



The University of Tehran Press

Detection of Dehydration and Flooding Phenomena in Proton Exchange Membrane Fuel Cells Based on Multi-Valued Fuzzy Logic

Pezhman Bayat^{1*} | Peyman Bayat²

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran. Email: pezhman.bayat@hut.ac.ir

2. Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran. Email: peyman.bayat@hut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Paper

Article History:

Received: 12 December 2025

Revised: 29 December 2025

Accepted: 25 February 2026

Published Online: 22 June 2026

Keywords:

Dehydration Phenomena,

Flooding Phenomena,

Proton Exchange Membrane Fuel Cells,

Electrochemical Impedance Spectroscopy,

Multi-Valued Fuzzy Logic.

ABSTRACT

Proton exchange membrane fuel cells are considered one of the most important options for clean energy production in the automotive industry, but their performance is strongly influenced by water management within the system. In this study, a novel approach for detecting and diagnosing the water balance state in a fuel cell is presented, based on the combination of multi-valued fuzzy logic and geometric parameters of electrochemical impedance spectroscopy. Multi-valued fuzzy logic enables modeling of intermediate and boundary conditions between dehydration, normal, and flooding states. Geometric analysis of impedance spectra extracts three key parameters: ohmic resistance, the diffusion semicircle radius, and the real component of its center, which are used as inputs to a fuzzy system with 640 rules. Simulation results in MATLAB software on 50 operational states (including 9 normal, 15 dehydration, and 26 flooding states) show that the proposed method can diagnose the fault type with an overall accuracy of 98% and estimate the severity of phenomena with a mean absolute error of 1.45%. The mean severity errors are 0.17% for normal state, 2.1% for dehydration state, and 1.7% for flooding state. Compared to conventional methods such as long short-term memory recurrent neural network with 94% accuracy, deep convolutional neural network with 90% accuracy, and type-1 fuzzy logic with 80% accuracy, this method demonstrates significant superiority and can be employed as an efficient tool for online monitoring and improving the reliability of fuel cells. This achievement can pave the way for the development of intelligent control systems and extend the operational life of fuel cells in industrial and transportation applications.

Cite this article: Bayat, P. & Bayat, P. (2026). Detection of Dehydration and Flooding Phenomena in Proton Exchange Membrane Fuel Cells Based on Multi-Valued Fuzzy Logic. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (3), 473-501. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.409883.1209>



© Pezhman Bayat, Peyman Bayat

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.409883.1209>

Introduction

Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) are among the most promising technologies for clean energy generation, particularly in automotive and backup power applications. However, their performance is critically dependent on precise water management within the cell. Insufficient membrane hydration leads to dehydration, increasing ionic resistance and causing voltage and power loss. Conversely, excessive water accumulation at the cathode results in flooding, blocking gas transport pathways and limiting oxygen access, which also degrades performance. Effective, real-time diagnosis of these opposing faults is essential for developing intelligent control systems, enhancing reliability, and accelerating the commercialization of PEMFCs.

Materials and Methods

This study proposes a novel, integrated diagnostic framework that synergistically combines multi-valued fuzzy logic (MVFL) with key geometric parameters extracted from electrochemical impedance spectroscopy (EIS) Nyquist plots. The method eliminates the need for complex equivalent circuit model (ECM) fitting. Instead, three sensitive geometric indicators are directly derived from the EIS spectra: the ohmic resistance (R_0), indicative of membrane dehydration; the radius of the low-frequency diffusion arc (r), associated with flooding severity; and the real component of this arc's center (C_{real}), reflecting combined effects. These parameters serve as crisp inputs to a designed MVFL inference system. The MVFL system, employing Gaussian and Generalized Bell membership functions, models the continuous spectrum between normal, dehydration, and flooding states using a rule base of 640 intelligently constructed fuzzy rules. This approach provides superior modeling of intermediate and boundary conditions compared to classical Type-1 fuzzy systems, while maintaining lower computational complexity than Type-2 systems.

Results

The proposed hybrid diagnostic system was rigorously validated using a comprehensive dataset of 50 simulated operational states from a detailed PEMFC model, encompassing normal operation, various degrees of dehydration, and flooding. The system demonstrated exceptional performance, achieving an overall fault diagnosis accuracy of 98%. It precisely distinguished between dehydration, flooding, and normal conditions, as confirmed by a clear confusion matrix. Quantitatively, the system accurately estimated the severity (percentage) of each fault type. The mean absolute error for severity estimation was 1.45%, with errors tightly distributed: ~0.17% for normal states, ~2.1% for dehydration, and ~1.7% for flooding cases. The three-dimensional response surfaces of the MVFL system revealed smooth, continuous, and logical mappings from the input parameter space to the output fault severities, demonstrating the system's stability and its ability to handle complex, nonlinear interactions between the inputs.

Discussion and Conclusion

The integrated MVFL-EIS approach successfully addresses key research gaps identified in the literature. It moves beyond binary fault detection to enable precise identification of intermediate and concurrent fault states (e.g., mild dehydration with partial flooding). The method offers an optimal balance between high diagnostic accuracy (98%), computational efficiency (bypassing ECM fitting), and interpretability (through a transparent fuzzy rule base). The strong correlation between the extracted geometric EIS parameters and the physical phenomena of dehydration and flooding provides a solid foundation for the system's decisions. This diagnostic framework shows high potential for implementation in real-time online monitoring and control systems for PEMFCs. By enabling early and accurate fault detection, it paves the way for enhanced operational reliability, extended cell lifetime, and accelerated adoption of PEMFC technology in industrial and transportation applications. Future work will focus on experimental validation with real-time data and integration of this diagnostic module into an adaptive control strategy.



تشخیص پدیده خشکی و طغیان در پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون مبتنی بر منطق فازی چند ارزشی

پژمان بیات^{۱*} | پیمان بیات^۲

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران. رایانامه: pezhman.bayat@hut.ac.ir

۲. استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران. رایانامه: peyman.bayat@hut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه:

پدیده خشکی،

پدیده طغیان،

پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون،

طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی،

منطق فازی چند ارزشی.

پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون به عنوان یکی از گزینه‌های مهم برای تولید انرژی پاک در صنایع خودروسازی مطرح هستند، اما عملکرد آن‌ها به شدت تحت تأثیر مدیریت آب درون سامانه قرار دارد. در این پژوهش رویکردی نوین برای تشخیص و آشکارسازی وضعیت تعادل آب در پیل سوختی ارائه شده که بر پایه ترکیب منطق فازی چند ارزشی و پارامترهای هندسی طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بنا شده است. منطق فازی چند ارزشی امکان مدل‌سازی شرایط میانی و مرزی میان حالت‌های خشکی، نرمال و طغیان را فراهم می‌آورد. تحلیل هندسی طیف‌های امپدانس، سه پارامتر کلیدی مقاومت اهمی، شعاع نیم‌دایره نفوذ و مؤلفه حقیقی مرکز آن را استخراج کرده و به عنوان ورودی سیستم فازی با ۶۴۰ قانون مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب روی ۵۰ حالت عملیاتی (شامل ۹ حالت نرمال، ۱۵ حالت خشکی و ۲۶ حالت طغیان) نشان می‌دهد روش پیشنهادی با دقت کلی ۹۸ درصد قادر به تشخیص نوع خطا است و شدت پدیده‌ها را با میانگین خطای مطلق ۱/۴۵ درصد تخمین می‌زند. میانگین خطای شدت برای حالت نرمال ۰/۱۷ درصد، خشکی ۲/۱ درصد و طغیان ۱/۷ درصد به دست آمده است. این روش در مقایسه با روش‌های مرسوم نظیر شبکه عصبی بازگشتی حافظه بلند - کوتاه مدت با دقت ۹۴ درصد، شبکه عصبی کانولوشنی عمیق با دقت ۹۰ درصد و منطق فازی نوع-۱ با دقت ۸۰ درصد، برتری چشمگیری داشته و به عنوان ابزاری کارآمد برای پایش آنلاین و بهبود قابلیت اطمینان پیل‌های سوختی قابل به کارگیری است. این دستاورد می‌تواند زمینه‌ساز توسعه سامانه‌های هوشمند کنترل و افزایش عمر مفید پیل‌های سوختی در کاربردهای صنعتی و حمل‌ونقل باشد.

استناد: بیات، پژمان و بیات، پیمان (۱۴۰۵). تشخیص پدیده خشکی و طغیان در پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون مبتنی بر منطق فازی چند ارزشی. فصلنامه

سیستم‌های انرژی پایدار، ۵ (۳) ۴۷۳-۵۰۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.409883.1209>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© پژمان بیات، پیمان بیات

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.409883.1209>



جدول اختصارات

شرح فارسی	اختصارات	شرح فارسی	اختصارات
فیلتر کالمن توسعه‌یافته	EKF	پیل سوختی غشای تبادل پروتون	PEMFC
الگوریتم ژنتیک بهینه‌شده با پس‌انتشار خطا	GA-BP	غشای تبادل پروتون	PEM
تشدید پلاسمون سطحی	SPR	مجموعه الکتروود غشایی	MEA
تابع توزیع تجمعی	CDF	لایه نفوذ گازی	GDL
دینامیک سیالات محاسباتی	CFD	طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی	EIS
کاهش مرتبه مدل	MOR	منطق فازی چند ارزشی	MVFL
مقاومت‌سنجی الکتریکی	ERT	مدل مدار معادل	ECM
سیستم فازی نوع-۲ فاصله‌ای	IT2FS	عنصر فاز ثابت	CPE
جریان مستقیم	DC	شبکه عصبی کانولوشنی	CNN
جریان متناوب	AC	حافظه بلند - کوتاه مدت	LSTM
خوشه‌بندی-k میانگین	k-means	تابع پایه شعاعی	RBF
جنگل تصادفی	RF	توزیع زمان‌های استراحت	DRT
تحلیل مؤلفه‌های اصلی	PCA	سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی	ANFIS

جدول نمادها و پارامترها

شرح فارسی	پارامترهای مدار نفوذ	شرح فارسی	پارامترهای اصلی
ظرفیت خازنی مدار نفوذ	C_M	مقاومت اهمی (مقاومت سری)	R_0
مقاومت نفوذ اولیه	$R_{1,M}$	امپدانس کل پیل تابعی از فرکانس زاویه‌ای	$Z_{total}(\omega)$
مقاومت نفوذ ثانویه (سری یا سلف)	$R_{2,M}$	امپدانس‌های زیرمدارهای آند، کاتد و نفوذ	Z_A, Z_C, Z_D
اندوکتانس مدار نفوذ	L_M	فرکانس زاویه‌ای	ω
امپدانس شاخه $R_{2,M} + L_M$	Z_{RL}	فرکانس	f
مقاومت حداقل نفوذ	$R_{\beta}^{(D)}$	بخش حقیقی و موهومی امپدانس کل	$X(\omega), Y(\omega)$
نقطه برخورد فرکانس بالای نیم‌دایره نفوذ روی محور حقیقی	$R_{HF}^{(D)}$	اندازه امپدانس کل	$ Z_{total}(\omega) $
نقطه برخورد فرکانس پایین (سمت چپ) نیم‌دایره نفوذ	$R_{LF}^{(D)}$	زاویه فاز امپدانس کل	$\angle Z_{total}(\omega)$
بخش حقیقی Z_D	$R_{D,r}$	پارامترهای مدار معادل آند	پارامترهای مدار معادل آند
بخش موهومی Z_D	$R_{D,i}$	مقاومت انتقال بار آند	R_A
شرح فارسی	شاخص‌های هندسی از EIS	ضریب CPE لایه دوگانه آند	Q_A
شعاع نیم‌دایره نفوذ فرکانس پایین	r	نمای پراکندگی CPE آند	α_A
مؤلفه حقیقی مرکز نیم‌دایره نفوذ	C یا C_{real}	بخش حقیقی Z_A	$R_{A,r}$
نقاط انتهایی نیم‌دایره نفوذ	$R_{LF}^{(D)}, R_{HF}^{(D)}$	بخش موهومی Z_A	$R_{A,i}$
شرح فارسی	متغیرهای منطق فازی چندارزشی	شرح فارسی	پارامترهای مدار معادل کاتد
درصد شدت پدیده خشکی	$F_{Dehydration}$	مقاومت سری در شاخه کاتد	$R_{1,C}$
درصد شدت پدیده طغیان	$F_{Flooding}$	مقاومت موازی با C_C در کاتد	$R_{2,C}$
مجموعه مقادیر صدق در منطق فازی چندارزشی	$T = t_1, t_2, \dots, t_n$	ظرفیت خازنی شاخه کاتد	C_C
تابع عضویت گوسی	$\mu_{Gauss}(x; c, \sigma)$	ضریب CPE لایه دوگانه کاتد	Q_C
تابع عضویت زنگوله‌تعمیم‌یافته	$\mu_{Gbell}(x; a, b, c)$	نمای پراکندگی CPE کاتد	α_C
پارامترهای توابع عضویت (مرکز، پهنا، شیب و ...)	c, σ, a, b	امپدانس شاخه سری - موازی کاتد	$Z_{branch,C}$
درجه عضویت متغیرهای ورودی	$\mu_{RO}^{(i)}, \mu_C^{(j)}, \mu_r^{(k)}$	بخش حقیقی $Z_{branch,C}$	$R_{br,r}$
درجه فعال‌سازی قاعده فازی	$\alpha_{i,j,k}$	بخش موهومی $Z_{branch,C}$	$R_{br,i}$
اندیس‌های توابع عضویت خروجی برای خشکی و طغیان	$l_{i,j,k}, m_{i,j,k}$	پارامترهای میانی	A_C, B_C
توابع عضویت خروجی تجمیع‌شده	$\mu_{agg,Dehydration}, \mu_{agg,Flooding}$	پارامترهای میانی ادمیتانس کل کاتد	M_C, N_C
تعداد توابع عضویت ورودی‌ها	N_{RO}, N_C, N_r	بخش حقیقی Z_C	$R_{C,r}$
نگاشت کلی از پارامترهای EIS به شدت خطاها	$\mathcal{M}: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$	بخش موهومی Z_C	$R_{C,i}$

۱. مقدمه

پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون (PEMFC)^۱ به عنوان یکی از فناوری‌های امیدبخش در عرصه تولید انرژی پاک و پایدار، به‌ویژه در کاربردهای حیاتی مانند خودروهای برقی و سیستم‌های نیروی پشتیبان، شناخته می‌شوند. این جایگاه رفیع مرهون مزایای متعددی از جمله بازدهی بالا، چگالی توان قابل توجه، دمای کارکرد پایین و انتشار صفر آلاینده‌ها است [۱]. با این وجود، گسترش تجاری این فناوری در گرو غلبه بر چالش‌های عملیاتی متعددی است که از جمله حیاتی‌ترین آن‌ها می‌توان به مدیریت بهینه آب درون‌ساختار پیل اشاره کرد. تعادل آب‌پوشی غشا در PEMFC یک تناقض مهندسی ظریف است؛ از یک سو، غشای نافون برای حفظ هدایت یونی بالا نیازمند هیدراته ماندن مستمر است و خشکی^۲ موجب افزایش مقاومت یونی، افت شدید ولتاژ و در موارد شدید، آسیب‌های فیزیکی غیرقابل بازگشت به غشا می‌شود [۲]. از سوی دیگر، تولید آب به عنوان محصول واکنش در کاتد، اگر به‌درستی مدیریت نشود، به تجمع بیش از حد آن در منافذ لایه‌های نفوذگازی (GDL)^۳ و کانال‌های واکنش‌گر منجر می‌شود. این پدیده که به طغیان^۴ معروف است، مسیرهای انتقال گاز را مسدود می‌کند و با محدود کردن دسترسی کاتالیست به اکسیژن، سبب افت عملکرد و ناپایداری می‌شود [۳]. هر دو پدیده خشکی و طغیان نه تنها عملکرد لحظه‌ای پیل را مختل می‌کنند، بلکه استرس‌های مکانیکی و حرارتی ناشی از آن‌ها به تسریع فرسایش و کاهش چشمگیر عمر عملیاتی پیل می‌انجامد [۴]. بنابراین، توسعه راهکارهای تشخیصی دقیق، سریع و غیرتهاجمی برای پایش بلادرنگ وضعیت آب و شناسایی به موقع این دو عیب متضاد، نه تنها یک ضرورت فنی، بلکه یک پیش‌نیاز اساسی برای توسعه سیستم‌های کنترلی هوشمند، افزایش قابلیت اطمینان و در نهایت، تسریع در تجاری‌سازی PEMFCها به شمار می‌رود.

