

مطالعه آزمایشگاهی رشد و جدایش حباب در جوشش استخری شبکه سیمی و ارائه روابط تجربی

در پژوهش حاضر با طراحی و ساخت مجموعه آزمایشگاهی و رویکرد ارائه روابط تجربی، فرآیند جوشش استخری روی شبکه سیمی 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 شبکه سیمی در آب دیونیزه با دمای مختلف صورت پذیرفته است. بر اساس نتایج، با افزایش ابعاد مش شبکه سیمی و دمای سیال، شارحرارتی بحرانی کاهش می یابد. در شرایط شبکه سیمی با ابعاد مش ثابت، سیال با دمای ثابت و اعمال شارحرارتی کمتر از شارحرارتی بحرانی، دمای سیم افزایش می یابد اما در شرایط افزایش ابعاد مش شبکه سیمی، سیال با دمای ثابت و اعمال شارحرارتی بحرانی، دمای سیم کاهش می یابد. در شرایط شبکه سیمی با ابعاد مش ثابت، با افزایش دمای سیال در شار حرارتی ثابت و کمتر از شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت ثابت می باشد اما با افزایش شار حرارتی تا کمتر از شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت افزایشی بوده و در شار حرارتی بحرانی، کاهش می یابد. با افزایش ۴ برابری ابعاد مش در سیال ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد در شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت ۷٪ کاهش می یابد. ماکزیمم فرکانس رشد حباب مربوط به شبکه سیمی ۵٪ میلی متر در سیال ۱۰۰ درجه سانتی گراد با میزان ۰/۰۷۶۳ حباب بر میلی ثانیه است.

محمدعلی محمدی^۱

کاندیدا دکتری

سعید نیازی^۲

استادیار

یونس بخشان^۳

استاد

جمشید خورشیدی^۴

دانشیار

واژه‌های راهنما: حباب، رشد، جدایش، شبکه سیمی، جوشش استخری

۱- مقدمه

انتقال حرارت جوشش یکی از کارآمدترین پدیده‌های انتقال است که قادر به انتقال جرم و حرارت با سرعت بالا می‌باشد. پدیده جوشش ترکیبی از تغییر فاز مایع به بخار، انتقال حرارت هدایتی، جابجایی و همچنین

^۱ کاندیدا دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران mohammadi_66@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران s.niazihormozgan.ac.ir

^۳ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران bakhshan@hormozgan.ac.ir

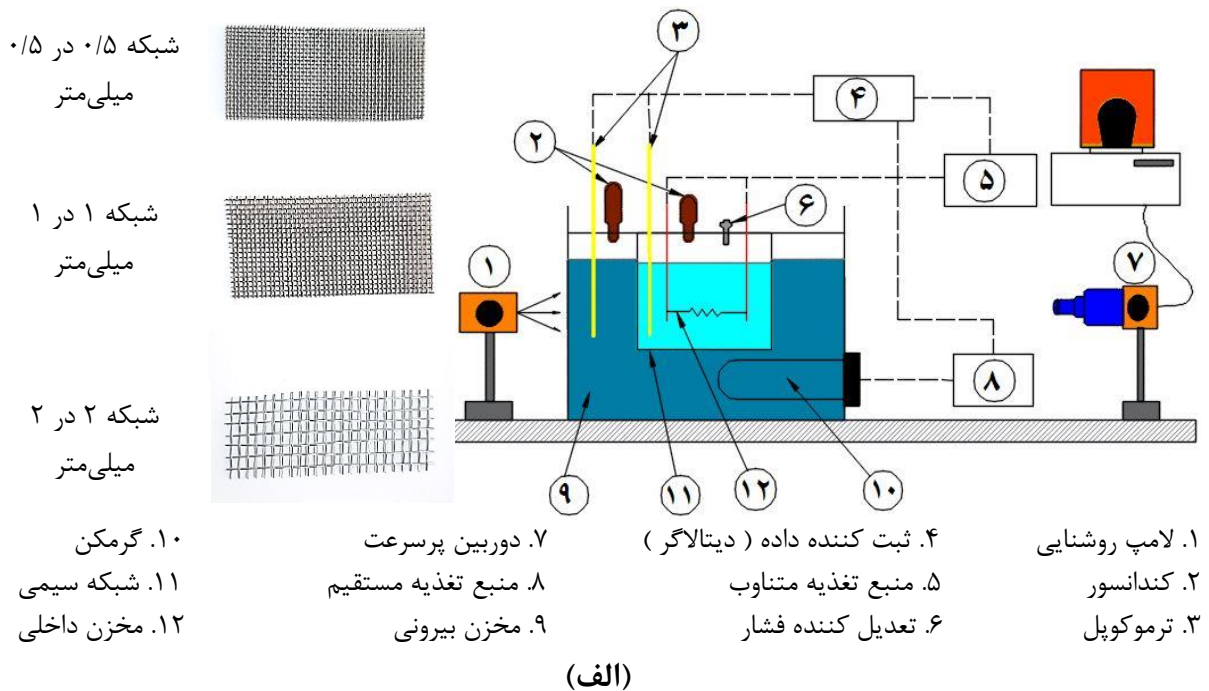
^۴ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران khoshidi@hormozgan.ac.ir

انتقال جرم می‌باشد. کاربردهای انتقال حرارت جوشش در زندگی روزمره متنوع بوده، از خانگی گرفته (مانند سیستم‌های تهویه مطبوع) تا فناوری‌های فضایی و کاربردهای صنعتی (مدیریت حرارتی در وسایل با شار حرارتی بالا مانند چیپ‌های خنک‌کننده الکتریکی، لیزرها، لوله‌های حرارتی، سیستم‌های ذخیره انرژی، تولید توان الکتریکی، استخراج نفت و گاز از طریق حفاری‌های عمیق، سرمایه‌های راکتورهای هسته‌ای و غیره) که این پدیده نقش مؤثری را ایفا می‌کند [۱]. 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 به منظور اصلاح سطح گرمایش برای بهبود انتقال حرارت انجام داده‌اند [۲]. لیانگ و همکارانش نحوه قرارگیری حباب‌ها بر روی سطح داغ تحت زوایای مختلف نسبت به راستای افق را بررسی نمودند [۳]. کولولیس و همکارانش به بررسی چشمی نتایج به‌دست‌آمده توسط جوشش بر روی سطح سیم داغ بسنده کردند [۴]. کونگ و همکاران نحوه حرکت و تغییر شکل حباب از لحظه جدایش از سطح صاف تا رسیدن به شکل پایدار را بررسی کردند [۵]. 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 [۶]. نان ژانگ و همکاران به بررسی رابطه فرکانس خروج و قطر حباب در جوشش استخری با توجه به اثرات زیرلایه در جوشش استخری پرداختند [۷]. پاستوسکو و همکاران از یک ساختار سطح فین دار به منظور افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی استفاده کردند [۸]. وانگ و همکاران اشاره کردند که ساختار لانه زنبوری باعث افزایش دو برابری شار حرارتی بحرانی نسبت به سطح ساده می‌شود [۹]. ژانگ و همکاران نیز به تحقیق برای بهبود منحنی جوشش روی ساختار شبکه‌ای با دیواره‌های بسیار نازک لیزری از فولاد زنگ نزن پرداختند [۱۰]. ژونگ و همکاران اثر استفاده از یک سطح فین دار نسبت به سطح صاف برای سیال آب را بررسی کردند [۱۱]. گودا و همکاران به بررسی یک بلوک فین‌دار و میکرو کانال با سطح مقطع یکنواخت مسی پرداختند [۱۲]. لوکوا و همکاران به بررسی رفتار حباب در هنگام جدایش از سطح پرداختند [۱۳]. دادجو و همکارانش به بررسی تأثیر زاویه سطح داغ بر جوشش سیال بر روی یک سطح مسی پرداختند [۱۴]. 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 [۱۵، ۱۶]. 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 [۱۷].

در پژوهش حاضر از دوربین پرسرعت ۹۶۰ تصویر در ثانیه استفاده شده‌است. در پژوهش‌های پیشین تنها بررسی یک یا چند پارامتر کلی در جوشش صورت پذیرفته، اما در پژوهش پیش‌رو جهت ارائه نتایج جامع‌تر، با طراحی و ساخت مجموعه آزمایشگاهی به مطالعه فرآیند جوشش استخری روی شبکه سیمی، 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 شبکه سیمی در آب دیونیزه با دمای مختلف و رویکرد ارائه روابط تجربی پرداخته شده‌است.

۲- روش آزمایش

در این پژوهش شبکه سیمی تحت آزمایش درون سیال با حجم ۵ لیتر غوطه‌ور شده و دمای سیال به کمک المنت حرارتی ۱۵۰۰ وات، در دمای موردنظر و یا دمای اشباع تنظیم شده‌است. برای این که حجم سیال در فرآیند آزمایش تغییر ننماید از درپوش استفاده‌شده تا ذرات بخار حاصل از جوشش، توسط کندانسورهای قرارگرفته روی آن، چگالیده شده و دوباره به مخزن برگردد. با توجه به این که 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. از یک مبدل فشار معادل فشار اتمسفر برای ثابت بودن فشار حین آزمایش، استفاده شده‌است. برای ذخیره مقادیر دماهای اندازه‌گیری‌شده در هریک از مراحل آزمایش از دیتالاگر ۸ کاناله استفاده گردیده است. برای ثابت نگه‌داشتن سیال در دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد از المنت حرارتی و رله استفاده شده‌است. حداکثر تفرانس تغییر دما ± 1 درجه سانتی‌گراد خواهد بود. برای دستیابی به نتایج جامع‌تر و بررسی شرایط سیال با دمای کمتر از دمای اشباع (مادون سرد)، آزمایش در دماهای ۳۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد نیز انجام شده‌است. در فرآیند آزمایش از منبع تغذیه آزمایشگاهی ۴۸۰۰۰ وات، مولتی‌مترهای با دقت بالا، ترموکوپل‌های نوع کا^۱ با دقت تقریبی ۰/۱ درجه سانتی‌گراد برای اندازه‌گیری دمای سیال، دوربین پرسرعت برای بررسی تصویری حباب‌ها و زمان و قطر جدایش استفاده شده‌است. همچنین شبکه سیمی با طول و عرض ثابت ۲۰ میلی‌متر در ۱۰ میلی‌متر و به ترتیب با ابعاد مش شبکه ۰/۵ در ۰/۵، ۱ در ۱ و ۲ در ۲ میلی‌متر، قطر مفتول ۰/۲ میلی‌متر از جنس فولاد زنگ نزن با گرید ۴۴۶ استفاده گردیده‌است.



