

## بررسی تجربی و عددی ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی بر اساس شرایط کاری موتور

آرش محمدی<sup>۱\*</sup>، مصطفی ورمزیار<sup>۲</sup>، سیامک طاهرلو<sup>۳</sup>، مسعود ضیابشرحق<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی مکانیک، تهران، ایران [amohammadi@srttu.edu](mailto:amohammadi@srttu.edu)

<sup>۲</sup> دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی مکانیک، تهران، ایران [varmazyar.mostafa@srttu.edu](mailto:varmazyar.mostafa@srttu.edu)

<sup>۳</sup> دانشگاه خواجه نصیر طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک، تهران، ایران [Siamaktaherloo@gmail.com](mailto:Siamaktaherloo@gmail.com)

<sup>۴</sup> دانشگاه خواجه نصیر طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک، تهران، ایران [mzia@kntu.ac.ir](mailto:mzia@kntu.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۵ فروردین ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۲ آبان ۱۳۹۵

کلیدواژه‌ها:

موتور ملی

جوشش جریانی

شار حرارتی

ضریب انتقال حرارت

### چکیده

حدود یک سوم انرژی آزاد شده سوخت درون موتور احتراق داخلی از طریق سامانه خنک کاری به محیط دفع می‌شود. خنک کاری بیش از حد، بازده موتور را کاهش می‌دهد و از طرف دیگر کاهش خنک کاری، باعث تشکیل لایه بخار روی سطح راهگاه آب، کاهش مقدار انتقال حرارت و آسیب قطعات می‌گردد. رفتار ضریب انتقال حرارت در زمان جوشش وابسته به شار حرارتی است و این ضریب در بازه جوشش نقطه‌ای افزایش و در مرحله جوشش لایه‌ای کاهش می‌یابد. در این تحقیق با ساخت تجهیزات آزمایشگاهی اثر شار حرارتی بر انتقال حرارت به سیال در شرایط کاری موتور ملی بررسی شده است. این بررسی با استفاده از دو سیال پایه، آب مقطر و مخلوط آب مقطر و اتیلن گلیکول (۵۰٪-۵۰٪)، و اندازه‌گیری دمای سطح صورت گرفته است. با توجه به اینکه جوشش جریانی در نزدیکی نقاط داغ راهگاه آب رخ می‌دهد که سرعت سیال در اطراف آن کم باشد، از این رو محدوده جریان بین دو دریچه دود در موتور ملی انتخاب و با ایجاد شار حرارتی ثابت، اثر سرعت و دمای سیال ورودی روی دمای سطح و ضریب انتقال حرارت بررسی گردید. علاوه بر نتایج آزمایشگاهی از شبیه‌سازی عددی استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی عددی در توافق خوبی با نتایج آزمایشگاهی است.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



## ۱- مقدمه

وظیفه سامانه خنک کاری محدود کردن بیشینه دمای قطعات موتور احتراق داخلی به منظور جلوگیری از آسیب های ناشی از افزایش دما است. خنک کاری دمای روغن، انبساط اجزائی که با محفظه احتراق ارتباط دارند و همچنین دمای محفظه احتراق را تنظیم می کند.

برای طراحی سامانه خنک کاری نیاز است دید کلی نسبت به مشخصات مهم موتور از جمله فشار، شار، دمای ورودی و دمای سطح و تأثیر آن بر روی نرخ انتقال حرارت از سطح به سیال خنک کننده ایجاد شود. انتقال حرارت به سیال خنک کننده به دو صورت انتقال حرارت جابجایی و جوشش صورت می گیرد.

جوشش نقطه ای<sup>۱</sup> که در نواحی داغ با سرعت کند سیال خنک کننده رخ می دهد، انتقال حرارت از سطح را افزایش داده و دمای این نقاط را کاهش می دهد. اگر مقدار انتقال حرارت از حد معینی بیشتر شود، لایه ای از بخار روی سطح تشکیل می شود. تشکیل لایه بخار، مقدار انتقال حرارت از سطح را به شدت کاهش می دهد که در نتیجه دما در آن محل بشدت افزایش پیدا کرده و به قطعات در آن ناحیه آسیب جدی می رساند. امکان پیش بینی کردن جوشش در موتور به علت هندسه پیچیده درون راهگاه آب بسیار مشکل است. پژوهش هایی بسیاری در این زمینه انجام گرفته است. از آن جمله می توان به بررسی مک اسی و همکاران [۳-۱] که بر روی مقدار انتقال حرارت مخلوط ۵۰-۵۰ آب و پروپیلن گلیکول و ۵۰-۵۰ آب و اتیلن گلیکول صورت گرفته است اشاره نمود. بررسی آنها نشان داد که انتقال حرارت جابجایی مخلوط آب و اتیلن نسبت به آب و پروپیلن گلیکول بهتر است. همچنین نتایج ایشان نشان می دهد که رابطه چن در میان سایر روابط مورد بررسی، مقدار انتقال حرارت جوشش را بهتر پیش بینی می کند.

نتیجه مشابهی در تحقیق کمپل و همکاران [۴-۵] ارائه گردیده است. ایشان معادله های رزنو و چن را برای پیش بینی انتقال حرارت در راهگاه آب موتور احتراق داخلی بررسی و نشان دادند که روش چن پیش بینی بهتری دارد. کندلیکار و بولوت [۶] یک مجموعه تجهیزات آزمایشگاهی برای بدست آوردن شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت جوشش مادون سرد ساختند. سپس درصد اتیلن گلیکول را در مخلوط آب و اتیلن گلیکول بین ۰ تا ۴۰ درصد تغییر دادند. اندرو اونیل [۷] یک راهگاه با سطح مقطع مستطیلی ساختند و در شرایط کاری استاندارد موتور احتراق داخلی جابجایی اجباری و جوشش جریان را بررسی کردند. آنها سرعت و دمای ورودی و فشار آب را تغییر دادند و نمودارهای شار حرارتی جوشش جریان را بررسی کردند. تابو [۸] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و روش های جوشش ارائه شده، جوشش مادون سرد را برای شرایط مختلف راهگاه آب موتور بررسی کرد. الگوی BDL<sup>۲</sup> برای برای -گیری های مختلف دیوار داغ در مطالعه اشتاینر و همکاران [۹] بررسی

شد. ایشان نشان دادند انتقال حرارت جوششی روی دیوار عمودی به کمک روش BDL به خوبی قابل پیش بینی است، مشروط به آنکه ناحیه جوشش لایه ای رخ ندهد. پس از آن هوسونگ لی [۱۰] به شبیه سازی جوشش در مقطع مستطیلی پرداخت که نتایج وی نیز نشان می داد روش چن تطابق بهتری با داده های آزمایشگاهی دارد و البته مشاهده کرد که با افزایش فشار از ۱ به ۱.۸۲ بار، مقدار مطابقت روش چن با نتایج تجربی بیشتر هم می گردد. هلالی و همکاران [۱۱] افزودن آب دریا، آب شرب، آب رودخانه و روغن موتور به آب مبدل حرارتی و اثر آن بر روی انتقال حرارت را بررسی کردند. آنها نشان دادند افزودن مایعات موجب کاهش شدید نرخ انتقال حرارت جوششی می گردد. همت خانلو [۱۲] جوشش تک حالت در راهگاه آب موتور را با استفاده از نرم افزار فایر<sup>۳</sup> و الگوهای چن و BDL بررسی کردند. آنها نشان دادند که الگوی چن همخوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. در ادامه تورگروسا [۱۳] جوشش مادون سرد در شرایط کاری موتور را بررسی کرد و نشان داد که رابطه چن در دماهای پایین سطح همخوانی خوبی با نتایج تجربی دارد ولی در دماهای زیادی سطح، انحراف قابل توجه است. یو [۱۴] جوشش مادون سرد در شرایط کاری دیزل سنگین را با مخلوط ۵۰-۵۰ و ۴۰-۶۰ آب و اتیلن گلیکول بررسی کرد و ضریب انتقال حرارت موتور را بدست آوردند. در ادامه هوا [۱۵] برای شبیه سازی جوشش جریان راهگاه آب موتور احتراق داخلی از یک بدنه مکعب مستطیلی چدنی استفاده کرد و با تغییر دما، سرعت و فشار آب، به بررسی رفتار شار حرارتی جوشش جریان مادون سرد پرداخت.