۱-۱. مرور ادبیات

در سال‌های اخیر، گستره وسیعی از راهکارهای تشخیصی با تکیه بر مبانی مختلف نظری و تجربی ارائه شده‌اند که مرور نظام‌مند آن‌ها نه تنها سیر تکامل این حوزه پژوهشی را نمایان می‌سازد، بلکه شکاف‌های موجود را نیز عیان می‌کند. روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی پیشرفته همچنان به عنوان ابزاری توانمند برای درک عمیق مکانیزم‌های درونی پیل مورد توجه پژوهشگران قرار دارند. برای نمونه، محققان در [۱] یک مدل دینامیکی چندمقیاسی مبتنی بر تابع توزیع تجمعی (CDF)^۵ را توسعه دادند که توزیع رطوبت را در مقیاس میکروسکوپی درون ساختار غشا و GDL شبیه‌سازی می‌کند. قوت اصلی این مدل، ارائه بینش کیفی بی‌نظیر از پدیده‌های انتقال جرم و بار درونی است. با این حال، پیچیدگی محاسباتی بسیار بالا و زمان‌بر بودن شبیه‌سازی، امکان به‌کارگیری آن را در سامانه‌های کنترلی بلادرنگ به‌شدت محدود می‌کند. در راستای غلبه بر این چالش، لیو و همکاران یک مدل کاهش‌یافته مبتنی رویکردهای مرتبه‌کاهی^۶ برای پیش‌بینی سریع شرایط نزدیک به طغیان ارائه کردند [۲]. اگرچه این مدل برای یکپارچه‌سازی با الگوریتم‌های کنترل مناسب‌تر است، اما در ازای سادگی، از دقت مکانیکی مدل‌های کامل CFD برخوردار نیست. ژاو و همکاران نیز از یک مدل مدار معادل الکتروشیمیایی دینامیک بهره گرفتند که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری^۷ بهینه‌سازی شده است [۳]؛ این رویکرد در مقایسه با مدل‌های فیزیکی کامل، از سرعت بیشتری برخوردار است، اما صحت نتایج آن به‌دقت مدل مدار اولیه وابسته بوده و قابلیت تعمیم‌پذیری آن در گستره وسیعی از شرایط عملیاتی نیازمند بررسی بیشتر است.

روش‌های مبتنی بر داده و یادگیری ماشین به دلیل توانایی ذاتی در مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی و پیچیده، با استقبال گسترده‌ای مواجه شده‌اند. گوئو و همکاران از یک شبکه عصبی کانولوشنی عمیق (CNN)^۸ برای طبقه‌بندی وضعیت پیل با

1. Proton-exchange Membrane Fuel Cell
2. Dehydration
3. Gas Diffusion Layer
4. Flooding
5. Cumulative Distribution Function
6. Model Order Reduction
7. Metaheuristic
8. Convolutional Neural Network

استفاده از داده‌های سری زمانی ولتاژ و جریان تحت الگوهای بارگذاری پویا بهره بردند [۴]. مزیت اصلی این روش، دقت تشخیص بسیار بالا در صورت در دسترس بودن حجم کافی از داده‌های آموزشی با کیفیت است. با این وجود، عملکرد این روش به داده‌های آموزشی وابستگی شدید دارد؛ همچنین ماهیت جعبه‌سیاه^۱ بودن آن که استنتاج فیزیکی را دشوار می‌سازد به عنوان محدودیت‌های اصلی این روش محسوب می‌شوند. کمال و همکاران [۵] در رویکردی متفاوت با به‌کارگیری تابع پایه شعاعی (RBF^۲) مستقل برای تشخیص طغیان بر مبنای داده‌های عملیاتی ارائه کردند. روش RBF در مقایسه با شبکه‌های عصبی عمیق به داده‌های آموزشی کمتری نیاز دارد و از نظر محاسباتی کارآمدتر است. با این حال، انتخاب پارامترهای بهینه برای هسته و همچنین، عملکرد ضعیف‌تر آن در تشخیص حالت‌های میانی بین شرایط عادی (نرمال) و طغیان کامل از چالش‌های پیش روی این روش به شمار می‌آید. بویملر و همکاران از نوعی الگوریتم یادگیری تقویتی عمیق^۳ برای توسعه یک استراتژی کنترلی تطبیقی به منظور جلوگیری از طغیان استفاده کردند [۶]. این روش از پویایی و توانایی ذاتی در یادگیری بر پایه پاداش برخوردار است، اما به شبیه‌سازی و آموزش گسترده نیاز دارد و پیاده‌سازی آن در شرایط عملیاتی پیچیده با دشواری همراه است.

طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS^۴) به عنوان یک ابزار تشخیصی قدرتمند و غیرمخرب، کانون توجه بسیاری از پژوهش‌های نوین بوده است. یو و همکاران در [۷] بر برازش مدل مدار معادل (ECM^۵) پیچیده‌ای شامل عنصر فاز ثابت (CPE^۶) تمرکز کردند تا پارامترهای سینتیکی و انتقال جرم را با دقت بالایی استخراج کنند. این روش اطلاعات ارزشمندی در مورد مکانیسم‌های بنیادی فرایندهای الکتروشیمیایی ارائه می‌دهد. مسئله عدم یکتایی در برازش ECM‌های پیچیده، به گونه‌ای که چندین مدل مختلف می‌توانند با دقت مشابهی با داده‌های تجربی تطابق یابند، مهم‌ترین ضعف این روش محسوب شده و به بروز عدم قطعیت در نتایج منجر می‌شود. در مقابل، ژانگ و همکاران [۸] در استفاده از پارامترهای هندسی مستخرج مستقیم از نمودار نیکوئیست، نظیر قطر قوس نیم‌دایره فرکانس پایین (شاخص مقاومت انتقال جرم) و محل برخورد با محور حقیقی در فرکانس بالا (مقاومت اهمی) را پیشنهاد کردند. مزیت بزرگ این رویکرد، سادگی، سرعت و حذف وابستگی به مدل است که آن را برای تشخیص بلادرنگ ایده‌آل می‌سازد. عیب بالقوه آن، حساسیت کمتر نسبت به تغییرات بسیار جزئی در مقایسه با روش‌های مبتنی بر ECM پیشرفته عنوان شده است. لی و همکاران از تحلیل تابع توزیع زمان‌های استراحت (DRT^۷) برای جداسازی مؤثر مؤثر فرایندهای الکتروشیمیایی همپوشان در طیف EIS بهره جستند [۹]. DRT می‌تواند تفکیک‌پذیری بهتری نسبت به ECM استاندارد ارائه دهد، اما خود یک فرایند محاسباتی سنگین و بسیار حساس به نویز است.

تلفیق EIS و هوش مصنوعی به عنوان یک جریان تحقیقاتی امیدوارکننده در حال ظهور است. ژانگ و همکاران (۲۰۲۵) از الگوریتم جنگل تصادفی^۸ برای طبقه‌بندی وضعیت پیل با استفاده از پارامترهای استخراج شده از یک ECM ساده‌شده به عنوان ورودی استفاده کردند [۱۰]. این روش در مدیریت داده‌های با ابعاد بالا و ارائه اهمیت ویژگی‌ها قوی عمل می‌کند. با این حال، مشابه بسیاری از روش‌های مبتنی بر درخت، در برون‌یابی داده‌هایی که خارج از محدوده داده‌های آموزشی قرار دارند، با چالش مواجه است. آئو و همکاران یک سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS^۹) را برای تشخیص عیوب پیاده‌سازی کردند که در آن پارامترهای ECM به عنوان ورودی به سیستم فازی اعمال شده و قوانین آن توسط شبکه عصبی یادگیری می‌شود [۱۱]. توانایی یادگیری و استنتاج تحت شرایط عدم قطعیت را ترکیب می‌کند. اشکال اصلی این روش، پیچیدگی ذاتی و خطر بیش‌برازش^{۱۰} به‌ویژه در صورت نبود داده کافی است. لیو و همکاران از یک شبکه عصبی بازگشتی حافظه بلند - کوتاه مدت

1. Black Box
2. Radial Basis Function
3. Deep Reinforcement Learning
4. Electrochemical Impedance Spectroscopy
5. Equivalent Circuit Model
6. Constant Phase Element
7. Distribution of Relaxation Times
8. Random Forest
9. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
10. Overfitting

(LSTM^۱) برای تحلیل داده‌های EIS در حوزه زمان به منظور تشخیص پویای طغیان استفاده کردند [۱۲]. LSTM در مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی طولانی‌مدت عملکرد مطلوبی دارد، اما فرایند آموزش آن بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. روش‌های مبتنی بر منطق فازی به دلیل انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری با سیستم‌های غیرخطی مورد توجه قرار گرفته‌اند. روبیو و همکاران (۲۰۲۵) یک سیستم فازی نوع-۱ را بر اساس داده‌های ولتاژ، جریان و دمای عملیاتی برای تشخیص خشکی توسعه دادند [۱۳]. مزیت این سیستم، سادگی، قابلیت تفسیرپذیری بالا و عدم نیاز به مدل‌سازی پیچیده ریاضی است. محدودیت اصلی آن، عدم توانایی در مدیریت عدم قطعیت ذاتی در تعریف توابع عضویت و قوانین است. به منظور رفع این نقیصه، اومر و همکاران از یک سیستم کنترل مد لغزشی فازی نوع-۲ فاصله‌ای^۲ استفاده کردند که تطبیقی و مقاوم است و با استفاده از مشاهده‌گر اختلال تشخیص نوع خطا را محقق می‌سازد [۱۴]. این سیستم در شرایطی با نویز بالا و در حضور داده‌های نادقیق، پایداری بالاتری از خود نشان می‌دهد. با این حال، پیچیدگی محاسباتی آن به طور قابل توجهی از نوع-۱ بیشتر است که اجرای بلادرنگ آن را با چالش مواجه می‌سازد. فن و همکاران [۱۵] نوعی سیستم استنتاج فازی را با الگوریتم کلونی زنبور عسل^۳ برای بهینه‌سازی خودکار توابع عضویت به کار گرفتند. این روش می‌تواند دقت سیستم فازی را بهبود بخشد، اما فرایند بهینه‌سازی می‌تواند بسیار زمان‌بر باشد.

روش‌های مبتنی بر سیگنال‌های آکوستیک نیز مورد کاوش قرار گرفته‌اند. فرانکو و همکاران از تحلیل سیگنال‌های آلتراسونیک غیرفعال برای تشخیص تشکیل و فروپاشی حباب‌های آب در کانال‌های پیل استفاده کردند [۱۶]. این روش می‌تواند مستقیم حضور آب مایع را تشخیص دهد و ماهیتی غیرتهاجمی دارد. ضعف آن، حساسیت به نویز محیطی و نیاز به سنسورهای تخصصی و نصب دقیق است.

روش‌های مبتنی بر سنسورهای نوری نیز در حال توسعه هستند. Rostan و همکاران [۱۷] از فیبر نوری تعبیه‌شده در مجاورت GDL برای اندازه‌گیری مستقیم میزان رطوبت با استفاده از اصل بازتابش نوری بهره بردند. این روش امکان اندازه‌گیری مستقیم و مکانی را فراهم می‌کند. با این وجود، هزینه بالا، پیچیدگی در تعبیه‌سازی و احتمال تأثیرگذاری بر عملکرد هیدرودینامیکی و انتقال جرم پیل از موانع اصلی آن به شمار می‌روند.

رویکردهای هیبریدی نیز حضور پررنگی در ادبیات موضوع دارند. لی و همکاران از تلفیق داده‌های اختلاف فشار در دو سر پیل با یک مدل نیمه‌تجربی بر اساس تحلیل گازهای خروجی برای تشخیص همزمان خشکی و طغیان استفاده کردند [۱۸]. این روش از لحاظ هزینه نسبت به EIS پایین‌تر است، اما دقت و حساسیت کمتری داشته و عمدتاً برای تشخیص حالت‌های شدید مناسب است. کائو و همکاران از تحلیل انتقال حرارت با استفاده از آرایه‌ای از ترموکوپل‌ها برای استنباط وضعیت آب‌گیری بر اساس پروفیل دمایی استفاده کردند [۱۹]. این روش می‌تواند اطلاعات مکانی ارزشمندی ارائه دهد، اما تفسیر داده‌های دما دشوار بوده، چرا که توسط چندین پارامتر دیگر نیز متأثر می‌شود.

روش‌های مبتنی بر تحلیل پاسخ پله نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. Duque و همکاران [۲۰] از تحلیل پاسخ پله جریان و مدل‌سازی پاسخ ولتاژ برای استخراج پارامترهای سینتیکی و تشخیص محدودیت انتقال جرم استفاده کردند. این روش می‌تواند سریع‌تر از EIS باشد، اما اطلاعات فرکانسی کامل را ارائه نمی‌دهد و تفسیر آن می‌تواند دشوار باشد. روش‌های مبتنی بر تحلیل تصویر با پیشرفت فناوری بینایی ماشین در حال ظهور هستند. Lv و همکاران [۲۱] از دوربین‌های با سرعت بالا برای فیلمبرداری از سطح GDL و استفاده از پردازش تصویر برای شناسایی قطرات آب و الگوهای غرقاب شدن استفاده کردند. این روش مستقیم و بصری است، اما تنها برای پیل‌های شفاف و آزمایشگاهی قابل استفاده بوده و برای کاربردهای صنعتی عملی نیست.

روش‌های مبتنی بر مدل‌های انتقال جرم دو فازی نیز توسعه یافته‌اند. لی و همکاران یک مدل انتقال جرم دو فازی (گاز-مایع) را برای شبیه‌سازی دقیق دینامیک قطرات آب در GDL توسعه دادند [۲۲]. این مدل‌ها برای درک بنیادی مکانیزم‌ها بسیار ارزشمند هستند، اما به دلیل بار محاسباتی بسیار سنگین، برای اهداف تشخیصی بلادرنگ غیرعملی محسوب می‌شوند. روش‌های

1. Long Short-Term Memory
2. Interval Type-2 Fuzzy System
3. Bee Colony

مبتنی بر یادگیری ماشین سنتی نیز هنوز کاربرد دارند. Cheikh و همکاران [۲۳] از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA^۱) برای کاهش ابعاد داده‌های عملیاتی و سپس از خوشه‌بندی k-میانگین^۲ برای تشخیص حالت‌های مختلف عملکردی استفاده کردند. این روش بدون ناظر است و نیاز به داده برچسب‌دار ندارد، اما دقت آن معمولاً از روش‌های با ناظر پایین‌تر است.

روش‌های مبتنی بر فیلتر کالمن برای تخمین حالت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. رومی و همکاران از فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF^۳) برای تخمین پارامترهای داخلی پیل از جمله میزان آب‌گیری غشا بر اساس اندازه‌گیری‌های ولتاژ و جریان استفاده کردند [۲۴]. این روش می‌تواند برای تخمین حالت در زمان واقعی مؤثر باشد، اما به یک مدل دینامیکی دقیق از پیل نیاز دارد که خود یک چالش اساسی است. روش‌های مبتنی بر آنالیز آنتروپی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. Romey و همکاران [۲۵] از آنالیز آنتروپی سیگنال جریان خروجی پیل با کمک روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک و پس‌انتشار خطا (GA-BP^۴) برای تشخیص بینظمی‌های ناشی از طغیان استفاده کردند. این روش به مدل نیاز ندارد و می‌تواند تغییرات ظریف را تشخیص دهد، اما ارتباط مستقیم بین آنتروپی و مکانیزم فیزیکی همیشه واضح نیست.

روش‌های مبتنی بر امپدانس داخلی با سیگنال کوچک یک جایگزین ساده برای EIS محسوب می‌شوند. وئی و همکاران از تزریق یک سیگنال اختلال فرکانس واحد و اندازه‌گیری پاسخ آن برای تخمین امپدانس داخلی در یک فرکانس خاص استفاده کردند [۲۶]. این روش از EIS سریع‌تر و ساده‌تر است، اما اطلاعات محدودی را تنها در یک فرکانس ارائه می‌دهد. روش‌های مبتنی بر داده‌های پیل‌های تجاری نیز در حال توسعه هستند. ژو و همکاران روی توسعه الگوریتم‌هایی برای تشخیص عیب بر اساس داده‌های عملیاتی در دسترس از پیل‌های سوختی موجود در وسایل نقلیه تمرکز کردند [۲۷]. قدرت این روش در استفاده از داده‌های واقعی است، اما اغلب به داده‌های کاملاً برچسب‌گذاری شده برای آموزش نیاز دارد که ممکن است همیشه در دسترس نباشد. روش‌های مبتنی بر مقاومت سنجی الکتریکی^۵ نیز برای تصویربرداری از توزیع رطوبت درون پیل به کار رفته‌اند. چیمبرز و همکاران از آرایه‌ای از الکترودها در اطراف پیل برای بازسازی توزیع مکانی هدایت داخلی استفاده کردند [۲۸]. این روش می‌تواند اطلاعات مکانی ارزشمندی ارائه دهد، اما وضوح فضایی آن محدود و پیاده‌سازی آن پیچیده و پرهزینه است. روش‌های مبتنی بر اسپکتروسکوپی پلاسمون سطحی^۶ نیز به عنوان یک تکنیک نوین مطرح شده‌اند. سینگ و همکاران از یک سنسور SPR برای تشخیص مستقیم تشکیل لایه‌های آب بر روی سطح کاتالیزور در مقیاس نانو استفاده کردند [۲۹]. این روش بسیار حساس و مستقیم است، اما در حال حاضر آزمایشگاهی بسیار پیشرفته است و برای پیل‌های استاندارد قابل اجرا نیست. روش‌های مبتنی بر مدل‌های داده‌محور خالص نیز وجود دارند. برخی از پژوهشگران به مطالعه ساختارهای ترکیبی مبتنی بر پیل‌های سوختی پرداخته‌اند [۳۰ و ۳۱]. پژوهشگران در [۳۱] از یک مدل مبتنی بر ترانسفورماتور^۷ برای پیش‌بینی سری زمانی ولتاژ و تشخیص انحرافات ناشی از عیوب ترکیبی مبتنی بر PEMFC استفاده کردند. این مدل‌های پیشرفته می‌توانند روابط پیچیده را یاد بگیرند، اما به حجم بسیار زیادی از داده برای آموزش نیاز دارند و تفسیر آن‌ها بسیار دشوار است.