¹K-Type Thermocouple



(ب)

شکل ۱- (الف) شبکه سیمی و شماتیک مورد استفاده (ب) سیستم آزمایش

۳- معادلات حاکم

مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر جوشش، شار حرارتی اعمال شده است که در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$q'' = \frac{q}{A} = \frac{V \times I}{A} \quad (1)$$

مقاومت الکتریکی شبکه سیمی از معادله (۲) پیروی می‌کند.

$$R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

ضریب انتقال حرارت به کمک رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$h = \frac{q}{T_w - T_{sat}} = \frac{V \times I}{T_w - T_{sat}} \quad (3)$$

از پارامترهای اساسی در دینامیک حباب، فرکانس تشکیل حباب می‌باشد. فرکانس تشکیل حباب‌ها وابسته به مدت زمان لازم برای ایجاد یک حباب جدید و مدت زمان لازم برای رشد و جدایش آن بوده که مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۱۷].

$$f = \frac{1}{t_G - t_w} \quad (4)$$

چگالی نقاط مولد حباب از نسبت تعداد کل حباب در هر میلی‌ثانیه به مساحت کل المنت مطابق رابطه (۵) به دست می‌آید [۱۷، ۱۸].

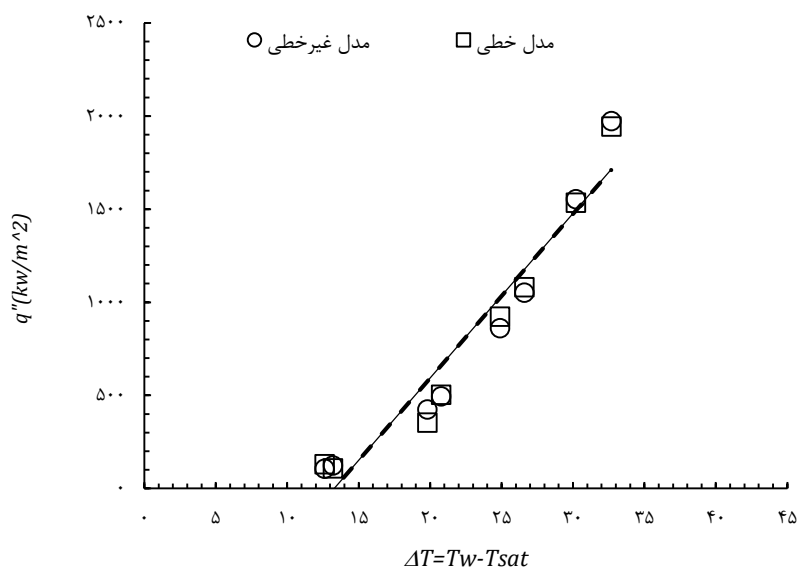
$$NSD = \frac{N}{A} \quad (5)$$

در تصویربرداری از رشد حباب و قطر حباب، از دوربین پرسرعت ۹۶۰ تصویر در هر ثانیه استفاده شده است و تحلیل و بررسی و جمع‌آوری اطلاعات، به کمک نرم‌افزارهای صفحه گسترده، اتوکد، آنالیز تصاویر-کلمکس، نرم افزار آماری-اس پی اس اس و مینی تب، صورت پذیرفته است.

۴- نتایج و تحلیل آن‌ها

جدول ۱- مدل پیشنهادی برای تخمین شار حرارتی در جوشش استخری روی سیم صاف و شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵ میلی‌متر در سیال با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد

مدل	مدل تابع	رابطه همبستگی	میانگین خطای مطلق
۱	رابطه غیرخطی	$q'' = 1.08 + ((V^{0.07}) \times (W^{0.76}) \times (L^{-0.84}) \times (\Delta T^{0.52}) \times (h^{0.06}))$	۰/۲۶
۲	رابطه خطی	$q'' = 911.59 + 2202.52 \times V + 10.04 \times W - 416.14 \times L - 215.03 \times \Delta T - 764.12 \times h$	۱/۲۲



نمودار ۱- مدل خطی و غیرخطی شار حرارتی سیم صاف و شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵ میلی‌متر در سیال با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد

- 1 Excel
- 2 Auto Cad
- 3 Clemex Vision
- 4 SPSS
- 5 Minitab

برای حصول اطمینان از صحت عملکرد دستگاه‌ها و تجهیزات آزمایش، بررسی جوشش استخری با اعمال شار حرارتی، روی یک سیم صاف و شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵ در ۰/۵ میلی‌متر در آب دیونیزه با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد صورت پذیرفت و مشاهده گردید رابطه مستقیم بین شار حرارتی و اختلاف دما برقرار است. در جدول (۱)، مدل پیشنهادی برای تخمین شار حرارتی و در نمودار (۱) مدل خطی و غیرخطی شار حرارتی سیم صاف و شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵ میلی‌متر در سیال با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده‌است.

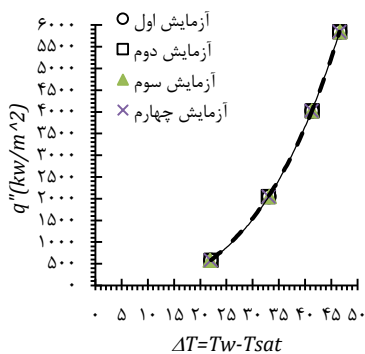
۴-۱- آزمایش تکرارپذیری

برای حصول 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.

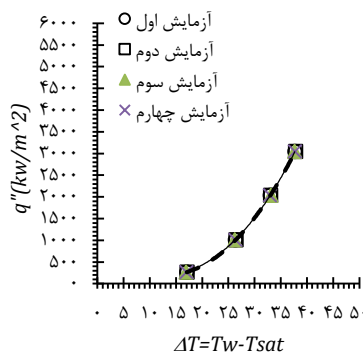
در نمودار (۲) تغییرات شار حرارتی و اختلاف دمای سیال و حالت اشباع در شبکه سیمی با ابعاد مش الف- ۰/۵ در ۰/۵ میلی‌متر، ب- ۱ در ۱ میلی‌متر، ج- ۲ در ۲ میلی‌متر و آب دیونیزه با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد با چهار مرحله تکرار نشان داده شده‌است.

۴-۲- شار حرارتی بحرانی

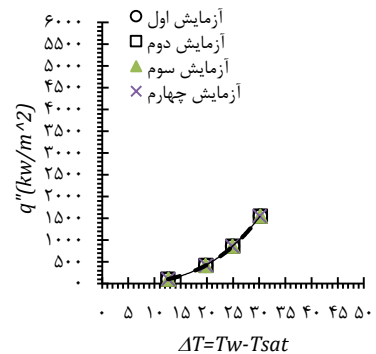
برای ارائه روابط همبستگی شار حرارتی بحرانی از نتایج آزمایش نحوه جوشش استخری آب دیونیزه روی شبکه سیمی استفاده شده‌است. ابتدا آزمایش برای شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵ میلی‌متر با اعمال شار حرارتی و افزایش آن در آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در ادامه آزمایش برای شبکه سیمی با ابعاد مش ۱ و ۲ میلی‌متر تکرار گردید که در جدول (۲)، نتایج شار حرارتی بحرانی هریک از برای شبکه‌های سیمی و در نمودار (۳) تغییرات شار حرارتی و اختلاف دمای سیال و حالت اشباع در شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر و آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده‌است.



(ج)



(ب)

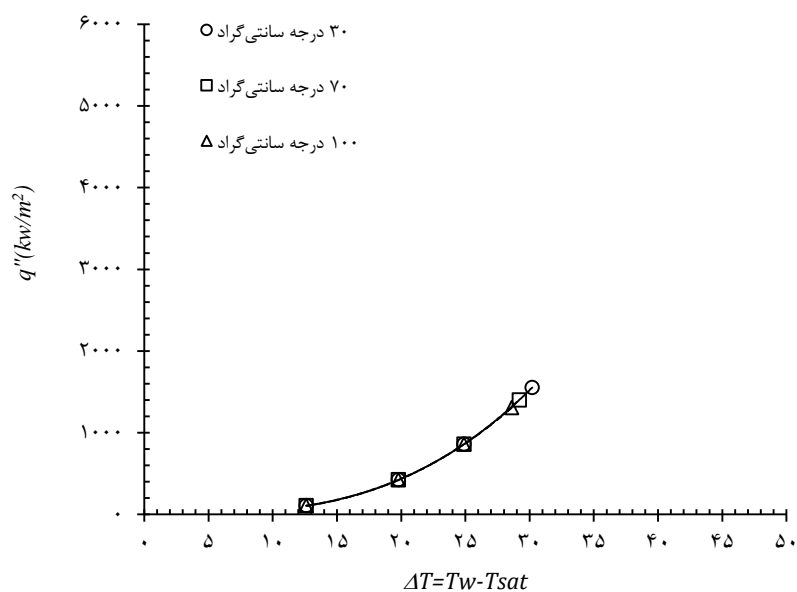


(الف)

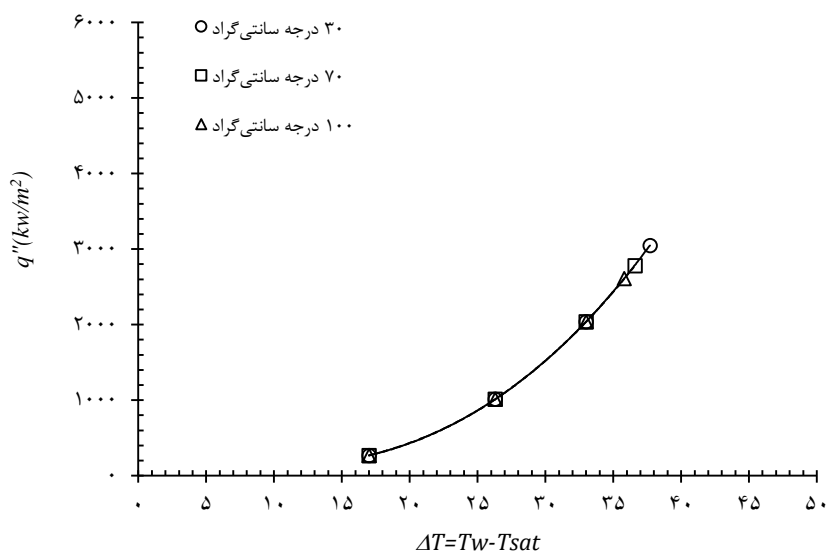
نمودار ۲- تغییرات شار حرارتی و اختلاف دمای سیال و حالت اشباع در شبکه سیمی با ابعاد مش (الف) ۰/۵ در ۰/۵ میلی‌متر، (ب) ۱ در ۱ میلی‌متر، (ج) ۲ در ۲ میلی‌متر و آب دیونیزه با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد با چهار مرحله تکرار

جدول ۲- شار حرارتی بحرانی شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر و آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

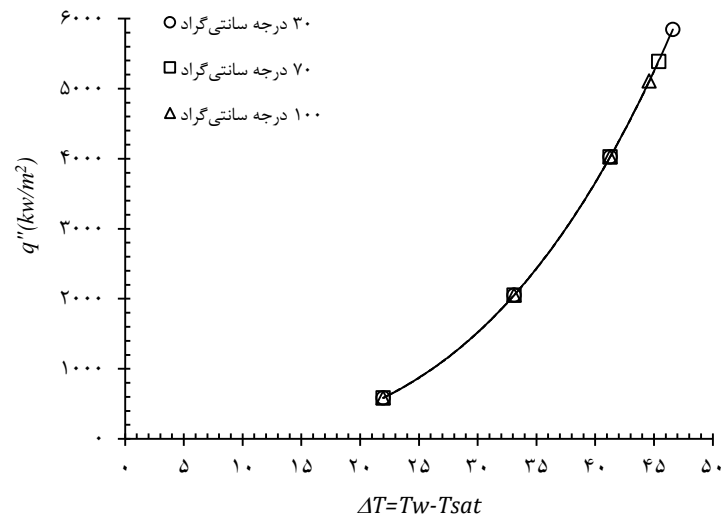
شار حرارتی بحرانی (کیلووات بر مترمربع)			ابعاد شبکه (میلی‌متر)
دمای سیال ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد	دمای سیال ۷۰ درجه سانتی‌گراد	دمای سیال ۳۰ درجه سانتی‌گراد	
۱۳۰۵	۱۴۰۲	۱۵۳۳	۰/۵
۲۶۱۱	۲۷۸۲	۳۰۴۸	۱
۵۱۰۷	۵۳۸۹	۵۸۴۷	۲



