



Original Research

## Simulation and prediction of bubble dynamic parameters using machine learning algorithm in boiling process used in thermal analysis of internal combustion engines

Erfan Khosravian\*

Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Flow Boiling  
Numerical Simulation  
Bubble Dynamics  
Machine Learning  
Algorithm  
Artificial Neural Network

### ABSTRACT

Heat transfer is an important and influential factor in the design of internal combustion engines. Accurate prediction of heat transfer has a great impact on the design of cooling systems of internal combustion engines. The simulation of internal combustion engines for their thermal analysis is done using computational fluid dynamics along with boiling simulation. This article investigates the subcooled boiling flow of pure water in a small channel and its dependence on different parameters such as working pressure, heat flux, and mass flux. The subcooling temperature of the inlet fluid is of interest. Numerical simulations were performed using axisymmetric models and the effect of different grid sizes on the accuracy of the results was investigated. The bubble separation diameter was also studied and its relationship with pressure, heat flux, mass flux, and temperature under the inlet coolant was analyzed. Finally, a database of generated simulation results and predictive models for bubble dynamics using machine learning algorithms were presented.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

\* Corresponding author

E-mail address: [erfankhosravian@pnu.ac.ir](mailto:erfankhosravian@pnu.ac.ir) (E. Khosravian)

Received 7 January 2024; Accepted 25 April 2024

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

**Cite this article:** Khosravian E. Simulation and prediction of bubble dynamic parameters using machine learning algorithm in boiling process used in thermal analysis of internal combustion engines. The Journal of Engine Research. 2023 June 22;70(2):99-117. doi: [10.22034/ER.2024.2020901.1025](https://doi.org/10.22034/ER.2024.2020901.1025)

## شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای دینامیکی حباب با استفاده از روش یادگیری دستگانه در فرآیند جوشش در تحلیل گرمایی موتورهای احتراق داخلی

عرفان خسرویان\*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>کلیدواژه‌ها:</b> جوشش جریانی شبیه‌سازی عددی دینامیک حباب روش یادگیری دستگانه شبکه عصبی مصنوعی	انتقال حرارت عامل مهم و تأثیرگذار در طراحی موتورهای احتراق داخلی است. پیش‌بینی دقیق انتقال حرارت برای طراحی سامانه خنک‌کاری موتورهای احتراق داخلی تأثیر بسزایی دارد. لذا شبیه‌سازی موتورهای احتراق داخلی به‌منظور تحلیل حرارتی آن‌ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به‌همراه شبیه‌سازی جوشش انجام می‌پذیرد. در این مقاله، بررسی جریان جوشش زیرخنک‌شده آب خالص در یک آبراه کوچک و وابستگی آن به متغیرهای مختلف مانند فشار کاری، شار حرارتی، شار جرمی و دمای زیر سرد سیال ورودی مورد توجه است. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از الگوهای متقارن محوری انجام شده و تأثیر اندازه‌های شبکه‌های مختلف بر دقت نتایج مورد بررسی قرار گرفت. قطر جداسازی حباب نیز مطالعه شد و وابستگی آن با فشار، شار گرما، شار جرمی و دمای زیر خنک‌کننده ورودی تحلیل شد. در نهایت، یک پایگاه داده از نتایج شبیه‌سازی تولید شده و الگوهای پیش‌بینی برای دینامیک حباب با استفاده از روش‌های یادگیری دستگانه ارائه شد.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

\* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: [erfankhosravian@pnu.ac.ir](mailto:erfankhosravian@pnu.ac.ir) (عرفان خسرویان)

دریافت ۷ بهمن ۱۴۰۲؛ پذیرش ۶ اردیبهشت ۱۴۰۳  
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

**Cite this article:** Khosravian E. Simulation and prediction of bubble dynamic parameters using machine learning algorithm in boiling process used in thermal analysis of internal combustion engines. The Journal of Engine Research. 2023 June 22;70(2):99-117. doi: 10.22034/ER.2024.2020901.1025

## ۱- مقدمه

جوشش سازوکاری رایج در فرایند انتقال حرارت است که به طور گسترده برای کاربردهای مختلف صنعتی از جمله تحلیل حرارتی موتورهای احتراق داخلی، طراحی پره‌های گردا و صنایع هوافضا مطالعه شده است. در یک پژوهش به شبیه‌سازی راهگاه‌های سیال خنک‌کننده موتور ملی پرخوران با نرم‌افزار AVL-FIRE برای بررسی اثرات جوشش پرداخته شده است. در این مطالعه خانلو و همکاران [۱] اعتبارسنجی شبیه‌سازی را با مقایسه نتایج دو شبیه‌سازی رایج چن و BDL با نتایج تجربی جوشش خیلی سرد داخل مجرای افقی انجام دادند. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی چن تطابق بیشتری با نتایج تجربی دارد. لذا جوشش تک حالت در راهگاه آب موتور با روش چن شبیه‌سازی کردند. نتایج قبلی نشان دادند که ضریب انتقال حرارت با در نظر گرفتن جوشش در نقاط بحرانی موتور بشدت افزایش می‌یابد.

هسو و گراهام<sup>۱</sup> [۲] در سال ۱۹۶۱ خصوصیات انتقال حرارت جوشاندن روی صفحه صاف در خلاء را بررسی کردند. آنها دریافتند که ضریب انتقال حرارت به طور قابل توجهی با افزایش شار گرما افزایش می‌یابد و شار گرمای بحرانی به طور قابل توجهی در خلاء بیشتر از شرایط جوی است.

ژانگ<sup>۲</sup> و همکاران [۳] استفاده از جوش را در افزایش انتقال حرارت برای یک وسیله نقلیه مافوق صوت بررسی کرد. آنها دریافتند که استفاده از جوش می‌تواند به طور قابل توجهی ضریب انتقال حرارت را افزایش داده و بار حرارتی روی سطح خودرو را کاهش دهد. آنها همچنین دریافتند که استفاده از میکرو/نانو ساختارها بر روی سطح می‌تواند انتقال حرارت در حال جوش را بیشتر افزایش دهد.

ونگ<sup>۳</sup> و همکاران [۴] استفاده از جوش را در خنک کردن پره گردا گازی با دمای داغ بررسی کرد. آنها دریافتند که استفاده از جوش می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد خنک‌کننده تیغه را افزایش دهد و تنش‌های حرارتی روی سطح تیغه را کاهش دهد. آنها همچنین دریافتند که استفاده از شیوه‌های مختلف جوش، مانند جوشاندن هسته‌ای و جوش لایه، می‌تواند برای دستیابی به عملکرد خنک‌کننده مطلوب بهینه شود.

هوانگ<sup>۴</sup> و همکاران [۵]، استفاده از جوش برای خنک کردن یک احتراق مافوق صوت را بررسی کردند. آنها دریافتند که استفاده از جوش می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد خنک‌کننده محفظه احتراق را افزایش دهد و دمای دیواره احتراق را کاهش دهد. آنها همچنین دریافتند که استفاده از شیوه‌های مختلف جوش، می‌تواند برای دستیابی به عملکرد خنک‌کننده مطلوب بهینه شود. به طور خلاصه، استفاده از جوش در کاربردهای هوافضا به طور گسترده مطالعه شده است و مشخص شده است که سازوکار انتقال حرارت مؤثری برای دفع شارهای گرمای زیاد است. استفاده از جوش می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد خنک‌کننده اجزای مختلف هوافضا، از جمله وسایل نقلیه مافوق صوت، پره‌های گردا گاز و احتراق‌های مافوق صوت را افزایش دهد.

پدیده‌های چندحالتی به طور گسترده در محیط اطرافمان اتفاق می‌افتند و این پدیده‌ها به دلیل داشتن قابلیت انتقال حرارت شدید مهم اند. انتقال حرارت به همراه تغییر حالت سازوکار مهمی در انتقال حرارت است که با قابلیت انتقال گرما قابل توجه است و در عین حال اختلاف دمای سطح نیز بسیار کوچک است. این مزیت ویژه سبب شده است که از جریان‌های چندحالتی در صنایع مختلف استفاده شود. اخیراً دستگاه‌های برقی مورد استفاده در رایانه‌های پرسرعت و وسایل نقلیه برقی پیشرفت فوق‌العاده‌ای را تجربه کرده‌اند؛ در نتیجه توان تولیدی این دستگاه‌ها بیشتر رفت و در عین حال ابعادشان کوچک‌تر شده است. این امر مستلزم دفع مقادیر بیشتری از گرما است که سامانه‌های معمولی خنک‌کننده هوا نمی‌توانند این حجم از حرارت را مدیریت کنند. بنابراین، مجموعه وسیعی از مطالعات وجود دارند که مزایا و

<sup>1</sup> Hsu and Graham

<sup>2</sup> Zhang

<sup>3</sup> Wang J

<sup>4</sup> Hwang

کاربردهای جوشش جریانی در آبراه‌های کوچک را به عنوان یک سازوکار خنک‌کننده مؤثر که می‌تواند مقادیر زیادی گرما را دفع کند، بررسی می‌کنند. مزیت اصلی جوشش جریانی، قابلیت این فرآیند در اتلاف مقدار قابل توجهی از توان حرارتی است زیرا این نوع انتقال حرارت از گرمای نهان سیال بهره برداری می‌کند. همچنین، عمر مؤثر تجهیزات می‌تواند به دلیل اختلاف دماهای کوچک در جوشش جریانی افزایش یابد. علاوه بر این، از آنجایی که سیال تحت یک فرآیند تغییر حالت قرار می‌گیرد، سرعت ورودی مورد نیاز بسیار کمتر از جریان‌های تک‌حالت است [۶].

نانوسیالات حاوی نانوذرات معلق در سیالات پایه معمولی هستند. با توجه به ظرفیت شدید آن‌ها برای انتقال گرما، اغلب در سامانه‌های خنک‌کننده مانند تهویه مطبوع و خنک‌کننده‌های قطعات برقی استفاده می‌شوند. سازوکارهای انتقال حرارت با استفاده از جوشش جریانی نانوسیال به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: انتقال حرارت جابجایی بدون فرآیند تغییر حالت و جوشش جریانی [۷].