Moezzi و همکاران [۳۲] عملکرد چهار مدل پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی برای برآورد شاخص‌های تولید ناخالص داخلی، انتشار CO₂ و سرطان مرتبط با دستگاه تنفسی در کشورهای شرق و غرب آسیا تا سال ۲۰۴۰ مورد مقایسه قرار گرفته است. پس از ارزیابی مدل‌ها با معیارهای خطا، مدل خود رگرسیون میانگین متحرک انباشته به عنوان بهترین مدل شناسایی شد. Shirazi و همکاران [۳۳] اثرات زیست‌محیطی و آسیب‌های ناشی از خودروهای الکتریکی در مقایسه با خودروهای دارای موتور احتراق داخلی، تحت سناریوهای مختلف دمای محیط، با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه حیات بررسی شده است. در این پژوهش، شاخص‌هایی همچون انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف انرژی و آسیب به اکوسیستم‌ها در دماهای گوناگون مورد

1. Principal Component Analysis
2. k-means
3. Extended Kalman Filter
4. Genetic Algorithm Optimized Backpropagation
5. Electrical Resistance Tomography
6. Surface Plasmon Resonance
7. Transformer

سنجش قرار گرفته است. نتایج این مقالات نشان داده است که عملکرد زیست‌محیطی خودروهای الکتریکی به شدت به دمای محیط وابسته است. این مطالعه ضمن تأکید بر مزیت‌های کلی خودروهای الکتریکی در شرایط معتدل، به افزایش آسیب‌های محیطی در دماهای بسیار پایین یا بالا اشاره دارد که باید در سیاست‌گذاری‌های حمل‌ونقل پایدار مد نظر قرار گیرد.

۱-۲. شکاف‌های تحقیقاتی و نوآوری‌های پژوهش حاضر

بررسی جامع ادبیات پژوهش در حوزه تشخیص عیوب PEMFC نشان می‌دهد اگرچه پیشرفت‌های قابل توجهی حاصل شده است، اما پنج شکاف اساسی همچنان وجود دارد:

- تمرکز بیشتر روش‌ها بر تشخیص حالت‌های عیب کامل (خشکی یا طغیان شدید) و ناتوانی در تشخیص و تمایز حالت‌های میانی و مرزی (مانند خشکی خفیف هم‌زمان با طغیان موضعی)؛
- عدم تلفیق بهینه میان پارامترهای هندسی ساده و سریع مستخرج از منحنی EIS با چارچوب‌های استنتاج نرم پیشرفته‌ای که قادر به مدیریت عدم قطعیت باشند؛
- استفاده نشدن از منطق فازی چندارزشی (MVFL^۱) در این حوزه، با وجود مزایای آن در مدل‌سازی پیوستگی شرایط بین حالت‌های مختلف بدون افزایش پیچیدگی محاسباتی فازی نوع-۲؛
- چالش تفسیرپذیری پایین در روش‌های یادگیری عمیق، که مانعی برای پذیرش در سیستم‌های ایمن - حیاتی است؛
- فاصله میان روش‌های پیچیده تحقیقاتی و نیاز صنعت به الگوریتم‌های سریع، کارا و قابل اجرا روی سخت‌افزارهای ساده. برای پر کردن این شکاف‌ها، مقاله حاضر یک چارچوب تشخیصی نوین و یکپارچه ارائه می‌دهد که نوآوری‌های اصلی آن عبارت‌اند از:

- ترکیب بدیع پارامترهای هندسی EIS با MVFL به نحوی که برای اولین بار، سه شاخص هندسی (مقاومت اهمی R_0 ، شعاع نیم‌دایره نفوذ r_0 مؤلفه حقیقی مرکز آن C_{real}) به عنوان ورودی یک سیستم فازی با ۶۴۰ قانون طراحی شده است؛
 - تشخیص دقیق حالت‌های مرزی و میانی که سیستم MVFL پیشنهادی قادر است طیف پیوسته از خشکی مطلق تا طغیان کامل را با دقت ۹۸ درصد و میانگین خطای شدت ۱/۴۵ درصد شناسایی کند؛
 - بهبود کارایی محاسباتی با حذف فرایند زمان‌بر برازش مدار معادل و استفاده از ساختار فازی با پیچیدگی کمتر از نوع-۲، ضمن حفظ قابلیت تفسیرپذیری بالا؛
 - اعتبارسنجی جامع کمی و کیفی روی ۵۰ حالت عملیاتی و مقایسه با روش‌های LSTM، CNN و فازی نوع-۱ که برتری روش پیشنهادی را از لحاظ دقت، پایداری و زمان پاسخ تأیید می‌کند.
- به عنوان جمع‌بندی، هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک چارچوب تشخیصی ترکیبی و بلادرنگ برای PEMFCها است که قادر به شناسایی هم‌زمان پدیده‌های خشکی و طغیان به همراه تخمین دقیق شدت آن‌ها (از ۰ تا ۱۰۰ درصد) باشد. برای این منظور، از ترکیب پارامترهای هندسی مستخرج از EIS و یک سیستم استنتاج مبتنی بر MVFL بهره گرفته شده است تا ضمن دستیابی به دقت بالا، پیچیدگی محاسباتی در حد قابل پیاده‌سازی برای پایش آنلاین باقی بماند.
- ساختار این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. بخش دوم به تشریح دقیق مواد و روش‌ها، شامل مبانی نظری استخراج پارامترهای هندسی از EIS و طراحی پارامترهای ورودی سیستم MVFL اختصاص دارد. همچنین، تأثیر پدیده خشکی و طغیان روی منحنی EIS مورد بحث قرار گرفته است. به علاوه، در این بخش سیستم MVFL پیشنهادی به همراه پایگاه سیستم قواعد فازی، جهت تشخیص عیوب تحت مطالعه طراحی و ارائه شده است. در بخش سوم، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی ارائه و مورد تحلیل و بحث دقیق قرار می‌گیرد و عملکرد سیستم پیشنهادی در تشخیص وضعیت خطا ارزیابی می‌شود. همچنین، در انتهای این بخش مطالعه مقایسه‌ای با سایر پژوهش‌های مرتبط انجام گرفته و برتری روش پیشنهادی به وضوح نمایش داده شده است. در نهایت، بخش چهارم به جمع‌بندی یافته‌های کلیدی پژوهش، بیان نتیجه‌گیری نهایی و کارهای آینده می‌پردازد.

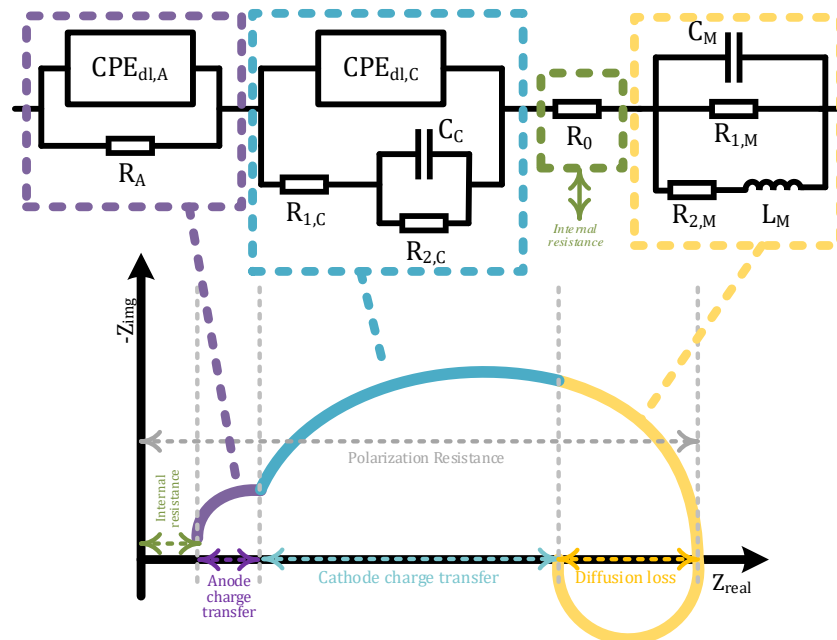
۰۲ روش کار

۰۱-۲ بررسی هندسی منحنی EIS

اطلاعات هندسی حاصل از EIS شامل بخش‌های حقیقی و موهومی، فرکانس، فاز و دامنه‌ای است که از داده‌های خام امپدانس استخراج می‌شوند و می‌توانند در تحلیل روند تخریب سامانه نیز مورد استفاده قرار گیرند [۳۴]. نخستین نقطه تقاطع در ناحیه فرکانس بالا بیانگر مقاومت داخلی کل سامانه پیل سوختی است. دومین نقطه تقاطع به مقاومت انتقال بار در آند مربوط می‌شود و سومین نقطه تقاطع نشان‌دهنده مقاومت انتقال بار در کاتد است. چهارمین نقطه تقاطع نیز مقاومت نفوذی را بازتاب می‌دهد. مجموع این مقاومت‌ها (داخلی، انتقالی و نفوذی) به عنوان مقاومت پلاریزاسیون شناخته می‌شود که با عملکرد داخلی کلی و میزان تلفات پیل سوختی ارتباط مستقیم دارد. علاوه بر این، بیشینه مقدار مطلق فاز می‌تواند نشانه‌ای از تخریب غشای الکترولیتی باشد [۳۵]. فرکانس متناظر با این بیشینه (فرکانس ماکسیمم) نسبت معکوس با ثابت زمانی داشته و به دینامیک سامانه مربوط می‌شود. در نهایت، بیشینه دامنه می‌تواند در شرایطی که داده‌های EIS در فرکانس‌های پایین ناقص یا اندازه‌گیری آن‌ها دشوار است، به عنوان جایگزینی برای مقاومت پلاریزاسیون مورد استفاده قرار گیرد. در شکل ۱ مدار معادل PEMFC تحت مطالعه و ترسیم منحنی EIS مربوطه نشان داده شده است [۳۴-۳۶].

۰۲-۲ تحلیل ریاضی امپدانس PEMFC تحت مطالعه

مدل فرایندی ارائه‌شده در این مقاله، امپدانس PEMFC را از طریق حل تحلیلی معادلات حاکم بر انتقال جرم، سینتیک‌های الکتروشیمیایی و انتقال آب استخراج می‌کند. این مدل به یک مدار معادل فیزیکی منجر می‌شود که هر عنصر آن به طور مستقیم با پارامترهای فیزیکی سلول مرتبط است. مدار معادل کلی از اتصال سری سه زیرمدار تشکیل شده است: مدار آند، مدار کاتد و مدار امپدانس اهمی. امپدانس کل سلول به صورت شکل ۱ بیان می‌شود [۳۴]:



شکل ۱. مدار معادل PEMFC تحت مطالعه [۳۴] و ترسیم منحنی EIS مربوطه

$$Z_{total}(\omega) = R_0 + Z_A(\omega) + Z_C(\omega) + Z_D(\omega) \quad (1)$$

که در آن $\omega = 2\pi f$ فرکانس زاویه‌ای و f فرکانس اعمال شده در تحلیل EIS است.

بخش اول: مقاومت داخلی (افت اهمی): مقاومت داخلی که با R_0 نشان داده می‌شود، بیانگر تلفات اهمی در الکترولیت، الکترودها و جمع‌کننده‌های جریان است. این مقاومت یک امپدانس کاملاً حقیقی بوده و مستقل از فرکانس است [۳۴].

بخش دوم: انتقال بار آند: این فرایند انتقال بار فارادیک و ظرفیت لایه‌دوگانه در آند را مدل‌سازی می‌کند. لایه‌دوگانه توسط یک عنصر با فاز ثابت (CPE) که به صورت موازی با مقاومت انتقال بار قرار دارد، نمایش داده می‌شود. ادمیتانس^۱ یک CPE به صورت $Y_{CPE} = Q(j\omega)^\alpha$ تعریف می‌شود؛ که در آن Q ضریب CPE و α نمای پراکندگی است ($0 \leq \alpha \leq 1$). برای یک خازن ایده‌آل، $\alpha = 1$ و $Q = C$ خواهد بود. امپدانس ترکیب موازی $CPE_{dl,A}$ و R_A به صورت رابطه^۲ بیان می‌شود [۳۴]:

$$Z_A = \left(\frac{1}{R_A} + Q_A(j\omega)^{\alpha_A} \right)^{-1} \quad (۲)$$

بخش سوم: انتقال بار کاتد: زیرمدار انتقال بار کاتد شامل یک عنصر با فاز ثابت $CPE_{dl,C}$ است که به صورت موازی با ترکیب سری/موازی مقاومت‌ها و یک خازن قرار دارد. این آرایش قادر است پدیده‌های بین‌سطحی اضافی مانند جذب یا تشکیل لایه سطحی را مدل‌سازی کند.

شاخه‌ای که شامل $R_{1,C}$ به صورت سری با $C \parallel R_{2,C}$ است، امپدانس زیر را دارد [۳۴ و ۳۵]:

$$Z_{branch,C} = R_{1,C} + \left(\frac{1}{R_{2,C}} + j\omega C_C \right)^{-1} \quad (۳)$$

امپدانس کل کاتد ترکیب موازی $CPE_{dl,C}$ و $Z_{branch,C}$ خواهد بود:

$$Z_C = \left(Q_C(j\omega)^{\alpha_C} + \frac{1}{Z_{branch,C}} \right)^{-1} \quad (۴)$$

بخش چهارم: تلفات نفوذی: این زیرمدار اثرات نفوذ در فرکانس‌های پایین و رفتار القایی احتمالی را در نظر می‌گیرد. ساختار آن شامل یک خازن C_M به صورت موازی با یک مقاومت $R_{1,M}$ و یک شاخه سری $R-L$ متشکل از $R_{2,M} + L_M$ است. امپدانس شاخه سری $R_{2,M} + L_M$ به صورت رابطه^۵ تعریف می‌شود [۳۵]:

$$Z_{RL} = R_{2,M} + j\omega L_M \quad (۵)$$

ترکیب سه عنصر موازی C_M ، $R_{1,M}$ و Z_{RL} امپدانس زیر را به دست می‌دهد:

$$Z_D = \left(j\omega C_M + \frac{1}{R_{1,M}} + \frac{1}{R_{2,M} + j\omega L_M} \right)^{-1} \quad (۶)$$

۲-۳. اندازه و زاویه فاز امپدانس کل

امپدانس کل مدار معادل الکتروشیمیایی یک تابع مختلط از فرکانس زاویه‌ای ω است. این امپدانس به صورت مجموع چهار زیرامپدانس که به طور سری مشابه رابطه^۱ به یکدیگر متصل شده‌اند، بیان می‌شود. اجزای حقیقی و موهومی هر زیر امپدانس به صورت $Z_A = R_{A,r} + jR_{A,i}$ ، $Z_C = R_{C,r} + jR_{C,i}$ و $Z_D = R_{D,r} + jR_{D,i}$ تعریف می‌شوند؛ که در آن زیرنویس‌های r و i به ترتیب بخش‌های حقیقی و موهومی را نشان می‌دهند [۳۶].

