



شبیه‌سازی انتقال حرارت با فرض پدیده جوشش در راهگاه آب موتور ملی پرخوران

رضا همت خانلو^۱، آرش محمدی^{۲*}، سید علی جزایری^۳، محمود یعقوبی^۴

^۱دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران، ایران، reza_hemmatkhanlou@sina.kntu.ac.ir

^۲شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، a_mohammadi@ip-co.com

^۳دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران، ایران، jazayeri@kntu.ac.ir

^۴دانشگاه شیراز، yaghoubi@shirazu.ac.ir

*نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۲۳۸۰۲۳۶۰

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۰۸ مهر ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۵ اسفند ۱۳۹۲

کلیدواژه‌ها:

راهگاه آب

جوشش مادون سرد

موتور ملی پرخوران

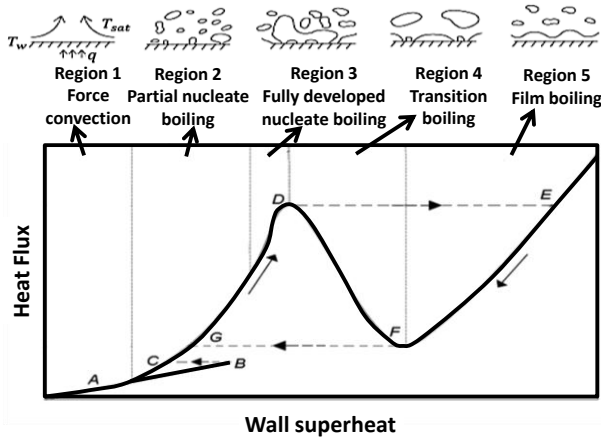
ضریب انتقال حرارت

شبیه‌سازی

انتقال حرارت تأثیر مهمی بر طراحی مفهومی و جزئیات طراحی سامانه خنک‌کاری موتور احتراق داخلی و عملکرد آن دارد. در بحث طراحی نحوه انتقال حرارت نقاط داغ بستار، یکی از راه‌ها گذر هوشمندانه از جریان تک حالت جابجایی به جوشش مادون سرد است. بدین منظور لازم است تا جزئیات جریان و انتقال حرارت در محدوده وسیعی از کارکرد موتور دانسته شوند. راهکار مؤثر برای تحلیل حرارتی موتورهای احتراق داخلی، شبیه‌سازی آنها با روش دینامیک سیالات محاسباتی به همراه شبیه‌سازی جوشش است. در این مقاله راهگاه‌های سیال خنک‌کننده موتور ملی پرخوران با نرم‌افزار AVL-FIRE برای بررسی اثرات جوشش شبیه‌سازی شد. اعتبارسنجی شبیه‌سازی با مقایسه نتایج دو شبیه‌سازی رایج چن و BDL با نتایج تجربی جوشش مادون سرد داخل مجرای افقی انجام شد. این مقایسه نشان می‌دهد که شبیه‌سازی چن تطابق بیشتری با نتایج تجربی دارد. لذا جوشش تک حالت در راهگاه آب موتور با روش چن شبیه‌سازی شد. نتایج این قسمت ارائه کمیتهای فشار، سرعت و ضریب انتقال حرارت (با و بدون فرض جوشش) در شبیه‌سازی است. نتایج قبل نشان می‌دهند که ضریب انتقال حرارت با در نظر گرفتن جوشش در نقاط بحرانی موتور بشدت افزایش می‌یابد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱) مقدمه



شکل ۱: ناحیه بندی جوشش در نزدیک سطح [۱]

در جوشش نقطه ای مادون سرد، دمای توده سیال خنک تر از دمای اشباع آن است درحالی که در جوشش اشباع، دمای توده سیال برابر دمای اشباع فشار نظیر است. در شکل (۲) حالت‌های مختلف انتقال حرارت نشان داده شده است. پس از مشاهده اولین حباب، پدیده جوشش رخ می‌دهد. در ناحیه جوشش مادون سرد، به علت دمای خنک تر توده سیال نسبت به دمای اشباع آن، پس از حرکت از دیوار سیال به سمت بالا، متراکم می‌شود و دمای سیال گرم تر می‌شود. قبل از آنکه دمای توده سیال به اندازه مقدار دمای اشباع شود، حباب‌ها چگالیده می‌شوند، اما با یکسان شدن دمای توده سیال با دمای اشباع، حباب‌های تولیدی دیگر از بین نمی‌روند و همراه با جریان حرکت می‌کنند. در صورت مهار نشدن، تعداد حباب‌ها می‌توانند سطح عایقی را ایجاد نمایند و منجر به گرم شدن شدید دمای دیوار و کاهش شار حرارتی عبوری از دیوار و در نهایت ذوب آن شوند.

