



تشخیص آزمایشگاهی غوطه‌وری کاتد و آند پیل سوختی غشاء پلیمری با توان زیر ۳۰۰ وات با روش فازی - عصبی تطبیقی

علی خنفری^۱، آریا الستی^{۱*}، محمدجعفر کرمانی^۲ و سعید اصغری ورزنه^۳

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۳- پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۲
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶

کلمات کلیدی:

پیل سوختی غشاء پلیمری
توده‌ی پیل
فازی - عصبی تطبیقی
غوطه‌وری
افت فشار

خلاصه: امروزه به دلیل اهمیت روزافزون پیل سوختی غشاء پلیمری در تولید انرژی پاک، عیب‌یابی این مبدل انرژی اهمیت به‌سزایی یافته است. عیب‌یابی در پیل سوختی می‌تواند به‌طور محسوسی سبب افزایش عمر مفید و قابلیت اطمینان آن شود. بخش زیادی از عیوب مربوط به پیل سوختی غشاء پلیمری ناشی از برهم خوردن تعادل رطوبت در آن است. غوطه‌وری یکی از شایع‌ترین عیوب مرتبط با عدم تعادل پیل سوختی است؛ که هم در بخش کاتد و هم در آند توده‌ی پیل محتمل است. در کارهای گذشته عمدتاً به کاتد به دلیل اینکه مبدأ تولید آب است، به عنوان مکان محتمل برای بروز غوطه‌وری توجه شده است. در این مقاله آند نیز به عنوان مکان محتمل برای بروز این پدیده مورد توجه قرار گرفته است. روش این پژوهش بر این اساس است که از توده‌ی پیل در شرایط کارکرد سالم داده‌برداری می‌شود و تلاش می‌شود با استفاده از ورودی‌های مرتبط، سه پارامتر خروجی ولتاژ توده، افت فشار کاتد و افت فشار آند، با استفاده از روش فازی - عصبی تطبیقی تخمین زده شوند. در شرایط نامشخص، مقایسه انحراف مقادیر واقعی خروجی‌ها از مدل با مقادیر مجاز انحراف‌ها (به ترتیب ۰/۰۷۳۵ ولت، ۰/۰۰۹۲ بار و ۰/۰۰۴۷ بار) می‌تواند وقوع یا عدم وقوع غوطه‌وری را تعیین کند.

۱- مقدمه

پیل سوختی غشاء پلیمری یکی از مبدل‌های انرژی است؛ که در آن از واکنش بین هیدروژن و اکسیژن انرژی الکتریکی و گرما تولید می‌شود. ویژگی منحصر به فرد این نوع از پیل سوختی نسبت به انواع دیگر آن، کارکرد در دمای پایین، راندمان بالا و چگالی انرژی بالا است؛ به‌گونه‌ای که استفاده از آن برای کاربردهای حمل‌ونقل و یا ساکن مانند تولید هم‌زمان برق و حرارت امکان‌پذیر است. این راندمان بالا با استفاده توأمان از انرژی الکتریکی و گرما به فراتر از ۹۰ درصد نیز می‌رسد [۱] و این ویژگی به این مبدل قابلیت مضاعفی برای استفاده در منازل جهت تولید برق غیرمتمرکز بخشیده است. کارکرد بدون وجود قطعه‌ی متحرک، بی‌صدا بودن و عدم تولید آلاینده از مزایای استفاده از این پیل نسبت به موتورهای احتراق داخلی است.

با وجود مزایای بسیار، این مبدل انرژی هنوز جایگاه مورد انتظار خود را در عرصه تجاری‌سازی پیدا نکرده است؛ که قیمت بالا یکی از مهم‌ترین دلایل آن بوده است؛ اما هزینه تولید، با تولید انبوه و بهینه‌سازی فرایندهای

ساخت تا حد زیادی کاهش می‌یابد و تاکنون هم پیشرفت‌های خوبی در این زمینه اتفاق افتاده است. عامل مهم دیگری که مانع از گسترش کاربرد این پیل سوختی شده، پایین بودن قابلیت اطمینان آن بوده است. این امر سبب فرسودگی پیش از موعد پیل و افت عملکرد آن می‌شود. به همین دلیل تلاش در جهت شناسایی عیوب پیل سوختی و پیش‌بینی و جلوگیری از شدت یافتن این عیوب یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های محققان بوده است. از عیوب مختلفی که برای یک پیل سوختی محتمل است، می‌توان به آلودگی غشاء بر اثر وجود آلودگی در گازهای ورودی، کمبود مداوم هیدروژن و اکسیژن، نشت گاز به گاز، پیدایش ترک در غشاء، غوطه‌وری و یا خشکی اشاره کرد. با توجه به اینکه بیش از نیمی از عیوب مرتبط با پیل سوختی غشاء پلیمری مرتبط با آب است [۲]، تلاش زیادی در زمینه مدیریت آب در پیل سوختی غشاء پلیمری در سال‌های اخیر صورت گرفته است.

یک راه بررسی و تشخیص وقوع غوطه‌وری دیدن مستقیم آب مایع در پیل شفاف است [۳-۵]؛ که البته کاربرد این دسته از پژوهش‌ها به دلیل استفاده از پیل‌های شفاف و آزمایشگاهی بیشتر در حوزه مطالعات پارامتری

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: aalasti@sharif.edu



است و در کارکردهای برخط در پیل‌های تجاری کاربرد چندانی ندارد.

روش‌های عیب‌یابی برخط را می‌توان به دو دسته‌بندی بزرگ روش‌های بر پایه‌ی مدل و روش‌های مستقل از مدل تقسیم نمود. یکی از پژوهش‌های مستقل از مدل مربوط به ژنگ و همکاران [۶] است؛ که در آن با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی، منحنی ناپیوستگیست امپدانس به سه وضعیت نسبت استوکیومتری کم، متوسط و زیاد تقسیم‌بندی شده است. در پژوهش بن و همکاران [۷] از روش جداسازی مدهای تجربی که یکی از روش‌های پردازش سیگنال است، برای تشخیص غوطه‌وری و خشکی استفاده شده است.

از پژوهش‌های مبتنی بر مدل می‌توان به پژوهش برسل و همکاران [۸] اشاره کرد. در این پژوهش یک مدل برای پدیده‌ی زوال غشاء ارائه شده است و عمر باقی‌مانده غشاء با استفاده از مشاهده‌گر کالمن فیلتر تخمین زده شده است؛ که در نهایت با مدل تطابق خوبی نشان داده است.

از دیگر مدل‌سازی‌هایی که در این دسته می‌گنجد، می‌توان به پژوهش ونگ و همکاران [۹] اشاره کرد؛ که در آن یک مدل مدار معادل برای ولتاژ خروجی و تلفات آن ارائه شده است. در تحقیقی مشابه پورانیک و همکاران [۱۰] بر اساس کار قبلی مدلی در فضای حالت ارائه نمودند.

اما شاید مهم‌ترین کاری که در حوزه‌ی مدارهای معادل صورت گرفته است، مربوط به فوکوئت و همکاران [۱۱] باشد؛ که در آن مدار معادل رندل را اصلاح نموده، از المان خازن با فاز ثابت برای تبیین اثر خازن دولایه استفاده نمودند.

یکی از روش‌های عیب‌یابی مبتنی بر مدل، استفاده از مشاهده‌گر است. در این حوزه بر اساس عیب‌یابی موردنیاز مدل پیشنهادی هم متفاوت خواهد بود. یکی از مدل‌سازی‌های پرکاربرد در این حوزه توسط پوکراشپان و همکاران [۱۲] صورت گرفته؛ که هدف آن کنترل نسبت اکسیژن اضافه بوده است. دور شدن این نسبت از مقدار تعیین‌شده به‌منزله‌ی عیب تلقی شده، با تنظیم دبی کمپرسور در جهت رفع آن تلاش شده است. در کارهای زیادی به این مهم پرداخته شده است؛ که از جمله آن‌ها می‌توان به پژوهش رخت‌علا و همکاران [۱۳] اشاره کرد.

