سوختی پلیمری

نفوذپذیری نسبی فاز گاز برابر با $(1-s)^3$ می‌باشد [۲۲،۲۰]. لذا معادله داری برای فاز گاز به صورت رابطه (۵) است.

$$u_g = -\frac{k_{abs}(1-s)^3}{\mu_g} \frac{dP_g}{dx} \quad (5)$$

شار جرمی مخلوط گاز ورودی به پیل سوختی برابر با مجموع شار جرمی گونه‌های تشکیل دهنده آن است. بنابراین سرعت مخلوط گاز ورودی به لایه نفوذ گاز کاتد توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$u_g = \frac{M_{O_2}N_{O_2} + M_{NO_2}N_{N_2} + M_{H_2O}N_{H_2O}}{\rho_g} \quad (6)$$

با فرض ایده‌آل بودن، چگالی مخلوط گاز (ρ_g) را می‌توان از رابطه (۷) محاسبه کرد:

$$\rho_g = P_g \frac{M_g}{R_u T} \quad (7)$$

در رابطه (M_g و R_u) به ترتیب ثابت جهانی گازها و جرم مولی مخلوط گاز است. در طول لایه نفوذ گاز کسر جرمی گونه‌های اکسیژن، نیتروژن و بخار آب تغییر می‌کند، لذا جرم مولی مخلوط گاز در طول این لایه تغییر می‌کند. مقدار جرم مولی مخلوط گاز از رابطه زیر قابل محاسبه است. در این رابطه y_i نماد کسر جرمی گونه گازی i می‌باشد.

$$M_g = \left(\sum \frac{y_i}{M_i} \right)^{-1} \quad (8)$$

شار مولی اکسیژن در لایه نفوذ گاز ثابت بوده و بر طبق واکنش کاهش اکسیژن در کاتالیست کاتد به ازای هر مول اکسیژن ۴ مول پروتون در واکنش شرکت می‌کند، لذا شار مولی اکسیژن بصورت تابعی از چگالی جریان است بصورت رابطه (۹) بیان می‌شود.

$$N_{O_2} = \frac{J}{4F} \quad (9)$$

در این رابطه F (C/mol) عدد فارادی و J (A/cm²) چگالی جریان می‌باشد. شار اکسیژن ناشی از جابه‌جایی و نفوذ است و به دلیل ثابت بودن شار مولی اکسیژن، تغییرات آن صفر است [۲۰]:

$$\frac{d}{dx}(\rho_g u_g y_{O_2}) - \frac{d}{dx}(\varepsilon \rho_g (1-s) D_{eff}^{O_2} \frac{dy_{O_2}}{dx}) = 0 \quad (10)$$

در این رابطه $D_{eff}^{O_2}$ نشان دهنده ضریب نفوذ مؤثر اکسیژن در مخلوط است که توسط رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود [۲۴،۲۳]:

$$D_{eff}^{O_2} = D^{O_2} \varepsilon (1-s)^{1.5} \quad (11)$$

در لایه نفوذی گاز بر خلاف اکسیژن، شار جرمی بخار آب به دلیل تبادل جرم با آب ثابت نیست لذا تغییرات آن با مقدار آب تبخیر شده بر واحد حجم برابر است.

$$\frac{d}{dx}(M_{H_2O} N_{H_2O}) = -\dot{m}_{H_2O} \quad (12)$$

با تلفیق رابطه فوق با معادله شار جرمی بخار آب، معادله (۱۳) بدست می‌آید [۲۰]:

$$\frac{d}{dx}(\rho_g u_g y_{H_2O}) - \frac{d}{dx}(\varepsilon \rho_g (1-s) D_{eff}^{H_2O} \frac{dy_{H_2O}}{dx}) = -\dot{m}_{H_2O} \quad (13)$$

$\dot{m}_{H_2O}$ تابعی از اشباع، کسر مولی بخار آب و فشار گاز است. درحالتی که $x_{H_2O} > x_{H_2O}^{sat}$ باشد میعان رخ می‌دهد که مقدار بخار آب مایع شده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود [۱۷،۱۵]:

$$\dot{m}_{H_2O} = k_{cond} \varepsilon (1-s) P_g \frac{M_{H_2O}}{R_u T} (x_{H_2O} - x_{H_2O}^{sat}) \quad (14)$$

در حالتی که $x_{H_2O} \leq x_{H_2O}^{sat}$ فرایند تبخیر اتفاق می‌افتد که مقدار آب تبخیر شده از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود [۲۲،۲۰]:

$$\dot{m}_{H_2O} = k_{vap} \varepsilon \rho_l P_g (x_{H_2O} - x_{H_2O}^{sat}) \quad (15)$$

در روابط فوق، ρ_l ، k_{vap} ، k_{cond} به ترتیب ثابت میعان بخار آب، ثابت تبخیر بخار آب، چگالی آب و کسر مولی بخار آب در حالت اشباع است. مقدار

جدول ۱ مقادیر فرضی نسب داده شده به α در تعدادی از مقالات

مشخصات مدل	α
داس و همکاران (۲۰۱۰) [۵]	۰/۵
شی و همکاران (۲۰۰۸) [۱۷]	۰
چن و همکاران (۲۰۰۸) [۱۹]	۱
سانگ و همکاران (۲۰۰۶) [۲۰]	۰/۵
وینیکی (۲۰۰۶) [۲۲]	۰/۶
پاساگولاری و ونگ (۲۰۰۴) [۱۶]	۰
پاساگولاری و ونگ (۲۰۰۴) [۲۱]	۰/۵