بنابراین امپدانس مختلط کل به صورت $Z_{total}(\omega) = X(\omega) + jY(\omega)$ زیر نوشته می‌شود؛ که در آن:

$$X(\omega) = R_0 + R_{A,r} + R_{C,r} + R_{D,r} \quad (۷)$$

$$Y(\omega) = R_{A,i} + R_{C,i} + R_{D,i} \quad (۸)$$

بنابراین، اندازه امپدانس کل بر مبنای بخش‌های حقیقی و موهومی به شرح زیر خواهد بود [۳۴-۳۶]:

$$|Z_{total}(\omega)| = \sqrt{[X(\omega)]^2 + [Y(\omega)]^2} \quad (۹)$$

همچنین، زاویه فاز (بر حسب رادیان) توسط تانژانت معکوس چهار ربع نسبت بخش موهومی به بخش حقیقی به صورت رابطه ۱۰ قابل دستیابی است.

$$\angle Z_{\text{total}}(\omega) = \arctan\left(\frac{Y(\omega)}{X(\omega)}\right) \quad (10)$$

۲-۴. تأثیر پدیده خشکی و طغیان روی منحنی EIS

عملکرد بهینه PEMFC وابسته به مدیریت دقیق آب در مجموعه الکترود غشایی (MEA^۱) است. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، دو حالت بحرانی خطا عبارت‌اند از: پدیده خشکی غشا و طغیان (غرق‌شدگی) لایه کاتالیست/کاتد. در این حالت‌ها، EIS ابزاری قدرتمند برای تشخیص این شرایط است که با تحلیل مشخصه PEMFC در صفحه امپدانس عمل می‌کند. این بخش اثرات متمایز خشکی و طغیان را بر نمودار نایکوئیست^۲ (منحنی EIS) توضیح می‌دهد و پدیده‌های فیزیکی را به پاسخ‌های الکتریکی قابل اندازه‌گیری پیوند می‌دهد.

۲-۴-۱. پدیده خشکی

پدیده خشکی زمانی رخ می‌دهد که غشا و یونومر^۳ درون لایه‌های کاتالیست، آب‌رسانی ضروری خود را از دست بدهند؛ معمولاً به دلیل دمای بالای کارکرد، رطوبت پایین گاز ورودی، جریان‌های استوکیومتری^۴ بیش از حد، یا کارکرد در چگالی جریان بالا، پدیده خشکی اتفاق می‌افتد. هنگام رخداد پدیده خشکی، برجسته‌ترین ویژگی در منحنی EIS، افزایش قابل توجه در محل برخورد محور حقیقی در فرکانس بالا بوده که متناظر با مقاومت داخلی R_0 (تلفات اهمی در الکترولیت، الکترودها و جمع‌کننده‌های جریان) است. این موضوع به‌وضوح به صورت یک جابه‌جایی به سمت راست در کل طیف امپدانس مشاهده می‌شود. بر این اساس بروز پدیده خشکی به انتقالی منحنی EIS به سمت راست منجر شده که با افزایش خشکی این مقدار بیشتر می‌شود؛ علاوه بر آن، ظرفیت CPE آند نیز به دلیل کمبود آب در یونومر آند کاهش می‌یابد [۳۴ و ۳۵].

۲-۴-۲. پدیده طغیان

پدیده طغیان (غرق‌شدگی) با تجمع آب مایع اضافی در لایه کاتالیست کاتد، لایه میکروحفره‌ای، و لایه نفوذ گاز، یا در مسیرهای جریان آند مشخص می‌شود. این پدیده ناشی از دماهای پایین، چگالی جریان‌های بالا (تولید زیاد آب)، نرخ‌های ناکافی جریان گاز، یا رطوبت بالای گاز ورودی است. هنگام رخداد پدیده طغیان، افزایش غالب در مقاومت‌های نفوذی است؛ مقاومت نفوذ اولیه ($R_{1,M}$) که مقاومت نفوذ گاز غالب در لایه غرق‌شده را مدل می‌کند، افزایش بزرگی نشان می‌دهد. این دلیل اصلی ظهور یک کمان بزرگ‌تر در فرکانس پایین است؛ به‌علاوه مقاومت نفوذ سری ($R_{2,M}$) به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده فراگیری محدودیت انتقال است. به‌علاوه غرق‌شدگی می‌تواند یک حلقه القایی در پایین‌ترین فرکانس‌ها ایجاد کند و منجر به افزایش L_M شود، که با رشد و غالب شدن سومین نیم‌دایره فرکانس پایین مرتبط است؛ همچنین ظرفیت متناظر C_M برای فرآیند مرتبط با نفوذ کاهش می‌یابد. این از نظر فیزیکی منطقی است، زیرا پر شدن حفره‌ها با آب مایع خواص دی‌الکتریک و ظرفیت ذخیره بار مؤثر در سطح الکترود غرق‌شده را تغییر می‌دهد [۳۶].

۲-۵. استخراج پارامترهای کنترلی از منحنی EIS

برای تحلیل دقیق بررسی تأثیر خطاهای تحت مطالعه روی منحنی EIS، باید دو نقطه کلیدی روی محور حقیقی مشخص شود، که قطر نیم‌دایره نفوذ را تعریف می‌کنند.

1. Membrane Electrode Assembly
2. Nyquist
3. Ionomer
4. Stoichiometric

حد فرکانس بالا برای نیم‌دایره تلفات نفوذی (ω_{high})، که این مقدار، فرکانسی است که در آن فرایندهای نفوذ شروع به آشکار شدن می‌کنند. در یک فرکانس بالا، مؤلفه‌های خازنی و القایی در Z_D قابل چشم‌پوشی است. در این نقطه:

$$Z_D(\omega_{high}) \approx R_{D,min} = \frac{R_{1,M} R_{2,M}}{R_{1,M} + R_{2,M}} = R_{\beta}^{(D)} \quad (11)$$

با این حال، محل برخورد اندازه‌گیری شده روی محور حقیقی در این فرکانس برابر است با مجموع تمامی مؤلفه‌های مقاومتی دیده شده در مدار، که قبل از نیم‌دایره بخش تلفات نفوذی قرار می‌گیرد. بنابراین:

$$Re[Z_{total}(\omega_{high})] = R_0 + Re(Z_A(\omega_{high})) + Re(Z_C(\omega_{high})) + R_{\beta}^{(D)} \quad (12)$$

این مجموعه را به عنوان $R_{HF}^{(D)}$ تعریف می‌کنیم. این نقطه، محل برخورد سمت راست نیم‌دایره نفوذ با محور حقیقی در نمودار نایکویست است.

با نزدیک شدن فرکانس به صفر ($\omega \rightarrow 0$) خواهیم داشت: $Z_{total}(0) = R_0 + R_A^{DC} + R_C^{DC} + R_{\beta}^{(D)}$ ؛ که این، محل برخورد سمت چپ کل نمودار نایکویست است. بنابراین، محل برخورد سمت چپ نیم‌دایره نفوذ به تنهایی متناظر است با امیدانس کل، بدون مقدار اهمی بخش Z_D ؛ که این مقدار برابر است با:

$$Re[Z_{total}(\omega \text{ where } Z_D \rightarrow 0)] = R_0 + Re(Z_A) + Re(Z_C) \quad (13)$$

کل این مجموع را به عنوان $R_{LF}^{(D)}$ تعریف می‌کنیم. این یک نقطه مجازی روی محور حقیقی است که مرکز را مشخص می‌کند؛ جایی که از آن، نیم‌دایره Z_D با کاهش فرکانس شروع به گسترش می‌کند.

بر این مبنا، با تقریبی مناسب، نیم‌دایره نفوذ در نمودار بین دو نقطه روی محور حقیقی گسترده می‌شود که شامل: محل برخورد سمت چپ $(R_{LF}^{(D)}, 0)$ و محل برخورد سمت راست $(R_{HF}^{(D)}, 0)$ خواهد بود. برای یک نیم‌دایره کامل که روی محور حقیقی

متمركز است، مرکز C نقطه میانی و شعاع r نصف فاصله بین آن‌ها خواهد بود؛ بنابراین $C = \left(\frac{R_{LF}^{(D)} + R_{HF}^{(D)}}{2}, 0 \right)$ و $r = \frac{R_{HF}^{(D)} - R_{LF}^{(D)}}{2}$ ؛ با جای‌گزینی $R_{LF}^{(D)} = R_0 + Re(Z_A) + Re(Z_C)$ و $R_{HF}^{(D)} = R_0 + Re(Z_A) + Re(Z_C) + R_{\beta}^{(D)}$ خواهیم داشت:

$$C = \left(R_0 + Re(Z_A) + Re(Z_C) + \frac{R_{\beta}^{(D)}}{2}, 0 \right) \quad (14)$$

$$r = \frac{R_{\beta}^{(D)}}{2} \quad (15)$$

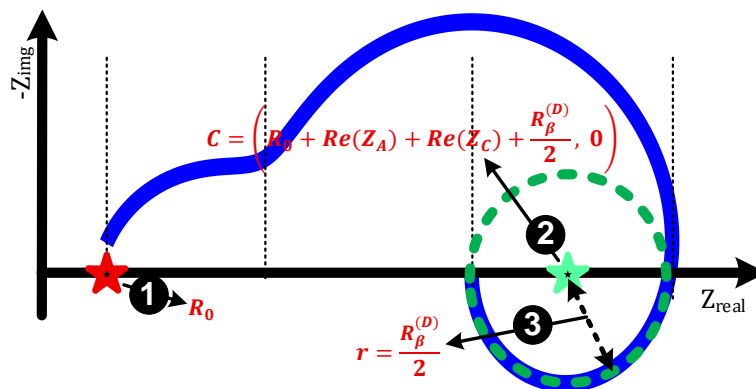
بر این مبنا، پارامترهای کنترلی تحت مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. این پارامترها شامل مقدار R_0 ، میزان شعاع (r) و بخش حقیقی مرکز دایره کامل $(R_0 + Re(Z_A) + Re(Z_C) + (R_{\beta}^{(D)} / 2))$ که هم شعاع و هم مرکز نیم‌دایره تلفات نفوذی بوده، است؛ که با علامت‌های ①، ② و ③ نشان داده شده است. به علاوه، در جدول ۱ داده‌های ورودی، فرضیات و پارامترهای سیستم PEMFC تحت مطالعه لیست شده است.

۲-۶. ترکیب MVFL و پارامترهای منحنی EIS

روش MVFL، گسترشی از منطق فازی سنتی بوده که با مقادیر گسسته فراتر از حالت دودویی $\{0, 1\}$ یا بازه پیوسته $[0, 1]$ عمل می‌کند [۳۷ و ۳۸]. در MVFL، مقادیر از یک مجموعه متناهی انتخاب می‌شوند؛ چنین قابلیت به‌ویژه در سامانه‌هایی سودمند است که شرایط فقط به صورت «کم» یا «زیاد» قابل توصیف نیستند، بلکه می‌توان آن‌ها را در چندین درجه گسسته مانند «بسیار کم»، «کم»، «متوسط»، «زیاد» و «بسیار زیاد» طبقه‌بندی کرد.

جدول ۱. داده‌های ورودی، فرضیات و پارامترهای سیستم PEMFC تحت مطالعه

مراجع	واحد (یکتا)	مقدار در نظر گرفته شده	پارامتر	بخش
	$\Omega \cdot cm^2$	۰٫۰۵	R_0	مقاومت داخلی
	$\Omega \cdot cm^2$	۰٫۰۸	R_A	
	$S \cdot (rad/s)^{-n}$	۰٫۰۰۵	Q_A	انتقال بار آند
	-	۰٫۹۵	α_A	
	$\Omega \cdot cm^2$	۰٫۱۵	$R_{1,C}$	
	$\Omega \cdot cm^2$	۰٫۱	$R_{2,C}$	
[۳۴-۳۶]	F	۰٫۸	C_C	انتقال بار کاتد
	$S \cdot (rad/s)^{-n}$	۰٫۰۰۳	Q_C	
	-	۰٫۸۵	α_C	
	F	۰٫۰۱	C_M	
	$\Omega \cdot cm^2$	۰٫۵	$R_{1,M}$	تلفات نفوذی
	$\Omega \cdot cm^2$	۰٫۲	$R_{2,M}$	
	H	۰٫۰۵	L_M	



شکل ۲. پارامترهای کنترلی مستخرج از منحنی EIS در سیستم PEMFC تحت مطالعه

در زمینه تشخیص خطا در PEMFCها، روش MVFL امکان مدل‌سازی دقیق حالات گذار میان شرایط نرمال، خشک و غرقاب را فراهم می‌آورد؛ حالتی که غالباً ماهیتی پیوسته دارند. به خلاف سامانه‌های فازی نوع اول (که از درجات عضویت قطعی استفاده می‌کنند) و سامانه‌های فازی نوع دوم (که عدم قطعیت را مدیریت می‌کنند، اما هزینه محاسباتی بالاتری دارند)، MVFL با گسسته‌سازی درجات عضویت، تعادلی میان قابلیت تفسیرپذیری و پیچیدگی محاسباتی پایین‌تر برقرار می‌سازد. در این روش، با در نظر گرفتن اینکه T مجموعه‌ای از مقادیر صدق باشد خواهیم داشت [۳۸]:

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}, \quad t_i \in [0, 1] \quad (16)$$

برای هر متغیر ورودی، توابع عضویت مقادیر قطعی^۱ را به مقادیر صدق در مجموعه T نگاشت می‌کنند. عملیات منطقی (AND، OR و NOT) با استفاده از هنجارهای t -norms و هم‌هنجارهای t -conorms روی مجموعه T بسط داده می‌شوند.

۲-۶-۱. طراحی ورودی‌ها، خروجی‌ها

بر اساس استخراج پیشین از نمودارهای نایکویست در EIS سیستم تحت مطالعه، سه پارامتر ورودی اصلی عبارت‌اند از:

- I. شعاع نیم‌دایره نفوذ در فرکانس پایین (r) مرتبط با شدت پدیده طغیان؛
- II. نقطه برخورد در فرکانس بالا بر محور حقیقی (R_0) یا مقاومت اهمی، مرتبط با شدت پدیده خشکی؛
- III. بخش حقیقی مرکز نیم‌دایره نفوذ (C_{real}) نشان‌دهنده اثر ترکیبی خشکی و طغیان.

این پارامترها به عنوان ورودی‌های قطعی برای سامانه تشخیص خطای پیشنهادی مبتنی بر MVFL در نظر گرفته می‌شوند. همچنین در سیستم تشخیص خطای پیشنهادی، دو عدد خروجی مورد هدف قرار گرفته است که شامل موارد زیر می‌شود:

I. میزان حساسیت پدیده خشکی که به صورت درصد $F_{Dehydration} \in [0\%, 100\%]$ است؛ و مقدار درصدی پدیده خشکی را مشخص می‌کند؛

II. میزان حساسیت پدیده طغیان که به صورت درصد $F_{Flooding} \in [0\%, 100\%]$ است؛ و مقدار درصدی پدیده طغیان را معین می‌سازد.

۲-۶-۲. طراحی توابع عضویت

در طراحی توابع عضویت از روش ناهمگن شامل توابع گوسی (G^1) و زنگوله تعمیم‌یافته (GB^1) استفاده شده تا رفتار غیر خطی ورودی‌ها و خروجی‌ها به درستی پیاده‌سازی شود؛ تابع G استفاده شده به شرح زیر انتخاب شده است [۳۸ و ۳۹].

$$\mu_{Gauss}(x; c, \sigma) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (17)$$

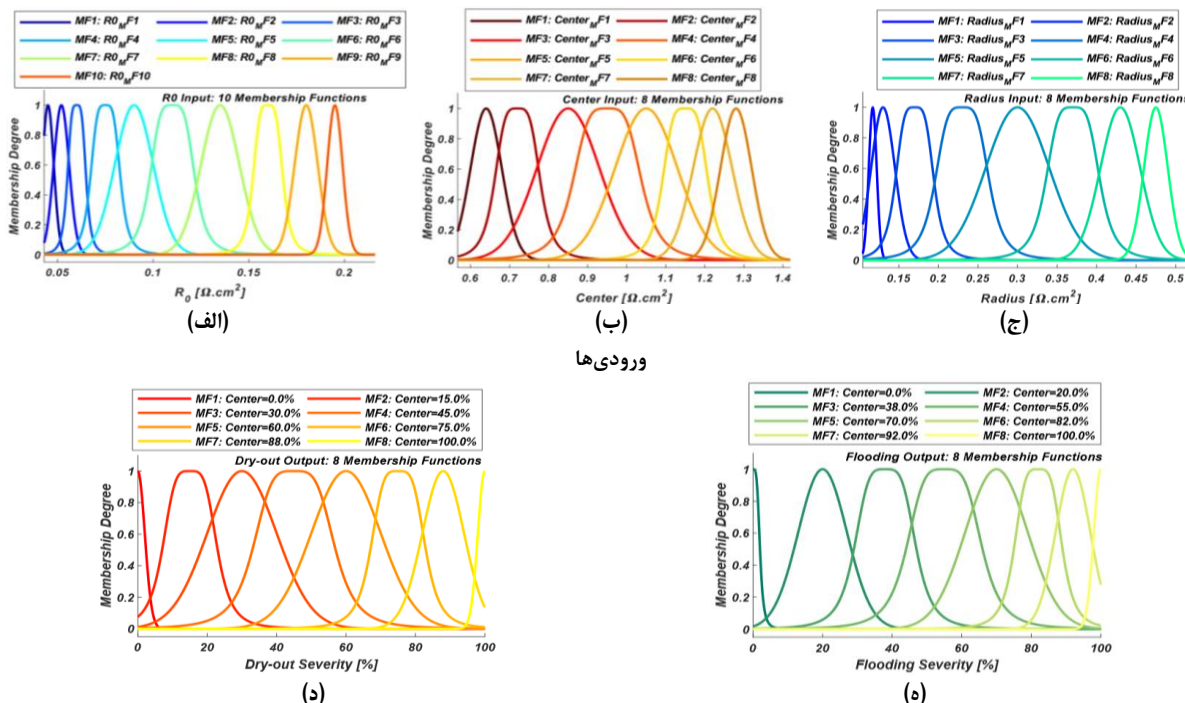
که در آن c بیانگر مرکز و σ پارامتر پهنای تابع است.