روش فازی-عصبی تطبیقی یکی از روش‌های قدرتمند شناسایی توابع است؛ که از مزایای دو ابزار قدرتمند منطق فازی و تئوری شبکه عصبی بهره می‌برد و تاکنون به‌ندرت از این روش برای تخمین توابع در حوزه مدیریت آب پیل سوختی استفاده شده است. برخی از کاربردهای روش فازی-عصبی تطبیقی در سیستم‌های پیل سوختی را می‌توان در پژوهش مائو و همکاران

[۱۴] یافت. این کاربردهای معرفی شده عبارتند از: پیش بینی افت ولتاژ در دراز مدت، پیش بینی زوال پیل با استفاده از ولتاژهای مراحل قبلی و پیش بینی ولتاژ پیل در آینده. ردی و سوداکار [۱۵] از کنترل‌کننده‌ی فازی-عصبی تطبیقی در مقایسه با کنترل‌کننده‌ی فازی استفاده کردند و در تنظیم کارکرد در بیشینه توان یک پیل کیلووات، کنترل‌کننده‌ی فازی عصبی تطبیقی عملکرد بهتری داشت. مدل‌سازی فازی-عصبی تطبیقی با معرفی رویکردهای جدید آموزش پیشرفت ملموسی داشته‌است. تعدادی از این رویکردها در پژوهش کارابوگا و کایا [۱۶] بررسی شده است.

در این پژوهش از این روش برای تخمین توابع ولتاژ خروجی، افت فشار کانال کاتد و افت فشار کانال آنُد در شرایط ایده‌آل استفاده می‌شود. با بهره‌گیری از این توابع و مقایسه مقدار آن‌ها با مقدار واقعی این پارامترها در سیستم، می‌توان بروز غوطه‌وری، مکان وقوع آن و درجه اهمیت آن را تحت بار الکترونیکی شدت‌جریان کشف نمود.

در اغلب کارها تنها به کاتد به‌عنوان مکان محتمل بروز غوطه‌وری توجه شده است؛ که این مسئله ناشی از عدم اهمیت به پدیده‌ی نفوذ معکوس^۱ است. در این پژوهش به آنُد نیز به‌عنوان مکان محتمل بروز غوطه‌وری توجه شده است. همچنین با استفاده از پارامتر ولتاژ در کنار افت فشار کانال‌ها، درجه‌ی شدت پدیده‌ی غوطه‌وری به دو درجه غوطه‌وری ابتدایی و جدی، تقسیم شده است؛ که این تقسیم‌بندی نیز به‌نوبه خود این پژوهش را از پژوهش‌های گذشته متمایز می‌کند.

۲- الگوسازی تجربی

۲-۱- توصیف میز آزمون

برای استفاده از توده‌ی پیل سوختی یک دستگاه آزمون اولیه در آزمایشگاه پیل سوختی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر موجود است؛ که توسط پژوهشگاه فضایی ایران طراحی و ساخته شده است؛ که گازهای هیدروژن و اکسیژن پس از ورود به آن از روتامتر دستی عبور می‌کنند و هریک از مرطوب‌ساز مجزا عبور کرده، به توده‌ی پیل وارد می‌شوند. این روتامترها امکان تنظیم دستی دبی را فراهم می‌آورند. بار الکترونیکی مورد استفاده در این دستگاه به‌گونه‌ای طراحی شده است؛ که امکان کارکرد تا توان ۸۰۰ وات را به پیل می‌دهد و با آن می‌توان جریان را تا میزان دلخواه و حداکثر تا ۱۰۰ آمپر بالا برد. داده‌های آزمایش از جمله ولتاژ تک‌تک سلول‌ها و دماها و فشارها پس از اندازه‌گیری حسگرها توسط کارت‌های داده‌برداری

1 Back diffusion

2 Stack



شکل ۱. میز آزمون طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه پیل سوختی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر (سمت چپ تصویر) در کنار میز اولیه آزمون ساخته شده توسط پژوهشگاه فضایی ایران (سمت راست تصویر).

Fig. 1. Designed and fabricated testbed in fuel cell laboratory of Mechanical Engineering Department of Amirkabir University of Technology (left side of image) besides primary testbed made by Iranian Space Research Center (right side of image)

حلقه دوم، آب دیونیزه با درصد خلوص بالا پس از عبور از یک مبدل حرارتی با جنس فولاد ضد زنگ از مجاورت آب حلقه اول به توده پیل پمپاژ شده و پس از عبور از پیل مجدداً برمی گردد. در شکل ۱ میز اولیه آزمون در کنار میز ساخته شده در این پژوهش مشاهده می شود.

۲-۲- مشخصات توده پیل سوختی مورد استفاده

توده پیل مورد استفاده دارای سه سلول و ابعاد مفید ۱۰ سانتی متر در ۱۰ سانتی متر است. این توده پیل از نوع آب-خنک بوده و مسیری برای عبور سیال خنک کننده در آن در نظر گرفته شده است. جنس صفحات دوقطبی این پیل از گرافیت است. توده پیل مورد اشاره توسط مرکز تحقیقات هیدروژن و انرژی خورشیدی ZSW آلمان طراحی و ساخته شده است و در شکل ۲ دیده می شود.

ICP-DAS در بستر سخت افزاری RS۴۸۵ به رایانه انتقال می یابند. نرخ داده برداری این کارت ها ۶۰ هرتز است.

در کنار این میز آزمون، میز دیگری نیز در این پژوهش طراحی و ساخته و به میز قبلی افزوده شد. این میز امکان کنترل خودکار دبی گاز کاتد و آند را فراهم می آورد. برای هر یک از کاتد و آند دو عدد کنترل کننده دبی جرمی تعبیه شده است؛ تا کارکرد دقیق در بازه وسیعی از دبی ها را برای توده های پیل مختلف آسان سازد. وظیفه دیگر این میز کنترل دمای توده های آب-خنک با استفاده از آب دیونیزه بود. دمای توده با تعداد کم سلول در شرایطی نیازمند افزایش است تا در نقطه بهینه کاری قرار گیرد و در حال کار نیز نیازمند کنترل است؛ تا از حد معینی بالاتر نرود که به خشکی غشاء و آسیب دیدن آن منتج نشود. این عمل با استفاده از دو حلقه ی تودرتو صورت می گیرد. در حلقه ی اول از یک رادیاتور هوا-خنک و یک گرم کن برقی با سقف ظرفیت ۲ کیلووات، برای گرم یا خنک سازی آب استفاده می شود. در

است. این روش مدل‌سازی در واقع بر اساس یک سیستم فازی تکگی-سوگونو-کنگ (TSK) و تنظیم پارامترهای آن شکل می‌گیرد. نخستین بار جنگ [۱۷] در سال ۱۹۹۳ میلادی این روش مدل‌سازی را گسترش داد. در این مدل‌سازی با در نظر گرفتن M قانون فازی به شکل زیر یک سیستم فازی معرفی می‌شود:

اگر x_1 برابر A_1^l و x_r برابر A_r^l و ... x_n برابر A_n^l باشد، آنگاه

$$y^l = c^l + c_1^l x_1 + c_2^l x_2 + \dots + c_n^l x_n$$

در این قوانین، A_i^l ها مجموعه‌های فازی، 1 عددی صحیح در بازه 1 تا M ، است؛ که M تعداد قوانین است. همچنین c_i^l ها عددهایی ثابت و قابل تنظیم هستند به گونه‌ای که خروجی مدل کمترین خطا را با داده‌های واقعی خروجی داشته باشد. خروجی این سیستم از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود:

$$f = \frac{\sum_{l=1}^M y^l \omega^l}{\sum_{l=1}^M \omega^l} \quad (1)$$

که در این رابطه، ω^l قدرت آتش قانون l ام نامیده می‌شود و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\omega^l = \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \quad (2)$$

که در آن، $\mu_{A_i^l}(x_i)$ میزان وابستگی متغیر کلامی x_i به مجموعه فازی A_i^l بیان می‌کند و مقداری بین 0 تا 1 را به خود می‌گیرد. در واقع هر تابع پیوسته‌ای که مقادیر خروجی آن بین 0 تا 1 باشد می‌تواند یک کاندیدا برای $\mu_{A_i^l}(x_i)$ باشد. در این پژوهش توابع فازی به شکل معروف زنگی گوسی انتخاب شدند.