در مقاله حاضر اولاً اثر تغییر فشار گاز در لایه نفوذ گاز کاتد و همچنین تبادل جرم میان فازها لحاظ و بررسی شده است. ثانیاً ضمن مدل کردن جریان آب در غشای پیل سوختی پلیمری، مقدار دقیق α تعیین شده است. بنابراین در مقاله حاضر بر خلاف مقالات مشابه از نسبت دادن مقداری فرضی به α خودداری شده است. ثالثاً تأثیر تغییر دما و رطوبت نسبی هوای ورودی کاتد بر پارامترهای جریان دوفازی بررسی شده است که این موضوع در مقالات مشابه کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

۲- مفروضات و معادلات حاکم

مدل کنونی یک بعدی، پایا و هم دما است. در این مدل گاز و مایع با هم در تماس بوده و با هم تبادل جرم دارند. گاز موجود در لایه نفوذی گاز کاتد کامل است. لزجت گاز ثابت فرض شده است. گاز تراکم ناپذیر بوده اما چگالی آن ثابت نیست. توضیح بیشتر این که، تولید یا مصرف گونه‌های گازی سبب تغییر نسبت جرمی گونه‌ها و در نتیجه تغییر چگالی مخلوط گاز می‌شود. علاوه بر اینها توزیع خلل و فرج لایه نفوذ گاز و لایه کاتالیست یکنواخت فرض شده است.

برای محاسبه سرعت در محیط متخلخل از رابطه داری استفاده می‌شود، این رابطه برای فاز مایع (آب) بصورت رابطه (۱) است [۲۰،۱۸]:

$$u_l = -\frac{k_{abs} K_{r,lq}}{\mu_l} \frac{dP_l}{dx} \quad (1)$$

که در آن k_{abs} نفوذپذیری مطلق لایه نفوذ گاز، $K_{r,lq}$ نفوذپذیری نسبی فاز مایع، μ_l لزجت آب و P_l فشار فاز مایع می‌باشد. برای $K_{r,lq}$ در نظر گرفتن تأثیر تماس دو فاز بر هم در معادله فوق ظاهر شده است و مقدار آن برای فاز مایع از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۲۰،۱۸]:

$$K_{r,lq} = s \quad (2)$$

در این عبارت، s نماد مقدار اشباع در هر مقطع است که به صورت نسبت حجم مایع به حجم فضای خالی لایه نفوذ گاز تعریف می‌شود.

در جریان دوفازی در محیط متخلخل، بین دو فاز مایع و گاز اختلاف فشار وجود دارد که این اختلاف فشار، به فشار موئینگی P_c معروف است:

$$P_c = P_g - P_l \quad (3)$$

فشار موئینگی در هر مقطع لایه نفوذ گاز و لایه کاتالیست با استفاده از رابطه لورت قابل محاسبه است. این رابطه برای سطوح آب گریز ($\theta > 90^\circ$) به صورت رابطه (۴) است [۲۱-۱۹]:

$$P_c = \delta \cos(\theta_c) \left(\frac{\varepsilon}{k_{abs}} \right)^{0.5} \times (1.417s - 2.21s^2 + 1.263s^3) \quad (4)$$

در این رابطه δ نشان دهنده کشش سطحی آب، θ_c زاویه تماس آب و سطح لایه نفوذ گاز و ε ضریب تخلخل لایه نفوذ گاز است که به صورت نسبت حجم حفره‌ها به حجم کل لایه نفوذ گاز ($\varepsilon = V_{pore}/V_{total}$) تعریف می‌شود.

برای فاز گاز معادله داری مشابه معادله (۱) است با این تفاوت که

- فشار مخلوط گاز در مرز a و f یک اتمسفر منظور شده است.
 - رطوبت مرز f ، 70% در نظر گرفته شده است. هیدروژن سمت آند اشباع در نظر گرفته نشده است، تا به این ترتیب میزان جریان نفوذ معکوس غشا افزایش یابد.

- در مرز c و d ضمن محاسبه رطوبت نسبی با استفاده از رابطه ۱۹ مقدار λ محاسبه شده است.

- شار آب در مرز c از رابطه $N_{H_2O}|_c = (1 + \alpha)/2F$ محاسبه شده است.
 - به رطوبت نسبی در مرز a سه مقدار 0.7 ، 0.8 و 0.9 نسبت داده شده است و تأثیر این تغییر رطوبت نسبی بر پارامترهای جریان بررسی شده است.
 - مانند مقالات مشابه [۵، ۲۲]، به مقدار s در مرز a مقداری فرضی نسبت داده شده است. تعیین دقیق این مقدار مستلزم مدل سازی جریان دوفازی در کانال کاتد می باشد. در مقاله حاضر این مقدار 0.05 در نظر گرفته شده است.

۵- حل عددی و اعتبارسنجی

معادلات ارائه شده در بخش قبل با استفاده از روش تفاضل محدود خطی شده است. کلیه معادلات با روش تیلور پیش روی مرتبه اول گسسته سازی شده اند و در نهایت برای حل سیستم معادلات گسسته به دست آمده، کدی محاسباتی در زبان برنامه نویسی فرترن نوشته و توسط روش تکرار حل شده است. اعتبارسنجی حل عددی با استفاده مدل سانگ و همکاران [۲۰] که کامل ترین مدل در میان نمونه های مشابه خود می باشد، انجام شده است. از این رو، خواص لایه نفوذی گاز نیز از مقاله مذکور استخراج شده است که در جدول ۲ این خواص آورده شده است. سانگ و همکاران [۲۰] در مدل خود، α را محاسبه نکرده اند و به آنها مقادیر فرضی 0.5 را نسبت داده اند.