با این حال، استفاده از جوشش جریانی نانوسیال به دلیل قابلیت انتقال حرارت شدید آن توجه بیشتری را به خود جلب کرده است و مطالعات تحقیقاتی زیادی برای کشف این پدیده مهم انجام شده است [۸-۱۱]. یک روش متداول تغییر حالت در سامانه‌های خنک‌کننده، انتقال حرارت جوشش هسته‌ای است که به دلیل توانایی قدرتمند دفع گرما معروف است. بزرگترین نگرانی در این فرآیند خشک شدن است که زمانی اتفاق می‌افتد که دمای دیواره از نقطه ذوب مواد داغتر می‌شود [۱۲، ۱۳].

جوشش جریانی خیلی سرد نوعی خاصی از جوشش هسته‌ای است که در آن دمای توده کمتر از دمای اشباع سیال کاری است. جوشش جریانی خیلی سرد در آبراه‌هایی با قطرهای نسبتاً کوچک به دلیل سادگی در استفاده و نسبت سطح به حجم زیاد مورد توجه قرار گرفته است. در این جریان، قبل از فرآیند جوشش، دمای سیال با انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. سپس در لایه مجاور دیواره، فرآیند جوشش هسته‌ای خیلی سرد شروع می‌شود. پس از آن، حباب‌های کوچک‌تری که هسته‌های جوانه‌زنی را ترک می‌کنند، با هم ادغام می‌شوند و حباب بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که الگوی جریان به جریان اسلاگ تبدیل شود. جوشش جریانی در سال‌های اخیر توجه بیشتری را به خود جلب کرده است، زیرا فناوری‌های نوآورانه فشرده‌تری در حال طراحی هستند و نیاز بیشتری برای دفع گرما در سامانه‌های هوابرق، قطعات برقی و خودروهای دورگه مورد نیاز است. اخیراً، جوشش جریانی خیلی سرد توانسته است با استفاده از گرمای محسوس و نهان سیال خنک‌کننده، به عنوان راه حلی برای رفع این نیاز استفاده می‌شود. جوشش جریانی خیلی سرد روشی مؤثر برای دفع گرما است به نحوی که دمای توده سیال کمتر از دمای اشباع مایع باشد در حالی که گرمای اعمال شده به دیواره برای جوانه‌زنی کافی است [۱۴].

با استفاده از گرمای نهان سیال، جوشش جریانی خیلی سرد می‌تواند مقادیر بیشتری از سامانه‌های خنک‌کننده تک حالت معمولی را دفع کند. این الگوی جریان دارای مزیت افزوده‌ای است که به طور گسترده برای صنایعی مانند نیروگاه‌ها، مبدل‌های حرارتی و سامانه‌های خنک‌کننده برقی در دسترس است، بنابراین تمام تحقیقات در این زمینه دیر یا زود برای کاربران در زندگی روزمره قابل اجرا خواهد شد [۱۰].

جوشش جریانی خیلی سرد به دلیل سادگی در ساختار، نسبت سطح به حجم زیاد، محتوای سیال خنک‌کننده کم و دمای سطح نسبتاً یکنواخت نسبت به روش‌های معمولی ترجیح داده می‌شود. با این حال، پیچیدگی جریان دو حالت علاوه بر تأثیر متغیرهای بسیار زیاد در انتقال حرارت این نوع جریان سبب ایجاد دغدغه در طراحان شده است. این موضوع زمانی بیشتر تشدید می‌شود که یک خطا در طراحی اولیه سامانه خنک‌کننده می‌تواند باعث آسیب‌های فاجعه‌بار به محیط اطراف شود. به عبارت دیگر، حتی ممکن است دمای دیواره از دمای ذوب مواد بیشتر شود، که می‌تواند منجر به نشت سیال سمی شود. این امر نیازمند یک ابزار پیش‌بینی دقیق برای طراحی سامانه‌های حرارتی مبتنی بر جریان دو حالتی

<sup>1</sup> Avionics Systems (Aviation and Electronics)

قابل اعتماد و قوی است. در یک تحقیق تجربی، کیم<sup>۱</sup> و همکاران [۱۵] با استفاده از نانوذرات آلومینا دریافتند که شار حرارتی بحرانی و قابلیت انتقال حرارت افزایش یافته است.

عابدینی و همکاران [۱۶] در یک مطالعه عددی اثرات افزودن نانوذرات آلومینا با قطر ۳۰ نانومتر به سیال پایه آب را بررسی کردند. مشاهدات آن‌ها نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی نانوسیال از سیالات پایه بیشتر است. علیرغم افزایش قابل توجه ضریب انتقال حرارت در شارهای جرمی کوچک، مشاهده شد که افزودن نانوذرات در شارهای جرمی بزرگ اثرات ناچیزی دارد.

هم و چو<sup>۲</sup> [۱۷] اثرات اندازه نانوذرات و غلظت حجمی آن‌ها را در نانوسیال آلومینا و آب را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که شار حرارتی بحرانی افزایش یافته است درحالی که ضریب انتقال حرارت در مقایسه با سیال پایه کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین متوجه افزایش قطر جدایش حباب و بسامد جدایش حباب با افزایش غلظت نانوسیال شدند.

ستوده و همکاران [۱۸] یک مطالعه تجربی در جوشش جریانی خیلی سرد آلومینا/آب انجام دادند. هدف از مطالعه آن‌ها عمدتاً الگوسازی سامانه خنک‌کننده موتورهای احتراق داخلی بود که در آن از یک خنک‌کننده برای دفع گرمای تولید شده حاصل از احتراق استفاده می‌شود. آن‌ها افزایش انتقال حرارت را با افزایش زبری لوله مشاهده کردند.

مشایی و همکاران [۱۹] یک بررسی عددی برای بررسی اثرات استفاده از نانوذرات آلومینا در مبدل‌های حرارتی با بازده قوی انجام دادند. آن‌ها کاهش دمای دیواره و افزایش افت فشار را مشاهده کردند.

مرشد و همکاران [۲۰] آزمایشی را برای بررسی قابلیت استفاده از پوشش نانوکامپوزیت در جوشش جریانی، به ویژه در یک محیط خورنده طراحی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از پوشش نانو، نرخ انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی بترتیب از ۳۰٪ به ۱۲۰٪ و ۳۵٪ به ۵۵٪ افزایش می‌یابد. همچنین، افت فشار به وجود آمده به دلیل افزودن نانوذرات مس کمتر از ۱۵٪ است.

دولتی اصل و همکاران [۲۱] چهار نانوذره را در شرایط مختلف آزمایش نمودند و دریافتند که درحالی که شار جرمی و طول لوله اثرات قابل توجهی بر شار حرارتی بحرانی دارند، غلظت نانوذرات و ضریب هدایت حرارتی آن‌ها تأثیری چندانی بر شار حرارتی بحرانی ندارند. آن‌ها همچنین دو الگوی مختلف را برای پیش‌بینی شار حرارتی بحرانی جوشش جریانی نانوسیال با میانگین خطای مطلق کمتر از ۱۳٪ پیشنهاد کردند.

علیمردادی و همکاران [۱۰] یک مطالعه عددی بر روی اثرات زبری سطح بر روی خواص حرارتی نانوسیالات در جوشش جریانی خیلی سرد درون یک لوله دایره‌ای انجام دادند. آن‌ها افزایش دمای سطح دیواره و همچنین ضریب انتقال حرارت را با افزایش زبری سطح گزارش کردند.

پاترا<sup>۳</sup> و همکاران [۲۲] آزمایشی را برای نشان دادن جوشش جریانی نانوسیالات  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  از طریق آبراهی با شیب عمودی انجام دادند. آن‌ها دریافتند که با کاهش غلظت نانوذرات، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. مطالعه آن‌ها همچنین نشان داد که افزودن نانوذرات شار حرارتی بحرانی را بهبود می‌بخشد؛ زیرا تعداد هسته‌های جوانه‌زنی از طریق افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد.

در یک تحقیق تجربی، وانگ<sup>۴</sup> و همکاران [۲۳] جوشش جریانی خیلی سرد را با استفاده از دو نانوسیال AIN و  $Al_2O_3$  با سیال پایه آب به منظور یافتن وابستگی برای عدد ناسلت با دقت زیاد مطالعه کردند.

سلیمانی و کشاورز [۲۴] یک مطالعه تجربی بر روی اثرات سرعت سیال، زبری سطح و نانوذرات طراحی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزودن ۰٫۲۵٪ غلظت حجمی نانوذرات می‌تواند به طور قابل توجهی فرآیند انتقال حرارت را بهبود بخشد.

1 Kim TI

2 Ham and Cho

3 Patra

4 Wang Y

آن‌ها همچنین نشان دادند که با افزایش زبری و سرعت ورودی، قابلیت انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در پژوهشی دیگر، عزیزفر و همکاران [۲۵] عملکرد حرارتی نانوسیال  $Al_2O_3$  و  $CuO$  را بررسی کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد که افزودن نانوذرات فرآیند انتقال حرارت را ۳ تا ۶ برابر در مقایسه با سیالات پایه بهبود می‌بخشد.

در یک مطالعه تجربی، کیم<sup>۱</sup> و همکاران [۲۶] با افزودن ۰.۱٪ غلظت حجمی نانوذرات در آب، بهبود قابل توجهی در شار حرارتی بحرانی (تا ۳۰٪) مشاهده کردند. موخرچی<sup>۲</sup> و همکاران [۲۷] رفتار ترموفیزیکی نانوسیال آلومینا/آب را در جوشش جریان‌ی بررسی کردند. آن‌ها اثرات غلظت جرمی نانوذرات، دمای خیلی سرد ورودی، زبری سطح و سرعت جریان را بر ضریب انتقال حرارت مطالعه کردند. آن‌ها افزایش قابل توجهی در ضریب انتقال حرارت به دلیل افزایش خواص گرمافیزیکی مشاهده شد. همچنین، افت فشار در طول لوله با افزایش غلظت نانوذرات نیز افزایش می‌یابد. اسفندیار و همکاران [۲۸] به مطالعه عددی و تحلیل متغیرهای حرارتی جوشش جریان‌ی خیلی سرد پرداختند و الگوهای پیش‌بینی مبتنی بر روش شبکه عصبی مصنوعی را ارائه کردند و یک رویکرد یادگیری عمیق مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی متغیرهای ذکر شده در آب خالص ارائه نمودند.