درواقع سیستم TSK نگاشتی از فضای $U \subset \mathbb{R}^n$ به $V \subset \mathbb{R}$ است.

ساختار یکی از مدل‌های به‌دست‌آمده در نرم‌افزار MATLAB در شکل ۳ به‌صورت شماتیک دیده می‌شود.

در لایه‌ی اول شکل ۳، چهار ورودی به‌صورت چهار دایره‌ی توپر مشکی‌رنگ مشاهده می‌شود. لایه‌ی دوم؛ که با دایره‌های سفیدرنگ نشان



شکل ۲. پیل سوختی غشا پلیمری سه سلولی طراحی و ساخته شده توسط مرکز تحقیقات هیدروژن و انرژی خورشیدی ZSW آلمان

Fig. 2. Three cell polymer electrolyte membrane fuel cell (design and fabrication by center for hydrogen and solar energy research (ZSW)- Germany)

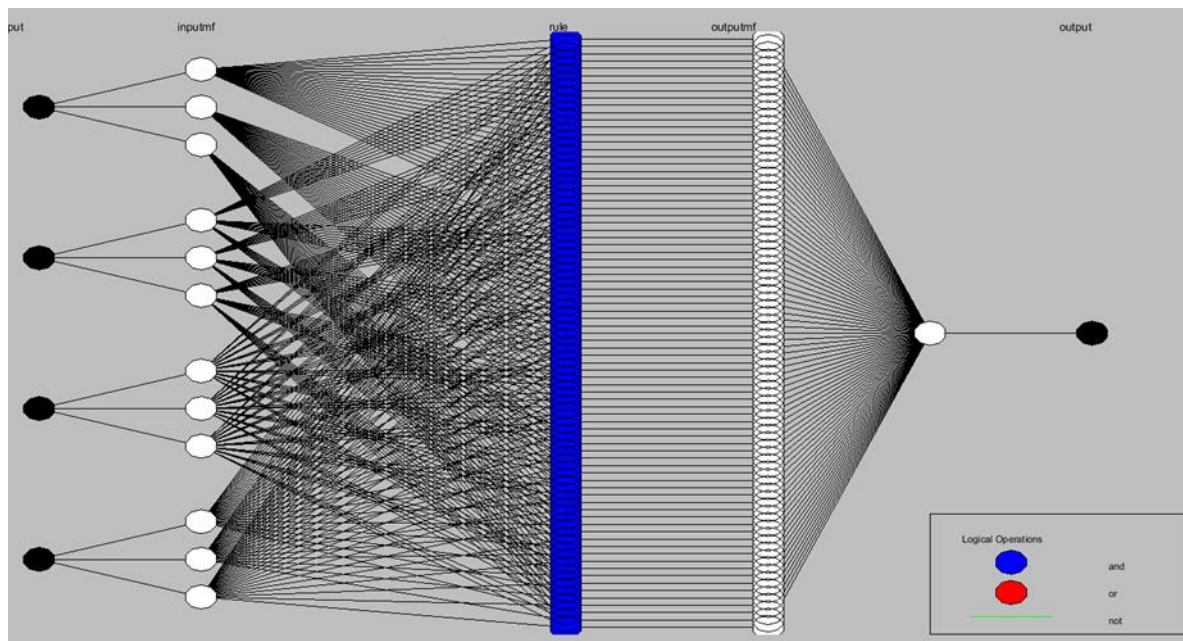
۲-۳- آزمایش‌های غوطه‌وری در کاتد و آند

آزمایش‌های شرایط عادی و غوطه‌وری در طیف گسترده‌ای از ورودی‌ها صورت گرفت. جریان الکتریکی از 0 تا 50 آمپر تغییر داده شد. دبی جرمی اکسیژن از $0/25$ [slpm] تا $1/5$ [slpm] و دبی جرمی هیدروژن از $0/34$ [slpm] تا 2 [slpm] تغییر داده شد. دمای توده پیل از 45 تا 60 درجه سانتی‌گراد تغییر یافت.

برای شبیه‌سازی غوطه‌وری، دمای توده‌ی پیل در مقایسه با گازهای ورودی پایین‌تر قرار داده شد. همچنین دمای گاز مرطوب ورودی به توده‌ی پیل هرچه بالاتر قرار گیرد، احتمال میعان آب افزایش یافته، توده‌ی پیل به سمت غوطه‌وری حرکت می‌کند. در کنار این شرایط، کارکرد در جریان‌های الکتریکی بالا نیز به‌نوبه‌ی خود شرایط را برای وقوع مصنوعی غوطه‌وری مهیا می‌سازد.

۲-۴- معماری مدل فازی-عصبی تطبیقی

یکی از روش‌های مدل‌سازی جعبه سیاه توابع غیرخطی پیچیده و آشوبناک که در عین سادگی و سرعت بالای محاسبه، نیاز زیادی به فهم دقیق فیزیک مسئله ندارد، مدل‌سازی به کمک روش فازی-عصبی تطبیقی



شکل ۳. ساختار شماتیک مدل فازی عصبی طراحی شده در نرم افزار MATLAB

Fig. 3. Schematic structure of designed Neuro-Fuzzy model in Matlab software

شود. برای انتخاب ورودی‌های مناسب می‌توان از آنالیز حساسیت خروجی‌ها به ورودی‌ها کمک گرفت. به این ترتیب برای مدل ولتاژ از خروجی‌های دبی هیدروژن و اکسیژن، جریان الکتریکی و دمای توده به عنوان ورودی‌های مؤثر استفاده شد. به همین ترتیب در مدل افت فشار کاتد، از دبی اکسیژن، دمای حباب تر ورودی کاتد، جریان الکتریکی و دمای توده به عنوان ورودی‌های مؤثر استفاده شده و برای مدل ت فشار آند نیز از دبی هیدروژن، دمای حباب تر هیدروژن، جریان الکتریکی و دمای توده به عنوان ورودی‌های مدل استفاده شده است. به طور خلاصه می‌توان نوشت:

$$V = \mathcal{U}(\text{H2_flow}, \text{O2_flow}, \text{I_stack}, \text{T_stack}) \quad (3)$$

$$\Delta P_{O_2} = \mathcal{V}(\text{O2_flow}, \text{T_wet_O2}, \text{I_stack}, \text{T_stack}) \quad (4)$$

$$\Delta P_{H_2} = \mathcal{W}(\text{H2_flow}, \text{T_wet_H2}, \text{I_stack}, \text{T_stack}) \quad (5)$$

داده شده، مربوط به فازی سازی ورودی‌ها است و در آن مقادیر $\mu_{A_i^l}(x_i)$ ها محاسبه می‌شود. در لایه سوم؛ که با دایره‌های آبی رنگ نشان داده شده است، قدرت آتش قوانین مختلف محاسبه می‌شود. در لایه چهارم که با دایره سفید رنگ نشان داده شده است، قدرت آتش هر قانون در خروجی Y^l متناظر همان قانون ضرب می‌شود و در نهایت در لایه پنجم که با یک دایره سفید رنگ مشاهده می‌شود، خروجی‌های لایه‌های چهارم با یکدیگر جمع شده، بر مجموع قدرت آتش همه قوانین تقسیم می‌شود و در نهایت خروجی مدل فازی-عصبی تطبیقی محاسبه می‌شود. علت استفاده از لفظ تطبیقی این است که برای بهینه‌سازی مدل و کم نمودن هرچه بیشتر خطای خروجی مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده، ضرایب C_1^l, \dots, C_n^l به صورت تطبیقی بهینه می‌شوند.

