



Numerical Investigation of Water Droplet Flow in the Cathode Channel of a PEM Fuel Cell with Transversal Blocked Flow Channel

Mohammad Mazidi Sharfabadi ^{*1}, Arash Parsanezhad ², Ali Gholam Valoujerdi ³

¹ Professor Assistant, Research Institute for Development and Optimization of Energy Technologies, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran

² MS, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, West Tehran Branch, Tehran

³ MS Student, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran

Received: 25 Sep 2022 **Accepted:** 30 Jan 2023

Abstract

In this paper, the motion of water droplets inside a cathode gas channel of a polymer membrane fuel cell with transverse channel blocking is investigated numerically, biphasically, and two-dimensionally. 24 different blocked geometries are studied and the effect of the different block length (W_r) and the position of the block across the channel (λ) upon velocity and pressure contours, the shape of streamlines and droplet deformation is investigated and droplet discharge time, instant pressure drop, mean pressure drop, and instant and mean water coverage ratio are calculated. The results show that the channel becomes blocked and clogged for some geometries and in other cases where the droplet crosses the barrier, the discharge time decreases and the instant and average pressure drop and water coverage ratio increase by placing the barrier. According to the obtained results, the greatest decrease in discharge time (if there is no restriction in pressure supply) is for $W_r=1.66$ and $\lambda=0.3$. Also, the lowest instant pressure drop and water coverage ratio occur for $W_r=0.66$ and $\lambda=0.3$.

Keyword: Polymer Membrane Fuel Cell, Cathode Channel, Channel Block, Pressure Drop, Coverage Ratio, Water Management

* mazidim@ripi.ir

بررسی عددی حرکت قطره آب درون کانال کاتد پیل سوختی غشا پلیمری همراه با مسدودسازی عرضی کانال جریان

محمد مزیدی شرف آبادی^{۱*}، آرش پارسائزاد^۲، علی غلام ولوجردی^۳

^۱ استادیار مهندسی مکانیک، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران غرب، تهران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندس مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۳ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۰

چکیده

در این مقاله حرکت قطره آب درون کانال گاز کاتد پیل سوختی غشاء پلیمری همراه با مسدودسازی عرضی کانال به صورت عددی، دوفازی و دوبعدی بررسی می‌شود. ۲۴ هندسه مختلف برای مانع مطالعه و اثر تغییرات طول مانع (W_T) و موقعیت قرار گرفتن آن در عرض کانال (λ)، بر روی کانتورهای سرعت و فشار، شکل خطوط جریان و تغییر شکل قطره بررسی شده‌اند و زمان تخلیه قطره، افت فشار لحظه‌ای، افت فشار متوسط و نسبت پوشش آب لحظه‌ای و متوسط محاسبه گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که در بعضی از هندسه‌ها کانال دچار انسداد و گرفتگی می‌شود و در سایر حالات که قطره از مانع عبور می‌کند قرار دادن مانع باعث کاهش زمان تخلیه و افزایش افت فشار لحظه‌ای و متوسط و نسبت پوشش آب می‌گردد. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین کاهش زمان تخلیه (در صورت عدم محدودیت در تأمین فشار) برای حالت $W_T=1/66$ و $\lambda=0/3$ است. همچنین کمترین افت فشار لحظه‌ای و نسبت پوشش آب برای حالت $W_T=0/66$ و $\lambda=0/3$ اتفاق می‌افتد.

کلمات کلیدی: پیل سوختی غشای پلیمری، کانال کاتد، انسداد کانال، افت فشار، نسبت پوشش، مدیریت آب

* mazidim@ripi.ir

۱- مقدمه

پیل‌های سوختی دستگاه‌های الکتروشیمیایی هستند که به‌طور مستقیم انرژی شیمیایی حاصل از واکنش سوخت و اکسیدکننده را به الکتریسیته و گرما تبدیل می‌کنند. در میان انواع پیل‌های سوختی پیل سوختی غشاء پلیمری به دلیل داشتن راندمان بالا، دمای عملیاتی مناسب و پایین، عدم ایجاد آلودگی و زمان راه‌اندازی کوتاه به‌طور گسترده قابل‌استفاده بوده و یک منبع تبدیل انرژی مناسب در آینده است. بازده پیل‌های سوختی می‌تواند به میزان قابل‌توجه ۶۰٪ در تبدیل انرژی الکتریکی و همچنین به مقدار کلی ۸۰٪ در تولید هم‌زمان انرژی‌های الکتریکی و حرارتی با بیش از ۹۰٪ کاهش آلاینده‌های اصلی برسد. پیل‌های سوختی غشاء پلیمری در دماهای نسبت پایین، حدود 80°C کار می‌کنند. کارکرد دماپایین به آن‌ها اجازه می‌دهد زمان آماده شدن کمتری داشته باشند. امروزه، پیل‌های سوختی به‌عنوان منبع تغذیه وسایل نقلیه، ساختمان‌های تجاری، منازل و حتی وسایل کوچک مانند لپ‌تاپ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پیل‌ها در محدوده بزرگی از توان (از یک کیلووات تا صدها مگاوات) به‌طور مؤثری می‌توانند به کار بروند [۱].

پیل‌های سوختی غشاء پلیمری که پیل‌های سوختی غشاء تبادل پروتون نیز نامیده می‌شوند، چگالی توان بالایی دارند و در مقایسه با سایر پیل‌های سوختی مزایای وزن و حجم کم را دارند. پیل‌های سوختی غشاء پلیمری از یک پلیمر جامد به‌عنوان الکترولیت و از الکترودهای کربنی متخلخل دارای کاتالیست پلاتینیم استفاده می‌کنند. آن‌ها برای کار فقط به هیدروژن، اکسیژن هوا و آب نیاز دارند و مانند برخی پیل‌های سوختی به سیالات خورنده نیاز ندارند. آن‌ها معمولاً با هیدروژن خالص که از تانک‌های ذخیره یا بازسازنده‌ها تغذیه می‌شود، سوخت‌گیری می‌شوند.

نسبت مقدار هیدروژن مصرف‌شده به هیدروژن ورودی به پیل سوختی درصد مصرف سوخت نامیده می‌شود [۲] در پیل‌های سوختی پلیمری انتها بسته درصد مصرف سوخت تقریباً برابر ۱۰۰ درصد است. بدین معنا که تقریباً تمامی هیدروژن یا اکسیژن ورودی به پیل سوختی در واکنش الکتروشیمیایی شرکت می‌کنند [۳]. اگرچه در حالت انتها بسته احتمال دارد در قسمت‌های انتهایی پیل سوختی با کمبود سوخت مواجه شویم که نتیجه آن کاهش ولتاژ و عملکرد سلول است [۴]. تجمع آب در قسمت انتهایی کانال‌های آند و کاتد عامل اصلی کمبود سوخت هستند [۵]. اگر حجم آب در کاتد زیاد شود مقداری از آب از سمت کاتد به آند در اثر پدیده نفوذ معکوس انتقال می‌یابد. همچنین با انباشت گاز در سمت کاتد منافذ عبور گاز روی لایه نفوذ گاز از آب انباشته می‌شود و با محدودیت نفوذ گاز به سطح کاتالیست و محدودیت انجام واکنش مواجه خواهیم شد. این پدیده به غرقابگی معروف است [۶].