تحقیقات را در زمینه جوشش تحت شرایط کارکرد موتور می‌توان به دو دسته تقسیم بندی کرد. نخست تحقیقاتی که از راه تجربه و محاسبه جوشش در داخل مجاری با سطح مقطع‌های مختلف تحت شرایط کارکرد موتور را بررسی می‌کنند. دوم تحقیقاتی که شبیه سازی جوشش را به صورت کاربردی در راهگاه آب موتور مطالعه می‌کنند. به علت خم‌های راهگاه آب موتور و دشواری امکان مشاهده پدیده جوشش در آن، آزمایش‌های جوشش در مجاری با طول کوتاه و سطح مقطع‌های متفاوت انجام می‌شود. از مهمترین و گسترده‌ترین آزمایش‌های انجام شده در زمینه جوشش تحت شرایط خنک‌کاری موتورهای احتراق داخلی می‌توان به تحقیقات رابینسون [۲] و هوسونگ لی [۳] و هالا لی [۴] اشاره کرد که در آنها از مجرای افقی با مقطع مستطیلی که به کف آن گرم می‌شود، استفاده شده است. هوسونگ لی به شبیه‌سازی جوشش در مقطع مستطیلی نیز پرداختند که نتایج حاصل نشان داد که شبیه‌سازی چن (ضریب انتقال حرارت جوشش) تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. همچنین مشاهده کرد که با افزایش فشار از ۱ به ۱٫۸۲ بار، مطابقت شبیه‌سازی چن با نتایج تجربی بیشتر می‌گردد.

به ازای جرمی مشخص از سوخت، هرچه مقدار انتقال حرارت از دیواره محفظه احتراق بیشتر شود، دما و فشار متوسط گازهای احتراقی کاهش می‌یابد، بنابراین قدرت خروجی موتور تابعی از مقدار انتقال حرارت در موتور می‌باشند. از طرف دیگر در صورت انتقال حرارت کم در نواحی داغ مانند دریچه دود و تاج سمبه، افزایش دما در آن نواحی بر اثر تماس با گازهای نسوخته موجب پیدایش کوبش خواهد شد. تعادل حرارتی اجزای موتور با انتقال حرارت به سیال خنک کننده فراهم می‌شود. انتقال حرارت از سطح داغ به سیال خنک‌کننده ترکیبی از انتقال حرارت جابجایی و جوشش نقطه‌ای^۱ است. جوشش نقطه‌ای در نواحی داغ بستر مفید است، زیرا شار حرارتی بزرگی را به ازای تغییر کم دما، منتقل می‌کند. اگر در جوشش حرارت موضعی به قدری زیاد باشد که لایه بخار روی سطح تشکیل گردد، جوشش لایه‌ای^۲ به وقوع می‌پیوندد. به این ترتیب دما در آن نقطه شدت گرم می‌شود و به آن ناحیه آسیب جدی می‌رسد. انتقال حرارت بر اثر جابجایی اجباری به خواص سیال و هندسه جریان وابسته است و فشار اثر زیادی بر انتقال حرارت جابجایی ندارد. در نواحی که شار حرارتی بزرگ است مثل اطراف دریچه دود و شمع، بر اثر تغییر سرعت، تغییر چشمگیری در دمای دیوار رخ می‌دهد که نشانگر پدیده جوشش است. زمانی که شار حرارتی افزایش یابد، دمای دیوار مطابق خط مستقیم تا نقطه A در شکل (۱) افزایش می‌یابد که در این ناحیه انتقال حرارت بر اثر پدیده جابجایی است. سپس حباب‌هایی روی دیوار تشکیل گردد. حباب‌ها زمانی بر روی دیوار داغ تشکیل می‌گردند که دمای دیوار از دمای اشباع توده سیال گرمتر باشد. با تولید حباب بر روی دیوار، مطابق منحنی AB، شار حرارتی افزایش ناگهانی دارد. با افزایش شار حرارتی، تعداد حباب‌ها افزوده می‌شود و دمای دیوار گرمتر می‌شود (منحنی BC). نقطه C معرف شار حرارتی بحرانی^۳ است. از این نقطه به بعد افزایش مقدار حرارت، باعث می‌شود تا دمای دیوار، مسیر CD را طی کند و دمای دیوار شدیداً گرم شود. این امر ممکن است باعث ایجاد تنش حرارتی شدیدی در پوسته جامد آن شود. همچنین با کاهش شار حرارتی دمای دیوار خنک می‌شود و از طریق مسیر EDF باز می‌گردد و در نقطه D، لایه حباب ناگهان به حباب‌های کوچکی می‌شکند.

