ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2023;23(02):107-126

An Experimental Study on Bubble Growth and Departure in Pool Boiling on Wire with Annular Geometry and Providing Empirical Relations

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Mohammadi M A.[1],
Niazi S.[1*],
Bakhshan Y.[1],
Khorshidi J.[1],

How to cite this article
Mohammadi M A, Niazi S, Bakhshan Y, Khorshidi J. An Experimental Study on Bubble Growth and Departure in Pool Boiling on Wire with Annular Geometry and Providing Empirical Relations. Modares Mechanical Engineering. 2023;23(02):107-126.

[1] Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

Correspondence
Address: Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
s.niazi@hormozgan.ac.ir

Article History
Received: May 07, 2022
Accepted: November 07, 2022
ePublished: February 19, 2023

ABSTRACT

The present study examined the pool boiling process in a specific geometry by designing and constructing a laboratory complex. Investigation of pool boiling process, electrical resistance, critical heat flux, heat transfer coefficient, bubble growth and departure, bubble growth frequency, and nucleation site density by applying heat flux to critical heat flux was carried out on a ring wire in deionized water at different temperatures. According to the results, increasing the number of rings and fluid temperature decreased the critical heat flux. In the case of a ring wire with a constant number of rings, a fluid with a constant temperature, and the use of heat flux values less than the critical heat flux, the wire temperature increased, but it decreased in the case of increasing the number of rings, a fluid with a constant temperature and applying critical heat flux values. In a ring wire with a constant number of rings, the heat transfer coefficient was constant by increasing fluid temperature at values of heat flux less than the critical heat flux, but the heat transfer coefficient decreased at critical heat flux values. The diameters of the produced bubbles were enhanced by increasing heat flux and they separated from the rings when combined. At the beginning of the reddening of the ring wire, a critical heat flux occurred, and considering 110% of the time required for the critical heat flux, the images of the state of the ring wire after the critical heat flux are presented.

Keywords Bubble, Growth, Departure, Ring wire, Pool boiling.

CITATION LINKS

1- Improving the pool boiling process using the effect of porous surfaces. 2- Review of pool boiling enhancement by surface modification. 3- A brief review on factors affecting flow and pool boiling. 4- Review of two types of surface modification on pool boiling enhancement: Passive and active. 5- Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer of water on hydrophobic surfaces. 6- Pool boiling critical heat flux (CHF) – Part 1: Review of mechanisms, models, and correlations. 7- Visualisation of subcooled pool boiling in nanofluids. 8- Thermal interactions between nucleation sites and the solid wall during pool boiling of a pure fluid: A review. 9- Thermal interactions between nucleation sites and the solid wall during pool boiling of a pure fluid: A review. 10- Experimental study of wall nucleation characteristics in flow boiling under subatmospheric pressures in a vertical square channel. 11- A unified relationship between bubble departure frequency and diameter during saturated nucleate pool boiling. 12- Comparison of pool boiling performance for plain micro-fins and micro-fins with a porous layer. 13- Effects of a porous honeycomb structure on critical heat flux in downward-facing saturated pool boiling. 14- Experimental study of the time period of continued heating rate on the pool boiling characteristics of saturated water. 15- Marangoni effect on microbubbles emission boiling generation during pool boiling of self-rewetting fluid. 16- Experiments on the effects of nanoparticles on subcooled nucleate pool boiling. 17- Measurement of nucleation site density, bubble departure diameter and frequency in pool boiling of water using high-speed infrared and optical cameras. 18- Effect of heating surface morphology on active site density in subcooled flow nucleated boiling. 19- Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer of water on hydrophobic surfaces. 20- Effect of Surface Roughness on Pool Boiling Heat Transfer of Water on a Superhydrophilic Aluminum Surface. 21- Heating surface material's effect on subcooled flow boiling heat transfer of R134a. 22- Enhanced pool boiling heat transfer mechanisms for selectively sintered open microchannels.

Copyright© 2020, 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.

مطالعه آزمایشگاهی رشد و جدایش حباب در جوشش استخری روی سیم با هندسه حلقوی و ارائه روابط تجربی

محمدعلی محمدی[۱]، سعید نیازی[۱*]، یونس بخشان[۱]، جمشید خورشیدی[۱]
[۱] مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس ، ایران

چکیده
در پژوهش حاضر با طراحی و ساخت مجموعه آزمایشگاهی، فرآیند جوشش استخری در یک هندسه خاص مطالعه شده است. بررسی فرآیند جوشش استخری، مقاومت الکتریکی، شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت، رشد و جدایش حباب، فرکانس رشد حباب و چگالی نقاط مولد حباب با اعمال شارحرارتی تا شارحرارتی بحرانی روی سیم حلقوی در آب دیونیزه با دمای مختلف صورت‌پذیرفته‌است. براساس نتایج، با افزایش تعداد حلقه و افزایش دمای سیال، شارحرارتی بحرانی کاهشی است. در شرایط سیم حلقوی با تعداد حلقه ثابت، سیال با دمای ثابت و اعمال مقادیر شارحرارتی کمتر از شارحرارتی بحرانی، دمای سیم افزایش می‌یابد اما در شرایط افزایش تعداد حلقه، سیال با دمای ثابت و اعمال مقادیر شارحرارتی بحرانی، دمای سیم کاهشی است. همچنین در سیم حلقوی با تعداد حلقه ثابت، با افزایش دمای سیال در مقادیر شارحرارتی کمتر از شارحرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت ثابت بوده اما در مقادیر شارحرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. قطر حباب‌های تولیدی با افزایش شارحرارتی، بزرگ‌تر شده و با ترکیب شدن با یکدیگر از روی حلقه‌ها جدا می‌شوند. در ابتدای سرخ شدگی سیم‌حلقوی، شار حرارتی بحرانی رخ‌داده و با درنظر گرفتن۱۱۰٪ از زمان لازم برای شارحرارتی بحرانی تصاویر وضعیت سیم‌حلقوی پس از شارحرارتی بحرانی ارائه‌شده‌است.
کلیدواژه‌ها: حباب، رشد، جدایش، سیم حلقوی، جوشش استخری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۶
*نویسنده مسئول: s.niazi@hormozgan.ac.ir

۱- مقدمه

جوشش به تغییر حالت سیال از فاز مایع به بخار در حضور سطح جامد دارای شار حرارتی اشاره دارد. فرآیند جوشش در دستگاه‌های متعدد به عنوان یک مکانیزم مهم در طراحی به شمار می‌آید که می‌توان به طراحی بویلرها، لوله‌های تقطیر، راکتورهای هسته‌ای، پمپ‌های حرارتی، دستگاه‌های تهویه مطبوع، تجهیزات نیروگاهی و ... اشاره نمود و با افزایش روزافزون نیاز بشر به انرژی و اقتصادی بودن فرآیندها، باعث شده، افزایش بازدهی انتقال حرارت موردتوجه و اولویت محققان قرار گیرد [1]. عوامل مختلفی در بهبود فرآیند جوشش تأثیر دارند که می‌توان به سطوح گسترده، تراکم محل هسته، مرطوب بودن، کاهش طول موج بی‌ثباتی و فتیله‌سازی مویرگی یا گسترش پذیری اشاره نمود. محققان روش‌های متعددی با بهبود یک یا چند عامل به‌منظور اصلاح سطح گرمایش برای بهبود انتقال حرارت انجام داده‌اند [2]. زبری سطح گرمایش هم اثر قابل توجهی روی عملکرد انتقال حرارت جوشش دارد [3]. لی و همکاران خلاصه‌ای از روش‌های غیرفعال اصلاح سطوح به‌منظور افزایش جوشش استخری ارائه نمودند [4]. کیم و همکارانش در مطالعه‌ای به بررسی جوشش استخری در تمام نواحی جوشش برای یک سطح زبر آب گریز از جنس مس پرداختند [5]. لیانگ و همکارانش نحوه قرارگیری حباب‌ها بر روی سطح داغ تحت زوایای مختلف نسبت به راستای افق را بررسی نمودند [6]. کولولیاس و همکارانش به بررسی چشمی نتایج به‌دست‌آمده توسط جوشش بر روی سطح سیم داغ بسنده کردند [7]. کونگ و همکاران نحوه حرکت و تغییر شکل حباب از لحظه جدایش از سطح صاف تا رسیدن به شکل پایدار را بررسی کردند [8]. ماری و همکاران به بررسی اثرات مختلف کوپلینگ بین رسانش گرمایی درون یک دیوار داغ و رشد حباب‌های بخار در مایعات خالص اشباع‌شده پرداختند [9]. کولگان و همکاران پس از بررسی مدل‌های مختلف برای تعیین مقدار قطر جدایش حباب اعلام کردند که در صورت کاهش فشار کاری، مقدار قطر جدایش افزایش و فرکانس رشد حباب کاهش می‌یابد [10]. لنان ژانگ و همکاران به بررسی رابطه فرکانس خروج و قطر حباب در جوشش استخری با توجه به اثرات زیرلایه در جوشش استخری پرداختند [11]. پاستوسکو و همکاران از یک ساختار سطح فین دار به‌منظور افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی استفاده کردند و نتایج آن‌ها نشان می‌داد که مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی در سطح فین دار تقریبا دو برابر سطح سوراخ شده است [12]. وانگ و همکاران اشاره کردند که ساختار لانه زنبوری باعث افزایش دو برابری شار حرارتی بحرانی نسبت به سطح ساده می‌شود [13]. برای اجرای آزمایش بر روی سیم داغ درون مخزن سیال، از سیم‌هایی با جنس‌ها و قطرهای مختلف استفاده می‌شود که از جمله می‌توان به سیم نیکل، سیم استیل زنگ نزن، سیم کروم، آلیاژهای پلاتینیم و غیره اشاره نمود [14,15]. از پارامترهای مهم در جوشش سیالات، مقدار قطر جدایش حباب بوده که برای اندازه‌گیری آن‌ها به دوربین پرسرعت نیاز است. عموماً در پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه بررسی حباب‌ها، از دوربین‌هایی با نرخ تصویربرداری ۵۰۰ تصویر در هر ثانیه یا بیشتر استفاده می‌شود [16].

۲- روش آزمایش

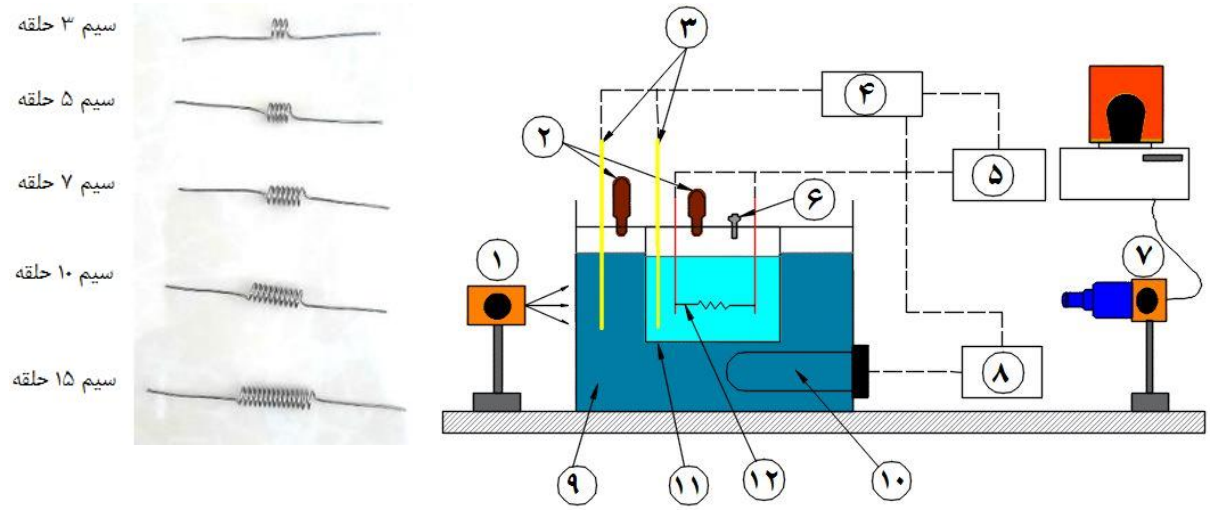
در پژوهش حاضر از سیستم آزمایش با ظرفیت ذخیره آب دیونیزه با حجم ۵ لیتر استفاده‌شده تا سیم حلقوی مورد آزمایش درون سیال غوطه‌ور شود و دمای سیال با استفاده از المنت حرارتی با توان ۱۵۰۰ وات، در دمای موردنظر و یا دمای اشباع تنظیم شده‌است. سیستم آزمایش مورداستفاده دارای درپوش بوده تا بخار حاصل از جوشش، به کمک کندانسورهای قرارگرفته روی آن، چگالیده شده و دوباره به مخزن برگردد و حجم سیال درون آن تغییر نکند. برای ثابت بودن فشار حین آزمایش، یک مبدل فشار

معادل فشار اتمسفر استفاده شده‌است. دیتالاگر ۸ کاناله برای ذخیره مقادیر دماهای اندازه‌گیری‌شده در هریک از مراحل آزمایش استفاده‌گردیده و برای ثابت نگه‌داشتن دمای سیال در دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، المنت حرارتی برای گرمایش آب مخازن به کمک رله تحت کنترل بوده و دمای سیال در هر مرحله از آزمایش ثابت نگه‌داشته می‌شود و حداکثر تلرانس تغییر دما ۱± درجه سانتی‌گراد خواهد بود. برای بررسی شرایط سیال با دمای کمتر از دمای اشباع (مادون سرد) و دستیابی به نتایج جامع‌تر، آزمایش در دماهای ۳۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد نیز انجام شده‌است. همچنین از منبع تغذیه آزمایشگاهی ۴۸۰۰۰ وات، مولتی‌مترهای با دقت بالا برای اندازه‌گیری مقدار ولتاژ و جریان خروجی منبع تغذیه، ترموکوپل‌های نوع K با دقت تقریبی ۰/۱ درجه سانتی‌گراد برای اندازه‌گیری دمای سیال، دوربین پرسرعت برای بررسی تصویری حباب‌ها و زمان و قطر جدایش مورداستفاده قرارگرفته‌است. سیم حلقوی استفاده‌شده در آزمایش به ترتیب با تعداد ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ حلقه با قطر ۴/۳ میلی‌متر، طول بازوی صاف ۱۰ میلی‌متر، گام حلقه یک میلی‌متر، قطر مفتول سیم حلقوی ۰/۵ میلی‌متر از جنس فولاد زنگ نزن با گرید ۴۴۶ می‌باشد. در شکل ۱، شماتیک سیستم آزمایش طراحی و ساخته‌شده و سیم حلقوی مورد استفاده نشان داده‌شده‌است.