وجود آب در غشاء پیل سوختی پلیمری برای اینکه غشاء به‌خوبی رسانش یونی را از سمت آند به کاتد انجام دهد، ضروری است. مدیریت مناسب قطرات آب تولیدشده در کانال کاتد عامل مهمی برای حفظ عملکرد بالای پیل سوختی غشاء پلیمری است. حرکت قطرات آب مایع در کانال‌های گاز کاتد پیل سوختی غشاء پلیمری و اثرات آن روی مدیریت آب در این نوع پیل توسط محققان زیادی بررسی شده است [۷]. آب به‌طور عمده در اثر واکنش کاهش اکسیژن در لایه کاتالیست سمت کاتد تولید می‌شود. آب تولیدی از طریق لایه نفوذ گاز به داخل کانال‌های گاز (هوا) انتقال می‌یابد و در آنجا توسط جریان هوا به خارج از پیل رانده می‌شود. ایجاد آب به مقدار زیاد در کانال گاز ممکن است باعث انسداد منافذ لایه نفوذ گاز شده و از رسیدن گاز واکنش‌دهنده به محل لایه کاتالیست جلوگیری کند. این پدیده در بین محققان طغیان نامیده می‌شود و موجب افزایش افت پتانسیل غلظتی در پیل می‌شود [۸]. در یک پیل سوختی

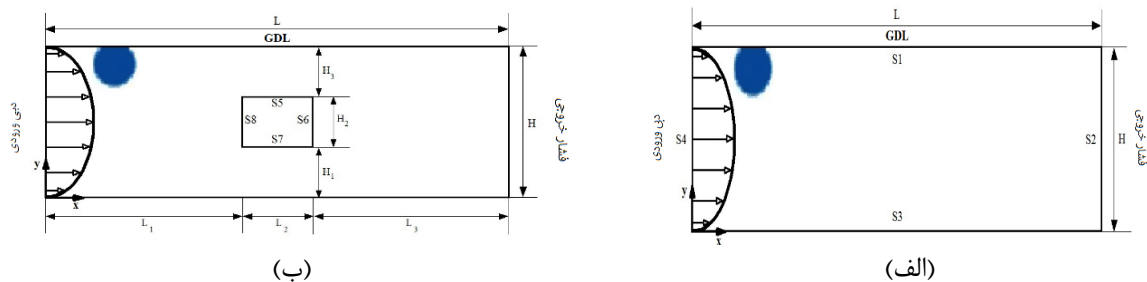
غشا پلیمری، کانال‌های گاز در مجاورت لایه نفوذ گاز می‌باشند و به گاز اجازه می‌دهند از طریق لایه نفوذ گاز به داخل پیل نفوذ کند. بنابراین، شکل هندسی کانال گاز تأثیر بسیار زیادی روی مدیریت آب و حرارت، و عملکرد پیل و همچنین انتقال واکنش‌دهنده‌ها از کانال گاز به لایه نفوذ گاز و متعاقباً به لایه کاتالیست دارد [۹]. محققان دریافته‌اند که قرار دادن مانع در داخل کانال گاز، یک راه مؤثر برای افزایش نفوذ گاز از به لایه کاتالیست و در نتیجه بهبود عملکرد پیل است. در حقیقت وجود مانع در کانال گاز پیل سوختی غشاء تبادل پروتون، جریان گاز را به سمت لایه نفوذ گاز منحرف می‌کند و در نتیجه موجب تسهیل انتقال حرارت و انتقال جرم از هسته مرکزی کانال به لایه کاتالیست می‌شود که این امر موجب بهبود عملکرد پیل می‌شود. همچنین، مانع‌گذاری در کانال گاز کاتد تأثیری زیادی روی بهبود عملکرد پیل دارد و اضافه کردن مانع به کانال گاز آند، فایده زیادی ندارد [۱۰]. پرنگ و همکاران [۱۱] به صورت عددی و دوبعدی در حالت تک‌فاز نشان دادند که نصب عرضی یک سیلندر با مقطع مستطیلی در کانال گاز، به طور مؤثری عملکرد پیل را بهبود می‌بخشد. افشاری و هوره [۱۲] اثر شکل، اندازه و تعداد مانع‌های داخل کانال گاز کاتد را در حالت انسداد جزئی روی انتقال اکسیژن و عملکرد پیل سوختی به صورت عددی و دوبعدی و در حالت تک‌فاز با بررسی ۲۷ هندسه مختلف بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مانع با هندسه دوزنقه‌ای و نیم‌دایره‌ای چگالی توان پیل نسبت به مانع مربعی بهبود بیشتری می‌بخشد. همچنین استفاده از چیدمان زیگزاگ نسبت به متقارن موجب افت فشار کمتر و بهبود عملکرد پیل می‌گردد. ژانگ و همکاران [۱۳] با توسعه یک مدل چندفازی سه‌بعدی، جریان دوفازی گاز و مایع را در کانال و الکترودهای متخلخل پیل سوختی غشاء پلیمری بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که افزایش زاویه تماس بین لایه نفوذ گاز و کانال می‌تواند موجب تخلیه راحت‌تر آب در کانال‌ها و بهبود عملکرد پیل شود. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که اضافه کردن مانع در کانال کاتد نه تنها غلظت اکسیژن در الکترودها را افزایش می‌دهد، بلکه فرایند تخلیه آب را نیز تسهیل می‌کند که هردوی این عوامل به طور مؤثر از افت غلظتی در پیل جلوگیری می‌کنند.

در این مقاله، با مطالعه دوفازی و با استفاده از روش حجم سیال^۱، فرایند تخلیه آب در کانال کاتد از نوع موازی همراه با مانع مستطیلی در عرض کانال و در حالت انسداد جزئی بررسی می‌شود و با کانال بدون مانع مقایسه می‌گردد. همچنین، اثر تغییر طول مانع و تغییر قرارگیری موقعیت مانع در عرض کانال روی پارامترهای مدیریت آب نظیر فشار، سرعت، زمان تخلیه و نسبت پوشش آب بررسی می‌گردد.

۲- هندسه و مدل‌سازی

مدل‌سازی دوبعدی، غیر دائم و دوفازی مدیریت آب درون کانال کاتد همراه با یک سیلندر مربعی همراه با شرایط مرزی و اولیه بیان می‌شود. جریان فازها در رژیم آرام و از نوع تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود. میدان حل در پژوهش حاضر در کانال ساده (بدون مانع) شکل ۱ (الف) و در کانال با مانع شکل ۱ (ب) به صورت شماتیک نشان داده شده است.

¹ Volume of fluid



شکل ۱- میدان حل و شرایط مرزی معادلات حاکم در پژوهش حاضر (الف) بدون مانع (ب) با مانع [۱۱]

مشخصات هندسی کانال به شکل جدول ۱ است که با الگو گرفتن از طرح کلی هندسی کانال پیرانگ و همکاران [۱۱] طراحی شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی کانال

مقدار (mm)	کمیت
۱۰	اندازه طول کانال (L)
۰/۵	اندازه ارتفاع کانال (H)
۰/۳	اندازه ارتفاع مانع (H ₃)

در این پژوهش تغییرات طول مانع و موقعیت قرارگیری مانع در عرض کانال، درون کانال به ترتیب توسط دو پارامتر WR و λ تعریف و تغییر داده می‌شود که به ترتیب در روابط ۱ و ۲ ارائه شده است.

$$WR = \frac{L_2}{H} \quad (۱)$$

$$\lambda = \frac{H_3}{H} \quad (۲)$$

که در آن L_2 اندازه عرض مانع و H_3 اندازه فاصله سقف مانع (S₅) تا سقف کانال (S₁) است. نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش به صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- اطلاعات هندسی نمونه‌های مورد بررسی پژوهش حاضر

λ	H ₃ (mm)	WR	L ₂ (mm)	λ	H ₃ (mm)	WR	L ₂ (mm)
۰/۰۵	۰/۰۲۵	۰/۶۶	۰/۳۳	۰/۰۵	۰/۰۲۵	۱/۳۳	۰/۶۶۵
۰/۱	۰/۰۵			۰/۱	۰/۰۵		
۰/۲	۰/۱			۰/۲	۰/۱		
۰/۲۵	۰/۱۲۵			۰/۲۵	۰/۱۲۵		
۰/۳	۰/۱۵			۰/۳	۰/۱۵		
۰/۴	۰/۲			۰/۴	۰/۲		
۰/۰۵	۰/۰۲۵	۱	۰/۵	۰/۰۵	۰/۰۲۵	۱/۶۶	۰/۸۳
۰/۱	۰/۰۵			۰/۱	۰/۰۵		
۰/۲	۰/۱			۰/۲	۰/۱		
۰/۲۵	۰/۱۲۵			۰/۲۵	۰/۱۲۵		
۰/۳	۰/۱۵			۰/۳	۰/۱۵		
۰/۴	۰/۲			۰/۴	۰/۲		

۳- معادلات حاکم

فرضیات رایج در مدل‌سازی با توجه به تمرکز این پروژه بر مدل‌سازی حرکت قطره در کانال گاز در زیر ارائه شده است [۱۴]. درک تمام این فرضیات به منظور پیش‌بینی محدودیت مدل و نیز تفسیر دقیق نتایج آن مهم و ضروری است. جزئیات مربوط به فرمول‌بندی و معادلات و پس‌زمینه تئوری را می‌توان در مراجع [۱۵-۱۷] یافت.