ناحیه جوشش نقطه ای از دو ناحیه جوشش مادون سرد^۴ و جوشش اشباع^۵ تشکیل شده است که تفاوت آنها در دمای توده سیال است.

1 Nucleate boiling

2 Film boiling

3 Critical heat flux

4 Sub-cooled nucleate boiling

5 Saturated nucleate boiling

4 Rabinson

5 Lee

6 Helali

که تحت شرایط جوشش کار می‌کرد استفاده کردند. نتایج حاصل از شبیه سازی دو حالتی نشان داد که نتایج این دو شبیه سازی تطابق مناسبی دارند.

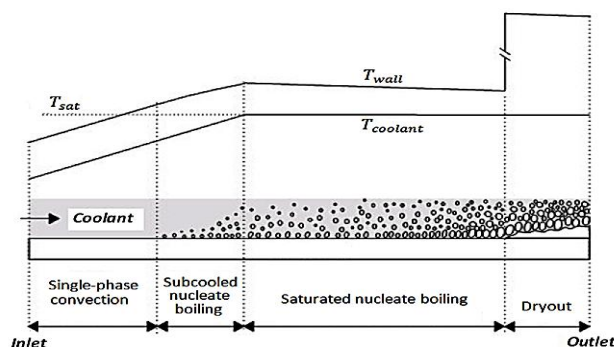
فای‌دونگ و همکاران [۶] نیز شبیه سازی جوشش را در مجرای افقی با مقطع T شکل بررسی کردند و سپس جوشش را در راهگاه آب شبیه سازی کردند. آنها محیط سیال (راهگاه آب) و محیط جامد (استوانه و بستار) را تحلیل حرارتی کردند. نتایج نشان داد که دمای پل مابین دریچه‌ها از ۵۳۰ درجه کلوین (بدون فرض جوشش) به ۵۰۶٫۶ درجه کلوین (با فرض جوشش) خنک‌تر شد. درحالی که دمای آب داخل راهگاه در همان نقطه از ۱۰۲٫۷ درجه سانتیگراد (بدون فرض جوشش) به ۱۰۸٫۸ درجه سانتیگراد (با فرض جوشش) گرم‌تر شد. کاردون^۹ و همکاران [۱۱] با استفاده از شبیه‌سازی جوشش چن به شبیه‌سازی جوشش جریانی در راهگاه آب موتور بنزینی پرخوران پرداختند. شبیه‌سازی در بدترین شرایط حرارتی یعنی در توان بیشینه موتور انجام شد. آنها دماسنج‌هایی در مجرای بین دریچه‌های یکی از استوانه‌ها تعبیه کردند. شبیه‌سازی در دو حالت با و بدون جوشش انجام شد. برای صحت‌گذاری شبیه‌سازی، دمای شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه شد.

جعفرآبادی و همکاران [۱۳] برای اصلاح راهگاه آب اطراف افشانه و راهگاه دود و هوا در موتور دیزل ۱۲ استوانه با توان ۱۰۰۰ کیلو وات از چهار هندسه متفاوت با فرض جوشش استفاده کردند. آنها از شبیه‌سازی BDL^{۱۰} برای شبیه‌سازی جوشش استفاده کردند. نتایج توزیع دما نشان داد که در طرح چهارم ضریب انتقال حرارت جوششی در سمت راهگاه آب محفظه احتراق نسبت به سایر طرح‌ها بزرگتر است. همچنین دمای دیوار محفظه احتراق نسبت به سایر طرح‌ها خنک‌تر خواهد بود. پنگ^{۱۱} و همکاران [۱۴] مروری بر پدیده جوشش به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی انجام دادند.