۳- معادلات مورد نیاز

مهم‌ترین مؤلفه تأثیرگذار بر جوشش، مقدار شار حرارتی اعمال شده است که برابر با مقدار توان الکتریکی اعمالی تقسیم بر مقدار مساحت سطح داغ و در رابطه (۱) آمده‌است.

$$q'' = \frac{q}{A} = \frac{V \times I}{A} \qquad (۱)$$



۱. لامپ روشنایی
۲. کندانسور
۳. ترموکوپل
۴. ثبت کننده داده (دیتالاگر)
۵. منبع تغذیه متناوب
۶. تعدیل کننده فشار
۷. دوربین پرسرعت
۸. منبع تغذیه مستقیم
۹. مخزن بیرونی
۱۰. گرمکن
۱۱. سیم حلقوی
۱۲. مخزن داخلی

(الف)

(ب)

شکل ۱) الف) شماتیک و سیم حلقوی مورد استفاده ب) سیستم آزمایش طراحی و ساخته‌شده

برای تعیین مقاومت الکتریکی سیم حلقوی از معادله (۲) استفاده می‌شود.

$$R = \frac{V}{I} \qquad (۲)$$

ضریب انتقال حرارت به کمک رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$h = \frac{q}{T_W - T_{Sat}} = \frac{V \times I}{T_W - T_{Sat}} \qquad (۳)$$

یکی دیگر از پارامترهای مهم در دینامیک حباب، فرکانس تشکیل حباب می‌باشد. فرکانس تشکیل حباب‌ها بستگی به مدت زمان لازم برای ایجاد یک حباب جدید و مدت زمان لازم برای رشد و جدایش آن دارد که به کمک رابطه (٤) محاسبه می‌گردد [17].

$$f = \frac{1}{t_G - t_w} \qquad (۴)$$

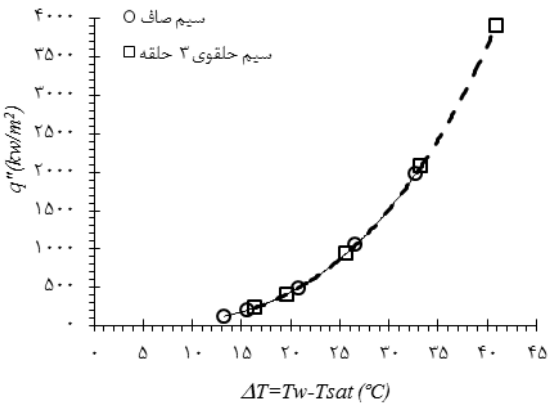
برای تعیین چگالی نقاط مولد حباب، مطابق رابطه (۵) از تقسیم تعداد کل حباب در هر میلی‌ثانیه به مساحت کل المنت استفاده شده است [17,18].

$$NSD = \frac{N}{A} \qquad (۵)$$

در آزمایش‌ها برای تعیین رشد حباب و قطر حباب روی المنت با سیم حلقوی، از دوربین پرسرعت ۹٦۰ تصویر در هر ثانیه استفاده می‌شود و پس از اجرای آزمایش‌های موردنظر و جمع‌آوری اطلاعات، با استفاده از نرم‌افزارهای صفحه گسترده، اتوکد، آنالیز تصاویر-کلمکس، نرم افزار آماری-اس پی اس اس و مینی تب، اطلاعات مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

۴- نتایج و تحلیل آن‌ها

در ابتدا برای اطمینان از صحت عملکرد دستگاه‌ها و تجهیزات آزمایش، با اعمال شار حرارتی، جوشش استخری روی یک سیم صاف و سیم حلقوی ۳ حلقه در آب دیونیزه با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید بین شار حرارتی و اختلاف دما رابطه مستقیم وجود دارد. در شکل ۲، نمودار جوشش استخری سیم صاف و سیم حلقوی ۳ حلقه در سیال با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده‌شده‌است.



شکل ۲) نمودار جوشش استخری سیم صاف و سیم حلقوی ۳ حلقه در سیال با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد

۴-۱- آزمایش تکرارپذیری

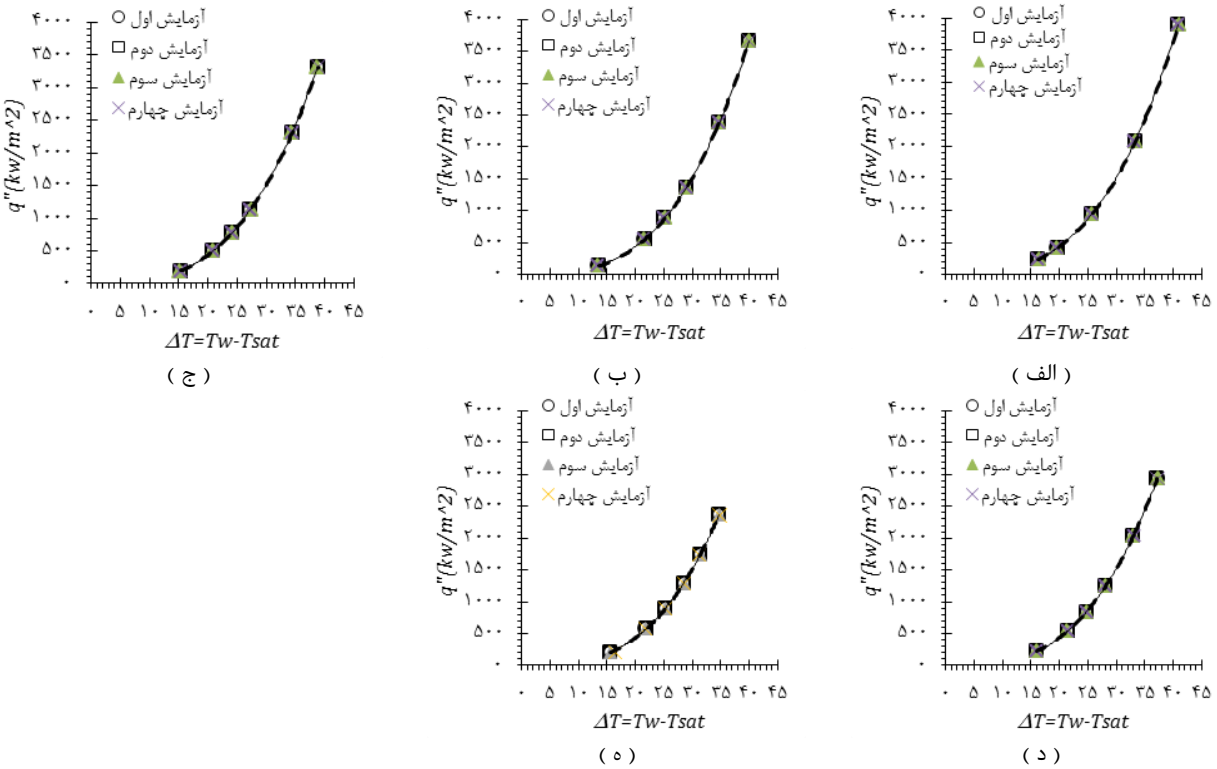
برای اطمینان از روند صحیح انجام آزمایش‌ها، تکرار آزمایش تا چهار مرحله صورت پذیرفت و نتایج از روش تست نرمال توسط نرم افزار مینی‌تب محاسبه شد و مشاهده گردید نتایج از توزیع نرمال پیروی می‌نماید و آزمایش تکرارپذیر است. در شکل۳، نمودار تغییرات شار حرارتی و اختلاف دمای سیال و حالت اشباع در سیم حلقوی الف- ۳ حلقه، ب- ۵ حلقه، ج- ۷ حلقه، ه- ۱۰ حلقه، و- ۱۵ حلقه و آب دیونیزه با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد با چهار مرحله تکرار نشان داده شده‌است.

۴-۲- شار حرارتی بحرانی

برای ارائه روابط همبستگی مقدار شار حرارتی بحرانی از نتایج آزمایش نحوه جوشش استخری آب دیونیزه روی سیم حلقوی استفاده شده‌است. ابتدا آزمایش برای سیم حلقوی با تعداد ۳ حلقه با اعمال شار حرارتی و افزایش آن در آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در ادامه آزمایش برای سیم حلقوی با تعداد حلقه ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ حلقه تکرار گردید که در جدول ۱، نتایج شار حرارتی بحرانی هریک از سیم‌های حلقوی و در شکل٤، نمودار تغییرات شار حرارتی و اختلاف دمای سیال و حالت اشباع در سیم حلقوی ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ حلقه و آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده‌است.

جدول ۱) شار حرارتی بحرانی سیم حلقوی با تعداد حلقه ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ و آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

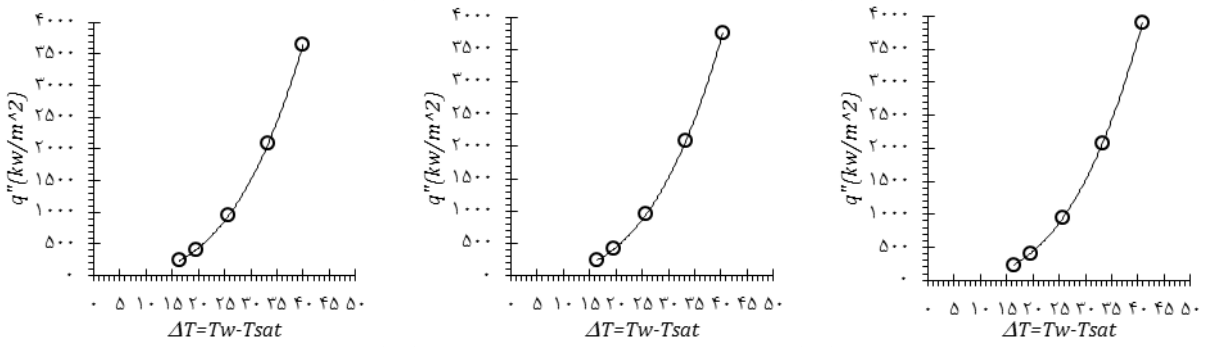
تعداد حلقه	شار حرارتی بحرانی (کیلووات بر مترمربع)		
	دمای سیال ۳۰ درجه سانتی‌گراد	دمای سیال ۷۰ درجه سانتی‌گراد	دمای سیال ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد
۳	۳۹۰۷	۳۷۶۱	۳۶۴۹
۵	۳۶۵۹	۳۴۸۹	۳۳۲۲
۷	۳۳۲۰	۳۰۹۶	۲۹۶۵
۱۰	۲۹۴۲	۲۶۳۲	۲۴۷۹
۱۵	۲۳۶۱	۲۱۴۵	۱۹۴۰



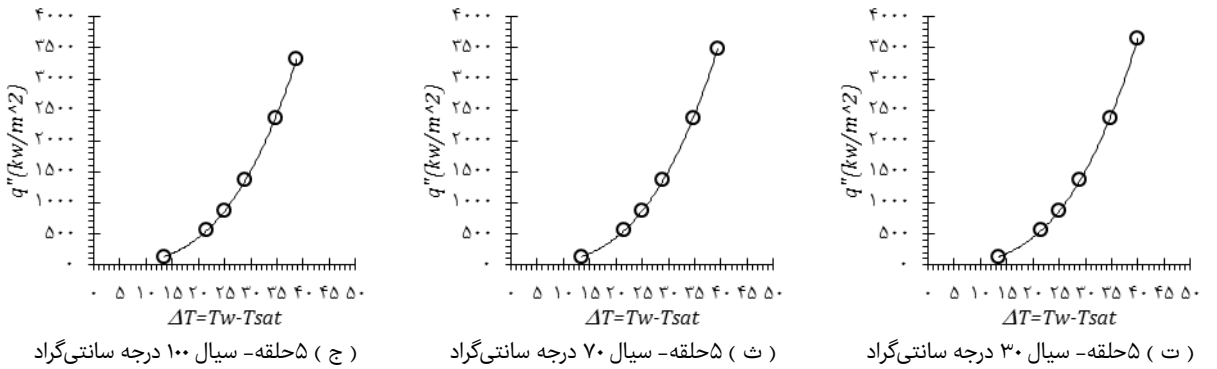
(الف) (ب) (ج)

(د) (ه)

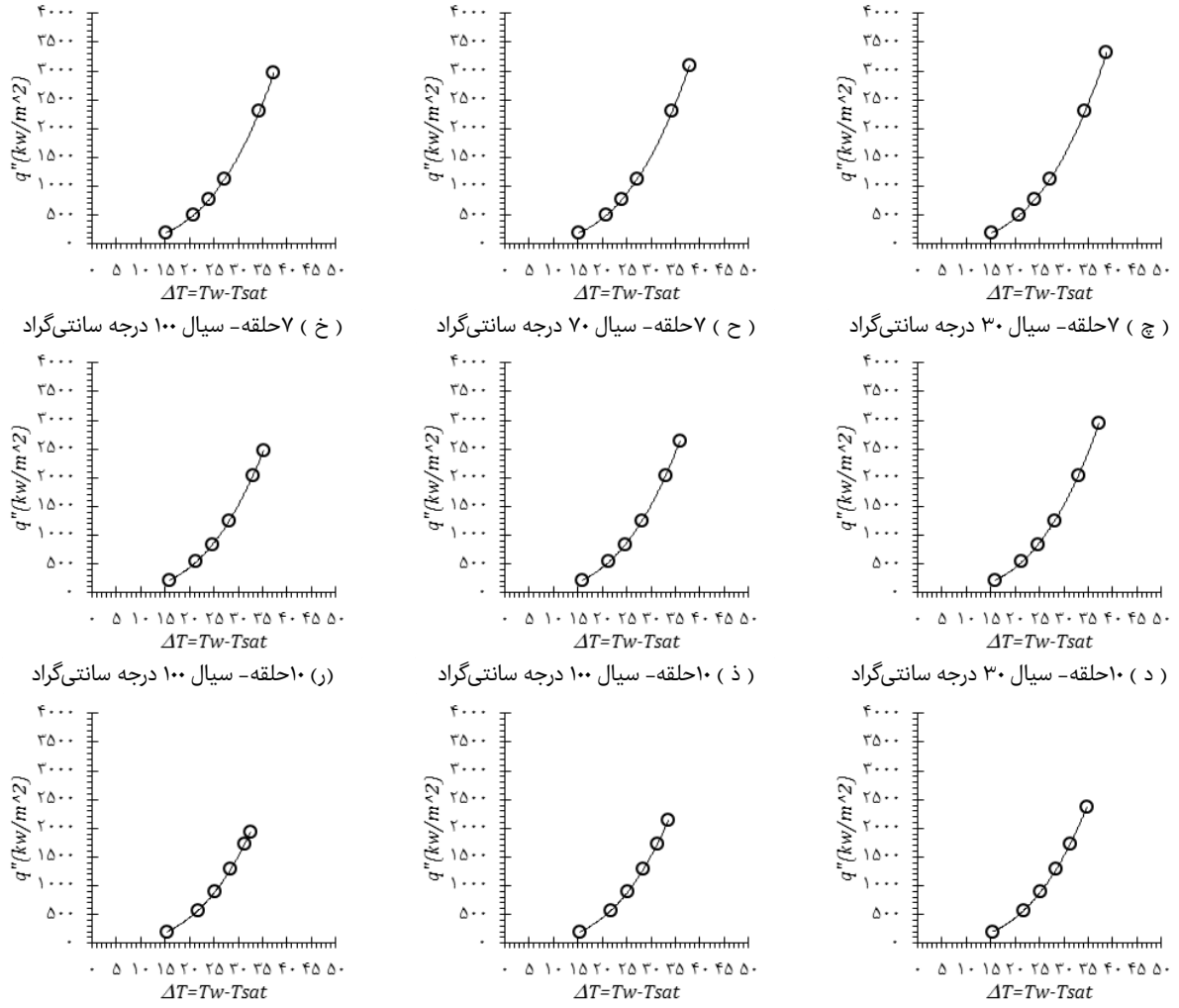
شکل ۳) نمودار تغییرات شار حرارتی و اختلاف دمای سیال و حالت اشباع در سیم حلقوی الف) ۳ حلقه، ب) ۵ حلقه، ج) ۷ حلقه، د) ۱۰ حلقه، ه) ۱۵ حلقه و آب دیونیزه با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد با چهار مرحله تکرار