- مسئله به صورت دوبعدی طراحی و حل می‌شود.
- جریان دوفازی گاز-مایع در نظر گرفته می‌شود.
- شبیه‌سازی به صورت غیر دائم در نظر گرفته شده است.
- رژیم جریان به دلیل ابعاد کانال و سرعت کم به صورت آرام ($Re=344/1$) در نظر شده است [۱۸].
- عدد ماخ بسیار کوچک است و بنابراین جریان سیال به عنوان جریان تراکم ناپذیر فرض می‌شود.
- جریان هم‌دما در نظر گرفته شده است، بنابراین از تغییرات در حجم قطره به دلیل تبخیر یا تقطیر صرف‌نظر می‌شود [۱۹].
- کشش سطحی و خواص سیال ثابت در نظر گرفته شده است.

معادلات اصلی حاکم بر مدل‌سازی عبارت‌اند از: معادله بقای جرم، معادله بقای مومنتوم (ناویر-استوکس) و معادله حجم سیال (VOF) برای پی‌جویی فصل مشترک قطرات آب و جریان گاز می‌باشد. معادلات بقای جرم و بقای مومنتوم در جهت x و y در حالت دوبعدی و در مختصات کارتزین به ترتیب توسط روابط (۳) تا (۵) ارائه می‌شوند.

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} \right) = -\frac{\delta p}{\delta x} + F^{st}_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} \right) = -\frac{\delta p}{\delta y} + F^{st}_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

در روابط ۳ تا ۵، u و v مؤلفه‌های سرعت در جهت x و y ، ρ چگالی، p فشار، F^{st} نیروی کشش سطحی و μ لزجت دینامیکی می‌باشد.

۳-۱- روش حجم سیال

در روش حجم سیال، قانون بقای جرم برای هر فاز به صورت مستقیم اعمال می‌گردد. همچنین، تغییرات توپولوژی فصل مشترک مستقیماً حساب می‌شود و تمهید خاصی برای شبیه‌سازی جدا شدن فصل مشترک و اتصال آن لازم نیست. در روش حجم سیال تابع کسر حجمی، α ، برای یکی از فازها مقدار ۱ و برای فاز دیگر مقدار ۰ را داراست. پر واضح است که مقدار α در سلولی که هر دو فاز موجود باشند (فصل مشترک) بین ۰ و ۱ خواهد بود. با کمک این تابع می‌توان خواص فیزیکی سیال را در هر نقطه از دامنه حل تعریف نمود. اگر ϕ به عنوان یک خاصیت فیزیکی همانند چگالی، لزجت و ... در نظر گرفته شود، برای این خاصیت در کل میدان رابطه ۶ برقرار است:

$$\phi = \phi_2 + (\phi_1 - \phi_2) \quad (6)$$

که در آن اندیس ϕ نشانگر فاز مورد نظر است.

در روش حجم سیال، برای محاسبه دقیق فصل مشترک روش‌هایی در نظر گرفته شده است. در این روش‌ها در سلول‌های ناحیه فصل مشترک یک تقریب هندسی برای فصل مشترک در نظر گرفته می‌شود. این کار سبب می‌شود که در جابجایی α در میدان حل به کمک میدان سرعت، شار عبوری از سطوح سلول با دقت بیشتری محاسبه شده و دیفیوژن عددی آن کاهش یابد. بر همین اساس روش‌های مختلفی ابداع شده است. در این مقاله از الگوریتم-VOF PLIC برای بازسازی فصل مشترک استفاده شده که طی دو مرحله بر میدان حل اعمال گردیده است. در مرحله اول (مرحله بازسازی)، با استفاده از مقدار کسر حجمی در هر سلول و سلول‌های مجاور، سطح بازسازی و در مرحله دوم (مرحله انتقال)، سطح بازسازی شده توسط میدان سرعت جابجا شد.

۲-۳- نسبت پوشش آب^۲

یکی از کاراکترهای تأثیرگذار در مقوله‌ی مدیریت آب درون پیل‌های سوختی غشا پلیمری که به صورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه می‌شود نسبت پوشش آب متوسط و لحظه‌ای، WCR است که معادلات آن به شرح زیر می‌باشد:

$$WCR = \frac{A_{water}}{A} = \frac{\int F dA}{\int dA} \quad (7)$$

$$\overline{WCR} = \frac{\int_{t_0}^t (WCR) dt}{(t - t_0)} \quad (8)$$

مقدار \overline{WCR} روی سطح لایه نفوذ گاز یک پارامتر تأثیرگذار در عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری است. هنگامی که مقدار \overline{WCR} روی سطح لایه نفوذ گاز کم‌تر باشد گازهای واکنش‌دهنده راحت‌تر به لایه‌های کاتالیست می‌رسند که باعث بهبود عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری می‌گردد. با ارزیابی زمان تغییرات WCR در دیوارهای مختلف پیل سوختی غشا پلیمری، می‌توان رفتار قطرات در طول این جابجایی را با جزئیات بیشتری مطالعه کرد. به حداقل رساندن مقدار WCR یکی از اهداف طراحی بهینه پیل سوختی غشا پلیمری است که منجر به بهبود کلی عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری می‌شود [۲۰، ۲۱] در این پژوهش WCR روی سطح لایه نفوذ گاز محاسبه خواهد شد.

۳-۳- کشش سطحی

در این بخش، مدل CSS که اثر کشش سطحی را با یک نیروی حجمی جایگزین می‌کند، معرفی می‌شود. در این مدل خطای ناشی از جریان‌های پارازیته کمتر است. در مدل CSS، نیروی حجمی به صورت دیورژانس یک تانسور (تانسور موئینگی T) محاسبه می‌شود. تانسور موئینگی مماس بر سطح است و به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود:

$$T = -\sigma(I - n \otimes n) \nabla \alpha \quad (9)$$

که I ماتریس یکه و \otimes نماد ضرب تانسوری است. n بردار یکه عمود بر سطح است. در روش CSS، Fst به صورت رابطه ۱۰ تعریف می‌شود که σ ضریب کشش سطحی است:

$$\hat{n} = \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \quad n_i = \frac{\partial \alpha / \partial x_i}{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial x_n} \frac{\partial \alpha}{\partial x_n} \right)^{1/2}} \quad (10)$$

² Water Coverage Ratio (WCR)

$$F^{st} = -\nabla \cdot T = \nabla \cdot \left[\sigma \left(|\nabla \alpha| I - \frac{\nabla \alpha \otimes \nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right) \right] \quad (11)$$

۴- شرایط مرزی و اولیه

در این مقاله، شبیه‌سازی دوبعدی جریان گاز اطراف قطره‌ای که از سطح لایه نفوذ گاز وارد کانال گاز شکل ۱ می‌شود، مدنظر است. قطره‌ای به قطر $100 \mu\text{m}$ در فاصله $100 \mu\text{m}$ از ورودی کانال روی سطح لایه نفوذ گاز قرار داده می‌شود. برای شرط مرزی ورودی از پروفیل سهمی برای سرعت مطابق رابطه ۱۱ استفاده می‌شود. U_{max} در رابطه ۱۱ سرعت در مرکز کانال می‌باشد. فشار در خروجی کانال برابر فشار اتمسفر فرض می‌شود. برای دیواره کانال و لایه نفوذ گاز شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است. همچنین، زاویه تماس استاتیکی با زاویه‌های 40° برای سطح آب‌دوست S_3 BP و سطح مانع S_5 و 140° برای سطح آب‌گریز لایه نفوذ گاز S_1 استفاده می‌شود.