شکل های ۲ و ۳ به منظور اعتبارسنجی حل عددی ترسیم شده اند. برای استخراج نتایج مذکور، مقدار α محاسبه نشده است و برای تطابق شرایط مسأله با شرایط مدل سانگ و همکاران به آن عدد فرضی 0.5 نسبت داده شده است. همان طور که مشخص است انطباق قابل قبولی میان نتایج مدل حاضر و نتایج سانگ و همکاران [۲۰] وجود دارد. اختلاف موجود میان نتایج مدل ها در شکل ۳، ممکن است ناشی از حل غیر همدمای مدل سانگ و همکاران باشد.

جدول ۲ لیست مقادیر کمیتهای فیزیکی [۲۰]

پارامتر	مقدار
ε_{gdt}	0.4
$\mu_g (\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1})$	$1/9 \times 10^{-5}$
$k_{abs} (\text{m}^3)$	7×10^{-13}
$k_{cond} (\text{s}^{-1})$	100
$k_{vap} (\text{m}^2\text{N}^{-1}\text{s}^{-1})$	1
	10.1325
$\delta (\text{Ns}^{-1})$	$6/25 \times 10^{-2}$
$\theta_{c,gdt} (^\circ)$	110
$J (\text{Acm}^{-2})$	10000
$\mu_t = 0.6612(T - 229)^{-1.562}$	
$D^{0.2} = 0.1775 \times 10^{-4} \left(\frac{T}{273.15}\right)^{1.823}$	
$D^{H_2O} = 0.256 \times 10^{-4} \left(\frac{T}{307.15}\right)^{2.334}$	

$x_{H_2O}^{sat}$ وابسته به دماست و توسط رابطه (۱۶) محاسبه می شود [۲۲].

$$x_{H_2O}^{sat}(T, 1\text{atm}) = \exp(13.38t - 1.97t^2 - 0.64t^3 - 0.13t^4) \quad (16)$$

در این رابطه $t = 1 - 373/T$ ، و T دمای مطلق مخلوط برحسب کلوین است.

به دلیل انتقال جرم میان بخار آب و آب، شار آب نیز ثابت نبوده و تغییرات آن با نرخ تبادل جرم میان بخار آب و آب برابر است. لذا معادله پیوستگی برای آب صورت رابطه (۱۷) بیان می شود.

$$\frac{d}{dx}(\rho_l u_l) = \dot{m}_{H_2O} \quad (17)$$

به کمک معادلات فوق، مدل سازی جریان دوفازی در لایه نفوذ گاز انجام می شود. همان طور که پیش از این اشاره شد، محاسبه دقیق آب وارد شده به لایه کاتالیست و لایه نفوذ گاز برای تعیین شرایط مرزی مدل کنونی ضرورت دارد. برای تعیین شار مولی آب انتقال یافته از غشا، از معادله (۱۸) استفاده شده است [۲۰]. به دلیل کشش الکترواستاتیک، مقداری آب از آند به کاتد جریان می یابد که مقدار آن در جمله اول سمت راست رابطه (۱۸) بیان شده است. به دنبال افزایش میزان آب در سمت کاتد غشا، پدیده نفوذ معکوس رخ می دهد که با ترم دوم سمت راست معادله (۱۸) محاسبه می شود و نهایتاً شار خالص آب، حاصل تفاضل این دو جریان می باشد.

$$N_{H_2O} = 2.5 \frac{\lambda}{22 F} - \frac{\rho_{dry}}{EW} \exp \left[2416 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \times (2.563 - 0.33\lambda + 0.0264\lambda^2 - 0.00067\lambda^3) \frac{d\lambda}{dx} \quad (18)$$

در رابطه فوق λ نشان دهنده مقدار آب محلول در غشای پلیمری، ρ_{dry} چگالی غشای پلیمری خشک و EW نماد عدد اکسی والان غشا پلیمری است که مقدار آن برای نیفون ۱۱۷، عدد ۱۱۰۰ می باشد [۲]. مقدار λ در مرزهای c و d با استفاده از رطوبت نسبی RH در این مرزها تعیین می شود [۲۰، ۱۹].

$$\lambda = 0.0043 + 17.81RH - 39.85RH^2 + 36RH^3 \quad (19)$$

۳- دامنه حل و شرایط مرزی

هدف اصلی تحقیق حاضر استخراج پارامترهای جریان دوفازی در لایه نفوذ گاز کاتد (مرز a تا b در شکل ۱) می باشد، اما برای تعیین دقیق میزان آب وارد شده به این لایه، مدل سازی جریان در سایر بخش های پیل سوختی (مرز f تا b) نیز ضرورت پیدا کرده است.

در سمت آند (مرز d تا f) جریان به صورت تک فاز مدل شده است. تک فاز در نظر گرفتن جریان سمت آند، به دلیل عدم تولید آب در این سمت از یک سو و جهت جریان آب در پیل سوختی از سوی دیگر، فرض معقولی است. جریان آب در غشا نیز با در نظر گرفتن جریان الکترواستاتیک و جریان نفوذ معکوس، مدل سازی شده است.