هدف از انجام این تحقیق اندازه گیری دمای سطح، ضریب انتقال حرارت جابجایی و جوشش در یک راهگاه با سطح مقطع مستطیل با ثابت نگه داشتن شار حرارتی است. برای رسیدن به این هدف تجهیزات آزمایشگاهی طراحی شده است که در شکل (۱) نشان داده شده است. سرعت جریان با تنظیم شار تلمبه و دمای توده سیال با گرمکن های غوطه ور (گرمکن های اول تا سوم) تنظیم می شود.

با توجه به اینکه یکی از نقاط داغ که امکان جوشش در آن وجود دارد، ناحیه پل دریچه<sup>۴</sup> دود<sup>۴</sup> است، از این رو شرایط دما و سرعت سیال خنک کننده در روش حاضر مشابه با شرایط موتور ملی در نظر گرفته شده است. گرما ساز اصلی، گرمایش موضعی مورد نیاز را بر روی دیوار پایینی راهگاه ایجاد می کند (منطقه آزمون در شکل ۱). دمای مس توسط دماسنج هایی که در آن نصب شده، به طور لحظه ای ثبت می شود و توسط نرم افزار LabView در رایانه ذخیره می شود. با استفاده از این داده ها می توان ضریب انتقال حرارت و دمای سطح را با تغییر متغیرهای سرعت و دمای توده سیال محاسبه کرد. برای بررسی شروع جوشش، راهگاه شفاف توسط دوربین عکس برداری شده است. به علاوه برای

3 Fire

4 Valve bridge

1 Nucleate Boiling

2 BDL

در شکل (۲) نقاط و نواحی مهم در فرآیند انتقال حرارت در راهگاه آب به تصویر کشیده شده است. تحت شارحرارتی ثابت، دمای سطح به موازات دمای سیال افزایش می‌یابد.

قبل از شروع جوشش (ناحیه بین نقاط A و G) انتقال حرارت از نوع جابجایی اجباری است. در نقطه B، دمای سطح به دمای اشباع سیال می‌رسد. به علت اثر هیستریزیس<sup>۱</sup> سطح، حباب‌ها بلافاصله پس از رسیدن دمای سطح به دمای اشباع تشکیل نمی‌گردند، تا اینکه در نقطه C، اولین حباب مشاهده می‌گردد که معرف آغاز فرآیند جوشش<sup>۲</sup> است. بین نقاط C و D، حباب‌هایی ایجاد می‌شود که منجر به کاهش دمای سطح می‌گردد. از این پس سهم انتقال حرارت ناشی از جوشش بیشتر از جابجایی اجباری خواهد بود.

در نقطه E انتقال حرارت جوشش به علت تولید حباب‌های بسیار زیاد بر انتقال حرارت جابجایی غالب می‌گردد و به این ناحیه که از نقطه E آغاز می‌گردد، ناحیه جوشش کاملاً توسعه‌یافته<sup>۳</sup> گویند. در نتیجه به علت افزایش شار انتقال حرارت از سطح، دمای سطح در ناحیه جوشش کامل توسعه یافته به طور تقریبی ثابت باقی می‌ماند و یا حتی می‌تواند کاهش یابد.

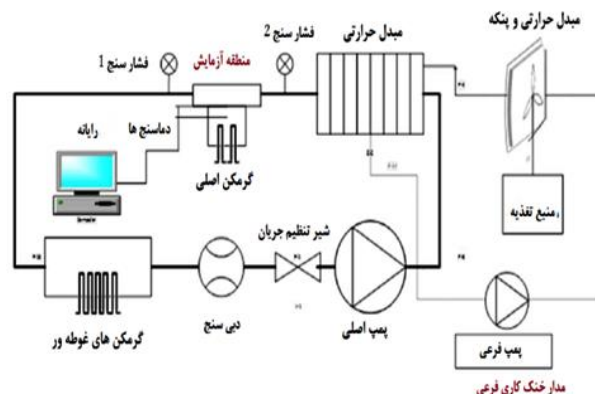
اگر سرعت تشکیل حباب از سرعت جدا شدن آن از دیوار بیشتر باشد باعث می‌شود تا حباب‌ها به هم متصل شوند و در نهایت یک لایه بخار روی دیوار شکل بگیرد. به این پدیده تشکیل لایه بخار روی سطح، جوشش لایه‌ای گویند. همچنین به ناحیه گذر از حالت جوشش هسته‌ای به جوشش لایه‌ای نیز ناحیه گذر گویند. این لایه هوا به علت دارا بودن ضریب هدایت پایین همانند عایق عمل کرده و موجب می‌شود تا دمای دیوار به شدت بالا برود.

در شبیه‌سازی انتقال حرارت و هیدرودینامیک سیال باید اثر متقابل حباب، سیال و دیواره جامد دیده شود. می‌توان این اثر متقابل را به چهار دسته زیر تقسیم‌بندی کرد: اثر متقابل حرارتی حباب و سطح جامد، اثر متقابل حرارتی هسته تولید حباب در دیواره جامد، اثر متقابل دینامیکی حباب و سیال، اثر متقابل دینامیکی حباب‌ها. این اثرها در محاسبات روابط انتقال حرارت جوشش استفاده می‌شوند.

### ۳- تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات مورد استفاده در این مجموعه آزمایشگاهی شامل لوله‌هایی از جنس گالوانیزه، تلمبه برای چرخش سیال در مدار بسته، شارسنج برای خوانش شار جریان، منبع انبساط برای کنترل فشار، گرماسازهای غوطه‌ور برای افزایش دمای توده سیال، گرماساز برای حرارت دهی موضعی سیال است. همچنین مجموعه خنک‌کاری جداگانه برای تنظیم کردن دمای توده سیال که در بر گیرنده دو مبدل حرارتی و تلمبه است،

بررسی دقیق تر توزیع دما در جامد و سیال، شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار فلوئنت انجام گرفته است.

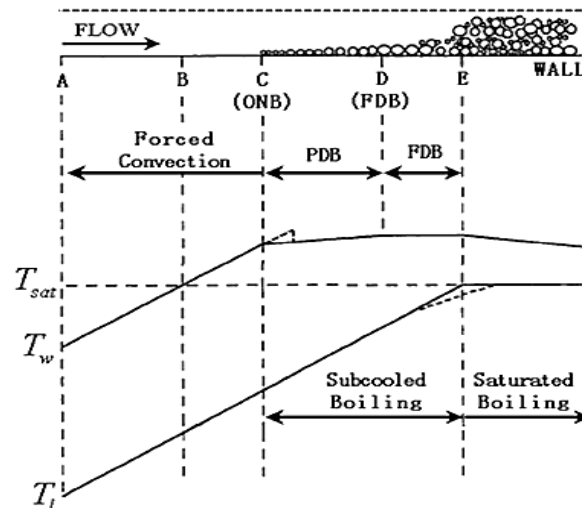


شکل ۱: شمای تجهیزات آزمایشگاهی جوشش جریان

### ۲- مروری پدیده جوشش

با توجه به زیاد بودن ضریب انتقال حرارت جوشش نقطه‌ای نسبت به انتقال حرارت جابجایی اجباری، بررسی و تحلیل آن همواره مورد توجه محققین بوده است. با گذر دمای سطح از دمای اشباع سیال تغییر حالت از مایع به بخار اتفاق می‌افتد. اگر نیروهای وارد بر حباب به گونه‌ای باشد که باعث جدایی از دیوار شود، حباب وارد ناحیه‌ای با دمای پایین‌تر از دمای اشباع شده و چگالیده می‌گردد.

به کمک این پدیده انرژی نهان برای تغییر حالت را از دیوار جذب نموده و بعد به لایه‌های بالایی منتقل می‌گردد (شکل ۲). با افزایش دمای دیوار، تعداد حباب‌های ایجاد شده در مجاورت آن افزایش یافته که این موجب افزایش چشمگیر مقدار انتقال حرارت می‌گردد.



شکل ۲: نمودارهای دمای دیواره داغ و سیال در جوشش مادون سرد [۶]

<sup>3</sup> Fully Developed Boiling

<sup>1</sup> Hysteresis Effect

<sup>2</sup> Onset of Nucleate Boiling (ONB)

فشارسنج ها و فضای مساوی بین جریان بالادستی و پایین دستی بنا نهاده شده است.

فرض چهارم، فرض انتقال حرارت یک بعدی در قطعه مسی در نقاطی که دماسنج نصب شده است، است. این فرض امکان محاسبه شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت را به ما می دهد. در قسمت شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی خواهیم دید که این فرض به علت ضخامت و فاصله کم بین دماسنج ها فرض به جایی است.