در این مقاله شبیه‌سازی عددی پدیده جوشش مادون سرد در راهگاه آب موتور ملی پرخوران انجام شد. محاسبه انتقال حرارت جوشش براساس روابط تجربی تک حالت است. ضریب انتقال حرارت واقعی ترکیبی از انتقال حرارت جابجایی و جوشش است. بی‌نیازی به شبیه‌سازی‌های پیچیده دو حالتی جوشش، حل سریع‌تر معادلات و دقت مناسب، جزء برتری‌های این روش‌اند.

۲) انتقال حرارت در جوشش جریانی مادون سرد

روزنف^{۱۲} نشان داد که گرمای جوشش جریانی را می‌توان از مجموع مقادیر شار حرارتی جابجایی اجباری و شار حرارتی جوشش نقطه‌ای بدین صورت محاسبه کرد [۱۵]:



شکل ۲: نمای توزیع دما در نواحی مختلف در پدیده جوشش [۱]

ابوزیان^۱ [۵] و فای‌دونگ و همکاران^۲ [۶] نیز انتقال حرارت در مقطع T شکل در شرایط کارکرد سامانه خنک‌کاری در موتورهای احتراق داخلی بررسی کردند. علت انتخاب این نوع مقطع به خاطر شبیه‌سازی فرآیند جوشش در نقطه بحرانی پل مابین دریچه‌ها است.

علاوه بر تحقیقات انجام شده بر روی آب و اتیلن‌گلیکول، ابوزیان و همکاران [۷]، انتقال حرارت را از دیوار چدنی به روغن روانکاری تحت شرایط جوشش به صورت تجربی مطالعه کردند. هدف آنها ارزیابی مشخصات حرارتی روغن موتورهای مختلف در تماس با سطوح داغ بود. نتایج نشان می‌دهند که مواد افزودنی روغن، خواص روغن و دمای توده سیال، تأثیر چشمگیری بر انتقال حرارت روغن موتور دارد.

در سال‌های اخیر تحقیقات کاربردی بسیاری در زمینه شبیه‌سازی جوشش مادون سرد در راهگاه آب موتور انجام شده است. تاو بو^۳ در شرکت ریکاردو از شبیه‌سازی جریان همگن برای شبیه‌سازی جوشش مادون سرد در راهگاه آب استفاده کرد [۸]. ابتدا شبیه‌سازی پیشنهادی را با نتایج آزمایش‌های رابینسون [۲] و زایتون و شوکری^۴ [۹] صحت‌گذاری کرد. سپس از شبیه‌سازی مذکور برای شبیه‌سازی جوشش مادون سرد در راهگاه آب موتور استفاده کرد. پس از تحلیل انتقال حرارت در نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی^۵ VECTIS به تحلیل دمایی قطعات حساس پرداخت. کوری شبیه‌سازی برای شار حرارتی جوشش ارائه داد و با شبیه‌سازی یک بعدی و سه بعدی آن را بررسی کرد. کور^۶ و همکاران شبیه‌سازی برای محاسبه شار حرارتی در جوشش نقطه‌ای ارائه دادند [۱۰]. محمدی و همکاران [۱۱] از شبیه‌سازی‌های مخلوط دو حالتی^۷ و معادله پیفان/مولن‌هاور^۸ برای شبیه‌سازی جوشش در راهگاه آب موتور دیزل سواری استفاده کردند. آنها برای صحت‌گذاری شبیه‌سازی از داده‌های تجربی موتور واقعی

1 Abouzian

2 Fei Dong

3 Ta Boo

4 Zeiton

5 Computational fluid dynamics

6 Corre

7 Phase

8 Pflaum/Mollenhauer

9 Cardone

10 Boiling departure lift-off

11 Pang

12 Rosenow

همچنین می توان به دلیل وجود جریان، با ضریب تصحیح S از شدت تأثیر آن کم کرد. دو شبیه سازی برای محاسبه ضریب تصحیح S پیشنهاد می گردد: شبیه سازی چن^۳ و شبیه سازی BDL.

