

Comparison of Hydrogen and Methane as Heating Gases in the Anode Channel during the Dual-Channel Heating Process of a Solid Oxide Fuel Cell

Masoud Hami, Javad Mahmoudimehr*^{ID}

Thermo-fluid Department, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: July 13, 2025

Revised: November 03, 2025

Accepted: November 04, 2025

ePublished: November 18, 2025

ABSTRACT

Dual-channel heating, where air and fuel are injected into the cathode and anode channels, respectively, is a common method for increasing the temperature of solid oxide fuel cells (SOFCs). However, the effects of heating gases in the anode channel on the thermal performance of SOFCs have not been investigated. In this study, the heating process of an SOFC is simulated using two combinations of air-hydrogen and air-methane through a transient model based on the finite volume method. The study aims to evaluate the performance of these gas combinations in terms of heating duration and temperature gradient, under various inlet velocities and gas heating rates. The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) multi-criteria decision-making method is then used to identify the optimal solution. The results indicate that hydrogen transfers heat to the cell structure more rapidly within a short distance after entering the channel. In contrast, air and methane distribute heat transfer over a longer flow path. Moreover, the maximum temperature gradient predominantly occurs near the gas inlet regions. In addition, the heating duration with the air-methane combination is shorter than that of air-hydrogen, with the difference becoming more pronounced at lower inlet velocities. Conversely, the effect of the heating gas type on the temperature gradient depends on the gas inlet velocity. Ultimately, the air-hydrogen combination, which results in a heating duration of 1290 s and a maximum temperature gradient of 211 K cm^{-1} , is identified as the optimal choice according to the TOPSIS method.

Keywords: Heating Gases, Heat-up Process, Numerical Simulation, Solid Oxide Fuel Cell, Temperature Gradient, Time Duration

How to cite this article

Hami M, Mahmoudimehr J, Comparison of Hydrogen and Methane as Heating Gases in the Anode Channel during the Dual-Channel Heating Process of a Solid Oxide Fuel Cell. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(10):653-666.

*Corresponding author's email: Mahmoudimehr@guilan.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0001-9866-9359



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



مقایسه استفاده از گازهای گرم‌کننده هیدروژن و متان در کانال آند در فرایند گرمایش دوکاناله پیل سوختی اکسید جامد

مسعود حامی، جواد محمودی‌مهر*

گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

گرمایش دوکاناله که در آن گازهای هوا و سوخت به ترتیب به کانال‌های کاتد و آند تزریق می‌شوند، یکی از روش‌های رایج برای افزایش دمای پیل‌های سوختی اکسید جامد است. با این وجود، تاکنون تأثیر استفاده از گازهای گرم‌کننده در کانال آند بر عملکرد حرارتی این پیل‌های سوختی با هم مقایسه نشده است. در این پژوهش، فرایند گرمایش گذرای یک پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از دو ترکیب هوا-هیدروژن و هوا-متان، به روش عددی حجم محدود شبیه‌سازی شده است. هدف از این مقایسه، ارزیابی عملکرد این ترکیب‌های گازی بر اساس دو شاخص کلیدی مدت‌زمان گرمایش و گرادیان دمایی در چند سرعت و نرخ افزایش دمای گاز ورودی است. در ادامه، برای انتخاب پاسخ برتر از میان پاسخ‌های موجود، از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه تاپسیس (TOPSIS) بهره گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که هیدروژن در فاصله‌ای کوتاه پس از ورود به کانال، گرمای خود را سریع‌تر به ساختار پیل سوختی منتقل می‌کند؛ در حالی که انتقال حرارت هوا و متان در مسیر طولانی‌تری انجام می‌شود. همچنین، بیشینه گرادیان دما عمدتاً در نواحی نزدیک به ورودی گازها ایجاد می‌شود. علاوه بر این، مدت‌زمان گرمایش با ترکیب هوا-متان همواره کمتر از ترکیب هوا-هیدروژن است و این تفاوت در سرعت‌های ورودی پایین‌تر، قابل‌توجه‌تر است. از سوی دیگر، تأثیر نوع گاز گرم‌کننده بر بیشینه گرادیان دمایی وابسته به سرعت گاز ورودی است. در نهایت، از میان گزینه‌های بررسی‌شده، ترکیب هوا-هیدروژن با مدت‌زمان گرمایش ۱۲۹۰ ثانیه و بیشینه گرادیان دمایی ۲۱۱ کلوین بر سانتی‌متر به‌عنوان گزینه برتر از دیدگاه روش تاپسیس انتخاب شده است.

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

کلیدواژه‌ها: پیل سوختی اکسید جامد، شبیه‌سازی عددی، فرایند گرمایش، گازهای گرم‌کننده، گرادیان دمایی، مدت‌زمان

نحوه ارجاع به این مقاله

حامی مسعود، محمودی‌مهر جواد، مقایسه استفاده از گازهای گرم‌کننده هیدروژن و متان در کانال آند در فرایند گرمایش دوکاناله پیل سوختی اکسید جامد، مهندسی مکانیک مدرس. ۷۷۶-۷۵۳(۱۰): ۲۵۰۴؛ ۱۴۰۴.

* پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: Mahmoudimehr@guilan.ac.ir

* شناسه ارکید نویسنده عهده دار مکاتبات: 0000-0001-9866-9359



۱- مقدمه

رشد فزاینده مصرف سوخت‌های فسیلی، همراه با چالش‌هایی نظیر توزیع نامتوازن این منابع، پایان‌پذیری آن‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی حاصل از مصرفشان، مشکلات متعددی را به وجود آورده است. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین تبدیل انرژی برای تأمین پایدار و پاسخ‌گویی به نیازهای روبه‌رشد جوامع، ضرورتی انکارناپذیر به‌شمار می‌رود [1].

در میان سیستم‌های مختلف تبدیل انرژی، پیل سوختی به‌عنوان یک فناوری امیدبخش، توجه بسیاری را جلب کرده است. پیل سوختی یک سیستم تبدیل مستقیم انرژی است که انرژی موجود در سوخت را بدون فرایند احتراق به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و بازده تبدیل انرژی آن بالاتر از موتورهای احتراق داخلی است [2,3]. در این میان، پیل سوختی اکسید جامد که یک پیل سوختی با دمای عملکردی بالا محسوب می‌شود به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی مانند قابلیت استفاده از سوخت‌های متنوع، سوخت و هوای خروجی با دمای بالا و بازده انرژی مطلوب، مورد توجه محققان قرار گرفته است [4,5]. این مزایا موجب شده‌اند که این نوع پیل سوختی در کاربردهای متنوعی نظیر واحدهای توان کمکی، تجهیزات الکترونیکی قابل حمل و نیروگاه‌های مقیاس کوچک مورد استفاده قرار گیرد و به‌عنوان راهکاری نوین در پاسخ به نیازهای انرژی شناخته شود [6,7].

پیل‌های سوختی اکسید جامد برای دستیابی به هدایت یونی مناسب، لازم است تا به دمای عملیاتی مطلوب برسند که این کار با انجام فرایند گرمایش امکان‌پذیر است [8,9]. باین‌حال، مدت‌زمان گرمایش نسبتاً طولانی پیل‌های سوختی اکسید جامد استفاده از آن‌ها را در برخی کاربردها، مانند وسایل نقلیه که نیازمند شروع بکار سریع هستند، با چالش مواجه کرده است. از طرف دیگر، باتوجه‌به ماهیت سرامیکی الکترولیت و وجود مواد با خواص مختلف در ساختار پیل سوختی اکسید جامد، فرایند گرمایش سریع می‌تواند باعث ایجاد توزیع دمای غیریکنواخت و گرادیان‌های دمایی قابل‌توجه شود که در نهایت ترک‌خوردگی و شکست ساختار آن را به دنبال خواهد داشت [10,11]. بنابراین، کوتاه‌کردن زمان گرمایش و کنترل گرادیان‌های دمایی از جمله پارامترهای کلیدی در طراحی بهینه این فرایند به‌شمار می‌روند.

یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای گرم‌کردن پیل سوختی اکسید جامد، استفاده از گازهای داغ است. در این روش، ابتدا گازهای ورودی گرم شده و سپس با الگوهای تک‌کاناله (Single-channel) یا دوکاناله (Dual-channel) وارد کانال‌های پیل سوختی می‌شوند. در سال‌های اخیر، برخی از پژوهشگران فرایند گرمایش تک‌کاناله را مورد ارزیابی قرار دادند. دم و فدوروف [12] عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد را طی فرایند گرمایش تک‌کاناله (تزریق هوای گرم) مدل‌سازی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که افزایش سرعت هوای

