

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر شرایط عملکردی مختلف پیل سوختی غشای پلیمری بر توان تولیدی و مدیریت آب

محمدرضا هاشمی نسب، محمدجعفر کرمانی\*، سید سلمان نورآذر، محمدحسن خودسیانی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۲۰  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۳-۰۹  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۳-۲۶  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۴-۱۰

### کلمات کلیدی:

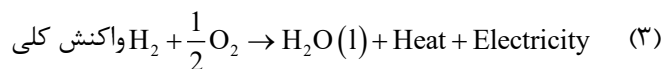
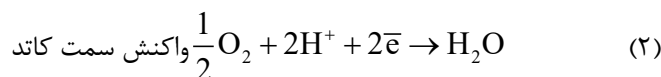
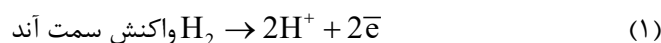
پیل سوختی غشا پلیمری  
مدیریت آب در پیل سوختی  
غشای پلیمری  
طراحی آزمایش  
روش رویه پاسخ  
پردازش تصویر دیجیتال

**خلاصه:** در پژوهش حاضر تأثیر استوکیومتری آند، کاتد و دمای گازهای ورودی بر مدیریت آب و عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش و عکس برداری مستقیم مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور مشاهده انباشت آب در کانال‌های جریان سمت کاتد، پیل سوختی غشای پلیمری با صفحات انتهایی شفاف در آزمایشگاه تحقیقاتی پیل سوختی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر طراحی و ساخته شده است. طراحی کلیه آزمایش‌ها با استفاده از روش رویه پاسخ و طرح مرکب مرکزی انجام پذیرفته است. در هر شرایط کارکردی، نمودارهای عملکردی برحسب زمان برای پیل ثبت و هم‌زمان از کانال‌های جریان سمت کاتد فیلم برداری گردیده است. در ادامه با استفاده از تکنیک پردازش تصویر دیجیتال، مساحتی از کانال‌ها که توسط توده‌های آب اشغال شده، اندازه‌گیری و ثبت شده است. پارامتر ضریب آب پوشانی که از تقسیم مساحت توده‌های آب انباشته شده در کانال‌های جریان به مساحت کانال‌ها حاصل می‌گردد به عنوان معیار مطالعه پدیده طغیان مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد افزایش استوکیومتری آند، کاتد و دمای گازهای ورودی سبب کاهش ضریب آب پوشانی می‌گردد. همچنین در مقادیر توان بهینه میزان ضریب آب پوشانی در محدوده ۱/۸ تا ۴/۳ قرار می‌گیرد. بررسی تأثیر شرایط کارکردی مختلف نشان می‌دهد که در مقادیر استوکیومتری کاتد بالا بایستی دمای گازهای ورودی و نرخ استوکیومتری آند در مقادیر پایین قرار گیرند. از طرفی مطالعه نحوه اثرگذاری دمای گازهای ورودی نشان می‌دهد که به هنگام استفاده از گازهای گرم، مقادیر استوکیومتری کم آند و کاتد سبب دستیابی به حداکثر توان می‌گردد.

### ۱- مقدمه

با توجه به معادله (۳) محصولات واکنش پیل سوختی غشای پلیمری، آب و حرارت می‌باشد. انباشت آب اضافی در پیل منجر به پدیده طغیان<sup>۱</sup> (آب‌گرفتگی) می‌گردد. در یک جمع‌بندی کلی، مهم‌ترین نتایج آب‌گرفتگی را می‌توان قرار گرفتن آب بر روی لایه نفوذ گازی و کاتالیست، بسته شدن منافذ آن‌ها، کاهش طول عمر لایه کاتالیست، افزایش توان نوسانی پمپ<sup>۲</sup> و بسته شدن کانال‌های جریان<sup>۳</sup> دانست. از طرفی محتوای آب مناسب غشا سبب افزایش رسانایی یونی آن و بهبود عملکرد پیل می‌شود [۱]. در واقع می‌توان گفت هدف از مدیریت آب، ایجاد تعادل بین دو نیاز متضاد یعنی مرطوب نگه داشتن غشا (جلوگیری از خشک شدن) و جلوگیری از آب‌گرفتگی است.

پیل سوختی ابزاری برای تبدیل انرژی است که در آن انرژی شیمیایی واکنش دهنده‌ها به صورت مستقیم و در طی فرایندی گرمازا به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. به طور کلی واکنش‌هایی که در لایه کاتالیست پیل سوختی غشای پلیمری رخ می‌دهد شامل واکنش اکسایش هیدروژن در آند و کاهش اکسیژن در کاتد است.



- 1 Flooding
- 2 Parasitic pumping power
- 3 Channel clogging

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mkermani@aut.ac.ir



مسئله مدیریت آب در پیل‌های سوختی غشای پلیمری از آن جهت دارای اهمیت است که هر دو عامل انباشت آب مایع و خشک شدن مجموعه غشا الکتروود سبب افت عملکرد پیل می‌گردد. رسانایی یونی غشا تابع محتوای آب آن است. کمبود آب در پیل سبب افزایش مقاومت یونی و ناپایداری ولتاژ تولیدی می‌شود [۲]. از طرفی انباشت آب، بسته شدن منافذ لایه نفوذ گازی و لایه کاتالیست را در پی دارد و از ورود واکنش‌دهنده‌ها به محل انجام واکنش<sup>۱</sup> در لایه کاتالیست جلوگیری می‌کند. بنابراین توزیع گازهای واکنش‌دهنده بر روی لایه کاتالیست ناهمگون می‌شود و پدیده گرسنگی<sup>۲</sup> در غشا به وقوع می‌پیوندد. پدیده گرسنگی سبب آسیب دیدن ساختار غشا می‌گردد و عمر لایه کاتالیست کاهش می‌یابد. در نهایت به دلیل توزیع غیریکنواخت واکنش‌دهنده‌ها، جریان تولیدی نیز غیریکنواخت می‌گردد و عملکرد پیل کاهش می‌یابد [۳-۵]. با توجه به موارد فوق مطالعه جریان دوفازی در پیل سوختی و شناخت چگونگی اثرگذاری آن بر انباشت آب و پدیده آب‌گرفتگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و بخش زیادی از مطالعات عددی [۸-۶] و آزمایشگاهی [۱۳-۹] در حوزه پیل‌های سوختی غشای پلیمری را به خود اختصاص داده است. طغیان در پیل سوختی غشای پلیمری می‌تواند در هر سه ناحیه لایه کاتالیست، لایه نفوذ گازی و کانال جریان به وقوع پیوندد. امروزه مطالعات زیادی در زمینه مدیریت آب در لایه نفوذ گازی، لایه کاتالیست و کانال جریان انجام شده است. بررسی پدیده آب‌گرفتگی در کانال جریان با استفاده از روش‌های عکس‌برداری انجام می‌پذیرد. در یک جمع‌بندی کلی، مطالعات انجام‌شده در زمینه مدیریت آب و جریان دوفازی در پیل را می‌توان به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم کرد. روش‌های مستقیم شامل عکس‌برداری مستقیم از پیل شفاف<sup>۳</sup> [۱۴ و ۱۵]، عکس‌برداری نوترونی<sup>۴</sup> [۱۶ و ۱۷]، عکس‌برداری توسط اشعه ایکس<sup>۵</sup> [۱۸ و ۱۹] و رزونانس مغناطیسی هسته‌ای<sup>۶</sup> [۲۰] و [۲۱] می‌باشد. در این روش‌ها می‌توان انباشت و تخلیه آب را در پیل مشاهده کرد. در روش‌های غیرمستقیم به صورت آزمایشگاهی از پارامترهای قابل اندازه‌گیری نظیر افت فشار [۱۳] و مقاومت فرکانس

- 1 Reaction sites
- 2 Starvation
- 3 Direct visualization of a transparent cell
- 4 Neutron radiography
- 5 X-ray radiography
- 6 Nuclear Magnetic Resonance (NMR)

بالا<sup>۷</sup> برای مطالعه دوفازی پیل استفاده می‌کنند [۲۲].

عکس‌برداری نوترونی بسیار هزینه‌بر می‌باشد و استفاده از این روش برای مشاهده انباشت آب در لایه‌های مختلف پیل نیازمند دسترسی به دستگاه‌های پیشرفته و گران‌قیمت است. در عکس‌برداری با اشعه ایکس وضوح بالای زمانی به دست می‌آید اما به صورت هم‌زمان نمی‌توان به وضوح زمانی و مکانی دست‌یافت [۲۳]. به بیان دیگر باینکه در هنگام عکس‌برداری با اشعه ایکس می‌توان تعداد زیادی عکس در ثانیه برداشت اما وضوح تصاویر چندان بالا نیست. مشابه این امر در روش رزونانس مغناطیسی هسته‌ای نیز صادق است [۲۴]. سیستم‌های عکس‌برداری اپتیکال علاوه بر کاربرد آسان و هزینه کم، قابلیت ارائه تصاویر با حداکثر کیفیت ۲۰۰ نانومتر را دارند. عیب بزرگ این روش، نیاز به استفاده از صفحات انتهایی شفاف و تعبیه کانال‌های جریان بر روی این صفحات به منظور مشاهده بصری تشکیل و یا انباشت قطرات آب در کانال‌های جریان می‌باشد که این امر در پیل‌های سوختی تجاری رایج نیست [۲۵].

برای اولین بار توبر<sup>۸</sup> و همکاران [۲۶] به بررسی پدیده آب‌گرفتگی در کانال‌های جریان پیل سوختی غشای پلیمری با استفاده از روش عکس‌برداری مستقیم اپتیکال پرداختند. بدین منظور آن‌ها نسبت به طراحی یک پیل سوختی غشای پلیمری با الگوی جریان موازی و صفحات انتهایی شفاف اقدام نمودند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که استفاده از لایه نفوذ گازی آب‌دوست سبب توزیع بهتر آب در سطح لایه کاتالیست می‌گردد. از طرفی استفاده از لایه نفوذ گازی آب‌گریز، بسته شدن کانال جریان و وقوع پدیده آب‌گرفتگی را در پی دارد. آرکومانیس<sup>۹</sup> و همکاران [۲۷] از طریق عکس‌برداری مستقیم با استفاده از دوربین Sensi-Cam به بررسی تأثیر دمای کاری و استوکیومتری آند و کاتد بر جریان دوفازی در پیل سوختی با الگوی مارپیچ پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها بیانگر نقش مشابه استوکیومتری آند و کاتد در انباشت آب و تأثیر متفاوت آن‌ها بر خارج‌سازی آب است. علاوه بر این در استوکیومتری کم آند با افزایش دبی هیدروژن ورودی، حجم آب مشاهده‌شده در سمت کاتد افزایش می‌یابد در حالی که در مقادیر استوکیومتری میانی و بالا افزایش دبی هیدروژن تأثیری بر محتوای آب سمت کاتد ندارد. مطالعه نحوه اثرگذاری دما بر محتوای آب سمت

- 7 High Frequency Resistance (HFR)
- 8 Tuber
- 9 Arcoumanis

کاری مختلف بر عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری از روش طراحی آزمایش استفاده کردند. آن‌ها مزایای به‌کارگیری طرح عاملی رویه پاسخ<sup>۲</sup> را کاهش تعداد آزمایش‌ها و امکان مطالعه تأثیر متقابل پارامترها بر توان خروجی دانستند. در این مطالعه چهار پارامتر نرخ استوکیومتری آند و کاتد، رطوبت نسبی کاتد و دمای گازهای ورودی به‌عنوان متغیر مستقل و توان خروجی به‌عنوان پاسخ در نظر گرفته شد. آن‌ها حداکثر توان تولیدی پیل را در نرخ استوکیومتری آند و کاتد ۱/۹۷ و ۱/۸۰، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۷۳/۷۳ درصد به دست آوردند. شنگ<sup>۳</sup> و همکاران [۳۲] با هدف بررسی تأثیر دمای کاری، دمای رطوبت زنی آند و کاتد، فشار کاری و استوکیومتری واکنش‌دهنده‌ها بر عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری از روش هیبرید تگوجی-شبکه‌های عصبی<sup>۴</sup> استفاده کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که دمای کاری و فشار بیشترین تأثیر را بر عملکرد پیل دارند. کایتاکولو<sup>۵</sup> و همکارانش [۳۳] در راستای دستیابی به حداکثر توان، طرح تگوجی را مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها در شرایط کاری بهینه، اختلاف چگالی توان تولیدی و مقدار پیش‌بینی‌شده  $44/64 \text{ mW.cm}^{-2}$  را گزارش دادند و علت وجود این اختلاف را ناتوانی مدل تگوجی در محاسبه اثرات متقابل پارامترها دانستند.