۲-۵- تشریح مدل

هدف مدل فازی-عصبی تطبیقی محاسبه سه خروجی در شرایط کارکرد سالم است. این سه خروجی عبارت‌اند از ولتاژ خروجی، افت فشار کاتد و افت فشار آند. برای یافتن مدل برای این سه خروجی، سه مدل مجزا ساخته شده است. در هر یک از این سه مدل، ورودی‌های مؤثری باید در نظر گرفته

جدول ۱. مشخصات سه مدل فازی-عصبی تطبیقی ارائه شده

Table 1. proposed Neuro-Fuzzy models specifications

تعداد قوانین فازی مدل (M)	متوسط خطای تخمین داده‌های آزمون	تعداد توابع عضویت فازی ورودی‌ها	بردار ورودی مدل‌ها	پارامتر خروجی مدل فازی-عصبی تطبیقی
۸۱	۰/۰۳۶ ولت	۳	$[H_2_flow, O_2_flow, I_stack, T_stack]^T$	V
۸۱	۰/۰۱۷ بار	۳	$[O_2_flow, T_wet_O_2, I_stack, T_stack]^T$	ΔP_{O_2}
۸۱	۰/۰۱۵ بار	۳	$[H_2_flow, T_wet_H_2, I_stack, T_stack]^T$	ΔP_{H_2}

ورودی‌های متناظر با این داده‌های خروجی در شکل ۵ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۵ مشاهده می‌شود به منظور تولید داده غنی برای طراحی مدل‌های فازی-عصبی، پارامترها در بازه وسیعی تغییر داده شدند؛ در نتیجه مدل‌هایی که طراحی می‌شوند قادر خواهند بود خروجی‌های موردنیاز را به‌خوبی در پیچیده‌ترین شرایط نیز تخمین بزنند.

۲-۶-۱- دقت اندازه‌گیری

برای سنجش دقت^۱ اندازه‌گیری فشار باید به دقت حسگر و کارت داده‌برداری توجه نمود و کمینه‌ی آن‌ها را به‌عنوان دقت اندازه‌گیری در نظر گرفت. دقت حسگر فشار برابر با 0/05. درصد از مقیاس کامل^۲ (2/5) (بار) یعنی برابر با 0/00125 بار است [۱۸]. ریزسنجی^۳ قرائت کارت داده‌برداری ۱۶ بیت می‌باشد که می‌توان از آن انتظار داشت مقیاس کامل (2/5 بار) را با ریزسنجی^۴ ۳۶ قسمت اندازه‌گیری کند که این ریزسنجی بسیار فراتر از دقت حسگر فشار است. همچنین دقت آن برابر با 0/1 درصد از مقیاس کامل است [۱۹]؛ که برای حسگر فشار این عدد برابر با 0/0025 بار می‌شود؛ لذا دقت مجموعه حسگر و کارت داده‌برداری برابر با کمینه دقت یعنی 0/0025 بار است؛ که دقت مطلوبی است.

دقت حسگرهای دما نیز که از نوع ترموکوپل نوع K منعطف هستند برابر با ۲/۲ درجه سانتی‌گراد است [۲۰]؛ که در گستره اندازه‌گیری صفر تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مطلوب ارزیابی می‌شود. از طرفی دقت کارت داده‌برداری همان‌گونه که ذکر شد برابر با درصد مقیاس کامل است؛ که معادل 0/1 درجه سانتی‌گراد است؛ لذا دقت اندازه‌گیری دما برابر کمینه دقت این دو عدد یعنی ۲/۲ درجه سانتی‌گراد است.

در روابط فوق U ، ν و ν معرف توابعی چند متغیره هستند که آرگومان‌های ورودی آن‌ها در پرانتز بعد از آن‌ها آمده است. برای توصیف هر یک از ورودی‌ها (متغیرهای کلامی)، باید تعدادی مجموعه فازی انتخاب نمود. برای مثال برای توصیف متغیر کلامی جریان الکتریکی می‌توان از سه مجموعه فازی صفر، متوسط و زیاد بهره برد و یا از ۴ مجموعه فازی صفر، کم، متوسط و زیاد استفاده نمود. به همین ترتیب می‌توان تعداد مجموعه‌های فازی توصیف‌کننده یک متغیر کلامی را کم و یا زیاد نمود. با زیاد کردن تعداد مجموعه‌های فازی توصیف‌کننده‌ی یک متغیر کلامی، مدل پیچیده‌تر شده، زمان موردنیاز برای محاسبه‌ی آن افزایش می‌یابد؛ ولی در عوض دقت مدل در تخمین نیز افزایش می‌یابد؛ اما این مسئله از جایی به بعد هرچند به کاهش بیشتر خطای مدل در داده‌های آموزش می‌انجامد، سبب کاهش قدرت تعمیم‌پذیری مدل برای داده‌های غیر آموزشی می‌شود.

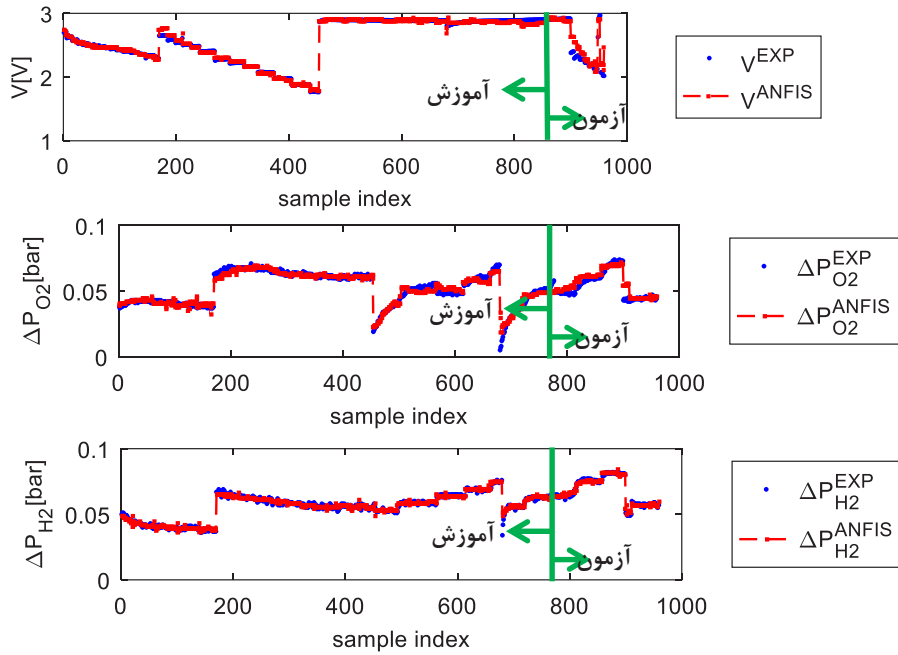
محاسبه و بهینه‌سازی توابع فازی-عصبی تطبیقی برای سه متغیر خروجی یادشده به کمک جعبه‌ابزار Neuro-Fuzzy Designer در نرم‌افزار MATLAB صورت پذیرفته است. در این مدل‌سازی برای هر ورودی سه تابع عضویت فازی در نظر گرفته شده است. در متغیرهای ورودی انتخابی و تعداد توابع فازی انتخابی برای آن‌ها قابل مشاهده است.

۲-۶-۲- جمع‌آوری داده و صحت سنجی مدل‌های فازی-عصبی تطبیقی

از میان داده‌های آزمایش به‌طور تصادفی ۷۰ درصد به منظور آموزش مدل فازی-عصبی تطبیقی و ۳۰ درصد به منظور آزمون دقت و تعمیم‌پذیری مدل فازی-عصبی تطبیقی انتخاب شدند.