(الف) شبکه ۰/۵ میلی‌متر - سیال ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد



(ب) شبکه ۱ میلی‌متر - سیال ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد



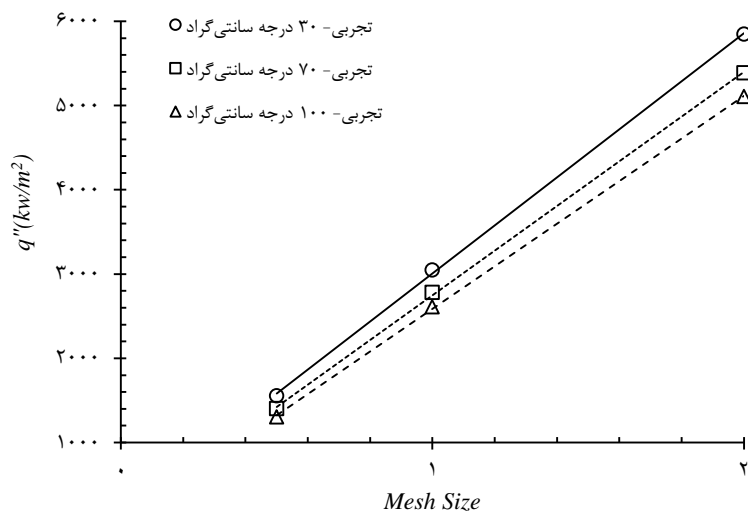
(ج) شبکه ۲ میلی‌متر- سیال ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

نمودار ۳- تغییرات شار حرارتی و اختلاف دمای سیال و حالت اشباع در شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر و آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

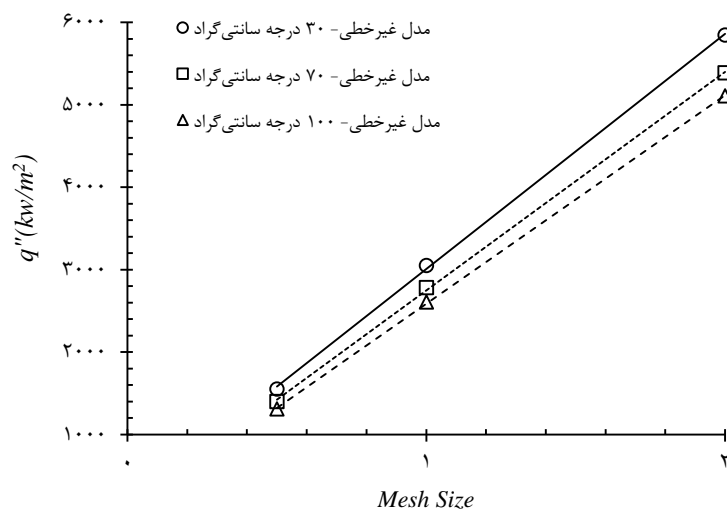
در بررسی جوشش استخری پژوهش‌های پیشین، تأثیر زبری سطح و زاویه تماس نیز مورد توجه بوده‌است [۲۰، ۱۹]. در صورت عدم وجود اطلاعات کافی، سبب بروز خطای بسیاری در نتایج به‌دست آمده برای مقدار شار حرارتی بحرانی خواهد شد که به همین دلیل در این پژوهش از تعداد شبکه، جریان الکتریکی، مقاومت الکتریکی، دمای سیال و ضریب انتقال حرارت جایابی 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 شبکه سیمی افزایش یافته و با ترکیب حباب‌ها، حباب‌های بزرگ‌تری بوجود آمده و فضای خالی درون حباب موجب می‌شود تا شبکه سیمی در شار حرارتی بحرانی کمتری شروع به سرخ شدن نموده و پس از گذشت زمان کوتاهی به درخشندگی کامل رسیده و پس‌از آن گسیخته شود. همچنین علاوه بر افزایش دمای سیال، با افزایش ابعاد شبکه نیز شار حرارتی بحرانی، افزایش می‌یابد. برای یکپارچه‌سازی نتایج، در جدول (۳)، مدل پیشنهادی برای تخمین شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری روی شبکه سیمی و در نمودار (۴) نمودار شار حرارتی بحرانی شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد الف- تجربی، ب- مدل غیرخطی، ج- مدل خطی نشان داده شده‌است.

جدول ۳- مدل پیشنهادی برای تخمین شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری روی شبکه سیمی

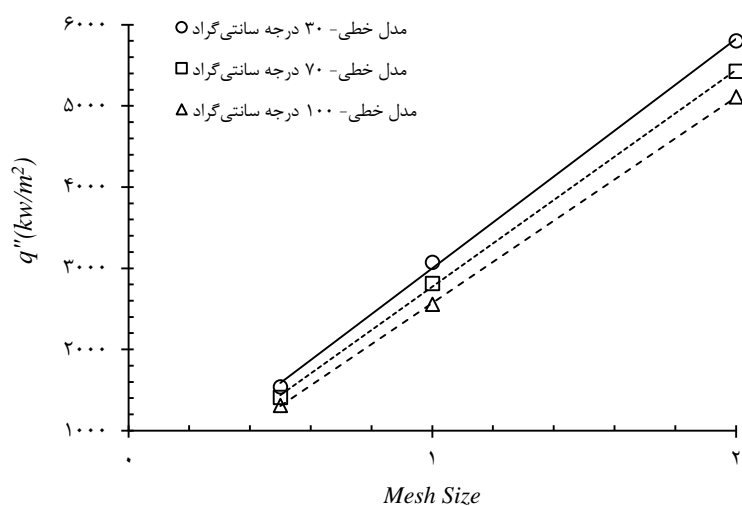
مدل	مدل تابع	رابطه همبستگی	میانگین خطای مطلق
۱	رابطه غیرخطی	$CHF = -30.19 + ((n^{-0.17}) \times (I^{4.38}) \times (R^{2.24}) \times (T_W^{-0.01}) \times (h^{-1.83}))$.
۲	رابطه خطی	$CHF = 1868.72 + 2.44 \times n + 136.9 \times I + 37395.83 \times R - 16.98 \times T_W - 664.92 \times h$.



(الف)



(ب)



(ج)

نمودار ۴- شار حرارتی بحرانی شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵، ۱ و ۲ میلی متر در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه

سانتی گراد (الف) تجربی، (ب) مدل غیرخطی، (ج) مدل خطی

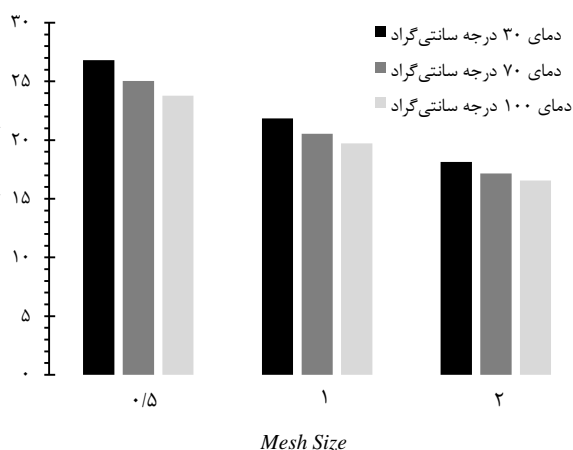
مطابق نتایج به دست آمده ملاحظه می‌شود که با افزایش ابعاد شبکه و افزایش دمای سیال، شار حرارتی بحرانی افزایشی است. در شرایط شبکه سیمی با ابعاد مش ثابت، سیال با دمای ثابت و شار حرارتی کمتر از شار حرارتی بحرانی، دمای سیم افزایش می‌یابد و در شرایط افزایش ابعاد شبکه، سیال با دمای ثابت و شار حرارتی بحرانی، دمای سیم افزایشی است.

خطای مطلق به دست آمده در مدل‌های غیر خطی و خطی صفر می‌باشد و در شرایط مختلف، خطای محاسباتی وجود دارد که نشان‌دهنده عدم وابستگی خطا به شرایطی خاص است و مدل‌های ارائه شده را می‌توان برای شرایط مختلف، مورد استفاده قرار داد.

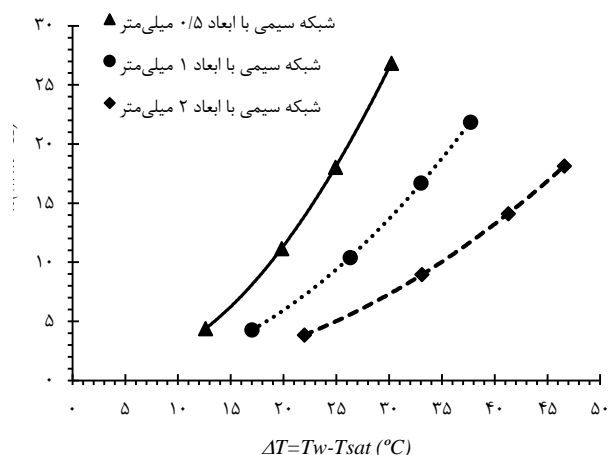
۳-۴- ضریب انتقال حرارت

برای بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی شبکه سیمی، ابتدا آزمایش برای شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵ میلی‌متر، با اعمال شار حرارتی و افزایش آن در آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در ادامه آزمایش برای شبکه سیمی با ابعاد مش ۱ و ۲ میلی‌متر، با اعمال شار حرارتی بحرانی در آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تکرار گردید.

در شبکه سیمی با ابعاد مش ثابت، ضریب انتقال حرارت جابجایی در حالت شارحرارتی ثابت و دما متغیر در شار حرارتی کمتر از شارحرارتی بحرانی، باری هر شار ثابت می‌باشد اما در شار حرارتی بحرانی کاهش می‌یابد. همچنین در شبکه سیمی با افزایش ابعاد مش، ضریب انتقال حرارت جابجایی در حالت شار حرارتی متغیر و دما ثابت در کمتر از شار حرارتی بحرانی، افزایش می‌یابد و در شار حرارتی بحرانی نیز کاهش می‌یابد. در شبکه سیمی با ابعاد مش ثابت، با افزایش دمای سیال در شار حرارتی ثابت و کمتر از شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت ثابت بوده اما در شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. همچنین در شبکه سیمی با ابعاد مش ثابت، با افزایش دمای سیال و افزایش شار حرارتی تا کمتر از شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت افزایشی است اما در شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد.