با وجود تحقیقات گسترده انجام پذیرفته به کمک روش طراحی آزمایش بر روی پیل‌های سوختی غشای پلیمری، مشاهده می‌شود که هیچ پژوهشی به بررسی هم‌زمان تأثیر پارامترهای عملکردی بر مدیریت آب و توان تولیدی با استفاده از این روش نپرداخته است. که این امر ضرورت انجام پژوهش حاضر را نمایان می‌سازد.

## ۲- پیل سوختی شفاف و تجهیزات آزمایشگاهی (فرآیند آزمایشگاهی)

شکل ۱ پیل سوختی غشاء پلیمری شفاف را که به‌منظور به‌کارگیری در این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی پیل سوختی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر طراحی و ساخته شده است، نشان می‌دهد. سطح فعال پیل ۲۵ سانتی‌متر مربع، میدان جریان آن از نوع مارپیچ موازی و عمق و عرض کانال‌ها به

کاتد نشان داد که با افزایش دمای کاری حجم آب مایع موجود در کانال جریان این سمت بشدت کاهش می‌یابد. اسلم<sup>۱</sup> و همکاران [۲۸] به‌منظور درک بهتر نحوه اثرگذاری آب مایع موجود در پیل سوختی غشای پلیمری بر عملکرد آن، از پیل سوختی شفاف با الگوی جریان تک کانال مارپیچ استفاده کردند. آن‌ها به‌منظور مشاهده قطرات آب در دو سمت آند و کاتد، دو دوربین با رزولوشن بالا در هر دو سمت قرار دادند و از طریق تعریف پارامتر جدید ضریب آب پوشانی گوشه‌ها به بررسی تأثیر شرایط کاری مختلف بر پدیده‌های دوفازی درون پیل پرداختند. نتیجه این مطالعه نشان داد که میزان آب انباشته‌شده در گوشه‌های از طریق کاهش نرخ دبی هوا، افزایش فشار کاری و رطوبت نسبی افزایش می‌یابد. آن‌ها در تحقیقی دیگر [۲۹]، به‌منظور مطالعه اثرات شرایط کاری مختلف بر آب‌گرفتگی و خشکی غشا، از دوربین‌های عکس‌برداری و حرارتی به‌صورت هم‌زمان در سمت کاتد پیل سوختی غشای پلیمری شفاف استفاده نمودند و نشان دادند که با کاهش نرخ استوکیومتری در سمت کاتد توان تولیدی و میزان آب مشاهده‌شده در کانال‌های جریان این سمت افزایش و توزیع دمای یکنواخت‌تری حاصل می‌گردد.

امروزه پژوهش‌های گسترده‌ای با استفاده از روش‌های مختلف در راستای شناخت عملکرد پیل‌های سوختی غشای پلیمری در شرایط کاری مختلف انجام شده است. یکی از این روش‌ها، طراحی آزمایش می‌باشد. تکنیک طراحی آزمایش، یک روش آماری قدرتمند به‌منظور انجام آزمایش‌های هدفمند می‌باشد که عمده مزیت آن افزایش دقت نتایج و همچنین افزایش بهره‌وری فرآیند آزمایش از طریق حداقل رسانی تعداد آزمایش‌های موردنیاز است. این روش آماری قابلیت تشخیص پارامترهای مؤثر بر فرآیند مورد بررسی و تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر را در اختیار محقق قرار می‌دهد. با توجه به تعداد پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری و همچنین تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر، روش طراحی آزمایش می‌تواند ابزاری مفید جهت انجام مطالعات آماری در این حوزه باشد. مطالعات انجام در زمینه پیل سوختی به کمک روش طراحی آزمایش در سه دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند: ارتقاء اجزا و مواد پیل‌های سوختی، تحلیل و بهبود عملکرد و ارزیابی و توسعه سیستم‌های پیل سوختی [۳۰].

کنعانی و همکاران [۳۱] به‌منظور مطالعه آماری تأثیر شرایط

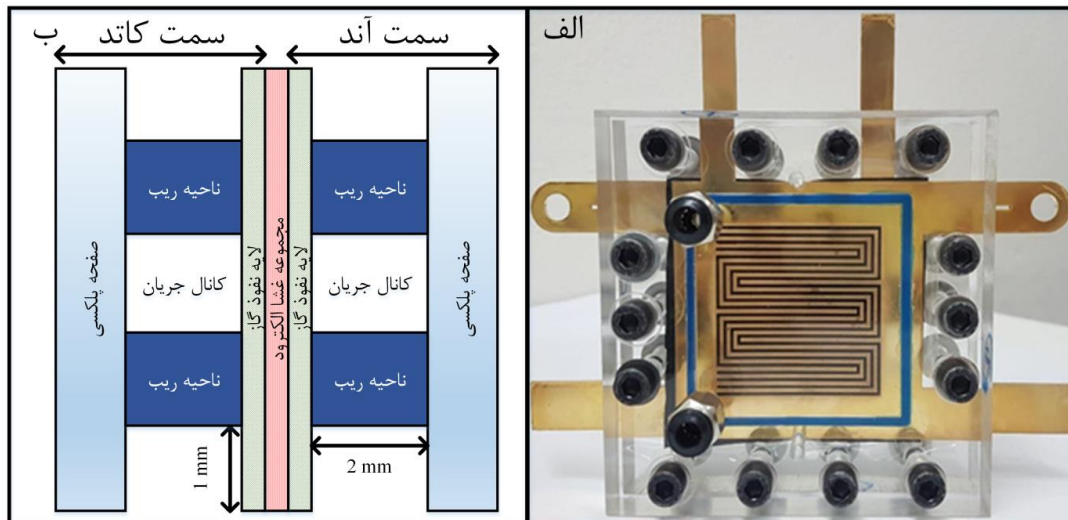
2 Response Surface Method (RSM)

3 Sheng

4 Taguchi-neural network method

5 Kaytakoglu

1 Aslam



شکل ۱ پیل سوختی غشاء پلیمری با صفحات انتهایی شفاف طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه تحقیقاتی پیل سوختی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر الف: نمای روبرو ب: شماتیک مقطع عرضی

Fig. 1. (a) Front view of the transparent PEM fuel cell manufactured in the present study in fuel cell research laboratory of Amirkabir University of Technology, (b) schematics of transversal cross section

تصویربرداری را نمایش می‌دهد. دستگاه تست قابلیت تنظیم دبی جرمی، دما و رطوبت نسبی گازهای ورودی، پس فشار در خروجی و جریان الکتریکی را دارد. خطای فلومترهای دستگاه ۰/۱٪، دامسج‌ها از نوع K با خطای  $\pm 1$  °C، مرطوب سازها از نوع لوله‌ای با خطای ۱۰٪ و خطای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان ۰/۰۱٪ درصد می‌باشد. مسیر گازهای واکنش‌دهنده از ابتدا تا انتهای خروجی دستگاه به این صورت است که ابتدا فشار گازها در رگلاتورهای تنظیم فشار تنظیم می‌گردد. در ادامه گازهای ورودی وارد فلومترهای دستگاه شده و در این بخش دبی موردنظر تنظیم می‌شود. سپس گازها از مخازن عایق عبور می‌کنند. درون این مخازن آب وجود دارد و دمای آن‌ها توسط گرم‌کن تنظیم می‌گردد. پس از خروج از مخازن آب، گازها توسط مرطوب‌سازهای لوله‌ای رطوبت زنی می‌شوند و دما و فشار آن‌ها قبل از ورود به پیل توسط سنسورها ثبت می‌شود. پس از خروج از پیل نیز سنسورهای دما و فشار و شیرهای تنظیم پس فشار قرار دارند. در طول این فرآیند کلیه مقادیر دما و فشار خوانده شده توسط سنسورها توسط واحد ثبت نتایج<sup>۶</sup> ذخیره می‌گردد.

دقت و کیفیت پردازش تصاویر دیجیتال تحت تأثیر شدید کیفیت نورپردازی قرار دارد [۳۴]. حسگر یک دوربین دیجیتال، آرایه‌ای از حسگرهای بسیار کوچک است که هرکدام از آن‌ها ضمن حس کردن شدت نور، سیگنالی را به پردازنده دوربین ارسال می‌نمایند. شدت نور

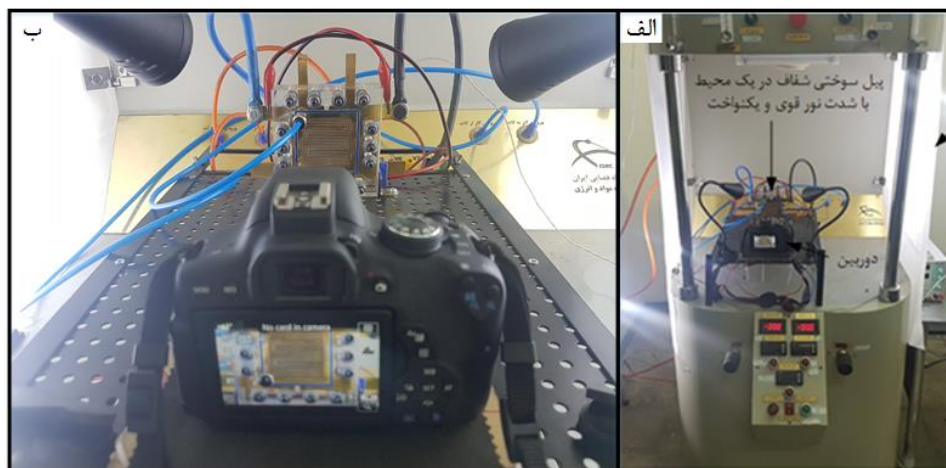
ترتیب ۲ و ۱ میلی‌متر می‌باشد. میدان جریان مارپیچ موازی به صورت "راه به در" روی صفحات فلزی از جنس استیل ۳۱۶ ماشین‌کاری شده است. باهدف جلوگیری از خوردگی و افزایش رسانایی الکتریکی صفحات، بر روی آن‌ها آبکاری طلا انجام شده است. صفحات انتهایی در هر دو سمت آند و کاتد از جنس پلکسی گلس<sup>۱</sup> اند که این امر امکان مشاهده کانال‌های جریان را به‌منظور مطالعه توده‌های آب انباشته‌شده در آن‌ها فراهم می‌سازد.