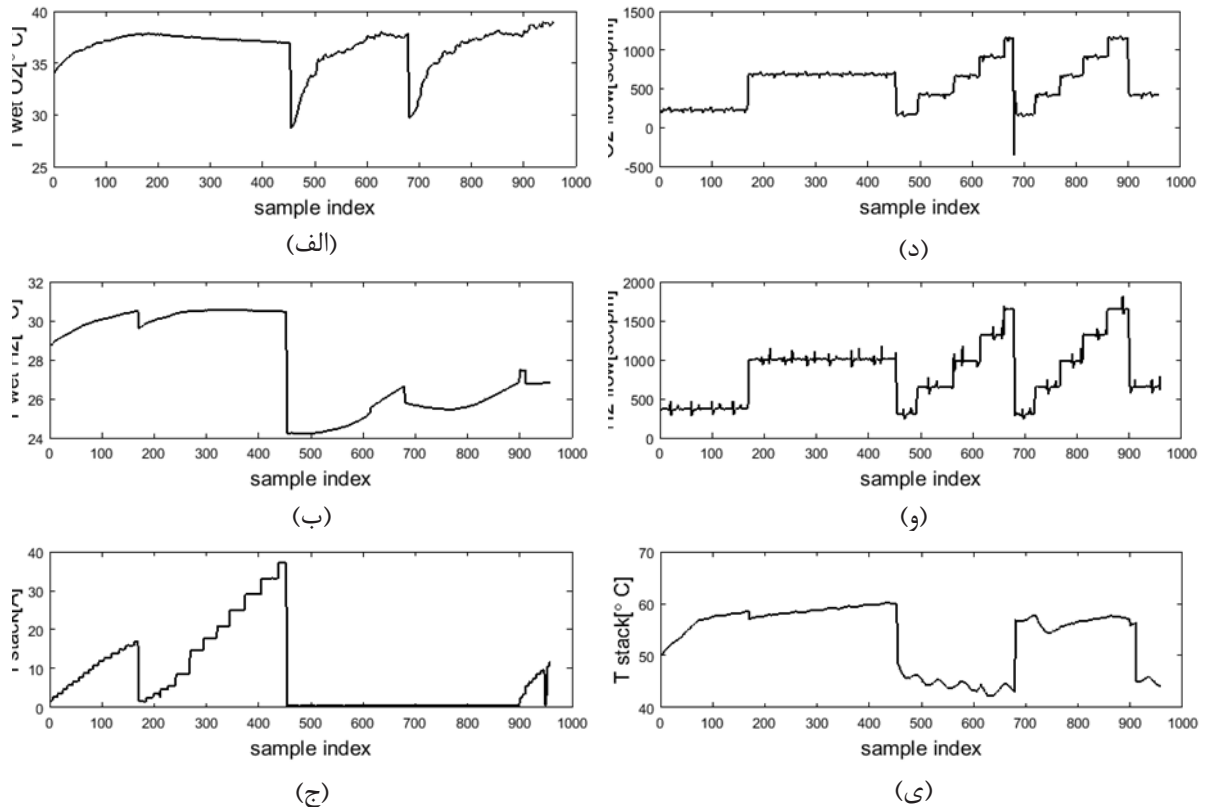
در نمودارهای شکل ۴ منحنی مدل فازی-عصبی تطبیقی محاسبه شده در کنار منحنی‌های خروجی واقعی سیستم با هم در سه پارامتر خروجی مقایسه می‌شوند. لازم به ذکر است، در این نمودارها داده‌های مربوط به آموزش مدل‌ها و داده‌های مربوط به آزمون آن‌ها، در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند.

- 1 Accuracy
- 2 Full Scale Range (FSR)
- 3 Resolution



شکل ۴. داده‌های خروجی واقعی (آبی‌رنگ) در کنار خروجی‌های تخمین توسط مدل فازی-عصبی تطبیقی (قرمز رنگ) در شرایط کارکرد عادی پارامترهای: الف) ولتاژ خروجی توده، ب) افت فشار کاتد و ج) افت فشار آنود.

Fig. 4. Real output data (blue colored) besides ANFIS approximated outputs (red colored) in normal condition in parameters: a) Stack voltage, b) Oxygen pressure drop and c) Hydrogen pressure drop.



شکل ۵. ورودی‌های مدل‌های فازی-عصبی تطبیقی جهت تخمین متغیرهای خروجی. منحنی الف) دمای اکسیژن مرطوب شده، ب) دمای هیدروژن مرطوب شده، ج) جریان الکتریکی توده، د) دبی جرمی گاز اکسیژن، و) دبی جرمی گاز هیدروژن، ی) دمای توده.

Fig. 5. ANFIS models' inputs for approximating outputs. plot a) Wet oxygen temperature, b) Wet hydrogen temperature, c) Stack electric current, d) Oxygen mass flow rate, e) Hydrogen mass flow rate and f) stack temperature.

۲-۷- عیب‌یابی بر اساس مدل فازی-عصبی تطبیقی

شاید بتوان باربیر [۲۱] را اولین کسی دانست که ارتباط پدیده غوطه‌وری را با افت فشار غیرمنتظره کانال معرفی کرد. او بر اساس قانون معروف دارسی افت فشار یک لوله مستقیم را به صورت زیر توف نمود.

$$\Delta P = f \frac{L \rho \bar{V}^2}{2D_H} \quad (6)$$

که در رابطه فوق f ضریب اصطکاک، L طول لوله مستقیم، \bar{V} سرعت سیال، ρ چگالی سیال و D_H قطر هیدرولیک کانال است. البته کانال پیل سوختی تفاوت‌هایی با یک لوله مستقیم یکنواخت دارد؛ اما رفتار افت فشار در آن بسیار شبیه به یک لوله مستقیم یکنواخت است. در رابطه (۶)، \bar{V} با دبی گاز متناسب است. ضریب اصطکاک f نیز در جریان آرام تابعیتی ساده از سرعت دارد و قطر هیدرولیک مقداری ثابت است. اما اگر کانال توسط قطرات آب مسدود شود، آنگاه این رابطه دستخوش تغییراتی غیرمنتظره خواهد شد. قطر هیدرولیک در برخی مقاطع کوچک شده، سرعت در آن مقاطع افزایش می‌یابد. این مسئله سبب افزایش افت فشار نسبت به حالتی می‌شود که موانع قطره‌ای در کانال وجود نداشت. به این ترتیب افت فشار غیرمنتظره کانال می‌تواند ملاکی از رخ دادن پدیده غوطه‌وری یا شکل‌گیری قطرات آب مایع در پیل، باشد.

مدل‌های فازی-عصبی تطبیقی برای کارکرد توده پیل در شرایط سالم که موانعی بر سر راه سیال در کانال‌ها وجود نداشته باشد، طراحی شده‌اند. حال برای استفاده از این مدل‌ها برای عیب‌یابی، سه پارامتر انحراف مقدار محاسبه‌شده‌ی فازی-عصبی تطبیقی با مقدار واقعی به شکل روابط (۷) تا (۹) تعریف می‌شود.

$$dV = V^{ANFIS} - V^{Exp} \quad (7)$$

$$\Delta d \Delta P_{O_2} = \Delta P_{O_2}^{EXP} - \Delta P_{O_2}^{ANFIS} \quad (8)$$

$$d \Delta P_{H_2} = \Delta P_{H_2}^{EXP} - \Delta P_{H_2}^{ANFIS} \quad (9)$$

در هر شرایط کارکرد افزایش پارامترهای خروجی معادلات (۷) تا (۹) از صفر به معنای ورود پیل به شرایط غیرعادی است. در شرایط وقوع غوطه‌وری در کاتد افت فشار کاتد از مقدار تخمینی مدل فازی-عصبی تطبیقی فراتر می‌رود و به عبارت دیگر سبب مثبت شدن پارامتر $d \Delta P_{O_2}$ می‌شود که در ادامه نیز به افت ولتاژ توده پیل نسبت به شیط سالم یا مثبت شدن پارامتر dV می‌انجامد. در غوطه‌وری آند نیز، همین اتفاق برای پارامتر $d \Delta P_{H_2}$ می‌افتد.