همچنین تابع GB به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۳۹].

$$\mu_{Gbell}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \quad (18)$$

که در آن a پارامتر کنترلی پهنای تابع، b کنترل شیب (که ثابت ۲ در نظر گرفته شده است) و c مرکز است.

داده‌های ورودی/خروجی و پارامترهای توابع طراحی شده به طور کامل در جدول ۲ لیست شده است. در نهایت، در شکل ۳ توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی‌ها نشان داده شده است.



ورودی‌ها

شکل ۳. توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی‌ها در سیستم تشخیص خطای پیشنهادی؛ (الف) μ_{R_0} ؛ (ب) $\mu_{C_{real}}$ ؛ (ج) μ_r ؛ (د) $\mu_{Dehydration}$ ؛ و (ه) $\mu_{Flooding}$.

1. Gaussian
2. Generalized Bell

۲-۶-۳. ساختار پایگاه قواعد

در طراحی سیستم تشخیص خطای پیشنهادی، پایگاه قواعد ترکیبی کاملی که شامل تمامی ترکیبات ورودی‌ها می‌شود به شرح رابطه ۱۹ در نظر گرفته شده است؛ که در مجموع شامل ۶۴۰ قانون است.

جدول ۲. پارامترهای توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی‌ها

ورودی/خروجی	پارامترها	شماره توابع عضویت	مرکز ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	پهنا ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	نوع تابع/مرجع
		1	0.045	0.003	G
		2	0.052	0.004	G
		3	0.060	0.005	GB
	پارامترهای توابع	4	0.075	0.008	GB
	عضویت ورودی R_0	5	0.090	0.010	G
		6	0.110	0.012	GB
		7	0.135	0.010	G
		8	0.160	0.008	GB
		9	0.180	0.006	G
		10	0.195	0.004	G
		1	0.64	0.04	G
		2	0.72	0.06	GB
ورودی‌های	پارامترهای توابع	3	0.85	0.08	G
سیستم MVFL	عضویت ورودی C_{real}	4	0.95	0.09	GB
		5	1.05	0.08	G
		6	1.15	0.06	GB
		7	1.22	0.05	G
		8	1.28	0.04	G
		1	0.117	0.005	G
		2	0.130	0.015	G
	پارامترهای توابع	3	0.170	0.025	GB
	عضویت ورودی r	4	0.230	0.035	GB
		5	0.300	0.040	G
		6	0.370	0.035	GB
		7	0.430	0.025	G
		8	0.475	0.015	G
		1	0	2	G
		2	15	8	GB
	پارامترهای توابع	3	30	10	G
	عضویت خروجی برای	4	45	12	GB
	پدیده خشکی	5	60	10	G
		6	75	8	GB
		7	88	6	G
خروجی‌های		8	100	2	G
سیستم MVFL		1	0	2	GB
		2	20	7	G
	پارامترهای توابع	3	38	9	GB
	عضویت خروجی برای	4	55	11	GB
	پدیده طغیان	5	70	9	G
		6	82	7	GB
		7	92	5	G
		8	100	2	G

$$\text{Total Rules} = N_{R_0} \times N_C \times N_r = 10 \times 8 \times 8 = 640 \quad (19)$$

بر این مبنای، هر قاعده از ساختار رابطه ۲۰ پیروی می‌کند.

$$\text{IF}(R_0 \text{ is } A_i) \text{ AND } (C \text{ is } B_j) \text{ AND } (r \text{ is } C_k) \text{ THEN } (\text{Dehydration is } D_l) \text{ AND } (\text{Flooding is } E_m) \quad (20)$$

در نهایت انتساب نتیجه‌گیر از یک اکتشاف هوشمند استفاده می‌کند که به صورت توابع نگاشت ۲۱ و ۲۲ فرمول‌نویسی شده است [۳۹].

$$l_{i,j,k} = \text{round} \left(1 + 7 \cdot \left(0.7 \cdot \frac{i-1}{9} + 0.3 \cdot \frac{j-1}{7} \right) \right) \quad (21)$$

$$m_{i,j,k} = \text{round} \left(1 + 7 \cdot \left(0.8 \cdot \frac{k-1}{7} + 0.2 \cdot \frac{j-1}{7} \right) \right) \quad (22)$$

مشروط به قیود منطقی که سازگاری و پایداری فیزیکی سیستم را تضمین می‌کنند.

۲-۶-۴. فازی‌سازی، روابط ورودی - خروجی و نافازی‌سازی

برای هر ورودی قطعی^۱ $x^* = [R_0^*, C^*, r^*]$ ، درجه عضویت به منظور فازی‌سازی^۲ به شرح (۲۳) محاسبه می‌شود [۴۰]. که برای هر $i = 1, 2, \dots, 10$ ، فرمول نویسی مشابه برای C^* و r^* در نظر گرفته شده است.

$$\mu_{R_0}^{(i)}(R_0^*) = \begin{cases} \exp \left(-\frac{(R_0^* - c_{R_0}^{(i)})^2}{2(\sigma_{R_0}^{(i)})^2} \right), & \text{Type = G} \\ \frac{1}{1 + \left| \frac{R_0^* - c_{R_0}^{(i)}}{\sigma_{R_0}^{(i)}} \right|^4}, & \text{Type = GB} \end{cases} \quad (23)$$

به‌علاوه، برای هر قاعده $R_{i,j,k}$ هر درجه فعال‌سازی^۳ از طریق حاصل ضرب‌ها t -norm به دست آمده است؛ لذا خواهیم داشت:

$$\alpha_{i,j,k} = \mu_{R_0}^{(i)}(R_0^*) \times \mu_C^{(j)}(C^*) \times \mu_r^{(k)}(r^*) \quad (24)$$

توابع عضویت خروجی تجمیع‌شده نیز از طریق عمل‌گرهای بیشینه از طریق روابط ۲۵ و ۲۶ به دست آمده است [۴۰].

$$\mu_{\text{agg, Dehydration}}(F_{\text{Dehydration}}) = \max_{i,j,k} \left[\alpha_{i,j,k} \cdot \mu_{\text{Dehydration}}^{(l_{i,j,k})}(F_{\text{Dehydration}}) \right] \quad (25)$$

$$\mu_{\text{agg, Flooding}}(F_{\text{Flooding}}) = \max_{i,j,k} \left[\alpha_{i,j,k} \cdot \mu_{\text{Flooding}}^{(m_{i,j,k})}(F_{\text{Flooding}}) \right] \quad (26)$$

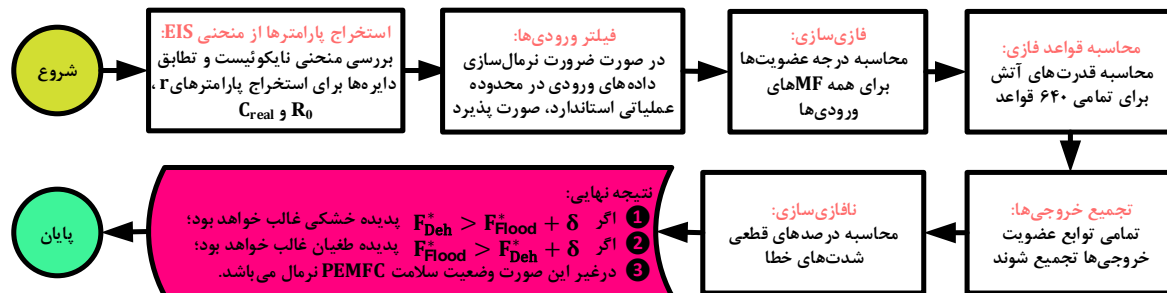
مقادیر قطعی خروجی (نافازی‌سازی^۴) بر مبنای متوسط‌گیری وزنی از طریق روابط ۲۷ و ۲۸ به دست آمده است.

$$F_{\text{Dehydration}}^* = \frac{\sum_{q=1}^Q F_{\text{Dehydration}}^{(q)} \cdot \mu_{\text{agg, Dehydration}}(F_{\text{Dehydration}}^{(q)})}{\sum_{q=1}^Q \mu_{\text{agg, Dehydration}}(F_{\text{Dehydration}}^{(q)})} \quad (27)$$

$$F_{\text{Flooding}}^* = \frac{\sum_{q=1}^Q F_{\text{Flooding}}^{(q)} \cdot \mu_{\text{agg, Flooding}}(F_{\text{Flooding}}^{(q)})}{\sum_{q=1}^Q \mu_{\text{agg, Flooding}}(F_{\text{Flooding}}^{(q)})} \quad (28)$$

در نهایت، ترتیب ریاضیاتی کامل در خصوص نگاشت $\mathcal{M}: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ از فضای پارامترهای استخراج شده EIS به فضای شدت و نوع خطا به صورت $\mathcal{M}(R_0^*, C^*, r^*) = (F_{\text{Deh}}^*, F_{\text{Flood}}^*)$ حاصل می‌شود؛ که هر خروجی از طریق روابط ۲۳ تا ۲۸ شامل فازی‌سازی، محاسبه قوانین، تجمیع و نافازی‌سازی تولید می‌شود. این فرمول نویسی نوآورانه به منظور تشخیص نوع و شدت خطا به صورت زمان واقعی می‌تواند در سیستم‌های PEMFC مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، به منظور جمع‌بندی تمامی مراحل روش تشخیص خطای پیشنهادی به صورت فلوچارت در شکل ۴ قابل دستیابی است.

1. Crisp
2. Fuzzification
3. Firing Strength
4. Defuzzification



شکل ۴. فلوجارت روش عیب‌یابی زمان‌واقعی در تشخیص پدیده خشکی و طغیان در عملکرد PEMFC مبتنی بر ترکیب MVFL و پارامترهای EIS

۳. نتایج و بحث

پس از طراحی و پیاده‌سازی چارچوب تشخیصی ترکیبی مبتنی بر تلفیق MVFL و پارامترهای منحنی EIS، مرحله اعتبارسنجی و تحلیل عملکرد سیستم و روی یک مجموعه داده شبیه‌سازی شده جامع انجام پذیرفته است. این مجموعه داده شامل ۵۰ حالت عملیاتی ثبت شده از مدل مدار معادل PEMFC تحت مطالعه بوده که به صورت تصادفی شرایط متنوعی از عملکرد نرمال، خشکی (با درجات خفیف تا شدید) و طغیان (با سطوح موضعی تا گسترده) را پوشش می‌دهد.

هدف از این شبیه‌سازی‌ها، ارزیابی دوگانه سیستم در تشخیص کیفی نوع خطا (تفکیک بین شرایط نرمال، خشکی و طغیان) و همچنین، تخمین کمی شدت هر خطا به صورت درصدی است. داده‌ای جامع شامل ۵۰ نقطه عملیاتی انجام شده که از شبیه‌سازی دقیق مدل PEMFC استخراج شده است. این نقاط به طور تصادفی ترکیبی از ۹ حالت سالم، ۱۵ حالت خشکی (از خفیف تا شدید) و ۲۶ حالت طغیان را پوشش می‌دهند. برای هر نقطه، پارامترهای R_0 ، C_{real} و r از منحنی EIS استخراج و به سیستم MVFL داده شده و خروجی آن با مقادیر مرجع مقایسه شده است. معیارهای کمی خطا در بخش نتایج گزارش شده‌اند: دقت کلی طبقه‌بندی ۹۸ درصد (ماتریس درهم‌ریختگی، میانگین خطای مطلق تخمین شدت ۱/۴۵ درصد و خطا به تفکیک کلاس شامل ۰/۱۷ درصد برای حالت نرمال، ۲/۱ درصد برای خشکی و ۱/۷ درصد برای طغیان. بیشینه خطای خشکی ۲/۹ درصد و بیشینه خطای طغیان ۱۰ درصد (تنها یک مورد) گزارش شده که تحلیل آن در نتایج آمده است.

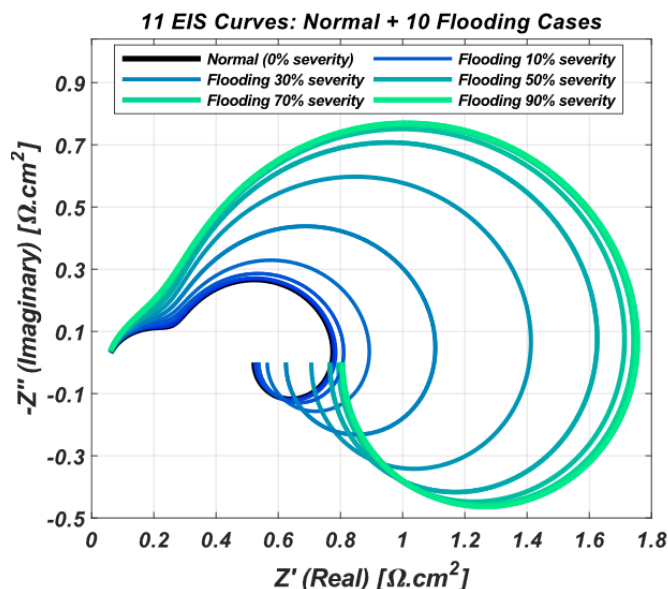
کلیه مراحل پیاده‌سازی با بهره‌گیری از نرم‌افزار متلب^۱ ورژن R2023a انجام شده و جزئیات تنظیم پارامترهای توابع عضویت و پایگاه قواعد در جدول‌های ۱ تا ۳ و نتایج شبیه‌سازی مستند شده‌اند. این رویه، قابلیت باز تولید نتایج را تضمین می‌کند و فرایند اعتبارسنجی را کاملاً شفاف و مبتنی بر شاخص‌های استاندارد خطا ارائه می‌دهد. نتایج به دست آمده که در ادامه به صورت شهودی و تحلیلی ارائه می‌شوند، گویای قابلیت‌های چشمگیر رویکرد پیشنهادی در مدیریت عدم قطعیت، مدل‌سازی شرایط میانی و ارائه خروجی‌های دقیق و قابل تفسیر است.

در جدول ۳ شاخص‌های آماری خطای تخمین شدت برای ۵۰ حالت عملیاتی (۹ حالت نرمال، ۱۵ حالت خشکی، ۲۶ حالت طغیان) لیست شده است.

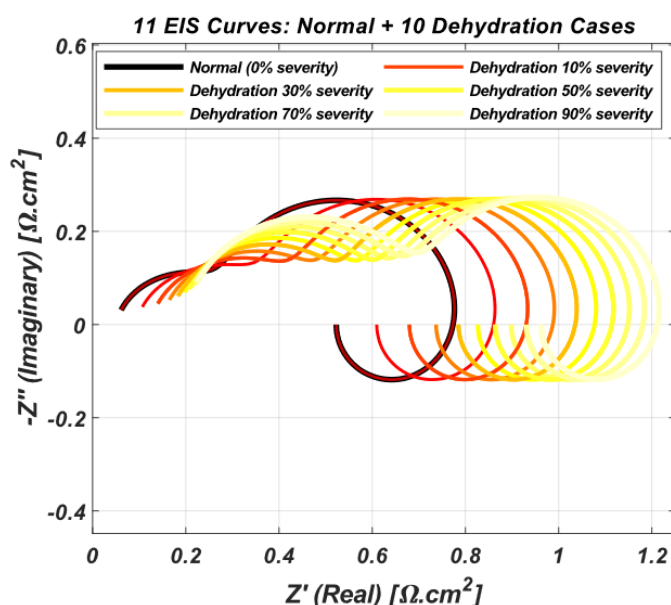
جدول ۳. شاخص‌های آماری خطای تخمین شدت برای ۵۰ حالت عملیاتی

حداکثر خطا (%)	حداقل خطا (%)	انحراف معیار (%)	میانگین خطای مطلق (%)	حالت عملیاتی
۴۰٫۰	۰۰٫۰	۱۲٫۰	۱۷٫۰	نرمال
۹۰٫۲	۱۰٫۱	۶۵٫۰	۱۰٫۲	خشکی
۰۰٫۱۰	۱۰٫۰	۸۵٫۱	۷۰٫۱	طغیان
۰۰٫۱۰	۰۰٫۰	۴۲٫۱	۴۵٫۱	کل داده‌ها

در شکل‌های ۵ و ۶، تغییرات کمی نمودار نایکویست ناشی از دو پدیده طغیان و خشکی نمایش داده شده است. در حالت طغیان (شکل ۵)، شعاع نیم‌دایره فرکانس پایین از مقدار $0.117 \Omega.cm^2$ در حالت نرمال به $0.475 \Omega.cm^2$ در طغیان شدید افزایش یافته است که معادل رشد ۳۰۶ درصدی است. در مقابل، در پدیده خشکی (شکل ۶)، مقاومت اهمی R_0 از $0.045 \Omega.cm^2$ در حالت نرمال به $0.195 \Omega.cm^2$ در خشکی کامل رسیده که افزایش حدود ۳۴۰ درصدی را نشان می‌دهد این ارقام حاکی از حساسیت بالای پارامترهای هندسی انتخاب‌شده نسبت به شدت هر یک از عیوب هستند.