مجموعه غشا الکتروود بکار رفته در پیل از نوع M/۱۵ ۸۱۵ ساخت شرکت گور<sup>۲</sup> با ضخامت  $25 \mu\text{m}$ ، میزان پلاتین  $0.1 \text{ mg.cm}^{-2}$  در سمت آند و  $0.4 \text{ mg.cm}^{-2}$  در سمت کاتد می‌باشد. این مجموعه مابین صفحات لایه نفوذ گاز آب‌گریز از نوع کربن پارچه‌ای<sup>۳</sup> دارای لایه میکرو متخلخل<sup>۴</sup> در دو سمت آند و کاتد قرار گرفته است. قابل ذکر است که صفحات لایه نفوذ گازی مدل GDL LT-۱۲۰۰ ساخت شرکت ایتک<sup>۵</sup> با ضخامت  $260 \mu\text{m}$  می‌باشند.

در این پژوهش، محتوای آب انباشته‌شده در کانال‌های جریان سمت کاتد با استفاده از تصویربرداری مستقیم مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل ۲ دستگاه تست پیل سوختی، تجهیزات نورپردازی و

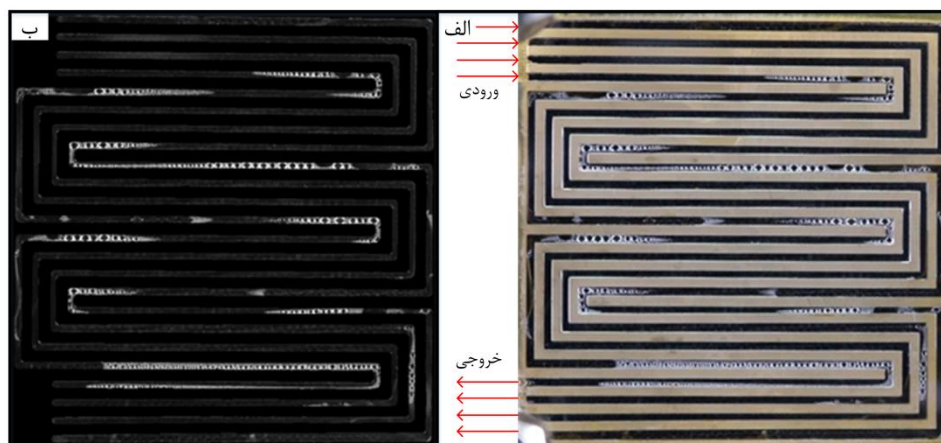
- 1 PLEXIGLAS®
- 2 Gore
- 3 Woven web carbon cloth GDL
- 4 Micro-porous layer
- 5 E-TEK

6 Data acquisition unit



شکل ۲ پیل سوختی مستقرشده در اتاق تست ساخته شده در پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده مواد و انرژی اصفهان، به همراه تجهیزات نورپردازی و تصویربرداری الف: نمای دور ب: نمای نزدیک

Fig. 2. Imaging and lighting equipment installed in front of the transparent PEM fuel cell, (a) long shot (b) close-up



شکل ۳ تصویر میدان جریان پیل سوختی به همراه توده های آب انباشته شده در کانال های جریان الف: عکس واقعی ب: همان عکس پس از پردازش تصویر

Fig. 3. Image of accumulated water in PEM fuel cell flow channels, (a) captured image, (b) processed image

با رزولوشن بالا<sup>۲</sup> استفاده شده است. این دوربین در مقابل کانال های جریان سمت کاتد قرار می گیرد و همزمان با کارکرد پیل از تشکیل و انباشت قطرات فیلم برداری صورت می پذیرد. شکل ۳ الف نشان دهنده تصویر به دست آمده از پیل سوختی شفاف در حالت عملکردی چگالی جریان ۰/۶ آمپر بر سانتی متر مربع و دمای گازهای ورودی کاملاً مرطوب ۳۰ درجه سانتی گراد می باشد. در این مطالعه از تکنیک پردازش تصاویر دیجیتال برای تشخیص محتوای آب درون کانال ها در شرایط کاری مختلف استفاده شده است. شکل ۳ ب قطرات آب پس از پردازش را نمایش می دهد که در آن توده های آب شکل گرفته درون کانال ها آشکار شده اند.

کافی و یکنواخت لازمه پردازش تصویر می باشد. شدت و یکنواختی نور در یک تصویر را شدت و یکنواختی منبع نور تعیین می کند. منابع نور نقطه ای، نور را به صورت موضعی به جسم می تابانند و مناطقی که مستقیماً در معرض این شدت نور قرار می گیرند، در تصویر روشن تر از دیگر مناطق خواهند بود که سبب غیریکنواخت شدن شدت نور در تصویر نهایی خواهد شد. منظور یکنواخت کردن شدت نور، در اختیار داشتن یک منبع نور گسترده ضروری می باشد. چنین منبع نور گسترده ای سافت باکس<sup>۱</sup> نامیده می شود که نور یک لامپ قوی را به صورت یکنواخت به محیط می تاباند.

به منظور عکس برداری از کانال های جریان سمت کاتد از دوربین

2 Canon EOS 750D SLR

1 Softbox

جدول ۱ کران بالا و پایین پارامترها در طراحی آزمایش

Table 1. Upper and lower bound of selected operating parameters in DOE

شماره	پارامتر	نماد	محدوده تغییرات
۱	استوکیومتری آند	AST	۱/۲ - ۲/۴
۲	استوکیومتری کاتد	CST	۲/۵ - ۴/۵
۳	دمای گازهای ورودی*	T*	۱/۲ - ۳/۲

\* تذکر اول: دما به فرم بی بعد می باشد. این پارامتر از تقسیم دمای گازهای ورودی به دمای استاندارد محیط ( $T^* = T_{Inlet} / T_{SATP}$ ) به دست آمده است.

جدول ۲ پارامترهای ثابت به هنگام انجام آزمایشها

Table 2. Constant operating parameters

شماره	پارامتر	نماد	مقدار
۱	رطوبت نسبی آند (%)	ARH	۱۰۰
۲	رطوبت نسبی کاتد (%)	CRH	۱۰۰
۳	چگالی جریان ( $A\ cm^{-2}$ )	i	۰/۶
۴	پس فشار سمت آند (Pa)	ABP	۰/۰
۵	پس فشار سمت کاتد (Pa)	CBP	۰/۰

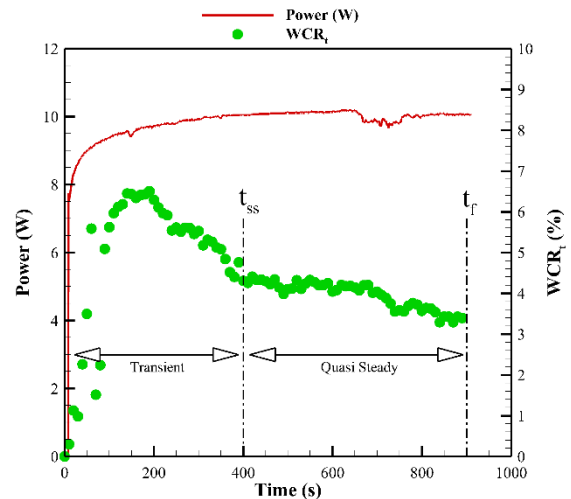
نقاطی که در بازه زمانی  $[t_{ss}, t_f]$  ضریب آب پوشانی آنها محاسبه شده و  $WCR_t$  ضریب آب پوشانی لحظه ای است.

### ۳- طراحی آزمایشها و شرایط عملکردی

توان تولیدی پیل های سوختی غشای پلیمری تابع پارامترهای عملکردی آنها می باشد. نرخ استوکیومتری، دمای گازهای ورودی، رطوبت نسبی و پس فشار در دو سمت آند و کاتد از جمله پارامترهای مؤثر در عملکرد پیل به شمار می آیند. از طرفی بررسی هم زمان این پارامترها سبب اتلاف زمان و مواد مصرفی می گردد. در تحقیق حاضر سه پارامتر قابل تنظیم دمای گازهای ورودی، استوکیومتری آند و کاتد به عنوان پارامترهای مستقل ورودی در نظر گرفته شده و آزمایش های مختلف بر مبنای تغییر این سه پارامتر طراحی می گردند. جدول ۱ نشان دهنده کران بالا و پایین این پارامترها به منظور طراحی آزمایش است.

سایر پارامترها در هنگام عملکرد پیل، ثابت نگه داشته شده است.

جدول ۲ نشان دهنده نماد و مقادیر این پارامترها می باشد.



شکل ۴ منحنی توان تولیدی و ضریب آب پوشانی بر حسب زمان به منظور نشان دادن زمان پایایی

Fig. 4. Plot of power and instantaneous WCR vs. time, in order to demonstrate quasi-steady state

به منظور مطالعه کمی میزان انباشت توده های آب در کانال های جریان سمت کاتد، پارامتر ضریب آب پوشانی<sup>۱</sup> لحظه ای مورد استفاده قرار می گیرد. این پارامتر در هر لحظه بیانگر درصدی از کانال های جریان است که توسط توده های آب اشغال شده و به صورت رابطه (۴) تعریف می شود [۹].

$$WCR_t (\%) = \frac{\text{سطحی از کانال جریان که در آن آب مشاهده می شود}}{\text{سطح کل کانال جریان}} \times 100 \quad (4)$$

ضریب آب پوشانی لحظه ای به صورت پیوسته در طول انجام هر آزمایش محاسبه می شود. در نهایت میانگین این ضرایب از زمانی که مقادیر آن به حالت پایا و یا شبه پایا می رسد با استفاده از رابطه (۵) تعیین می گردد. مطابق شکل ۴ مقادیر ضریب آب پوشانی لحظه ای در ثانیه ۴۰۰ به حالت پایا رسیده است. بنابراین ضریب آب پوشانی گزارش شده در کانتورهای این پژوهش، مقادیر میانگین گیری شده از زمانی است که این ضریب به حالت پایا و یا شبه پایا رسیده است.

$$WCR = \frac{1}{n} \sum_{t=t_{ss}}^{t=t_f} WCR_t \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $WCR$  ضریب آب پوشانی میانگین پس از پایداری پیل است که در ادامه به اختصار از عبارت ضریب آب پوشانی استفاده می شود.  $t_{ss}$  زمان آغاز ناحیه پایداری،  $t_f$  زمان اتمام آزمایش،  $n$  تعداد