اما معیاری برای شناسایی انحراف جدی از مقدار تخمینی مدل باید تعیین گردد و اگر صرفاً با مثبت شدن پارامترهای dV ، $d \Delta P_{O_2}$ و $d \Delta P_{H_2}$ راجع به عیب توده‌ی پیل قضاوت شود، ممکن است قضاوت نادرستی به دلیل خطاهای اندازه‌گیری ایجاد گردد و پدیده چترینگ^۱ در قضاوت اتفاق افتاده، عیوب غوطه‌وری و شرایط کارکرد سالم پی‌درپی تشخیص داده شوند. به همین دلیل باید برای هر یک از پارامترهای مزبور یک محدوده قابل قبول تعیین شود؛ که قرارگیری پارامترهای فوق در این محدوده به منزله‌ی صحت عملکرد قلمداد گردد. برای این کار ابتدا منحنی سه پارامتر dV ، $d \Delta P_{O_2}$ و $d \Delta P_{H_2}$ در شرایط کارکرد سالم برای تمامی داده‌های آموزش و آزمون (نشان داده‌شده در شکل ۴)، ترسیم می‌شود. سپس با استفاده از این نمودارها پارامترهای میانگین و انحراف از معیار برای سه منحنی تعیین می‌شود. حال با استفاده از روابط (۱۰) تا (۱۲) محدوده مجاز برای سه پارامتر تعیین می‌گردد [۲۲].

$$dV_{TH} = \max(|\overline{dV}| + 3\sigma(dV)) \quad (10)$$

$$d \Delta P_{O_2TH} = \max(|\overline{d \Delta P_{O_2}}| + 3\sigma(d \Delta P_{O_2})) \quad (11)$$

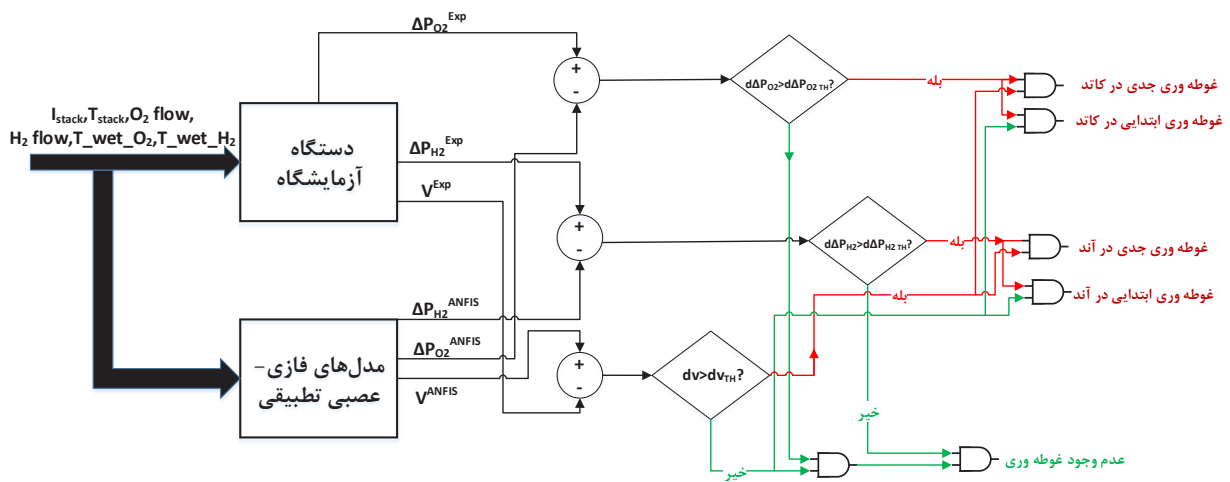
$$d \Delta P_{H_2TH} = \max(|\overline{d \Delta P_{H_2}}| + 3\sigma(d \Delta P_{H_2})) \quad (12)$$

در روابط (۱۰) تا (۱۲) عدد ۳ به صورت تجربی تعیین شده است و به این دلیل در نظر گرفته شده که خطاهای اندازه‌گیری می‌تواند یک شرایط سالم را معیوب نشان دهد. مقادیر مجاز انحراف که از روابط (۱۰) تا (۱۲) محاسبه می‌شوند در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. مقادیر مجاز پارامترهای انحراف

Table 2. Deviation thresholds values

مقدار	پارامتر
ولت ۰/۰۷۳۵	dV_{TH}
بار ۰/۰۰۹۲	$d\Delta P_{O_2 TH}$
بار ۰/۰۰۴۷	$d\Delta P_{H_2 TH}$



شکل ۶. فلوجارت تشخیص غوطه‌وری و درجه شدت و مکان آن

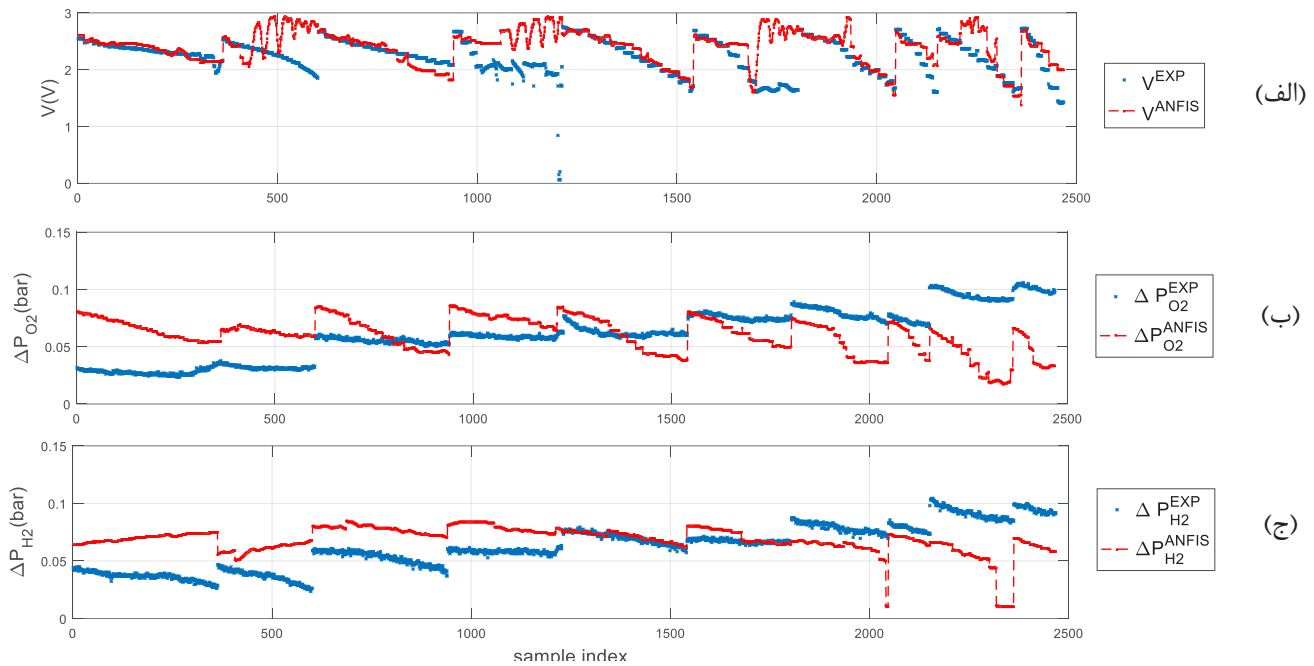
Fig. 6. Diagnosis flowchart for flooding, its severity and its location

تطبیقی از شرایط کارکرد ایده‌آل، در نمودارهای شکل ۷ مشاهده می‌شود. حال با استفاده از روش ذکر شده برای عیب‌یابی در بخش ۷-۲، باید پارامترهای انحراف از مدل محاسبه و با مقادیر مجاز مقایسه شوند. در شکل ۸، این مقایسه صورت گرفته و وضعیت کارکرد توده پیل مشخص شده است. با توجه به مطالب پیش‌گفته و نمودار شکل ۸ می‌توان گفت؛ که در نواحی مشخص شده با مستطیل‌های قرمز رنگ، عیب غوطه‌وری کاتد، رخ داده است و در نواحی مشخص شده با مستطیل سبزرنگ، پدیده غوطه‌وری در توده پیل رخ نداده است. همچنین نواحی مشخص شده با مستطیل قرمز خط‌چین معرف وقوع پدیده غوطه‌وری در آنند هستند. با در نظر گرفتن فلوجارت معرفی شده در شکل ۶ خلاصه وضعیت نواحی یازده‌گانه مشخص شده را نشان می‌دهد.