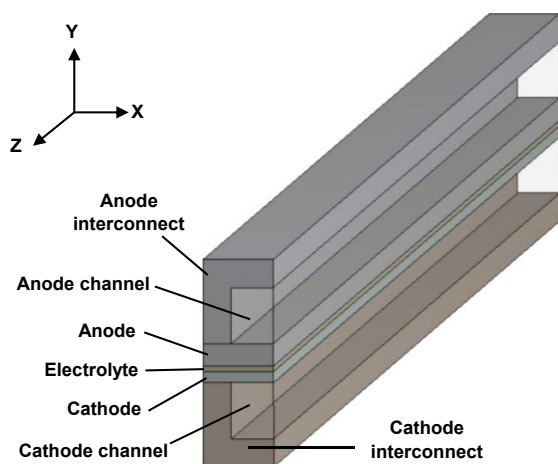
ورودی به کانال کاتد، منجر به کاهش هم‌زمان مدت‌زمان گرمایش و بیشینه گرادیان دمایی می‌شود. کیم و همکاران [13] به‌صورت یک‌بعدی فرایند گرمایش یک پیل سوختی اکسید جامد را با تزریق هوای گرم به داخل کانال کاتد (الگوی گرمایش تک‌کاناله) شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق مشاهده شد که با افزایش سرعت هوا از ۱/۵ متر بر ثانیه به ۳ متر بر ثانیه، مدت‌زمان گرمایش از ۷۵۰۰ ثانیه به ۳۲۰۰ ثانیه کاهش می‌یابد. سان و همکاران [14] فرایند گرمایش تک‌کاناله پیل سوختی اکسید جامد را به‌صورت دوبعدی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که افزایش نرخ جرمی هوای گرم ورودی، مدت‌زمان فرایند گرمایش و اختلاف بین دمای بیشینه و دمای کمینه پیل سوختی را کاهش می‌دهد اما مصرف انرژی گرم‌کن الکتریکی را افزایش می‌دهد. خانافر و همکاران [15] در یک مطالعه عددی، توزیع دما و گرادیان دمایی را در فرایند گرمایش تک‌کاناله یک پیل سوختی اکسید جامد طی بازه‌ای ۶۰۰۰ ثانیه‌ای بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سرعت گرمایش تأثیر قابل‌توجهی بر ساختار حرارتی پیل سوختی دارد. بر همین اساس، آن‌ها پیشنهاد کردند که برای دستیابی به یک الگوی بهینه گرمایش، دمای هوای گرم‌کننده ورودی به‌صورت تابعی از زمان تنظیم شود. چی و همکاران [10] تلاش کردند تا یک روش گرم‌سازی ایمن و سریع برای پشته (Stack) پیل اکسید جامد انتخاب کنند. نتایج نشان داده است که به‌کارگیری روش گرم‌سازی با هوای داغ به همراه بازیابی کامل حرارت اتلافی می‌تواند مصرف انرژی را حدود ۴۲ درصد نسبت به روش استفاده از کوره الکتریکی کاهش دهد. حامی و محمودی‌مهر [16] با روش عددی به بررسی اثر توابع افزایش دمای هوای گرم‌کننده ورودی طی فرایند گرمایش تک‌کاناله یک پیل سوختی اکسید جامد پرداختند. آن‌ها دریافتند، در حالتی که این توابع برحسب زمان به شکل‌های دوران‌یافته نمایی (Rotated quadratic) و خطی (Linear) تغییر کند، به ترتیب کوتاه‌ترین مدت‌زمان گرمایش و کم‌ترین گرادیان دمایی در پیل سوختی حاصل می‌شود.

علاوه بر این، گروهی دیگر از پژوهشگران الگوی گرمایش دوکاناله را مورد بررسی قرار دادند. برزی و همکاران [17] با بهره‌گیری از یک مدل عددی دوبعدی، رفتار گذرای یک پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای را در مرحله گرمایش مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، جریان‌های هوا و نیتروژن با دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس و دبی جرمی ثابت به ترتیب به کانال‌های هوا و سوخت تزریق شدند. در این پژوهش، حداکثر اختلاف دما در راستای محور پیل سوختی حدود ۱۵۰ درجه سلسیوس ثبت شده است. همچنین، مدت‌زمان لازم برای افزایش دمای پیل سوختی از دمای محیط تا دمای یکنواخت ۸۶۰ درجه سلسیوس، حدود ۲/۵ ساعت برآورد شده است. چن و ژیانگ [18] به‌صورت تئوری به مقایسه روش‌های گرمایش تک‌کاناله و دوکاناله پرداختند. آن‌ها از هوا در روش گرمایش تک‌کاناله و زوج گازهای هوا-متان در گرمایش دوکاناله

راستا، ابتدا شبیه‌سازی سه‌بعدی و گذرای فرایند با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام می‌شود. سپس، برای انتخاب بهترین گزینه از میان نتایج حاصل، روش تصمیم‌گیری چندشاخصه تاپسیس (TOPSIS) به‌کار گرفته می‌شود تا تعادل مطلوب بین دو شاخص کلیدی مدت‌زمان گرمایش و گرادیان دمایی ایجاد گردد.

۲- شرح سیستم

در شکل ۱، هندسه سه‌بعدی یک پیل سوختی اکسید جامد نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، این پیل سوختی از یک ساختار پن (PEN structure) تشکیل شده است که شامل الکتروود متخلخل آند، الکتروود متخلخل کاتد و الکتروولیت جامد است. علاوه بر این، کانال سوخت، کانال هوا و صفحات متصل‌کننده از دیگر اجزای آن هستند [11,15]. در جدول ۱ ابعاد هندسی پیل سوختی اکسید جامد مورد استفاده در شبیه‌سازی حاضر ارائه شده است.



شکل ۱) هندسه شماتیک سه‌بعدی یک پیل سوختی اکسید جامد
Fig.1) 3D schematic geometry of an SOFC

در کار حاضر، فرایند گرمایش با استفاده از تزریق گازهای گرم به درون کانال‌ها با بهره‌گیری از ترکیب‌های هوا-هیدروژن و هوا-متان انجام می‌گیرد. شکل ۲ نحوه انجام فرایند گرمایش را نمایش می‌دهد. برای گرمایش، دمای گازهای گرم‌کننده ورودی، در ابتدا به‌صورت تابع خطی از زمان، از دمای اولیه ۲۹۸ کلوین تا دمای نهایی ۸۹۸ کلوین افزایش می‌یابد. سپس، دمای گازها تا لحظه اتمام فرایند گرمایش، در مقدار ثابت ۸۹۸ کلوین حفظ می‌شود. شایان‌ذکر است که فرایند گرمایش زمانی به اتمام می‌رسد که کمینه دمای ساختار پن به ۸۶۸ کلوین برسد [12,16,22]. همچنین، شیب تابع افزایش دمای گازهای ورودی که نرخ تغییرات دمایی را توصیف می‌کند، در این مطالعه به‌صورت خلاصه با عنوان نرخ افزایش دما ((Rate of temperature rise (RTR)) شناخته می‌شود.

استفاده کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که الگوی تک‌کاناله به دلیل مدت‌زمان طولانی، برای کاربردهای عملی مناسب نیست. یوان و لیو [19] به‌صورت عددی تأثیر توزیع سرعت غیریکنواخت گازهای ورودی به کانال‌های هوا و سوخت را بر فرایند گرمایش یک پیل سوختی اکسید جامد بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که این الگوی غیریکنواخت، تأثیر قابل‌توجهی بر مدت‌زمان گرمایش و گرادیان دمایی دارد، به‌گونه‌ای که این اثر در کانال سوخت به‌مراتب شدیدتر از کانال هوا است. لو و فونگ [20] با تزریق هوا و هیدروژن به ترتیب به داخل کانال‌های کاتد و آند، فرایند گرمایش یک پیل سوختی اکسید جامد را با استفاده از یک مدل عددی دوبعدی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها برای جلوگیری از ایجاد گرادیان‌های شدید دمایی، دمای گازهای ورودی را به‌تدریج از ۵۰۰ کلوین تا ۱۴۰۰ کلوین افزایش دادند و گزارش کردند که فرایند گرمایش پس از گذشت حدود ۱۸۰۰۰ ثانیه به پایان می‌رسد. چودهاری و سنجای [21] طی مطالعه عددی نشان دادند که مدت‌زمان فرایند گرمایش دوکاناله (گازهای گرم‌کننده هوا-متان) ۱۱۱۱ ثانیه به طول می‌انجامد. ژنگ و همکاران [22] یک شبیه‌سازی سه‌بعدی را برای بررسی تأثیر هندسه صفحات متصل‌کننده بر فرایند گرمایش دوکاناله پیل سوختی اکسید جامد توسعه دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش نسبت عرض کانال به عرض ریب می‌تواند گرادیان دمایی در پیل سوختی را کاهش دهد. حامی و محمودی‌مهر [23] فرایندهای گرمایش تک‌کاناله (هوا) و دوکاناله (ترکیب هوا-هیدروژن) یک پیل سوختی اکسید جامد را به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که الگوی جریان همسو عملکرد برتر را از نظر گرادیان دما و زمان گرم‌شدن دارا است. با این حال، الگوی جریان ناهمسو از نظر مصرف انرژی مطلوب‌تر است. ژو و همکاران [24] با بهره‌گیری از رویکردی ترمودینامیکی، بهینه‌سازی یک سامانه پیل سوختی اکسید جامد مجهز به پیش‌گرمایش دومرحله‌ای را با لحاظ ویژگی‌های حرارتی انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که راهبرد بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهادی، منجر به کاهش ۱۲/۱۲ درصدی در بیشینه گرادیان دمایی، ۲۸ درصدی در هزینه همتراز شده انرژی (Levelized cost of energy) و ۴/۷۶ درصدی در آلایندگی ویژه جرمی در نقطه عملکرد بهینه شده است.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نوع و نحوه تزریق گازهای گرم‌کننده ورودی نقش تعیین‌کننده‌ای در سرعت فرایند و توزیع دما در فرایند گرمایش پیل سوختی اکسید جامد دارد. با این حال، تاکنون مقایسه مستقیمی بین عملکرد حرارتی زوج گازهای هوا-هیدروژن و هوا-متان در این مرحله انجام نشده است. به این منظور، در پژوهش حاضر اثر نوع گاز گرم‌کننده ورودی به کانال آند (هیدروژن و متان) بر روی دو شاخص ارزیابی متشکل از مدت‌زمان فرایند گرمایش و گرادیان دمایی بررسی می‌شود. در این

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\varepsilon\rho\vec{u}) = 0 \quad (۱)$$

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (۲)$$

قانون بقای ممنتوم به شکل معادله (۳) بیان می‌شود. در این معادله، μ نشان‌دهنده ویسکوزیته دینامیکی سیال است. علاوه بر این، S_M جمله چشمه است که از رابطه (۴) تعیین می‌شود. در معادله (۴)، β نفوذپذیری محیط متخلخل است [18,25].