1 Water Coverage Ratio (WCR)

جدول ۳ آزمایش‌های طراحی‌شده با استفاده از روش رویه پاسخ به همراه مقادیر توان تولیدی و ضریب آب پوشانی  
**Table 3. Proposed tests by DOE. Generated power and WCR are considered as responses**

<i>WCR</i>	<i>Power</i> (W)	<i>CST</i>	<i>AST</i>	<i>T</i> <sup>*</sup>	ترتیب انجام آزمایش (مرتب به آزمایش)
۷/۰۹	۹/۳۰۹	۲/۵	۱/۲	۱/۲	۱
۴/۴۳	۱۰/۵۱۴	۲/۵	۱/۲	۳/۲	۲
۰/۴۷	۶/۶۳۴	۲/۵	۲/۴	۱/۲	۳
۰/۴۳	۹/۹۵۱	۲/۵	۲/۴	۳/۲	۴
۴/۱۰	۱۰/۵۰۳	۴/۵	۱/۲	۱/۲	۵
۱/۱۱	۹/۶۵۵	۴/۵	۱/۲	۳/۲	۶
۱/۹۷	۹/۴۲۵	۴/۵	۲/۴	۱/۲	۷
۲/۰۵	۱۰/۳۰۸	۴/۵	۲/۴	۳/۲	۸
۴/۷۱	۹/۰۴۷	۳/۵	۱/۸	۱/۲	۹
۳/۱۵	۱۰/۰۸۱	۳/۵	۱/۸	۳/۲	۱۰
۳/۱۶	۹/۹۱۸	۳/۵	۱/۲	۲/۲	۱۱
۰/۶۹	۹/۰۹۸	۳/۵	۲/۴	۲/۲	۱۲
۲/۸۳	۸/۹۵۸	۲/۵	۱/۸	۲/۲	۱۳
۲/۱۶	۹/۷۴۸	۴/۵	۱/۸	۲/۲	۱۴
۳/۱۴	۹/۳۴۶	۳/۵	۱/۸	۲/۲	۱۵
۳/۱۶	۹/۳۴۸	۳/۵	۱/۸	۲/۲	۱۶
۳/۱۷	۹/۳۴۱	۳/۵	۱/۸	۲/۲	۱۷
۳/۱۳	۹/۳۴۶	۳/۵	۱/۸	۲/۲	۱۸
۳/۱۲	۹/۳۴۴	۳/۵	۱/۸	۲/۲	۱۹
۳/۱۴	۹/۳۵۲	۳/۵	۱/۸	۲/۲	۲۰

آزمایش‌ها است. جدول ۳ آزمایش‌های طراحی‌شده توسط طرح مرکب مرکزی بر مبنای سه پارامتر دمای گازهای ورودی، استوکیومتری آند و کاتد را نشان می‌دهد. در این جدول ستون اول نشان‌دهنده ترتیب انجام آزمایش، ستون‌های دوم تا چهارم به ترتیب دمای بی‌بعد، استوکیومتری آند و کاتد می‌باشند. لازم به ذکر است که کلیه آزمایش‌ها در شرایط کارکردی ارائه‌شده توسط طرح مرکب مرکزی انجام گرفته و دو پارامتر توان میانگین تولیدی و ضریب میانگین آب پوشانی که پس از پایداری پیل حاصل می‌شود (شکل ۴)، به‌عنوان پاسخ سیستم در ستون‌های پنجم و ششم جایگزین گردیده‌اند.

در طرح مرکب مرکزی، یک رویه مرتبه دوم<sup>۴</sup> به کمک پارامترهای

در تحقیق حاضر از روش طراحی آزمایش و طرح عاملی رویه پاسخ<sup>۱</sup> استفاده‌شده است. به‌هنگام استفاده از این طرح عاملی می‌توان مدل‌های باکس بنکن<sup>۲</sup> و طرح مرکب مرکزی<sup>۳</sup> را بکار برد. تعداد آزمایش‌های پیشنهادی در طرح مرکب مرکزی و باکس بنکن به ازای ۳ پارامتر مستقل ورودی به ترتیب ۲۰ و ۱۵ می‌باشد. بنابراین در این پژوهش طرح مرکب مرکزی بکار گرفته می‌شود. همان‌گونه که گفته شد طرح مرکب مرکزی برای سه پارامتر ورودی، ۲۰ آزمایش را پیشنهاد می‌دهد که ۵ آزمایش نهایی آن تکراری است. هدف از انجام آزمایش‌های تکراری، جلوگیری از وقوع خطای انسانی و بررسی تکرارپذیری به‌هنگام انجام

- 
- 1 Response Surface Method (RSM)
  - 2 Box Behnken Design (BBD)
  - 3 Central Composite Design (CCD)

---

4 Second order nonlinear regression

جدول ۴ مقادیر ضرایب رگرسیون برای دو پارامتر توان تولیدی و ضریب آب پوشانی

Table 4. Estimated regression coefficients for the models of Power (W) and WCR

ضرایب رگرسیون		
Power (W)	WCR	پارامتر
۱۱/۲۷۶۱	۱۸/۱۵۷۴	مقادیر ثابت
عبارات خطی		
۰/۴۳۵۴	-۷/۲۴۱۱	$T^*$
-۵/۴۶۸۹	-۲/۰۳۷۲	AST
۱/۰۵۷۶	-۰/۹۷۳۹	CST
مربعات		
۰/۱۴۶۹	۱/۰۱۹۷	$T^* \times T^*$
۰/۲۵۲۶	-۲/۷۳۳۷	AST $\times$ AST
-۰/۰۶۴۴	-۰/۴۱۲۹	CST $\times$ CST
اثرات متقابل		
۰/۸۰۰۵	۱/۱۸۷۵	$T^* \times$ AST
-۰/۵۶۱۰	-۰/۰۲۸۲	$T^* \times$ CST
۰/۵۸۶۲	۱/۹۶۷۱	AST $\times$ CST

آماری، دو معیار اصلی جهت بررسی کفایت مدل‌های رگرسیونی ارائه می‌شود. الف) مانده: که نشان‌دهنده میزان اختلاف مقادیر حاصل از انجام آزمایش‌ها و مدل رگرسیون در شرایط عملکردی یکسان است. شرط کفایت مدل وجود مانده کم و عدم مشاهده الگویی خاص در مقادیر مانده برحسب ترتیب انجام آزمایش‌ها (شکل ۵ الف و ج) است. ب) نمودار نقطه‌ای احتمال نرمال مانده‌ها: این نمودار با فرض توزیع نرمال با میانگین صفر برای خطاها ترسیم می‌گردد. محور افقی نمودار نشان‌دهنده مقدار مانده است و محور عمودی آن از طریق محاسبه مرتبه میانه<sup>۲</sup> حاصل می‌شود. روند خطی نمودار حاصل بیانگر انطباق داده‌های نمونه با توزیع نرمال و کفایت مدل می‌باشد. همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۵ مشاهده می‌شود هر دو شرط اساسی جهت کفایت مدل‌های رگرسیونی برای دو پارامتر وابسته توان تولیدی و ضریب آب پوشانی برقرار است. بنابراین مدل‌های رگرسیونی برازش شده از دقت مناسبی برخوردار خواهند بود.

#### ۲-۴- بررسی تأثیر پارامترهای مستقل بر توان تولیدی و ضریب آب پوشانی به کمک نمودار اثرات اصلی

نمودار اثرات اصلی به کمک میانگین‌گیری از مقادیر در هر سطح به دست می‌آید. بنابراین در این نمودار، اثرات هم‌زمان پارامترها بر متغیر پاسخ لحاظ نمی‌شود. مطالعه نتایج این نمودار (شکل ۶) نشان می‌دهد که به‌صورت میانگین با افزایش دمای گازهای ورودی و استوکیومتری کاتد، توان تولیدی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر افزایش استوکیومتری آند افت عملکرد را در پی دارد. بررسی نمودارهای استخراج‌شده برای مقادیر ضریب آب پوشانی بیانگر این نتیجه است که افزایش دمای گازهای ورودی و استوکیومتری آند همواره سبب کاهش میزان آب انباشته‌شده در کانال‌های جریان سمت کاتد می‌گردد درحالی‌که با افزایش استوکیومتری کاتد از ۲/۵ به ۳/۵ مقادیر آب انباشته‌شده در کانال‌های تغییری نمی‌کند و افزایش مجدد نرخ استوکیومتری به کران بالا (۴/۵) سبب تخلیه کانال‌های جریان می‌گردد.

#### ۳-۴- بررسی اثر استوکیومتری کاتد بر محتوای آب و توان تولیدی

به کمک معادله رگرسیون حاصل از جدول ۴ می‌توان کانتورهای توان برحسب پارامترهای مستقل را ترسیم نمود و از این طریق تأثیر

مستقل ورودی بر روی پاسخ برازش می‌شود. این رابطه شامل مقدار ثابت، عبارات خطی<sup>۱</sup>، مرتبه دوم و اثرات متقابل پارامترها است. فرمول (۶) بیانگر فرم کلی این رابطه است [۳۵].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (6)$$

در رابطه (۶)،  $Y$  متغیر وابسته،  $X_i$  ها پارامترهای مستقل ورودی،  $\beta_i$  ها ضرایب متناظر آن‌ها هستند. از آنجایی که تحقیق حاضر سه پارامتر مستقل و دو پارامتر وابسته مجزا دارد، می‌توان روابط (۷) و (۸) را نوشت:

$$\text{Power (W)} = \text{Function}(T^*, \text{AST}, \text{CST}) \quad (7)$$

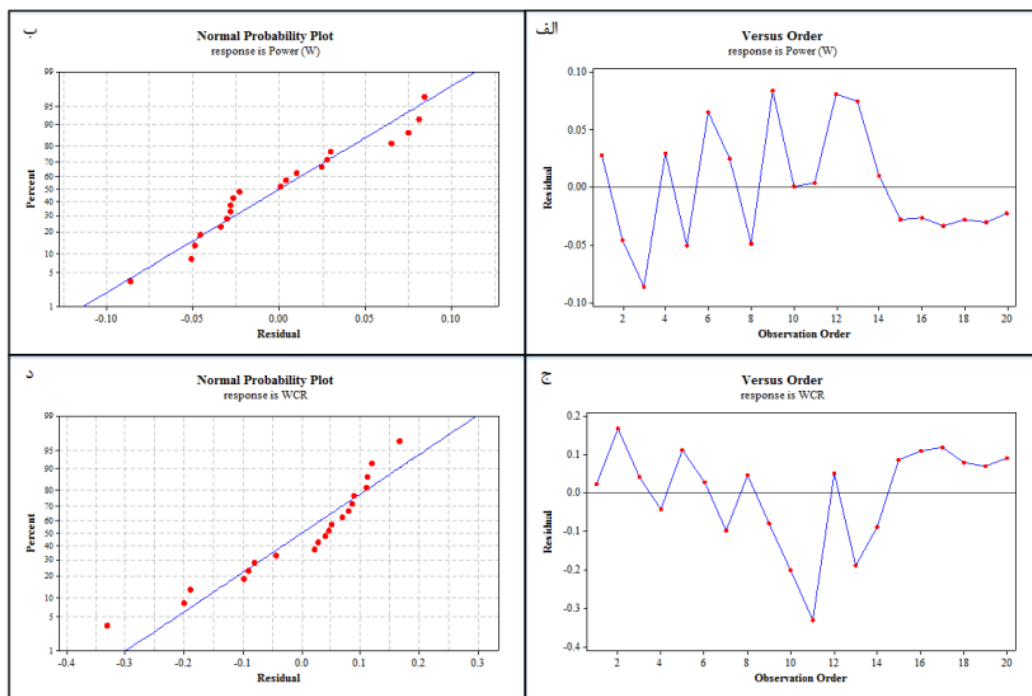
$$\text{WCR} = \text{Function}(T^*, \text{AST}, \text{CST}) \quad (8)$$