(الف) ۳حلقه- سیال ۳۰ درجه سانتی‌گراد (ب) ۳حلقه- سیال ۷۰ درجه سانتی‌گراد (پ) ۳حلقه- سیال ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد



(ت) ۵حلقه- سیال ۳۰ درجه سانتی‌گراد (ث) ۵حلقه- سیال ۷۰ درجه سانتی‌گراد (ج) ۵حلقه- سیال ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد



(چ) ۷حلقه- سیال ۳۰ درجه سانتی‌گراد (ح) ۷حلقه- سیال ۷۰ درجه سانتی‌گراد (خ) ۷حلقه- سیال ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

(د) ۱۰حلقه- سیال ۳۰ درجه سانتی‌گراد (ذ) ۱۰حلقه- سیال ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (ر) ۱۰حلقه- سیال ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

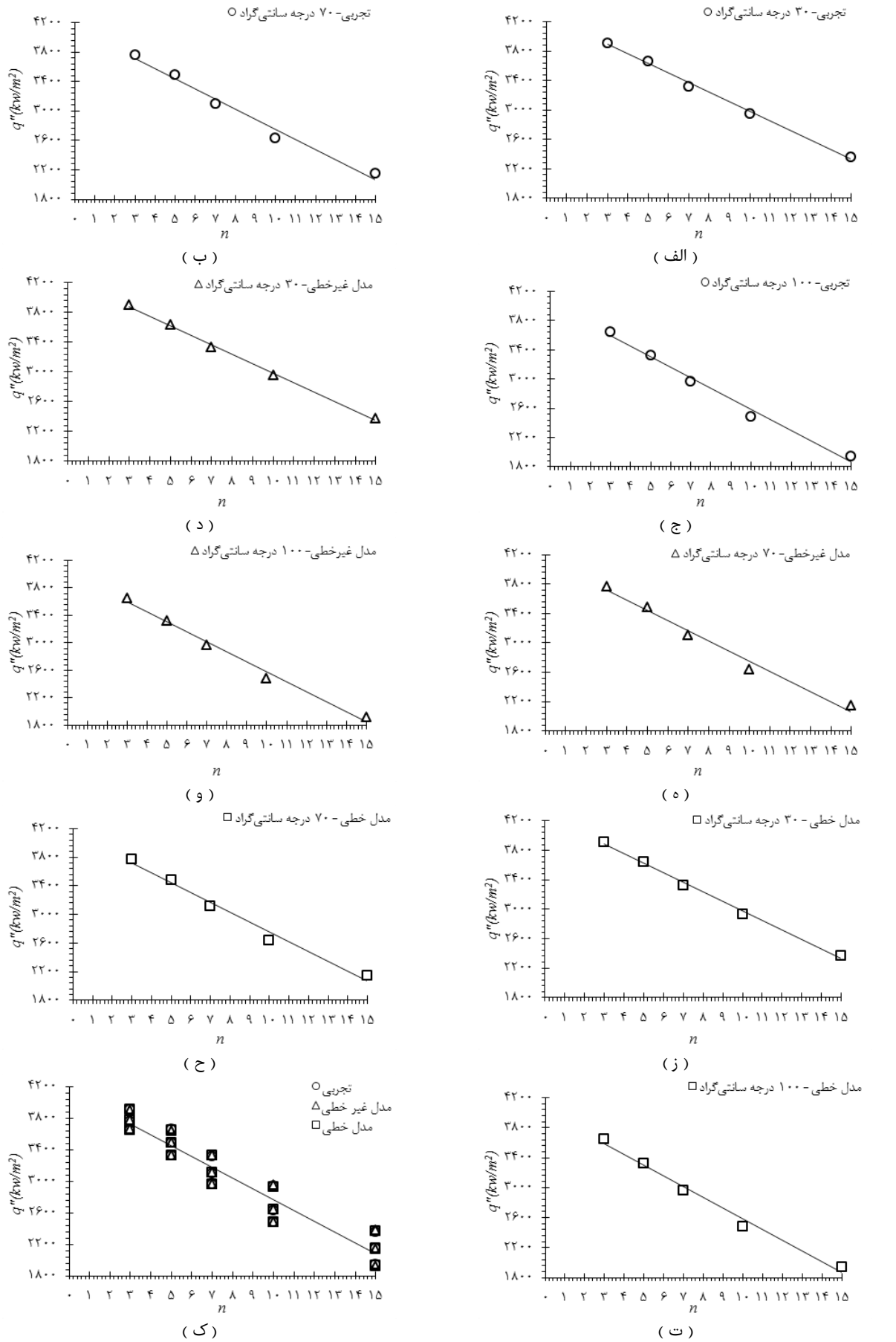
(ز) ۱۵حلقه- سیال ۳۰ درجه سانتی‌گراد (ژ) ۱۵حلقه- سیال ۷۰ درجه سانتی‌گراد (س) ۱۵حلقه- سیال ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

شکل ۴) نمودار تغییرات شار حرارتی و اختلاف دمای سیال و حالت اشباع در سیم حلقوی ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ حلقه و آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

در بررسی جوشش استخری پژوهش‌های پیشین، تأثیر زبری سطح و زاویه تماس نیز مورد توجه بوده‌است [1920]. در صورت عدم وجود اطلاعات کافی، سبب بروز خطای بسیاری در نتایج به‌دست آمده برای مقدار شار حرارتی بحرانی خواهد شد که به همین دلیل در این پژوهش از تعداد حلقه، جریان الکتریکی، مقاومت الکتریکی، دمای سیم، اختلاف دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی به‌عنوان پارامترهای مؤثر استفاده شده‌است تا بتوان به‌صورت ساده‌تری مقدار شار حرارتی بحرانی را تخمین زد. با توجه به همبستگی پارامترها ملاحظه می‌شود با افزایش دمای سیال، به دلیل افزایش دمای سطح سیم، تعداد حباب‌های تشکیل‌شده روی سیم حلقوی افزایش یافته و با ترکیب حباب‌ها، حباب‌های بزرگ‌تری بوجود آمده و فضای خالی درون حباب موجب می‌شود تا سیم حلقوی در شار حرارتی بحرانی کمتری شروع به سرخ شدن نموده و پس از گذشت زمان کوتاهی به درخشندگی کامل رسیده و پس‌ازآن گسیخته شود. همچنین علاوه بر افزایش دمای سیال، با افزایش تعداد حلقه نیز شار حرارتی بحرانی، کاهش می‌یابد. برای یکپارچه‌سازی نتایج، در جدول ۲، مدل پیشنهادی برای تخمین شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری روی سیم با هندسه حلقوی و در شکل ۵ نمودار شار حرارتی بحرانی سیم حلقوی ۳، ۵، ۷، ۱۰، و ۱۵ حلقه در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد الف تا ج- تجربی، د تا و- مدل غیرخطی، ز تا ت- مدل خطی، ک- مقایسه نتایج تجربی، مدل غیرخطی و مدل خطی، نشان داده‌شده‌است.

جدول ۲) شار حرارتی بحرانی سیم حلقوی با تعداد حلقه ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ و آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

مدل	مدل تابع	رابطه همبستگی	میانگین خطای مطلق
۱	رابطه غیرخطی	$CHF = -903.011 + n^{-0.638} + I^{-0.292} + R^{-3.877} + {T_W}^{-0504} + \Delta T^{2.282} + h^{-0.358}$	۰/۰۹
۲	رابطه خطی	$CHF = -5642.508 + 17.646 \times n + 12.925 \times I + 581.885 \times R - 0.831 \times T_W + 229.272 \times \Delta T - 52.747 \times h$	-۱/۰۳



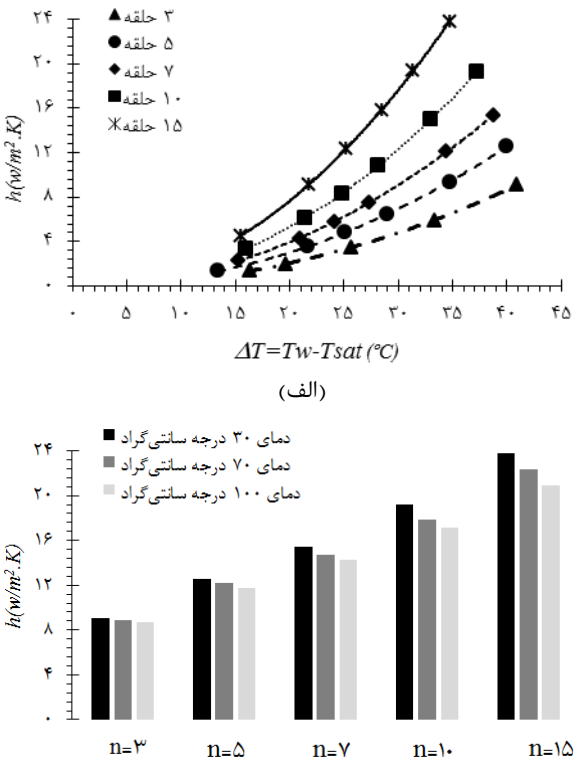
شکل ۵) نمودار شار حرارتی بحرانی سیم حلقوی ۳، ۵، ۷، ۱۰، و ۱۵ حلقه در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد الف تا ج) تجربی، د تا و) مدل غیرخطی، ز تا ت) مدل خطی، ک) مقایسه نتایج تجربی، مدل غیرخطی و مدل خطی

مطابق نتایج به‌دست آمده ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد حلقه و افزایش دمای سیال، شار حرارتی بحرانی کاهشی است. در شرایط سیم حلقوی با تعداد حلقه ثابت، سیال با دمای ثابت و مقادیر شار حرارتی کمتر از شار حرارتی بحرانی، دمای سیم افزایش می‌یابد اما در شرایط افزایش تعداد حلقه، سیال با دمای ثابت و مقادیر شار حرارتی بحرانی، دمای سیم کاهشی است. همچنین در سیم حلقوی با تعداد حلقه ثابت، با افزایش دمای سیال در مقادیر شار حرارتی کمتر از شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت ثابت بوده اما در مقادیر شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. خطای مطلق به‌دست آمده در مدل‌های غیر خطی و خطی به ترتیب ۱/۰۹٪ و ۱/۰۳-% می‌باشد و در شرایط مختلف، خطای محاسباتی وجود دارد که نشان‌دهنده عدم وابستگی خطا به شرایطی خاص است و مدل‌های ارائه‌شده را می‌توان برای شرایط مختلف و با خطای قابل‌قبول، مورد استفاده قرار داد.

۴-۳- ضریب انتقال حرارت

برای بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی سیم حلقوی، ابتدا آزمایش برای سیم حلقوی با تعداد ۳ حلقه، با اعمال شار حرارتی و افزایش آن در آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در ادامه آزمایش برای سیم حلقوی با تعداد ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ حلقه، با اعمال شار حرارتی بحرانی در آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تکرار گردید که در شکل ٦، الف- نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی، ب- مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی در سیم حلقوی با تعداد حلقه ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ و آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده‌شده‌است.

در بررسی ضریب انتقال حرارت در جوشش استخری پژوهش‌های پیشین، تأثیر جنس، هندسه و زاویه سطح المنت نسبت به افق نیز مورد توجه بوده‌است [6,21,22]. در صورت عدم وجود اطلاعات کافی، سبب بروز خطای بسیاری در نتایج به‌دست آمده برای مقدار ضریب انتقال حرارت خواهد شد. در این پژوهش از زاویه سطح المنت صرفنظر شده‌است تا بتوان به‌صورت ساده‌تری مقادیر ضریب انتقال حرارت را به‌دست آورد. با توجه به نتایج، ملاحظه می‌شود در سیم حلقوی با تعداد حلقه ثابت، با افزایش دمای سیال در مقادیر شار حرارتی کمتر از شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت ثابت بوده اما در مقادیر شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل افزایش شار حرارتی تا کمتر از شار حرارتی بحرانی در سیال دمای ۳۰ به ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و ثابت بودن سطح سیم حلقوی در تعداد حلقه ثابت، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود به دلیل کاهش شار حرارتی بحرانی در دمای سیال از ۳۰ به ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و ثابت بودن سطح سیم حلقوی در تعداد حلقه ثابت، ضریب انتقال حرارت جابجایی کاهش می‌یابد و با افزایش تعداد حلقه سیم حلقوی در دمای ثابت سیال، سطح سیم افزایش یافته که در نتیجه، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش پیدا می‌کند. به طور کلی ملاحظه می‌شود که با افزایش ۵ برابری تعداد حلقه در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در مقادیر شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت ۲/۵ برابر افزایش می‌یابد.