### ۵- محاسبه شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت

از آنجا که امکان ثبت نتایج برحسب زمان توسط نرم افزار LabVIEW وجود دارد، دمای دماسنج ها ۱ تا ۴ و سیال ورودی می تواند خوانش شود. فاصله بین دماسنج های دوم و چهارم ( $T_2$  و  $T_4$  در شکل ۴) برابر  $l_2 = 5 \text{ mm}$  و فاصله بین دماسنج دوم و سطح بالایی مس برابر  $l_1 = 1 \text{ mm}$  است.  $k$  ضریب هدایت حرارتی مس خالص است که با دما تغییر می کند. مقدار آن بر حسب دما در جدول (۱) نشان داده شده است.  $q''$  شار حرارتی،  $h$  ضریب انتقال حرارت،  $T_s$  دمای سطح مس در تقاطع خط مستقیم بین دماسنج های دوم و چهارم با سطح مس و  $T_f$  دمای سیال است. شار حرارتی از معادله ۱ و ضریب انتقال حرارت از معادله ۲ بدست می آید. دمای سطح از برون یابی دما در دماسنج های دوم و چهارم طبق معادله ۳ محاسبه می گردد.

$$q'' = k \frac{T_2 - T_4}{l_2} \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (1)$$

$$h = \frac{q''}{T_s - T_f} \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) \quad (2)$$

$$T_s = T_2 - \frac{l_1}{l_2} (T_4 - T_2) \quad (3)$$

جدول ۱. ضریب هدایت حرارتی مس

درجه سانتیگراد	۲۵	۱۲۵	۲۲۵
$k$ (W/m.K)	۴۰۱	۴۰۰	۳۹۸

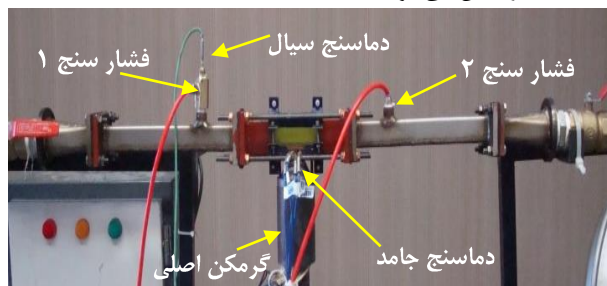
### ۶- شرایط آزمایش

فشار ۱،۲ بار ثابت نگه داشته شده است و مقدار شار در این پژوهش برابر با ۳،۵۶، ۷،۱۲، ۱۰،۶۹ و ۲۴،۹۴ لیتر در دقیقه است که متناظر با سرعت های ۰،۱، ۰،۲، ۰،۳، ۰،۷ و ۱ متر در ثانیه در نظر گرفته شده است. دمای سیال ورودی به منطقه آزمون برابر با  $85^\circ\text{C}$  لحاظ می شود.

بیشینه شار حرارتی در این پژوهش  $95 \text{ W/cm}^2$  است و عدم قطعیت در دماسنج های نوع K برابر با  $\pm 1^\circ\text{C}$  است. عدم قطعیت در سرعت اندازه گیری شده در منطقه آزمون برابر با ۰،۰۵ متر در ثانیه و مقدار خطای فشارسنج در مقیاس کامل کمتر از ۰،۲۵٪ فرض می گردد. بر اساس عدم قطعیت های ذکر شده، مقدار عدم قطعیت شار حرارتی برابر با ۵٪ شار حرارتی اندازه گیری شده است.

وجود دارد (شکل ۱). مجموعه ای برای داده برداری و ثبت داده های فشار، دما و شار جریان در این مجموعه بکار گرفته شده است.

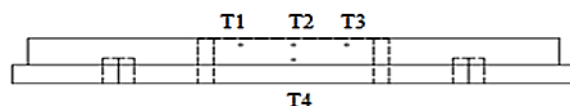
منطقه آزمایش مهمترین قسمت این چرخه است. این منطقه دارای یک راهگاه جریان مستطیل شکل با سه طرف شیشه ای شفاف و یک طرف سطح مسی است. همچنین این منطقه دارای سه منطقه گذار با شیب ملایم است که سبب تغییر هندسه از دایره به مستطیل می گردد که در شکل (۳) نشان داده شده است. وجود منطقه ورودی درون چرخه سبب بوجود آمدن جریان توسعه یافته با شکل سهمی قبل از رسیدن سیال به منطقه گرمایش می شود.



شکل ۳: منطقه آزمون

در مناطق داده برداری، فشارسنج هایی با رعایت فاصله مناسب نسبت به یکدیگر قرار گرفته است. برای اندازه گیری دمای ورودی به منطقه گرمایش یک عدد دماسنج در قسمت بالا دست جریان قرار گرفته (شکل ۳) و از یک گرمکن موضعی با توان متغییر تا ۶ kW برای افزایش دما استفاده شده است.

نحوه قرارگیری دماسنج های ۱ تا ۴ برای اندازه گیری دمای سطح و محاسبه شار حرارتی در شکل ۴ نشان داده شده است که سه دماسنجی در نزدیکی سطح و یکی در پایین به صورت T شکل اند.



شکل ۴: نحوه قرارگیری دماسنج ها در پوسته مسی

### ۴- فرضیات

فرض اول این است که اندازه گیری ها در حالت پایا انجام می گیرد. برای رسیدن به حالت پایا و اطمینان از پایداری سیستم حدود ۲۰ دقیقه زمان لازم است. گرمکن های غوطه ور اول تا سوم دمای سیال را گرم میکنند و از طریق مبدل حرارتی و تبادل گرما با آب خنک دمای سیال به حالت پایا می رسد (شکل ۱). بعد از روشن کردن گرماساز موضعی، حرارت به پوسته مس منتقل می شود و دمای آن افزایش می یابد (شکل ۳). فرض دوم این است که دمای توده سیال در تماس با مس برابر دمای ورودی به منطقه آزمون در نظر گرفته می شود. چون فاصله بین دماسنج و سطح حرارت دهی کم است این فرض قابل قبول است. از این فرض برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی و دمای محیط استفاده می گردد. فرض سوم آن است که فشار در منطقه آزمون برابر با میانگین فشار در دو سمت منطقه آزمون است. این فرضیه بر اساس افت فشار خطی بین

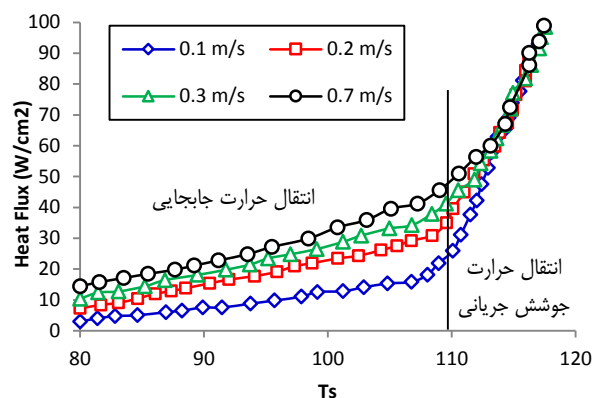
## ۷- آزمایش تجربی

### آزمایش تجربی برای آب مقطر

در این قسمت از آب مقطر به عنوان سیال کاری استفاده شده است و تأثیر تغییر سرعت بر روی دمای سطح و ضریب انتقال حرارت بررسی می‌شود. برای انجام این آزمایش‌ها دمای ورودی  $85^{\circ}\text{C}$  و فشار  $1,2\text{ bar}$ ، لحاظ می‌گردد.

شکل (۵) اثر تغییر سرعت سیال روی دمای سطح با تغییر شار حرارتی را نشان می‌دهد. محور افقی دمای سطح و محور عمودی شار حرارتی را نشان می‌دهد. سرعت بین  $0,1$  تا  $0,7$  متر در ثانیه و شار حرارتی در بازه  $5\text{ W/cm}^2$  تا  $100$  تغییر می‌کند.

برای هر سرعت معادله‌ای خطی بین دمای سطح و شار حرارتی تا قبل از شروع جوشش وجود دارد. بنابراین می‌توان گفت که انتقال حرارت جابجایی به متغیر سرعت وابسته است که در مراجع انتقال حرارت با متغیر عدد رینولدز بیان می‌شود. برای تمامی سرعت‌ها دمای سطح بین  $80$  تا  $110$  درجه سانتیگراد تغییر می‌کند ولی با افزایش سرعت به شار حرارتی بیشتری برای افزایش دمای سطح نیاز است.