(ب)



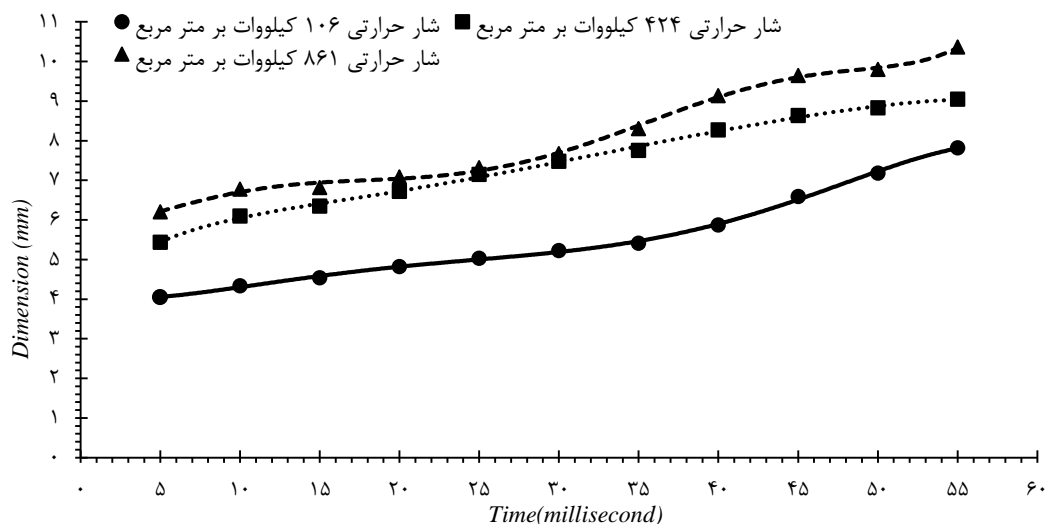
(الف)

نمودار ۵- (الف) نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی، **(ب)** مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی در شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر و آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

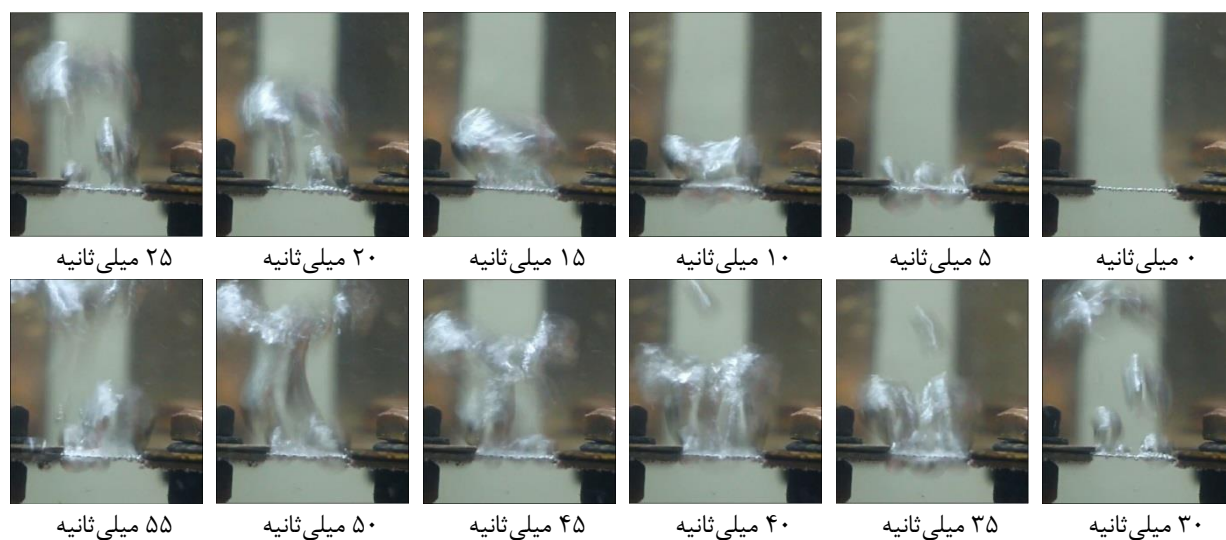
با ابعاد مش شبکه سیمی در دمای ثابت سیال، سطح سیم کاهش یافته که در نتیجه، ضریب انتقال حرارت جابجایی کاهش پیدا می‌کند که در نمودار (۵)، الف- نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی، ب- مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی در شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر و آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. در بررسی ضریب انتقال حرارت در جوشش استخری پژوهش‌های پیشین، تأثیر جنس، هندسه و زاویه سطح المنت نسبت به افق نیز مورد توجه بوده است [۳، ۲۲ و ۲۳]. در صورت عدم وجود اطلاعات کافی، سبب بروز خطای بسیاری در نتایج به دست آمده برای مقدار ضریب انتقال حرارت خواهد شد. در این پژوهش از زاویه سطح المنت صرف نظر شده است تا بتوان به صورت ساده‌تری ضریب انتقال حرارت را به دست آورد. با توجه به نتایج، ملاحظه می‌شود در شبکه سیمی با ابعاد مش ثابت، با افزایش دمای سیال در شار حرارتی ثابت و کمتر از شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت ثابت بوده اما در شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت ثابت، با افزایش دمای سیال و افزایش شار حرارتی تا کمتر از شار حرارتی بحرانی، به دلیل ثابت بودن سطح شبکه سیمی ضریب انتقال حرارت افزایشی است اما در شار حرارتی بحرانی به دلیل کاهش شار حرارتی بحرانی در دمای سیال از ۳۰ به ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و ثابت بودن سطح شبکه سیمی در ابعاد مش ثابت، ضریب انتقال حرارت جابجایی کاهش می‌یابد. با افزایش ابعاد مش شبکه سیمی در دمای ثابت سیال، سطح سیم کاهش یافته که در نتیجه، ضریب انتقال حرارت جابجایی کاهش پیدا می‌کند. به طور کلی ملاحظه می‌شود که در شبکه سیمی با افزایش ۴ برابری ابعاد مش در سیال دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت ۰/۷٪ کاهش می‌یابد.

۴-۴- رشد و جدایش حباب

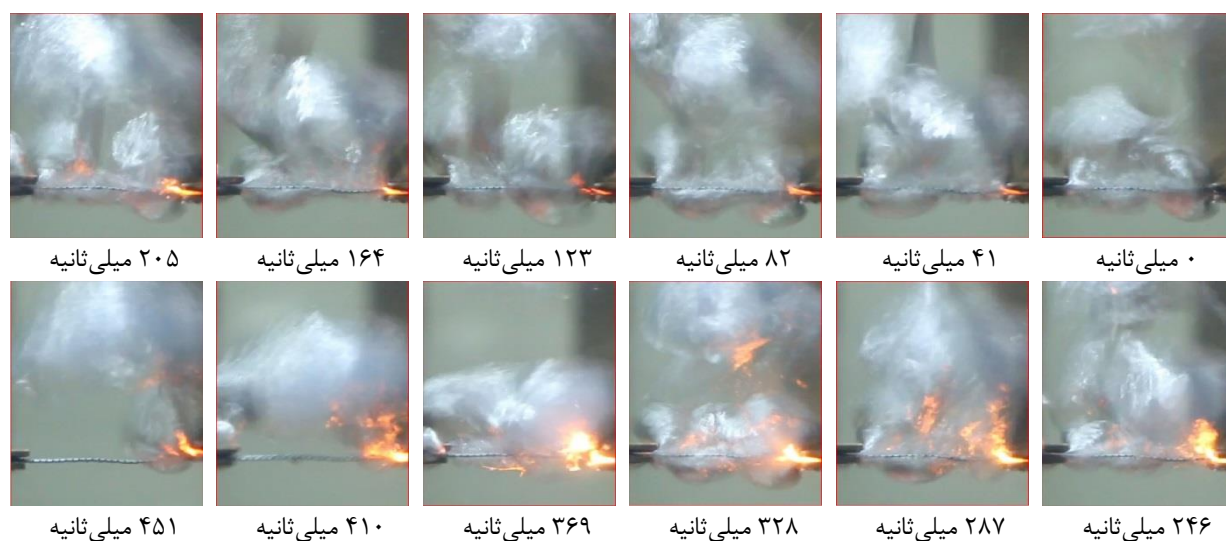
برای بررسی رشد و جدایش حباب و ارائه روابط همبستگی تخمین قطر حباب روی شبکه سیمی، دو حالت (شار ثابت-دما متغیر و دما ثابت-شار متغیر) در نظر گرفته شده است. ابتدا آزمایش برای شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵ میلی‌متر با اعمال شار حرارتی و افزایش آن در آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در ادامه آزمایش برای شبکه سیمی با ابعاد مش ۱ و ۲ میلی‌متر 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 ۰/۰۱ 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 گرفته شده است. در شکل (۲) قطر و رشد حباب در جوشش استخری ارائه شده است. در شرایط اعمال شار حرارتی بحرانی، بازه زمانی ارائه‌شده در تصاویر از ۱۰ تا ۱۱۰ درصد از مدت زمان لازم برای رسیدن شبکه سیمی به حالت سرخ‌شدگی و درخندگی کامل می‌باشد.



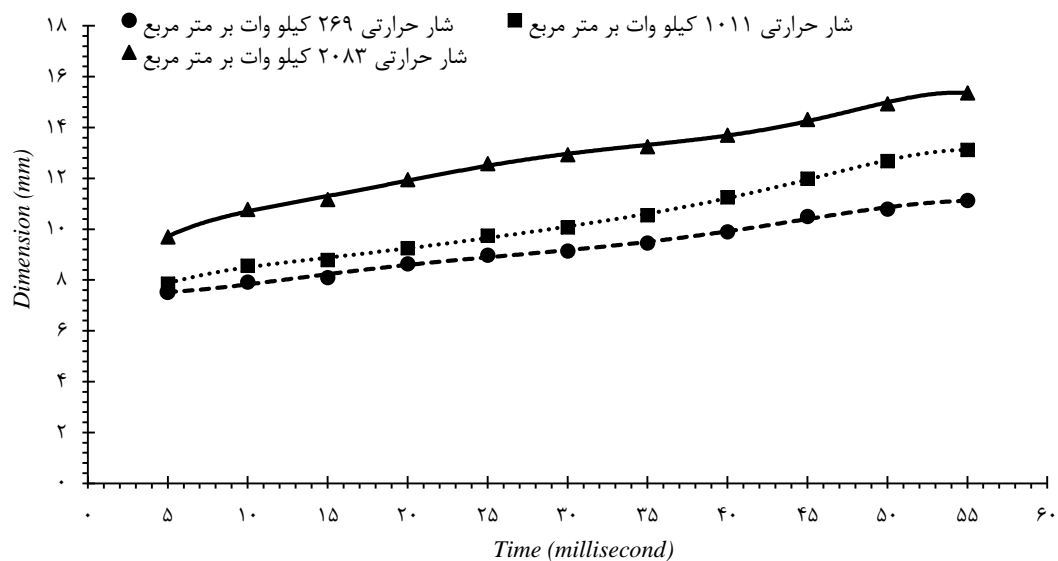
(الف) قطر حباب در شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵ میلی‌متر، شار حرارتی ۱۰۶، ۴۲۴ و ۸۶۱ کیلووات بر متر مربع