(الف)

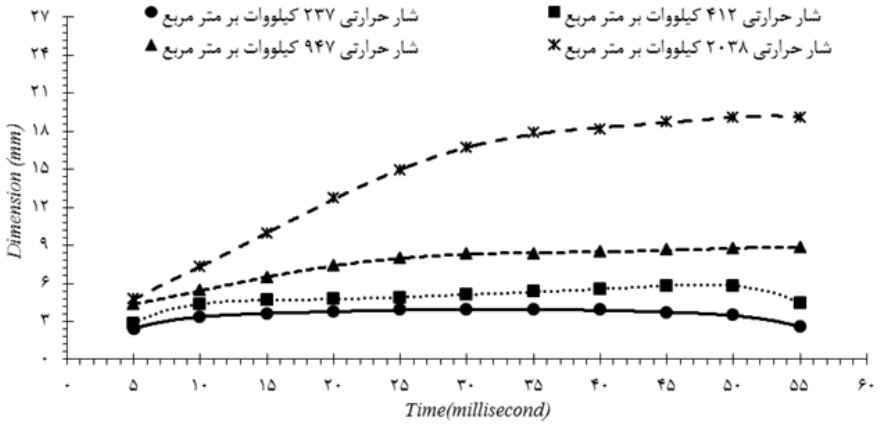
(ب)

شکل ۶) الف) نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی، ب) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی در سیم حلقوی با تعداد حلقه ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ و آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

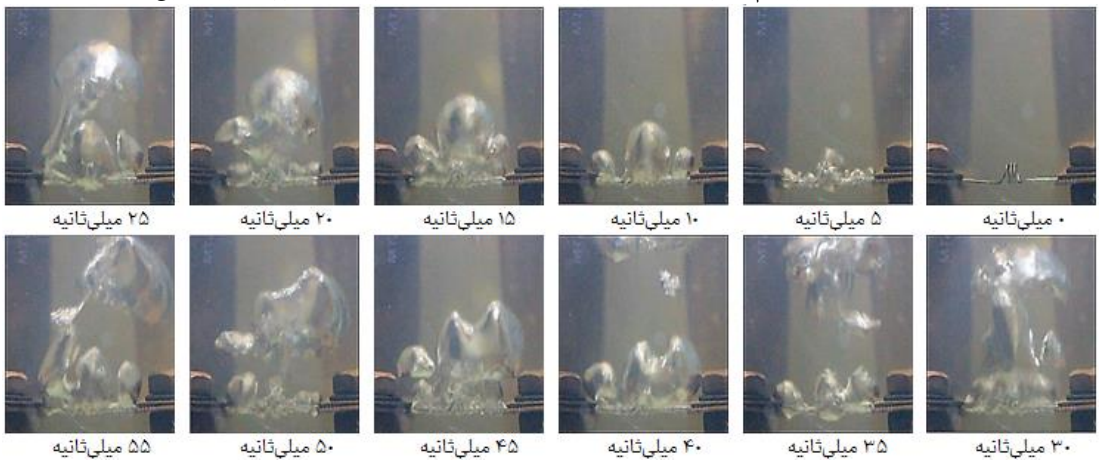
۴-۴- رشد و جدایش حباب

برای بررسی رشد و جدایش حباب و ارائه روابط همبستگی تخمین قطر حباب روی سیم حلقوی، دو حالت (شار ثابت-دما متغیر و دما ثابت-شار متغیر) در نظر گرفته شده است. ابتدا آزمایش برای سیم حلقوی با تعداد ۳ حلقه با اعمال شار حرارتی و افزایش آن در آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در ادامه آزمایش برای سیم حلقوی با تعداد حلقه ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ حلقه تکرار گردیده و به کمک تصویربرداری با دوربین پرسرعت در هر میلی‌ثانیه، پردازش و جداسازی تصاویر در هر فریم صورت پذیرفته و قطر حباب‌ها به کمک نرم افزار کلمکس و اتوکد با مقیاس ۱:۱ تعیین می‌شود. تصاویر با مقیاس ۱:۱ وارد نرم‌افزار اتوکد شده و به کمک ابزار اندازه، قطر هریک از حباب‌ها

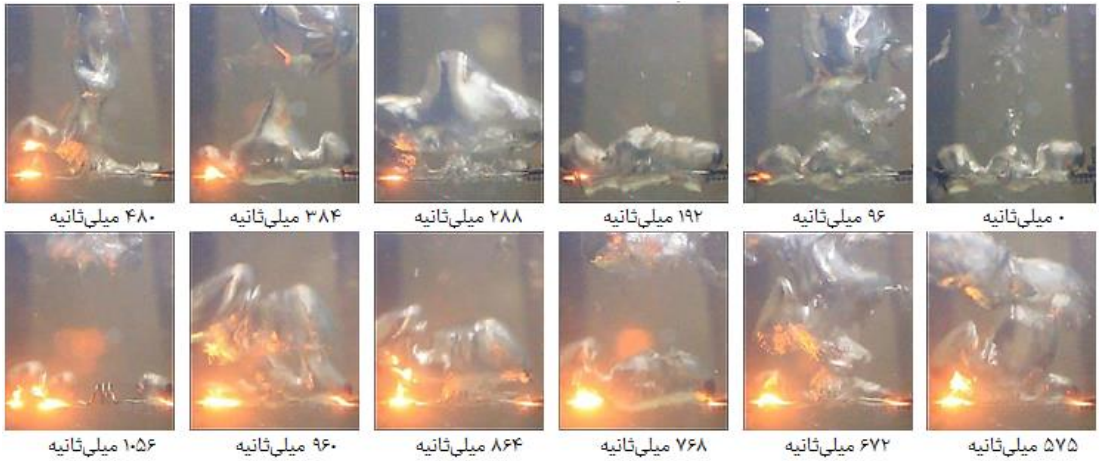
اندازه‌گیری شده و جهت حصول اطمینان از اندازه‌گیری صورت‌پذیرفته، مجدداً دیتابرداری توسط نرم‌افزار کلمکس صورت‌پذیرفته و خطای اندازه‌گیری ۰/۰۰۱ میلی‌متر مشاهده گردید. میزان رشد حباب، با تفاضل قطر حباب در هر فریم نسبت به فریم قبل و به کمک صفحه گسترده تعیین می‌گردد. تصاویر رشد و جدایش حباب در شار حرارتی کمتر از شار حرارتی بحرانی در سیال با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه می‌شود و با توجه به این‌که رشد حباب و قطر حباب در هر میلی‌ثانیه مشهود نیست لذا نتایج و تصاویر ارائه‌شده هر ۵ میلی‌ثانیه و در بازه زمانی صفر تا ۵۵ میلی‌ثانیه در نظر گرفته‌شده است. در شکل ۷، قطر حباب و رشد حباب در جوشش استخری آب دیونیزه روی المنت با سیم حلقوی ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ حلقه در دمای آب ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه‌شده است. در شرایط اعمال شارحرارتی بحرانی، بازه زمانی ارائه‌شده در تصاویر از ۱۰ تا ۱۱۰ درصد از مدت زمان لازم برای رسیدن سیم حلقوی به حالت سرخ‌شدگی و درخشندگی کامل می‌باشد.



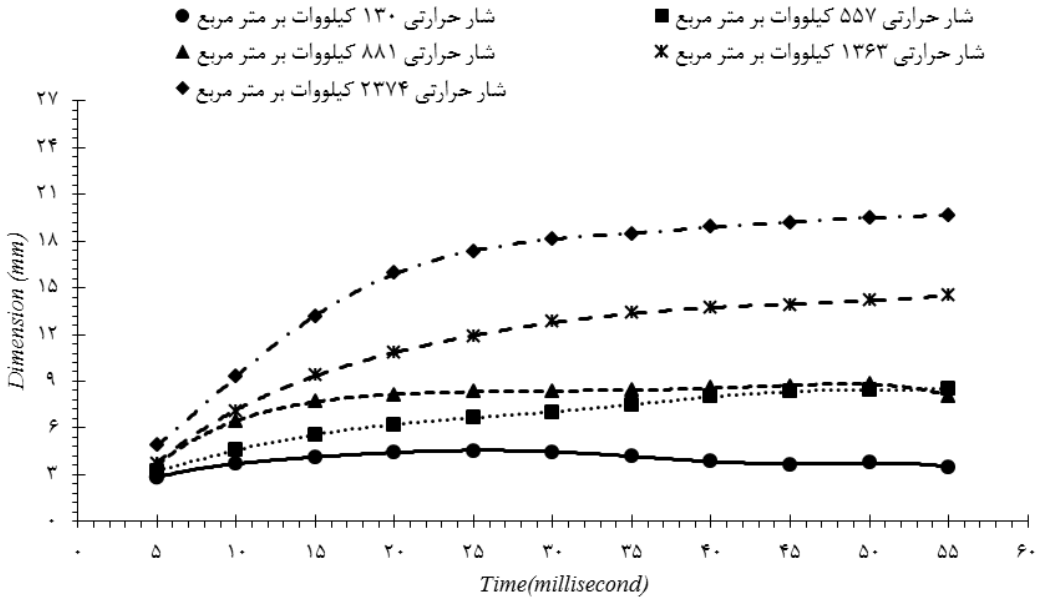
الف) قطر حباب در سیم حلقوی ۳ حلقه، شار حرارتی ۲۳۷، ۴۱۲، ۹۴۷ و ۲۰۳۸ کیلووات بر متر مربع



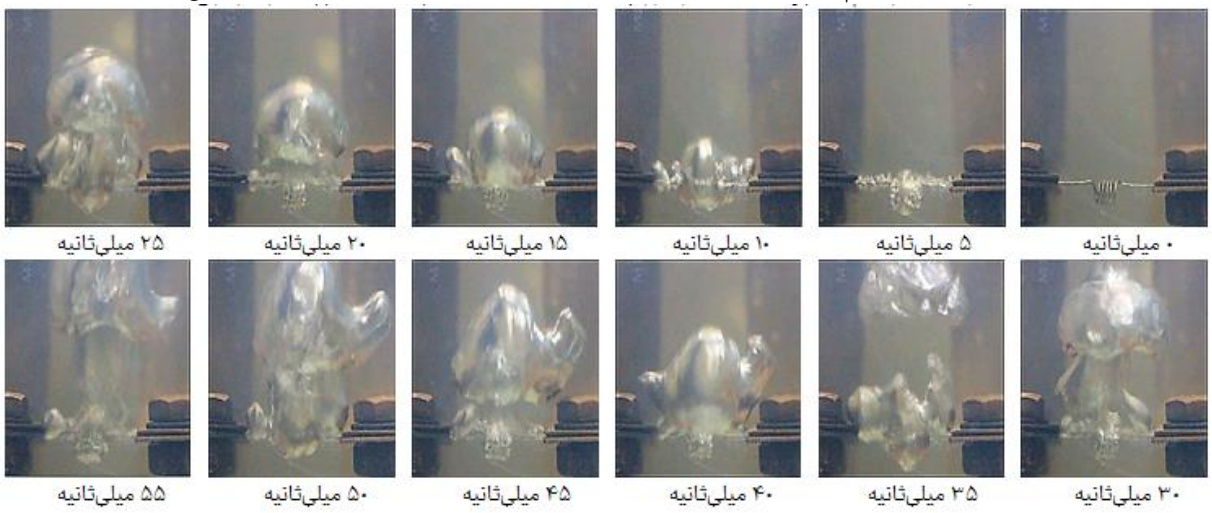
ب) رشد حباب در سیم حلقوی ۳ حلقه، شار حرارتی ۲۰۳۸ کیلووات بر مترمربع



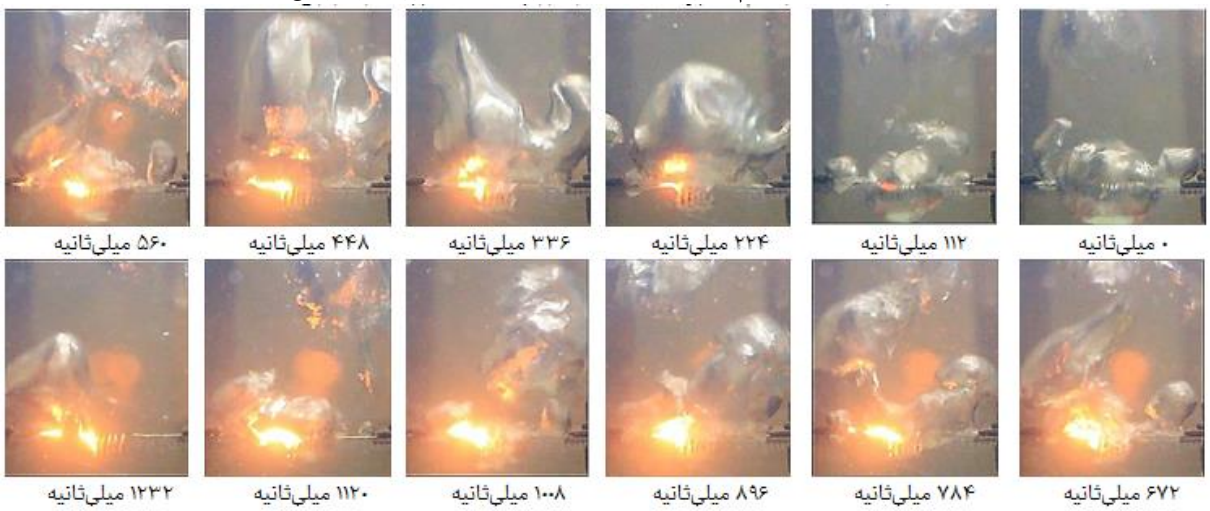
پ) رشد حباب در سیم حلقوی ۳ حلقه، شار حرارتی ۳۶۴۹ کیلووات بر مترمربع



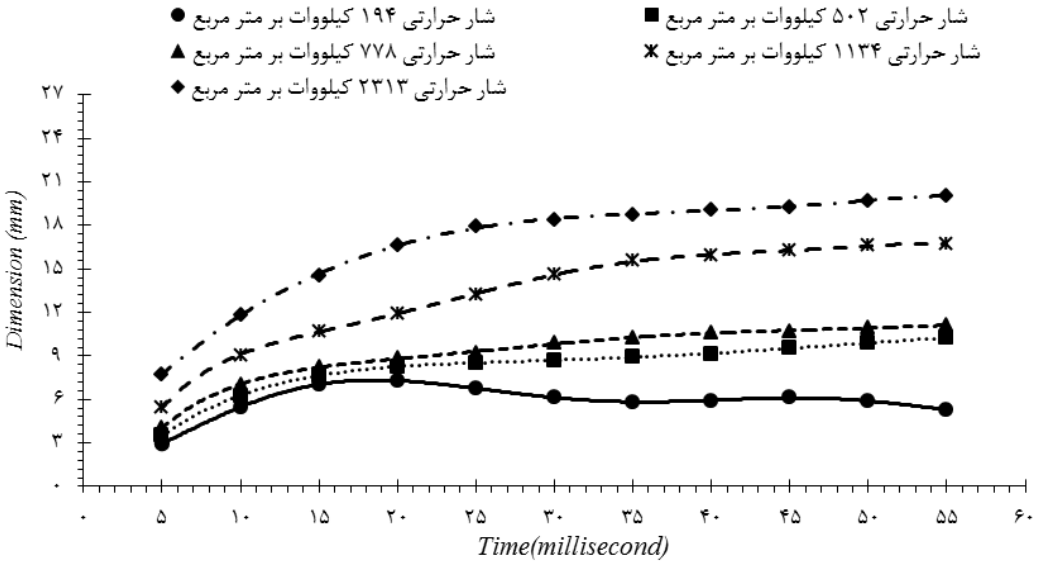
ت) قطر حباب در سیم حلقوی ۵ حلقه، شار حرارتی ۱۳۰، ۵۵۷، ۸۸۱، ۱۳۶۳ و ۲۳۷۴ کیلووات بر متر مربع