خواص فیزیکی لایه های کاتالیست مشابه لایه های نفوذ گاز در نظر گرفته شده و جریان دوفازی در آنها مشابه لایه نفوذ گاز مدل سازی شده است. در لایه کاتالیست کاتد فرض بر این بوده است که واکنش الکتروشیمیایی و تولید آب در مجاورت غشا صورت گرفته است. این فرض با نتایج تحقیقات اخیر نیز تطابق دارد [۲۴]، لذا شار آب در مرز c ، مجموع شار آب غشا و آب تولید شده در پی واکنش الکتروشیمیایی می باشد و از رابطه $N_{H_2O} = (1 + \alpha)/2F$ محاسبه می شود.

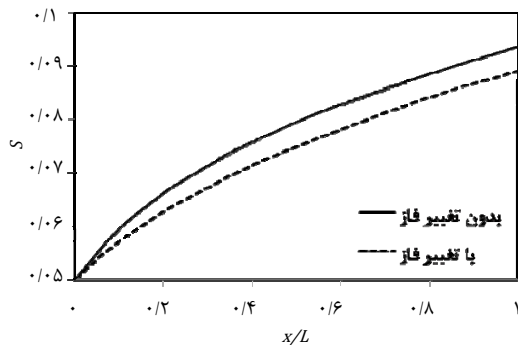
۴- شرایط مرزی

- مدل حاضر مدلی هم دما می باشد و لذا دما در مرز a و f با هم برابر است. در مدل حاضر به ازای سه دمای 3.53 ، 343 و 333 نتایج استخراج شده است.

نفوذ گاز کاند پیل سوختی پلیمری، مستلزم لحاظ کردن اثر تماس و تبادل جرم میان فازها می‌باشد. این دو پدیده در مدل‌سازی‌های تک‌فاز لحاظ نمی‌شوند و در مدل‌سازی‌های دوفازی مشابه، عموماً اثر تبادل جرم میان فازها در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین در نتایج ارائه شده، ابتدا به بررسی اثر تماس و تبادل جرم بر پارامترهای جریان دوفازی پرداخته می‌شود. پس از آن با توجه به این که تعیین دقیق میزان آب انتقال یافته از غشا، از دیگر وجوه تمایز مقاله حاضر با مطالعات مشابه است، در جدولی به ارائه α به ازای شرایط مختلف مطالعه شده در مقاله حاضر پرداخته می‌شود و نهایتاً تأثیر تغییر رطوبت هوای ورودی کاند و همچنین دمای عملکرد پیل سوختی، بر پارامترهای جریان دوفازی مطالعه می‌شود.

در مدل‌سازی‌های تک‌فاز عموماً فرض می‌شود که آب و هوا از مسیرهای جداگانه عبور می‌کنند و در نتیجه اثر تماس فازها بر یکدیگر را منظور نمی‌کند. شکل ۴ به بررسی اثر تماس میان فازها بر غلظت مولی اکسیژن پرداخته است. با توجه به این شکل، در صورتی که اثر تماس منظور شود، افت غلظت اکسیژن بیشتر می‌شود. وجود آب در خلل و فرج‌های لایه نفوذ گاز بخشی از حجم آن را اشغال می‌کند. این امر سبب کاهش ضریب نفوذ موثر گونه‌های گازی از جمله اکسیژن شده و در نتیجه افت غلظت را به دنبال دارد. با توجه به شکل ۴ بدیهی است که در نظر گرفتن اثر تماس میان فازها، سبب کاهش چگالی جریان حدی می‌شود.

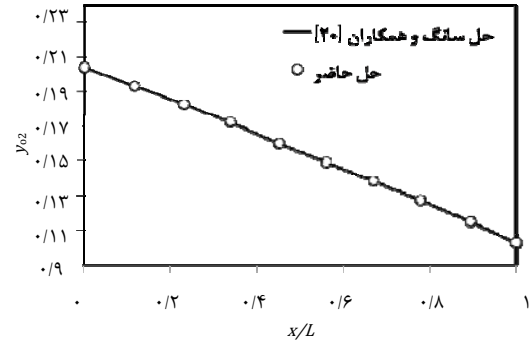
در شکل ۵ تغییرات فشار مویینگی در طول لایه نفوذی گاز نشان داده شده‌اند. با دقت در این نمودار و مقایسه آن با نمودار ۱۴، مشخص است که تغییرات فشار مویینگی بیش از دو مرتبه^۱ بزرگتر از تغییرات فشار گاز است. با توجه به روابط (۱) و (۳) و با دقت در شکل ۵ می‌توان فهمید که عامل اصلی تخلیه آب از لایه نفوذی گاز کاند، گرادیان فشار مویینگی است، لذا زمانی که اثر تبادل فاز لحاظ شده و مقدار آب به واسطه فرآیند تبخیر کاهش می‌یابد، تغییرات فشار مویینگی نیز کاهش می‌یابد، زیرا آب کمتری تخلیه شده و در نتیجه گرادیان فشار مویینگی کمتری مورد نیاز است. شکل ۶ به بررسی اثر تغییر فاز روی میزان اشباع در لایه نفوذی گاز می‌پردازد.