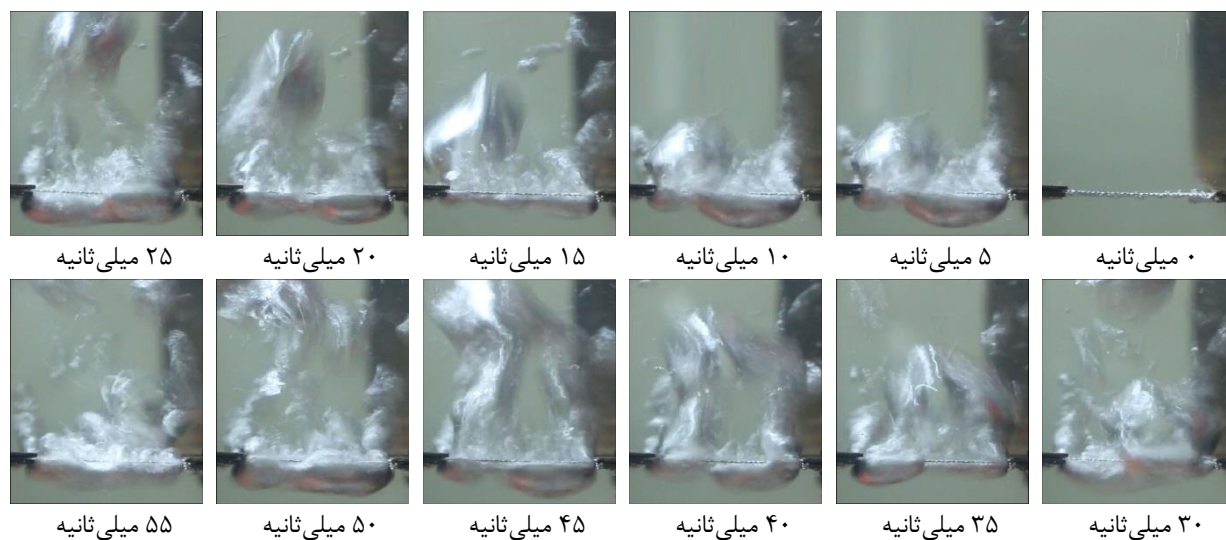
(ب) رشد حباب در شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵ میلی‌متر، شار حرارتی ۸۶۱ کیلووات بر مترمربع



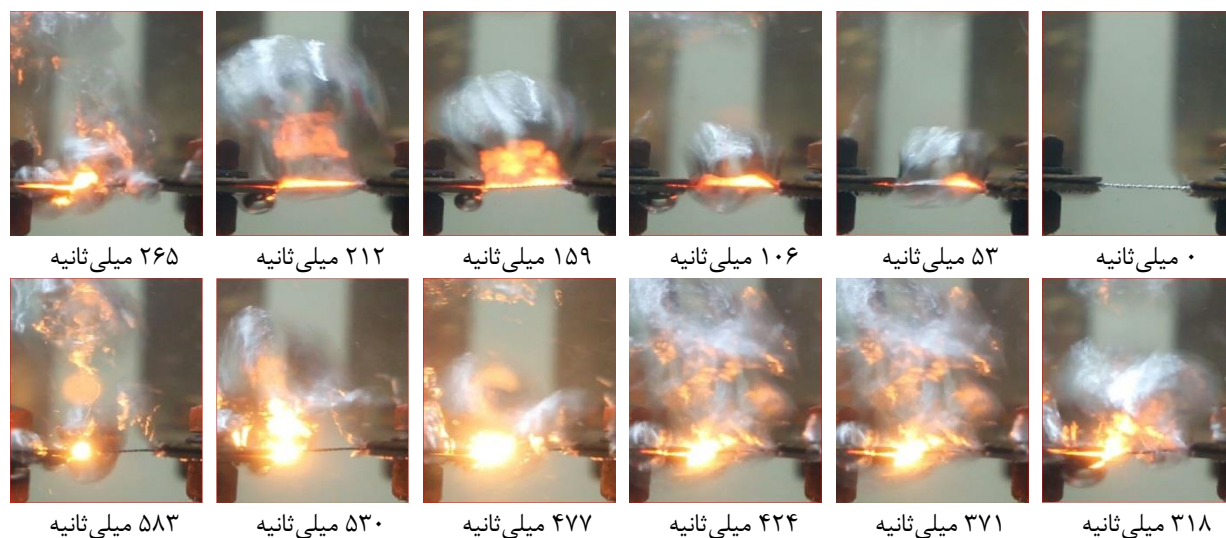
(پ) رشد حباب در شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵ میلی‌متر، شار حرارتی بحرانی ۱۳۰۵ کیلووات بر مترمربع



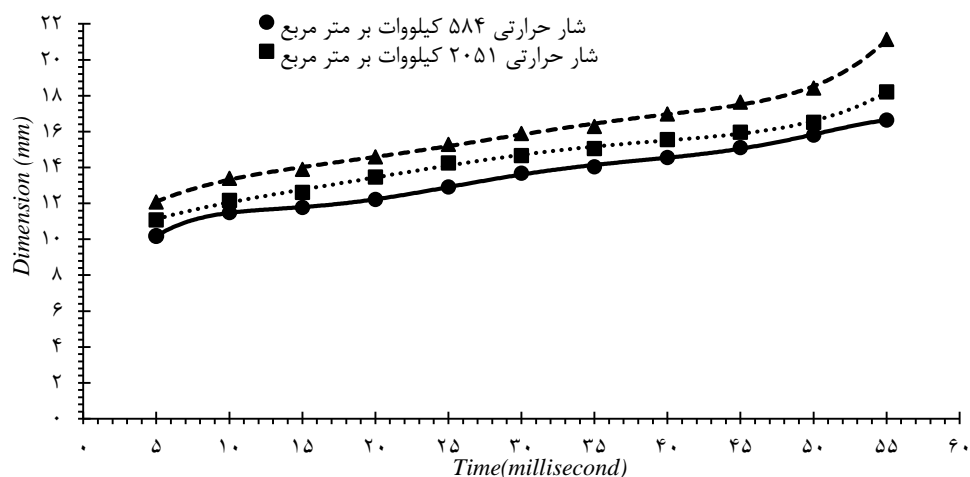
(ت) قطر حباب در شبکه سیمی با ابعاد مش ۱ میلی‌متر، شار حرارتی ۲۶۹، ۱۰۱۱، ۲۰۸۳ کیلووات بر متر مربع



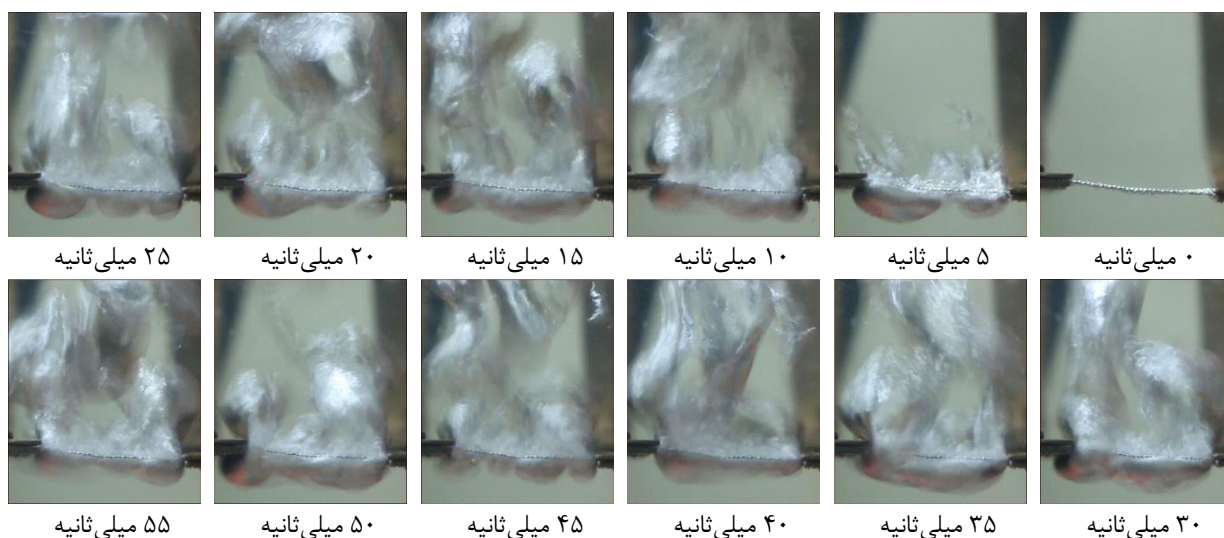
(ث) رشد حباب در شبکه سیمی با ابعاد مش ۱ میلی‌متر، شار حرارتی ۲۰۸۳ کیلووات بر مترمربع



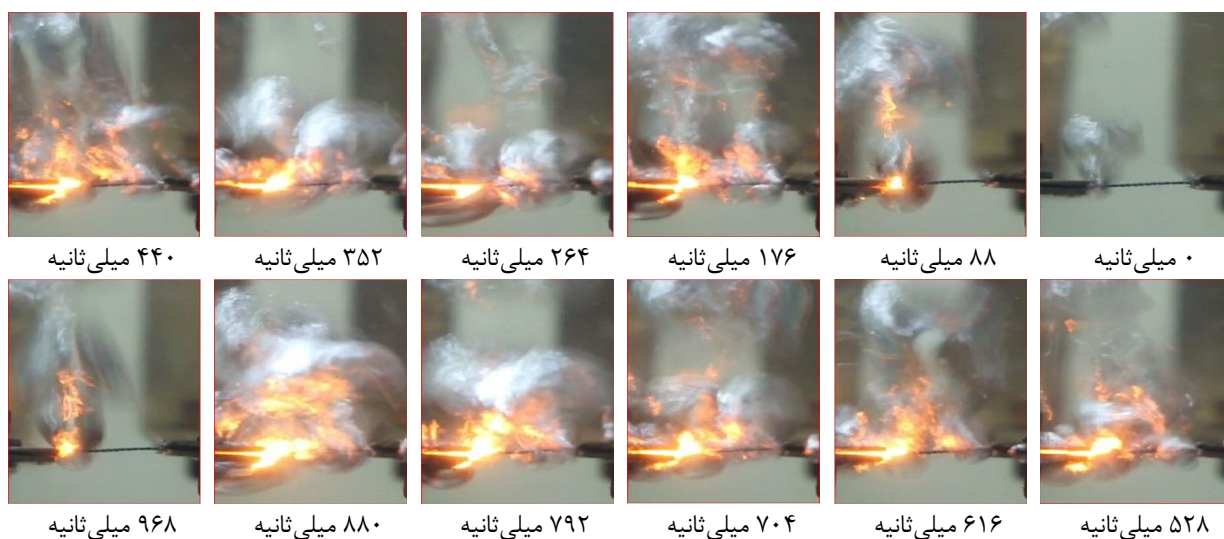
(ج) رشد حباب در شبکه سیمی با ابعاد مش ۱ میلی‌متر، شار حرارتی بحرانی ۲۶۱۱ کیلووات بر مترمربع