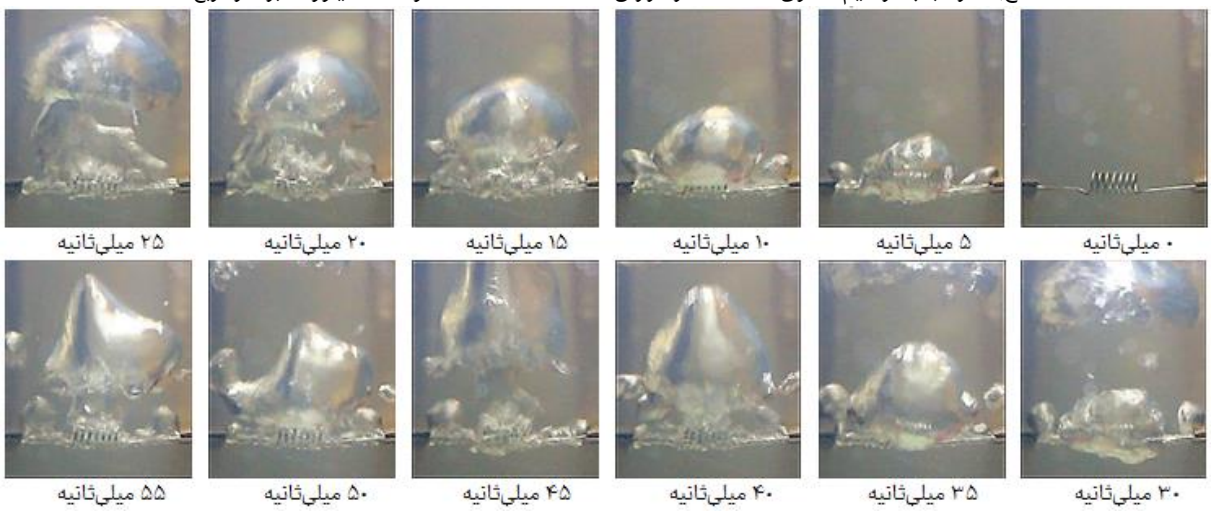
ث) رشد حباب در سیم حلقوی ۵ حلقه، شار حرارتی ۲۳۷۴ کیلووات بر مترمربع



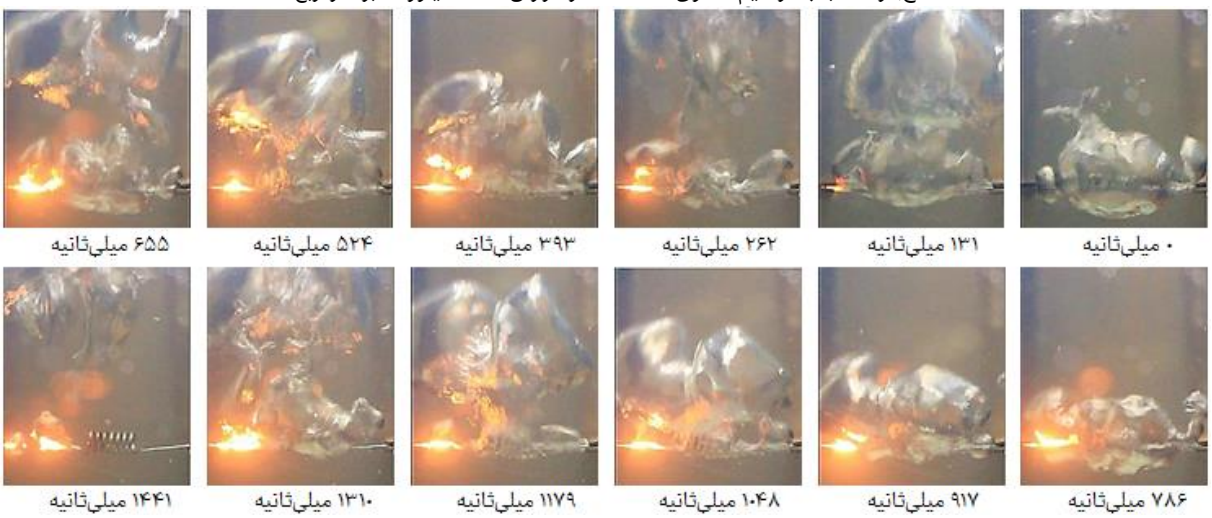
ج) رشد حباب در سیم حلقوی ۵ حلقه، شار حرارتی بحرانی ۳۳۲۲ کیلووات بر مترمربع



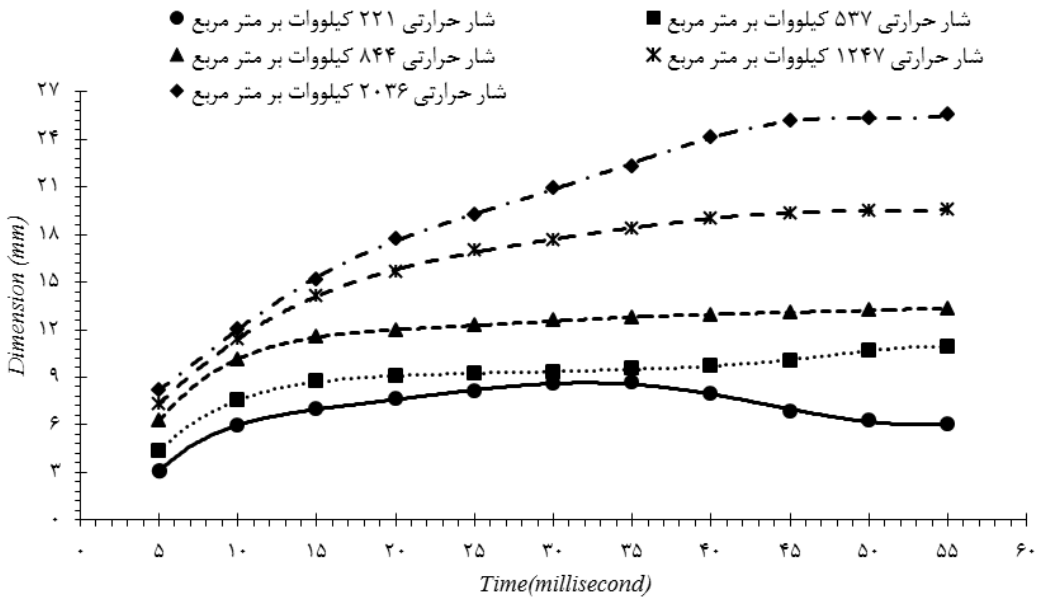
چ) قطر حباب در سیم حلقوی ۷ حلقه، شار حرارتی ۱۹۴، ۵۰۲، ۷۷۸، ۱۱۳۴ و ۲۳۱۳ کیلووات بر متر مربع



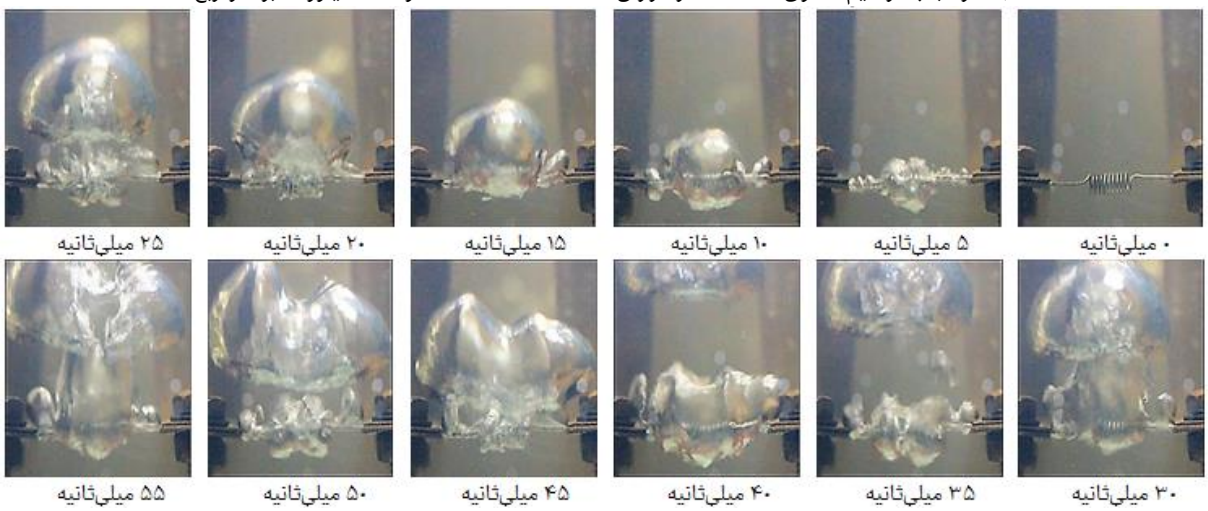
ح) رشد حباب در سیم حلقوی ۷ حلقه، شار حرارتی ۲۳۱۳ کیلووات بر مترمربع



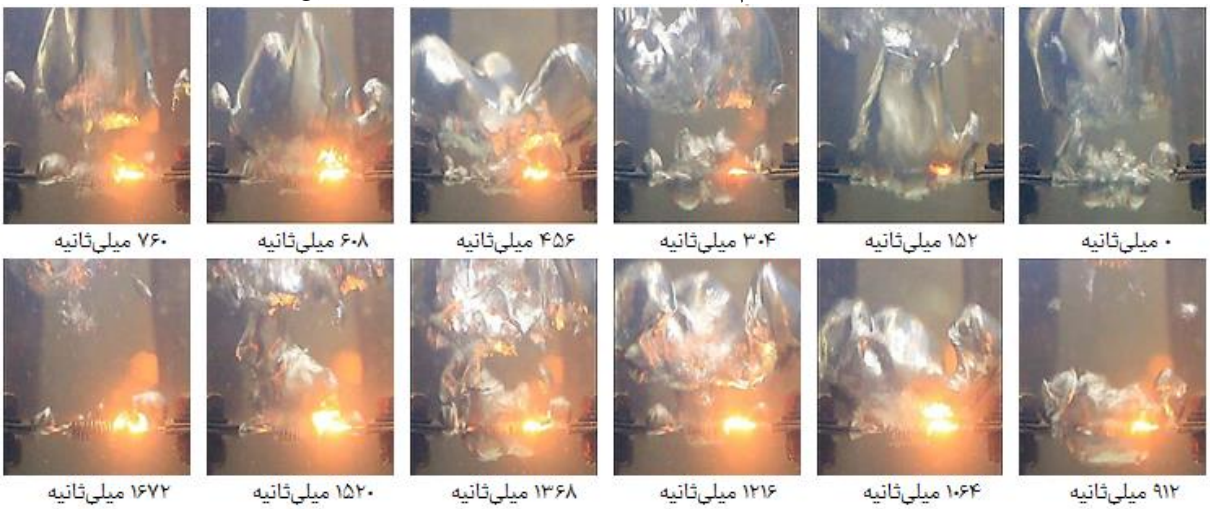
خ) رشد حباب در سیم حلقوی ۷ حلقه، شار حرارتی بحرانی ۲۹۶۵ کیلووات بر مترمربع



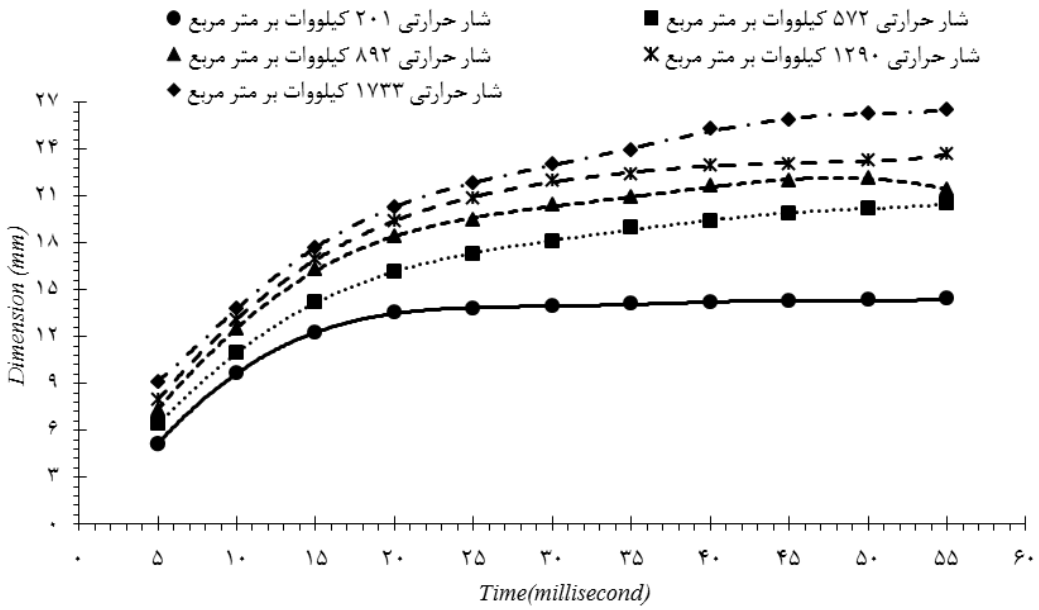
د) قطر حباب در سیم حلقوی ۱۰ حلقه، شار حرارتی ۲۲۱، ۵۳۷، ۸۴۴، ۱۲۴۷ و ۲۰۳۶ کیلووات بر مترمربع