۲-۱) شبیه سازی چن

چن ضریب تصحیح S را به جریان وابسته می دانست و آن را بدین شکل پیشنهاد داد [۱۸].

$$S_{Chen} = \frac{1}{(Re\phi^{1.25})^{1.17}} \quad (۹)$$

که بعدها باتروث^۴ آن را بدین شکل اصلاح نمود [۱۷].

$$S_{Chen} = \frac{1}{1 + 2.53 \times 10^{-6} (Re_l \phi^{1.25})^{1.17}} \quad (۱۰)$$

در جوشش جریانی مادون سرد $1 \approx \phi$ و مقدار S_{Chen} تنها به عدد رینولدز وابسته خواهد بود.

۲-۲) شبیه سازی BDL

برخلاف شبیه سازی چن، که ضریب تصحیح S به عدد رینولدز و جریان وابسته است، در شبیه سازی BDL مقدار آن به دینامیک حباب و میدان جریان آن در نزدیکی دیوار بستگی دارد. ابتدا رانگ^۵ و همکاران [۱۹] معادله ای برای ضریب تصحیح S پیشنهاد دادند. مطابق فرضیه ژنگ، حباب ابتدا در نقطه ای به نام هسته حبابزا ایجاد شده، سپس مطابق شکل (۳) در شعاع r_D از هسته حبابزا جدا شده و درحالی که روی سطح داغ می لغزد حرارت را از سطح داغ جذب می کند. این رویه ادامه می یابد تا حباب به شعاع r_L برسد و نیروی شناوری قدرت غلبه بر سایر نیروها را پیدا کند، در این هنگام حباب از سطح جدا شده و به داخل توده سیال نفوذ می کند. در معادلات (۱۱-۱۳) پیشنهادی ژنگ^۶ [۱۷] ضریب تصحیح S از دو مؤلفه تشکیل شده که مقادیر آنها به قطر حباب در لحظه جدایش و صعود بستگی دارد.

$$S_{BDL} = S_{BDL1} S_{BDL2} \quad (۱۱)$$

$$S_{BDL1} = \left(\frac{d_D}{d_L}\right)^n \quad (۱۲)$$

$$S_{BDL2} = \frac{S_{BDL1} h_{nb}}{1 + C_{BDL} Nu} \quad (۱۳)$$

n و C_{BDL} مقادیر ثابتی اند که از زینه بندی شبیه سازی به دست می آیند. برای به دست آوردن قطر جدایش d_D ، تنها کافیست تعادل نیروهای وارد بر حباب را در راستای جریان نوشت. قطر صعود d_L باید تعادل نیروها را در راستای عمود بر جریان در لحظه صعود نوشت [۱۹].

$$q_{total} = q_{conv.} + q_{boil.} \quad (۱)$$

چن آزمایش هایی را برای بررسی انتقال حرارت در مجرای قائم انجام داد و برای محاسبه انتقال حرارت، معادله پیشنهادی روزنف و چوی را اصلاح نمود [۱۶]. چن اعتقاد داشت که ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی حاصل مجموع دو سازوکار بزرگ (جابجایی اجباری) و کوچک (جوشش نقطه ای) است:

$$h_{total} = h_{mac.} + h_{mic.} \quad (۲)$$

و شار حرارتی کل نیز برابر است با:

$$q_{total} = (h_{mac.} + h_{mic.})(T_w - T_{sat}) \quad (۳)$$

که h_{mac} ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری است. برای جابجایی اجباری معادله دیتوس- بولتر^۱، ضریب انتقال حرارت بدین شرح است [۱۷]:

$$h_{mac.} = \frac{k}{D_h} 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (۴)$$

برای اصلاح مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری در جریان همراه با جوشش از ضریب ϕ استفاده می شود. چن برای محاسبه مقدار ϕ ، معادله ای را پیشنهاد داد که در آن $\phi = \phi\left(\frac{1}{X_{tt}}\right)$ و عدد مارتینلی است که بدین شکل تعریف می شود [۱۷]:

$$\frac{1}{X_{tt}} = \left(\frac{\xi_g}{1 - \xi_g}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^{0.1} \quad (۵)$$

که ξ_g بیانگر کسر جرمی بخار است.

باتروث^۲ معادله پیشنهادی $\phi = \phi\left(\frac{1}{X_{tt}}\right)$ را بدین نحو اصلاح نمود [۱۸]:

$$\xi_g > 0.1 : \phi = 2.35 \left(\frac{1}{X_{tt}} + 0.213\right)^{0.736} \quad (۶)$$

$$\xi_g \leq 0.1 : \phi = 1$$

در جوشش جریانی مادون سرد، مقدار کسر جرمی بخار بسیار ناچیز است زیرا که پس از تولید و رشد حباب بسرعت به توسط سیال خود چگالیده می شود، بنابراین مقدار ξ_g آنها بسیار کوچک است و ضریب تصحیح $\phi = 1$ خواهد بود.