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho\vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\varepsilon\rho\vec{u}\vec{u}) = -\varepsilon\vec{\nabla}P + \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla}\varepsilon\mu\vec{u}) + S_M \quad (۳)$$

$$S_M = -\frac{\varepsilon\mu}{\beta}\vec{u} \quad (۴)$$

معادله (۵) قانون بقای انرژی را نشان می‌دهد. $C_{p,eff}$ و k_{eff} به ترتیب گرمای ویژه و هدایت حرارتی مؤثر هستند که به ترتیب از معادلات (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند [23,25].

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho C_{p,eff}T)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\varepsilon\rho\vec{u}C_{p,eff}T) = \vec{\nabla} \cdot (k_{eff}\vec{\nabla}T) \quad (۵)$$

$$C_{p,eff} = \varepsilon C_{p,g} + (1 - \varepsilon)C_{p,s} \quad (۶)$$

$$k_{eff} = \varepsilon k_g + (1 - \varepsilon)k_s \quad (۷)$$

۳-۲- شرایط اولیه و مرزی

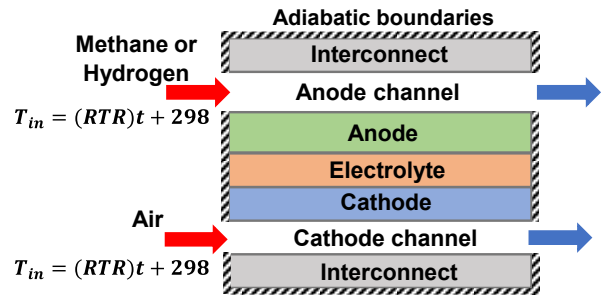
در لحظه ابتدایی، گازها در فشار ثابت ۱۰۱۳۲۵ پاسکال بوده و دما در کل دامنه محاسباتی برابر مقدار یکنواخت ۲۹۸ کلوین است. همچنین، نرخ جرمی و نرخ افزایش دمای گازهای ورودی به کانال‌ها ثابت فرض شده است. در ضمن، سرعت اولیه گازهای ورودی (سرعت در لحظه صفر و دمای ۲۹۸ کلوین) به کانال‌های آند و کاتد با هم برابر بوده و فشار در خروجی کانال‌ها برابر مقدار ثابت ۱۰۱۳۲۵ پاسکال در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، شرایط مرزی حرارتی دیوارهای خارجی، به صورت عایق فرض شده و از شرط تقارن در شبیه‌سازی استفاده شده است.

۳-۳- روش شبیه‌سازی

برای حل معادلات حاکم از روش حجم محدود و نرم‌افزار آنسیس-فلوئنت (Ansys Fluent) بهره گرفته شده است و زوج سرعت-فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل (SIMPLE algorithm) و با در نظرگیری حلگر فشار مبنا در حالت آرام، به صورت سه‌بعدی و در شرایط گذرا حل گردیده است. همچنین، از رویکرد بالادست مرتبه دوم برای گسسته‌سازی معادلات استفاده شده است. شایان ذکر است که رسیدن باقی‌مانده معادلات به 10^{-6} ، به عنوان معیار توقف فرایند حل عددی در نظر گرفته شده است.

۳-۴- استقلال از شبکه

هندسه مسئله حاضر در نرم‌افزار آنسیس دیزاین‌مدلر (Ansys Design Modeler) ترسیم شده و مش‌بندی آن در نرم‌افزار آنسیس مشینگ (Ansys Meshing) انجام گرفته است. در نواحی با گرادیان بالای دما و سرعت، از شبکه ریزتر استفاده شده تا تغییرات محلی فیزیکی با دقت کافی ثبت گردد. به منظور



شکل ۲) شماتیک گرمایش دوکاناله پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از ترکیب گازهای گرم‌کننده هوا-هیدروژن و هوا-متان

Fig.2) Schematic of dual-channel heating of an SOFC using air-hydrogen and air-methane heating gases

جدول ۱) ابعاد پارامترهای هندسی پیل سوختی اکسید جامد [12]

Table 1) Dimensions of the geometric parameters of the SOFC [12]

Number	Parameter	Value	Unit
1	Cell length	100	mm
2	Cell width	5	mm
3	Electrolyte thickness	0.015	mm
4	Cathode thickness	0.075	mm
5	Anode thickness	0.5	mm
6	Channel width	3	mm
7	Channel height	3	mm
8	Interconnect height	2	mm

جدول ۲) خواص فیزیکی پیل سوختی اکسید جامد [12,18]

Table 2) Physical properties of the SOFC [12,18]

Number	Parameter	Value	Unit
1	Anode specific heat	595	J kg ⁻¹ K ⁻¹
2	Cathode specific heat	573	J kg ⁻¹ K ⁻¹
3	Electrolyte specific heat	606	J kg ⁻¹ K ⁻¹
4	Interconnect specific heat	502	J kg ⁻¹ K ⁻¹
5	Anode density	3030	Kg m ⁻³
6	Cathode density	3310	Kg m ⁻³
7	Electrolyte density	5160	Kg m ⁻³
8	Interconnect density	8030	Kg m ⁻³
9	Anode thermal conductivity	5.84	W m ⁻¹ K ⁻¹
10	Cathode thermal conductivity	1.86	W m ⁻¹ K ⁻¹
11	Electrolyte thermal conductivity	2.16	W m ⁻¹ K ⁻¹
12	Interconnect thermal conductivity	20	W m ⁻¹ K ⁻¹
13	Anode porosity	0.42	-
14	Cathode porosity	0.36	-
15	Anode permeability	0.034	m ²
16	Cathode permeability	0.037	m ²

۳-۳- شبیه‌سازی

در این قسمت معادلات حاکم، شرایط اولیه و مرزی و اعتبارسنجی نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۱- معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی عملکرد پیل سوختی اکسید جامد در فرایند گرمایش، معادلات بقای جرم، بقای ممنتوم و بقای انرژی در شرایط گذرا باید حل شوند. لازم به ذکر است که جریان گازها به صورت آرام بوده و از قانون گاز ایده‌آل پیروی می‌کنند [16,18].

قانون بقای جرم در رابطه (۱) مشاهده می‌شود. در این رابطه $\vec{u}$ بردار سرعت، t زمان و ε ضریب تخلخل است. همچنین، ρ چگالی گاز است که از قانون گاز ایده‌آل (معادله (۲)) محاسبه می‌شود. در معادله (۲)، T ، P و R به ترتیب بیانگر فشار، دمای مطلق و ثابت گاز هستند [18].

۴- روش تصمیم‌گیری چندشاخصه

در کار حاضر کمینه‌سازی مدت‌زمان گرمایش و کمینه‌سازی گرادیان دمایی بیشینه موردتوجه است و این دو پارامتر شاخص‌های ارزیابی در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، سرعت ورودی اولیه گازها (سرعت در لحظه صفر و دمای ۲۹۸ کلوین) و شیب خط تابع افزایش دمای گازهای گرم‌کننده ورودی که به آن نرخ افزایش دما گفته می‌شود، متغیرهای تصمیم‌گیری هستند. هر ترکیب گرمایش (شامل هوا-هیدروژن و هوا-متان) برای چهار سرعت ورودی اولیه شامل ۱، ۲، ۴ و ۶ متر بر ثانیه و چهار نرخ افزایش دما شامل ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۲ کلوین بر ثانیه شبیه‌سازی می‌شوند. پس از انجام شبیه‌سازی، پاسخ برتر از میان گزینه‌های موجود با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه تاپسیس انتخاب می‌شود.

روش تاپسیس یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه است که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا مسائل مورد نظر را سازمان‌دهی کرده، آن‌ها را تحلیل نموده و به مقایسه و رتبه‌بندی گزینه‌ها بپردازند. بر همین اساس، انتخاب گزینه یا گزینه‌های مناسب صورت می‌گیرد. این روش به‌طور هم‌زمان فاصله گزینه‌ها از راه‌حل ایده‌آل مثبت و راه‌حل ایده‌آل منفی را در نظر می‌گیرد و با ترکیب این دو فاصله، ترتیب ترجیحی گزینه‌ها را بر اساس نزدیکی نسبی آن‌ها تعیین می‌کند. به عبارت دیگر، بهترین گزینه، گزینه‌ای است که کمترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل منفی دارد. راه‌حل ایده‌آل مثبت به‌عنوان یک گزینه فرضی شناخته می‌شود که برای تمام شاخص‌ها بهترین مقادیر ممکن را دارد، در حالی که راه‌حل ایده‌آل منفی گزینه‌ای فرضی است که بدترین مقادیر شاخص‌ها را شامل می‌شود. در نهایت، شاخصی تحت عنوان ضریب نزدیکی (Closeness Coefficient) محاسبه می‌شود؛ هرچه مقدار این ضریب بزرگ‌تر باشد، رتبه گزینه موردنظر بهتر است [26]. به دلیل سادگی مفهومی، سهولت محاسباتی و قابلیت تفسیر نتایج، روش تاپسیس در سال‌های اخیر کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مهندسی، مدیریت انرژی، مهندسی شیمی، ارزیابی عملکرد، انتخاب فناوری و مدیریت کسب‌وکار یافته است [27].