(ج) قطر حباب در شبکه سیمی با ابعاد مش ۲ میلی‌متر، شار حرارتی ۵۸۴، ۲۰۵۱ و ۴۰۲۸ کیلووات بر متر مربع



(ح) رشد حباب در شبکه سیمی با ابعاد مش ۲ میلی‌متر، شار حرارتی ۴۰۲۸ کیلووات بر متر مربع



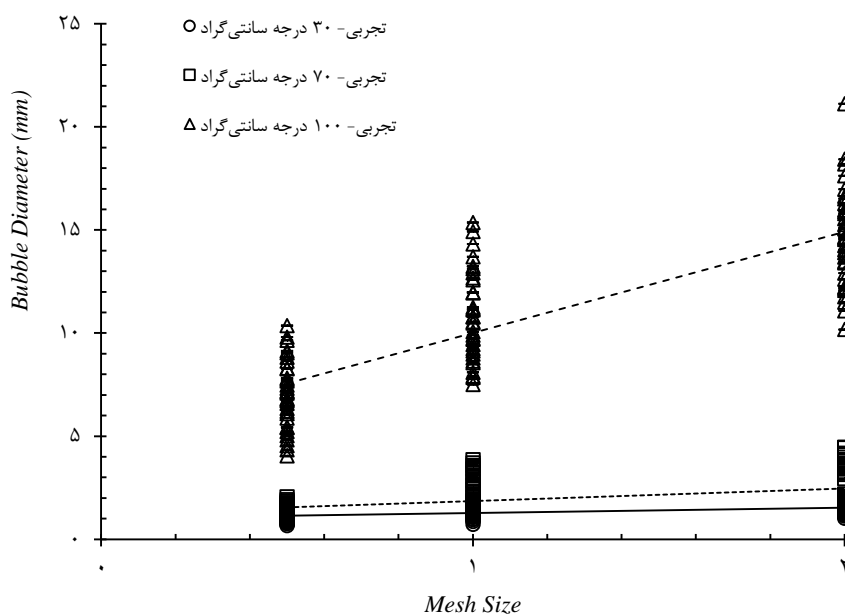
(خ) رشد حباب در شبکه سیمی با ابعاد مش ۲ میلی‌متر، شار حرارتی بحرانی ۵۱۰۷ کیلووات بر متر مربع

شکل ۲- قطر حباب و رشد حباب در جوشش استخری آب دیونیزه روی شبکه سیمی با ابعاد مش ۱/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر در دمای آب ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

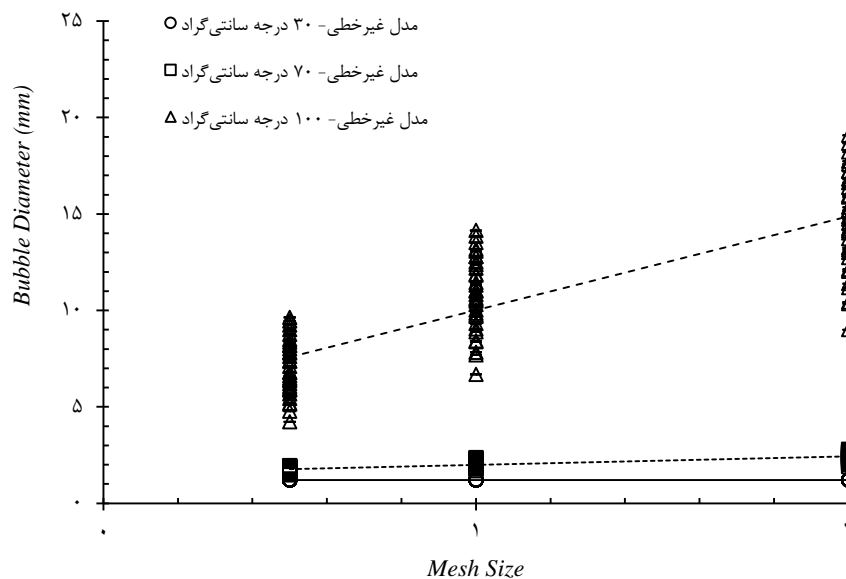
در بررسی قطر حباب در پژوهش‌های پیشین، تأثیر تغییر فشار کاری نیز مورد توجه بوده است [۱۰]. در صورت عدم وجود اطلاعات کافی، سبب بروز خطای بسیاری در نتایج به دست آمده برای مقدار قطر حباب خواهد شد که در این پژوهش از تعداد شبکه، زمان، شار حرارتی، ولتاژ الکتریکی، جریان الکتریکی، مقاومت الکتریکی و دمای سیال، به عنوان پارامترهای مؤثر استفاده شده است تا بتوان به صورت ساده تری مقدار قطر حباب را تخمین زد. با توجه به نتایج ملاحظه می‌شود با اعمال شار حرارتی، ابتدا حباب‌ها به صورت عمودی و به طرف پایین شکل گرفته و در جهت افقی در طول شبکه حرکت می‌کنند، سپس با افزایش شار حرارتی، قطر حباب‌ها بزرگ‌تر شده و با ترکیب شدن با یکدیگر از روی شبکه جدا می‌شوند و قطر حباب فقط در لحظه جدایش از سطح شبکه سیمی، 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 [۷]. همچنین ملاحظه می‌شود با افزایش شار حرارتی و افزایش دمای سیال، قطر حباب‌ها بیشتر می‌گردد. در شار حرارتی بحرانی، 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 پس از آن دچار گسیختگی می‌شوند.

جدول ۴- مدل پیشنهادی برای تخمین قطر حباب در جوشش استخری روی شبکه سیمی

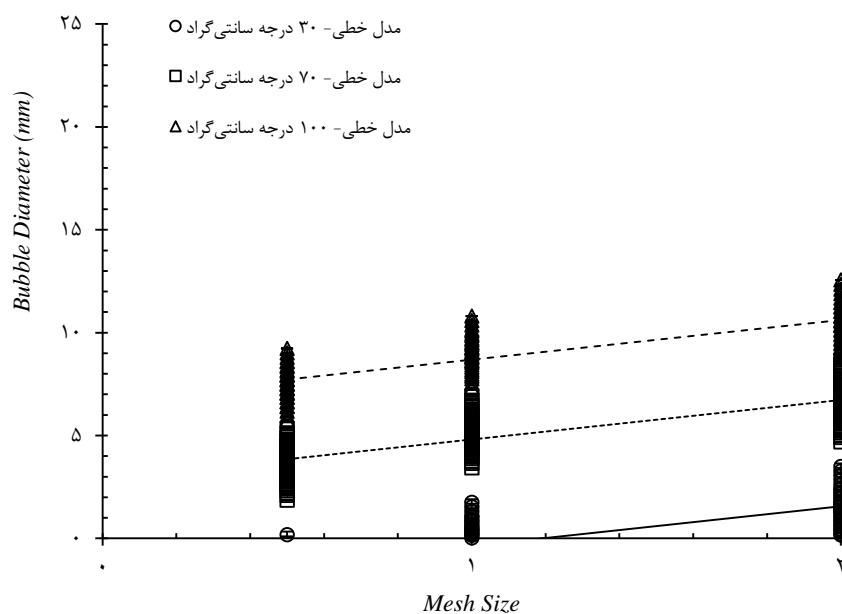
مدل	مدل تابع	رابطه همبستگی	میانگین خطای مطلق
۱	رابطه غیر خطی	$D_B = 1.2 + ((n^{12.09}) \times (t^{0.24}) \times (q^{"-15.37}) \times (V^{17.81}) \times (I^{13.18}) \times (R^{3.07}) \times (T_W^{6.76}))$	۰/۰۰۴
۲	رابطه خطی	$D_B = -12.41 - 1.04 \times n + 0.04 \times t + 0.001 \times q - 0.36 \times V + 0.06 \times I + 49.03 \times R + 0.13 \times T_W$	۱/۸۱



(الف)



(ب)



(ج)

نمودار ۶- قطر حباب روی شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه

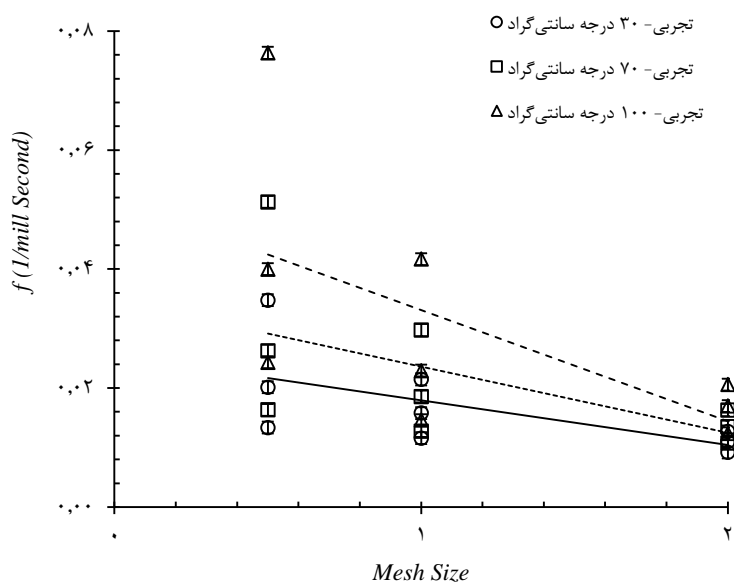
سانتی‌گراد (خطای کل ۰/۰۰۱ میلی‌متر) (الف) تجربی، (ب) مدل غیرخطی، (ج) مدل خطی

برای یکپارچه‌سازی نتایج، در جدول (۴)، مدل پیشنهادی برای تخمین قطر حباب در جوشش استخری روی شبکه سیمی و در نمودار (۶) قطر حباب روی شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد الف- تجربی، ب- مدل غیرخطی، ج- مدل خطی، نشان داده شده‌است.

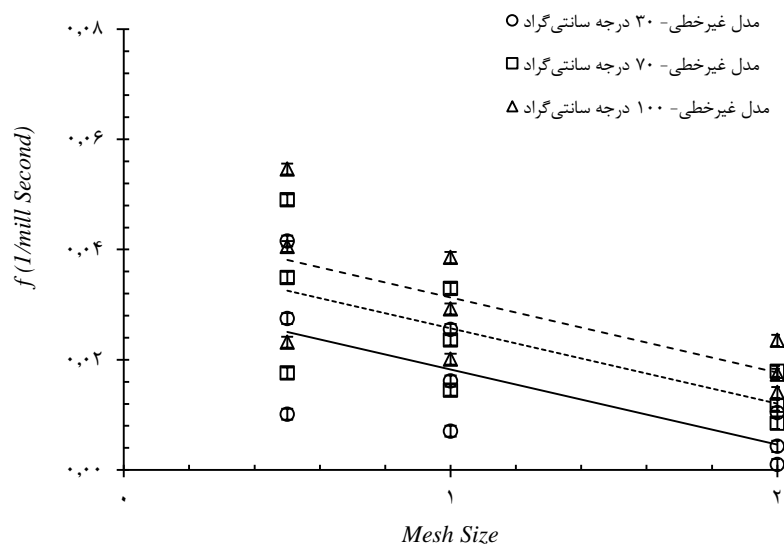
خطای مطلق به دست آمده در مدل‌های غیر خطی و خطی به ترتیب $0.04/0\%$ و $1/81\%$ می‌باشد و در شرایط مختلف، خطای محاسباتی وجود دارد که نشان‌دهنده عدم وابستگی خطا به شرایطی خاص است و مدل‌های ارائه شده را می‌توان برای شرایط مختلف و با خطای قابل قبول، مورد استفاده قرار داد.