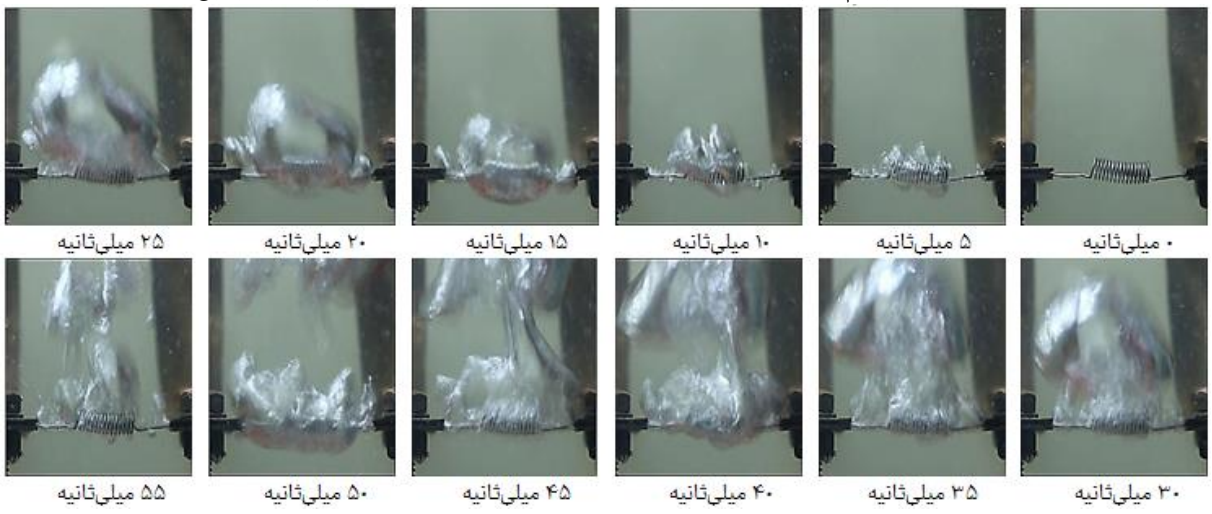
ذ) رشد حباب در سیم حلقوی ۱۰ حلقه، شار حرارتی ۲۰۳۶ کیلووات بر مترمربع



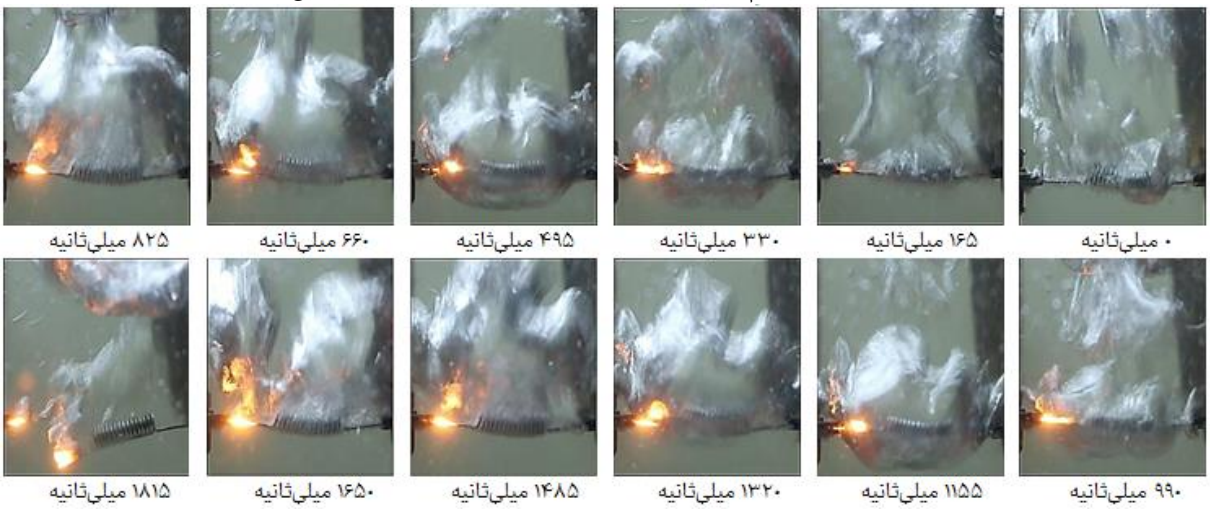
ر) رشد حباب در سیم حلقوی ۱۰ حلقه، شار حرارتی بحرانی ۲۴۷۹ کیلووات بر مترمربع



ز) قطر حباب در سیم حلقوی ۱۵ حلقه، شار حرارتی ۲۰۱، ۵۷۲، ۸۹۲، ۱۲۹۰ و ۱۷۳۳ کیلووات بر متر مربع



ژ) رشد حباب در سیم حلقوی ۱۵ حلقه، شار حرارتی ۱۷۳۳ کیلووات بر متر مربع



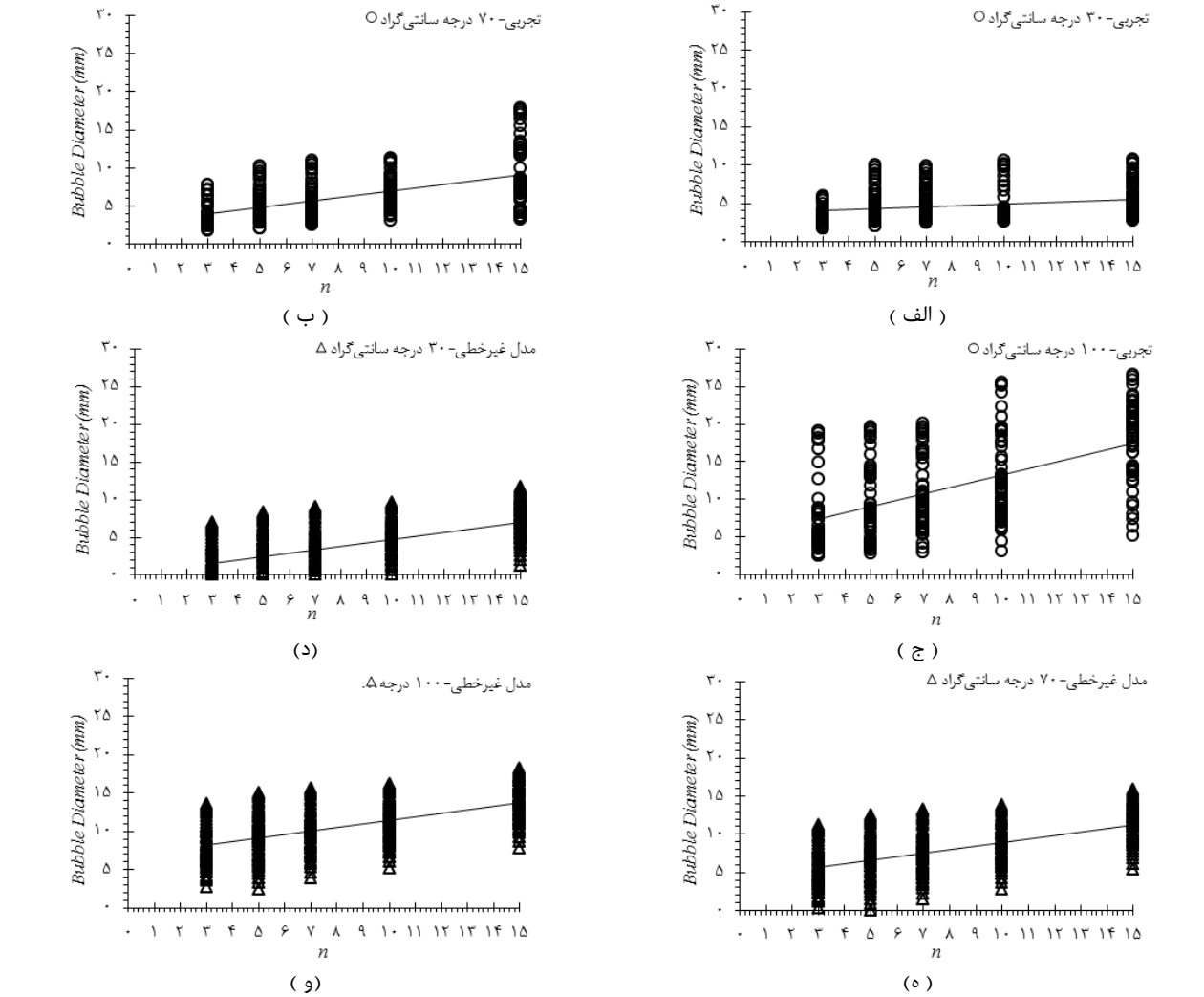
ی) رشد حباب در سیم حلقوی ۱۵ حلقه، شار حرارتی بحرانی ۱۹۴۰ کیلووات بر متر مربع

شکل ۷) قطر حباب و رشد حباب در جوشش استخری آب دیونیزه روی المنت با سیم حلقوی ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ حلقه در دمای آب ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

در بررسی قطر حباب در پژوهش‌های پیشین، تأثیر تغییر فشار کاری نیز مورد توجه بوده‌است [10]. در صورت عدم وجود اطلاعات کافی، سبب بروز خطای بسیاری در نتایج به‌دست آمده برای مقدار قطر حباب خواهد شد که به همین دلیل در این پژوهش از تعداد حلقه، زمان، شار حرارتی، ولتاژ الکتریکی، جریان الکتریکی، مقاومت الکتریکی و دمای سیم، به‌عنوان پارامترهای مؤثر استفاده شده‌است تا بتوان به‌صورت ساده‌تری مقدار قطر حباب را تخمین زد. با توجه به نتایج ملاحظه می‌شود با اعمال شار حرارتی حباب‌ها شکل‌گرفته و ابتدا به صورت افقی در طول حلقه‌ها حرکت می‌کنند، سپس با افزایش شار حرارتی، قطر حباب‌ها بزرگ‌تر شده و با ترکیب شدن با یکدیگر از روی حلقه‌ها جدا می‌شوند و قطر حباب فقط در لحظه جدایش از سطح سیم حلقوی، برای مدت زمان کوتاهی کاهش می‌یابد که دلیل آن کم بودن دمای سیال نسبت به حالت اشباع (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) و انتقال حرارت از بخار به مایع و تغییر فاز از حالت بخار به مایع است[7]. همچنین ملاحظه می‌شود با افزایش شار حرارتی و افزایش دمای سیال، قطر حباب‌ها بیشتر می‌گردد. در مقادیر شار حرارتی بحرانی، با افزایش تعداد حلقه به دلیل عدم انتقال حرارت از سیم به مایع ابتدا المنت‌ها شروع به سرخ شدن نموده و پس از گذشت زمان به درخشندگی کامل رسیده و پس‌ازآن دچار گسیختگی می‌شوند. برای یکپارچه‌سازی نتایج، در جدول ۳، مدل پیشنهادی برای تخمین قطر حباب در جوشش استخری روی سیم با هندسه حلقوی و در شکل ۸ نمودار قطر حباب روی سیم حلقوی ۳، ۵، ۷، ۱۰، و ۱۵ حلقه در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد الف تا ج- تجربی، د تا و- مدل غیرخطی، ز تا ت- مدل خطی، ک- مقایسه نتایج تجربی، مدل غیرخطی و مدل خطی، نشان داده شده‌است.

جدول ۳) مدل پیشنهادی برای تخمین قطر حباب در جوشش استخری روی سیم با هندسه حلقوی

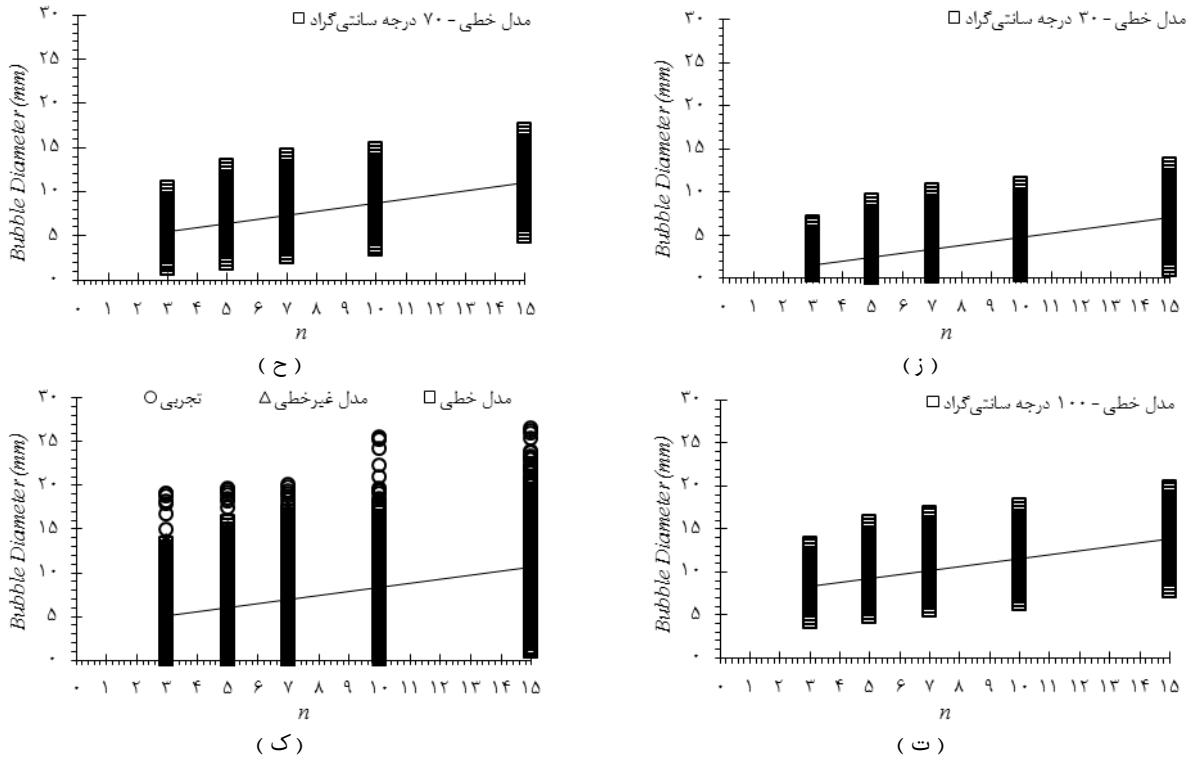
مدل	مدل تابع	رابطه همبستگی	میانگین خطای مطلق
۱	رابطه غیرخطی	$D_B = -21.76 + n^{0.612} + t^{0.471} + q''^{0.336} + V^{-0.840} + I^{-0.579} + R^{3.425} + {T_W}^{0564}$	۰/۰۰۱
۲	رابطه خطی	$D_B = -7.902 - 0.508 \times n + 0.082 \times t + 0.003 \times q'' + 0.337 \times V - 0.23 \times I + 8.606 \times R + 0.097 \times T_W$	۰/۰۰۴



(الف) (ب)

(ج) (د)

(ه) (و)



شکل ۸) نمودار قطر حباب روی سیم حلقوی ۳، ۵، ۷، ۱۰، و ۱۵ حلقه در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد الف تا ج) تجربی، د تا و) مدل غیرخطی، ز تا ت) مدل خطی، ک) مقایسه نتایج تجربی، مدل غیرخطی و مدل خطی