در روش تاپسیس برای اینکه شاخص‌ها هم‌مرتب و قابل‌مقایسه با هم شوند، باید در ابتدا با استفاده از رابطه (۸) نرمال شوند [28,29]:

$$F_{ij}^n = \frac{F_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m F_{ij}^2}} \quad (8)$$

در معادله (۸)، F_{ij} بیانگر عملکرد گزینه i در شاخص j (زمان گرمایش یا گرادیان دمایی)، m برابر تعداد گزینه‌های موجود و F_{ij}^n نشان‌دهنده مقدار نرمال گزینه i برای شاخص j است. فاصله هر

اطمینان از استقلال نتایج عددی نسبت به اندازه شبکه، پنج شبکه‌بندی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر دقیق تعداد سلول‌های محاسباتی هر بخش از پیل سوختی در شبکه‌بندی‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داده است که با افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی از ۳۲۶,۴۰۰ به ۶۶۰,۰۰۰، تغییر قابل‌توجهی در نتایج مشاهده نمی‌شود. بنابراین، شبکه‌ای با ۳۲۶,۴۰۰ سلول محاسباتی به‌عنوان شبکه بهینه و مناسب برای انجام شبیه‌سازی‌های این پژوهش انتخاب شده است. این انتخاب تعادلی مناسب میان دقت عددی و زمان محاسباتی فراهم می‌کند.

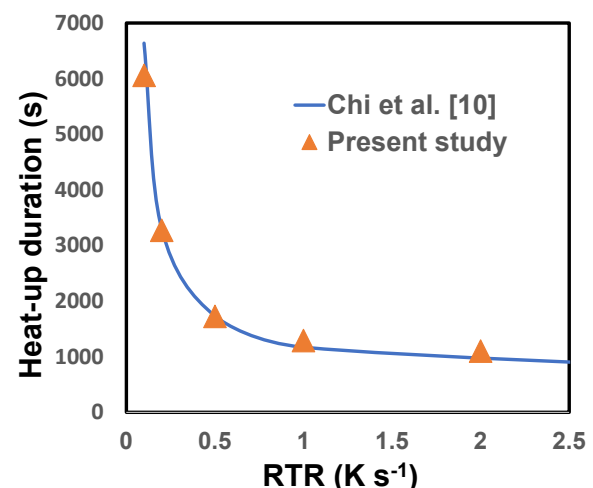
جدول ۳) تعداد سلول‌های هر بخش در شبکه‌بندی‌های مختلف

Table 3) Number of computational cells in different grids

Number	Component	Number of computational cells				
		Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4	Mesh 5
1	Cell width	10	12	14	17	20
2	Cell length	50	100	150	200	300
3	Anode	5	6	6	7	10
4	Electrolyte	2	3	3	4	5
5	Cathode	3	5	5	5	7
6	Anode interconnect	20	25	32	40	44
7	Cathode interconnect	20	25	32	40	44
8	Total number of cells	25000	76800	163800	326400	660000

۳-۵- اعتبارسنجی نتایج

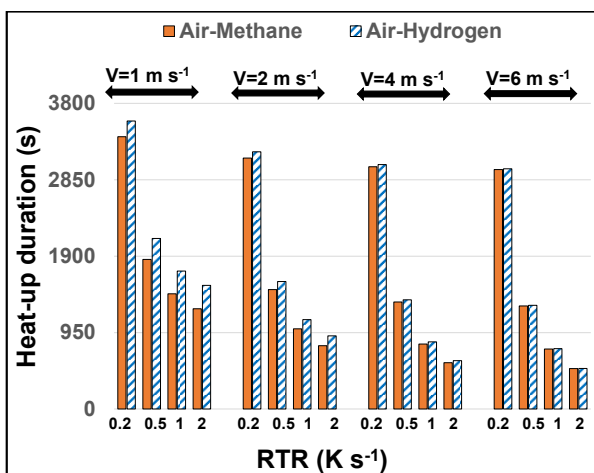
برای نشان‌دادن اعتبار نتایج کار حاضر، تغییرات مدت‌زمان فرایند گرمایش بر حسب نرخ افزایش دمای هوای گرم‌کننده ورودی، با نتایج حل عددی چی و همکاران [10] مقایسه شده است. با مشاهده شکل ۳ می‌توان دریافت که تطابق قابل‌قبولی بین نتایج وجود دارد.



شکل ۳) اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی حاضر از طریق مقایسه با نتایج چی و همکاران [10]

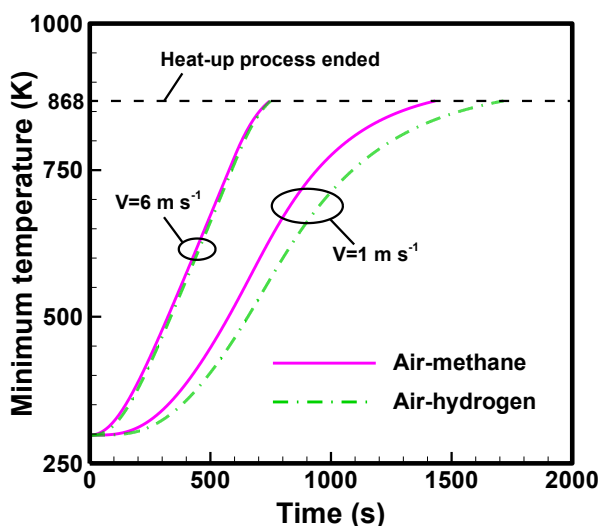
Fig.3) Validation of the present simulation results by comparison with the data of Chi et al. [10]

انتقال حرارت بالا می‌رود؛ بنابراین شیب منحنی دما در بازه‌های میانی بیشتر می‌شود. در ادامه، با نزدیک شدن دمای ساختار به دمای ورودی گازها، نیروی محرکه حرارتی کاهش یافته و روند افزایش دما مجدداً کند می‌گردد. همچنین، افزایش سرعت از ۱ به ۶ متر بر ثانیه باعث افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌گردد. در این شرایط، گرما با نرخ بالاتری از گاز به ساختار جامد منتقل می‌شود و انرژی حرارتی سریع‌تر در لایه‌های داخلی ساختار نفوذ می‌کند. مطابق نتایج، با افزایش سرعت ورودی از ۱ به ۶ متر بر ثانیه، اختلاف زمان لازم برای تکمیل گرمایش بین دو ترکیب گازی از ۲۸۳ ثانیه به تنها ۸ ثانیه می‌رسد.



شکل ۴) مقایسه مدت زمان گرمایش پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از گازهای گرم‌کننده هوا-هیدروژن و هوا-متان

Fig.4) Comparison of heating duration of SOFC using air-hydrogen and air-methane heating gases



شکل ۵) روند تغییرات کمینه دمای ساختار پن طی زمان، برای دو سرعت اولیه ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه و با نرخ افزایش دمای ۱ کلوین بر ثانیه

Fig.5) Time variation of minimum PEN structure temperature for two initial inlet velocities of 1 and 6 m s⁻¹ at a RTR of 1 K s⁻¹

گزینه از پاسخ ایده‌آل فرضی و پاسخ غیر ایده‌آل فرضی به ترتیب از روابط (۹) و (۱۰) تعیین می‌شوند [28,29]:

$$d_{i+} = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (F_{i,j}^n - F_{ideal,j}^n)^2} \quad (9)$$

$$d_{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (F_{i,j}^n - F_{non-ideal,j}^n)^2} \quad (10)$$

ضریب نزدیکی d_i به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود و گزینه‌ای با بیش‌ترین مقدار d_i به‌عنوان پاسخ برتر از دیدگاه روش تاپسیس انتخاب می‌شود [28,29].

$$d_i = \frac{d_{i-}}{d_{i+} + d_{i-}} \quad (11)$$

۵- نتایج و بحث

در این قسمت در ابتدا هر شاخص ارزیابی به‌صورت جداگانه بررسی می‌شوند و سپس با در نظرگیری هم‌زمان هر دو شاخص ارزیابی، پاسخ برتر با استفاده از روش تاپسیس تعیین می‌شود.

۵-۱- رویکرد تصمیم‌گیری تک‌شاخصه (مدت زمان گرمایش)

در شکل ۴، مدت زمان مورد نیاز برای گرمایش پیل سوختی تحت دو ترکیب گازی هوا-هیدروژن و هوا-متان نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ افزایش دما و نیز سرعت ورودی اولیه گازها، مدت زمان گرمایش کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از انتقال سریع‌تر انرژی حرارتی به اجزای پیل سوختی است. علاوه بر این، مدت زمان گرمایش، بدون توجه به مقدار نرخ افزایش دما، با استفاده از ترکیب هوا-متان کوتاه‌تر از الگوی گرمایش هوا-هیدروژن است. همچنین، تأثیر نوع گاز گرم‌کننده در سرعت‌های ورودی اولیه پایین محسوس‌تر است؛ در این شرایط، تفاوت در ویژگی‌های گرمایی گازها نقش مهم‌تری در انتقال حرارت ایفا می‌کند. اما با افزایش سرعت ورودی، جریان گاز به‌اندازه‌ای تقویت می‌شود که اثر تفاوت خواص حرارتی گازها کم‌رنگ‌تر شده و هر دو ترکیب گرمایشی رفتار مشابه‌تری از خود نشان می‌دهند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بهترین پاسخ (کم‌ترین مقدار) از دیدگاه مدت زمان گرمایش متعلق به ترکیب هوا-متان (برابر ۵۰۳ ثانیه) است که در سرعت اولیه ۶ متر بر ثانیه و نرخ افزایش دمایی ۲ کلوین بر ثانیه ایجاد می‌شود.