مطالب گفته‌شده در این بخش را می‌توان در فلوجارت شکل ۶ مشاهده نمود.

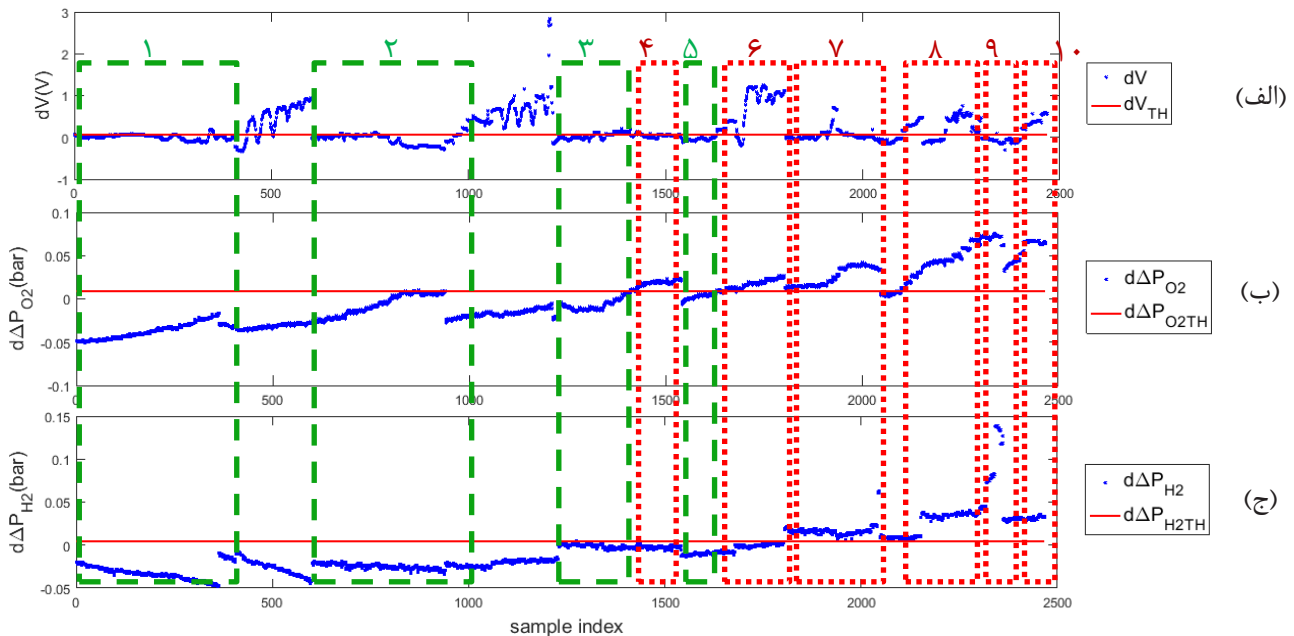
۲-۸ نتایج

پس از آموزش سه مدل فازی-عصبی تطبیقی برای تخمین توابع خروجی ولتاژ توده پیل، افت فشار کاتد و افت فشار آنود، با استفاده از داده‌های شرایط کارکرد سالم، حال آزمایش‌ها در گستره وسیعی از دمای توده‌ی پیل و دبی‌های مختلف واکنش‌دهنده‌ها تکرار شد و در برخی از آزمایش‌ها، غوطه‌وری به‌صورت مصنوعی با ایجاد شرایط معرفی شده در بخش ۳-۲، اتفاق افتاد. این بار توسط مدل‌های فازی-عصبی تطبیقی طراحی شده، تلاش شد عیوب غوطه‌وری احتمالی رخ داده در این آزمایش شناسایی شوند. منحنی خروجی این آزمایش‌ها در کنار مقادیر تخمین توسط مدل‌های فازی-عصبی



شکل ۷. داده‌های آزمون در شرایط نامشخص (منحنی آبی‌رنگ) در کنار خروجی‌های تخمین توسط مدل‌های فازی-عصبی تطبیقی در شرایط کارکرد سالم (منحنی قرمز رنگ) برای پارامترهای: الف) ولتاژ خروجی توده. ب) افت فشار کاتد. ج) افت فشار آنود.

Fig. 7. Unknown condition real data (blue-colored curves) besides ANFIS approximated values in normal condition (red-colored curves) for parameters: a) Stack voltage, b) Oxygen pressure drop and c) Hydrogen pressure drop.



شکل ۸. نمودار پارامترهای انحراف خروجی‌ها از مقادیر تخمین فازی-عصبی تطبیقی در مقایسه با مقادیر مجاز انحراف در پارامترهای الف) ولتاژ، ب) افت فشار کاتد و ج) افت فشار آنود.

Fig. 8. Deviation parameters of outputs from ANFIS predicted values in comparison with deviation thresholds for parameters: a) Voltage, b) Cathode pressure drop and c) Anode pressure drop.

قاعدتاً مربوط به عیب دیگری، به جز غوطه‌وری در توده پیل هستند؛ که در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

در شکل ۸ برخی از نواحی وجود دارند که با وجود رخ دادن افت ولتاژ (بزرگ‌تر از حد مجاز بودن پارامتر انحراف ولتاژ)، افت فشار همچنان کوچک‌تر از حد مجاز است. این نواحی که در فلوجارت شکل ۶ نیز تفسیر نشده‌اند،

جدول ۳. وضعیت محدوده‌های مختلف کاری از منظر عیب غوطه‌وری

Table 3. Status of different work regions from the perspective of flooding defect

شماره محدوده	وضعیت
۱	سالم
۲	سالم
۳	سالم
۴	غوطه‌وری ابتدایی در کاتد
۵	سالم
۶	غوطه‌وری جدی در کاتد
۷	غوطه‌وری ابتدایی در کاتد و آند
۸	غوطه‌وری جدی در کاتد و آند
۹	غوطه‌وری ابتدایی در کاتد و آند
۱۰	غوطه‌وری جدی در کاتد و آند

۳- نتیجه‌گیری

می‌توان در وهله اول وقوع پدیده‌ی غوطه‌وری در کاتد و آند و میزان شدت آن را کشف نمود و در مراحل آتی پژوهش، می‌توان واکنشی جهت مدیریت میزان آب در توده پیل نشان داد؛ تا توده پیل در هنگام کار وارد رژیم معیوب نشود و از این طریق عمر توده پیل را می‌توان به میزان چشمگیری افزایش داد. در تحقیق آتی عیب‌یابی پدیده خشکی غشا موردتوجه قرار خواهد گرفت و راهکارهایی برای کشف آن ارائه می‌شود.