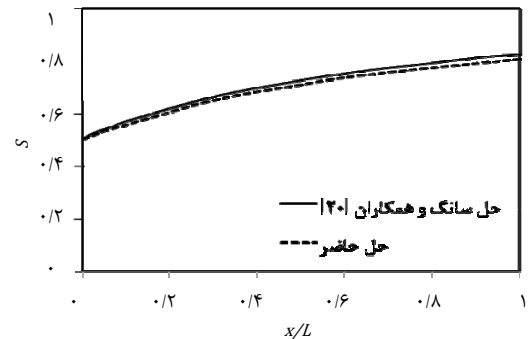
شکل ۶ منحنی تغییرات اثر تغییر فاز بر توزیع اشباع در طول لایه نفوذی گاز

جدول ۳ مقادیر α به ازای مقادیر مختلفی از دما و رطوبت نسبی	
α	حالت مورد بررسی
۱/۱۳۵	$T=353$ و $RH=0.8$
۱/۱۴۲	$T=343$ و $RH=0.8$
۱/۱۳۷	$T=333$ و $RH=0.8$
۱/۱۵۹	$T=353$ و $RH=0.7$
۱/۱۲۳	$T=353$ و $RH=0.9$

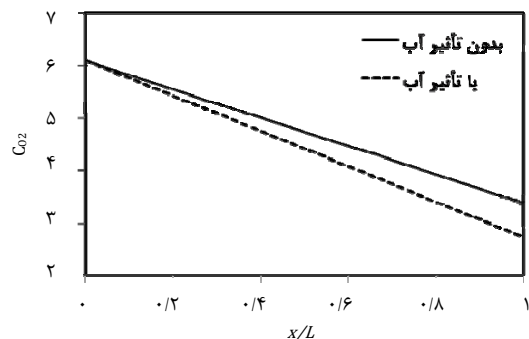
1- order



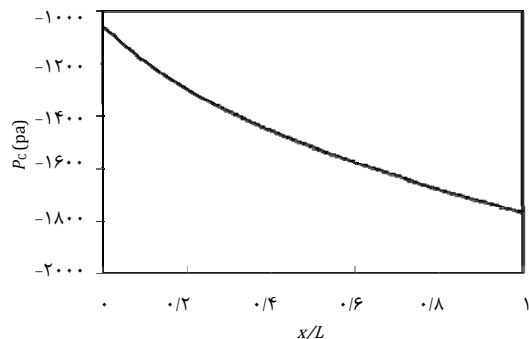
شکل ۲ منحنی تغییرات غلظت اکسیژن در طول لایه نفوذی گاز و مقایسه آن با نتایج سانگ و همکاران



شکل ۳ منحنی تغییرات میزان اشباع در طول لایه نفوذی گاز و مقایسه آن با نتایج سانگ و همکاران



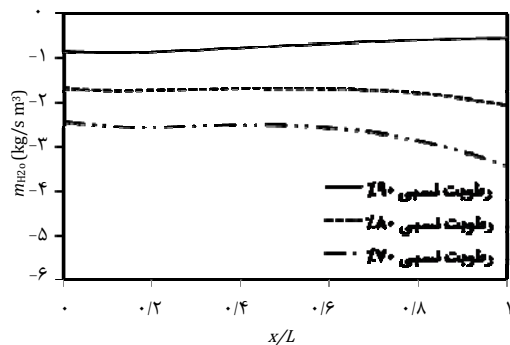
شکل ۴ منحنی تغییرات غلظت مولی اکسیژن در طول لایه نفوذی گاز با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثر تماس دو فاز



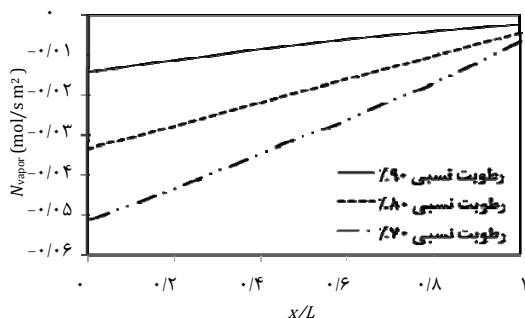
شکل ۵ منحنی تغییرات فشار مویینگی در طول لایه نفوذی گاز

۶- نتایج

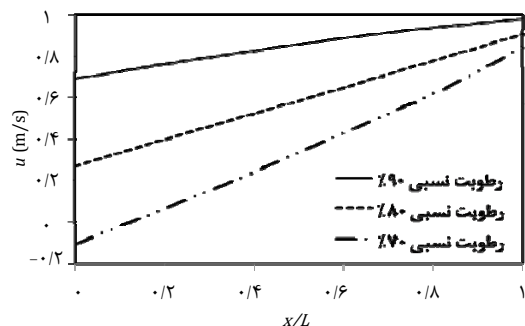
همان‌طور که پیش از این اشاره شد، مدل‌سازی دقیق جریان دوفازی در لایه



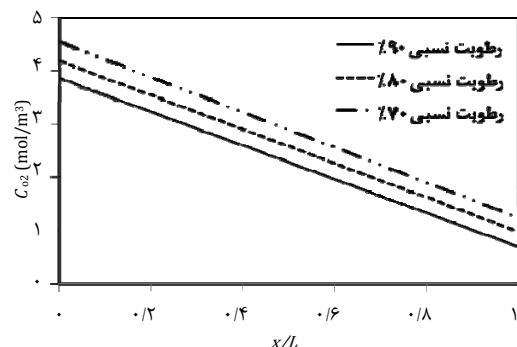
شکل ۷ منحنی‌های تغییرات میزان تبادل جرم بین دو فاز به ازای رطوبت‌های نسبی مختلف کانال کاند