برای بررسی تأثیر سرعت اولیه بر روی مدت زمان گرمایش، شکل ۵ روند تغییرات کمینه دمای ساختار پن را در طول زمان، برای دو سرعت اولیه ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه و با نرخ افزایش دمای ۱ کلوین بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، فرایند گرمایش زمانی پایان می‌یابد که کمینه دمای ساختار پن به ۸۶۸ کلوین برسد. طبق شکل، منحنی تغییرات دما در ابتدا شیب ملایمی دارد و افزایش دمای ساختار آهسته است. با گذشت زمان و افزایش دمای گازها، اختلاف دمای مؤثر افزایش یافته و نرخ

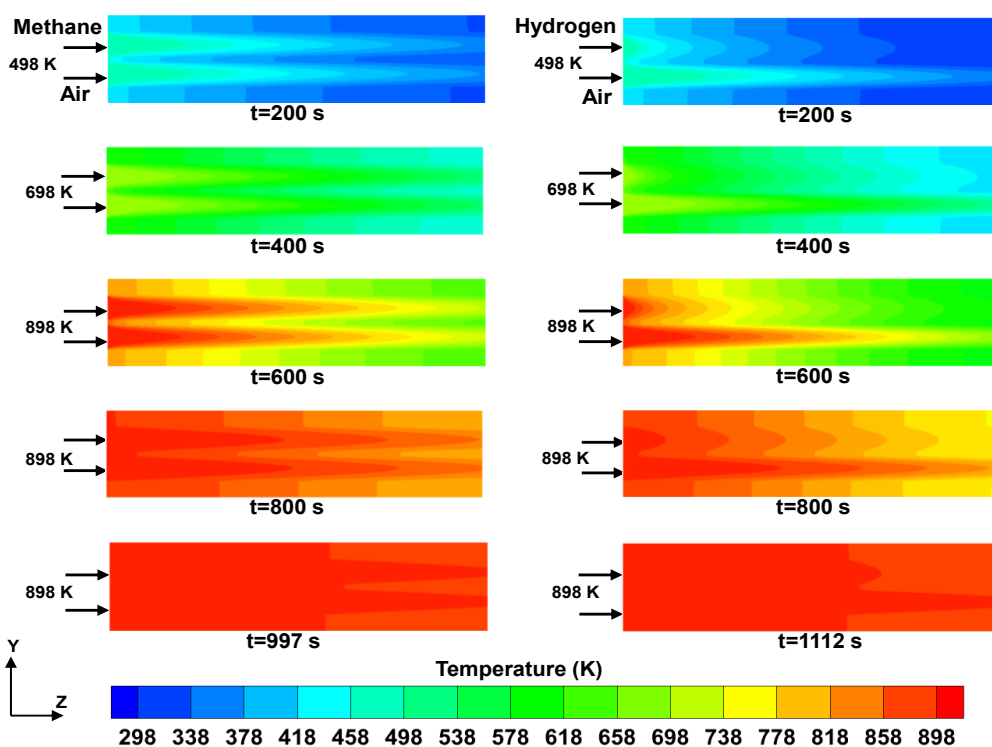
نرخ افزایش دما برابر با ۱ کلوین بر ثانیه، در زمان‌های مختلف مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نزدیکی ورودی کانال‌ها، پروفیل سرعت گازها تقریباً یکنواخت است که این امر ناشی از توسعه نیافتگی جریان در این بخش می‌باشد. با حرکت جریان در امتداد طول کانال، جریان به تدریج توسعه یافته می‌گردد و پروفیل سرعت شکلی سهمی‌مانند به خود می‌گیرد؛ به‌طوری‌که بیشینه سرعت در ناحیه‌ی مرکزی هر کانال ظاهر شده و سرعت در نزدیکی دیواره‌ها به حداقل مقدار خود می‌رسد.

در نواحی انتهایی کانال نیز به دلیل کاهش دما و در نتیجه افزایش چگالی گازها (مطابق قانون گاز ایده‌آل)، و با در نظر گرفتن قانون پیوستگی و ثابت بودن جریان جرمی، میانگین سرعت گاز کاهش می‌یابد. این امر منجر به کاهش مقدار بیشینه سرعت در این نواحی می‌شود. با مقایسه کانتورهای سرعت در زمان‌های مختلف دیده می‌شود که با گذشت زمان و افزایش دمای گازهای ورودی، سرعت گازها نیز افزایش می‌یابد. این پدیده به دلیل کاهش چگالی گازها در اثر افزایش دما و در عین حال ثابت بودن جریان جرمی رخ می‌دهد. مطابق شکل ۷، اگر چه بیشینه سرعت محلی گازها تا حدود ۱۱ متر بر ثانیه افزایش یافته است، اما بیشینه سرعت متوسط گاز برابر ۶/۰۲ متر بر ثانیه بوده که در لحظه پایانی فرایند گرمایش و در ورودی کانال‌ها مشاهده شده است.

در شکل ۶، کانتورهای دمای دوبعدی در صفحه تقارن پیل سوختی برای دو ترکیب گرمایشی هوا-هیدروژن (سمت راست) و هوا-متان (سمت چپ)، تحت شرایطی با سرعت ورودی اولیه ۲ متر بر ثانیه و نرخ افزایش دما برابر با ۱ کلوین بر ثانیه، در بازه‌های زمانی مختلف مقایسه شده‌اند. نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد که ترکیب هوا-متان موجب افزایش سریع‌تر دمای سلول نسبت به ترکیب هوا-هیدروژن می‌شود. این تفاوت رفتاری به تفاوت در خواص ترموفیزیکی این گازها بازمی‌گردد.

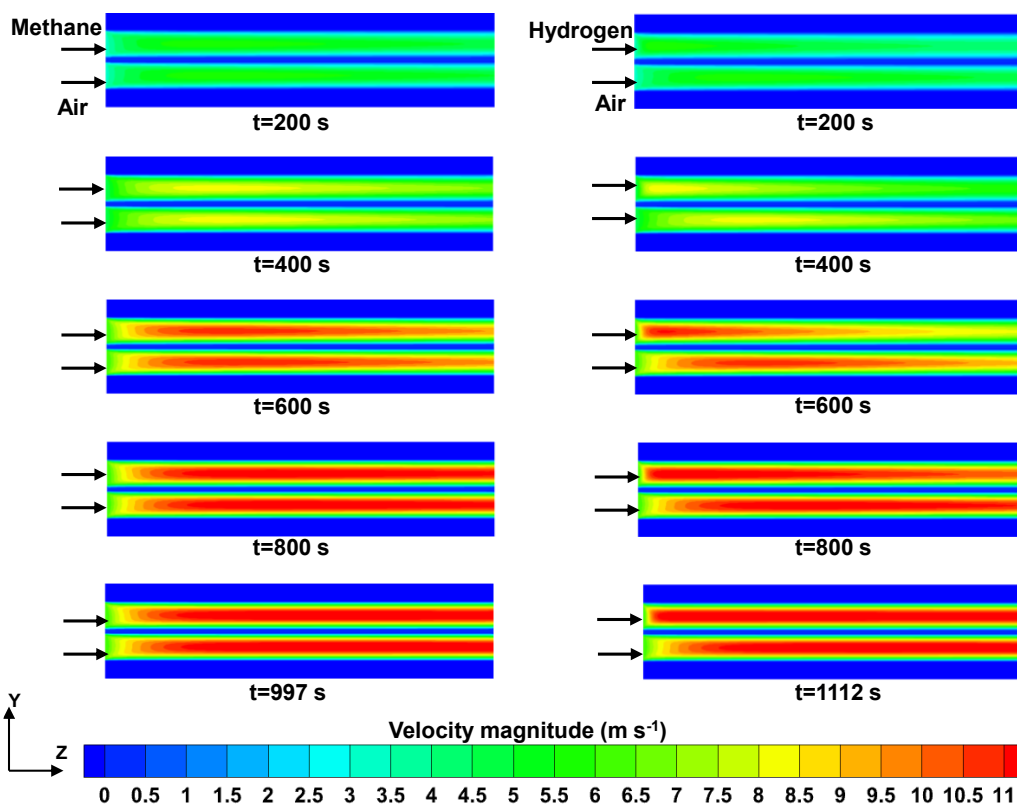
هیدروژن به دلیل ضریب نفوذ حرارتی بالاتر، گرمای خود را با سرعت بیشتری از دست داده و در فاصله‌ای کوتاه پس از ورود به کانال، آن را به اجزای پیل سوختی منتقل می‌کند. این انتقال سریع حرارت باعث می‌شود که در نواحی انتهایی کانال، جایی که کمترین دما در پیل سوختی ثبت می‌شود، دمای گاز هیدروژن به‌طور محسوس کاهش یابد. در مقابل، هوا و متان که از ضریب نفوذ حرارتی پایین‌تری برخوردارند، گرمای خود را به تدریج منتقل کرده و در نتیجه فرایند گرمایش در راستای طولی کانال یکنواخت‌تر انجام می‌شود.

در شکل ۷، کانتورهای دوبعدی سرعت در صفحه تقارن پیل سوختی برای دو ترکیب گرمایشی هوا-هیدروژن (سمت راست) و هوا-متان (چپ)، در شرایطی با سرعت ورودی اولیه ۲ متر بر ثانیه و



شکل ۶) کانتورهای دمای وابسته به زمان برای دو ترکیب گرمایشی هوا-هیدروژن (سمت راست) و هوا-متان (سمت چپ)، در شرایط سرعت ورودی اولیه ۲ متر بر ثانیه و نرخ افزایش دمای ۱ کلوین بر ثانیه

Fig.6) Time-dependent temperature contours for two heating combinations: air-hydrogen (right) and air-methane (left), at an initial inlet velocity of 2 m s^{-1} and a RTR of 1 K s^{-1}



شکل ۷) کانتهای سرعت وابسته به زمان برای دو ترکیب گرمایشی هوا-هیدروژن (سمت راست) و هوا-متان (سمت چپ)، در شرایط سرعت ورودی اولیه ۲ متر بر ثانیه و نرخ افزایش دمای ۱ کلوین بر ثانیه

Fig.7) Time-dependent velocity contours for two heating combinations: air-hydrogen (right) and air-methane (left), at an initial inlet velocity of 2 m s^{-1} and a RTR of 1 K s^{-1}

این افزایش ضریب جابه‌جایی منجر به انتقال سریع‌تر گرما از گاز به سطح جامد و یکنواخت‌تر شدن توزیع دما در ساختار می‌شود. در نتیجه، با افزایش سرعت اولیه گاز، اختلاف دمای موضعی میان نواحی مختلف کاهش یافته و بیشینه گرادیان دمایی کوچک‌تر می‌شود.