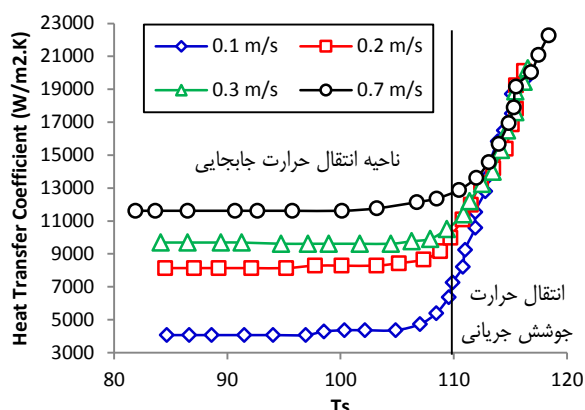
شکل ۵: تأثیر تغییر سرعت آب مقطر روی شار حرارتی و دمای سطح در دمای ورودی  $85^{\circ}\text{C}$  و فشار  $1,2\text{ bar}$

در سرعت  $0,1\text{ m/s}$  برای رسیدن به دمای  $110^{\circ}\text{C}$  باید شار حرارتی  $20\text{ W/cm}^2$  و در سرعت  $0,7\text{ m/s}$  شار حرارتی  $41\text{ W/cm}^2$  را تولید نمود. اما بعد از شروع جوشش، برای سرعت‌های  $0,1$  تا  $0,7\text{ M/S}$  شار حرارتی تابع دمای سطح و مستقل از سرعت است. به این صورت که با افزایش شار حرارتی ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند. این مشاهده با روابط موجود برای محاسبه شارحرارتی جوشش مانند معادلات چن و BDL همخوانی دارد. مشاهده مهم دیگر مقایسه شیب افزایش شار حرارتی در مقابل دما است. در ناحیه جوشش، اختلاف دمای کم منجر به افزایش شار حرارتی زیاد می‌شود. در ناحیه جوشش جریانی شیب افزایش شار حرارتی در مقابل تغییر دمای سطح بیش از دو برابر مقدار آن در ناحیه انتقال حرارت جابجایی است.

در ناحیه انتقال حرارت جابجایی افزایش شار حرارتی از  $12,6\text{ W/cm}^2$  به  $25,9$  منجر به افزایش دما از  $90^{\circ}\text{C}$  به  $100$  می‌گردد. یعنی افزایش  $13,3\text{ W/cm}^2$  شار حرارتی باعث افزایش دمای  $10$  درجه‌ای می‌شود.

در ناحیه انتقال حرارت جوشش جریانی افزایش شار حرارتی از  $W/cm^2$   $60$  به  $72$  منجر به افزایش از  $110^{\circ}\text{C}$  به  $115$  خواهد شد. یعنی افزایش  $W/cm^2$   $12$  شار حرارتی افزایش دمای  $5$  درجه سانتیگراد را نتیجه می‌دهد. مطلب دیگری که در منحنی‌ها نشان داده شده است با افزایش سرعت سیال، شیب منحنی‌ها افزایش پیدا می‌کند و فرآیند جوشش و تشکیل حباب با تاخیر صورت می‌گیرد که این یک پدیده شناخته شده در جوشش جریانی است.

در شکل (۶) اثر تغییر سرعت سیال روی دمای سطح و ضریب انتقال حرارت بررسی شده است. محور افقی دمای سطح و محور عمودی ضریب انتقال حرارت را نشان می‌دهد. سرعت بین  $0,1$  تا  $0,7$  متر در ثانیه تغییر می‌کند.



شکل ۶: تأثیر تغییر سرعت آب مقطر روی ضریب انتقال حرارت و دمای سطح در دمای ورودی  $85^{\circ}\text{C}$  و فشار  $1,2\text{ bar}$

با تغییر سرعت، ضریب انتقال حرارت جابجایی تا قبل از شروع جوشش تغییر چندانی نمی‌کند. بنابراین ضریب انتقال حرارت جابجایی قبل از آغاز جوشش مستقل از دمای سطح است. برای تمامی سرعت‌ها دمای سطح بین  $80$  تا  $110$  درجه سانتیگراد تغییر می‌کند این درحالی است که افزایش سرعت، افزایش ضریب انتقال حرارت را نتیجه می‌دهد. در سرعت  $0,1\text{ m/s}$  مقدار ضریب انتقال حرارت  $4733\text{ W/m}^2.\text{K}$  و در سرعت  $0,7\text{ m/s}$  مقدار ضریب انتقال حرارت  $12130\text{ W/m}^2.\text{K}$  است. بعد از شروع جوشش، ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی به طور ناگهانی شروع به افزایش می‌کند. روشن است که با افزایش سرعت شروع پدیده جوشش دیرتر اتفاق می‌افتد زیرا حباب‌های بخار که در نزدیکی سطح تشکیل می‌شوند، از سطح جدا شده و در اثر نیروهای شناوری و سرعت سیال به ناحیه توده جریان وارد می‌شوند که دمای آنها از دمای اشباع پایین تر است و به این ترتیب حباب‌ها چگالیده خواهند شد.

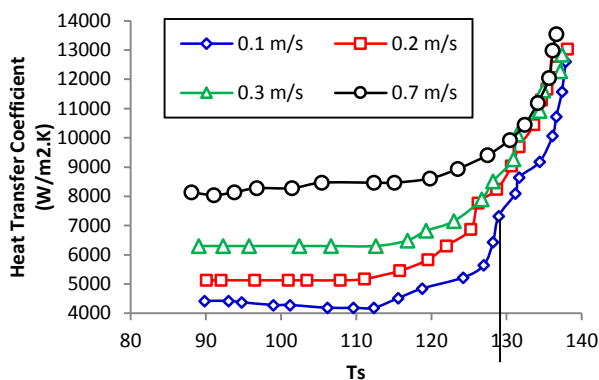
بعد از شروع جوشش جریانی، ضریب انتقال حرارت مستقل از سرعت و وابسته به دمای سطح است و تغییر دمای اندکی منجر به افزایش قابل توجه در ضریب انتقال حرارت می‌گردد. به طور نمونه افزایش دمای سطح از  $100$  به  $115$  درجه سانتیگراد در سرعت  $0,1\text{ m/s}$  باعث افزایش ضریب انتقال حرارت از  $6361\text{ W/m}^2.\text{K}$  به  $17899$  و

۵۲،۱ نیاز است. این در حالی است که در دمای  $127^{\circ}\text{C}$  آب مقطر در ناحیه جوشش قرار دارد.

بعد از شروع جوشش در شکل (۷) در دمای  $127^{\circ}\text{C}$ ، برای سرعت‌های  $0.1$  تا  $0.7$  m/s، شار حرارتی تابع دمای سطح است و سرعت اثر کمی دارد. هر چند که در دمای سطح یکسان، با افزایش سرعت به شار حرارتی بیشتری نیاز است. در صورتی که در مقایسه با ناحیه جوشش در شکل (۵) که در دمای سطح یکسان، شار حرارتی مستقل از سرعت بوده است در مخلوط آب مقطر و اتیلن گلیکول در شکل (۷) با افزایش سرعت افزایش محسوسی روی شار حرارتی رخ می‌دهد.

مطلب مهم دیگر مقایسه شیب افزایش شار حرارتی در مقابل دما است. در ناحیه جوشش، اختلاف دمای کم منجر به افزایش شار حرارتی زیاد می‌گردد. در ناحیه جوشش جریانی شیب افزایش شار حرارتی در مقابل تغییر دمای سطح بیش از دو برابر مقدار آن در ناحیه انتقال حرارت جابجایی است. این نتیجه با نتیجه شکل (۵) که مربوط به آب مقطر است، همخوانی دارد.