شکل ۸ منحنی‌های تغییرات شار مولی بخار آب در طول لایه نفوذی گاز



شکل ۹ منحنی‌های تغییرات سرعت توده گاز در طول لایه نفوذی گاز



شکل ۱۰ منحنی‌های تغییرات غلظت مولی اکسیژن در طول لایه نفوذی گاز

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب به تأثیر رطوبت نسبی بر سرعت آب و میزان اشباع پرداخته‌اند. همان‌طور که در توضیح شکل ۸ ذکر شد، تغییر رطوبت هوای ورودی بر شار مولی بخار آب اثر می‌گذارد. با توجه به ثابت بودن مجموع شار مولی آب و بخار آب، تغییر رطوبت نسبی هوا، به طور قطع بر

در این شکل، تأثیر تبادل جرم میان فازها، بر میزان اشباع بررسی شده است. همان‌طور که اشاره شد، زمانی که اثر تبادل جرم میان فازها لحاظ می‌شود، شار مولی آب به دلیل تبخیر کاهش یافته و در نتیجه گرادیان فشار مویینگی کمتری برای تخلیه آن مورد نیاز است. از آنجا که تنها متغیر تابع فشار مویینگی (رابطه لورت) میزان اشباع است، در نظر داشتن تبادل فاز بر میزان اشباع اثر گذار است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، به دنبال تبخیر آب و کاهش شار مولی آب، میزان اشباع نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه درصد کمتری از حفره‌های لایه نفوذ گاز با آب مایع پر می‌شود.

در ادامه به بررسی اثر تغییر دمای عملکرد پیل سوختی و همچنین رطوبت نسبی هوای ورودی بر پارامترهای جریان دوفازی پرداخته می‌شود. برای این منظور ۵ حالت مختلف مطابق جدول ۳ در نظر گرفته می‌شود. در جدول مذکور، مقادیر α متناسب با هریک از این حالات آورده شده است. محاسبه دقیق α امکان تعیین دقیق شرایط مرزی مورد نیاز برای حل جریان دوفازی را فراهم کرده است.

اکنون با در نظر گرفتن دمای ۳۵۳ کلوین، به عنوان دمای کاری پیل سوختی اثر تغییر رطوبت نسبی هوای ورودی به پیل سوختی بر پارامترهای جریان دوفازی بررسی می‌شود. در شکل ۷ به اثر تغییر رطوبت نسبی هوای وارد شده به کاند، بر میزان تبادل جرم میان فازها پرداخته شده است.

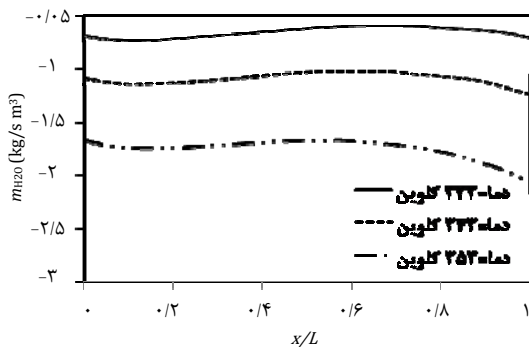
کاهش رطوبت نسبی هوای ورودی به کاند تأثیر زیادی بر پارامترهای جریان دوفازی می‌گذارد، زیرا ظرفیت هوای ورودی برای جذب بخار آب افزایش می‌یابد. به عبارت روشن‌تر، کاهش رطوبت نسبی هوای ورودی کاند، افزایش تبخیر آب در لایه نفوذی گاز را به دنبال دارد. همان‌طور که در شکل ۷ ترسیم شده است با کاهش رطوبت نسبی هوا، مقدار تبادل جرم منفی‌تر می‌شود. با توجه به این که در مدل‌سازی کنونی مقدار تبادل جرم ناشی از تبخیر، عددی منفی است، منفی‌تر شدن m_{H_2O} حاکی از افزایش نرخ تبخیر است. افزایش نرخ تبخیر، سبب افزایش سهم بخار آب در تخلیه آب لایه نفوذی گاز می‌شود (شکل ۸) به طوری که به ازای رطوبت هوای ۷۰٪ بیش از ۴۵٪ آب موجود در لایه نفوذ گاز به صورت بخار تخلیه می‌شود، در حالی که این مقدار برای رطوبت هوای ۹۰٪ حدود ۱۳٪ می‌باشد. لذا با کاهش رطوبت هوای ورودی احتمال وقوع غرقاب‌شدگی کم می‌شود.

با توجه به شکل ۸ کاهش رطوبت نسبی هوای ورودی، باعث افزایش شار مولی بخار آب می‌شود. بنابراین با کاهش میزان رطوبت هوا و افزایش میزان تبخیر آب، مقدار شار مولی بخار آب افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که چون جریان بخار آب از چپ به راست است، مقدار آن منفی می‌باشد.

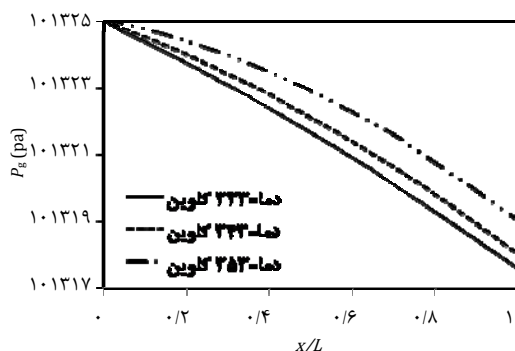
در شکل ۹ اثر تغییر میزان رطوبت نسبی هوا بر سرعت مخلوط گاز بررسی شده است. با توجه به رابطه (۶) می‌توان انتظار داشت که تغییر شار مولی بخار آب بر سرعت توده گاز تأثیر گذار است. با توجه به این که بخار آب خلاف جهت توده گاز حرکت می‌کند.