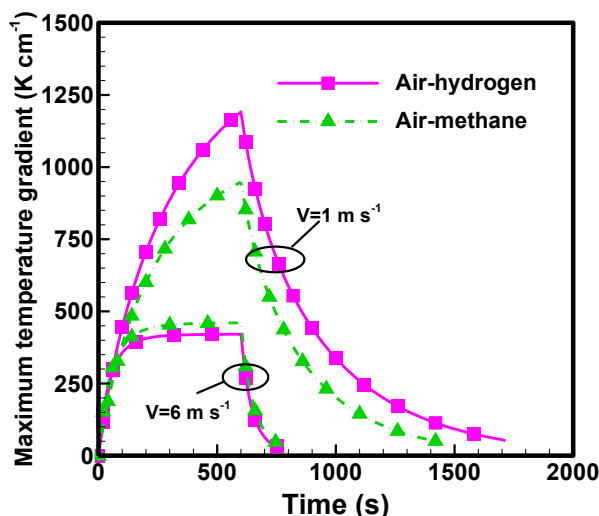
نکته دیگر این است که تأثیرگذاری نوع گازهای گرم‌کننده بر بیشینه گرادیان دمایی وابسته به سرعت ورودی اولیه است. در سرعت‌های ورودی کوچک‌تر (۱ متر بر ثانیه و ۲ متر بر ثانیه) ترکیب هوا-متان گرادیان دمایی کمتری را ایجاد می‌کنند. اما با افزایش سرعت (۴ متر بر ثانیه و ۶ متر بر ثانیه) این ترکیب سبب ایجاد گرادیان دمایی بیشتری می‌شود. با این حال، افزایش سرعت ورودی گازها باعث تقویت مکانیزم جابه‌جایی حرارتی می‌شود. این افزایش نرخ جابه‌جایی موجب می‌گردد که گرمای گازها نیز به شکل یکنواخت‌تری در سراسر کانال توزیع شود.

باتوجه به نتایج، بهترین پاسخ از دیدگاه گرادیان دمایی (کم‌ترین مقدار) برابر ۸۵ کلوین بر سانتی‌متر بوده که متعلق به ترکیب گرمایش هوا-هیدروژن با سرعت اولیه ۶ متر بر ثانیه و نرخ افزایش دمای 0.5 K s^{-1} است.

۲-۵- رویکرد تصمیم‌گیری تک‌شاخصه (گرادیان دمایی بیشینه)

نحوه تغییرات بیشینه گرادیان دمایی در ساختار پین در ترکیب‌های گرمایش هوا-هیدروژن و هوا-متان در شکل ۸ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که کاهش نرخ افزایش دما و افزایش سرعت ورودی اولیه گازها، منجر به کاهش مقدار گرادیان دمایی می‌شود. زمانی که نرخ افزایش دمای گازهای ورودی کاهش می‌یابد، سیستم فرصت کافی برای برقراری تعادل حرارتی در اختیار دارد. در این حالت، گرمای ورودی به تدریج در لایه‌های مختلف ساختار پخش شده و دمای اجزای پیل سوختی با آهنگ یکنواخت‌تری افزایش می‌یابد. در نتیجه، اختلاف دما میان نواحی ورودی و خروجی و همچنین بین لایه‌های داخلی کاهش یافته و گرادیان دمایی ملایم‌تری ایجاد می‌شود. در مقابل، زمانی که دمای گازهای ورودی با نرخ بالاتری افزایش می‌یابد، نواحی نزدیک به ورودی سریع‌تر گرم می‌شوند، در حالی که بخش‌های داخلی هنوز سرد هستند؛ در نتیجه، اختلاف دمای قابل‌توجهی در ساختار شکل گرفته و گرادیان دمایی تشدید می‌شود. از سوی دیگر، افزایش سرعت جریان ورودی گاز موجب افزایش عدد رینولدز و در پی آن، افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی خواهد شد.

حرارت موضعی دارد، بنابراین انتقال حرارت در طول کانال توزیع می‌شود و از تمرکز گرادیان دمایی در ورودی کاسته می‌شود.

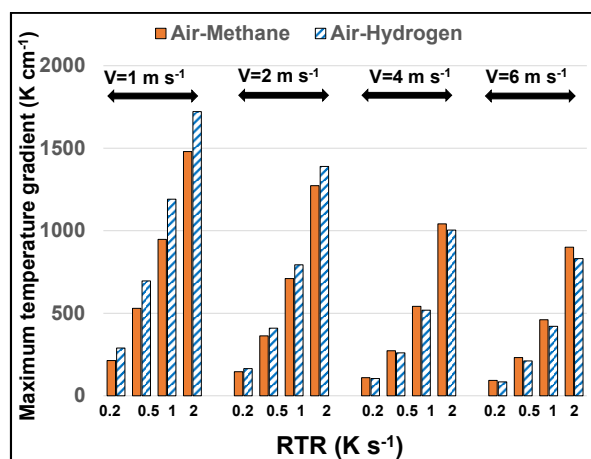


شکل ۹) روند تغییرات بیشینه گرادیان دمای ساختار پن در طول زمان، برای دو سرعت اولیه ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه و با نرخ افزایش دمای ۱ کلوین بر ثانیه

Fig.9) Time variation of the maximum temperature gradient in the PEN structure for two initial inlet velocities of 1 and 6 m s⁻¹ at a RTR of 1 K s⁻¹

در شکل ۱۰، کانتورهای گرادیان دما در ساختار پن، در صفحه تقارن پیل سوختی و در زمان ۶۰۰ ثانیه نمایش داده شده‌اند. این نتایج حاصل شبیه‌سازی عددی فرایند گرمایش پیل سوختی، برای دو مقدار مختلف از سرعت اولیه گاز ورودی (۱ و ۶ متر بر ثانیه) و تحت شرایط نرخ افزایش دمای یکنواخت ۱ کلوین بر ثانیه هستند. لازم به ذکر است که بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در این نرخ افزایش دما، لحظه ۶۰۰ ثانیه با وقوع بیشینه گرادیان دمایی درون پیل سوختی هم‌زمان است. از این‌رو، تحلیل رفتار حرارتی پیل سوختی در این زمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

مطابق شکل ۱۰، بیشینه گرادیان دما عمدتاً در نواحی نزدیک به ورودی گازها مشاهده می‌شود. دلیل این تمرکز آن است که در این نواحی، گازهای داغ برای نخستین‌بار با ساختار هنوز سرد پیل سوختی تماس پیدا می‌کنند. اختلاف دمای بین گاز ورودی و اجزای داخلی پیل سوختی در این مرحله از گرمایش به‌تدریج افزایش یافته و در حدود زمان ۶۰۰ ثانیه، که دمای گاز به سطح بالایی رسیده؛ ولی ساختار پیل سوختی به‌طور کامل گرم نشده است، به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این اختلاف دمای موضعی شدید منجر به ایجاد شیب حرارتی بالا در ناحیه ورودی می‌شود. چنین گرادیان‌های دمایی می‌توانند تنش‌های حرارتی قابل توجهی در ساختار پیل سوختی ایجاد کنند که در صورت تکرار یا تداوم، احتمال بروز ترک، تغییر شکل مکانیکی و در نهایت کاهش عمر عملیاتی پیل سوختی را افزایش می‌دهند. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت جریان گاز ورودی،

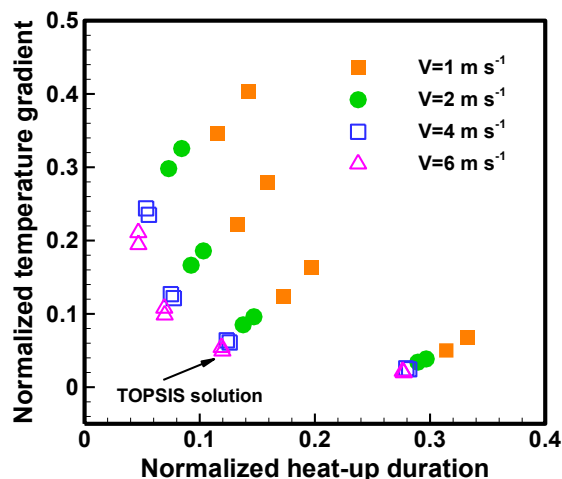


شکل ۸) مقایسه بیشینه گرادیان دمایی ایجادشده در پیل سوختی برای گازهای گرم‌کننده هوا-هیدروژن و هوا-متان.