در شکل (۸) اثر تغییر سرعت مخلوط روی دمای سطح و ضریب انتقال حرارت بررسی شده است. محور افقی دمای سطح و محور عمودی ضریب انتقال حرارت است. سرعت بین  $0.1$  تا  $0.7$  m/s تغییر می‌کند. با تغییر سرعت ضریب انتقال حرارت جابجایی تا قبل از شروع جوشش در دمای  $127^{\circ}\text{C}$  تغییر چندانی نمی‌کند. برای تمامی سرعت‌ها دمای سطح بین  $80$  تا  $127^{\circ}\text{C}$  تغییر می‌کند ولی با افزایش سرعت ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

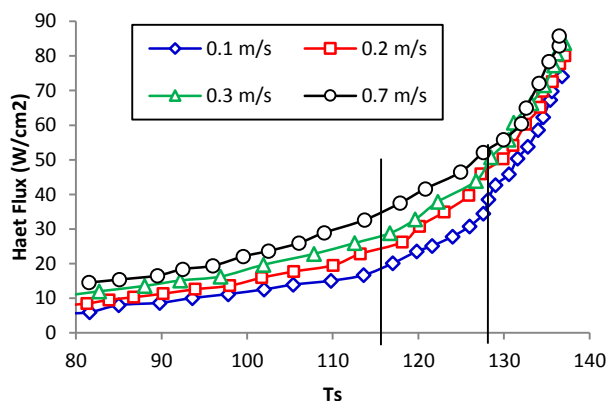


شکل ۸: تأثیر تغییر سرعت مخلوط آب مقطر و اتیلن گلیکول روی ضریب انتقال حرارت و دمای سطح در دمای ورودی  $85^{\circ}\text{C}$  و فشار  $1.2$  bar

در سرعت  $0.1$  m/s مقدار ضریب انتقال حرارت  $4188$  W/m<sup>2</sup>.K و در سرعت  $0.7$  m/s برابر  $8941$  W/m<sup>2</sup>.K است. اگر مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی مخلوط آب مقطر و اتیلن گلیکول با مقدارهای متناظر آن برای آب مقطر خالص مقایسه شود دیده می‌شود که ضریب انتقال حرارت جابجایی بین  $12$  تا  $25$  درصد افت کرده است. بعد از شروع جوشش، ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی برای مخلوط به طور ناگهانی شروع به افزایش می‌کند.

سرعت  $0.7$  m/s باعث افزایش ضریب انتقال حرارت از  $W/m^2.K$  به  $17899$  خواهد شد.

نتایج آزمایش تجربی برای آب مخلوط آب مقطر- اتیلن گلیکول از آنجا که از مخلوط  $50-50$  حجمی آب و اتیلن گلیکول برای خنک‌کاری استفاده می‌شود، اثر تغییر سرعت این مخلوط بر روی شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. دمای ورودی  $85^{\circ}\text{C}$  و فشار  $1.2$  bar در نظر گرفته شده است. افزودن اتیلن گلیکول به آب مقطر باعث بالا رفتن نقطه جوش آن می‌شود. در شکل (۷) اثر تغییر سرعت مخلوط روی دمای سطح با تغییر شار حرارتی بررسی شده است. محور افقی دمای سطح و محور عمودی شار حرارتی است. سرعت بین  $0.1$  تا  $0.7$  m/s تغییر می‌کند و شار حرارتی بین  $5$  تا  $80$  W/cm<sup>2</sup> متغیر است. برای مخلوط آب مقطر و اتیلن گلیکول، در هر سرعت یک معادله تقریباً خطی بین دمای سطح و شار حرارتی تا قبل از شروع جوشش وجود دارد. شیب این معادله خطی بین  $80$  تا  $113^{\circ}\text{C}$  و بین  $113$  تا  $127^{\circ}\text{C}$  متفاوت است، یعنی در محدوده دمایی  $80$  تا  $113^{\circ}\text{C}$  با نرخ بیشتری افزایش پیدا می‌کند. که علت رفتار آن، وجود اتیلن گلیکول است.



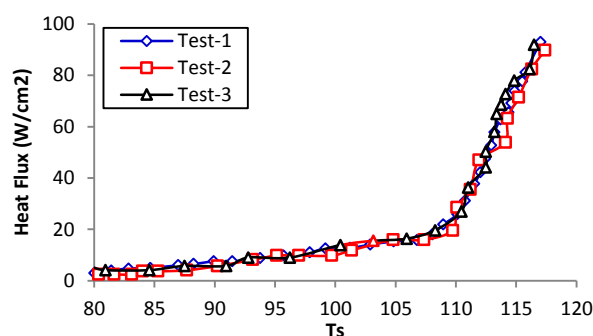
شکل ۷: تأثیر تغییر سرعت آب مقطر- اتیلن گلیکول روی شار حرارتی و دمای سطح در دمای ورودی  $85^{\circ}\text{C}$  و فشار  $1.2$  bar برای تمامی سرعت‌ها دمای سطح بین  $80$  تا  $127^{\circ}\text{C}$  و در دو محدوده خطی تغییر می‌کند ولی با افزایش سرعت، شار حرارتی بیشتری برای افزایش دمای سطح مورد نیاز است. در سرعت  $0.1$  m/s برای رسیدن به دمای  $110^{\circ}\text{C}$  به شار حرارتی  $15$  W/cm<sup>2</sup> و در سرعت  $0.7$  m/s به شار حرارتی  $28$  W/cm<sup>2</sup> نیاز است. اگر این مقادیر با سرعت‌های متناظر در شکل (۵) که برای آب مقطر است مقایسه شود، مشاهده می‌گردد برای رسیدن به دمای سطح یکسان در مخلوط آب مقطر و اتیلن گلیکول به شار حرارتی کمتری نسبت به آب مقطر خالص نیاز می‌شود.

با مشاهده شکل‌های (۵) و (۷) در می‌یابیم که اگر چه افزودن اتیلن گلیکول دمای جوش را افزایش می‌دهد ولی مقدار انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. در سرعت  $0.1$  m/s برای رسیدن به دمای  $127^{\circ}\text{C}$  به شار  $34.4$  W/cm<sup>2</sup> و در سرعت  $0.7$  m/s به شار حرارتی  $W/cm^2$

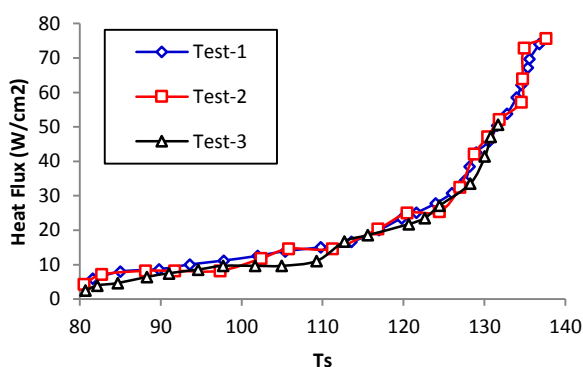
افزایش دمای سطح از  $130^{\circ}\text{C}$  تا  $140^{\circ}\text{C}$  در سرعت  $0.1\text{ m/s}$  باعث افزایش ضریب انتقال حرارت از  $7323\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  به  $12988\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  و در سرعت  $0.7\text{ m/s}$  باعث افزایش ضریب انتقال حرارت از  $9929\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  به  $12988\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  می‌شود. آب مقطر خالص در این دما وارد حالت جوشش لایه‌ای شده و از این رو قابل مقایسه با مخلوط آب مقطر و اتیلن گلیکول که نقطه جوش دارد نیست زیرا در جوشش لایه‌ای ضریب انتقال حرارت جوشش به طور قابل توجهی افت پیدا می‌کند.

#### تکرارپذیری

در انجام این پژوهش برای بدست آوردن داده‌ها و منحنی‌های قابل اعتماد آزمایشات طی سه مرحله انجام گرفته است که به عنوان نمونه نمودار شار حرارتی در مقابل دمای سطح برای سرعت  $0.1\text{ m/s}$  و در دمای ورودی  $85^{\circ}\text{C}$  و فشار  $1.2\text{ bar}$  برای آب مقطر و مخلوط آب مقطر و اتیلن گلیکول در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. با مقایسه نمودارها روشن است که نتایج آزمایش‌ها که در سه زمان متفاوت گرفته شده است، تفاوت کمی با هم دارند. بنابراین شرایط محیطی اثر قابل صرف نظری روی نتایج داشته است.



شکل ۹: اثر تکرار پذیری آزمایش آب مقطر در سرعت  $0.1\text{ m/s}$  روی شار حرارتی و دمای سطح



شکل ۱۰: اثر تکرار پذیری آزمایش آب مقطر- اتیلن گلیکول در سرعت  $0.1\text{ m/s}$  روی شار حرارتی و دمای سطح

#### تحلیل خطا

خطا از منابع مختلفی مانند خطا در اندازه‌گیری توسط دماسنج‌ها (دمای جامد و دمای توده سیال)، فشارسنج و شارسنج است.

#### عدم قطعیت در شار جریان

نرخ شار جریان اندازه‌گیری شده توسط شارسنج بین  $3.56\text{ lit/min}$  تا  $24.94\text{ lit/min}$  است که حدود  $0.1\text{ lit/min}$  نوسان دارد. بنابراین  $0.5\%$  خطا در خوانش شار وجود دارد.