۴-۵- فرکانس رشد حباب

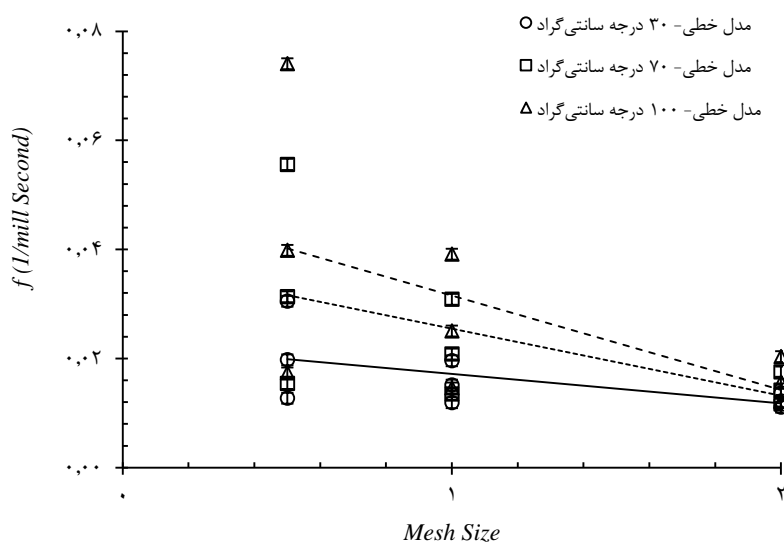
برای بررسی و ارائه روابط همبستگی فرکانس رشد حباب در آب دیونیزه با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد روی شبکه سیمی، با اعمال شار حرارتی و افزایش آن، زمان رشد و زمان انتظار استخراج گردید و به کمک تصویربرداری با دوربین پرسرعت در هر میلی‌ثانیه، پردازش و جداسازی تصاویر در هر فریم صورت پذیرفته و زمان جوانه‌زنی 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 بوده است [۱۰]. در صورت عدم وجود اطلاعات کافی، سبب بروز خطای بسیاری در نتایج به دست آمده برای مقدار فرکانس رشد حباب خواهد شد که به همین دلیل در این پژوهش از تعداد شبکه، شار حرارتی، دمای سیال، ولتاژ الکتریکی، جریان الکتریکی و مقاومت الکتریکی به عنوان پارامترهای مؤثر استفاده شده است تا بتوان به صورت ساده‌تری مقدار شار حرارتی بحرانی را تخمین زد. با توجه به همبستگی پارامترها ملاحظه می‌شود با افزایش ابعاد مش شبکه، زمان رشد و زمان انتظار افزایش یافته و فرکانس جدایش حباب کاهش می‌یابد. در نمودار (۷) فرکانس رشد حباب روی شبکه سیمی با ابعاد مش ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد الف- تجربی، ب- مدل غیرخطی، ج- مدل خطی و همچنین برای یکپارچه‌سازی نتایج، در جدول (۵)، مدل پیشنهادی برای تخمین فرکانس رشد حباب در جوشش استخری روی شبکه سیمی نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

نمودار ۷- فرکانس رشد حباب روی شبکه سیمی با ابعاد مش $0.5/1$ و 2 میلی‌متر در سیال با دمای 30 ، 70 و 100 درجه

سانتی‌گراد (خطای کل 0.001 حباب بر میلی ثانیه) (الف) تجربی، (ب) مدل غیرخطی، (ج) مدل خطی

جدول ۵- مدل پیشنهادی برای تخمین فرکانس رشد حباب در جوشش استخری روی شبکه سیمی

مدل	مدل تابع	رابطه همبستگی	میانگین خطای مطلق
۱	رابطه غیرخطی	$f = 0.011 + ((n^{-0.522}) \times (q^{-4.333}) \times (T_W^{0.964}) \times (V^{8.279}) \times (I^{2.317}))$	0.0001
۲	رابطه خطی	$f = -0.003 - 1.44 \times 10^{-5} \times n + 4.68 \times 10^{-6} \times q^n + 1.87 \times 10^{-4} \times T_W - 0.009 \times V + 1.65 \times 10^{-3} \times I$	0.0002

خطای مطلق به دست آمده در مدل‌های غیر خطی و خطی به ترتیب $0.0001/0$ و $0.0002/0$ می‌باشد و در شرایط مختلف، خطای محاسباتی وجود دارد که نشان‌دهنده عدم وابستگی خطا به شرایطی خاص است و مدل‌های ارائه شده را می‌توان برای شرایط مختلف و با خطای قابل قبول، مورد استفاده قرار داد. ماکزیمم فرکانس رشد حباب مربوط به شبکه سیمی با ابعاد 0.5 میلی‌متر در سیال 100 درجه سانتی‌گراد، 0.0763 حباب بر میلی‌ثانیه می‌باشد، ماکزیمم زمان رشد و ماکزیمم زمان انتظار حباب مربوط به شبکه سیمی با ابعاد 2 میلی‌متر در سیال 30 درجه سانتی‌گراد و به ترتیب 47 و 62 میلی‌ثانیه است.

۴-۶- چگالی نقاط مولد حباب

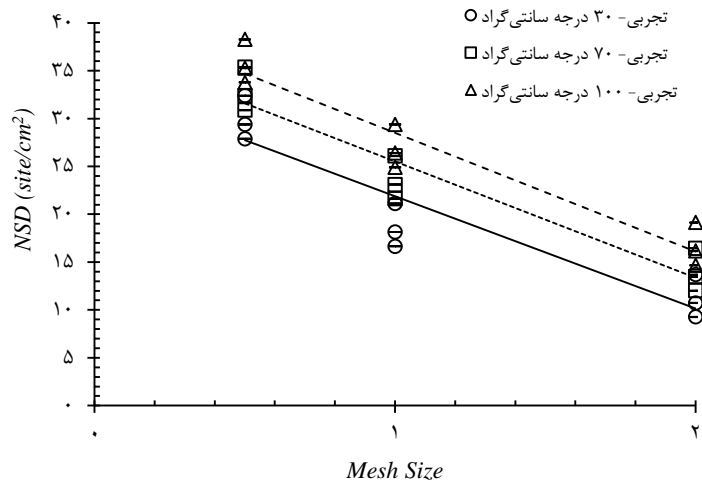
برای بررسی و ارائه روابط همبستگی چگالی نقاط مولد آب دیونیزه با دمای 30 ، 70 و 100 درجه سانتی‌گراد روی شبکه سیمی، با اعمال شار حرارتی و افزایش آن، نتایج استخراج گردید و به کمک تصویربرداری با دوربین پرسرعت در هر میلی‌ثانیه، پردازش و جداسازی تصاویر در هر فریم صورت پذیرفته و تعداد حباب در هر فریم استخراج 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 بوده است [۱۸]. در صورت عدم وجود اطلاعات کافی، سبب بروز خطای بسیاری در نتایج به دست آمده برای مقدار چگالی نقاط مولد حباب خواهد شد که به همین دلیل در این پژوهش از تعداد شبکه، شار حرارتی، دمای سیال، مقاومت الکتریکی، ولتاژ الکتریکی، جریان الکتریکی به عنوان پارامترهای مؤثر استفاده شده است تا بتوان به صورت 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 ابعاد شبکه، چگالی نقاط مولد حباب کم می‌شود.

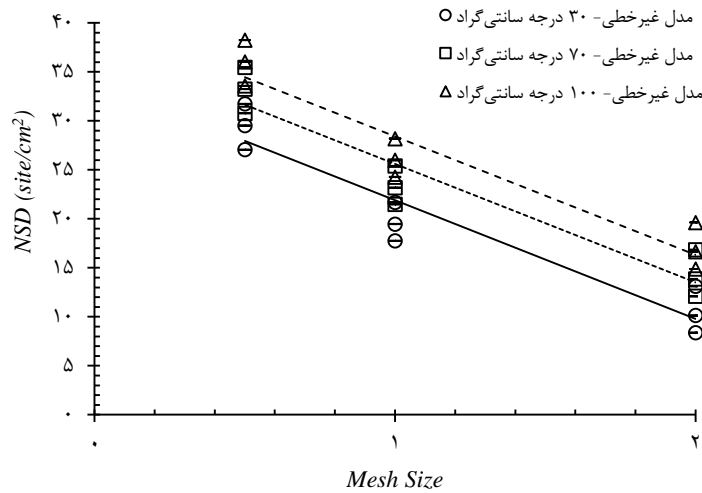
برای یکپارچه‌سازی نتایج، در جدول (۶)، مدل پیشنهادی برای تخمین چگالی نقاط مولد حباب در جوشش استخری روی شبکه سیمی و در نمودار (۸) چگالی نقاط مولد حباب روی شبکه سیمی با ابعاد 0.5 ، 1 و 2 میلی‌متر در سیال با دمای 30 ، 70 و 100 درجه سانتی‌گراد الف- تجربی، ب- مدل غیرخطی، ج- مدل خطی، نشان داده شده است.

جدول ۶- مدل پیشنهادی برای تخمین چگالی نقاط مولد حباب در جوشش استخری روی شبکه سیمی

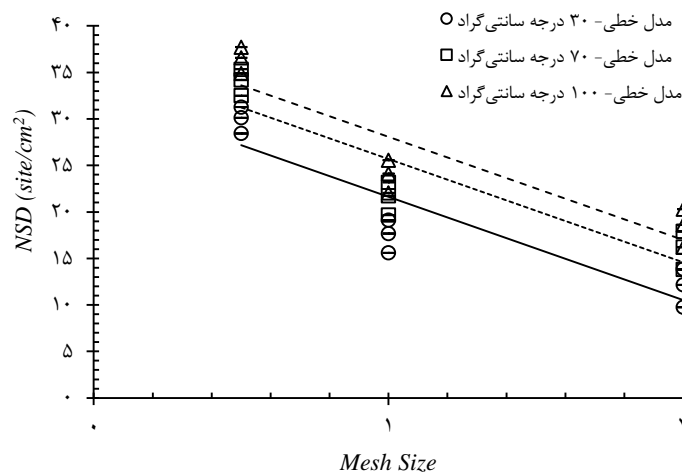
مدل	مدل تابع	رابطه همبستگی	میانگین خطای مطلق
۱	رابطه غیرخطی	$NSD = -9.78 + n^{0.498} + q^{0.276} + T_W^{0.559} + V^{-32.19} + I^{-6.29} + R^{717.02}$	۰/۱۴
۲	رابطه خطی	$NSD = 40.86 - 0.002 \times n + 0.002 \times q + 0.093 \times T_W - 1.54 \times V + 0.24 \times I - 174.96 \times R$	۰/۰۴



(الف)



(ب)



(ج)

نمودار ۸- چگالی نقاط مولد حباب روی شبکه سیمی با ابعاد مش ۵/۰، ۱ و ۲ میلی‌متر در سیال با دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰

درجه سانتی‌گراد (خطای کل ۰/۰۱ بر سانتی متر مربع) **الف** - تجربی، **ب** - مدل غیرخطی، **ج** - مدل خطی

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش هدف از مطالعه، بررسی فرآیند جوشش استخری روی شبکه سیمی بود که با توجه به آزمایش‌ها، مشاهدات، محاسبات و تحلیل‌های صورت پذیرفته می‌توان نتیجه گرفت در شار حرارتی بحرانی با افزایش دمای سیال، تعداد حباب‌های تشکیل شده روی شبکه سیمی افزایش یافته و با ترکیب حباب‌ها، حباب‌های بزرگ‌تری بوجود آمده و در ابتدای سرخ‌شدگی شبکه سیمی، شار حرارتی بحرانی رخ داده و در شار حرارتی بحرانی کمتری شروع به سرخ شدن نموده و پس از گذشت زمان کوتاهی گسیخته شود. شار حرارتی بحرانی متأثر از ابعاد شبکه سیمی بوده و با افزایش ابعاد شبکه در سیال با دمای ثابت، شار حرارتی بحرانی افزایش می‌یابد. بر اساس مدل توابع در پیش‌بینی شار حرارتی بحرانی، مؤثرترین پارامتر، جریان الکتریکی اعمال شده می‌باشد.