Fig.8) Comparison of the maximum temperature gradient in the SOFC using the air-hydrogen and air-methane heating gases

برای بررسی تأثیر سرعت اولیه گازهای ورودی بر بیشینه گرادیان دما، شکل ۹ روند تغییرات بیشینه گرادیان دمای ساختار پن را در طول زمان نشان می‌دهد. این بررسی برای دو سرعت اولیه ۱ و ۶ متر بر ثانیه و با نرخ افزایش دمای ۱ کلوین بر ثانیه انجام شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، بیشینه گرادیان دما در ابتدا افزایش یافته و در لحظه ۶۰۰ ثانیه به مقدار اوج می‌رسد، سپس به‌تدریج کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار آن است که در این لحظه، اختلاف بین دمای گازهای ورودی (که اکنون به حداکثر مقدار خود رسیده) و بخش‌های داخلی پیل سوختی که هنوز به تعادل حرارتی نرسیده‌اند، بیشترین مقدار خود را دارد. به بیان دیگر، نرخ گرمایش در نواحی مختلف پیل سوختی هنوز یکنواخت نشده و بنابراین بیشترین ناهمگنی حرارتی در همین بازه زمانی مشاهده می‌شود. پس از رسیدن دمای گازهای ورودی به مقدار ثابت (۸۹۸ کلوین)، گرمایش تدریجی در نواحی سردتر پیل سوختی ادامه یافته و به‌تدریج اختلاف دمای بین بخش‌های مختلف کاهش می‌یابد. در نتیجه، بیشینه گرادیان دما روندی نزولی پیدا می‌کند و پیل سوختی به سمت توزیع دمای یکنواخت‌تری میل می‌کند. این کاهش گرادیان دمایی نشان‌دهنده نزدیک شدن به حالت پایدار حرارتی است.

علاوه بر این، شکل ۹ نشان می‌دهد که در سرعت اولیه ۱ متر بر ثانیه، الگوی گرمایش هوا-هیدروژن بیشینه گرادیان دمایی بالاتری نسبت به هوا-متان ایجاد می‌کند؛ اما در سرعت ۶ متر بر ثانیه، برعکس، بیشینه گرادیان دمایی در الگوی هوا-متان بیشتر است. در سرعت ورودی پایین (۱ متر بر ثانیه)، به دلیل زمان اقامت بیشتر گاز در نزدیکی ورودی و کاهش نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی، گرما به‌صورت موضعی در ساختار پیل سوختی انباشته می‌شود و گرادیان دما شدیدتر و متمرکزتر ظاهر می‌گردد. در مقابل، با افزایش سرعت ورودی به ۶ متر بر ثانیه، گاز داغ با سرعت بیشتری در کانال جریان می‌یابد و فرصت کمتری برای تبادل



شکل ۱۱) گزینه‌های نرمال شده در صفحه مدت زمان گرمایش-گرادیان دمایی.

Fig.11) Normalized solutions on the heating time-temperature gradient plane

جدول ۴) رتبه پاسخ‌ها از نظر روش رتبه‌بندی تاپسیس

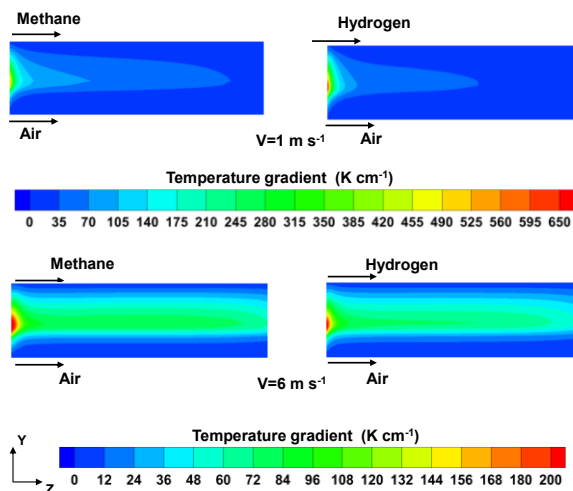
Table 4) Ranking of solutions based on the TOPSIS method

Number	Heating gases	RRT (K s ⁻¹)	Initial inlet velocity (m s ⁻¹)	TOPSIS rank
1	Air-hydrogen	0.2	1	27
2	Air-hydrogen	0.2	2	22
3	Air-hydrogen	0.2	4	19
4	Air-hydrogen	0.2	6	16
5	Air-hydrogen	0.5	1	24
6	Air-hydrogen	0.5	2	10
7	Air-hydrogen	0.5	4	5
8	Air-hydrogen	0.5	6	1
9	Air-hydrogen	1	1	30
10	Air-hydrogen	1	2	15
11	Air-hydrogen	1	4	7
12	Air-hydrogen	1	6	3
13	Air-hydrogen	2	1	32
14	Air-hydrogen	2	2	29
15	Air-hydrogen	2	4	21
16	Air-hydrogen	2	6	12
17	Air-methane	0.2	1	25
18	Air-methane	0.2	2	20
19	Air-methane	0.2	4	18
20	Air-methane	0.2	6	17
21	Air-methane	0.5	1	13
22	Air-methane	0.5	2	9
23	Air-methane	0.5	4	4
24	Air-methane	0.5	6	2
25	Air-methane	1	1	26
26	Air-methane	1	2	11
27	Air-methane	1	4	8
28	Air-methane	1	6	6
29	Air-methane	2	1	31
30	Air-methane	2	2	28
31	Air-methane	2	4	23
32	Air-methane	2	6	14

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش عددی، اثر دو ترکیب گاز گرم‌کننده هوا-هیدروژن و هوا-متان بر مدت زمان گرمایش و گرادیان دمایی در یک پیل سوختی اکسید جامد مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. شبیه‌سازی به صورت گذرا، سه‌بعدی و با استفاده از روش حجم محدود انجام شد و برای انتخاب پاسخ بهینه، از روش

توزیع حرارت در طول کانال یکنواخت‌تر شده و از شدت گرادیان‌های دمایی کاسته می‌شود، که این موضوع می‌تواند تأثیر مثبتی بر کاهش تنش‌های حرارتی و افزایش دوام پیل سوختی داشته باشد.



شکل ۱۰) کانترهای گرادیان دما در ساختار پن، مربوط به صفحه تقارن پیل سوختی، در لحظه ۶۰۰ ثانیه و برای دو مقدار مختلف از سرعت ورودی Fig.10) Temperature gradient contours in the PEN structure on the symmetry plane of the SOFC at 600 s for two initial inlet velocities

۵-۳- رویکرد تصمیم‌گیری چندشاخصه

در این قسمت با در نظرگیری هم‌زمان شاخص‌های ارزیابی، بهترین پاسخ از میان گزینه‌های موجود انتخاب می‌گردد. شکل ۱۱ تمام گزینه‌های موجود (۳۲ مورد) به صورت نرمال شده نشان می‌دهد. در این شکل پاسخ برتر از دیدگاه روش تصمیم‌گیری تاپسیس مشخص شده است. با در نظرگیری هم‌زمان دو شاخص ارزیابی، بهترین پاسخ مربوط به ترکیب گرمایش هوا-هیدروژن با سرعت اولیه ۶ متر بر ثانیه و نرخ افزایش دمای ۰/۵ کلوین بر ثانیه است که منجر به مدت زمان گرمایش ۱۲۹۰ ثانیه و بیشینه گرادیان دمایی ۲۱۱ کلوین بر سانتی‌متر می‌شود.

جدول ۴ مشخصات و رتبه‌بندی تمامی پاسخ‌ها را ارائه می‌دهد. مقایسه نتایج مربوط به دو نوع گاز گرم‌کننده نشان می‌دهد که ترکیب‌های هوا-هیدروژن و هوا-متان در بسیاری از شرایط عملکردی نزدیک به یکدیگر دارند. این موضوع نشان می‌دهد هیچ‌یک از گازها در تمامی شرایط برتری مطلق ندارد و عملکرد حرارتی آن‌ها وابسته به تعامل میان پارامترهایی نظیر سرعت ورودی و نرخ افزایش دما است. افزون بر این، نتایج جدول نشان می‌دهد که ترکیب‌هایی با سرعت ورودی بالاتر (به‌ویژه ۶ متر بر ثانیه) و نرخ افزایش دمای میانی (۰/۵ کلوین بر ثانیه) در هر دو نوع گاز، رتبه‌های بهتری کسب کرده‌اند. برای نمونه، در ترکیب هوا-هیدروژن با نرخ افزایش دمای برابر ۰/۵ کلوین بر ثانیه، افزایش سرعت ورودی از ۱ به ۶ متر بر ثانیه، رتبه پاسخ را به‌طور چشمگیری از ۲۴ به ۱ (بهترین رتبه) بهبود داده است.

فهرست علائم

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه سیال ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
k	هدایت گرمایی ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
P	فشار (Pa)
R	ثابت گاز ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
RTR	نرخ افزایش دمای گاز گرم‌کننده ورودی (K s^{-1})
S_m	جمله چشمه معادله ممنتوم ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-2}$)
T	دما (K)
t	زمان (s)
$\bar{u}$	بردار سرعت (m s^{-1})
V	مقدار سرعت ورودی اولیه (m s^{-1})

علائم یونانی

β	نفوذپذیری محیط متخلخل (m^2)
ε	ضریب تخلخل
μ	ویسکوزیته دینامیکی ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kg m^{-3})
eff	زیرنویس‌ها مؤثر
g	ناحیه گازی
s	ناحیه جامد

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- 1- C. W. Su, X. Y. Song, J. Dou, and M. Qin, "Fossil fuels or renewable energy? The dilemma of climate policy choices," *Renewable Energy*, vol. 238, p. 121950, 2025.
[doi:10.1016/j.renene.2024.121950](https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121950)
- 2- L. Pinzhi, S. Wei, D. Zhenhua, M. Wanda, and N. Shidong, "Analysis and comparison of multi-physics fields for different flow field configurations in SOFC," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 229, p. 125708, 2024.
[doi:10.1016/j.renene.2024.121950](https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121950)
- 3- O. Sadeghian, A. M. Shotorbani, S. Ghassemzadeh, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Energy management of hybrid fuel cell and renewable energy based systems- A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 107, pp. 135-163, 2025.
[doi:10.1016/j.ijhydene.2024.03.134](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.134)
- 4- S. Khalilarya and A. Chitsaz Khoyi, "Thermoeconomic analysis of a novel trigeneration system based on solid oxide fuel cell and gas turbine with hydrogen fuel," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 7, pp. 119-130, 2018.
https://mme.modares.ac.ir/article_10480.html