چگالی و لزجت دینامیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها برای آب $998/2 \text{ kgm}^{-3}$ و $0/001003 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ و برای هوا $1/225 \text{ kgm}^{-3}$ و $1/78 \times 10^{-5} \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ می‌باشد. ضریب کشش سطحی بین آب و هوا $0/0719 \text{ Nm}^{-1}$ و شتاب جاذبه $9/81 \text{ ms}^{-2}$ در نظر گرفته می‌شود و شرایط اولیه سرعت صفر است. شبیه‌سازی‌ها با سرعت بیشینه $7/\Delta \text{ms}^{-1}$ (U_{max}) در ورودی انجام می‌شود. این سرعت بیشینه با استفاده از بیشینه عدد رینولدز ($344/101$) ارائه شده توسط اشرفی و همکاران [۱۸] طبق رابطه ۱۲ به دست آمده است. این عدد رینولدز در محدوده جریان آرام است که به همین علت در شبیه‌سازی نیز جریان آرام در نظر گرفته شده است.

$$u = 4U_{max} \times \left(\frac{y}{h} - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right) \quad (12)$$

$$Re = \frac{\rho \left(\frac{2}{3} U_{max} \right) (2H)}{\mu} \quad (13)$$

اگر θ زاویه تماس مایع با دیوار باشد، آنگاه نرمال سطح مایع در سلول مجاور دیوار (n) از رابطه (۱۳) به دست می‌آید. به این شرط مرزی، شرط مرزی زاویه تماس گفته می‌شود.

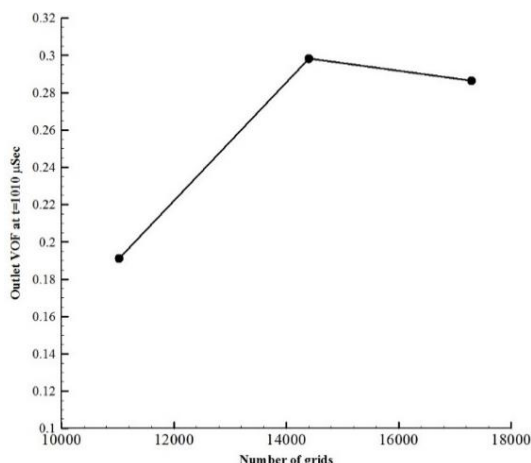
$$n = n_w \cos \theta + t_w \sin \theta \quad (14)$$

در رابطه ۱۳ n_w و t_w به ترتیب بردارهای یکه نرمال و مماس بر دیواره هستند. ترکیب زاویه تماس با بردار نرمال سطح محاسبه شده در یک سلول دور از دیواره، انحنای موضعی سطح را تعیین می‌کند و این انحنا برای تعیین عبارت نیروی حجمی در محاسبات کشش سطحی استفاده می‌شود. زاویه تماس θ زاویه بین دیواره و خط مماس بر سطح در نقطه تماس می‌باشد.

۵- شبکه‌بندی و استقلال از شبکه

در بررسی استقلال جواب از شبکه محاسباتی با استفاده از شبیه‌سازی مسئله در سه شبکه مختلف با تعداد مش ۱۱۰۲۴، ۱۴۴۰۰ و ۱۷۲۹۲ در گام زمانی 2×10^{-8} بررسی شده است که تمام شبکه‌های محاسباتی به صورت کاملاً یکنواخت ($\Delta x = \Delta y$) تولید شده است.

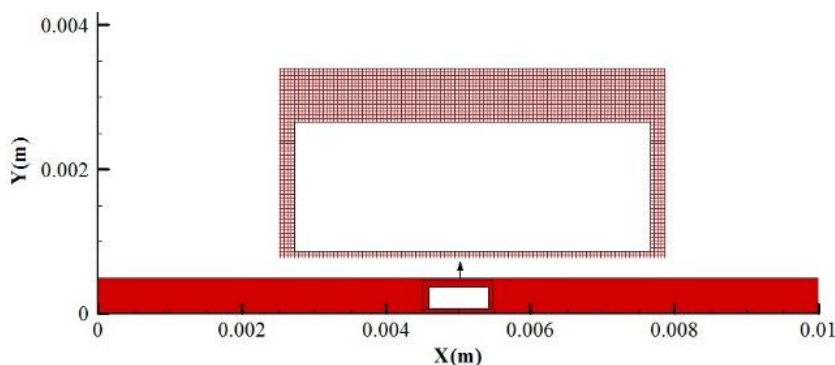
نمودار شکل ۲، کسر حجمی خروجی قطره را در لحظه‌ی $1010 \mu\text{s}$ برای این سه شبکه محاسباتی نشان می‌دهد.



شکل ۲- نسبت کسر حجمی خروجی قطره در لحظه $1010 \mu s$ برای شبکه‌های محاسباتی مختلف

همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج دو شبکه آخر نزدیک به هم است. شبکه محاسباتی با تعداد مش ۱۷۲۹۲ نسبت به شبکه با ۱۴۴۰۰ مش، ۳/۹۷ درصد اختلاف دارد که بیانگر به دست آمدن نتایج مستقل از شبکه می‌باشد و ریزتر کردن شبکه تأثیری در جواب نخواهد داشت؛ در نتیجه از شبکه با تعداد مش ۱۴۴۰۰ برای کاهش هزینه و زمان محاسباتی استفاده شده است.

با توجه به اندازه شبکه‌بندی نهایی با ۱۴۴۰۰ سلول و ابعاد هر سلول که برابر با $4/1666 \times 10^{-6}$ متر است، برای شبیه‌سازی نهایی به ۲۴ سلول در قطر هر قطره (CPD۳) نیاز است. در نهایت از این CPD برای مش بندی نهایی مسئله استفاده شده است. شکل ۳ مش نهایی انتخاب شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳- شکل مش نهایی به همراه بزرگنمایی قسمت بین مانع و دیواره

۶- اعتبار سنجی

در این بخش زمان تخلیه به ازای سرعت‌های ورودی U_{max} 5 ms^{-1} ، 10 ms^{-1} و 15 ms^{-1} با نتایج تجربی پژوهش اشرفی و همکاران [۱۸] مقایسه و در جدول ۳ ارائه شده است.

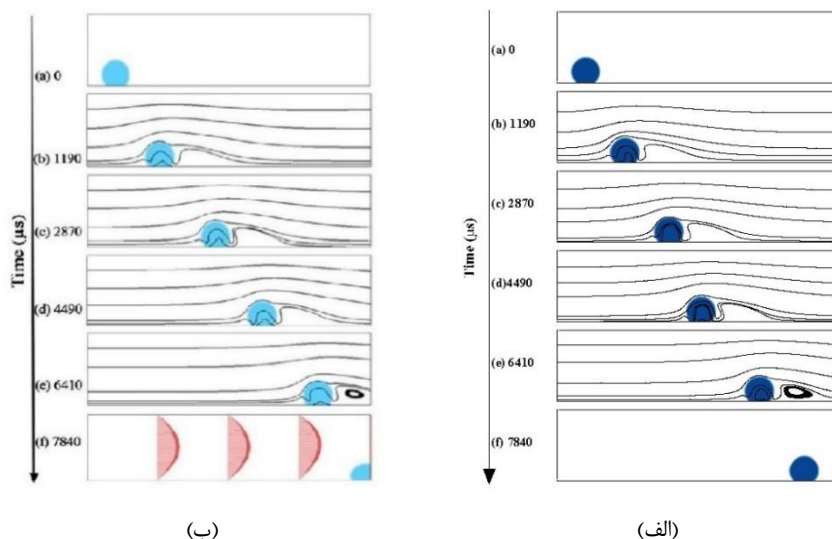
³ Cell per diameter

جدول ۳- نتایج آزمایشگاهی، نتایج نرم‌افزار Ansys Fluent و درصد خطا در سرعت‌های مختلف ورودی