به طور کلی ملاحظه می‌شود که در شبکه سیمی با افزایش ۴ برابری ابعاد مش در سیال دمای ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت 0.07% کاهش می‌یابد. با اعمال شار حرارتی، ابتدا حباب‌ها به صورت عمودی و به طرف پایین شکل گرفته و در جهت افقی در طول شبکه حرکت می‌کنند. قطر حباب فقط در لحظه جدایش از سطح شبکه سیمی، 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 شبکه جدا می‌شود. بر اساس مدل توابع در پیش‌بینی قطر حباب، مؤثرترین پارامترها، ولتاژ الکتریکی اعمال شده و تعداد شبکه می‌باشد. با افزایش ابعاد مش شبکه، زمان رشد و زمان انتظار افزایش یافته و فرکانس رشد و جدایش حباب کاهش می‌یابد. ماکزیمم فرکانس رشد حباب مربوط به شبکه سیمی با ابعاد 0.5 میلی‌متر در سیال ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، 0.0763 حباب بر میلی‌ثانیه می‌باشد، ماکزیمم زمان رشد و ماکزیمم زمان انتظار حباب مربوط به شبکه سیمی با ابعاد مش ۲ میلی‌متر در سیال ۳۰ درجه سانتی‌گراد و به ترتیب ۴۷ و ۶۲ میلی‌ثانیه است.

بر اساس مدل توابع در پیش‌بینی فرکانس رشد حباب، مؤثرترین پارامتر، شار حرارتی اعمال شده به شبکه سیمی می‌باشد. با افزایش شار حرارتی، چگالی نقاط مولد حباب افزایش می‌یابد. و همچنین با افزایش ابعاد شبکه، چگالی نقاط مولد حباب کم می‌شود. بر اساس مدل توابع در پیش‌بینی چگالی نقاط مولد حباب، مؤثرترین پارامتر، تعداد شبکه می‌باشد. با توجه به خطای مطلق به دست آمده در مدل‌های غیر خطی و خطی و عدم وابستگی خطا، مدل‌های ارائه شده را می‌توان برای شرایط مختلف و با خطای قابل قبول، مورد استفاده قرار داد.

مراجع

- [1] H. Yang, "Experimental and Numerical Investigation of Pool Boiling Heat Transfer on Engineered Nano-finned Surfaces," 2014. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1969.1/153309>.

- [2] G. Liang and I. Mudawar, "Review of Pool Boiling Enhancement by Surface Modification," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 128, pp. 892-933, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.026>.
- [3] G. Liang and I. Mudawar, "Pool Boiling Critical Heat Flux (CHF)–Part 1: Review of Mechanisms, Models, and Correlations," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 117, pp. 1352-1367, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.134>.
- [4] K. Kouloulis, A. Sergis, Y. Hardalupas, and T. Barrett, "Visualisation of Subcooled Pool Boiling in Nanofluids," *Fusion Engineering and Design*, Vol. 146, pp. 153-156, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.005>.
- [5] A. Marie, S. Cioulachtjian, S. Lips, and V. Sartre, "Thermal Interactions Between Nucleation Sites and the Solid Wall During Pool Boiling of a Pure Fluid: A Review," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 174, p. 107388, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107388>.
- [6] N. Colgan, J. L. Bottini, Z. J. Ooi, and C. S. Brooks, "Experimental Study of Wall Nucleation Characteristics in Flow Boiling under Subatmospheric Pressures in a Vertical Square Channel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 134, pp. 58-68, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.153>.
- [7] L. Zhang, S. Gong, Z. Lu, P. Cheng, and E. N. Wang, "A Unified Relationship between Bubble Departure Frequency and Diameter During Saturated Nucleate Pool Boiling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 165, p. 120640, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120640>.
- [8] R. Pastuszko, R. Kaniowski, and T. M. Wójcik, "Comparison of Pool Boiling Performance for Plain Micro-fins and Micro-fins with a Porous Layer," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 166, p. 114658, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114658>.
- [9] K. Wang, H. Gong, L. Wang, N. Erkan, and K. Okamoto, "Effects of a Porous Honeycomb Structure on Critical Heat Flux in Downward-facing Saturated Pool Boiling," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 170, p. 115036, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115036>.
- [10] C. Zhang, L. Zhang, H. Xu, P. Li, and B. Qian, "Performance of Pool Boiling with 3D Grid Structure Manufactured by Selective Laser Melting Technique," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 128, pp. 570-580, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.021>.
- [11] D. Zhong, Z. Li, and Z. Guo, "Critical Heat Flux for Downward-facing Saturated Pool Boiling on Pin Fin Surfaces," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 87, pp. 201-211, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.001>.
- [12] R. K. Gouda, M. Pathak, and M. K. Khan, "Pool Boiling Heat Transfer Enhancement with Segmented Finned Microchannels Structured Surface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 127, pp. 39-50, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.115>.

- [13] K. Laqua, K. Malone, M. Hoffmann, D. Krause, and M. Schlüter, "Methane Bubble Rise Velocities under Deep-sea Conditions—Influence of Initial Shape Deformation," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 505, pp. 106-117, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.01.041>.
- [14] M. Dadjoo, N. Etesami, and M. N. Esfahany, "Influence of Orientation and Roughness of Heater Surface on Critical Heat Flux and Pool Boiling Heat Transfer Coefficient of Nanofluid," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 124, pp. 353-361, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.025>.
- [15] A. Ayoobi, A. F. Khorasani, M. R. Tavakoli, and M. R. Salimpour, "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*, Vol. 137, pp. 318-327, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.083>.
- [16] Y. Hu, H. Wang, M. Song, and J. Huang, "Marangoni Effect on Microbubbles Emission Boiling Generation During Pool Boiling of Self-wetting Fluid," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 134, pp. 10-16, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.011>.
- [17] P. Kangude, D. Bhatt, and A. Srivastava, "Experiments on the Effects of Nanoparticles on Subcooled Nucleate Pool Boiling," *Physics of Fluids*, Vol. 30, No. 5, 2018, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5027295>.
- [18] C. Gerardi, J. Buongiorno, L.-w. Hu, and T. McKrell, "Measurement of Nucleation Site Density, Bubble Departure Diameter and Frequency in Pool Boiling of Water using High-speed Infrared and Optical Cameras," 2009, doi: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21208446>.
- [19] C. Paz, M. Conde, J. Porteiro, and M. Concheiro, "Effect of Heating Surface Morphology on Active Site Density in Subcooled Flow Nucleated Boiling," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 82, pp. 147-159, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.11.011>.
- [20] J. S. Kim, A. Girard, S. Jun, J. Lee, and S. M. You, "Effect of Surface Roughness on Pool Boiling Heat Transfer of Water on Hydrophobic Surfaces," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 118, pp. 802-811, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.124>.
- [21] J. Kim, S. Jun, J. Lee, J. Godinez, and S. M. You, "Effect of Surface Roughness on Pool Boiling Heat Transfer of Water on a Superhydrophilic Aluminum Surface," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 139, No. 10, p. 101501, 2017, doi: <https://asmedigitalcollection.asme.org/heattransfer/article-abstract/139/10/101501/384231/Effect-of-Surface-Roughness-on-Pool-Boiling-Heat>.
- [22] L. Zou and B. G. Jones, "Heating Surface Material's Effect on Subcooled Flow Boiling Heat Transfer of R134a," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 58, No. 1-2, pp. 168-174, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.036>.

[23] A. Jaikumar and S. G. Kandlikar, "Enhanced Pool Boiling Heat Transfer Mechanisms for Selectively Sintered Open Microchannels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 88, pp. 652-661, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.100>.

فهرست نمادهای انگلیسی

I	جریان الکتریکی (A)
q''	شار حرارتی (kw/m^2)
N	تعداد حباب
V	ولتاژ الکتریکی (v)
T_W	دمای آب ($^{\circ}\text{C}$)
R	مقاومت الکتریکی (Ω)
CHF	شار حرارتی بحرانی (kw/m^2)
T_{Sat}	دمای آب اشباع ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT	اختلاف دما ($^{\circ}\text{C}$)
NSD	چگالی نقاط مولد حباب (Sites/cm^2)
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($\text{w/m}^2.\text{k}$)
t_G	زمان رشد حباب (millisecond)
t_w	زمان انتظار حباب (millisecond)
n	تعداد سلول شبکه سیمی
f	فرکانس رشد حباب (millisecond^{-1})
A	مساحت سطح جانبی شبکه سیمی (m^2)
t	زمان (millisecond)

An Experimental Study on Bubble Growth and Departure in Pool Boiling on Wire Mesh and Providing Empirical Relations

Mohammad Ali Mohammadi

PhD. Candidate, Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
mohammadi_66@yahoo.com

*Corresponding author: **Saeid Niazi**

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
s.niazi@hormozgan.ac.ir

Younes Bakhshan

Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
bakhshan@hormozgan.ac.ir

Jamshid Khorshidi

Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
khoshidi@hormozgan.ac.ir

Abstract

The present study examined the pool boiling process in a specific geometry by designing, constructing a laboratory complex and Providing Empirical Relations. 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 wire mesh element in deionized water at different temperatures. According to the results, increasing the size of mesh and fluid temperature decreased the critical heat flux. In the case of a wire mesh with a constant size of mesh, 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 size of mesh, a fluid with a constant temperature and applying critical heat flux values. In the case of a constant size of mesh, 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 was increased with increasing values of heat flux less than the critical heat flux and decreased at critical heat flux values. By increasing 4 times the mesh size in the fluid at 30, 70 and 100°C in the critical heat flux, the heat transfer coefficient decreases by 0.7%. The maximum bubble growth frequency is related to the 0.5 mm wire mesh in 100°C fluid with 0.0763 bubbles per millisecond.

Keywords: Bubble, Growth, Departure, Wire mesh, Pool boiling