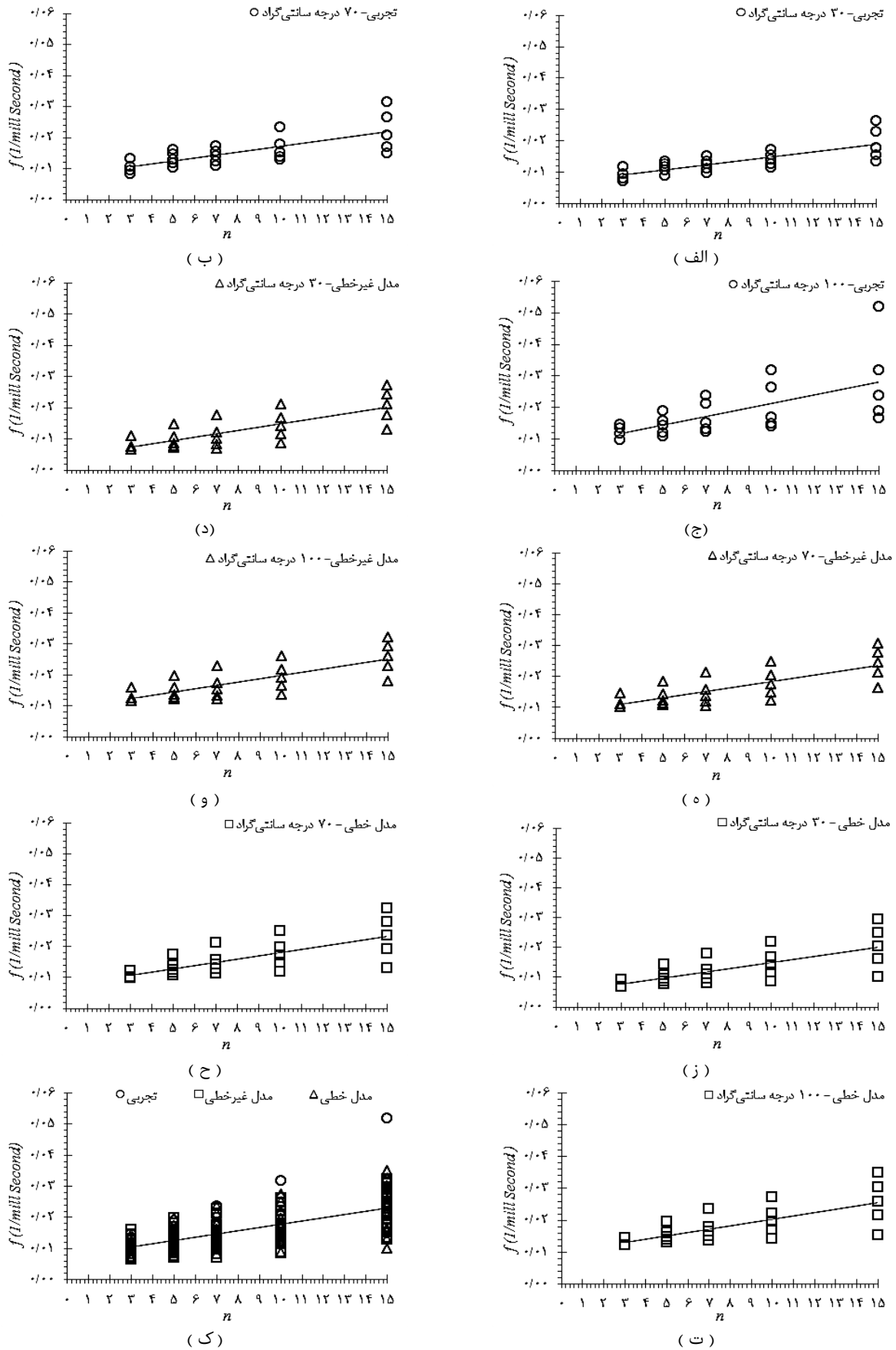
خطای مطلق به‌دست آمده در مدل‌های غیر خطی و خطی به ترتیب ۰/۰۰۱٪ و ۰/۰۰۴٪ می‌باشد و در شرایط مختلف، خطای محاسباتی وجود دارد که نشان‌دهنده عدم وابستگی خطا به شرایطی خاص است و مدل‌های ارائه‌شده را می‌توان برای شرایط مختلف و با خطای قابل‌قبول، مورد استفاده قرار داد.

۴-۵- فرکانس رشد حباب

برای بررسی و ارائه روابط همبستگی فرکانس رشد حباب در آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد روی سیم حلقوی، با اعمال شار حرارتی و افزایش آن، زمان رشد و زمان انتظار استخراج گردید و به کمک تصویربرداری با دوربین پرسرعت در هر میلی‌ثانیه، پردازش و جداسازی تصاویر در هر فریم صورت پذیرفته و زمان جوانه‌زنی اولین حباب تعیین می‌شود. پس از آن با توجه به تصاویر زمان جدایش حباب از سطح سیم و مدت زمان انتظار برای جوانه‌زنی حباب‌های جدید مشخص گردیده و مدت زمان رشد حباب از تفاضل زمان جدایش و زمان جوانه‌زنی و همچنین فرکانس رشد حباب در صفحه گسترده تعیین می‌گردد. در بررسی فرکانس رشد حباب در پژوهش‌های پیشین، تأثیر تغییر فشار کاری نیز مورد توجه بوده‌است [10]. در صورت عدم وجود اطلاعات کافی، سبب بروز خطای بسیاری در نتایج به‌دست آمده برای مقدار فرکانس رشد حباب خواهد شد که به همین دلیل در این پژوهش از تعداد حلقه، شار حرارتی، دمای سیم، ولتاژ الکتریکی، جریان الکتریکی و مقاومت الکتریکی به‌عنوان پارامترهای مؤثر استفاده شده‌است تا بتوان به‌صورت ساده‌تری مقدار شار حرارتی بحرانی را تخمین زد. با توجه به همبستگی پارامترها ملاحظه می‌شود با افزایش شار حرارتی، زمان رشد و زمان انتظار کاهش یافته و فرکانس جدایش حباب افزایش می‌یابد. در شکل ۹ نمودار فرکانس رشد حباب روی سیم حلقوی ۳، ۵، ۷، ۱۰، و ۱۵ حلقه در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد الف تا ج- تجربی، د تا و- مدل غیرخطی، ز تا ت- مدل خطی، ک- مقایسه نتایج تجربی، مدل غیرخطی و مدل خطی و همچنین برای یکپارچه‌سازی نتایج، در جدول ٤، مدل پیشنهادی برای تخمین فرکانس رشد حباب در جوشش استخری روی سیم با هندسه حلقوی نشان داده شده‌است. .

جدول ۴) مدل پیشنهادی برای تخمین فرکانس رشد حباب در جوشش استخری روی سیم با هندسه حلقوی

مدل	مدل تابع	رابطه همبستگی	میانگین خطای مطلق
۱	رابطه غیرخطی	$f = -4.983 + n^{-15.815} + q''^{0.003} + T_W{}^{0.004} + V^{-0.107} + I^{0.072} + R^{0.098}$	۰/۰۰۰۱
۲	رابطه خطی	$f = 0.007 - 8.48 \times 10^{-4} \times n + 4.23 \times 10^{-6} \times q'' + 7.76 \times 10^{-5} \times T_W + 0.0015 \times V - 9.995 \times 10^{-4} \times I + 0.004 \times R$	۰



شکل ۹) نمودار فرکانس رشد حباب روی سیم حلقوی ۳، ۵، ۷، ۱۰، و ۱۵ حلقه در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد الف تا ج) تجربی، د تا و) مدل غیرخطی، ز تا ت) مدل خطی، ک) مقایسه نتایج تجربی، مدل غیرخطی و مدل خطی

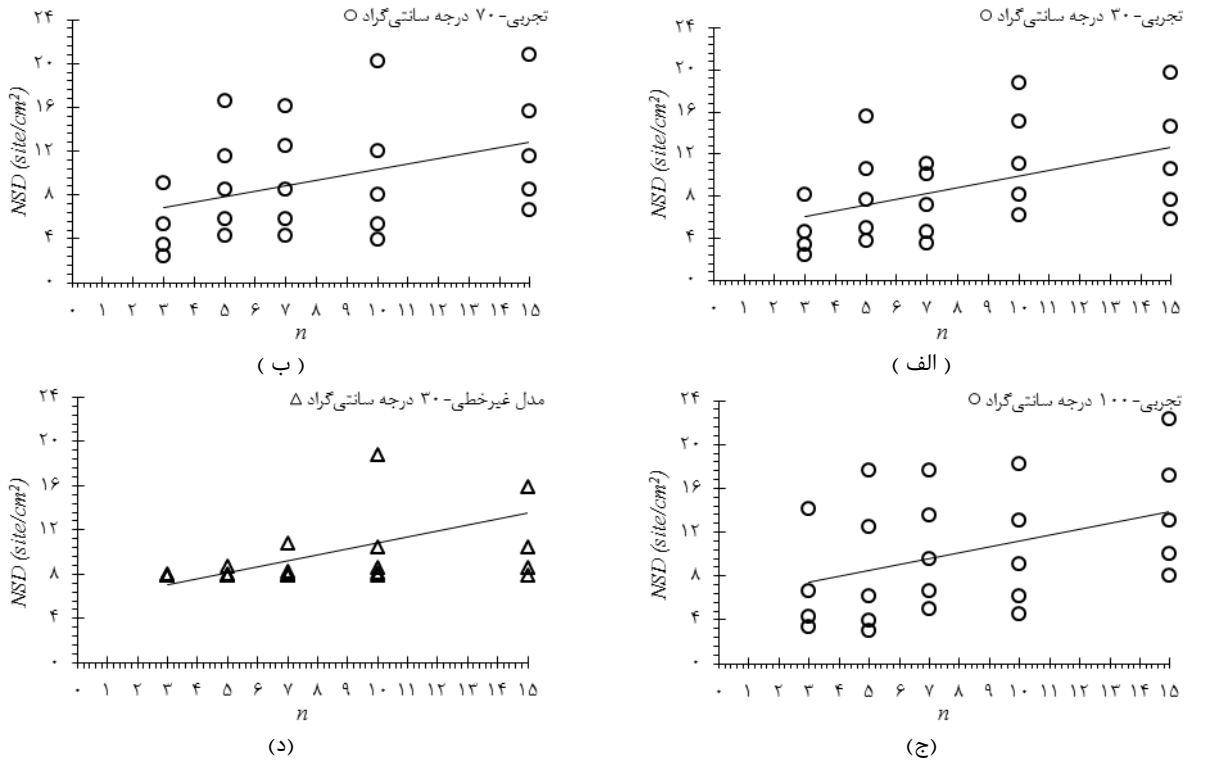
خطای مطلق به‌دست آمده در مدل‌های غیر خطی و خطی به ترتیب ۰/۰۰۰۱٪ و ۰٪ می‌باشد و در شرایط مختلف، خطای محاسباتی وجود دارد که نشان‌دهنده عدم وابستگی خطا به شرایطی خاص است و مدل‌های ارائه‌شده را می‌توان برای شرایط مختلف و با خطای قابل‌قبول، مورد استفاده قرار داد. ماکزیمم فرکانس رشد حباب مربوط به سیم حلقوی ۱۵ حلقه در سیال ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۰.۰۵۱۸ حباب بر میلی‌ثانیه می‌باشد، ماکزیمم زمان رشد و ماکزیمم زمان انتظار حباب مربوط به سیم حلقوی با ۳ حلقه در سیال ۳۰ درجه سانتی‌گراد و به ترتیب ۶۳ و ۸۳ میلی‌ثانیه است.