#### ۴- نتایج و بحث

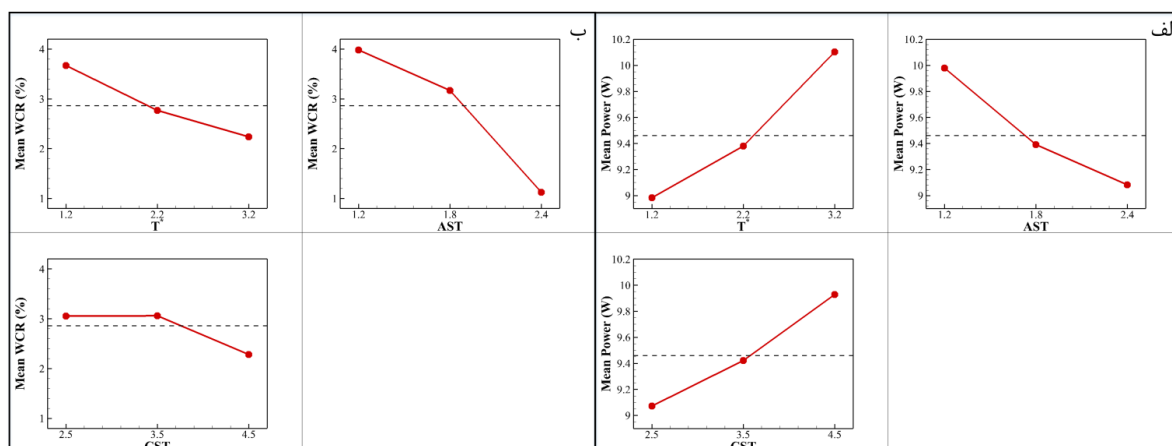
##### ۴-۱- بررسی کفایت مدل

با توجه به معادله رگرسیون مرتبه دوم (رابطه (۶))، ضرایب تخمین‌گر بر اساس طراحی آزمایش انجام‌شده مطابق جدول ۴ نوشته می‌شود. با کمک این مقادیر می‌توان مطالعه کمی دقیقی با هدف بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر پاسخ انجام داد. بر مبنای محاسبات





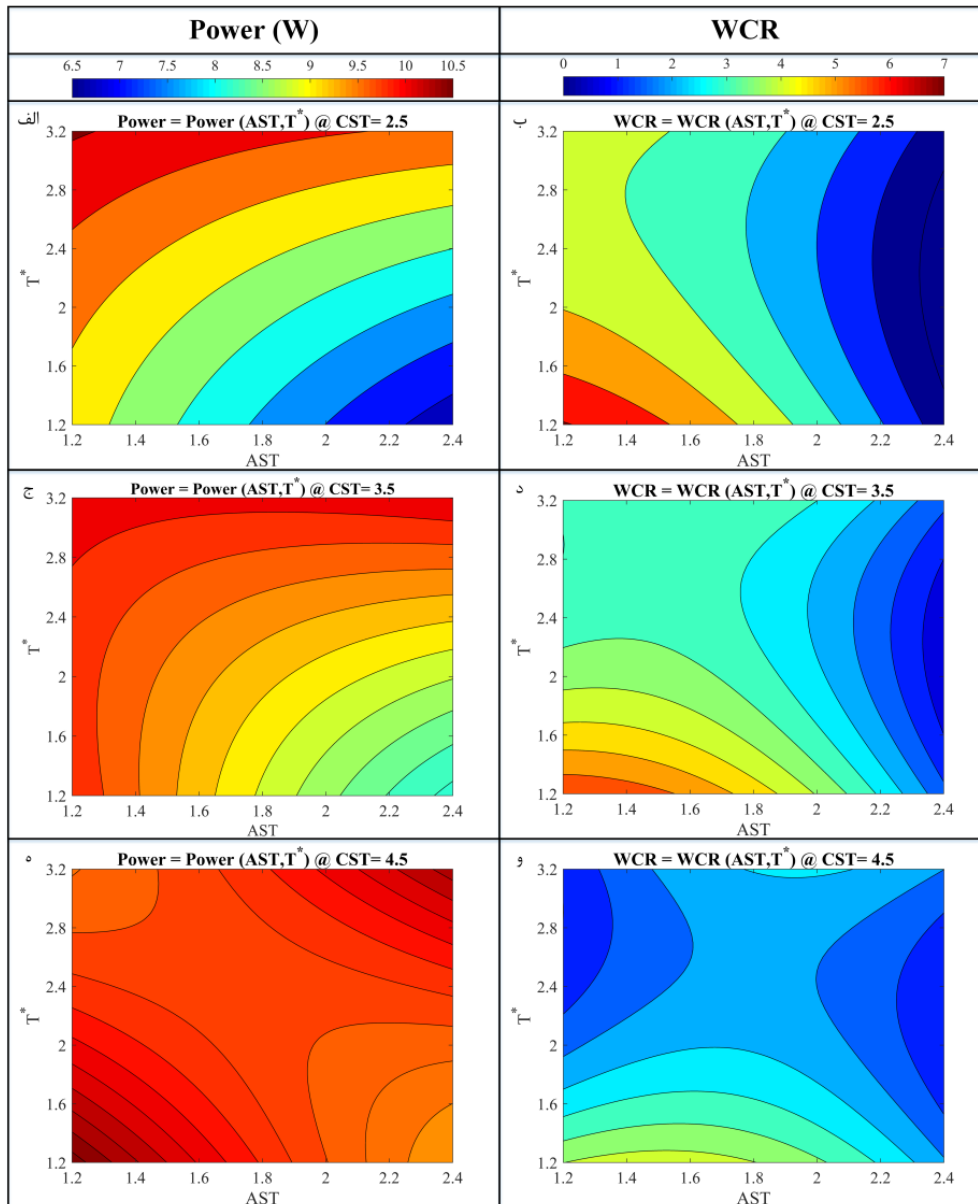
شکل ۵ مقدار باقیمانده برحسب مرتبه آزمایش و نمودار نقطه‌ای احتمال نرمال مانده‌ها برای توان و ضریب آب پوشانی  
**Fig. 5. Residual vs. observation order and normal probability plots for power and WCR**



شکل ۶ نمودار تأثیرات اصلی توان و ضریب آب پوشانی  
**Fig. 6. Main effect plots for generated power and WCR**

همچنین مشاهده می‌شود که افزایش دمای گازها همواره سبب بهبود عملکرد خواهد شد. در این شرایط با توجه به شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که در استوکیومتری کم و متوسط آند افزایش دمای گاز سبب کاهش میزان آب می‌گردد. حال آن که در استوکیومتری‌های بالاتر آند به دلیل کاهش شدید محتوای آب، افزایش دمای گاز تأثیر چندانی بر آب انباشته‌شده در کانال‌های جریان سمت کاند ندارد. در مقادیر استوکیومتری متوسط کاند (۳/۵) و محدوده دمای بی‌بعد کم‌تر از ۲/۶، با افزایش استوکیومتری آند توان تولیدی همواره کاهش

جداگانه و اثرات متقابل آن‌ها را بر توان تولیدی مورد مطالعه قرارداد. شکل ۷ کانتورهای توان تولیدی و ضریب آب پوشانی برحسب استوکیومتری آند و دمای بی‌بعد به ازای استوکیومتری‌های ثابت کاند را نشان می‌دهد. در استوکیومتری پایین کاند (۲/۵) با افزایش استوکیومتری آند توان تولیدی و میزان آب انباشته‌شده در سمت کاند کاهش می‌یابد. دلیل کاهش محتوای آب سمت کاند را می‌توان کاهش محتوای آب در سمت آند و افزایش پدیده نفوذ برگشتی دانست. در این شرایط محتوای آب غشا کاهش یافته و عملکرد پیل افت می‌نماید.



شکل ۷ کانتورهای توان تولیدی و ضریب آب پوشانی برحسب استوکیومتری آند و دمای بی‌بعد از ای استوکیومتری‌های ثابت کاتد

Fig. 7. Contour plots of power and WCR in plane of AST and  $T^*$  at constant CST levels

دلیل این امر را می‌توان کاهش میزان آب مایع در پیل با توجه به شکل ۷ دانست. حال آنکه در دماهای بالاتر، افزایش استوکیومتری آند سبب بهبود عملکرد پیل می‌شود. بررسی تغییرات توان تولیدی در استوکیومتری ثابت آند نشان می‌دهد در مقادیر استوکیومتری کمتر از ۱/۸ با افزایش دمای گازهای ورودی توان تولیدی کاهش می‌یابد. این امر در حالی اتفاق می‌افتد که در مقادیر بالاتر افزایش استوکیومتری آند، افزایش دمای گازها سبب بهبود عملکرد می‌گردد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از کانتورهای استوکیومتری کاتد ثابت شکل ۷ توصیه می‌شود که به‌منظور تولید حداکثر توان، در

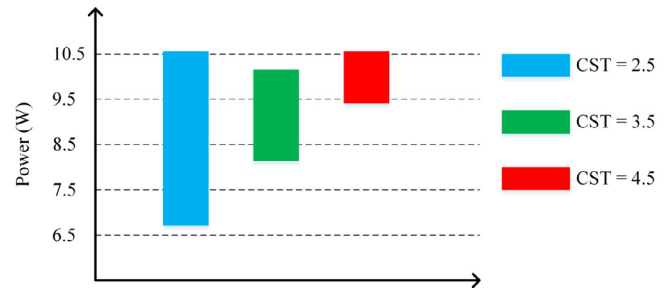
می‌یابد. در این شرایط محتوای آب نیز کاهش‌یافته و پدیده خشکی روی می‌دهد. در صورتی که در دماهای بالاتر، افزایش استوکیومتری آند تأثیری بر عملکرد پیل ندارد. در این شرایط دمای کارکردی بالاتر سبب بهبود سینتیک واکنش شده و افت توان ناشی از کمبود آب در پیل را جبران می‌کند. روند مشاهده‌شده ضریب آب پوشانی در مقادیر متوسط استوکیومتری آند نیز مشابه مقادیر کم می‌باشد با این تفاوت که میزان متوسط آب کاهش یافته است.

در کران بالای استوکیومتری کاتد ( $=4/5$ ) و محدوده دمای بی‌بعد کم‌تر از ۲/۳، با افزایش استوکیومتری آند، توان تولیدی کاهش می‌یابد.