در مطالعه حاضر، هدف ما شبیه‌سازی جریان جوششی خیلی سرد آب خالص بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر الگوی جریان است. سپس با تولید یک بانک اطلاعاتی داده، الگوهای پیش‌بینی برای دینامیک حباب ارائه می‌شوند. بنابراین، در این مطالعه عددی، جوشش جریان‌ی خیلی سرد آب خالص را بررسی می‌کنیم. سپس با استفاده از داده‌های تولید شده و روش‌های یادگیری دستگاه الگوهای پیش‌بینی ارائه می‌شود که با استفاده از آن‌ها و بدون نیاز به شبیه‌سازی عددی می‌توان توابع هدف مورد نظر را پیش‌بینی نمود.

## ۲- روش انجام شبیه‌سازی

در این مطالعه، از الگوی دوحالتی اویلر-اویلر استفاده شده است که در آن آب به عنوان جریان پیوسته و و بخار مایع حالت پراکنده در نظر گرفته می‌شوند. در الگوی اویلر-اویلر، معادلات بقای هر حالت به طور جداگانه حل می‌شوند.

### ۲-۱- معادلات حاکم

معادلات پیوستگی دو حالت [۲۹] به شرح زیر است:

$$\frac{\partial(\rho_l \alpha_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \alpha_l u_l) = \Gamma_{lg} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_g \alpha_g f_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \alpha_g u_g) = S_i - f_i \Gamma_{lg} \quad (2)$$

که در آن  $\rho_l$ ،  $\rho_g$ ،  $\alpha_l$ ،  $\alpha_g$  و  $u_l$  و  $u_g$  بترتیب چگالی مایع، چگالی بخار، کسر حجمی مایع، کسر حجمی بخار، سرعت مایع و سرعت بخار هستند. علاوه بر این،  $S_i$  متغیر منبع برای تشکیل و شکستن حباب‌ها در الگوی تعادل جمعیت برای حالت بخار است و  $f_i$  کسری عددی برای چگالی حباب است. معادلات گشتاور لختی [۳۰] برای هر دو حالت بدین صورت است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_l \alpha_l u_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \alpha_l u_l u_l) \\ = -\alpha_l \nabla P + \alpha_l \rho_l g + \nabla \cdot \{ \alpha_l \mu_l^e [\nabla u_l + (\nabla u_l)^T] \} + (\Gamma_{lg} u_g + \Gamma_{gl} u_g) + F_{lg} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_g \alpha_g u_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \alpha_g u_g u_g) \\ = -\alpha_g \nabla P + \alpha_g \rho_g g + \nabla \cdot \{ \alpha_g \mu_g^e [\nabla u_g + (\nabla u_g)^T] \} + (\Gamma_{gl} u_l + \Gamma_{lg} u_g) + F_{gl} \end{aligned} \quad (4)$$

<sup>1</sup> Kim SJ

<sup>2</sup> Mukherjee

که در آن،  $F_{lg}$  و  $F_{gl}$  نیروهای اعمال شده به هر حالت هستند. معادله بین این دو نیرو  $F_{gl} = F_{lg}$  است. نرخ انتقال جرم  $\Gamma_{lg}$  عمدتاً به دلیل تقطیر است و  $\Gamma_{gl}$  نرخ تولید بخار است. به طور دقیقتر،  $\Gamma_{gl}$  مجموع جرم حباب‌هایی است که از سطح گرمایش جدا می‌شوند. معادلات انرژی [۲۹] برای هر دو حالت بدین شرح است:

$$\frac{\partial(\rho_l \alpha_l H_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \alpha_l u_l H_l) = \nabla[\alpha_l k_l^e (\nabla T_l)] + (\Gamma_{gl} H_l - \Gamma_{lg} H_g) \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho_g \alpha_g H_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \alpha_g u_g H_g) = \nabla[\alpha_g k_g^e (\nabla T_g)] + (\Gamma_{lg} H_g - \Gamma_{gl} H_l) \quad (6)$$

که در آن،  $k_1, H_g, H_l, \mu_g, \mu_l$  و  $k_g$  بترتیب گرانیوی دینامیکی مایع، آنتالپی مایع گرانیوی دینامیکی بخار، آنتالپی بخار، ضریب هدایت حرارتی مایع و ضریب هدایت حرارتی بخار هستند. متغیرهای انتقال جرم [۲۷] بدین شرح اند:

$$\Gamma_{lg} = \frac{h a_{if} T_{sub}}{h_{fg}} \quad (7)$$

$$\Gamma_{gl} = \frac{Q_e}{h_{fg}} \quad (8)$$

الگوی رنز و مارشال<sup>۱</sup> [۳۰] برای محاسبه ضریب انتقال حرارت در حالت مایع استفاده می‌شود. نیروی پسا بین دو حالت با الگوی ایشی و زوبر<sup>۲</sup> [۲۹] اندازه‌گیری می‌شود.

### الگوی جداسازی شار حرارتی

برای تعیین شار حرارتی منتقل شده به سیال از الگوی کورول و پودوسکی<sup>۳</sup> [۳۲] استفاده می‌شود. طبق الگوی آنها، شار حرارتی از سطح بخاری از طریق سه سازوکار تبخیر، سردکردن ناگهانی و همرفت به سیال منتقل می‌شود:

$$q = q_e + q_q + q_c \quad (9)$$

$$q_e = \frac{\pi}{6} d_w^3 \rho_g f n_a h_{fg} \quad (10)$$

$$q_q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} f A_q \sqrt{t_w \lambda_l \rho_l c_{p,l} (T_w - T_l)} \quad (11)$$

$$q_c = A_c S t \rho_l c_{p,l} u_l (T_w - T_l) \quad (12)$$

که  $d_w, f, n_a, t_w, A_c$  و  $A_q$  بترتیب قطر خروج حباب، بسامد خروج حباب، چگالی محل فعال، زمان انتظار حباب، و مساحت کسری از سطح بخاری تحت همرفت و خاموش شدن هستند. با توجه به پیچیدگی ذاتی دینامیک حباب، این متغیرها به طور کلی به صورت تجربی معادله نویسی می‌شوند. چگالی محل هسته‌زایی فعال توسط الگوی لمارت و چاوالا<sup>۴</sup> [۳۳] تعیین می‌شود.

$$n_a = (185 T_{sup} 1.805)_{sup} \quad (13)$$

که در آن  $T_{sup}$  دمای فوق گرما دیوار است که معادل  $T_{w,sat, sup}$  است. قطر خروج حباب با معادله تولوبینسکی و کوستانچوک<sup>۵</sup> [۳۴] محاسبه می‌شود.

$$d_w = \min \left[ 0.6 \exp \left( \frac{-\Delta T_{sub,Lw}}{45} \right), 1.4 \right] \quad (14)$$

که در آن  $\Delta T_{sub,Lw}$  دمای خیلی سرد مایع است. از رابطه کول<sup>۶</sup> [۳۵] برای محاسبه بسامد خروج حباب استفاده می‌شود:

<sup>1</sup> Ranz and Marshall

<sup>2</sup> Ishii and Zuber

<sup>3</sup> Kurul and Podowski

<sup>4</sup> Lemmert and Chawla

<sup>5</sup> Tolubinsky and Kostanchuk

<sup>6</sup> Cole

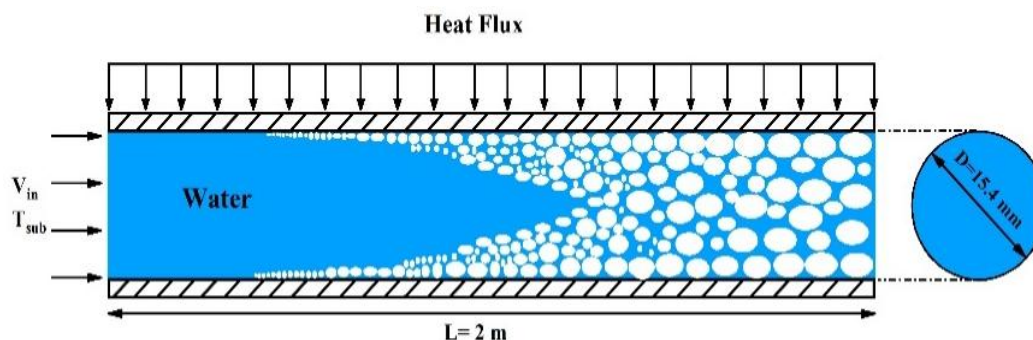
$$f = \sqrt{\frac{4g(\rho_l - \rho_g)}{3d_w\rho_l}} \quad (15)$$

در نهایت، زمان انتظار حباب، که فاصله بین خروج و ظهور یک حباب در همان محل هسته‌زایی است، توسط الگوی کورول و پودوسکی محاسبه می‌شود [۳۲]:

$$t_w = \frac{0.8}{f} \quad (16)$$

## ۲-۲- هندسه و شرایط مرزی

همانطور که گفته شد، جوشش جریان‌ی خلی سرد آب خالص در یک آبراه کوچک شبیه‌سازی شده است. هندسه لوله در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن سیال با دمای خلی سرد ورودی و سرعت ورودی وارد لوله می‌شود. سپس به طور مداوم گرم می‌شود. شرط عدم لغزش بر روی دیوارها اعمال می‌شود. شبیه‌سازی‌های اکسی سیمتریک برای مقادیر مختلف فشار کاری، شار حرارتی، شار جرمی و دمای خلی سرد سیال ورودی انجام می‌شود.