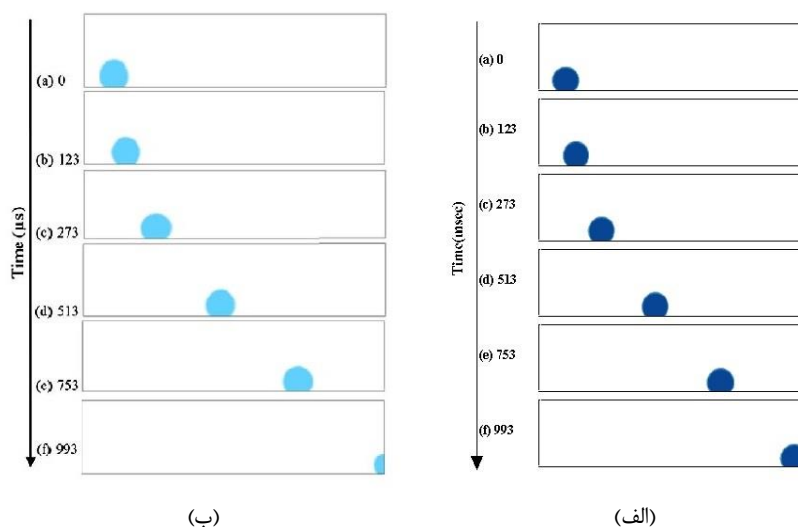
خطا. %	زمان تخلیه قطره (μs)		سرعت جریان ورودی هوا (ms^{-1})
	نتایج عددی	نتایج آزمایشگاهی	
۷/۸	۱/۰۵	۱/۱۳	۵
۷/۴	۱/۸۴	۱/۷۱	۱۰
۱۲/۸	۸/۷۲	۷/۶۰	۱۵

همان‌گونه که مشاهده می‌شود کمترین خطا ۷/۴٪ و بیشترین خطا ۱۲/۸٪ می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق خوب بین دو دسته از داده‌ها است.

در ادامه نتایج عددی مربوط به شکل قطره در زمان‌های مختلف که از پژوهش حاضر به دست آمده است با نتایج عددی این مقاله اشرفی و همکاران [۱۸] در شکل ۴ و شکل ۵ مقایسه می‌شود که از تطابق خوبی برخوردار است.



شکل ۴- شکل قطره در زمان‌های مختلف در سرعت ورودی $5ms^{-1}$: (الف) پژوهش حاضر (ب) مقاله اشرفی و همکاران [۱۸]



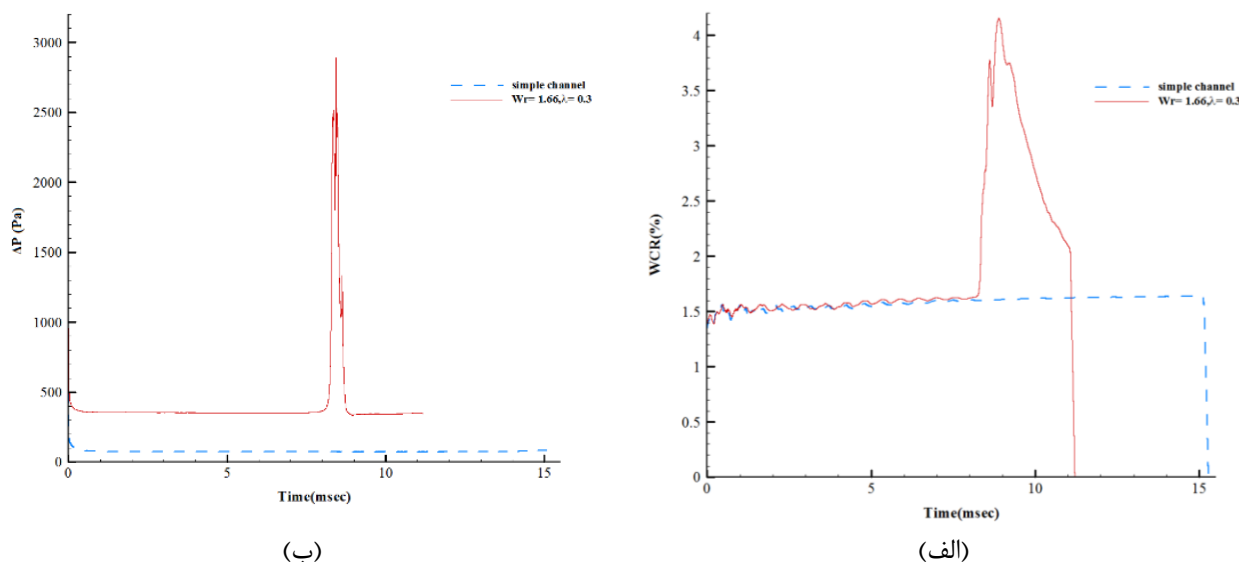
شکل ۵- شکل قطره در زمان‌های مختلف در سرعت ورودی $15ms^{-1}$: (الف) پژوهش حاضر (ب) مقاله اشرفی و همکاران

[۱۸]

۷- نتایج

۷-۱- بررسی اثر طول مانع

درصد نسبت پوشش آب و افت فشار برحسب زمان در کانال ساده (بدون مانع) و کانال مسدود شده با مانع در نسبت $W_r=1/66$ و $\lambda=0/3$ در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶- (الف) نسبت پوشش آب، (ب) افت فشار، برحسب زمان در کانال ساده و کانال مسدود شده با مانع در نسبت $W_r=1/66$ و $\lambda=0/3$

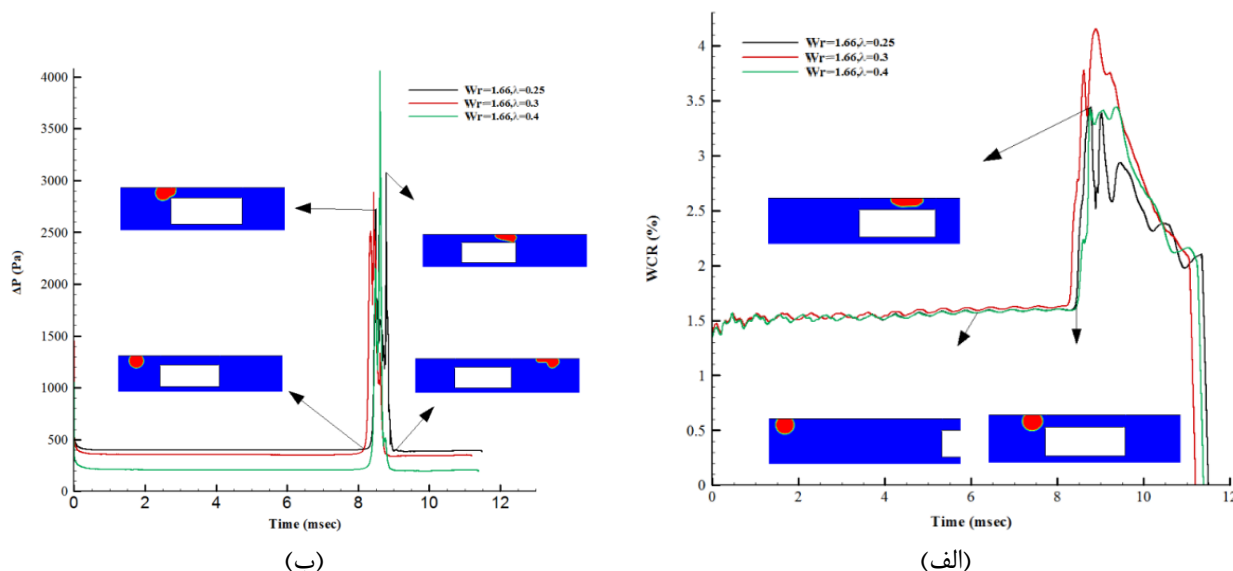
همان گونه که مشاهده می شود وجود مانع باعث کاهش زمان تخلیه قطره نسبت به حالت بدون مانع (به میزان ۲۵٪) از کانال شده است. حرکت قطره تا مانع در حدود ۸/۲۸ msec زمان می برد و از آنجا تا لحظه ی خروج از کانال (۱۱/۲ msec) ۲/۹۲ msec زمان می برد. هنگامی که قطره از کانال خارج می شود، مقدار WCR روی سطح لایه نفوذ گاز به صفر می رسد که از این طریق زمان تخلیه قطره محاسبه شده است.