همچنین h_{mic} نیز ضریب انتقال حرارت جوشش مادون سرد است که از معادله فاستر - زوبر^۲ [۱۶] بدین صورت محاسبه می شود:

$$h_{mic} = 0.00122 \left(\frac{k_l^{0.79} c_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} h_{lv}^{0.24} \rho_v^{0.24}}\right) \Delta T_e^{0.24} \Delta P_e^{0.75} \quad (۷)$$

از معادله (۷) برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جوشش استخری استفاده می شود که با توجه به تأثیر جریان سیال از مقدار آن نسبت به حالت سیال ساکن کاسته می شود.

$$\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat} \quad , \quad \Delta P_{sat} = P_w - P_{sat} \quad (۸)$$

³ Chen

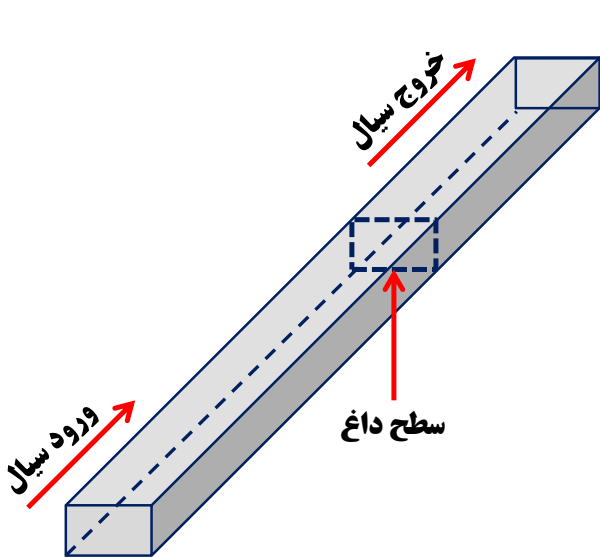
⁴ Batroos

⁵ Rong

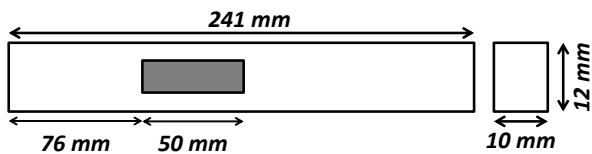
⁶ Zeng

¹ Ditus Bulter

² Faster-Zooper



شکل ۴: مجرای آزمایش رابینسون [۲]



شکل ۵: ابعاد هندسی مجرای آزمایش رابینسون [۲]

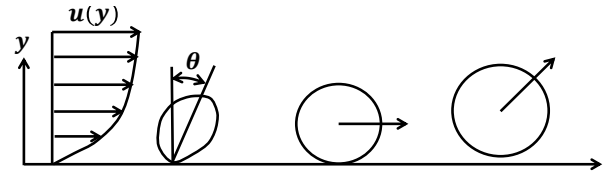
جدول ۱: شرایط آزمایش ۶ گروه برای شبیه‌سازی [۲]

| شماره | فشار کاری (bar) | سرعت ورودی سیال (m/s) |
|-------|-----------------|-----------------------|
| ۱ | ۱ | ۰,۲۵ |
| ۲ | ۲ | ۰,۲۵ |
| ۳ | ۳ | ۰,۲۵ |
| ۴ | ۱ | ۱ |
| ۵ | ۲ | ۱ |
| ۶ | ۳ | ۱ |

جدول ۲: خواص مخلوط ۵۰-۵۰ آب و اتیلن گلیکول [۱۱]

| واحد | اندازه | کمیت |
|-------------------|--------|------------------|
| J/kg.K | ۳۴۷۰ | گرمای ویژه |
| kg/m ³ | ۱۰۳۰ | چگالی |
| W/m.K | ۰,۴۴ | ضریب هدایت حرارت |