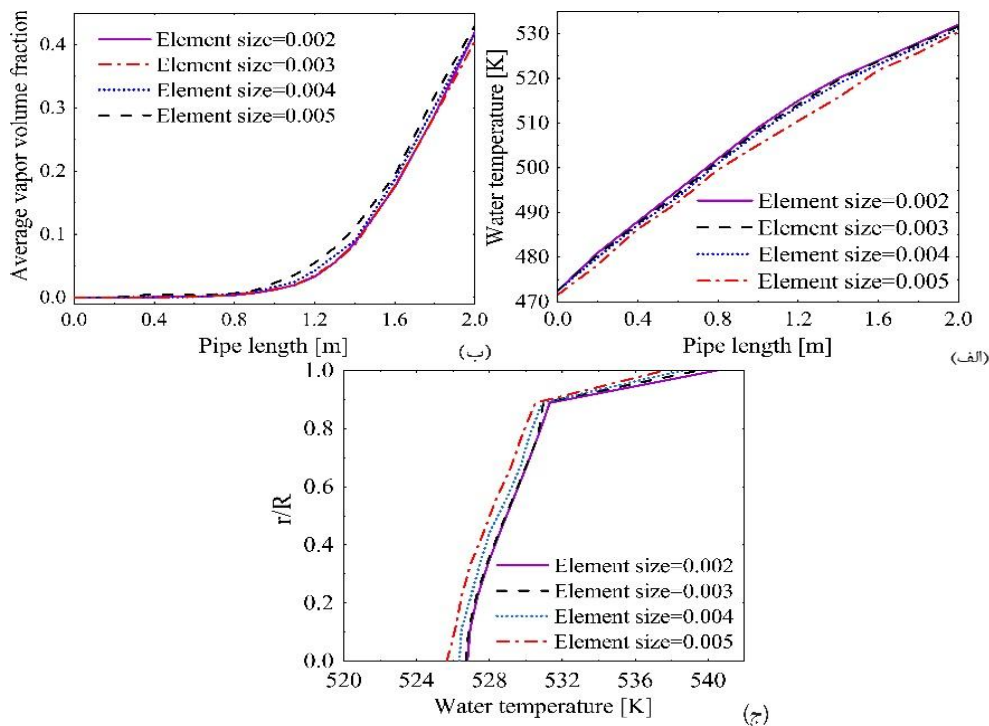
شکل ۱ هندسه مورد مطالعه و شرایط مرزی آن

## ۲-۳- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی داده‌های عددی

برای مطالعه وابستگی نتایج عددی به اندازه شبکه حل نیاز به بررسی استقلال از شبکه است. متغیرهای میانگین کسر حجمی بخار و دمای سیال در اندازه‌های مختلف شبکه حل در امتداد لوله به دست آمده است. شکل ۲-الف نیز میانگین کسر حجمی بخار را در طول لوله را نشان می‌دهد. در شکل ۲-ب، دمای میانگین سیال در طول لوله را نشان می‌دهد. میانگین دمای شعاعی برای اندازه‌های مختلف شبکه در شکل ۲-ج نشان داده شده است. با مقایسه نتایج، پس از اندازه شبکه ۰,۰۰۳ تقریباً هیچ تغییری با تغییر اندازه شبکه ایجاد نمی‌شود و در نتیجه، اندازه عنصر انتخاب شده برای شبیه‌سازی‌ها ۰,۰۰۳ است.

مجموعه داده‌های متشکل از ۴۰۸ شبیه‌سازی عددی جوش جریان خلی سرد با طیف گسترده‌ای از شرایط مرزی برای ثبت کامل ویژگی‌های فیزیک جریان تولید می‌شود. پوشش متغیر به شرح زیر است:

- سیال کاری: آب
- فشار:  $0.9MPa < P < 6.8MPa$
- شار جرمی:  $650 \frac{kg}{(m^2s)} < m < 1400 \frac{kg}{(m^2s)}$
- شار حرارتی:  $0.35 \frac{MW}{m^2} < q < 2.0 \frac{MW}{m^2}$
- دمای ساب خنک:  $32K < T_{sub} < 60K$



شکل ۲ الف) میانگین کسر حجمی بخار در طول لوله، ب) دمای میانگین سیال در طول لوله، ج) میانگین دمای شعاعی برای اندازه‌های مختلف شبکه

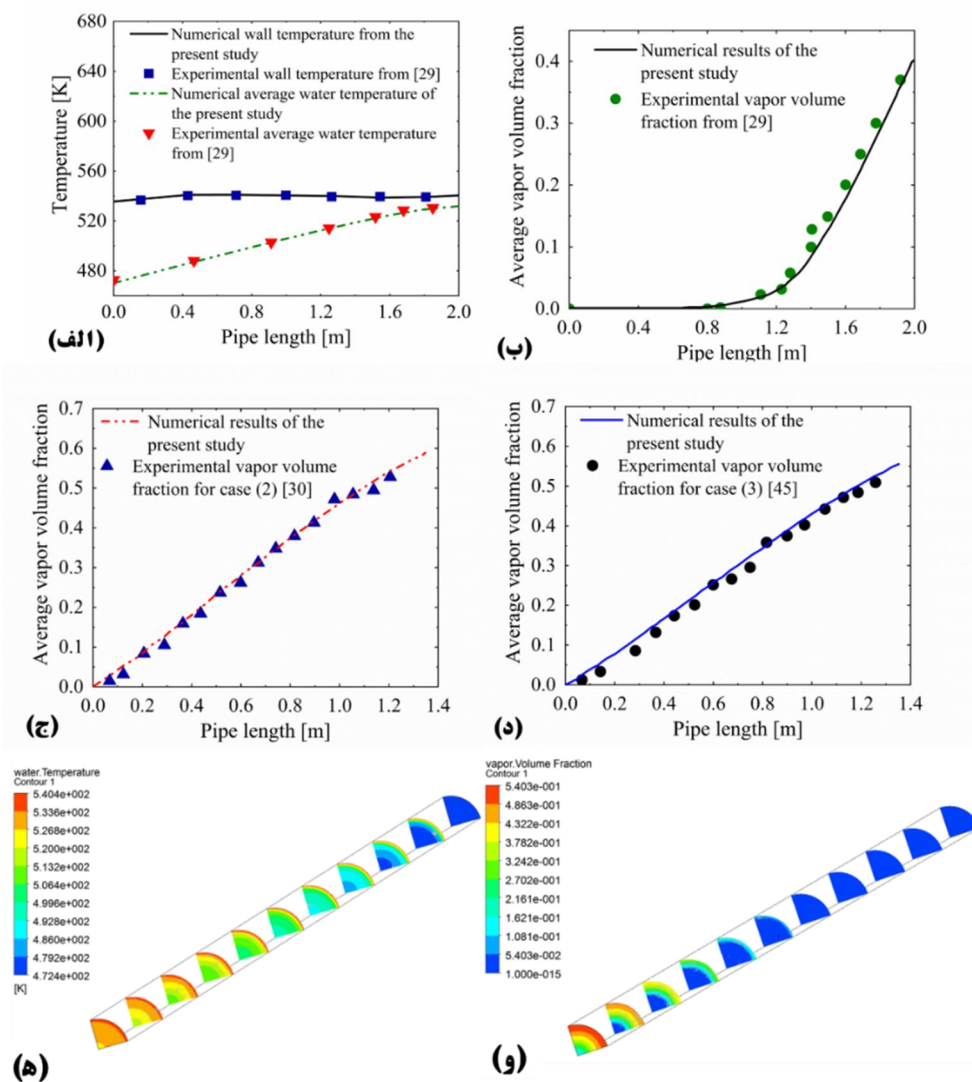
هدف از این مطالعه بررسی اثرات شرایط مرزی مختلف بر جریان جوش و متعاقباً ساخت و بهینه‌سازی یک شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی دقیق مقادیر هدف ذکر شده است. اثرات "معماری‌های الگو" مختلف برای کشف بهترین الگوی شبکه عصبی برای هر کمیت هدف مطالعه می‌شود. متغیرهای متوسط و محلی هر دو بررسی می‌شوند تا درک بهتری از تفاوت ویژگی‌های جریان در هر بخش از لوله به دست آوریم. برای ارزیابی مناسب الگوهای پیشنهادی، کسری از نقاط داده از فرآیند آموزش حذف می‌شوند و از آن‌ها برای آزمایش اینکه الگوها چگونه می‌توانند مقادیر مورد نظر را پیش‌بینی کنند، استفاده می‌شوند.

## ۳- نتایج و بحث

در اینجا دو دسته از نتایج ارائه می‌شوند: نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و نتایج حاصل از الگوهای مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی. علاوه بر این، برای اطمینان از معتبر بودن داده‌ها، تأیید صحت داده‌های استخراج شده بر اساس نتایج تجربی ارائه می‌شود. برای ساده‌تر کردن مقایسه، مطالعات موردی خاصی انتخاب شده و در سراسر این مطالعه استفاده می‌شود. جدول ۲ مطالعات موردی ذکر شده را ارائه می‌کند.