استوکیومتری کاتد نیز سبب کاهش محتوای آب می‌گردد، اما تأثیر نرخ استوکیومتری آند بر میزان آب موجود در پیل بیش‌تر از کاتد است. از طرفی افزایش نرخ استوکیومتری کاتد نفوذ اکسیژن به سطح کاتالیست را آسان می‌کند و این امر بهبود نرخ عملکرد را در پی خواهد داشت. در دماهای کارکرد متوسط ( $\frac{2}{2}$ ) نیز مشابه دمای پایین، با افزایش استوکیومتری آند، توان تولیدی کاهش می‌یابد (شکل ۹ ج). حال آنکه افزایش استوکیومتری کاتد همواره منجر به بهبود عملکرد پیل می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش استوکیومتری آند و کاتد کاهش ضریب آب پوشانی را در پی دارد. در دمای بالای گازهای ورودی ( $\frac{3}{2}$ ) مطابق شکل ۹ ه، به ازای استوکیومتری آند کم‌تر از  $\frac{1}{7}$  افزایش استوکیومتری کاتد سبب کاهش توان تولیدی می‌گردد. از سوی دیگر در مقادیر بزرگ‌تر از  $\frac{1}{7}$  افزایش استوکیومتری کاتد بهبود عملکرد را در پی خواهد داشت. این امر برای استوکیومتری کاتد نیز صادق است. بدین‌صورت که در مقادیر استوکیومتری کاتد کم‌تر از  $\frac{3}{5}$ ، با افزایش استوکیومتری آند توان تولیدی کاهش می‌یابد درحالی‌که به ازای مقادیر استوکیومتری کاتد بالاتر از  $\frac{3}{5}$  افزایش استوکیومتری آند سبب بهبود عملکرد می‌گردد.

مقایسه عملکرد پیل در دمای پایین ( $\frac{1}{2}$ ) و متوسط ( $\frac{2}{2}$ ) در شکل‌های ۹ الف و ۹ ج نشان می‌دهد که افزایش دما سبب کاهش حداکثر توان تولیدی شده است. با توجه به کاهش ضریب آب پوشانی، می‌توان نتیجه گرفت که با وجود افزایش دما، اثر نامطلوب کاهش محتوای آب پیل پدیده غالب می‌باشد. درحالی‌که با افزایش دما از مقادیر متوسط ( $\frac{2}{2}$ ) به بالا ( $\frac{3}{2}$ )، با وجود کاهش محتوای آب، توان تولیدی افزایش یافته که حاکی از غلبه اثر مثبت افزایش سینتیک واکنش‌ها (ناشی از افزایش دما) بر اثر منفی کاهش محتوای آب است. با توجه به کانتورهای دما ثابت شکل ۹، به‌منظور دستیابی به حداکثر توان و جلوگیری از آب‌گرفتگی و یا خشک شدن غشا، عملکرد در حداقل دما ( $\frac{1}{2}$ ) و یا حداکثر آن ( $\frac{3}{2}$ ) توصیه می‌شود. در دمای حداقل، بایستی نرخ استوکیومتری آند در مقدار کمینه و کاتد در مقدار بیشینه قرار گیرد. همچنین در دمای بالا پیشنهاد می‌گردد که استوکیومتری آند و کاتد در کمترین مقدار تنظیم شوند که ضمن جلوگیری از اتلافات ناشی از افت فشار، توان تولیدی پیل نیز حداکثر شود.

قیاس هم‌زمان نمودارهای ترسیمی نشان می‌دهد که به هنگام



شکل ۸ آنالیز حساسیت توان تولیدی در استوکیومتری‌های مختلف کاتد  
Fig. 8. Sensitivity analysis of power at various CST levels

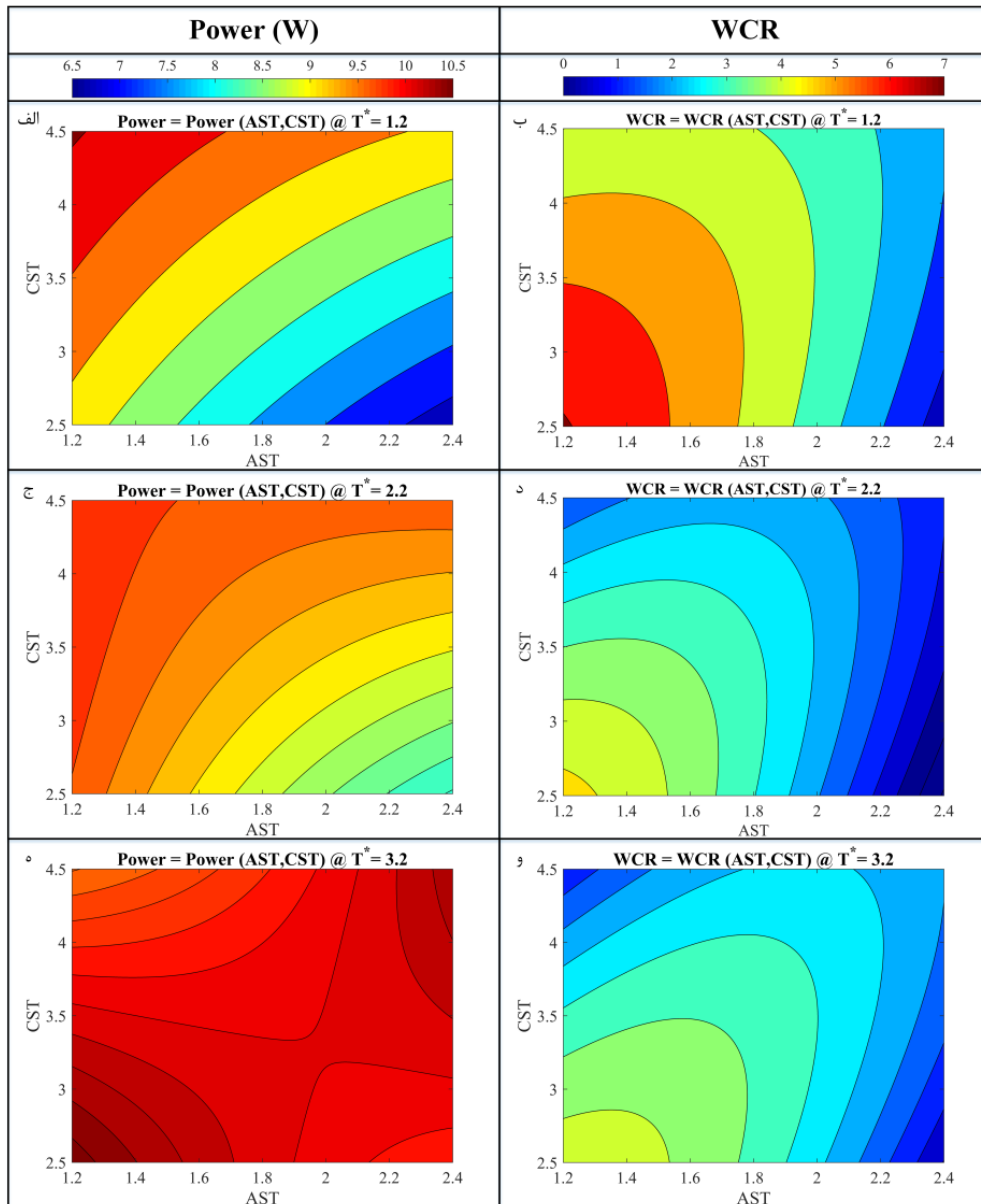
استوکیومتری پایین و متوسط کاتد ( $\frac{3}{5}$  و  $\frac{2}{5}$ ) نرخ استوکیومتری آند نیز پایین نگه‌داشته شود ولی از گازهای ورودی گرم استفاده گردد. از طرفی در استوکیومتری بالای کاتد ( $\frac{4}{5}$ )، بهترین عملکرد زمانی حاصل می‌شود که دمای گازها و استوکیومتری آند به‌صورت هم‌زمان در کران پایین و یا در کران بالا قرار گرفته باشند. در این شرایط با توجه به اتلافات پیل توصیه می‌شود که دمای گازها و نرخ استوکیومتری آند در کران پایین خود، تنظیم شوند.

قیاس هم‌زمان نمودارهای ترسیمی نشان می‌دهد که به هنگام تولید توان بیشتر از ۱۰ وات ضریب آب پوشانی در بازه ۳ تا  $\frac{4}{3}$  متغیر است.

نمودار شکل ۸ نشان‌دهنده محدوده تغییرات توان در استوکیومتری‌های مختلف سمت کاتد است. مقایسه عملکرد پیل در استوکیومتری‌های مختلف سمت کاتد بیانگر این موضوع است که با افزایش استوکیومتری کاتد میزان حساسیت پیل نسبت به تغییر سایر پارامترها کم‌تر می‌گردد. این امر را می‌توان از کاهش فاصله بین حداکثر و حداقل توان تولیدی در نمودار شکل ۸ نتیجه گرفت.

#### ۴-۴ - بررسی اثر دمای کارکرد بر محتوای آب و توان تولیدی

شکل ۹ نشان‌دهنده تغییرات توان و ضریب آب پوشانی برحسب استوکیومتری آند و کاتد در دماهای بی‌بعد  $\frac{1}{2}$ ،  $\frac{2}{2}$  و  $\frac{3}{2}$  است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در دمای پایین ( $\frac{1}{2}$ ) با افزایش استوکیومتری آند توان تولیدی کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار ضریب آب پوشانی (شکل ۹ ب)، علت این امر را می‌توان به خشک شدن پیل نسبت داد. مطالعه تأثیر افزایش استوکیومتری کاتد در این دما نشان می‌دهد که افزایش استوکیومتری کاتد همواره بهبود عملکرد را در پی دارد. باید توجه داشت که هرچند افزایش



شکل ۹ کانتورهای توان تولیدی و ضریب آب پوشانی برحسب استوکیومتری آند و کاتد به ازای دمای بی بعد ثابت  
**Fig. 9. Contour plots of power and WCR in plane of AST and CST at constant  $T^*$  levels**

کاهش می‌یابد. افزایش مجدد دما تأثیر چندانی بر این امر ندارد. در واقع با افزایش دمای گازهای ورودی محدوده تغییرات توان تولیدی کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که به هنگام استفاده از گازهای ورودی گرم، تغییرات استوکیومتری آند و کاتد تأثیر چندانی بر عملکرد پیل ندارد و در توان تولیدی ثبات مشاهده می‌شود.

۴-۵ - بررسی اثر استوکیومتری آند بر محتوای آب و توان تولیدی  
 شکل ۱۱ نشان‌دهنده تأثیر تغییرات استوکیومتری کاتد و دمای گازهای ورودی بر توان تولیدی و ضریب آب پوشانی

تولید توان بیشتر از ۱۰ وات ضریب آب پوشانی در بازه ۲ تا ۴/۳ متغیر است.