همین طور در حالت کانال ساده مقدار WCR تقریباً در تمام زمان های حرکت قطره ثابت و در حدود ۱/۶ است ولی در حالت با مانع یک پرش از ۱/۶٪ تا ۴/۱۵٪ در مقدار WCR در بازه زمانی ۸/۲۵ msec تا ۸/۸ msec اتفاق افتاده است که نشان می دهد سطح تماس قطره با سطح لایه نفوذ گاز افزایش می یابد و بعد از خروج از کانال به صفر می رسد. در شکل ۹ افت فشار برحسب زمان در کانال ساده (بدون مانع) و کانال مسدود شده با مانع در نسبت $W_r=1/66$ و $\lambda=0/3$ ارائه شده است.

همان گونه که مشاهده می شود به طور کلی وجود مانع باعث افزایش افت فشار شده است. در حالت کانال ساده افت فشار در تمام زمان ها مقدار ثابت و برابر با ۷۵ Pa است ولی در حالت کانال با مانع در هنگام نزدیک شدن و رسیدن به مانع ناگهان افت فشار از ۳۵۰ Pa تا ۲۸۷۴ Pa (۸۲۱٪) افزایش پیدا می کند و بعد از خروج قطره افت فشار به حالت ثابت قبل از مانع می رسد.

۷-۲- بررسی اثر موقعیت قرارگیری مانع در عرض کانال

درصد نسبت پوشش آب و افت فشار بر حسب زمان در کانال مسدود شده با مانع در نسبت $Wr=1/66$ و $\lambda=0/25$ ، $\lambda=0/3$ و $\lambda=0/4$ همراه با موقعیت قطره در کانال با نسبت مانع $\lambda=0/25$ به ترتیب در لحظات ۶/۱۵، ۸/۴۳ و ۸/۷۶ میلی‌ثانیه و ۸/۱۸، ۸/۴۹، ۸/۸ و ۹/۰۶ میلی‌ثانیه در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۷- (الف) نسبت پوشش آب، (ب) افت فشار، نسبت پوشش آب بر حسب زمان در $Wr=1/66$ و λ های ۰/۲۵، ۰/۳ و ۰/۴

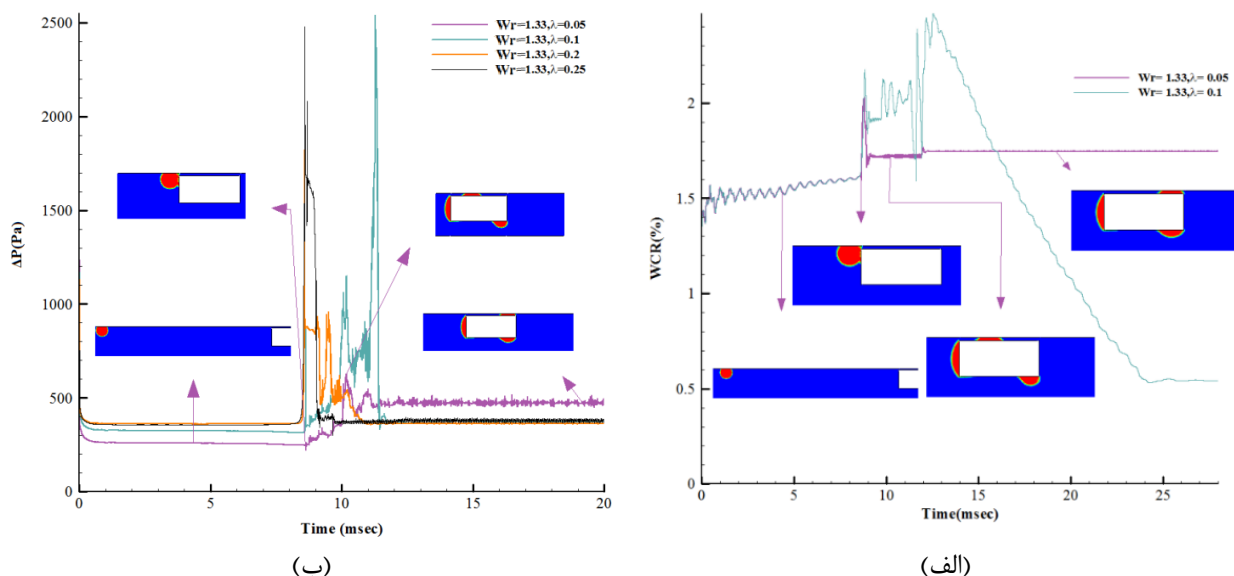
همان‌طور که در شکل ۹ (ب) مشاهده می‌شود، در راستای جریان و در طول کانال فشار افت می‌کند این نشان‌دهنده‌ی آن است که گرادیان فشار $(\frac{dp}{dx})$ در طول کانال منفی می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که فشار داخل قطره از بیرون آن بیشتر است که به دلیل نیروهای کشش سطحی در فصل مشترک قطره و گاز می‌باشد. برخلاف کانال ساده، فشار با حرکت قطره در طول کانال بخصوص وقتی که قطره به مانع می‌رسد و هنگام خروج قطره از مانع، به‌طور لحظه‌ای تغییر می‌کند. در حداصل دیواره پایین مانع و دیواره کف کانال افت فشار جریان مانند افت فشار در طول کانال است، این حالت به دلیل نسبت طول به ارتفاع زیاد و تک فاز بودن جریان می‌باشد که باعث ایجاد جریانی شبیه به جریان کاملاً توسعه‌یافته و توزیع خطی فشار می‌شود.

۷-۳- گرفتگی در کانال

علت مسدود شدن کانال، نیروهای کشش سطحی فوق‌العاده زیاد است. اگر نیروهای اینرسی، درگ و برشی که به قطره وارد می‌شوند بر کشش سطحی غلبه کنند، باعث از هم گسیخته شدن قطره می‌شوند. گرفتگی در بین مانع و دیوار لایه نفوذ گاز و یا پشت مانع که جریان‌های ویک قرار دارند ایجاد می‌شود.

گرفتگی در دو ناحیه، در نسبت λ های ۰/۰۵ و ۰/۱ در تمامی نسبت‌های Wr رخ می‌دهد. قطره بخشی از کانال (در بین مانع و دیواره سقف کانال) را مسدود می‌کند و بخش دیگر قطره از زیر مانع به تدریج خارج می‌شود. در نسبت $\lambda=0/2$ در تمامی نسبت‌های Wr و در نسبت $\lambda=0/25$ در تمامی نسبت‌های Wr به جز $Wr=1/66$ بخشی از قطره پس از گسیختگی پشت مانع می‌چسبد و از کانال خارج نمی‌شود.

در شکل ۱۰ (الف) درصد نسبت پوشش آب بر حسب زمان در کانال مسدود شده با مانع در نسبت $Wr=1/33$ و $\lambda=0/05$ و $\lambda=0/1$ همراه با موقعیت قطره در کانال با نسبت مانع $\lambda=0/05$ در لحظات $4/34$ ، $8/66$ ، $11/8$ و $19/2$ میلی ثانیه ارائه شده است. در شکل ۱۰ (ب) افت فشار بر حسب زمان در کانال مسدود شده با مانع در نسبت $Wr=1/33$ و $\lambda=0/05$ و $\lambda=0/1$ ، $\lambda=0/2$ و $\lambda=0/25$ همراه با موقعیت قطره در کانال با نسبت مانع $\lambda=0/05$ در لحظات $4/34$ ، $8/66$ ، $11/8$ و $19/2$ میلی ثانیه ارائه شده است.