جدول ۲ مطالعات موردی در پژوهش حاضر برای آب خالص

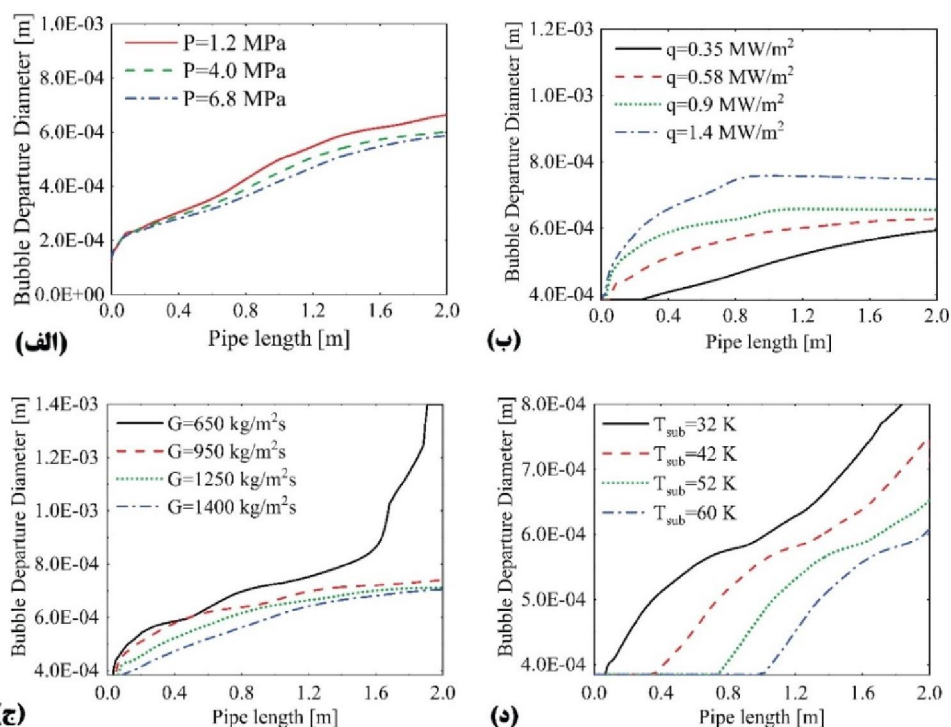
مطالعه موردی	فشار (MPa)	شار حرارتی ( $\frac{kW}{m^2}$ )	شار جرمی ( $\frac{kg}{m^2s}$ )	دمای خیلی سرد (K)
۱	۹-۶٫۸	۰٫۵۸	۹۵۰	۶۰
۲	۶٫۸	۱٫۴-۰٫۳۵	۹۵۰	۳۲
۳	۴	۰٫۹	۱۴۰۰-۶۵۰	۴۲
۴	۰٫۹	۰٫۳۵	۶۵۰	۶۰-۳۲



شکل ۳ مقایسه مقادیر تجربی و عددی: الف) میانگین دمای آب و دمای دیواره برای مورد ۱، ب) کسر حجم بخار در طول لوله برای مورد ۱، ج) کسر حجم بخار در طول لوله برای مورد ۲، د) کسر حجم بخار در طول لوله برای مورد ۳، ه) نقشه کسر حجمی بخار در طول لوله

### ۳-۱- قطر جدایش حباب

شکل ۴ روند قطر جدایش حباب در طول لوله را نشان می‌دهد. قطر جدایش حباب از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا نقش مهمی در الگوی تفکیک شار حرارتی دیواره دارد [۳۸]. شکل ۴-الف نشان می‌دهد که قطر جدایش حباب با افزایش فشار کاهش می‌یابد. اساس اکثر الگوها برای اندازه‌گیری این متغیر، الگوی فریتز در جوشش استخری است [۳۹]. تمام الگوهای دیگر عمدتاً نیروهای دیگری را برای در نظر گرفتن پیچیدگی‌های بیشتر ترکیب می‌کنند. قطر جدایش حباب به شدت به دمای خیلی داغ دیواره بستگی دارد [۴۰]، بنابراین با افزایش سطح فشار در سیال کاری، دمای اشباع افزایش می‌یابد، در نتیجه دمای خیلی داغ دیواره کمتر می‌شود. بنابراین، قطر جدایش حباب با افزایش فشار کاهش می‌یابد.

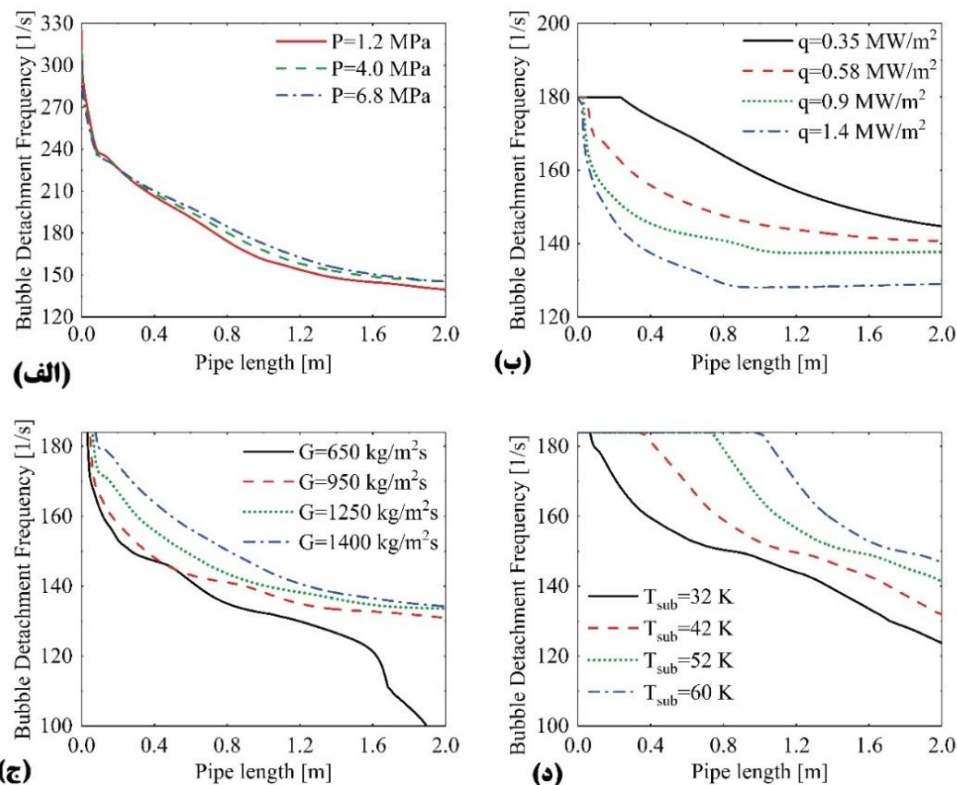


شکل ۴ مقایسه قطر جدایش حباب در الف) مطالعه موردی ۱ با فشارهای مختلف، ب) مطالعه موردی ۲ با شارهای حرارتی مختلف، ج) مطالعه موردی ۳ با شارهای جرمی مختلف و د) مطالعه موردی ۴ با انواع مختلف دمای خیلی سرد

شکل ۴-ب وابستگی شار حرارتی با قطر جدایش حباب را نشان می‌دهد، که شار حرارتی اثر معکوس روی قطر جدایش دارد. از آنجایی که جدایش حباب به شدت به سوپرگرم دیواره بستگی دارد، با افزایش شار حرارتی، دمای خیلی داغ دیواره افزایش می‌یابد، بنابراین قطر جدایش حباب بزرگ‌تر می‌شود. مشابه کسر حجمی بخار، قطر جدایش حباب همانطور که در شکل ۴-ج و شکل ۴-د نشان داده شده است، با افزایش شار جرمی کاهش می‌یابد و دمای خیلی سرد ورودی افزایش می‌یابد. همین روند در [۴۱-۴۲] مشاهده می‌شود.

### ۳-۲- بسامد جدایش حباب

شکل ۵ نتایج عددی بسامد جدایش حباب را نشان می‌دهد. بسامد جدایش حباب با قطر جدایش حباب رابطه معکوس دارد. بنابراین منطقی است که الگوی معکوس در شکل ۵ نسبت به شکل ۴ مشاهده شود. علاوه بر این، طبق [۴۰] بسامد جدایش حباب به شدت به سوپرگرم دیوار بستگی دارد و بنابراین، در مواردی که سوپرگرم دیواری تغییرات بیشتری را مشاهده خواهیم کرد، تغییر یافته است. شکل ۵-الف، شکل ۵-ب، و شکل ۵-د نشان می‌دهد که بسامد جدایش حباب بترتیب به دلیل افزایش فشار، شار جرمی و دمای خیلی سرد ورودی افزایش می‌یابد. با این حال، افزایش شار حرارتی الگوی معکوس را نشان می‌دهد و افت بسامد جدایش حباب را نشان می‌دهد که در شکل ۵-ب نشان داده شده است. مهم‌ترین تأثیر ناشی از تغییر شار حرارتی است زیرا به طور قابل توجهی بر دمای خیلی داغ دیواره تأثیر می‌گذارد. نتایج مشاهده شده برای بسامد جدایش حباب به خوبی با مطالعه تجربی یو و همکارانش [۴۲] مطابقت دارد.

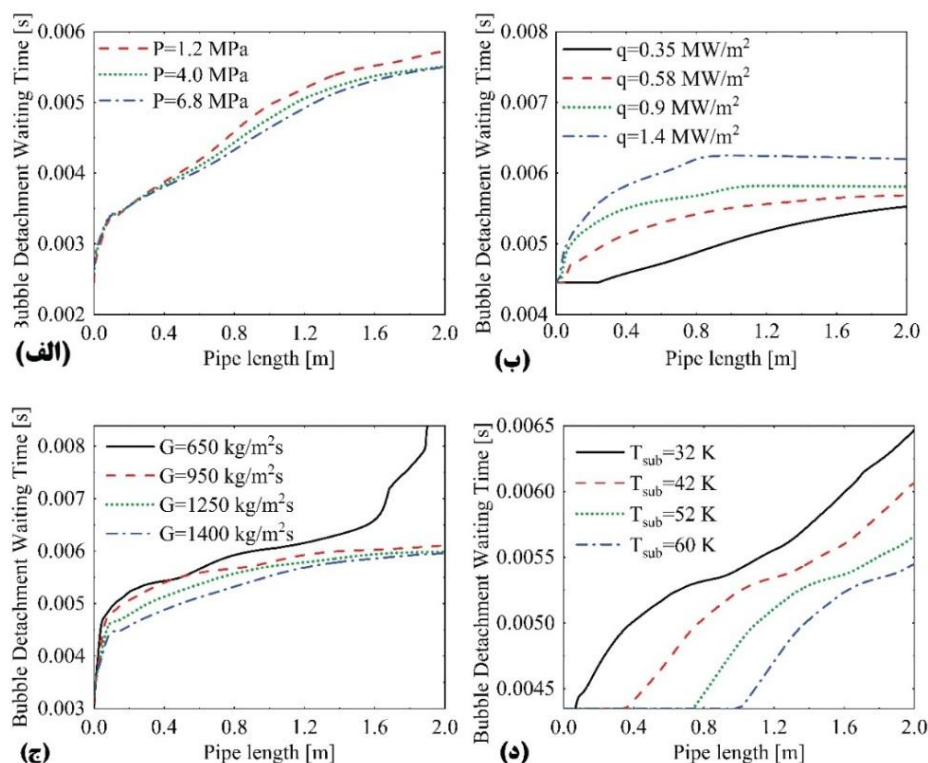


شکل ۵ مقایسه بسامد جدایش حباب در الف) مطالعه موردی ۱ با فشارهای مختلف، ب) مطالعه موردی ۲ با شارهای حرارتی مختلف، ج) مطالعه موردی ۳ با شارهای جرمی مختلف و د) مطالعه موردی ۴ با انواع مختلف دمای خیلی سرد

### ۳-۳- زمان انتظار جدایش حباب

زمان انتظار جدایش حباب، زمان گرمایشی است که برای رشد مجدد ضخامت لایه مرزی حرارتی به ۲،۳ برابر اندازه حفره لازم است [۴۳]. با این حال، در جوشش، زمان انتظار به عنوان زمان از خروج یک حباب تا پیدایش حباب دیگر در یک محل هسته‌سازی تعریف می‌شود.