شکل ۵. تأثیرات پدیده طغیان روی منحنی EIS مربوط به PEMFC

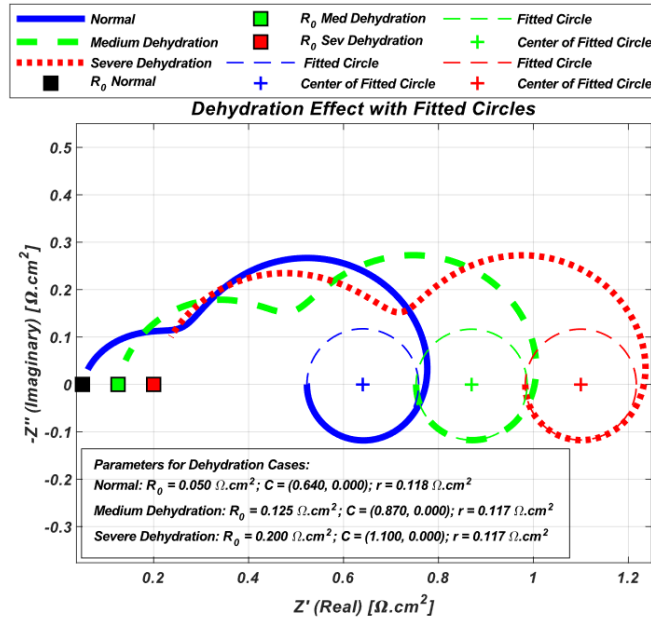


شکل ۶. تأثیرات پدیده خشکی روی منحنی EIS مربوط به PEMFC

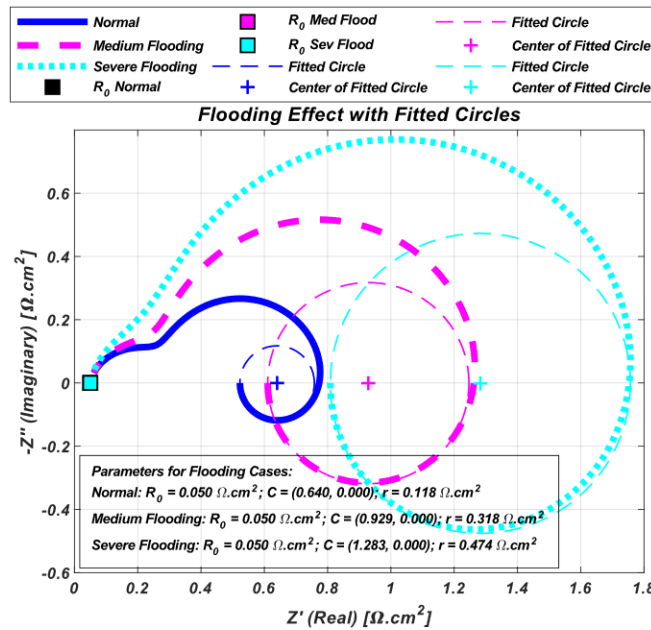
در شکل‌های ۷ و ۸، تغییرات کمی پارامترهای استخراج‌شده بر حسب افزایش شدت خطا ارائه شده است. در شکل ۷، مقدار R_0 برای خشکی خفیف (۲۰ درصد) برابر $0.075 \Omega.cm^2$ ، برای خشکی متوسط (۵۰٪) برابر $0.120 \Omega.cm^2$ و برای خشکی شدید (۹۰٪) برابر $0.180 \Omega.cm^2$ محاسبه شده است. در مورد پدیده طغیان (شکل ۸)، شعاع نیم‌دایره نفوذ (r) از $0.117 \Omega.cm^2$ در حالت نرمال به $0.475 \Omega.cm^2$ در طغیان کامل می‌رسد. این افزایش از یک الگوی نمایی با ضریب

تبین $R^2 = 0.989$ پیروی می‌کند. همچنین مؤلفه حقیقی مرکز نیم‌دایره (C_{real}) از $0.64 \Omega.cm^2$ به $1.28 \Omega.cm^2$ افزایش می‌یابد که بیانگر افزایش ۱۰۰ درصدی است.

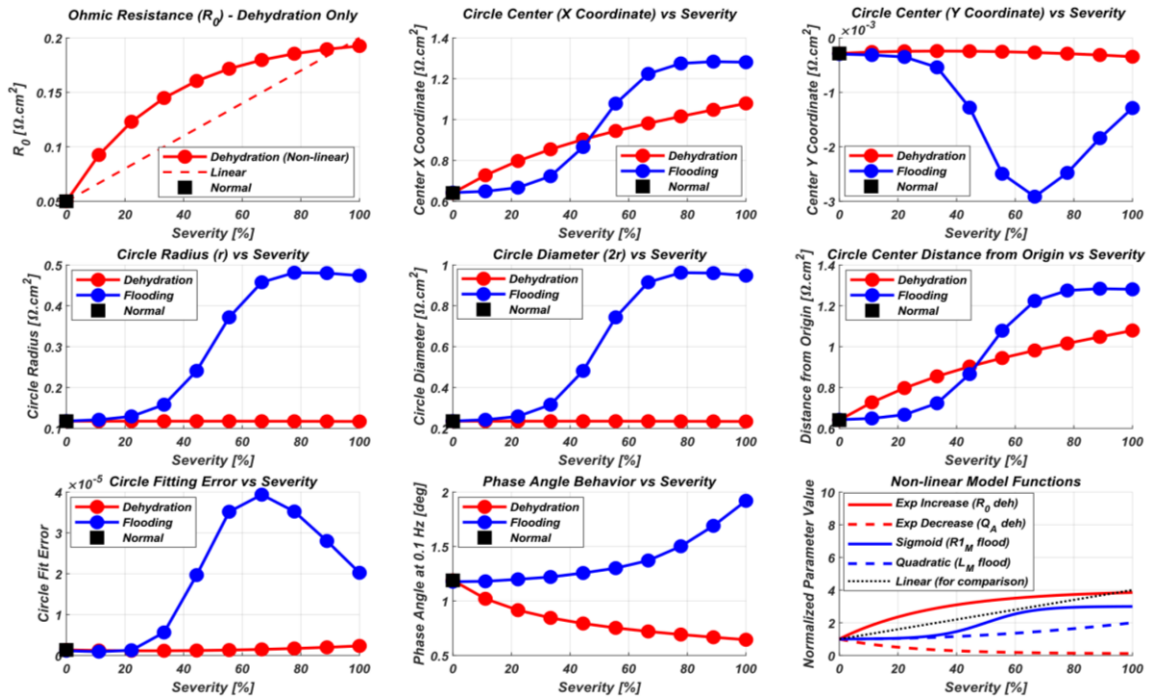
شکل ۹، پیچیدگی و ذات غیرخطی رابطه بین پارامترهای ورودی سیستم تشخیص و شدت واقعی خطاها را به‌وضوح آشکار می‌سازد و لزوم به‌کارگیری یک روش مدل‌سازی پیشرفته مانند MVFL را توجیه می‌کند. نمودار روند تغییرات سه پارامتر کلیدی R_0 ، C_{real} و r را در برابر یک طیف پیوسته از شدت خشکی (از ۰ تا ۱۰۰ درصد) و شدت طغیان (از ۰ تا ۱۰۰ درصد) به صورت هم‌زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هیچ‌یک از این روابط از الگوی خطی ساده پیروی نمی‌کنند.



شکل ۷. تأثیر میزان متوسط و شدید پدیده خشکی در پارامترهای منحنی EIS

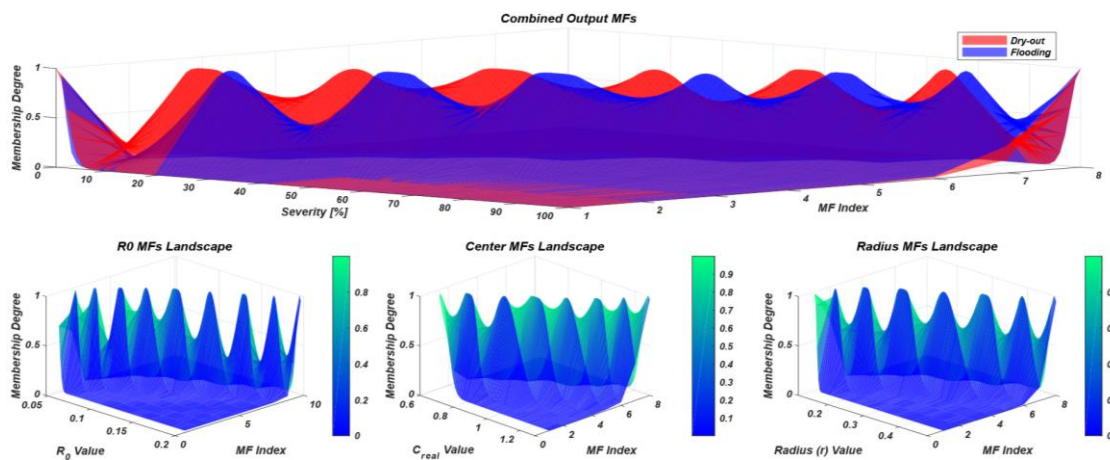


شکل ۸. تأثیر میزان متوسط و شدید پدیده طغیان در پارامترهای منحنی EIS



شکل ۹. رفتار غیر خطی پارامترهای مستخرج از EIS در برابر شدت خطاهای طغیان و خشکی

برای مثال، حساسیت R_0 به خشکی در سطوح پایین رطوبت (خشکی شدید) به مراتب بیشتر از سطوح خشکی خفیف است. به طور مشابه، پارامترهای مرتبط با طغیان نیز رفتاری اشباع‌شونده یا با شیب متغیر از خود نشان می‌دهند. این غیرخطی بودن می‌تواند ناشی از پدیده‌های فیزیکی پیچیده‌ای مانند توزیع ناهمگن آب در منافذ، اثرات آستانه‌ای در مسدودسازی کانال‌ها، و برهم‌کنش بین مکانیزم‌های انتقال بار و انتقال جرم باشد. بنابراین، یک مدل خطی ساده قادر به بازتولید دقیق این روابط پیچیده نیست و بنابراین استفاده از چارچوب MVFL که امکان تعریف سطوح گسسته متعدد و قواعد شرطی پیچیده را فراهم می‌آورد، یک انتخاب ضروری و بهینه است. در شکل ۱۰، سطوح پاسخ سه‌بعدی، ترسیم‌شده و در حقیقت نقشه جامع و پیوسته تصمیم‌گیری سیستم MVFL طراحی شده را به تصویر می‌کشد. این سطوح، حاصل نهایی فرایند استنتاج فازی هستند و نشان می‌دهند چگونه هر ترکیب ممکن از سه پارامتر ورودی R_0 ، C_{real} و r را به یک زوج خروجی قطعی شامل درصد خشکی و درصد طغیان نگاشت می‌شوند.



شکل ۱۰. سطوح سه‌بعدی از توابع عضویت برای سه ورودی و دو خروجی در سیستم تشخیص خطای پیشنهادی

همواری، پیوستگی و نبود ناپیوستگی یا نوسان تیز در این سطوح، حاکی از پایداری بالای سیستم طراحی شده است. به عنوان نمونه، برای یک مقدار ثابت C_{real} برابر با ۹۵،۰ در واحد $\Omega.cm^2$ ، افزایش R_0 از ۰/۰۶ به ۱۳،۰ در واحد $\Omega.cm^2$ باعث افزایش شدت خشکی از ۲۰ درصد به ۷۰ درصد می‌شود (شیب تقریبی ۸۳۳ درصد بر واحد مقاومت). همچنین در همین سطح، افزایش r از ۱۷،۰ به ۳۷،۰ در واحد $\Omega.cm^2$ ، شدت طغیان را از ۳۰ درصد به ۸۵ درصد می‌رساند. بیشینه شیب سطح پاسخ در ناحیه‌ای برابر با مقدار $R_0 > 0.12$ و $r > 0.35$ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده حساسیت بالای سیستم در تشخیص خطاهای شدید است.

نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۱ به طور جامع در شش بخش مجزا عملکرد سیستم تشخیص خطای پیل سوختی را به تصویر می‌کشد. در نمودار دقت تخمین شدت (شکل ۱۱ الف)، هماهنگی نزدیک بین مقادیر شدت واقعی و پیش‌بینی شده در خط مورب اصلی، دقت بالای سیستم پیشنهادی را در تخمین کمی خطاها تأیید می‌کند، به طوری که تنها یک مورد انحراف به چشم می‌خورد. ضریب همبستگی پیرسون بین این دو متغیر برابر ۰/۹۸۹ و میانگین خطای مطلق نرمال شده برابر ۱/۴۲ درصد محاسبه شد. از مجموع ۵۰ داده، تنها یک داده (مربوط به طغیان خفیف) دارای خطای ۱۰ درصد بوده و باقی داده‌ها خطای کمتر از ۳ درصد دارند. نمودارهای سه‌بعدی در شکل ۱۱ (ب)، بینش عمیق‌تری از روابط پیچیده در سیستم ارائه می‌دهند؛ این نمودار سه‌بعدی، رابطه غیرخطی پیچیده بین پارامترهای ورودی و شدت خطای خروجی را به صورت یک سطح پاسخ پیوسته مدل‌سازی کرده است. این سطح هموار نشان می‌دهد سیستم پیشنهادی به خوبی توانسته پدیده فیزیکی را درک و شبیه‌سازی کند. ماتریس درهم‌ریختگی در شکل ۱۱ (ج) به وضوح نشان می‌دهد سیستم در تشخیص ۲۵ مورد از ۲۶ خطای طغیان، هر ۹ حالت نرمال، و هر ۱۵ خطای خشکی موفق عمل کرده و به دقت کلی ۹۸ درصد دست یافته است. این امر بیانگر دقت بالای الگوریتم پیشنهادی است. این شکل نشان می‌دهد از ۲۶ نمونه طغیان، ۲۵ نمونه به درستی (حساسیت ۹۶/۱۵ درصد) و ۱ نمونه به اشتباه به عنوان حالت نرمال طبقه‌بندی شده است. تمامی ۱۵ نمونه خشکی (حساسیت ۱۰۰ درصد) و ۹ نمونه نرمال (دقت ۱۰۰ درصد) به درستی شناسایی شده‌اند. دقت کلی سیستم ۹۸ درصد به دست آمده است.

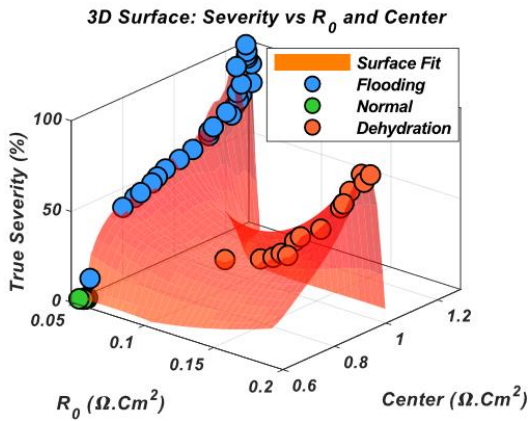
در شکل ۱۱ (د)، توزیع خطای شدت برای هر طبقه خطا نشان می‌دهد بیشترین دقت مربوط به حالت نرمال و کمترین دقت (که باز هم در حد بسیار مطلوبی است) مربوط به خطاهای خشکی است. طبق این شکل، کمترین خطا متعلق به حالت نرمال (۰/۱۷ درصد) و بیشترین خطا مربوط به پدیده خشکی (۲/۱ درصد) است. انحراف معیار خطا در طغیان (۱/۸۵ درصد) بیشتر از خشکی (۰/۶۵ درصد) است که تنوع بیشتر در داده‌های طغیان را نشان می‌دهد.

بررسی توزیع پارامترهای ورودی R_0 ، مرکز و شعاع استخراج شده از منحنی EIS در شکل ۱۱ (ه) به تصویر کشیده شده است و نشان می‌دهد توزیع‌های مجزای این پارامترها برای هر نوع خطا، بستر فیزیکی مناسبی برای تصمیم‌گیری سیستم فازی فراهم کرده است. در نهایت، نمایش فضای ویژگی سه‌بعدی در شکل ۱۱ (و)، جدایی‌پذیری واضح خوشه‌های داده مربوط به هر یک از سه حالت عملیاتی را نشان می‌دهد که علت پایه‌ای عملکرد موفق سیستم است.