در این مقاله بر روی عیب‌یابی پیل سوختی غشا پلیمری در عیب بسیار رایج غوطه‌وری تمرکز بوده است. در اغلب کارهای گذشته تنها به کاتد به عنوان مکان محتمل بروز پدیده غوطه‌وری توجه شده بود. در این مقاله با توجه به پدیده نفوذ معکوس به آند نیز به عنوان مکان محتمل بروز پدیده غوطه‌وری توجه شده است. روش عنوان‌شده، تخمین توابع خروجی ولتاژ پیل، افت فشار کانال کاتد و افت فشار کانال آند در شرایط ایده‌آل با کمک توابع فازی-عصبی تطبیقی و مقایسه آن‌ها با حالت فعلی بوده است. برای این کار از متغیرهایی به عنوان ورودی توابع فازی-عصبی تطبیقی استفاده شده است که اندازه‌گیری آن‌ها ساده است. این متغیرها عبارت‌اند از: دبی جرمی اکسیژن و هیدروژن، دمای هیدروژن و اکسیژن تر شده، جریان الکتریکی و دمای توده‌ی پیل. با در اختیار داشتن این سه مدل و مقادیر مجاز انحراف از مدل، به‌سادگی با یک سخت‌افزار حداقلی مانند پردازشگرهای ARM،

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانیم از مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری تشکر نماییم؛ که با پشتیبانی مالی خود امکان تجهیز و به‌روزرسانی آزمایشگاه پیل سوختی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر را فراهم نموده در ارتقای سطح کیفی این پژوهش نقش به‌سزایی ایفا نمودند.

منابع

- [1] H.Q. Nguyen, B. Shabani, Proton exchange membrane fuel cells heat recovery opportunities for combined heating/cooling and power applications, *Energy Conversion and Management*, 204 (2020) 112328.
- [2] A. Benmouna, M. Becherif, D. Depernet, F. Gustin, ScienceDirect Fault diagnosis methods for Proton Exchange Membrane Fuel Cell system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (2016) 1534-1543.
- [3] M. Hasheminasab, M.J. Kermani, S.S. Nourazar, M.H. Khodsiani, A novel experimental based statistical study for water management in proton exchange membrane fuel cells, *Applied Energy*, 264 (2020) 114713.
- [4] V. Hirpara, V. Patel, Y. Zhang, R. Anderson, N. Zhu, L. Zhang, Investigating the effect of operating temperature on dynamic behavior of droplets for proton exchange membrane fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (2020) 14145-14155.
- [5] N. Ibrahim-Rassoul, E.K. Si-Ahmed, A. Serir, A. Kessi, J. Legrand, N. Djilali, Investigation of two-phase flow in a hydrophobic fuel-cell micro-channel, *Energies*, 12 (2019) 1-32.
- [6] Z. Zheng, R. Petrone, M.C. Pera, D. Hissel, M. Becherif, C. Pianese, Diagnosis of a Commercial PEM Fuel Cell Stack via Incomplete Spectra and Fuzzy Clustering, in: *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference) 2013*, pp. 1595-1600.
- [7] M. Benne, B. Grondin-perez, M. Bessa, Polymer electrolyte membrane fuel cell fault diagnosis based on empirical mode decomposition, *Journal of Power Sources*, 299 (2015) 596-603.
- [8] M. Bressel, M. Hilairet, D. Hissel, B. Ould Bouamama, Extended Kalman Filter for prognostic of Proton Exchange Membrane Fuel Cell, *Applied Energy*, 164 (2016) 220-227.
- [9] W. Caisheng, M.H. Nehrir, S.R. Shaw, Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits, *IEEE Transactions on ENERGY CONVERSION*, 20 (2005) 442-451.

فهرست علائم

علائم انگلیسی	
f	مقدار خروجی مدل فازی-عصبی تطبیقی
x_i	متغیر ورودی i ام
A_i^l	متغیر کلامی i ام در قانون فازی l ام
μ_i^l	تابع عضویت A_i^l
C_i^l	ضریب i ام از خروجی قانون l ام
ω^l	قدرت آتش قانون l ام
E	خطای تخمین مدل فازی-عصبی تطبیقی
dx	انحراف پارامتر X از مقدار تخمین توسط مدل فازی-عصبی تطبیقی
I	جریان توده پیل (آمپر)
$flow$	دبی جرمی (sccpm)
$T_{wet_O_2}$	دمای اکسیژن مرطوب ورودی به توده پیل (درجه سانتی‌گراد)
$T_{wet_H_2}$	دمای هیدروژن مرطوب ورودی به توده پیل (درجه سانتی‌گراد)
T_{stack}	دمای توده پیل (درجه سانتی‌گراد)
L	طول لوله مستقیم (متر)
D_H	قطر هیدرولیک کانال (متر)
\bar{V}	سرعت سیال (متر بر ثانیه)
\bar{x}	میانگین پارامتر X
علائم یونانی	
ΔP	افت فشار کانال (بار)
ρ	چگالی سیال (کیلوگرم بر متر مکعب)
$\sigma(x)$	انحراف معیار پارامتر X
زیرنویس	
O_2	اکسیژن
H_2	هیدروژن
TH	حد مجاز
بالانویس	
Exp	مقدار واقعی حاصل از آزمایش
$ANFIS$	مقدار تخمین توسط مدل فازی-عصبی تطبیقی

- [16] D. Karaboga, E. Kaya, Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches : a comprehensive survey, *Artificial Intelligence Review*, 52 (2019) 2263-2293.
- [17] J.-s.R. Jang, ANFIS: Adaptive- Network-Based Fuzzy Inference System, *IEEE TRANSACTION ON SYSTEMS*, 23 (1993) 665-685.
- [18] BD sensors datasheet, in, BD Sensors, https://www.bdsensors.de/fileadmin/user_upload/Download/Prospekte/bds_TK_Digitalmanometer_EN_web.pdf, pp. 40.
- [19] ICP-DAS M7017-Z datasheet, in, https://www.icpdas.com/web/product/download/io_and_unit/rs-485/document/data_sheet/I-7017Z_M-7017Z_en.pdf, pp. 2.
- [20] in, <https://www.thermocoupleinfo.com/thermocouple-accuracies.htm>.
- [21] F. Barbir, Relationship between pressure drop and cell resistance as a diagnostic tool for PEM fuel cells, *Journal of Power Sources*, 141 (2005) 96-101.
- [22] N.Y. Steiner, D. Candusso, D. Hissel, P. Moc, Model-based diagnosis for proton exchange membrane fuel cells, *Mathematics and Computers in Simulation*, 81 (2010) 158-170.
- [10] S.V. Puranik, A. Keyhani, F. Khorrami, State-space modeling of proton exchange membrane fuel cell, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25 (2010) 804-813.
- [11] N. Fouquet, C. Doulet, C. Nouillant, G. Dauphin-tanguy, B. Ould-bouamama, Model based PEM fuel cell state-of-health monitoring via ac impedance measurements, *Journal of Power Sources*, 159 (2006) 905-913.
- [12] J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, H. Peng, A. Arbor, Control of Fuel Cell Breathing: Initial Results on the Oxygen Starvation Problem, *Fuel Cell*, 1 (2003) 1-25.
- [13] S.M. Rakhtala, A.R. Noei, R. Ghaderi, E. Usai, Control of oxygen excess ratio in a PEM fuel cell system using high-order sliding-mode controller and observer, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 23 (2015) 255-278.
- [14] L. Mao, L. Jackson, T. Jackson, Investigation of polymer electrolyte membrane fuel cell internal behaviour during long term operation and its use in prognostics, *Journal of Power Sources*, 362 (2017) 39-49.
- [15] K.J. Reddy, N. Sudhakar, ScienceDirect ANFIS-MPPT control algorithm for a PEMFC system used in electric vehicle applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (2019) 15355-15369.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Khanafari, A. Alasty, M. J. Kermani, S. Asghari, *Experimental Cathode-Anode Flooding Diagnosis of Polymer-Electrolyte Fuel Cell of Power under 300W Using Adaptive-Neuro-Fuzzy Method*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(3) (2022) 615-628.

DOI: 10.22060/mej.2021.20293.7207