از آنجایی که زمان انتظار جدایش حباب با بسامد جدایش حباب نسبت معکوس دارد، زمانی که با بسامد جدایش حباب مقایسه می‌شود، الگوی مخالفی برای زمان انتظار جدایش حباب مشاهده می‌شود. شکل ۶ تغییر زمان انتظار جدایش حباب را در موارد مختلف در طول لوله نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۶-الف مشاهده می‌شود، با افزایش فشار سیال، زمان انتظار جدایش حباب کاهش می‌یابد. در مقابل، این متغیر با افزایش شار حرارتی، که در شکل ۶-ب ارائه شده است، افزایش می‌یابد. ناگفته نماند که بیشترین تغییرات زمان انتظار جدایش حباب ناشی از تغییر شار حرارتی است. این تغییر در نتیجه تأثیر قابل توجه آن بر دمای خیلی داغ دیواره است. علاوه بر این، شکل ۶-ج و شکل ۶-د روند کاهش زمان انتظار جدایش حباب را برترتیب با افزایش شار جرمی و دمای خیلی سرد ورودی به تصویر می‌کشند. الگوی نامنظم در شکل ۶-ج به دلیل رسیدن به شار حرارتی بحرانی است.

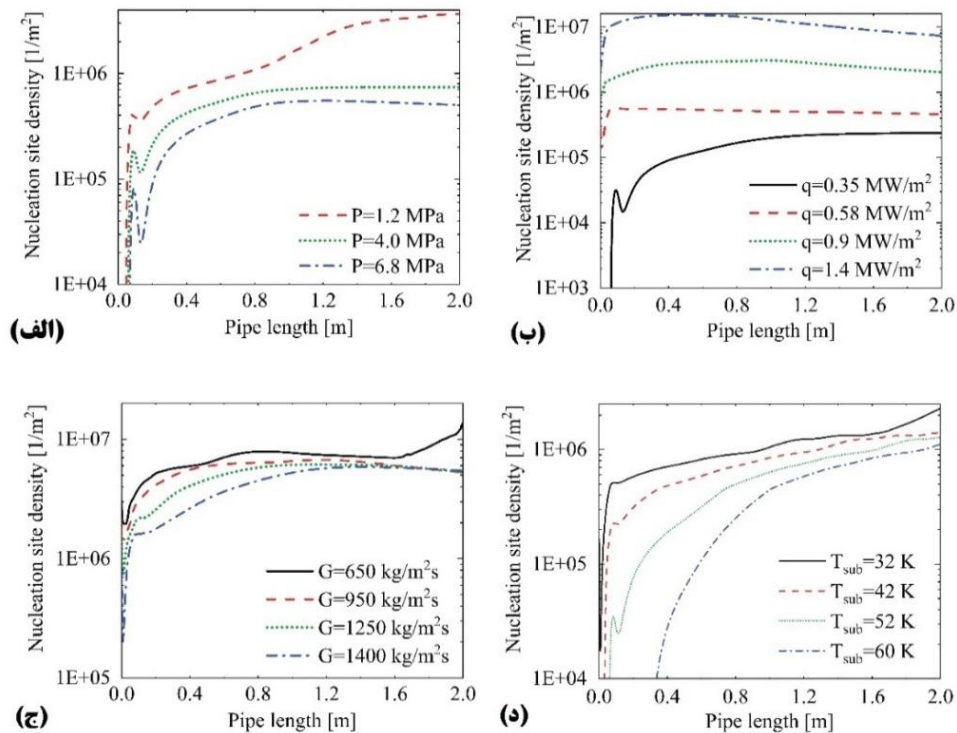


شکل ۶ مقایسهٔ زمان انتظار جدایش حباب در الف) مطالعهٔ موردی ۱ با فشارهای مختلف، ب) مطالعهٔ موردی ۲ با شارهای حرارتی مختلف، ج) مطالعهٔ موردی ۳ با شارهای گرمی مختلف، و د) مطالعهٔ موردی ۴ با دماهای خیلی سرد مختلف

### ۳-۴- چگالی نقاط جوانه‌زنی

چگالی نقاط جوانه‌زنی یکی از متغیرهای مهم در دینامیک حباب فرآیندهای جوشش است. این متغیر به شدت به شار حرارتی دیواره، دمای خیلی داغ دیواره و تعداد حفره‌ها بستگی دارد. شکل ۷ چگالی محل جوانه‌زنی را در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد. شکل ۷-الف تغییرات این متغیر را هنگام تغییر فشار سیال کاری نشان می‌دهد. زمانی که فشار افزایش می‌یابد، هسته‌های جوانه‌زنی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابند. دلیل اصلی این روند این است که با افزایش فشار سیال، تعداد حفره‌های فعال کاهش می‌یابد [۴۴]. علاوه بر این، شکل ۷-ب نشان می‌دهد که افزایش شار حرارتی اعمال شده به طور قابل توجهی تعداد هسته‌های جوانه‌زنی فعال را افزایش می‌دهد. دلیل کاهش تدریجی تعداد هسته‌های جوانه‌زنی در انتهای لوله عمدتاً به هم پیوستن حباب‌ها است که لایه‌ای از بخار را در مجاورت دیواره تشکیل می‌دهد و در نتیجه هسته‌های جوانه‌زنی را غیرفعال می‌کند. با این حال، همانطور که در شکل ۷-ج و شکل ۷-د نشان داده شده است، با افزایش شار گرمی و دمای خیلی سرد ورودی، تعداد هسته‌های جوانه‌زنی کاهش می‌یابد. این به این دلیل است که با افزایش دمای خیلی سرد ورودی، شار حرارتی بیشتری برای افزایش دمای توده مورد نیاز است و بر فرآیند جوشش تأثیر معکوس می‌گذارد. افزایش قابل توجه در شکل ۷-ج برای شار گرمی ۶۰۰ کیلوگرم بر متر مربع ثانیه را می‌توان با روند شار گرمی توجیه کرد. از آنجایی که کسر حجمی بخار به حداکثر مقدار خود می‌رسد، به این معنی که فقط بخار در جریان وجود دارد، تعداد هسته‌های جوانه‌زنی به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. روند ارائه شده برای تراکم محل هسته در مطالعه حاضر با نتایج یو<sup>۱</sup> و همکاران [۴۲] تایید شده است.

<sup>1</sup> Yoo



شکل ۷ مقایسه تراکم محل جوانه‌زنی در الف) مطالعه موردی ۱ با فشارهای مختلف، ب) مطالعه موردی ۲ با شارهای حرارتی مختلف، ج) مطالعه موردی ۳ با شارهای جرمی مختلف و د) مطالعه موردی ۴ با انواع مختلف دمای خیلی سرد

### ۳-۵- روش انتخاب الگوی شبکه عصبی

پس از جمع‌آوری داده‌های شبیه‌سازی شده، نیاز به یک مرحله پردازش داده است. به طوریکه داده‌هایی که جوشش در آن‌ها رخ نداده حذف شوند. پس از مرحله پردازش، به بررسی تعداد داده‌ها و بهینه‌سازی فرامتغیرها پرداخته می‌شود. فرآیند انتخاب بهترین الگو برای متغیر هدف دمای دیواره در آب خالص به عنوان مثال در ادامه تشریح شده است. مجموعه داده دمای دیواره محلی از ۱۱۴۴ داده عددی تشکیل شده است. مجموعه داده‌ها به نقاط داده‌های آموزشی و آزمون با نسبت تقسیم ۷۰٪-۳۰٪ تقسیم شده است که منجر به ۸۰۰ نقطه داده آموزشی و ۳۴۴ نقطه داده آزمون می‌شود. مرحله بعدی تعیین تعداد لایه‌های پنهان است. پرکاربردترین الگو برای انتخاب تعداد لایه‌های پنهان استفاده از سری  $2^n$  است که با ۳۲ نورون شروع می‌شود. برای شروع فرآیند، تعداد نورون‌ها و تعداد لایه‌های پنهان باید بررسی شوند زیرا اجزای اصلی شبکه عصبی هستند. جدول ۳ نتایج را برای تعداد مختلف نورون‌ها و لایه‌های پنهان با استفاده از تابع فعالیت ReLU برای همه لایه‌ها ارائه می‌کند.

### ۳-۶- نتایج الگوهای انتخابی برای آب خالص

بدیهی است که بهترین انتخاب برای فرامتنیرها لزوماً عمیق‌ترین شبکه عصبی یا کندترین الگو نیست، بنابراین منطقی است که جستجو برای بهترین معماری الگو قبل از انتخاب الگوی نهایی انجام شود. این روش انتخاب برای شناسایی بهترین معماری الگو برای تک تک توابع هدف در این مطالعه انجام می‌شود. الگوهای انتخابی نهایی برای همه مقادیر مورد نظر در آب خالص در جدول ۳ ارائه شده‌اند. این الگوها بهترین عملکرد را در بین موارد بررسی شده به دست می‌آورند.