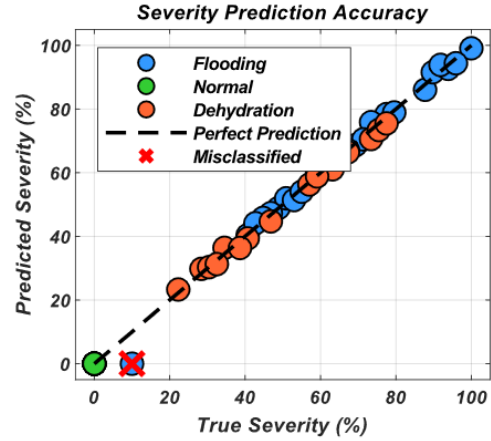
فضای ویژگی سه‌بعدی در شکل ۱۱ (و) نشان می‌دهد خوشه‌های مربوط به سه حالت عملیاتی با فاصله اقلیدسی مرکز به مرکز بیش از ۰/۱۵ درصد واحد از یکدیگر جدا شده‌اند. کمترین فاصله بین خوشه طغیان و خوشه نرمال برابر ۰/۱۲ درصد واحد بوده که بیانگر چالش تشخیصی در شرایط طغیان خفیف است.

مجموعه نمودارهای تحلیل آماری و زمانی در شکل ۱۲، پایداری و قابلیت اطمینان سیستم را طی زمان و تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار می‌دهند. نمودار توزیع خطای شدت (شکل ۱۲ الف) بر اساس نوع خطا عملکرد سیستم تشخیص را برای هر یک از سه حالت عملیاتی به تفکیک نشان می‌دهد. برای حالت نرمال (۹ نمونه)، میانگین خطای شدت تنها ۰/۱۷ درصد است که نشان می‌دهد سیستم به دقت بالا و پایداری کامل در شناسایی شرایط بهینه عملیاتی دست یافته است. محدوده خطا برای این حالت بین ۰ تا ۰/۴ درصد متغیر است که در حد دقت ابزارهای اندازه‌گیری است. در مورد خطاهای خشکی (۱۵ نمونه)، میانگین خطای شدت ۲/۱ درصد محاسبه شده که عمدتاً ناشی از تغییرات غیرخطی در رفتار پیل سوختی در شرایط کم‌آبی است. با این وجود، حداکثر خطای مشاهده شده برای این حالت کمتر از ۳ درصد است که برای کاربردهای عملی کاملاً قابل قبول است.

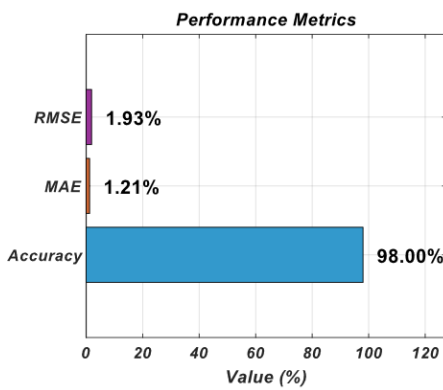
برای خطاهای طغیان (۲۶ نمونه)، میانگین خطای شدت ۱/۷ درصد به دست آمده که نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب مدل فازی با پدیده فیزیکی غرق‌آبی شدن پیل است. جالب توجه است که تنها نمونه با خطای قابل توجه ۱۰ درصد، مربوط به یک حالت طغیان خفیف است که به دلیل نزدیکی پارامترهای آن به شرایط نرمال، به اشتباه در این دسته قرار گرفته است.



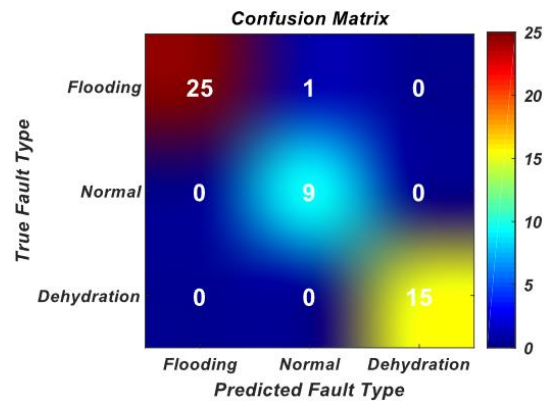
(ب)



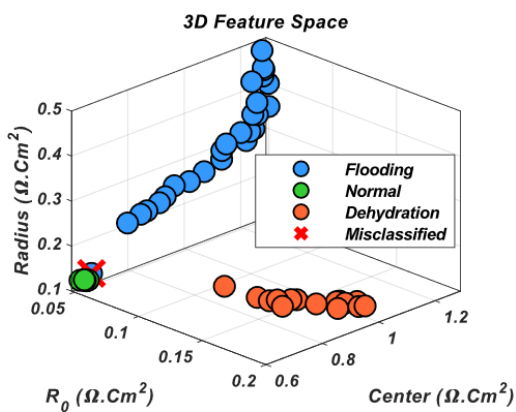
(الف)



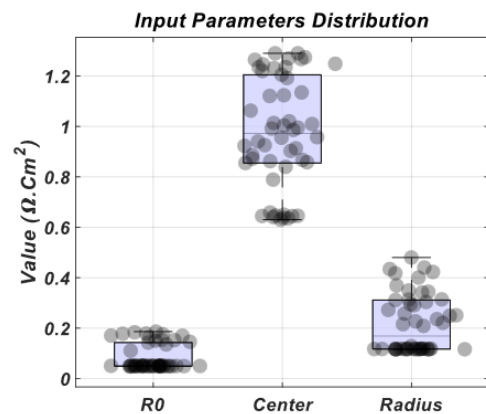
(د)



(ج)



(و)



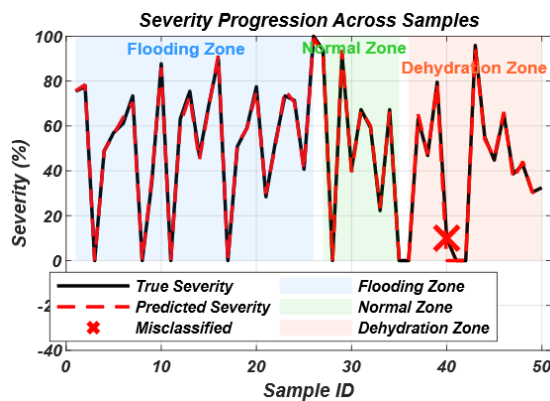
(ه)

شکل ۱۱. نتایج سیستم تشخیص خطای پیشنهادی برای ۵۰ حالت عملیاتی شامل ۹ حالت نرمال، ۱۵ حالت خشکی و ۲۶ حالت طغیان؛ (الف) دقت تخمین شدت خطا؛ (ب) شدت‌های خطاهای در نظر گرفته شده؛ (ج) ماتریس درهم‌ریختگی؛ (د) خطا و دقت بر حسب درصد؛ (ه) توزیع پارامترهای ورودی سیستم MVFL پیشنهادی؛ (و) فضای سه‌بعدی تغییرات پارامترهای ورودی سیستم MVFL پیشنهادی

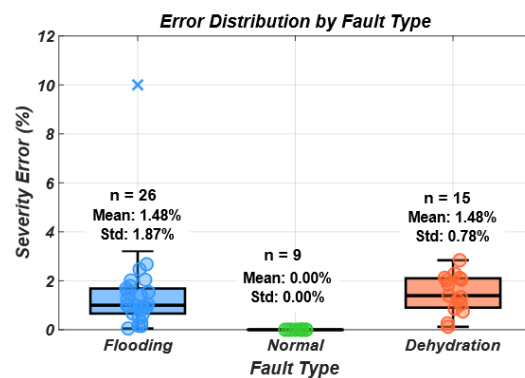
این توزیع خطاها به وضوح نشان می‌دهد MVFL پیشنهادی نه تنها در تشخیص نوع خطا، بلکه در تخمین کمی شدت آن نیز از دقت و پایداری بالایی برخوردار است. تفاوت در الگوی توزیع خطا برای هر نوع عیب، بازتابی از ماهیت فیزیکی متفاوت پدیده‌های خشکی و طغیان در پیل سوختی است که سیستم فازی به خوبی توانسته این تفاوت‌ها را مدل‌سازی کند.

روند تغییرات شدت خطا در طول نمونه‌ها در شکل ۱۲(ب) به وضوح تفاوت‌های توزیعی ذاتی شدت خطا را برای هر نوع خطا نمایش می‌دهد؛ تمرکز شدید حول صفر برای حالت نرمال، گستردگی بیشتر برای خشکی، و توزیع دوگانه برای سیلابی در این شکل قابل مشاهده است. ماتریس همبستگی در شکل ۱۲(ج) نشان می‌دهد شدت واقعی و پیش‌بینی شده دارای همبستگی ۰/۹۸ هستند. همچنین، همبستگی بین R_0 و شدت خشکی برابر ۰/۹۵ و بین r و شدت طغیان برابر ۰/۹۲ به دست آمده است. همبستگی میان R_0 و r تنها ۰/۲۳ بوده که بیانگر استقلال این دو پارامتر و توانایی سیستم در تفکیک هم‌زمان دو پدیده است. در نهایت، نمودار مختصات موازی در شکل ۱۲(د) با نمایش تمام نمونه‌ها در یک نما، الگوهای مشترک درون هر کلاس و تمایز واضح بین کلاس‌ها را به شکلی گویا به تصویر می‌کشد. در مجموع، این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که روش ترکیبی MVFL و پارامترهای هندسی EIS نه تنها دقیق، بلکه پایدار، قابل اعتماد، و دارای مبانی فیزیکی و آماری مستحکمی است که آن را برای کاربردهای عملی در محیط‌های واقعی مناسب می‌سازد.

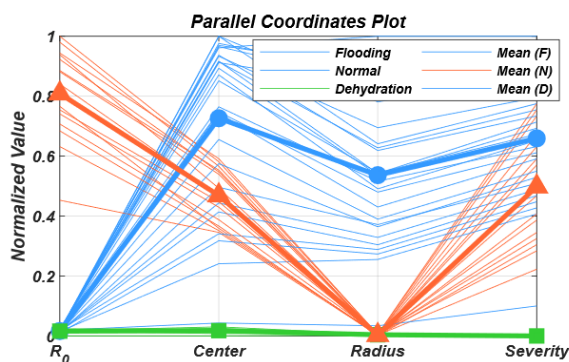
این نمودار نشان می‌دهد ۸۲ درصد از نمونه‌های نرمال دارای $R_0 < 0.065$ و $C_{real} < 0.85$ و $r < 0.23$ هستند. نمونه‌های خشکی عمدتاً با $R_0 > 0.09$ و نمونه‌های طغیان با $r > 0.3$ قابل شناسایی هستند.



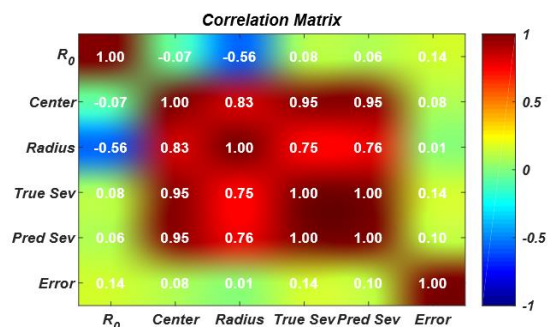
(ب)



(الف)



(د)

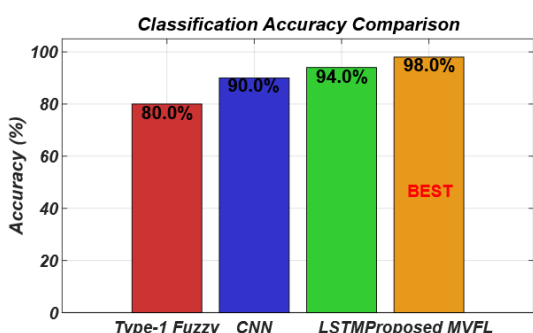


(ج)

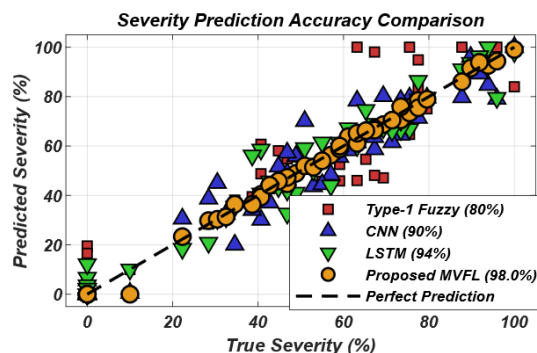
شکل ۱۲. نتایج سیستم تشخیص خطای پیشنهادی برای ۵۰ حالت عملیاتی؛ (الف) توزیع خطا برای هر حالت عملیاتی؛ (ب) روند تغییرات شدت خطا در طول نمونه‌ها؛ (ج) ماتریس همبستگی؛ (د) نمودار مختصات موازی

۳-۱. مطالعه مقایسه‌ای با سایر پژوهش‌های مرتبط

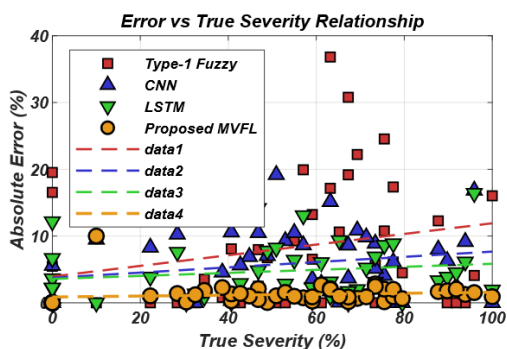
بر اساس تحلیل جامع مقایسه‌ای انجام‌شده در این بخش، همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، روش پیشنهادی مبتنی بر MVFL با سایر روش‌های مرسوم شامل LSTM [۱۲]، CNN [۴] و فازی کلاسیک نوع-۱ [۱۳] تحت مقایسه قرار گرفته است؛ بر اساس این مطالعه روش پیشنهادی به صورت معناداری عملکرد برتری را در تشخیص و پیش‌بینی شدت خطاهای سیستم PEMFC در مقایسه با سه روش مرسوم دیگر نشان می‌دهد. در شکل ۱۳ (الف) دقت پیش‌بینی شدت خطا را برای هر چهار روش به صورت پراکندگی حول خط برازش کامل نمایش می‌دهد. در این نمودار، نقاط مربوط به روش MVFL انسجام بیشتری حول خط مورب (پیش‌بینی ایده‌آل) داشته و پراکندگی کمتری را نسبت به روش‌های دیگر نشان می‌دهد بیانگر دقت بالاتر این روش در پیش‌بینی مقدار شدت خطاست. میانگین قدر مطلق خطا برای روش MVFL برابر ۲ درصد، برای LSTM برابر ۶ درصد، برای CNN برابر ۱۰ درصد و برای فازی نوع-۱ برابر ۲۰ درصد محاسبه شد. شکل ۱۳ (ب) به صورت میله‌ای دقت طبقه‌بندی کلی هر روش را مقایسه کرده که در آن روش MVFL با میانگین دقت ۹۸ درصد در رتبه اول قرار گرفته و پس از آن به ترتیب روش‌های LSTM با دقت ۹۴ درصد، CNN با دقت ۹۰ درصد و منطق فازی کلاسیک نوع ۱ با دقت ۸۰ درصد قرار دارند.