مقایسه سطوح توانی ترسیمی در شکل ۹ به ازای دماهای بی بعد مختلف نشان می‌دهد که با افزایش دمای گازها از کران پایین به مقدار متوسط حداکثر توان تولیدی کاهش می‌یابد و با افزایش مجدد از کران متوسط به بالا مجدداً شاهد افزایش توان هستیم. در شکل ۱۰ محدوده تغییرات توان تولیدی به ازای تغییرات دمای بی بعد رسم شده است. مطابق این شکل، با افزایش دمای گازها از مقادیر پایین به متوسط، حساسیت پیل به مقادیر سایر پارامترهای عملکردی

ج، می‌توان گفت افزایش دما و همچنین استوکیومتری کاتد هر دو باعث بهبود عملکرد می‌گردند. در این حالت محتوای آب کانال‌های جریان سمت کاتد به مقادیر کمتر از ۲ درصد نزول می‌کند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از کانتورهای استوکیومتری آند ثابت شکل ۱۱، توصیه می‌شود که به‌منظور تولید حداکثر توان در نرخ استوکیومتری کم آند ( $=1/2$ )، از اکسیژن با نرخ استوکیومتری پایین و دمای بالا استفاده شود. همچنین در مقادیر بالای استوکیومتری آند ( $=2/4$ )، دمای گازها و نرخ استوکیومتری کاتد در مقادیر کران بالای خود قرار گیرند.

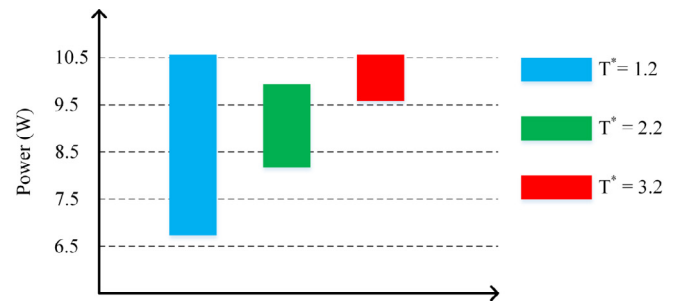
قیاس هم‌زمان نمودارهای ترسیمی نشان می‌دهد که به هنگام تولید توان بیشتر از ۱۰ وات ضریب آب پوشانی در بازه  $1/8$  تا  $4/27$  متغیر است.

مقایسه سطوح توانی ترسیمی در شکل ۱۱ به ازای استوکیومتری آند مختلف نشان می‌دهد که با افزایش نرخ استوکیومتری آند از کران پایین به مقدار متوسط حداکثر توان تولیدی کاهش می‌یابد و با افزایش مجدد از کران متوسط به بالا مجدداً شاهد افزایش توان هستیم. در شکل ۱۲ محدوده تغییرات توان تولیدی به ازای تغییرات استوکیومتری آند رسم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش استوکیومتری آند از مقادیر پایین به متوسط، حساسیت پیل به مقادیر سایر پارامترهای عملکردی تغییر محسوسی نمی‌کند. از طرفی در مقادیر زیاد استوکیومتری آند حساسیت پیل به مقادیر سایر پارامترهای عملکردی افزایش می‌یابد. در واقع مشاهده می‌شود با افزایش استوکیومتری آند، محدوده تغییرات توان تولیدی افزایش قابل توجهی می‌یابد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی پارامترهای مؤثر بر عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری و مدیریت آب در آن با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش و پردازش تصویر دیجیتال پرداخته شد. نتایج به‌دست‌آمده را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

- ۱- شرایط کارکردی مختلف بر محتوای آب مشاهده‌شده در کانال‌های جریان پیل سوختی غشای پلیمری تأثیر مستقیم دارد.
- ۲- عملکرد پیل سوختی شدیداً تحت تأثیر محتوای آب انباشته‌شده در کانال‌های جریان است. مشاهده می‌شود در توان‌های

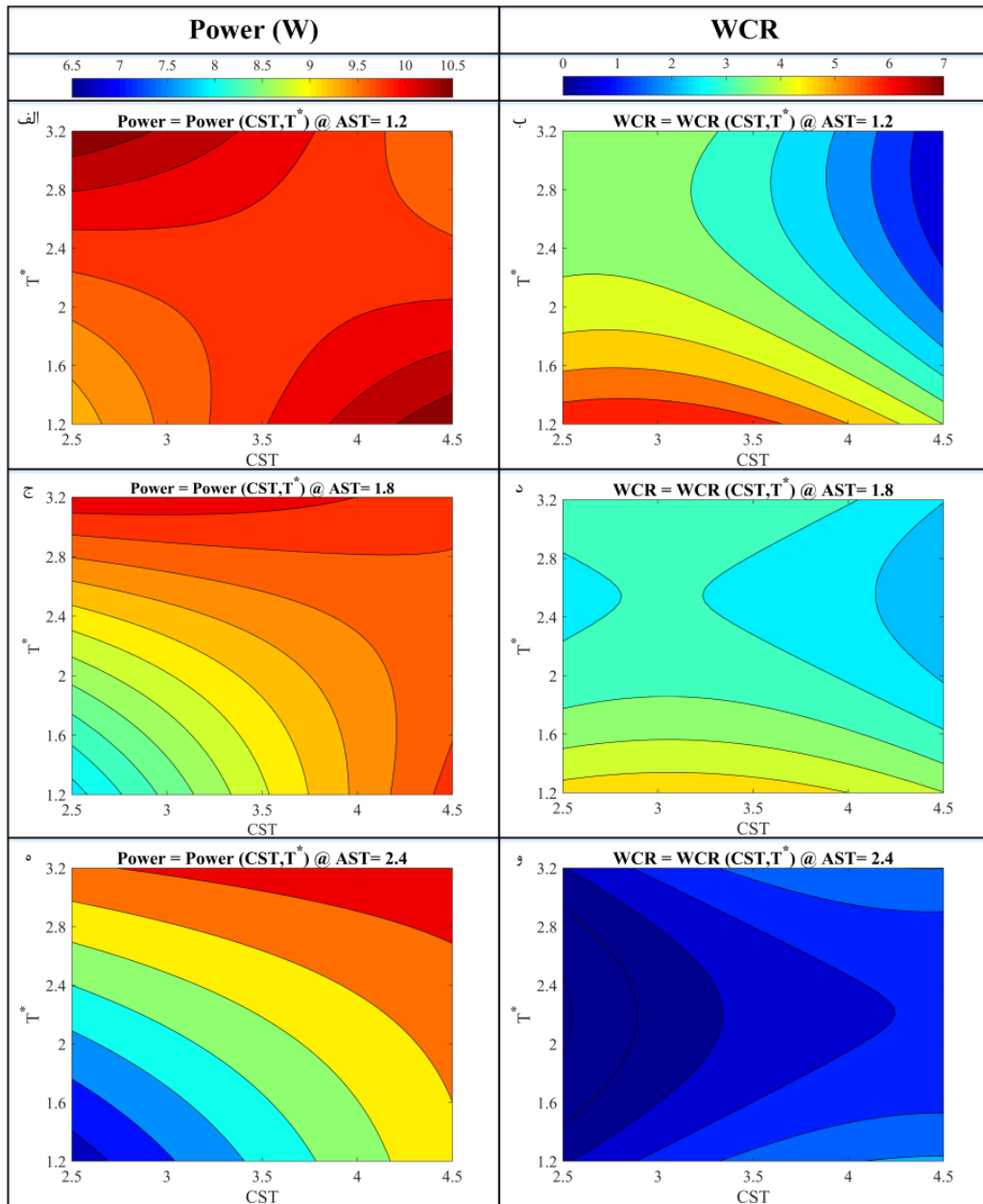


شکل ۱۰: آنالیز حساسیت توان تولیدی در دماهای بی‌بعد مختلف

Fig. 10. Sensitivity analysis of power at various  $T^*$  levels

در استوکیومتری‌های ثابت آند است. مطابق شکل ۱۱ الف، در استوکیومتری آند پایین ( $=1/2$ ) به ازای استوکیومتری کاتد کم‌تر از  $3/5$  افزایش دمای گازها سبب بهبود توان تولیدی می‌گردد. از طرفی در مقادیر بزرگ‌تر از  $3/5$  افزایش دما کاهش عملکرد را در پی خواهد داشت. دلیل این امر را می‌توان به کاهش میزان آب نسبت داد. همان‌گونه که در شکل ۱۱ ب مشاهده می‌شود در مقادیر استوکیومتری کاتد کم‌تر از  $3/5$  با افزایش دمای گازها میزان آب انباشته‌شده در پیل ضمن کاهش به مقادیر حدودی ۳ تا ۴ درصد می‌رسد درحالی‌که در مقادیر استوکیومتری کاتد بیش از  $3/5$ ، در صورت افزایش دما، اثر منفی خشک شدن پیل بر عملکرد بیش از اثر مثبت افزایش سینتیک واکنش‌ها می‌باشد که منجر به کاهش توان تولیدی می‌شود. مشابه روند فوق برای دما نیز صادق است. بدین‌صورت که در مقادیر دمای بی‌بعد کم‌تر از  $2/2$ ، با افزایش استوکیومتری کاتد توان تولیدی افزایش می‌یابد. با افزایش استوکیومتری کاتد در دمای کمتر از  $2/2$ ، اثر مثبت تسهیل دسترسی واکنش‌دهنده‌ها به محل‌های واکنش بر اثر منفی خشک شدن پیل غلبه می‌کند و به افزایش توان تولیدی می‌انجامد. برعکس، در دمای بیشتر از  $2/2$ ، افزایش استوکیومتری کاتد سبب غالب شدن پدیده خشک شدن می‌گردد و کاهش توان تولیدی را در پی دارد.

مطابق شکل‌های ۱۱ ج و د، در استوکیومتری متوسط آند ( $=1/8$ ) و دمای بی‌بعد کمتر از  $2/8$ ، افزایش استوکیومتری کاتد سبب افزایش توان تولیدی و کاهش محتوای آب می‌شود. درحالی‌که در مقادیر دمای بی‌بعد بیشتر از  $2/8$ ، افزایش استوکیومتری کاتد تنها منجر به افزایش توان مصرفی پمپ می‌شود و تأثیری در توان تولیدی پیل ندارد. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش دما در استوکیومتری ثابت کاتد، همواره سبب بهبود عملکرد می‌شود. با توجه به نمودار ۱۱



شکل ۱۱ کانتهورهای توان تولیدی و ضریب آب پوشانی برحسب استوکیومتری کاتد و دمای بی‌بعد به ازای استوکیومتری‌های ثابت آند

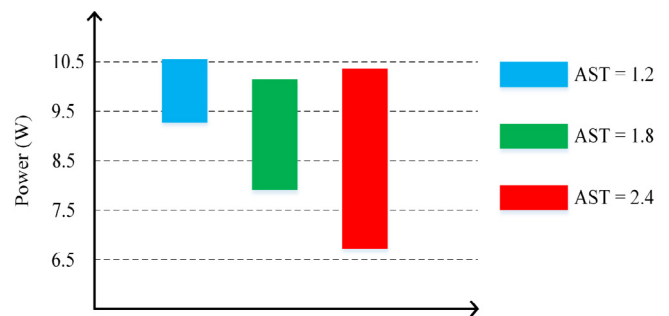
Fig. 11. Contour plots of power and WCR in plane of CST and  $T^*$  at constant AST levels

بالای ۱۰ وات برای پیل شفاف استفاده‌شده در این پژوهش، ضریب

آب پوشانی در محدوده ۱/۸ تا ۴/۳ متغیر است.