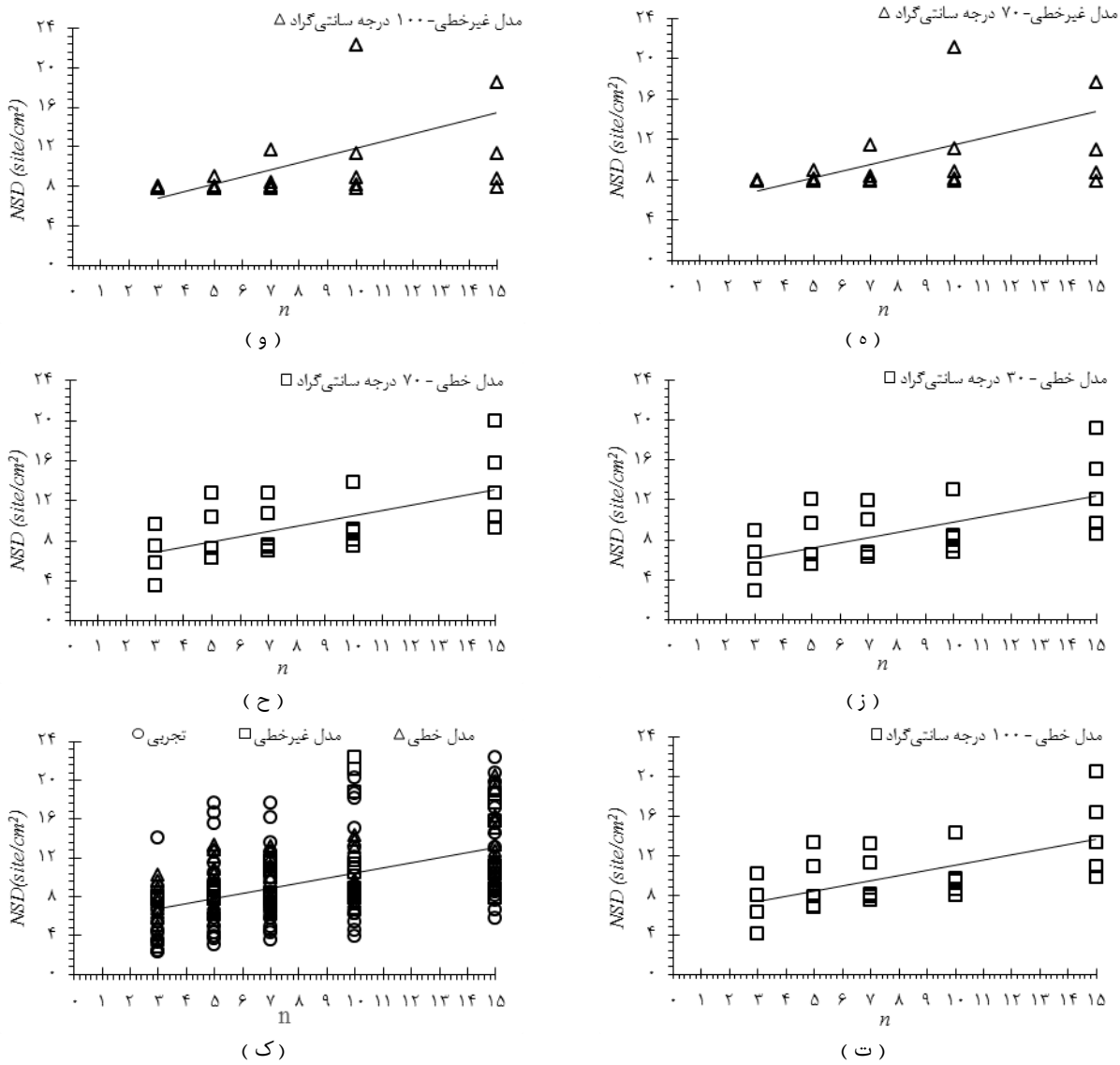
۴-۶- چگالی نقاط مولد حباب

برای بررسی و ارائه روابط همبستگی چگالی نقاط مولد آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد روی سیم حلقوی، با اعمال شار حرارتی و افزایش آن، نتایج استخراج گردید و به کمک تصویربرداری با دوربین پرسرعت در هر میلی‌ثانیه، پردازش و جداسازی تصاویر در هر فریم صورت پذیرفته و تعداد حباب در هر فریم استخراج می‌گردد که با استفاده از تقسیم تعداد کل حباب در هر میلی‌ثانیه به مساحت کل المنت، نتایج در صفحه گسترده تعیین می‌شود. در بررسی چگالی نقاط مولد حباب در پژوهش‌های پیشین، تأثیر شکل سطوح نیز مورد توجه بوده‌است [22]. در صورت عدم وجود اطلاعات کافی، سبب بروز خطای بسیاری در نتایج به‌دست آمده برای مقدار چگالی نقاط مولد حباب خواهد شد که به همین دلیل در این پژوهش از تعداد حلقه، شار حرارتی، دمای سیم، مقاومت الکتریکی، ولتاژ الکتریکی، جریان الکتریکی به‌عنوان پارامترهای مؤثر استفاده شده‌است تا بتوان به‌صورت ساده‌تری مقدار چگالی نقاط مولد حباب را تخمین زد. با توجه به نتایج، ملاحظه می‌شود با افزایش شار حرارتی، چگالی نقاط مولد حباب افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش تعداد حلقه، چگالی نقاط مولد حباب زیاد می‌شود. برای یکپارچه‌سازی نتایج، در جدول ۵، مدل پیشنهادی برای تخمین چگالی نقاط مولد حباب در جوشش استخری روی سیم با هندسه حلقوی و در شکل ۱۰ نمودار چگالی نقاط مولد حباب روی سیم حلقوی ۳، ۵، ۷، ۱۰، و ۱۵ حلقه در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد الف تا ج- تجربی، د تا و- مدل غیرخطی، ز تا ت- مدل خطی، ک- مقایسه نتایج تجربی، مدل غیرخطی و مدل خطی، نشان داده شده‌است. .

جدول ۵) مدل پیشنهادی برای تخمین چگالی نقاط مولد حباب در جوشش استخری روی سیم با هندسه حلقوی

مدل	مدل تابع	رابطه همبستگی	میانگین خطای مطلق
۱	رابطه غیرخطی	$NSD = 7.82 + n^{1.61} \times q''^{-15.28} \times T_W{}^{0.24} \times R^{-129.84} \times V^{129.84} \times I^{-93.59}$	-۰/۷
۲	رابطه خطی	$NSD = 19.45 - 2.93 \times n + 0.02 \times q'' + 0.02 \times T_W$ $+1.59 \times V - 2.93 \times I + 27.96 \times R$	۰/۰۲





شکل ۱۰) نمودار چگالی نقاط مولد حباب روی سیم حلقوی ۳، ۵، ۷، ۱۰، و ۱۵ حلقه در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد الف تا ج) تجربی، د تا و) مدل غیرخطی، ز تا ت) مدل خطی، ک) مقایسه نتایج تجربی، مدل غیرخطی و مدل خطی

خطای مطلق به‌دست آمده در مدل‌های غیر خطی و خطی به ترتیب ۰/۷-% و ۰/۰۲٪ می‌باشد و در شرایط مختلف، خطای محاسباتی وجود دارد که نشان‌دهنده عدم وابستگی خطا به شرایطی خاص است و مدل‌های ارائه‌شده را می‌توان برای شرایط مختلف و با خطای قابل‌قبول، مورد استفاده قرار داد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش هدف از مطالعه، بررسی فرآیند جوشش استخری روی سیم با هندسه حلقوی بود که با توجه به آزمایش‌ها، مشاهدات، محاسبات و تحلیل‌های صورت پذیرفته می‌توان نتیجه گرفت در فرآیند جوشش در تعداد حلقه ثابت، بین شار حرارتی و اختلاف دما رابطه مستقیم وجود دارد. در شار حرارتی بحرانی با افزایش دمای سیال، تعداد حباب‌های تشکیل شده روی سیم حلقوی افزایش یافته و با ترکیب حباب‌ها، حباب‌های بزرگ‌تری بوجود آمده و در ابتدای سرخ شدگی سیم حلقوی، شار حرارتی بحرانی رخ‌داده و در شار حرارتی بحرانی کمتری شروع به سرخ شدن نموده و پس از گذشت زمان کوتاهی گسیخته شود. جهت ارائه وضعیت سیم حلقوی پس از شار حرارتی بحرانی، تصاویر در ۱۱۰٪ از زمان لازم برای شارحرارتی بحرانی نیز ارائه‌شده‌است همچنین علاوه بر افزایش دمای سیال، با افزایش تعداد حلقه نیز شار حرارتی بحرانی، کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که کندانسور به صورت مستقیم با سیال در تماس نمی‌باشد و فقط جهت چگالش بخار آب در حین آزمایش بوده تا آزمایش تحت تأثیر تغییر حجم قرار نگیرد و تلفات حرارت ناشی از کندانسور با توجه به زمان‌های بسیار کم (میلی ثانیه) ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی است. بر اساس مدل توابع در پیش‌بینی مقادیر شار حرارتی بحرانی، مؤثرترین پارامتر، جریان الکتریکی اعمال‌شده می‌باشد. ضریب انتقال حرارت جابجایی در شار

حرارتی تا کمتر از شار حرارتی بحرانی در سیال با دمای ۳۰ به ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و ثابت بودن سطح سیم حلقوی در تعداد حلقه ثابت، افزایش می‌یابد. در شار حرارتی بحرانی در آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و ثابت بودن سطح سیم حلقوی در تعداد حلقه ثابت، ضریب انتقال حرارت جابجایی کاهش می‌یابد. همچنین در شار حرارتی بحرانی با افزایش تعداد حلقه در دمای ثابت سیال، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. به طور کلی با افزایش ۵ برابری تعداد حلقه در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در مقادیر شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت ۲/۵ برابر افزایش پیدا می‌کند. قطر حباب فقط در لحظه جدایش از سطح سیم حلقوی، برای مدت زمان کوتاهی به دلیل کم بودن دمای سیال نسبت به حالت اشباع (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) و انتقال حرارت از بخار به مایع و تغییر فاز از حالت بخار به مایع کاهش یافته و با افزایش شار حرارتی، قطر حباب‌ها بزرگ‌تر شده و با ترکیب با یکدیگر از روی حلقه‌ها جدا می‌شود. بر اساس مدل توابع در پیش‌بینی مقادیر قطر حباب، مؤثرترین پارامتر، تعداد حلقه می‌باشد. با افزایش شار حرارتی، زمان رشد و زمان انتظار کاهش یافته و فرکانس رشد و جدایش حباب افزایش می‌یابد. ماکزیمم فرکانس رشد حباب مربوط به سیم حلقوی ۱۵ حلقه در سیال ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۰.۰۵۱۸ حباب بر میلی‌ثانیه می‌باشد، ماکزیمم زمان رشد و ماکزیمم زمان انتظار حباب مربوط به سیم حلقوی با ۳ حلقه در سیال ۳۰ درجه سانتی‌گراد و به ترتیب ۶۳ و ۸۳ میلی‌ثانیه است. بر اساس مدل توابع در پیش‌بینی مقادیر فرکانس رشد حباب، مؤثرترین پارامتر، مقاومت الکتریکی سیم‌حلقوی می‌باشد. با افزایش شار حرارتی، چگالی نقاط مولد حباب افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد حلقه، چگالی نقاط مولد حباب زیاد می‌شود. بر اساس مدل توابع در پیش‌بینی مقادیر چگالی نقاط مولد حباب، مؤثرترین پارامتر، جریان الکتریکی اعمالی به سیم‌حلقوی می‌باشد. با توجه به خطای مطلق به‌دست آمده در مدل‌های غیر خطی و خطی و عدم وابستگی خطا، مدل‌های ارائه‌شده را می‌توان برای شرایط مختلف و با خطای قابل‌قبول، مورد استفاده قرار داد.

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

تعارض منافع: این مقاله از رساله آقای محمدعلی محمدی، دانشجوی کاندیدا دکتری مکانیک تبدیل انرژی دانشگاه هرمزگان، با عنوان "بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای ترمودینامیکی بر رشد و جدایش حباب‌ها در جوشش استخری روی سیم‌های حلقوی و شبکه سیمی" مستخرج شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

منابع مالی: هزینه‌های این پژوهش توسط نویسندگان تأمین شده است

فهرست علائم

I	جریان الکتریکی (A)
q"	شار حرارتی (kw/m^2)
N	تعداد حباب
V	ولتاژ الکتریکی (v)
T_w	دمای آب (°C)
R	مقاومت الکتریکی (Ω)
CHF	شار حرارتی بحرانی (kw/m^2)
T_{Sat}	دمای آب اشباع (°C)
ΔT	اختلاف دما (°C)
NSD	چگالی نقاط مولد حباب ($Sites/cm^2$)
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($w/m^2.k$)
t_G	زمان رشد حباب (millisecond)
t_w	زمان انتظار حباب (millisecond)
n	تعداد حلقه‌ی سیم حلقوی
f	فرکانس رشد حباب ($millisecond^{-1}$)
A	مساحت سطح جانبی سیم حلقوی (m^2)
t	زمان (millisecond)

زیرنویس‌ها

K-type	ترموکوپل‌های با دقت تقریبی ۰/۱ درجه سانتی‌گراد
Excel	نرم‌افزار صفحه گسترده
Auto Cad	نرم‌افزار اتوکد
Clemex Vision	نرم‌افزار آنالیز تصاویر
SPSS	نرم افزار آماری

منابع

1- Safari H, Moghaddasi H, Hosseinalipour M. Improving the pool boiling process using the effect of porous surfaces. Scientific Journal of Mechanical Engineering. 2019 May;28(124):69-11, (In Persian).

2- Liang G, Mudawar I. Review of pool boiling enhancement by surface modification. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019 January; 128: 892–42.

3- Dadhich M, Prajapati O. A brief review on factors affecting flow and pool boiling. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019 September; 112: 607–19.

4- Li W, Dai R, Zeng M, Wang Q. Review of two types of surface modification on pool boiling enhancement: Passive and active. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020 Setember; 130: 1-39.

5- Kim J, Girard A, Jun S, Lee J, You S. Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer of water on hydrophobic surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018 March; 118: 802-10.

6- LiangG, Mudawar I. Pool boiling critical heat flux (CHF) – Part 1: Review of mechanisms, models, and

correlations. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018 February; 117: 1352–16.
7- Kouloulias K, Sergis A, Hardalupas Y, Barrett T. Visualisation of subcooled pool boiling in nanofluids. Fusion Engineering and Design Part A. 2019 September; 146: 153–4.
8- Kong G, Mirsandi H, Buist K, Peters E, Baltussen M, Kuipers H. Thermal interactions between nucleation sites and the solid wall during pool boiling of a pure fluid: A review. Experiments in Fluids. 2019 July; 60: 130-5.
9- Marie A, Cioulachtjian S, Lips S, Sartre V. Thermal interactions between nucleation sites and the solid wall during pool boiling of a pure fluid: A review. International Journal of Thermal Sciences. 2020 April; 174: 107388.
10- Colgan N, Bottini J, Ooi Z, Brooks C. Experimental study of wall nucleation characteristics in flow boiling under subatmospheric pressures in a vertical square channel. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019 May; 134: 58-11.
11- Zhang L, Gong S, Lu Z, Cheng P, Wang E. A unified relationship between bubble departure frequency and diameter during saturated nucleate pool boiling. International Journal of Heat and Mass Transfer Part A. 2021 February; 165: 1-5.
12- Pastuszko R, Kaniowski R, Wójcik T. Comparison of pool boiling performance for plain micro-fins and micro-fins with a porous layer. Applied Thermal Engineering. 2020 February; 166: 9-12.
13- Wang K, Gong H, Wang L, Erkan N, Okamoto K. Effects of a porous honeycomb structure on critical heat flux in downward-facing saturated pool boiling. Applied Thermal Engineering. 2020 April; 170: 115036.
14- Ayoobi A, Faghih Khorasani A, Tavakoli M, Salimpour M. Experimental study of the time period of continued heating rate on the pool boiling characteristics of saturated water. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019 March; 137: 318-9, (In Persian).
15- Hu Y, Wang H, Song M, Huang J. Marangoni effect on microbubbles emission boiling generation during pool boiling of self-rewetting fluid. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019 May; 134: 10–7.
16- Kangude P, Bhatt D, Srivastava A. Experiments on the effects of nanoparticles on subcooled nucleate pool boiling. Physics of Fluids. 2018 May; 30; 1.5027295.
17- Gerardi C, Buongiorno J, Hu L, McKrell T. Measurement of nucleation site density, bubble departure diameter and frequency in pool boiling of water using high-speed infrared and optical cameras. ECI International conference on boiling heat transfer. 2009 May; 40: 1-8.
18- Paz C, Conde M, Porteiro J, Concheiro M. Effect of heating surface morphology on active site density in subcooled flow nucleated boiling. Experimental Thermal and Fluid Science. 2017 April; 82: 147–13.
19- Kim J, Girard A, Jun S, Lee J, You S. Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer of water on hydrophobic surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018 March; 118: 802–10.
20- Kim J, Jun S, Lee J, Godinez J, You S. Effect of Surface Roughness on Pool Boiling Heat Transfer of Water on a Superhydrophilic Aluminum Surface. Journal of Heat Transfer. 2017 Oct; 139: 1-9.
21- Zou L., Jones B. Heating surface material's effect on subcooled flow boiling heat transfer of R134a. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013 March; 58: 168-7.
22- Jaikumar A, Kandlikar S. Enhanced pool boiling heat transfer mechanisms for selectively sintered open microchannels. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015 September; 88: 652–10.