شکل ۸- (الف) نسبت پوشش، (ب) افت فشار، بر حسب زمان در $Wr=1/33$ و λ های مختلف

همان طور که در شکل ۱۰ (الف) مشاهده می شود بعد از برخورد قطره با مانع درصد پوشش آب به علت چندتکه شدن قطره کاهش پیدا می کند. در شکل ۱۰ (ب) مشاهده می شود پس از برخورد قطره با مانع با نسبت $\lambda=0/05$ در لحظه $4/34$ میلی ثانیه قطره چندتکه می شود. افت فشار به علت فضای بازتر زیر مانع نسبت به سایر λ ها کمتر افزایش پیدا می کند. در ادامه افت فشار به یک حالت نوسانی ثابت می رسد که این حالت نوسانی ادامه پیدا می کند. همان طور که مشاهده می شود نوسانات در نمودارهای فشار در تمامی حالتها زیاد است که این باعث کارکرد ناپایدار پیل سوختی می گردد.

کمترین و بیشترین افت فشار لحظه ای در تمامی حالتها مورد بررسی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- کمترین و بیشترین افت فشار لحظه ای در تمامی حالتها

بیشینه افت فشار لحظه ای (Pa)	λ	Wr	بیشینه افت فشار لحظه ای (Pa)	λ	Wr
۱۷۴۱/۲۹	۰/۰۵	۱/۳۳	۸۳۶/۴۶	کانال بدون مانع	۰/۶۶
۲۵۴۰/۰۴	۰/۱		۱۹۳۳/۸۳	۰/۰۵	
۱۸۲۲/۴۱	۰/۲		۲۲۷۴/۵۰	۰/۱	
۲۴۷۶/۸۶	۰/۲۵		۲۰۱۵/۶۱	۰/۲	
۲۳۳۵/۷۳	۰/۳		۱۸۹۳/۱۳	۰/۲۵	
			۲۰۷۰/۰۳	۰/۳	

۴۰۳۷/۳۶	۰/۴	۰/۶۶	۴۰۸۹/۵۳	۰/۴	۱
۱۸۹۹/۲۵	۰/۰۵		۱۵۹۳/۳۸	۰/۰۵	
۲۵۲۵/۱۱	۰/۱		۱۸۵۹۷/۷۶	۰/۱	
۲۰۸۹/۹۷	۰/۲		۱۸۹۶/۴۵	۰/۲	
۳۰۷۹/۰۶	۰/۲۵		۲۲۱۳/۸۱	۰/۲۵	
۲۸۸۸/۸۰	۰/۳		۲۲۸۶/۰۶	۰/۳	
۴۰۶۰/۹۰	۰/۴		۶۵۲۷/۴۳	۰/۴	

همان طور که مشاهده می شود کمترین بیشینه افت فشار مربوط به مانع با نسبت $WR=0/66$ و $\lambda=0/3$ و برابر با $2070/03 Pa$ می باشد. همچنین، بیشترین بیشینه افت فشار مربوط به مانع با نسبت $WR=1$ و $\lambda=0/1$ و برابر با $18597/76 Pa$ می باشد.

در ادامه مقادیر زمان تخلیه قطره، میانگین زمانی درصد نسبت پوشش آب، افت فشار برای کانال های بدون گرفتگی و همچنین افت فشار تا ۲۰ میلی ثانیه برای کانال هایی که دچار گرفتگی شدند، در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- نتایج عددی متوسط گیری شده زمانی پژوهش حاضر

افت فشار تا ۲۰ msec (Pa)	میانگین زمانی افت فشار (Pa)	میانگین زمانی نسبت پوشش آب (%)	زمان تخلیه (msec)	λ	WR	افت فشار تا ۲۰ msec (Pa)	میانگین زمانی افت فشار (Pa)	میانگین زمانی نسبت پوشش آب (%)	زمان تخلیه (msec)	λ	WR
-	-	-	-	-	-	-	۷۵/۷۰	۱/۵۷	۱۵/۲۸	-	کانال ساده
۳۷۰/۸۲	-	-	مسدود	۰/۰۵	۱/۳۳	۲۹۲/۱۹	-	-	مسدود	۰/۰۵	۰/۶۶
۴۰۰/۳۵	-	-	مسدود	۰/۱		۳۴۴/۶۸	-	-	مسدود	۰/۱	
۳۷۸/۱۵	-	-	مسدود	۰/۲		۳۴۴/۶۸	-	-	مسدود	۰/۲	
۴۰۰/۶۶	-	-	مسدود	۰/۲۵		۲۹۶/۸۶	-	-	مسدود	۰/۲۵	
-	۳۷۱/۹۳	۱/۸۵	۱۱/۴۹	۰/۳		-	۲۹۳/۸۴	۱/۷۶	۱۲/۰۳	۰/۳	
-	۲۳۸/۳۷	۱/۸۱	۱۱/۴۵	۰/۴		-	۲۰۹/۸۰	۱/۷۶	۱۱/۷۸	۰/۴	
۳۸۰/۸۰	-	-	مسدود	۰/۰۵		۱/۶۶	۳۴۵/۲۵	-	-	مسدود	
۴۲۴/۵۱	-	-	مسدود	۰/۱	۳۷۰/۷۶		-	-	مسدود	۰/۱	
۴۳۷/۵۶	-	-	مسدود	۰/۲	۳۴۵/۲۲		-	-	مسدود	۰/۲	
-	۴۴۵/۴۸	۱/۷۹	۱۱/۴۹	۰/۲۵	۳۴۹/۲۳		-	-	مسدود	۰/۲۵	
-	۴۰۷/۱۶	۱/۹۱	۱۱/۲۰	۰/۳	-		۳۳۵/۱۹	۱/۸۱	۱۱/۷۲	۰/۳	
-	۲۵۱/۴۵	۱/۸۲	۱۱/۳۹	۰/۴	-		۲۲۸/۳۷	۱/۷۸	۱۱/۴۵	۰/۴	

در ادامه مقایسه نتایج عددی پژوهش حاضر با مقادیر کانال ساده در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- مقایسه نتایج عددی پژوهش حاضر با مقادیر کانال ساده

افت فشار (%)	نسبت پوشش آب (%)	زمان تخلیه قطره (%)	λ	W_r	افت فشار (%)	نسبت پوشش آب (%)	زمان تخلیه قطره (%)	λ	W_r
+۳۰۳۹۱	+۱۷/۴۹	-۲۴/۸۳	۰/۳	۱/۳۳	+۱۵۲۸۸	+۱۲/۰۴	-۲۱/۳۰	۰/۳	۰/۶۶
+۲۱۴/۸۷	+۱۴/۷۵	-۲۵/۰۵	۰/۴		+۱۷۷/۱۶	+۱۲/۰۸	-۲۲/۹۲	۰/۴	
+۴۸۸/۴۶	+۱۳/۷۵	-۲۴/۷۹	۰/۲۵	۱/۶۶	+۳۴۲/۷۸	+۱۴/۹۷	-۲۳/۳۳	۰/۳	۱
+۴۳۷/۸۵	+۲۱/۱۷	-۲۶/۷۱	۰/۳		+۲۰۱/۶۷	+۱۳/۰۰	-۲۴/۴۹	۰/۴	
+۲۳۲/۱۵	+۱۵/۵۷	-۲۵/۵۰	۰/۴						