#### عدم قطعیت در دمای توده سیال

دمای توده سیال در ورودی منطقه آزمایش قرار دارد. دماسنج از نوع PT100 است که خطای آن  $1$  درجه سانتیگراد است (محدوده دمای سیال بین  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $90^{\circ}\text{C}$  است که از محدوده اندازه‌گیری دمای دماسنج کمتر است) بنابراین مقدار خطا کمتر از  $1$  درصد است.

#### عدم قطعیت در دمای جامد (مس)

دماسنج از نوع K-type است که خطای آن حدود  $1$  درجه با محدوده دمایی کمتر از  $1200\text{ K}$  است. بنابراین مقدار خطا کمتر از  $0.2\%$  است.

#### عدم قطعیت در خوانش فشار

فشارسنج از نوع DPI610 است که توانمندی خوانش فشار مطلق تا  $2.5\text{ bar}$  را دارد و خطای خوانش آن حدود  $0.2\%$  است.

#### تصاویر واقعی از آزمایش‌های تجربی

در این پژوهش با عکس برداری از مخلوط آب مقطر- اتیلن گلیکول در سرعت‌های  $0.1\text{ m/s}$  تا  $1$  در دمای ورودی  $85^{\circ}\text{C}$  و در دمای سطح  $133^{\circ}\text{C}$ ، فرآیند جوشش و تشکیل حباب بررسی شده است. شکل (۱۱) دیده می‌شود که با افزایش سرعت از  $0.1\text{ m/s}$  تا  $1$  حبابهای بخار سریعتر از سطح جدا شده و فاصله بین حباب‌ها افزایش پیدا می‌کند.

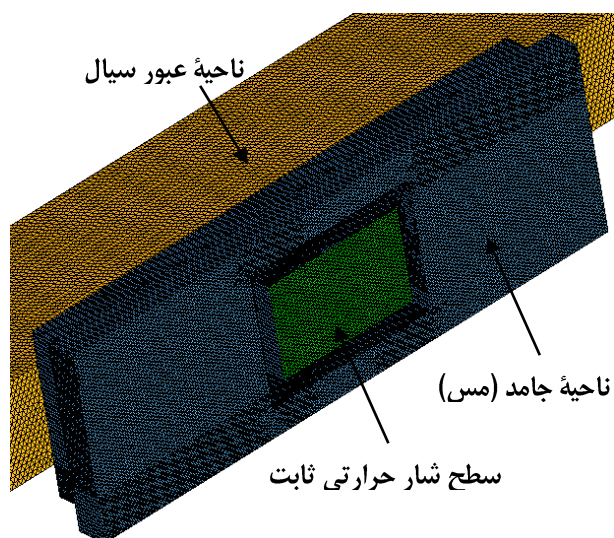


شکل ۱۱: تصویر برداری از فرآیند تشکیل حباب برای مخلوط آب مقطر- اتیلن گلیکول در سرعت‌های  $0.1\text{ m/s}$  تا  $1$  و دمای سطح  $133^{\circ}\text{C}$

#### مقایسه نتایج تجربی با پژوهش تجربی پیشین

در این پژوهش برای اطمینان از درستی آزمایشات صورت گرفته، یکی از منحنی‌های بدست آمده در این آزمایشات را با منحنی ارائه شده در آزمایشات لی و اونیل [۱۶] مقایسه می‌کنیم.

در شکل (۱۲) دو منحنی آب مقطر در محدوده کاری  $72^{\circ}\text{C}$  -  $\text{m/s}$  و  $70^{\circ}\text{C}$  -  $0.5\text{ m/s}$  با یکدیگر مقایسه شده‌اند، همانطور که در



شکل ۱۴: شبکه بندی منطقه آزمون

#### معادلات حاکم

با توجه به اینکه کوپل همزمان حرارت در جامد و سیال در حل وجود دارد و با توجه به محدوده سرعت از نوع آرام است. معادلات حاکم بصورت زیر است:

معادله بقای جرم:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

معادله بقای اندازه حرکت:

$$u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 V \quad (2)$$

معادله بقای انرژی:

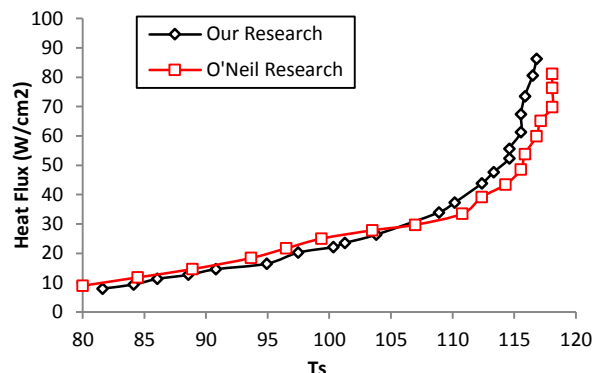
$$\rho c_v \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \nabla^2 T \quad (3)$$

در حل به روش حجم محدود<sup>۱</sup> برای جسم جامد تنها معادله انتقال حرارت هدایت حل می‌شود. با توجه به اینکه ماهیت جوشش جریانی دوحالتی است، بنابراین برای محاسبه ضریب انتقال حرارت لازم است شبیه‌سازی نیز بصورت دو حالتی انجام شود یا با استفاده از معادلات موجود مانند معادله<sup>۲</sup> ضریب انتقال حرارت تصحیح شود. در اینجا به علت اینکه حل جریانه‌های دو حالتی پیچیدگی خود را دارد، از روش دوم استفاده می‌کنیم.

روزنرف و چوی معتقد بودند که شارحرارتی جوشش جریانی هسته‌ای را می‌توان از جمع آثار و یا مجموع مقادیر شارحرارتی جابجایی اجباری و شارحرارتی جوشش نقطه‌ای بدست آورد [۱۷].

چن [۱۷] برای محاسبه انتقال حرارت پیشنهاد کرد که انتقال حرارت جوشش جریانی از مجموع دو ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری و ضریب انتقال حرارت جوشش نقطه‌ای بدست می‌آید:

شکل نشان داده شده است منحنی‌ها همخوانی خوبی با یکدیگر دارند و تفاوت مقادیر آنها بعد از فرآیند جوشش است.

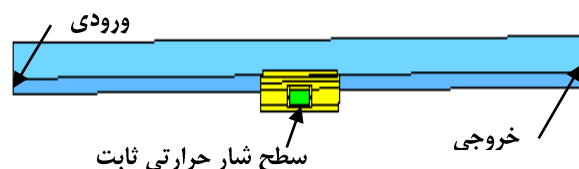


شکل ۱۲: مقایسه منحنی آب مقطر پژوهش حاضر با آزمایش قبلی انجام شده توسط O'Neil

با توجه به منحنی‌های نشان داده شده در شکل (۱۲) هر دو منحنی تقریباً به یک شکل بعد از شروع جوشش تغییر شیب می‌دهند، اختلاف بوجود آمده میان دو منحنی به علت تفاوت در نقطه شروع جوشش اتیلن گلیکول است به این صورت که نقطه شروع جوشش در اتیلن گلیکول مورد استفاده در آزمایشات لی و اونیل [۱۳] دارای نقطه جوش °C ۱۲۹٫۴ و اتیلن گلیکول (ضدیخ بهران) مورد استفاده در این آزمایش دارای نقطه جوش °C ۱۱۰ است، از اینرو می‌توان نتیجه گرفت که نتایج آزمایشات انجام گرفته با درصد خطای قابل قبولی روبرو است.

#### ۸- شبیه‌سازی عددی

از آنجایی که شرایط انجام آزمایش تجربی و تعداد آنها محدود و پرهزینه است، از این رو شبیه‌سازی عددی برای مطالعه دقیقتر و وسیعتر اثر پدیده جوشش روی انتقال حرارت انجام شده است. برای شبیه‌سازی از نرم افزار فلونت استفاده شده است. هندسه منطقه آزمون در شکل (۱۳) نشان داده شده است. سطح مقطع عبور سیال ۱۸×۱۳ mm<sup>2</sup> است.