افزایش شار مولی بخار آب کاهش سرعت توده گاز را به دنبال دارد، لذا در شکل ۹ ملاحظه می‌شود که با افزایش رطوبت نسبی هوای ورودی به کاند، و کاهش سرعت بخار آب (که در جهت مخالف مخلوط گاز حرکت می‌کند) سرعت گاز نیز افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۰ اثر رطوبت هوای ورودی بر غلظت اکسیژن مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییر رطوبت نسبی تأثیر چندانی بر گرادیان غلظت اکسیژن ندارد، اما با توجه به این که غلظت اکسیژن در مرز a، به ازای رطوبت نسبی کمتر هوا، بیشتر است لذا با کاهش رطوبت نسبی غلظت اکسیژن افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳ منحنی‌های تغییرات میزان تبادل جرم بین دو فاز در طول لایه نفوذی گاز



شکل ۱۴ منحنی‌های تغییرات فشار گاز در طول لایه نفوذی گاز

۷- جمع بندی

در مقاله حاضر، نتایج مدل‌سازی دو فازی جریان در لایه نفوذ گاز ارائه و بررسی شد. به منظور تعیین دقیق شار آب وارد شده به لایه نفوذ گاز کاتد، جریان آب در غشای نفیونی مدل‌سازی و مقدار پارامتر α به طور دقیق محاسبه شد. سپس پارامترهای جریان دوفازی استخراج و تأثیر میزان رطوبت نسبی هوا و دمای عملکرد پیل سوختی بر این پارامترها مورد بررسی قرار گرفت. برخی نتایج این مدل‌سازی را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- وجود آب در لایه نفوذی گاز سبب افزایش افت غلظت اکسیژن می‌شود.
- عامل اصلی تخلیه آب از لایه نفوذ گاز کاتد گرادیان فشار موینگی می‌باشد.
- تبخیر آب سبب کاهش گرادیان فشار موینگی و همچنین اشباع می‌شود.
- کاهش رطوبت هوای ورودی، نرخ تبخیر و سهم بخار آب در تخلیه آب لایه نفوذی گاز را افزایش داده و در مقابل سرعت توده گاز، سرعت آب، گرادیان فشار موینگی و گرادیان اشباع را کاهش می‌دهد.
- افزایش دمای عملکرد پیل سوختی، سبب افزایش نرخ تبخیر آب و کاهش گرادیان فشار گاز می‌شود.

۸- مراجع

- [1] P. Ryan O'hayre, Suk-Won Cha, G. Whitney Colella, B. Fritz Printz, *Fuel Cell Fundamental*, New Jersey, John wily and sons, pp. 1-19, 2006.
- [2] M. Matthew Mench, *Fuel Cell Engines*, New jersey, John wily and sons, pp. 29-34, 2008.
- [3] H. Hassanzadeh, M. Ali Farzad, A. Fardowsara, Investigation the cogeneration potential of fuel cell and the effect on the simultaneous production, The first Iranian conference on renewable energies and distributed generation, Birjand, Iran, 2010. (In Persian)
- [4] H. Hassanzadeh, A. Fardowsara, M. Barzagari, *Hdrogen and fuel cell the suitable candidate for resolving the environmental issue*, The first conference on energy and environment, Kerman, Iran, 2011. (In Persian)
- [5] K. Das Prodip, X. Li, Zhong-Sheng 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.

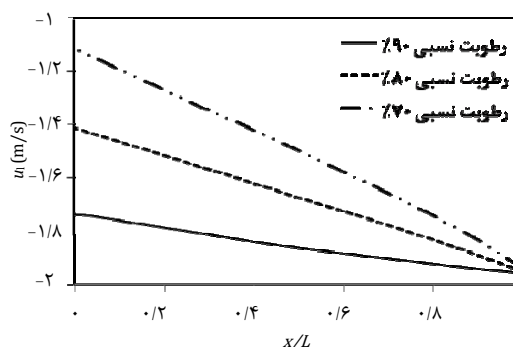
سرعت آب اثر می‌گذارد. این موضوع در شکل ۱۱ نشان داده شده است. از آنجا که به ازای رطوبت نسبی بالاتر سهم بخار آب در تخلیه آب لایه نفوذی گاز کاهش می‌یابد، سرعت آب در این شرایط افزایش خواهد یافت. افزایش سرعت آب مستلزم افزایش گرادیان فشار موینگی است و تغییرات فشار موینگی با تغییرات اشباع کنترل می‌شود. بنابراین افزایش سرعت آب، افزایش گرادیان اشباع را به دنبال دارد که شکل ۱۲ به بررسی این موضوع پرداخته است.

در ادامه با در نظر گرفتن رطوبت نسبی ۸۰٪ برای هوای ورودی کاتد، تأثیر تغییر دمای عملکرد پیل سوختی بر برخی پارامترهای جریان دو فازی بررسی می‌شود. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ اثر تغییر دما بر نرخ تبخیر به ازای واحد حجم و فشار گاز بررسی شده است.