جدول ۳ الگوهای انتخاب شده نهایی برای توابع هدف مختلف

تابع فعالیت خروجی	اندازه دسته	تعداد دوره‌ها	الگوی شبکه عصبی	متغیرهای ورودی	تابع هدف
ReLU	۳۲	۱۰۰۰۰	(۳۲، ۶۴، ۱۲۸، ۶۴، ۳۲)	$P, q, \dot{m}, T_{sub}, X_{in}$	قطر جدایش حباب
Linear	۶۴	۱۰۰۰۰	(۳۲، ۶۴، ۱۲۸، ۶۴، ۳۲)	$P, q, \dot{m}, T_{sub}, X_{in}$	بسامد جدایش حباب
ReLU	۶۴	۸۰۰۰	(۳۲، ۶۴، ۱۲۸، ۶۴)	$P, q, \dot{m}, T_{sub}, X_{in}$	زمان انتظار جدایش حباب
ReLU	۳۲	۴۰۰۰۰	(۳۲، ۶۴، ۱۲۸، ۶۴، ۳۲)	$P, q, \dot{m}, T_{sub}, X_{in}$	چگالی هسته‌های جوانه‌زنی

### متغیرهای دینامیک حباب

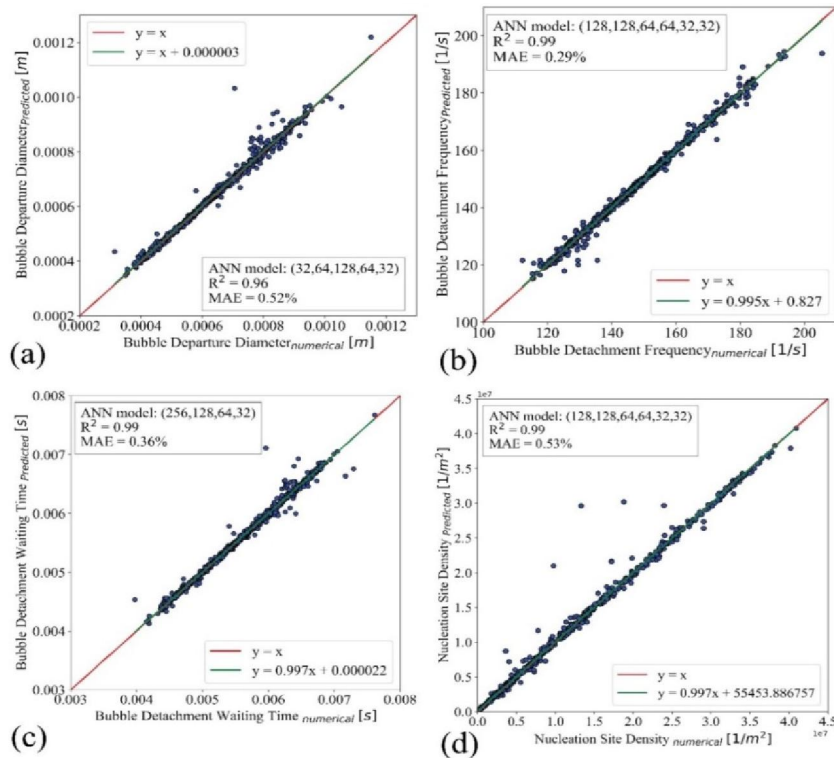
به منظور درک کامل دینامیک حباب فرآیند جوشش، متغیرهای مربوطه، مانند قطر جدایش حباب، بسامد جدایش حباب، زمان انتظار جدایش حباب، و چگالی هسته‌های جوانه‌زنی را بررسی می‌کنیم. مجموعه داده مورد استفاده در این بخش از ۳۳۷۱ نقطه تشکیل شده است. این مجموعه داده با نسبت ۷۰٪ - ۳۰٪ تقسیم می‌شود که منجر به ۲۲۸۹ نقطه داده آموزشی و ۹۸۲ نقطه داده آزمایشی می‌شود.

شکل ۸-الف پیش‌بینی‌های الگوی شبکه عصبی قطر جدایش حباب را با  $P, q, \dot{m}, T_{sub}, X_{in}$  به عنوان ورودی نشان می‌دهد. این الگو دارای میانگین خطای مطلق ۵۲٪ و ضریب تعیین ۰/۹۶ است.

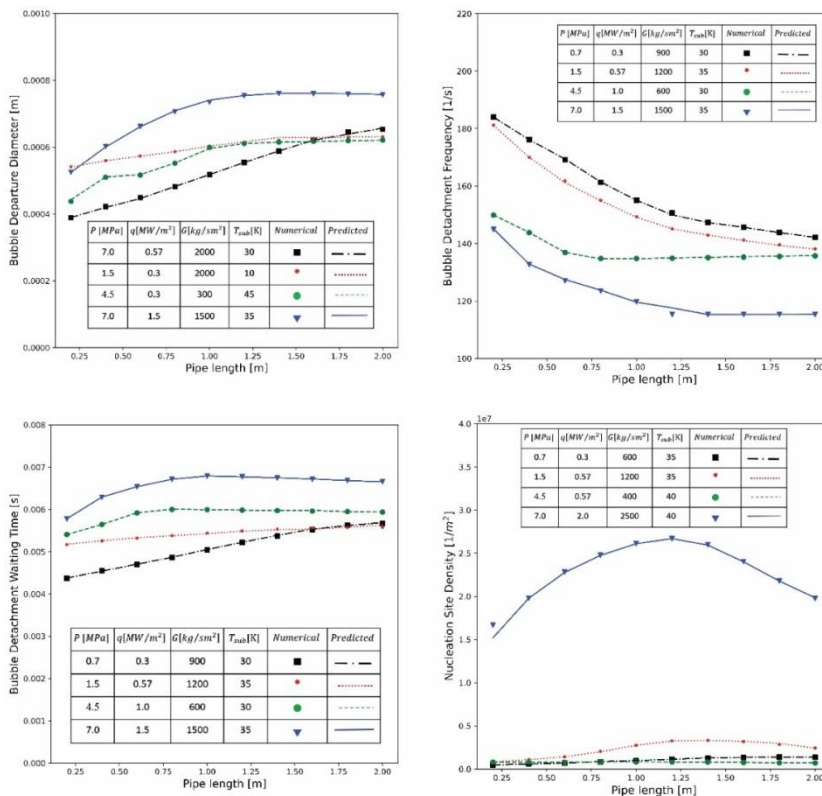
در شکل ۸-ب، الگوی بسامد جدایش حباب ارائه شده است. متغیرهای ورودی عبارتند از  $P, q, \dot{m}, T_{sub}, X_{in}$ . میزان خطا و ضریب تعیین این الگو به ترتیب ۰/۲۹ و ۹۹٪ است. خطای این متغیر در بین متغیرهای دینامیک حباب کمترین است و از این رو، این الگو دقیق‌ترین پیش‌بینی را در بین مقادیر هدف ذکر شده دارد.

شکل ۸-ج و شکل ۸-د به ترتیب الگوهای زمان انتظار جدایش حباب و چگالی هسته‌های جوانه‌زنی را نشان می‌دهند. خطا و ضریب تعیین برای زمان انتظار جدایش حباب به ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۹۹ است. به طور مشابه، معیارهای ذکر شده برای چگالی هسته‌های جوانه‌زنی به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۹۹ است. برای نشان دادن میزان دقیق عملکرد الگوها، از یک رگرسیون خطی برای هر کمیت استفاده می‌کنیم. تخمین‌های خطی کاملاً شبیه حالت آرمانی هستند که دقت الگوهای پیشنهادی را نشان می‌دهد.

شکل ۹ پیش‌بینی متغیرهای دینامیک حباب را نشان می‌دهد. بدیهی است که تقریباً برای همه موارد، الگوهای ارائه شده قادر به پیش‌بینی مقادیر هدف مشابه مقدار واقعی هستند.



شکل ۸ الگوهای پیش‌بینی بر اساس ۹۸۲ نقطه داده برای الف) قطر جدایش حباب محلی با الگوی لایه پنهان (۳۲،۶۴،۱۲۸،۶۴،۳۲)، ب) بسامد جدایش حباب با الگوی لایه پنهان (۱۲۸،۱۲۸،۶۴،۶۴،۳۲،۳۲)، ج) زمان انتظار جدایش حباب با الگوی لایه پنهان (۲۵۶،۱۲۸،۶۴،۳۲) و د) چگالی محل جوانه‌زنی برای الگوی لایه پنهان (۱۲۸،۱۲۸،۶۴،۶۴،۳۲،۳۲) و متغیرهای ورودی  $P, q, m, T_{sub}, X_{in}$



شکل ۹ پیش‌بینی نقاط داده حذف شده برای الف) قطر جدایش حباب، ب) بسامد جدایش حباب، ج) زمان انتظار جدایش حباب و د) چگالی هسته‌های جوانه‌زنی

## ۴- نتیجه‌گیری

پیش‌بینی دقیق انتقال حرارت برای طراحی سامانه خنک‌کاری موتورهای احتراق داخلی حائز اهمیت است. این مطالعه جریان جوش زیرخنک‌شده آب خالص در یک آبراه کوچک را حتی مرتبط‌تر می‌کند. نتایج این تحقیق بینش‌های ارزشمندی را در مورد تأثیر متغیرهای مختلف بر الگوی جریان و دینامیک حباب ارائه می‌کند و الگوهای پیش‌بینی توسعه‌افته می‌توانند در تحلیل حرارتی موتورهای احتراق داخلی همچنین برای بهینه‌سازی سامانه‌های حفاظت حرارتی در کاربردهای هوافضا مفید باشند. علاوه بر این، یافته‌های این مطالعه می‌تواند برای بهبود طراحی و ایمنی راکتورهای هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرد و اهمیت این تحقیق در زمینه‌های مختلف را بیشتر نشان دهد. برای ادامه این پژوهش پیشنهاد می‌شود تحلیل حرارتی موتورهای احتراق داخلی و پیش‌بینی متغیرهای مؤثر بهینه آن با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی صورت گیرد. همچنین شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای دینامیکی حباب با استفاده از روش یادگیری دستگاه در فرآیند جوش در راهگاه آب موتور خودرو انجام گیرد.