شکل ۱۳: هندسه منطقه آزمون

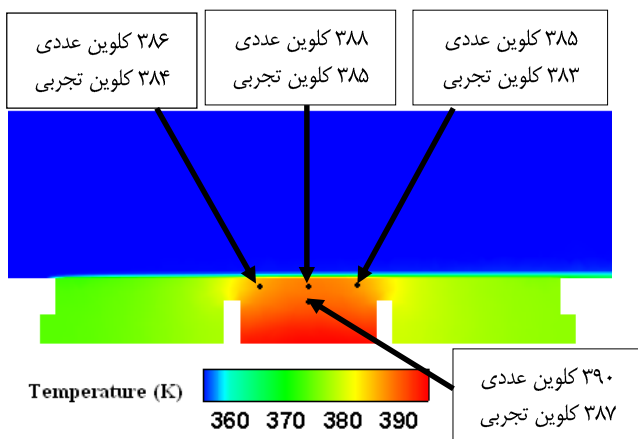
با توجه به اینکه طول منطقه آزمون حدود نیم متر است. از این رو شبکه بندی در شکل (۱۴) در نزدیکی ناحیه‌ای که شار حرارتی ثابت داده می‌شود، نشان داده شده است. تعداد کل خانه‌های شبکه که در بر گیرنده خانه‌های حجم ناحیه سیال و حجم مس است، ۲۲۷۳۷۹۷ است.

اختلاف دما بین شبیه‌سازی و نتیجه آزمایشگاهی ۲ تا ۳ درجه است که مقدار آن در نتیجه عددی بیشتر است. علت آن است که در شبیه‌سازی عددی، تمامی سطوح جامد بجز محلی که شار حرارتی اعمال می‌شود عایق در نظر گرفته شده است. در واقعیت این سطوح مقداری انتقال حرارت به محیط انجام می‌دهند که با در نظر نگرفتن آن، خطا وارد حل می‌شود.

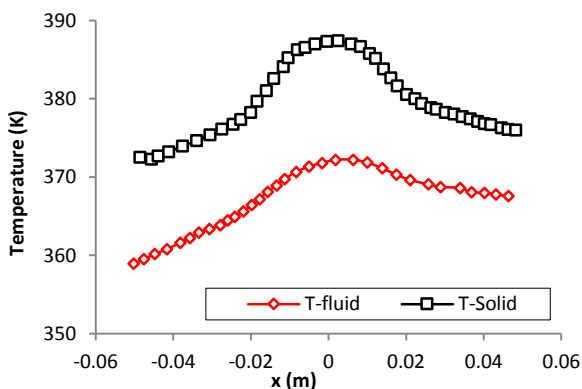
در شکل (۱۷) توزیع دمای سیال و جامد روی صفحه مشترک بین جامد و سیال نشان داده شده است. در ابتدای صفحه اختلاف دما ۱۳ درجه، در مرکز صفحه ۱۶ و در انتهای صفحه ۹٫۴ درجه است.

در شکل (۱۸) نمودار ضریب انتقال حرارت کلی در مرکز صفحه به شار حرارتی اعمال شده روی سطح شار حرارتی ثابت (در شکل (۱۴)) نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، همخوانی خوبی بین نتایج ضریب انتقال حرارت کلی با استفاده از روش BDL است.

نتایج حاکی از آن است که با افزایش شار حرارتی، اختلاف بین ضریب انتقال حرارت عددی و تجربی زیاد می‌گردد. این مطلب با ماهیت روابط جوشش نقطه‌ای همخوانی دارد. زیرا با افزایش شار حرارتی انتقال حرارت از ناحیه جوشش نقطه‌ای به سمت جوشش لایه‌ای پیش می‌رود.



شکل ۱۶: توزیع دمای سطح مقطع منطقه آزمون



شکل ۱۷: توزیع دمای سیال و جامد روی صفحه مشترک بین جامد و سیال

$$h_{total} = h_{mac} + h_{mic} \quad (4)$$

معادله چن [۲۶] (معادله (۵)) جوشش لایه‌ای بدین صورت ارائه شده است:

$$h_{mic} = 0.00122 \times \left( \frac{k_l^{0.79} c_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} h_{lv}^{0.24} \rho_v^{0.24}} \right) \Delta T_e^{0.24} \Delta P_e^{0.75} \quad (5)$$

برای جوشش جریانی این رابطه با ضریب تصحیح S برای اصلاح مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای استفاده می‌گردد. دو روش برای محاسبه ضریب تصحیح پیشنهاد شده است: روش چن و روش BDL. شبیه‌سازی پژوهش قبلی [۱۸] نشان داد که روش چن همخوانی بهتری با نتایج تجربی دارد. از این رو برای شبیه‌سازی حاضر از آن استفاده می‌کنیم که ضریب تصحیح به دینامیک حباب و میدان جریان پیرامون آن در نزدیکی دیوار بستگی دارد. توضیح معادله در مرجع [۱۸] وجود دارد.

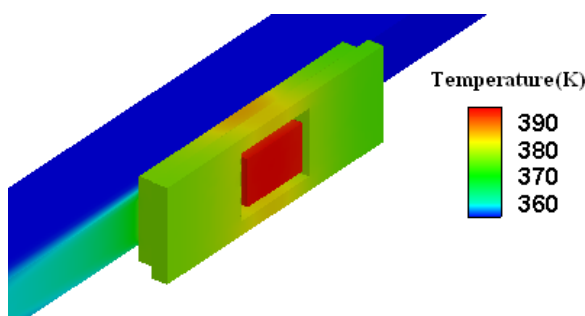
در نرم افزار فلونت معادله به صورت UDF به نرم افزار وارد شده است که ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان را با ضریب جوشش تصحیح شده جمع می‌کند.

#### شرایط مرزی

سیال آب مقطر و در ورودی سرعت ۰٫۱ m/s و دما ۸۵ °C در نظر گرفته شده است. در خروجی گرادیان سرعت و دمای صفر اعمال شده است. بر سطح شار حرارتی ثابت (شکل (۱۴))، شار ۳۰ W/cm<sup>2</sup> اعمال شده است و تمامی سطح‌های دیگر عایق فرض می‌شوند. جنس جامد مس انتخاب شده است.

#### نتایج شبیه‌سازی

در شکل (۱۵) توزیع دمای منطقه آزمون نشان داده شده است. مشخص است که بیشترین دما در محل اعمال شار حرارتی است که مقدار آن ۳۹۴ °K است.

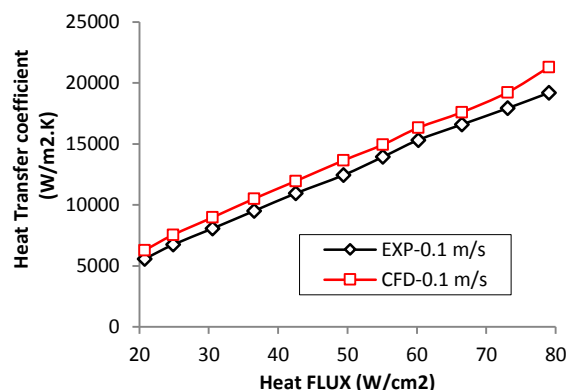


شکل ۱۵: توزیع دمای منطقه آزمون

در شکل (۱۶) در محل‌هایی که در اندازه‌گیری تجربی دامسج گذاشته شده است، دمای عددی با دمای آزمایشگاهی مقایسه شده که همخوانی خوبی بین نتایج وجود دارد.

## نتیجه گیری

در این تحقیق با ساخت یک تجهیزات آزمایشگاهی برای مطالعه جوشش جریان در راهگاه آب موتور ملی، اثر شار حرارتی در سرعت‌های مختلف روی دمای سطح و ضریب انتقال حرارت کلی بررسی شده است. همچنین برای مطالعه با جزئیات بیشتر اثر انتقال حرارت جوشش روی توزیع دما، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با نرم افزار فلونت نیز اضافه گردید. با مشاهده نمودارها و مقایسه بین داده های عددی و تجربی، نتایج زیر قابل ارایه است:



شکل ۱۸: نسبت شار حرارتی اعمال شده به ضریب انتقال حرارت در مرکز صفحه

- ✓ ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی برای آب مقطر خالص تنها تابعی از دمای سطح است ولی برای مخلوط آب مقطر و اتیلن گلیکول سرعت سیال نیز اثر دارد.
- ✓ با افزایش دمای ورودی آب مقطر خالص و مخلوط آب مقطر و اتیلن گلیکول، ضریب انتقال حرارت کاهش پیدا می‌کند.
- با عکس برداری از فرآیند جوشش می‌توان مشاهده کرد که با افزایش سرعت جدایش حبابهای بخار از سطح بیشتر شده و فضاهای خالی بین آنها افزایش پیدا کرده و سایز حباب های بوجود آمده کوچکتر می‌گردد. همچنین حباب های بوجود آمده در آب مقطر کوچکتر از حباب های بوجود آمده در مخلوط آب مقطر و اتیلن گلیکول است این اتفاق بیشتر در سرعت های زیاد قابل مشاهده است.