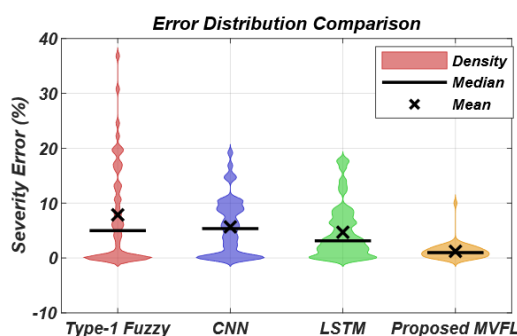
(ب)



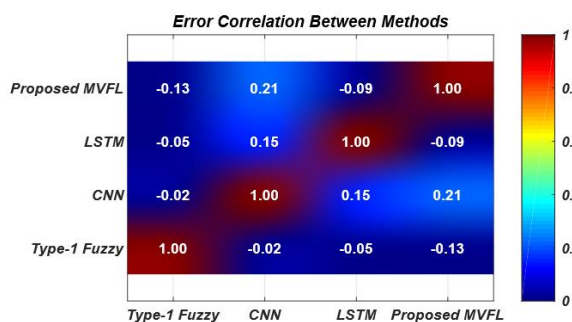
(الف)



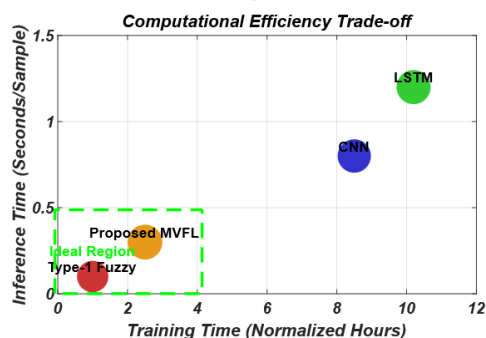
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۱۳. مطالعه مقایسه‌ای با سایر پژوهش‌های مرتبط؛ (الف) دقت پیش‌بینی شدت خطا؛ (ب) دقت طبقه‌بندی کلی روش‌های مختلف؛ (ج) توزیع خطا؛ (د) رابطه خطا با شدت واقعی خطا؛ (ه) مبادله بین زمان آموزش و استنتاج؛ (و) ماتریس همبستگی خطاها

توزیع خطا در شکل ۱۳(ج) نشان می‌دهد خطاهای روش MVFL نه تنها میانگین کمتری دارند، بلکه واریانس پایین‌تری نیز نشان می‌دهند که بیانگر پایداری بیشتر این روش است. طبق این شکل، واریانس خطا در روش MVFL برابر ۲/۰۱، در LSTM برابر ۴/۵۲، در CNN برابر ۸/۳۰ و در فازی نوع-۱ برابر ۲۱/۴۵ است که پایداری بالای روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. رابطه خطا با شدت واقعی خطا در شکل ۱۳(د) بیانگر آن است که روش پیشنهادی در تمامی سطوح شدت خطا (از صفر تا ۱۰۰ درصد) رفتار پایدارتری دارد، در حالی که روش‌های دیگر به‌ویژه در سطوح شدت خطای بالا نوسانات بیشتری از خود نشان می‌دهند. مبادله بین زمان آموزش و استنتاج در شکل ۱۳(ه) موقعیت مطلوب روش MVFL را در ناحیه ایده‌آل (پایین - چپ) نشان می‌دهد که بیانگر تعادل بهینه بین دقت بالا و کارایی محاسباتی است. طبق این شکل روش MVFL با زمان آموزش ۲/۸ ثانیه و زمان استنتاج ۰/۳۵ ثانیه به ازای هر نمونه، بهترین تعادل بین دقت و سرعت را فراهم می‌آورد. در نهایت، ماتریس همبستگی خطاها در شکل ۱۳(و) نشان می‌دهد خطاهای روش MVFL کمترین همبستگی را با خطاهای روش‌های دیگر دارد، که این امر نشان‌دهنده رویکرد متمایز و مکمل این روش در تشخیص عیب است.

در مجموع، یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند روش پیشنهادی MVFL با ترکیب مزایای تفسیرپذیری روش‌های فازی و دقت بالای روش‌های پیچیده، راه‌حلی متوازن و مؤثر برای تشخیص عیب در پیل‌های سوختی ارائه می‌دهد که می‌تواند به صورت عملی در سیستم‌های نظارت بلادرنگ صنعتی به کار گرفته شود.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک چارچوب تشخیصی نوین و یکپارچه برای پایش وضعیت خطا در سیستم PEMFC ارائه شد که بر پایه تلفیق هوشمندانه MVFL و پارامترهای هندسی کلید استخراج‌شده از منحنی EIS بنا شده است. رویکرد پیشنهادی با بهره‌گیری از سه شاخص هندسی حساس، مقاومت اهمی (R_0)، شعاع نیم‌دایره نفوذ (r) و مؤلفه حقیقی مرکز آن (C_{real}) و طراحی یک سیستم استنتاج فازی با ۶۴۰ قانون فازی، توانست طیف پیوسته‌ای از شرایط عملیاتی، از خشکی مطلق تا طغیان کامل، شامل حالت‌های میانی و مرزی پیچیده را با دقت تشخیص ۹۸ درصد شناسایی کند و شدت هر پدیده را به صورت کمی با دقت بسیار بالا تخمین بزند. این روش با حذف نیاز به برازش مدل‌های مدار معادل پیچیده و با دارا بودن پیچیدگی محاسباتی مناسب، پتانسیل بالایی برای پیاده‌سازی در سیستم‌های پایش و کنترل بلادرنگ دارد. دستاورد این تحقیق، گامی مؤثر در جهت افزایش قابلیت اطمینان، عمر عملیاتی و درنهایت تسریع در تجاری‌سازی پیل‌های سوختی پلیمری با ارائه یک ابزار تشخیصی دقیق، سریع و تفسیرپذیر است. پس از طراحی و پیاده‌سازی چارچوب تشخیصی ترکیبی مبتنی بر تلفیق MVFL و پارامترهای منحنی EIS، مرحله اعتبارسنجی و تحلیل عملکرد سیستم با بهره‌گیری از نرم‌افزار متلب انجام شد. این مجموعه داده شامل ۵۰ حالت عملیاتی ثبت‌شده از مدل مدار معادل PEMFC تحت مطالعه بود که به صورت تصادفی شرایط متنوعی از عملکرد نرمال، خشکی و طغیان را پوشش می‌دهد. در مجموع در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم، روش پیشنهادی از لحاظ دقت، پایداری، سرعت پردازش و عملکرد کلی برتری چشم‌گیری را از خود نشان داد. پژوهش حاضر دارای محدودیت‌هایی نظیر اعتبارسنجی مبتنی بر داده‌های شبیه‌سازی، فرض همگنی رطوبت در مقیاس میکروسکوپی بدون مدل‌سازی دقیق پدیده‌های دوفازی موضعی، و وابستگی توابع عضویت بهینه به محدوده عملیاتی خاص است. بر این اساس، خطامشی تحقیقات آتی شامل صحت‌سنجی تجربی چارچوب تشخیصی روی یک استک پیل سوختی واقعی تحت بار دینامیکی خودرویی، توسعه سیستم فازی تطبیقی برای تنظیم آنلاین توابع عضویت با تغییرات محیطی و کهنگی، یکپارچه‌سازی ماژول تشخیص با کنترل پیش‌بین جهت مدیریت فعال آب و افزایش طول عمر، و بررسی تعمیم‌پذیری روش به انواع دیگر پیل‌ها و کاربردهای ثابت ترسیم شده است.

منابع

- [1] Zadorozhna DB, Grajeda JS, López LO, Benavides O, Ramírez SF. Assessing the accuracy and replicability of water formation modeling in PEM fuel cells: a sensitivity analysis of key performance parameters using computational fluid dynamics. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025 Feb 14. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.009>
- [2] Ma L, Zhao H, Qu Y, Zhao S, Yu Y, Wei W. Reduced-order active disturbance rejection control method for PEMFC air intake system based on the estimation of oxygen excess ratio. *IET Renewable Power Generation*. 2023;17(4):951-63. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12647>
- [3] Zhao L, Dai H, Pei F, Ming P, Wei X, Zhou J. A comparative study of equivalent circuit models for electro-chemical impedance spectroscopy analysis of proton exchange membrane fuel cells. *Energies*. 2022;15(1):386. <https://doi.org/10.3390/en15010386>
- [4] Guo Z, Ma R, Ma H, Li Z, Xiong P, Jiang W, Zhou Y. An Online Fault Diagnosis Method for PEMFC Based on Output Voltage and Transfer Convolutional Neural Network. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2025. <https://doi.org/10.1109/TIE.2024.3525115>
- [5] Kamal MM, Yu DW, Yu DL. Fault detection and isolation for PEM fuel cell stack with independent RBF model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2014 Feb 1;28:52-63. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.10.002>
- [6] Bäumlér A, Azib T, Benterki A, Meng J, Boukhnifer M. A Learning-based Energy Management Strategy Considering Flooding and Drying Faults for Fuel Cell-Battery Hybrid Vehicles. *Psychology*. 2024:828-33. <https://doi.org/10.1109/MED61351.2024.10566230>
- [7] Sani M, Piffard M, Heiries V. Fault detection for pem fuel cells via analytical redundancy: A critical review and prospects. *Energies*. 2023;16(14):5446. <https://doi.org/10.3390/en16145446>
- [8] Yu D, Li X, Zhou F, Araya SS, Sahlin SL, Subramanian VR, Liso V. Online fault detection and isolation of PEMFC based on EIS and data-driven methods: Feasibility study and prospects. *Journal of Power Sources*. 2025;641:236915. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236915>
- [9] Li Y, Huang Q, Yuan H, Wang X, Wei X, Zhu J, Ma R, Gao L, Dai H. A review of polarization dynamics analysis of proton exchange membrane fuel cell: Distribution of relaxation time based method. *Science China Technological Sciences*. 2025;68(10):2010102. <https://doi.org/10.1007/s11431-025-3017-4>
- [10] Zhang T, Hou Z, Li X, Chen Q, Wang Q, Lüddeke C, Wu L, Wu X, Sun W. A novel multivariable prognostic approach for PEMFC degradation and remaining useful life prediction using random forest and temporal convolutional network. *Applied Energy*. 2025;385(C). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125569>
- [11] Ao Y, Laghrouche S, Depernet D. Diagnosis of proton exchange membrane fuel cell system based on adaptive neural fuzzy inference system and electrochemical impedance spectroscopy. *Energy Conversion and Management*. 2022;256:115391. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115391>
- [12] Liu Q, Zang W, Zhang W, Zhang Y, Tong Y, Feng Y. Steady-State Model Enabled Dynamic PEMFC Performance Degradation Prediction via Recurrent Neural Network. *Energies*. 2025;18(10):2665. <https://doi.org/10.3390/en18102665>
- [13] Rubio GA, Agila WE. A fuzzy model to manage water in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Processes*. 2021;9(6):904. <https://doi.org/10.3390/pr9060904>
- [14] Omer Abbaker AM, Wang H, Tian Y. Robust model-free adaptive interval type-2 fuzzy sliding mode control for PEMFC system using disturbance observer. *International Journal of Fuzzy Systems*. 2020;22(7):2188-203. <https://doi.org/10.1007/s40815-020-00916-8>
- [15] Fan L, Ma X. Maximum power point tracking of PEMFC based on hybrid artificial bee colony algorithm with fuzzy control. *Scientific Reports*. 2022;12(1):4316. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08327-5>
- [16] Franco EE, Henao Santa S, Cabrera JJ, Laín S. Air Flow Monitoring in a Bubble Column Using Ultrasonic Spectrometry. *Fluids*. 2024;9(7):163. <https://doi.org/10.3390/fluids9070163>
- [17] Rostan K, Kruglov R, Seiß V, Thiel S, Eichelbaum M, Engelbrecht R. In-situ Temperature and Humidity Measurement in PEM Fuel Cells with Off-the-shelf FBG. In *Optical Fiber Sensors 2023*. p. Tu3-36. Optica Publishing Group. <https://doi.org/10.1364/OFS.2023.Tu3.36>

- [18] Li Q, Wang H, Wang T, Li X, Liu Y, Chen W, You Z. Online diagnosis method of water management faults based on hybrid-frequency electrochemical impedance spectroscopy for PEMFC. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2024. <https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3427401>
- [19] Cao TF, Lin H, Chen L, He YL, Tao WQ. Numerical investigation of the coupled water and thermal management in PEM fuel cell. *Applied energy*. 2013;112:1115-25. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.031>
- [20] Duque L, Molinero A, Oller JC, Barcala JM, Diaz-Alvarez E, Folgado MA, Chaparro AM. Study of Mass Transport in the Anode of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell with a New Hydrogen Flow-Rate Modulation Technique. *ChemElectroChem*. 2024;11(14):e202400100. <https://doi.org/10.1002/celec.202400100>
- [21] Lv J, Yu Z, Zhang H, Sun G, Muhl P, Liu J. Transformer based long-term prognostics for dynamic operating PEM fuel cells. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2023;10(1):1747-57. <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3266803>
- [22] Li T, Bao Z, Yao R, Pan X, Bai F, Peng Z, Jiao K, Liu Z. Two-phase flow in the gas diffusion layer with different perforation of proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Green Energy*. 2025;22(6):1063-71. <https://doi.org/10.1080/15435075.2024.2347269>
- [23] Cheikh A, Steiner NY, Pahon E, Damour C, Benne M, Hissel D. Fault diagnosis of PEMFC using semi-empirical signal processing and K-means clustering. In *Symposium de Génie Electrique 2023*. <https://hal.science/hal-04452049>
- [24] Romey W, Vijayaraghavan K. Extended Kalman Filter for Normal and Oxygen-starved PEM Fuel Cells using a Lumped Pseudo-2D Model. In *2022 IEEE International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (AdCONIP)*. 2022. p. 263-268. IEEE. <https://doi.org/10.1109/AdCONIP55568.2022.9894212>
- [25] Huo H, Chen J, Wang K, Wang F, Jin G, Chen F. State estimation of membrane water content of PEMFC based on GA-BP neural network. *Sustainability*. 2023;15(11):9094. <https://doi.org/10.3390/su15119094>
- [26] Wei Y, Zhao Y, Yun H. Estimating PEMFC ohmic internal impedance based on indirect measurements. *Energy Science & Engineering*. 2021;9(8):1134-47. <https://doi.org/10.1002/ese3.878>
- [27] Zhou S, Zheng S, Hu Z. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Fault Rapid Diagnosis Method Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy and Fuzzy c-Means Algorithm. *SAE Technical Paper 2019-01-5032*; 2019. <https://doi.org/10.4271/2019-01-5032>
- [28] Chambers JE, Gunn DA, Wilkinson PB, Ogilvy RD, Ghataora GS, Burrow MP, Smith RT. Non-invasive time-lapse imaging of moisture content changes in earth embankments using electrical resistivity tomography (ERT). In *Advances in transportation geotechnics*. 2008. p. 489-494. CRC Press. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/7001/1/CH059.pdf>
- [29] Singh K, Kumar R, Kumar P, Nehra V, Gupta RK, Yusuf M. Few-layer Si and WS₂-based surface plasmon resonance sensor for water salinity concentration detection: theoretical insight. *Plasmonics*. 2024;19(6):3155-65. <https://doi.org/10.1007/s11468-024-02209-4>
- [30] Mahdavi Nasab AM, Roghani Araghi A. Improving Gas Turbine Performance in an Island Energy System Using Fuel Cells. *Journal of Sustainable Energy Systems*. 2024;3(4):401-17. <https://doi.org/10.22059/ses.2024.382693.1098>
- [31] Lv J, Yu Z, Zhang H, Sun G, Muhl P, Liu J. Transformer based long-term prognostics for dynamic operating PEM fuel cells. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2023;10(1):1747-57. <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3266803>
- [32] Moezzi SM, Shirazi MA, Monfared AR, Yousefi H. Comparison of classical statistical models for forecasting CO₂ emissions, GDP, and TBL cancer indicators: A comparative analysis of East and West Asia. *Energy Nexus*. 2026 Mar 1;21:100682. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2026.100682>
- [33] Shirazi MA, Zahedi R, Yousefi H, Aslani A. Environmental and damage assessment of electric vehicles compared to internal combustion engine vehicles under various ambient temperature scenarios using the LCA approach. *Energy Nexus*. 2025 Nov 19:100606. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100606>

- [34] Ma Y, Wang X, Yuan H, Chang G, Zhu J, Dai H, Wei X. Review of electrochemical impedance spectroscopy in fault diagnosis for proton exchange membrane fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025 Apr 1;211:115226. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115226>
- [35] Pivac I, Šimić B, Barbir F. Experimental diagnostics and modeling of inductive phenomena at low frequencies in impedance spectra of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*. 2017 Oct 15;365:240-8. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.08.087>
- [36] Yu D, Li X, Zhou F, Araya SS, Sahlin SL, Subramanian VR, Liso V. Online fault detection and isolation of PEMFC based on EIS and data-driven methods: Feasibility study and prospects. *Journal of Power Sources*. 2025 Jun 15;641:236915. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236915>
- [37] Liao Y, Wu J, Luo X. A Multi-valued Fuzzy Logic for Qualitative Reasoning in Healthcare. In *The International Conference on Healthcare Science and Engineering 2018* Sep 10 (pp. 235-250). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6837-0_17
- [38] Bhattacharjee D, Kim W, Chattopadhyay A, Waser R, Rana V. Multi-valued and fuzzy logic realization using TaOx memristive devices. *Scientific reports*. 2018 Jan 8;8(1):8. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18329-3>
- [39] Kagan E, Rybalov A, Yager RR. Multi-Valued Logic for Decision-Making Under Uncertainty. Birkhäuser; 2025 Feb 17. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-74762-5>
- [40] Sakharov A. Multi-Valued Models for Intuitionistic Logic. In *2025 IEEE 55th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL) 2025* Jun 1 (pp. 21-25). IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.1109/ISMVL64713.2025.00013>