## References

- [1] Hemat Khanloo R, Mohammadi A, Jazayeri S, Yaghoubi M. Simulation of heat transfer considering boiling phenomenon in cooling passage of turbo-charged national engine. Journal of Engine Research. 2012 December 21;29(29):3-14. [In Persian]
- [2] Hsu YY, Graham RW. Boiling heat transfer on a flat plate in a vacuum. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1961 Jun 8;2(3):245-57.
- [3] Wang S, Liao S, Zhang X. Experimental study on the cooling performance of a supersonic combustor using boiling. Applied Thermal Engineering. 2017 July 23;119(3):456-67.
- [4] Wang J, Zhao L, Wang X, Ma J, Lin J. An experimental investigation on transpiration cooling of wedge shaped nose cone with liquid coolant. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014 August 3;75:442-9.
- [5] Hwang BJ, Choi H, Min S. An experimental study on penetration and mixing characteristics of liquid fuel in preheated supersonic airflows. Acta Astronautica. 2023 Jan 1;202:511-21.
- [6] Qiu Y, Garg D, Zhou L, Kharangate CR, Kim S-M, and Mudawar I. An artificial neural network model to predict mini/micro-channels saturated flow boiling heat transfer coefficient based on universal consolidated data. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020 Jun 1;149:119211. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119211
- [7] Alimoradi H, Eskandari E, Pourbagian M, Shams M. A parametric study of subcooled flow boiling of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid using numerical simulation and artificial neural networks. Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering. 2022 Jun 7;1-31. doi: 10.1080/15567265.2022.2108949
- [8] Alimoradi H, Shams M. Optimization of subcooled flow boiling in a vertical pipe by using artificial neural network and multi objective genetic algorithm. Applied Thermal Engineering. 2017 Jan 5;1039-51. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.114
- [9] Alimoradi H, Shams M. Numerical simulation of the effects of surface roughness on nucleation site density of nanofluid boiling. Modares Mechanical Engineering. 2019 May 11;19(7);13-1622. [In Persian]
- [10] Alimoradi H, Shams M, Ashgriz N, Bozorgnezhad A. A novel scheme for simulating the effect of microstructure surface roughness on the heat transfer characteristics of subcooled flow boiling. Case Studies in Thermal Engineering, 2021 May 14;24:100829. doi: 10.1016/j.csite.2020.100829
- [11] Alimoradi H, Shams M, Valizadeh Z. The effects of nanoparticles in the subcooled boiling flow in the channels with different cross-sectional area and same hydraulic diameter. Modares Mechanical Engineering, 2017 September 11;16(12);545-54.
- [12] Celata G P, Cumo M, Mariani A, Zummo G. Burnout in subcooled flow boiling of water. A visual experimental study. International journal of thermal sciences. 2000 Jan 17;39(9-11):896-908. doi: 10.1016/S1290-0729(00)01175-3
- [13] Lee J, Jo D, Chae H, Chang SH, Jeong YH, Jeong JJ. The characteristics of premature and stable critical heat flux for downward flow boiling at low pressure in a narrow rectangular channel.

- Experimental Thermal and Fluid Science. 2015 July 20;69:86-98. doi: [10.1016/j.expthermflusci.2015.07.015](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.07.015)
- [14] Sharifi S, Aligoodarz MR, Rahbari A, Thermohydraulic performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid during single-phase flow and two-phase subcooled flow boiling. International Journal of Thermal Sciences. 2022 Jun 3;179:107605.
- [15] Kim TI, Jeong YH, Chang SH. An experimental study on CHF enhancement in flow boiling using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-fluid. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010 Feb 5;53(5-6):1015-22. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.11.011](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.11.011)
- [16] Abedini E, Behzadmehr A, Sarvari S, Mansouri S. Numerical investigation of subcooled flow boiling of a nanofluid. International Journal of Thermal Sciences. 2013 Jan 4;64:232-9. doi: [10.1016/j.ijthermalsci.2012.08.008](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.08.008)
- [17] Ham J, Cho H. Theoretical analysis of pool boiling characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid according to volume concentration and nanoparticle size. Applied Thermal Engineering. 2016 September 6;108:158-71. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2016.07.058](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.058)
- [18] Setoodeh H, Keshavarz A, Ghasemian A, Nasouhi A. Subcooled flow boiling of alumina/water nanofluid in a channel with a hot spot: An experimental study. Applied Thermal Engineering. 90:384-94. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2015.07.016](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.016)
- [19] Mashaei P, Shahryari M, Fazeli H, Hosseinalipour S. Numerical simulation of nanofluid application in a horizontal mesh heat pipe with multiple heat sources: a smart fluid for high efficiency thermal system. Applied Thermal Engineering. 2016 May 2;100:1016-30. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2016.02.111](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.111)
- [20] Morshed A, Paul TC, Khan J, Effect of Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite coating on flow boiling performance of a microchannel Applied Thermal Engineering. 2013 Jan 9;51(1-2):1135-43. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2012.09.047](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.09.047)
- [21] DolatiAsl K, Bakhshan Y, Abedini E, Niazi S, Correlations for estimating critical heat flux (CHF) of nanofluid flow boiling, International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019 May 4;139:69-76. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.146](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.146)
- [22] Patra N, Ghosh P, Singh R, Nayak A. Flow visualization in dilute oxide based nanofluid boiling. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019 September 5;135:331-44. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.145](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.145)
- [23] Wang Y, Deng K, Liu B, Wu J, Su G. A correlation of nanofluid flow boiling heat transfer based on the experimental results of AlN/H<sub>2</sub>O and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O nanofluid. Experimental Thermal and Fluid Science. 2017 Jun 14;80:376-83. doi: [10.1016/j.expthermflusci.2016.08.020](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.08.020)
- [24] Soleimani B, Keshavarz A, Heat transfer enhancement of an internal subcooled flow boiling over a hot spot. Applied Thermal Engineering. 2016 December 6;99:206-213. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2015.12.043](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.043)
- [25] Azizifar S, Ameri M, Behroyan I, Experimental investigation of the subcooled flow boiling heat transfer of water and nanofluids in a horizontal metal foam tube Heat and Mass Transfer. 2021 Feb 7;57(9):1499-511. doi: [10.1007/s00231-021-03042-9](https://doi.org/10.1007/s00231-021-03042-9)
- [26] Kim SJ, McKrell T, Buongiorno J, Hu L.-W. Alumina nanoparticles enhance the flow boiling critical heat flux of water at low pressure. Journal of Heat Transfer. 2008 May 7;130(4):5-17. doi: [10.1115/1.2818787](https://doi.org/10.1115/1.2818787)
- [27] Mukherjee S, Jana S, Mishra PC, Chaudhuri P, Chakrabarty S. Experimental investigation on thermo-physical properties and subcooled flow boiling performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluids in a horizontal tube. International Journal of Thermal Sciences. 2021 Feb 8;159:106581. doi: [10.1016/j.ijthermalsci.2020.106581](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106581)
- [28] Esfandyar M, Pourabdi G, Akbari M, Eskandari E. Numerical study and analysis of thermal parameters of subcooled flow boiling and presentation of prediction models based on artificial neural network algorithm. Karafan Scientific Quarterly. 2023 May 22;20(1). doi: [10.48301/KSSA.2023.388017.2469](https://doi.org/10.48301/KSSA.2023.388017.2469)
- [29] Cheung S, Vahaji S, Yeoh G, Tu J, Modeling subcooled flow boiling in vertical channels at low pressures-Part 1: Assessment of empirical correlations. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014 Jun 9;25:736-53. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.016](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.016)
- [30] Launder BE, Spalding DB, The numerical computation of turbulent flows. Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion. 1983 Jan 4;96-116.
- [31] Ishii M, Zuber N. Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows

- AIChE journal. 1979 September 6;25(5):843-55. doi: 10.1002/aic.690250513
- [32] Kurul N, Podowski MZ. Multidimensional effects in forced convection subcooled boiling.
- [33] Lemmert M, Chawla J. Influence of flow velocity on surface boiling heat transfer coefficient. Heat Transfer in Boiling. 1977 August 5;237(247);55-69.
- [34] Tolubinsky V, Kostanchuk D. Vapour bubbles growth rate and heat transfer intensity at subcooled water boiling.
- [35] Cole R. A photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux. AIChE Journal. 1960 Jun 8;6(4):533-8. doi: 10.1002/aic.690060405
- [36] Bartolomei G, Brantov V, Molochnikov Y S, Kharitonov Y V, Solodkii V, Batashova G, Mikhailov V. An experimental investigation of true volumetric vapor content with subcooled boiling in tubes Thermal Engineering. 1982 May 13;29(3):132-5.
- [37] Rouhani SZ, Axelsson E. Calculation of void volume fraction in the subcooled and quality boiling regions. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1970 Jan 7;13(2):383-93.
- [38] Basu N, Warriar GR, Dhir VK. Wall heat flux partitioning during subcooled flow boiling: Part 1-model development. J. Heat Transfer. 2005 July 9;127(2):131-40. doi: 10.1115/1.1842784
- [39] Friz W. Maximum volume of vapor bubbles. Physic. Zeitsch. 1935 Jun 5;36:379-54.
- [40] Yang L, Guo A, Liu D, Experimental investigation of subcooled vertical upward flow boiling in a narrow rectangular channel. Experimental Heat Transfer. 2016 July 13;29(2):221-43. doi: 10.1080/08916152.2014.973978
- [41] Sugrue R, Buongiorno J, McKrell T, An experimental study of bubble departure diameter in subcooled flow boiling including the effects of orientation angle, subcooling, mass flux, heat flux, and pressure. Nuclear Engineering and Design. 2014 may 16;279:182-8. doi: 10.1016/j.nucengdes.2014.08.009
- [42] Yoo J, Estrada-Perez CE, Hassan YA, Experimental study on bubble dynamics and wall heat transfer arising from a single nucleation site at subcooled flow boiling conditions-Part 2: Data analysis on sliding bubble characteristics and associated wall heat transfer. International Journal of Multiphase Flow. 2016 August 11;84:292-314. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.04.019
- [43] Han CY. The mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology). 1962 jan 12.
- [44] Zeng L, Klausner J, Nucleation site density in forced convection boiling. 1993 Jun 8. doi: 10.1115/1.2910651