## فهرست علائم

$C_{pl}$	گرمای ویژه سیال (J/kg.K)
$H$	ضریب انتقال حرارت
$q''$	شار حرارتی ( $W/cm^2$ )
$k$	ضریب انتقال حرارت جامدات ( $W/m.K$ )
$k_l$	ضریب انتقال حرارت سیال ( $W/m.K$ )
$T$	دما °C
$T_f$	دمای توده سیال °C
$\Delta T$	اختلاف دما °C
$T_i$	دماسنج‌های ۱ تا ۴ که در پوسته مس نصب شده است
$l$	طول m
$\rho_l$	چگالی سیال ( $kg/m^3$ )
$\sigma$	کشش سطح سیال (N/m)
$\mu_l$	ضریب لزجت سیال ( $N/m^2.s$ )
$\rho_v$	چگالی بخار ( $kg/m^3$ )

## مراجع

- [1] Gollin, M., McAssey, E., and Stinson, C., Comparative performance of ethylene glycol/water and propylene glycol/water coolants in the convective and forced flow boiling regimes. SAE 950464, 1995.
- [2] McAssey E., Stinson, C., and Gollin, M. Evaluation of engine coolants under flow boiling conditions, Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, pp. 193–200, 1995.
- [3] Ambrogi, G., McAssey V., Cozzone, G., and Hoover, C., The effect of off-design operation on the thermal performance of propylene-glycol and ethylene-glycol engine coolants. SAE 971827, 1997.
- [4] Campbell, N., Tilley, D., MacGregor, S., and Wong, L., Incorporating nucleate boiling in a precision cooling strategy for combustion engines, SAE 971791, 1997.
- [5] Campbell, N., Hawley, J. G., Robinson, K., Joyce, S., and Haigh, M., Prediction for nucleate boiling – results

- ✓ فرآیند جوشش جریانی و تشکیل حباب با افزایش سرعت در دماهای زیادتری صورت می‌گیرد زیرا قابلیت جریان برای جدایش حباب های بخار از سطح بیشتر می‌شود.
- ✓ شار حرارتی در محدوده انتقال حرارت جابجایی (تک حالت) برای آب مقطر خالص با دمای سطح معادله خطی دارد و با افزایش سرعت سیال مقدار آن زیاد می‌شود. این در حالی است که برای مخلوط ۵۰-۵۰ آب و اتیلن گلیکول در محدوده انتقال حرارت جابجایی (تک حالت) با دو متغیر شار حرارتی و دمای سطح معادله خطی دارد.
- ✓ اضافه کردن اتیلن گلیکول به آب مقطر در دمای سطح یکسان شار حرارتی سطح را کاهش می‌دهد. با افزایش سرعت مخلوط مقدار شار حرارتی از سطح افزایش پیدا می‌کند.
- ✓ ضریب انتقال حرارت جابجایی برای آب مقطر خالص و مخلوط آب مقطر و اتیلن گلیکول تابع دمای سطح نیست و به سرعت سیال بستگی دارد. همچنین افزودن اتیلن گلیکول باعث کاهش ضریب انتقال حرارت در دمای یکسان می‌شود و با افزایش سرعت درصد کاهش آن بیشتر می‌گردد.
- ✓ با افزودن اتیلن گلیکول به آب مقطر دمای جوش آن گرمتر می‌شود.
- ✓ برای آب مقطر خالص و مخلوط آب مقطر و اتیلن گلیکول، شار حرارتی تابع دمای سطح است.

- [13] Torregrosa, A.J., Broatch, A., Olmeda, P., Cornejo, O., Experiments on subcooled flow boiling in I.C. engine-like conditions at low flow velocities, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 52, pp. 347-354, 2014.
- [14] Yu, W., France, D. M., Singh, D., Smith, R. K., Ritter, J., Vijlbrief, T., Menger, Y., Sub cooled flow boiling of ethylene glycol/water mixtures in a bottom-heated tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 72, pp. 637-645, 2014.
- [15] Hua, S., Huang, R., Li, Z., Zhou, P., Experimental study on the heat transfer characteristics of subcooled flow boiling with cast iron heating surface, *Journal of Applied Engineering*, Vol. 77, pp. 180-191, 2015.
- [16] Lee, H. S. and O'Neill, A. T. Boiling curves and visual observations of subcooled flow boiling of water over a horizontal plate heater in a rectangular channel. In *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Orlando, Florida, USA, 5-11 November 2005.
- [17] Chen, J. C., A correlation for boiling heat transfer to saturated heat transfer to standard fluids in convective flow, ASME preprint 63HT34 presented at the 6<sup>th</sup> National Heat Transfer Conference, Boston, 1963.
- [۱۸] رضا همت خانلو، آرش محمدی، علی جزایری، محمود یعقوبی، شبیه‌سازی انتقال حرارت با فرض پدیده جوشش در راهگاه آب موتور ملی پرخوران، فصلنامه علمی- پژوهشی تحقیقات موتور، شماره ۴۹، زمستان ۹۱
- from a thermal bench marking exercise under low flow conditions, SAE 2002-01-1028, 2002.
- [6] Kandlikar, S. G. and Bulut, M. An experimental investigation on flow boiling of ethylene-glycol/water mixture, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 317-325, 2003.
- [7] Lee, H. S. and O'Neill, A. T. Boiling curves and visual observations of subcooled flow boiling of water over a horizontal plate heater in a rectangular channel. In *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Orlando, Florida, USA, 5-11 November 2005, paper IMECE 2005-79390 (ASME International, New York).
- [8] Tao Bo, CFD Homogeneous mixing flow modeling to simulate subcooled nucleate boiling flow, SAE 2004-01-1512, 2004.
- [9] Steiner, H., Brenn, G., Breitschadel, B., Onset of Partial Film Boiling on a Downward Facing Heated Surface, 6<sup>th</sup> ICMF, Leipzig, 2007.
- [10] Lee, H. S., Heat transfer predictions using the chen correlation on subcooled flow boiling in a standard IC engine, SAE 2009-01-1530, 2009.
- [11] Helali, A. B., Effects of water contamination on sub-cooled flow boiling heat transfer, *International Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 2288 - 2295, 2011.
- [12] Hemmatkhanloo, R., Mohammadi, A., Jazayeri, A., A review on nucleate boiling enhancement, *Journal Elixir Mechanical Engineering*, Vol. 52, pp. 11238-11243, 2012.



## Numerical and experimental investigation of flow boiling heat transfer coefficient according to engine operating condition

A. Mohammadi<sup>1\*</sup>, M. Varmazyar<sup>2</sup>, S. Taherloo<sup>3</sup>, M. Ziabasharhagh<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, [amohammadi@srttu.edu](mailto:amohammadi@srttu.edu)

<sup>2</sup> Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, [varmaziyar.mostafa@srttu.edu](mailto:varmaziyar.mostafa@srttu.edu)

<sup>3</sup> KNTUoosi University of Technology, Mechanical Engineering Department, Tehran, Iran, [siamaktaherloo@gmail.com](mailto:siamaktaherloo@gmail.com)

<sup>4</sup> KNTUoosi University of Technology, Mechanical Engineering Department, Tehran, Iran, [mzia@kntu.ac.ir](mailto:mzia@kntu.ac.ir)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 13 April 2016

Accepted: 2 November 2016

#### Keywords:

Iranian national engine

Flow boiling

Heat flux

Heat transfer coefficient

### ABSTRACT

Approximately one third of fuel heat release of an IC engine is delivered to environment by cooling system. Cooling more than a limit, decreases efficiency of engine and lower than a limit, causes vapor layer formation on the surface of water jacket and reduction of heat transfer and failure components. Behavior of heat transfer coefficient in boiling depends on heat flux. This coefficient increases during nucleate boiling and decreases during film boiling. In this research, an experimental setup was designed to investigate the effect of heat flux on heat transfer from coolant. This study carried out with two base fluid, distilled water and mixture of distilled water and ethylene-glycol (50-50) and measurement of surface temperature. With consider that boiling flow takes place on hot spot of water jacket with low speed of coolant, therefore, velocity range in exhaust valve bridge has considered. Effect of inlet velocity and coolant temperature in constant heat flux on surface temperature and heat transfer coefficient, has been investigated. Up to experimental results, numerical simulation carried out with CFD software. The numerical results have good agreement with experimental data.