تصمیم‌گیری چندشاخصه تاپسیس استفاده گردید. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

- بیشینه گرادیان دمایی عمدتاً در نواحی نزدیک به ورودی گازها متمرکز است و سایر قسمت‌های پیل سوختی گرادیان دمایی به‌مراتب کمتری را تجربه می‌کنند.
- افزایش سرعت گازهای ورودی منجر به کاهش هم‌زمان مدت‌زمان گرمایش و گرادیان دمایی بیشینه شده است. در مقابل، افزایش نرخ افزایش دمای گازهای ورودی، سبب کوتاه‌شدن مدت‌زمان گرمایش شده اما گرادیان دمایی بیشینه را افزایش داده است.
- مدت‌زمان گرمایش برای ترکیب هوا-متان همواره کمتر از ترکیب هوا-هیدروژن بوده است. علاوه بر این، اختلاف مدت‌زمان گرمایش میان دو ترکیب در سرعت‌های اولیه پایین‌تر، بیشتر و محسوس‌تر است. برای مثال، با افزایش سرعت ورودی از ۱ به ۶ متر بر ثانیه، تفاوت مدت‌زمان گرمایش بین دو ترکیب از ۲۸۳ ثانیه به تنها ۸ ثانیه می‌رسد.
- بیشتر بودن گرادیان دمایی در ترکیب هوا-هیدروژن در سرعت‌های ورودی پایین، به این دلیل است که هیدروژن پس از ورود به کانال آند، گرمای خود را در فاصله‌ای کوتاه و با سرعت بیشتری نسبت به متان و هوا به ساختار پیل سوختی منتقل می‌کند. در حالی‌که در ترکیب هوا-متان، انتقال حرارت به‌تدریج و در طول مسیر بلندتری انجام می‌شود. با این‌حال، افزایش سرعت گازهای ورودی موجب تقویت فرایند جابه‌جایی حرارتی شده و در نتیجه، اثرگذاری انتقال سریع گرما توسط هیدروژن کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش سرعت، تفاوت میان الگوهای گرمایش کمتر شده و حتی در برخی شرایط، ترکیب هوا-متان می‌تواند منجر به گرادیان دمایی بیشتری نسبت به هوا-هیدروژن شود.
- با در نظرگیری هم‌زمان شاخص‌های مدت‌زمان گرمایش و گرادیان دمایی، ترکیب گرمایش هوا-هیدروژن با سرعت ورودی ۶ متر بر ثانیه و نرخ افزایش دمای ۰/۵ کلوین بر ثانیه که منجر به مدت‌زمان گرمایش ۱۲۹۰ ثانیه و بیشینه گرادیان دمایی ۲۱۱ کلوین بر سانتی‌متر شد، بر اساس روش تصمیم‌گیری تاپسیس به‌عنوان گزینه بهینه انتخاب گردید.

- 17- Y. M. Barzi, M. Ghassemi, and M. Hamed, "Numerical analysis of start-up operation of a tubular solid oxide fuel cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 2015-2025, 2009. doi:10.1016/j.ijhydene.2008.11.034
- 18- M.-H. Chen and T. L. Jiang, "The analyses of the heat-up process of a planar, anode-supported solid oxide fuel cell using the dual-channel heating strategy," *International journal of hydrogen energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6882-6893, 2011. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.02.129
- 19- P. Yuan and S.-F. Liu, "Effect of non-uniform inlet flow rate on the heat-up process of a solid oxide fuel cell unit with cross-flow configuration," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 28, pp. 12377-12386, 2016. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.05.260
- 20- X. Luo and K. Fong, "Development of 2D dynamic model for hydrogen-fed and methane-fed solid oxide fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 328, pp. 91-104, 2016. doi:10.1016/j.jpowsour.2016.08.005
- 21- T. Choudhary, "Computational analysis of IR-SOFC: Transient, thermal stress, carbon deposition and flow dependency," *International journal of hydrogen energy*, vol. 41, no. 24, pp. 10212-10227, 2016. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.04.016
- 22- K. Zheng, Y. Kuang, Z. Rao, and S. Shen, "Numerical study on the effect of bi-polar plate geometry in the SOFC heating-up process," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 11, no. 1, 2019. doi:10.1063/1.5047278
- 23- M. Hami and J. Mahmoudimehr, "Simulation study to select optimal solid oxide fuel cells heat-up pattern from single, dual co-flow, and dual counter-flow alternatives," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 46, no. 1, pp. 1284-1305, 2024. doi:10.1080/15567036.2023.2298284
- 24- K. Xu et al., "Multi-criteria sensitivity study and optimization of a two-stage preheated SOFC system considering thermal characteristics," *Applied Thermal Engineering*, vol. 261, p. 125090, 2025. doi:10.1016/j.applthermaleng.2024.125090
- 25- Y. Bae, S. Lee, K. J. Yoon, J.-H. Lee, and J. Hong, "Three-dimensional dynamic modeling and transport analysis of solid oxide fuel cells under electrical load change," *Energy conversion and management*, vol. 165, pp. 405-418, 2018. doi:10.1016/j.enconman.2018.03.064
- 26- Yue, "A method for group decision-making based on determining weights of decision makers using TOPSIS," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 35, no. 4, pp. 1926-1936, 2011. doi:10.1016/j.apm.2010.11.001
- 27- M. Behzadian, S. K. Otaghsara, M. Yazdani, and J. Ignatius, "A state-of-the-art survey of TOPSIS applications," *Expert Systems with applications*, vol. 39, no. 17, pp. 13051-13069, 2012. doi:10.1016/j.eswa.2012.05.056
- 28- M. H. Shojaeefard, A. Khalkhali, M. Tahani, and B. Salimian Rizi, "Multi objective optimization of the centrifugal oil pump impeller," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 1-10, 2020. doi:10.22108/modares.2020.1111111
- 5- Y. Cui et al., "Multi-objective optimization design of the solid oxide fuel cells using response surface methodology and genetic algorithm," *Applied Thermal Engineering*, vol. 242, p. 122503, 2024. doi:10.1088/1742-6596/3012/1/012084
- 6- H. Hassanzadeh and M. A. Farzad, "Modeling and optimization of a single planar solid oxide fuel cell," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 2, pp. 81-91, 2015. https://mme.modares.ac.ir/article_8448.html
- 7- X. Qin et al., "Solid oxide fuel cell system for automobiles," *International Journal of Green Energy*, vol. 22, no. 5, pp. 901-910, 2025. doi:10.1080/15435075.2022.2065454
- 8- A. K. Yadav, S. Sinha, and A. Kumar, "Advancements in composite cathodes for intermediate-temperature solid oxide fuel cells: A comprehensive review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 59, pp. 1080-1093, 2024. doi:10.1016/j.ijhydene.2024.02.124
- 9- B. Hu, G. Lau, D. Song, Y. Fukuyama, and M. C. Tucker, "Optimization of metal-supported solid oxide fuel cells with a focus on mass transport," *Journal of Power Sources*, vol. 555, p. 232402, 2023. doi:10.1016/j.jpowsour.2022.232402
- 10- Y. Chi, P. Li, J. Lin, J. Li, S. Mu, and Y. Song, "Fast and safe heating-up control of a planar solid oxide cell stack: A three-dimensional model-in-the-loop study," *Journal of Power Sources*, vol. 560, p. 232655, 2023. doi:10.1016/j.jpowsour.2023.232655
- 11- M. R. Ahmadi, J. Mahmoudimehr, and M. Hami, "A multi-criteria assessment to show the superiority of time-dependent heat flux over constant heat flux during direct heating of solid oxide fuel cell," *Applied Thermal Engineering*, p. 127334, 2025. doi:10.1016/j.applthermaleng.2025.127334
- 12- D. L. Damm and A. G. Fedorov, "Reduced-order transient thermal modeling for SOFC heating and cooling," *Journal of power sources*, vol. 159, no. 2, pp. 956-967, 2006. doi:10.1016/j.jpowsour.2005.11.072
- 13- Y. Kim, M. Son, and I.-B. Lee, "Numerical study of a planar solid oxide fuel cell during heat-up and start-up operation," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 50, no. 3, pp. 1360-1368, 2011. doi:10.1016/j.jpowsour.2005.11.072
- 14- J. Son, S. Hwang, S. Hong, S. Heo, and Y.-B. Kim, "Parameter study on solid oxide fuel cell heat-up process to reaction starting temperature," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 7, pp. 1073-1083, 2020. doi:10.1007/s40684-019-00129
- 15- K. Khanafer, A. Al-Masri, K. Vafai, and P. Preethichandra, "Heat up impact on thermal stresses in SOFC for mobile APU applications: Thermo-structural analysis," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102159, 2022. doi:10.1016/j.seta.2022.102159
- 16- M. Hami and J. Mahmoudimehr, "Simulation-based multiobjective management of transient heating process of solid oxide fuel cell," *Fuel Cells*, vol. 23, no. 2, pp. 188-201, 2023. doi:10.1002/fuce.202200113

Engineering, vol. 13, no. 11, pp. 139-149, 2014.
mme.modares.ac.ir/article_8022.html

29- A. Sohani, S. Naderi, and F. Torabi, "Comprehensive comparative evaluation of different possible optimization scenarios for a polymer electrolyte membrane fuel cell," Energy Conversion and Management, vol. 191, pp. 247-260, 2019.
[doi:10.1016/j.enconman.2019.04.005](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.005)