- همان‌طور که در جدول ۵ و ۶ قابل مشاهده است در تمام حالات هندسه با مانع وجود مانع باعث کاهش زمان تخلیه قطره می‌گردد که از این نظر وجود مانع برای مدیریت آب در پیل سوختی یک ویژگی مثبت محسوب می‌شود، همچنین با کاهش نسبت W_r در λ های یکسان افت فشار متوسط کاهش می‌یابد که این نیز یک ویژگی مثبت می‌باشد.
- از منظر کاهش زمان تخلیه بهترین حالت مربوط به نسبت $W_r=1/66$ و $\lambda=0/3$ می‌باشد که زمان تخلیه آن $11/20 \text{ mSec}$ است و نسبت به کانال ساده $26/71$ درصد کاهش داشته است؛ بنابراین در صورتی که محدودیتی برای تأمین فشار نباشد، این حالت بهترین حالت می‌باشد.
- از منظر WCR بهترین حالت مربوط به نسبت $W_r=0/66$ و $\lambda=0/3$ می‌باشد که نسبت پوشش آب متوسط $1/76\%$ است و نسبت به کانال ساده $12/04\%$ افزایش داشته است.
- از منظر افت فشار متوسط بهترین حالت مربوط به نسبت $W_r=0/66$ و $\lambda=0/4$ می‌باشد که افت فشار متوسط $209/82 \text{ Pa}$ است و نسبت به کانال ساده $177/16\%$ افزایش داشته است.
- در مجموع با توجه به اینکه زمان تخلیه در مقیاس چند میلی‌ثانیه با هم اختلاف دارد، اگر پارامتر زمان تخلیه در نظر گرفته نشود، بهترین حالت از نظر کاهش WCR و کاهش افت فشار لحظه‌ای مربوط به نسبت $W_r=0/66$ و $\lambda=0/3$ می‌باشد.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله حرکت قطره آب درون کانال کاتد پیل سوختی غشا پلیمری همراه با مسدود سازی عرضی در هندسه‌های مختلف (۲۴ هندسه مختلف) به صورت عددی بررسی شده است. برای شبیه سازی از نرم‌افزار تحلیلی و برای مدل سازی جریان دوفازی از مدل حجم سیال استفاده شده است. شبیه سازی مساله بصورت جریان آرام، دوفازی، دوبعدی، غیر دائم، تراکم ناپذیر، هم‌دما با کشش سطحی و خواص سیال ثابت انجام شده است. در این تحقیق، مطالعه مش و مطالعه گام زمانی انجام شده است و در نهایت از گام زمانی 10^7 ثانیه و تعداد ۲۴ مش در قطر هر قطره استفاده شده است. همچنین اعتبارسنجی پژوهش حاضر با پژوهش‌های تجربی پیشین انجام شده است. اهم نتایج به دست آمده عبارتند از:

- وجود مانع در کانال باعث کاهش زمان تخلیه قطره از $21/30\%$ تا $26/71\%$ می‌گردد.
- وجود مانع باعث افزایش افت فشار متوسط از $177/16\%$ تا $488/46\%$ در کانال می‌گردد.

- در کانال کاتد وقتی که قطره به مانع می‌رسد و در میان مانع و سقف کانال قرار می‌گیرد WCR لحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند که بهتر است در این بخش از کانال سطح آب گریزتر ساخته شود.
- افزایش طول مانع باعث افزایش افت فشار در لهای ثابت می‌گردد.
- در نسبت لهای کوچک‌تر از ۰/۲۵ انسداد در کانال اتفاق می‌افتد که بهتر است برای دوری از عملکرد ناپایدار پیل سوختی از لهای بزرگ‌تر و متناسب با افت فشار بهتر است از $\lambda=0/3$ استفاده کرد.
- به‌صورت کلی مسدودسازی کانال با مانع به‌صورت عرضی اثر قابل توجهی در مقدار میانگین WCR ندارد.
- بهترین نسبت مانع در صورت عدم محدودیت در تأمین افت فشار مربوط به نسبت $Wr=1/66$ و $\lambda=0/3$ می‌باشد که زمان تخلیه آن ۱۱/۲۰ mSec است.
- بهترین هندسه مانع با توجه به افت فشار لحظه‌ای و نسبت پوشش آب $Wr=0/66$ و $\lambda=0/3$ است.
- در مدیریت آب درون کانال کاتد پیل سوختی در شرایط واقعی، نیاز به خروج سریع‌تر قطره آب است تا از انسداد و اختلال در روند کاری پیل جلوگیری شود. همچنین بررسی افت فشار به‌منظور انتخاب سیستم متناسب با پمپاژ و نداشتن نوسانات فشار لحظه‌ای برای کارکرد پایدار پیل اهمیت زیادی دارد.

۹- منابع

- [1] Y. Wang, K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho, and X. C. Adroher, "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research," *Applied Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 981-1007, 2011.
- [2] W. R. Baumgartner, P. Parz, S. D. Fraser, E. Wallnöfer, and V. Hacker, "Polarization study of a PEMFC with four reference electrodes at hydrogen starvation conditions," *Journal of Power Sources*, vol. 182, no. 2, pp. 413-421, 2008.
- [3] N. Yousfi-Steiner, P. Moçotéguy, D. Candusso, and D. Hissel, "A review on polymer electrolyte membrane fuel cell catalyst degradation and starvation issues: Causes, consequences and diagnostic for mitigation," *Journal of Power Sources*, vol. 194, no. 1, pp. 130-145, 2009.
- [4] S. Zhang et al., "A review of accelerated stress tests of MEA durability in PEM fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 388-404, 2009.
- [5] D. Liang, Q. Shen, M. Hou, Z. Shao, and B. Yi, "Study of the cell reversal process of large area proton exchange membrane fuel cells under fuel starvation," *Journal of Power Sources*, vol. 194, no. 2, pp. 847-853, 2009.
- [6] H. Li et al., "A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell," *Journal of Power Sources*, vol. 178, no. 1, pp. 103-117, 2008.
- [7] R. B. Ferreira, D. S. Falcão, V. B. Oliveira, and A. M. F. R. Pinto, "Numerical simulations of two-phase flow in proton exchange membrane fuel cells using the volume of fluid method-A review," *Journal of Power Sources*, vol. 277, pp. 329-342, 2015.
- [8] K. Mohammadzadeh, H. Khaleghi, H. Abolfazli, and M. Seddiq, "Effects of gas cross-over through the membrane on water management in the cathode and anode sides of PEM fuel cell," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 11, no. 4, pp. 861-875, 2018.
- [9] A. P. Manso, F. F. Marzo, J. Barranco, X. Garikano, and M. Garmendia Mujika, "Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 20, pp. 15256-15287, 2012.
- [10] H. Heidary, M. J. Kermani, and B. Dabir, "Influences of bipolar plate channel blockages on PEM fuel cell performances," *Energy Conversion and Management*, vol. 124, pp. 51-60, 2016.

- [11] S.-W. Perng, H.-W. Wu, T.-C. Jue, and K.-C. Cheng, "Numerical predictions of a PEM fuel cell performance enhancement by a rectangular cylinder installed transversely in the flow channel," *Applied Energy*, vol. 86 no. 9, pp. 1541-1554, 2009.
- [12] E. Afshari and N. B. Houreh, "Numerical predictions of performance of the proton exchange membrane fuel cell with baffle (s)-blocked flow field designs," *International Journal of Modern Physics B*, vol. 28, no. 16, p. 1450097, 2014.
- [13] G. Zhang, L. Fan, J. Sun, and K. Jiao, "A 3D model of PEMFC considering detailed multiphase flow and anisotropic transport properties," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 115, pp. 714-724, 2017.
- [14] F. Barbir, PEM fuel cells: theory and practice. Academic press, 2012.
- [15] A. Z. Weber and J. Newman, "Modeling Transport in Polymer-Electrolyte Fuel Cells," *Chemical Reviews*, vol. 104, no. 10, pp. 4679-4726, 2004.
- [16] C.-Y. Wang, "Fundamental models for fuel cell engineering," *Chemical reviews*, vol. 104, no. 10, pp. 4727-4766, 2004.
- [17] B. Sundén and M. Faghri, Transport phenomena in fuel cells, WIT press, 2005.
- [18] M. Ashrafi, M. Shams, A. Bozorgnezhad, and G. Ahmadi, "Simulation and experimental validation of droplet dynamics in microchannels of PEM fuel cells," *Heat and Mass Transfer*, vol. 52, 2006.
- [19] R. Jazmi, K. Mohammadzadeh, H. Khaleghi, and R. Maddahian, "Numerical investigation of water droplet behavior in anode channel of a PEM fuel cell with partial blockage," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 91 no. 4, pp. 1391-1406, 2021.
- [20] K. Mohammadzadeh, H. Khaleghi, R. Maddahian, and E. Shirani, "Numerical investigation of anode channel clogging of a PEMFC with a realistic droplet size distribution," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, no. 4, p. 204, 2020.
- [21] J. H. Jo and W. T. Kim, "Numerical simulation of water droplet dynamics in a right angle gas channel of a polymer electrolyte membrane fuel cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 26, pp. 8368-8383, 2015.