۳- افزایش نرخ استوکیومتری کاتد و دمای کارکردی سبب پایداری عملکرد پیل می‌گردد و وابستگی پیل به تغییر سایر پارامترهای عملکردی را کاهش می‌دهد. حال آن‌که افزایش استوکیومتری آند سبب ناپایداری عملکردی می‌گردد و وابستگی پیل به تغییر سایر پارامترهای عملکردی را افزایش می‌دهد.

۴- افزایش استوکیومتری کاتد، کاهش ضریب آب پوشانی و



شکل ۱۲ آنالیز حساسیت توان تولیدی در استوکیومتری‌های مختلف آند  
Figure 12. Sensitivity analysis of power at various AST levels

زمان (s)	$t$
ضریب آب پوشانی	$WCR$
متغیر مستقل ورودی	$X$
متغیر وابسته	$Y$
تعداد نقاطی که در بازه زمانی خاص ضریب آب پوشانی آن‌ها محاسبه شده است	$n$

### علائم یونانی

خطا	$\epsilon$
ضریب ثابت	$\beta$
<b>زیرنویس</b>	
حالت نهایی	$f$
حالت شبه پایا	$SS$

### مراجع

- [1] Y.B. Kim, Study on the effect of humidity and stoichiometry on the water saturation of PEM fuel cells, *International Journal of Energy Research*, 36(4) (2012) 509-522.
- [2] J.P. Owejan, T.A. Trabold, J.J. Gagliardo, D.L. Jacobson, R.N. Carter, D.S. Hussey, M. Arif, Voltage instability in a simulated fuel cell stack correlated to cathode water accumulation, *Journal of Power Sources*, 171(2) (2007) 626-633.
- [3] S. Endoo, K. Pruksathorn, P. Piumsomboon, Identification of the key variables in membrane electrode preparation for PEM fuel cells by a factorial design, *Renewable Energy*, 35(4) (2010) 807-813.
- [4] R. Anderson, L. Zhang, Y. Ding, M. Blanco, X. Bi, D.P. Wilkinson, A critical review of two-phase flow in gas flow channels of proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 195(15) (2010) 4531-4553.
- [5] R. Anderson, M. Blanco, X. Bi, D.P. Wilkinson, Anode water removal and cathode gas diffusion layer flooding in a proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(21) (2012) 16093-16103.
- [6] Z.X. Chen, D.B. Ingham, M.S. Ismail, L. Ma, K.J.

افزایش توان تولیدی را در پی دارد. در مقادیر استوکیومتری کاتد بالا، توصیه می‌گردد نرخ استوکیومتری آند و دمای کارکردی پیل در مقادیر کران پایین تنظیم شوند.

۵- افزایش دمای کارکردی سبب کاهش ضریب آب پوشانی در کانال‌های جریان و افزایش توان تولیدی می‌گردد. در دمای کارکردی بالا توصیه می‌شود نرخ استوکیومتری کاتد و آند در مقادیر کران پایین تنظیم شوند.

۶- افزایش استوکیومتری آند کاهش ضریب آب پوشانی و افت توان را در پی دارد. در مقادیر نرخ استوکیومتری آند کم، توصیه می‌گردد نرخ استوکیومتری کاتد در مقادیر کم و دمای کارکردی در کران بالا در نظر گرفته شود.

### تشکر و قدردانی

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از جناب آقای دکتر سعید اصغری ریاست محترم پژوهشکده مواد و انرژی اصفهان (پژوهشگاه فضایی ایران) به دلیل حمایت‌های صورت گرفته در طراحی و ساخت میز تست پیل سوختی غشای پلیمری و جناب آقای مهندس محمد نصر اصفهانی (پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده مواد و انرژی اصفهان) برای مشاوره و همکاری در ساخت پیل سوختی غشای پلیمری شفاف کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورند.

### فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

آمپر	$A$
پس فشار سمت آند، (Pa)	$ABP$
رطوبت نسبی آند (%)	$ARH$
استوکیومتری آند	$AST$
پس فشار سمت کاتد، (Pa)	$CBP$
رطوبت نسبی کاتد (%)	$CRH$
استوکیومتری کاتد	$CST$
چگالی جریان ( $A/cm^2$ )	$i$
فشار (Pa)	$P$
توان تولیدی (W)	$Power$
دمای بی‌بعد	$*T$

- Hydrogen Energy, 34(8) (2009) 3445-3456.
- [14] I.S. Hussaini, C.-Y. Wang, Visualization and quantification of cathode channel flooding in PEM fuel cells, *Journal of Power Sources*, 187(2) (2009) 444-451.
- [15] D. Spornjak, A.K. Prasad, S.G. Advani, In situ comparison of water content and dynamics in parallel, single-serpentine, and interdigitated flow fields of polymer electrolyte membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 195(11) (2010) 3553-3568.
- [16] J.M. LaManna, S. Chakraborty, J.J. Gagliardo, M.M. Mench, Isolation of transport mechanisms in PEFCs using high resolution neutron imaging, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(7) (2014) 3387-3396.
- [17] S.S. Alrwashdeh, I. Manke, H. Markötter, J. Haußmann, N. Kardjilov, A. Hilger, M.J. Kermani, M. Klages, A.M. Al-Falahat, J. Scholta, J. Banhart, Neutron radiographic in operando investigation of water transport in polymer electrolyte membrane fuel cells with channel barriers, *Energy Conversion and Management*, 148(Supplement C) (2017) 604-610.
- [18] D. Muirhead, R. Banerjee, M.G. George, N. Ge, P. Shrestha, H. Liu, J. Lee, A. Bazylak, Liquid water saturation and oxygen transport resistance in polymer electrolyte membrane fuel cell gas diffusion layers, *Electrochimica Acta*, 274 (2018) 250-265.
- [19] R. Banerjee, N. Ge, C. Han, J. Lee, M.G. George, H. Liu, D. Muirhead, P. Shrestha, A. Bazylak, Identifying in operando changes in membrane hydration in polymer electrolyte membrane fuel cells using synchrotron X-ray radiography, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(20) (2018) 9757-9769.
- [20] Z. Dunbar, R.I. Masel, Quantitative MRI study of water distribution during operation of a PEM fuel cell using Teflon flow fields, *Journal of Power Sources*, 171(2) (2007) 678-687.
- [21] T. Suzuki, Y. Tabuchi, S. Tsushima, S. Hirai, Measurement of water content distribution in catalyst coated membranes under water permeation conditions
- Hughes, M. Pourkashanian, Dynamics of liquid water in the anode flow channels of PEM fuel cells: A numerical parametric study, *Journal of the Energy Institute*, (2018).
- [7] M. Ashrafi, M. Shams, The effects of flow-field orientation on water management in PEM fuel cells with serpentine channels, *Applied Energy*, 208 (2017) 1083-1096.
- [8] M. Ashrafi, H. Kanani, M. Shams, Numerical and experimental study of two-phase flow uniformity in channels of parallel PEM fuel cells with modified Z-type flow-fields, *Energy*, 147 (2018) 317-328.
- [9] J.M. Sergi, S.G. Kandlikar, Quantification and characterization of water coverage in PEMFC gas channels using simultaneous anode and cathode visualization and image processing, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(19) (2011) 12381-12392.
- [10] J.P. Owejan, T.A. Trabold, D.L. Jacobson, M. Arif, S.G. Kandlikar, Effects of flow field and diffusion layer properties on water accumulation in a PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(17) (2007) 4489-4502.
- [11] R. Banerjee, S.G. Kandlikar, Experimental investigation of two-phase flow pressure drop transients in polymer electrolyte membrane fuel cell reactant channels and their impact on the cell performance, *Journal of Power Sources*, 268 (2014) 194-203.
- [12] S.G. Kandlikar, E.J. See, M. Koz, P. Gopalan, R. Banerjee, Two-phase flow in GDL and reactant channels of a proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(12) (2014) 6620-6636.
- [13] Z. Lu, S.G. Kandlikar, C. Rath, M. Grimm, W. Domigan, A.D. White, M. Hardbarger, J.P. Owejan, T.A. Trabold, Water management studies in PEM fuel cells, Part II: Ex situ investigation of flow maldistribution, pressure drop and two-phase flow pattern in gas channels, *International Journal of*



- direct visualisation of liquid water in the cathode and anode serpentine flow channels of proton exchange membrane (PEM) fuel cells, *Journal of the Energy Institute*, 91(6) (2018) 1057-1070.
- [29] R.M. Aslam, D.B. Ingham, M.S. Ismail, K.J. Hughes, L. Ma, M. Pourkashanian, Simultaneous thermal and visual imaging of liquid water of the PEM fuel cell flow channels, *Journal of the Energy Institute*, (2018).
- [30] B. Wahdame, D. Candusso, X. François, F. Harel, J.-M. Kauffmann, G. Coquery, Design of experiment techniques for fuel cell characterisation and development, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(2) (2009) 967-980.
- [31] H. Kanani, M. Shams, M. Hasheminasab, A. Bozorgnezhad, Model development and optimization of operating conditions to maximize PEMFC performance by response surface methodology, *Energy Conversion and Management*, 93 (2015) 9-22.
- [32] S.-J. Wu, S.-W. Shiah, W.-L. Yu, Parametric analysis of proton exchange membrane fuel cell performance by using the Taguchi method and a neural network, *Renewable Energy*, 34(1) (2009) 135-144.
- [33] S. Kaytakoğlu, L. Akyalçın, Optimization of parametric performance of a PEMFC, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(17) (2007) 4418-4423.
- [34] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, *Digital Image Processing (3rd Edition)*, Prentice-Hall, Inc., 2006.
- [35] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, 2008.
- by magnetic resonance imaging, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(9) (2011) 5479-5486.
- [22] A. Bozorgnezhad, M. Shams, H. Kanani, M. Hasheminasab, G. Ahmadi, The experimental study of water management in the cathode channel of single-serpentine transparent proton exchange membrane fuel cell by direct visualization, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(6) (2015) 2808-2832.
- [23] R. Banerjee, S.G. Kandlikar, Liquid water quantification in the cathode side gas channels of a proton exchange membrane fuel cell through two-phase flow visualization, *Journal of Power Sources*, 247 (2014) 9-19.
- [24] A. Bazylak, Liquid water visualization in PEM fuel cells: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(9) (2009) 3845-3857.
- [25] A. Bozorgnezhad, M. Shams, H. Kanani, M. Hasheminasab, G. Ahmadi, Two-phase flow and droplet behavior in microchannels of PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(42) (2016) 1-18.
- [26] K. Tüber, D. Pócza, C. Hebling, Visualization of water buildup in the cathode of a transparent PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, 124(2) (2003) 403-414.
- [27] T. Ous, C. Arcoumanis, Visualisation of water accumulation in the flow channels of PEMFC under various operating conditions, *Journal of Power Sources*, 187(1) (2009) 182-189.
- [28] R.M. Aslam, D.B. Ingham, M.S. Ismail, K.J. Hughes, L. Ma, M. Pourkashanian, Simultaneous