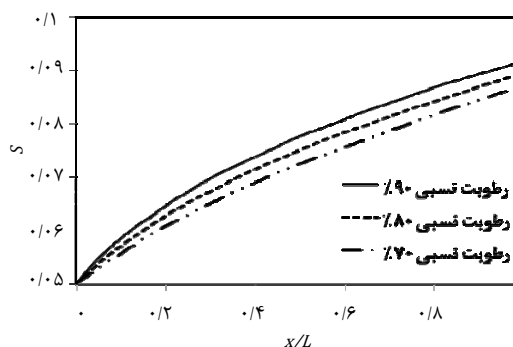
افزایش دما سبب افزایش $x_{sat}^{H_2O}$ هوا می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش دما ظرفیت هوا برای جذب بخار آب بیشتر می‌شود، لذا همان‌طور که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است، افزایش دمای عملکرد پیل سوختی، افزایش نرخ تبخیر را به دنبال دارد. در نتیجه سهم بخار آب در تخلیه آب لایه نفوذی گاز افزایش یافته و احتمال وقوع غرقاب‌شدگی کاهش می‌یابد.

افزایش دما باعث افزایش شار مولی بخار آب می‌شود. با توجه به جهت جریان بخار آب، افزایش شار مولی آن، کاهش سرعت توده گاز را به دنبال دارد. لذا با توجه رابطه (۵)، گرادیان فشار گاز نیز کاهش می‌یابد. بنابراین همان‌طور که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است، افزایش دمای عملکرد پیل سوختی باعث کاهش گرادیان فشار گاز می‌شود.

با توجه به این که افزایش دما سبب افزایش نرخ تبخیر می‌شود، تأثیر کیفی این پدیده بر سرعت آب، گرادیان فشار موینگی و گرادیان اشباع قابل پیش‌بینی است. مشابه شکل‌های ۱۲ و ۱۳ می‌توان گفت که افزایش دمای عملکرد پیل سوختی، کاهش سه پارامتر ذکر شده را به دنبال دارد.



شکل ۱۱ منحنی‌های تغییرات سرعت آب در طول لایه نفوذی گاز



شکل ۱۲ منحنی‌های تغییرات اشباع در طول لایه نفوذی گاز

- [16] Pasaogullari Ugur and C. Y. Wang, *Liquid Water Transport in Gas Diffusion Layer of Polymer Electrolyte Fuel Cells*, *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 151, pp. 399-406, 2004.
- [17] Shi Wanyuan, Kurihara Eru, Oshima Nobuyuki, *Effects of capillary pressure on liquid water removal in the cathode gas diffusion layer of a polymer electrolyte fuel cell*, *Journal of Power Source*, Vol. 182, pp. 112-118, 2008.
- [18] Zhan Zhigang, Xiao Jinsheng, Li Dayong, Pan Mu, Runzhang Yuan, *Effects of porosity distribution variation on the liquid water flux through gas diffusion layers of PEM fuel cells*, *Journal of Power Source*, Vol. 160, pp. 1041-1048, 2006.
- [19] Falin Chen, Min-Hsing Chang, Ping-Tso 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.
- [20] D. Song, Q. Wang, Zhong-Sheng Liu, C. Huang, *Transient analysis for the cathode gas diffusion layer of PEM fuel cells*, *Journal of Power Source*, Vol. 159, pp. 928-942, 2006.
- [21] U. Pasaogullari, C. Y. Wang, *Two-phase transport and the role of micro-porous layer in polymer electrolyte fuel cells*, *Electrochimica Acta*, Vol. 49, pp. 4359-4369, 2004.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] P. K. Das, X. Li, Z. S. Liu, *A three-dimensional agglomerate model for the cathode catalyst layer in PEM fuel cells*, *Journal of Power Sources*, Vol. 179, pp. 186-199, 2008.
- [6] M. Dawn Bernardi, W. Mark Verbruge, *Mathematical Model Of a Gas Diffusion Electrode Bonded to a Polymer Electrolyte*, *Journal of AIChE*, Vol. 37, pp. 1151-1163, 1991.
- [7] M. Dawn Bernardi, W. Mark Verbruge, *A mathematical model of the solid - polymer-electrolyte fuel cell*, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 139, 1992.
- [8] T.E Springer., T.A Zawodzinski, S. Gottesfeld, *Polymer Electrolyte Fuel Cell Model*, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 138, pp. 2334-2342, 1991.
- [9] Nedjib Djilali, Dongming Lu, *Influence of heat transfer on gas and water transport in fuel cells*, *International Journal of Thermal Science*, Vol. 41, pp. 20-49, 2002.
- [10] 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.
- [11] J. H. Jang, W. M. Yan, C. C. Shih, *Effect of gas diffusion layer parameter on cell performance of pem fuel cells*, *Journal of power sources*, Vol. 161, pp. 323-332, 2006.
- [12] C. Y. Wang, P. Cheng, *A multiphase mixture model for multiphase multicomponent transport in capillary porous media*, *international journal of heat and mass transfer*, Vol. 39, pp. 3619-3632, 1996.
- [13] Lixin You, Hongtan 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.
- [14] Lixin You, Hongtan Liu, *A two phase flow and transport model for a PEM fuel cells*, *Journal of power sources*, Vol. 155, pp. 219-230.
- [15] J. H. Nam and M. Kaviany, *Effective diffusivity and water-saturation distribution in single- and two-layer PEMFC diffusion medium*, *international journal of heat and mass transfer*, vol. 46, pp. 4595-4611, 2003.