همان طور که از شکل (۶) مشاهده می‌شود، تا قبل از نقطه شروع جوشش (نزدیک دمای اشباع در فشار متناظر)، تغییرات شار حرارتی نسبت به دمای دیوار به صورت خطی است. این بیانگر انتقال حرارت به صورت جابجایی اجباری می‌باشد و تا این مرحله شار حرارتی برای هر دو شبیه سازی یکسان است زیرا تا این نقطه شار حرارتی دیوار تنها از معادله (۴) به دست می‌آید. کمی پس از نقطه اشباع، جوشش رخ می‌دهد که افزایش شیب خط، نسبت به ناحیه خطی نشانگر همین



شکل ۳: سه مرحله رهایی حباب از دیواره: (۱) لحظه جدایش، (۲) لغزش روی دیواره و (۳) لحظه صعود حباب [۱۹]

در انتقال حرارت سه معادله اساسی: بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی حل می‌شوند [۱۱]:

بقای جرم:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (14)$$

بقای اندازه حرکت:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 V \quad (15)$$

بقای انرژی:

$$\rho c_v \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \phi \quad (16)$$

که در آن:

$$\phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (17)$$

به خاطر هندسه پیچیده راهگاه آب داخل موتور، جریان آشفته است و بندرت می‌توان جریان آرام را مشاهده کرد. در این مقاله برای وصف جریان آشفته در راهگاه آب از شبیه سازی آشفتگی $k - \epsilon$ استفاده شده است. k بیانگر انرژی جنبشی آشفتگی و ϵ نیز نرخ نابودی آشفتگی اند.

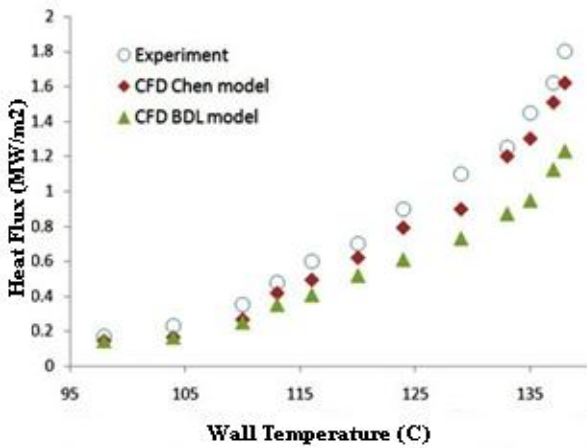
۳) اعتبارسنجی شبیه‌سازی جوشش

برای بررسی صحت و اعتبار شبیه‌سازی جوشش از نتایج تجربی آزمایش های رابینسون [۲] استفاده شده است. رابینسون برای شبیه‌سازی راهگاه آب موتور از مجرای افقی با سطح مقطع مستطیلی که از زیر به آن حرارت می‌داد، استفاده کرده است. نمای راهگاه مستطیلی و مشخصات هندسی آن در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های جوشش، از ۶ گروه داده، مطابق جدول (۱) استفاده شد. در آنها اثر فشار در سرعت‌های مختلف بر شار حرارتی بررسی شد. سیال عامل، ترکیب حجمی (۵۰-۵۰) آب و اتیلن گلیکول و دمای ورودی سیال نیز ۹۰ درجه سانتیگراد است. در جدول (۲) خواص سیال عامل ذکر شده است.

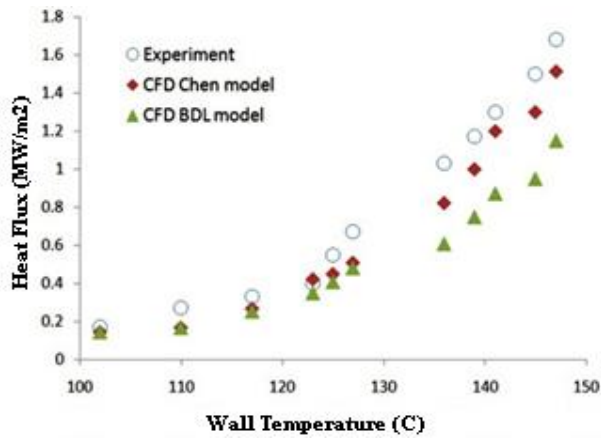
معادلات در نرم‌افزار به کمک روند ساده^۱ حل شده است و مقادیر شار حرارتی را از معادله (۳) در نقاط موردنظر محاسبه می‌کنیم و مطابق تصاویر شکل (۶) نمایش می‌دهیم.

¹ Simple algorithm

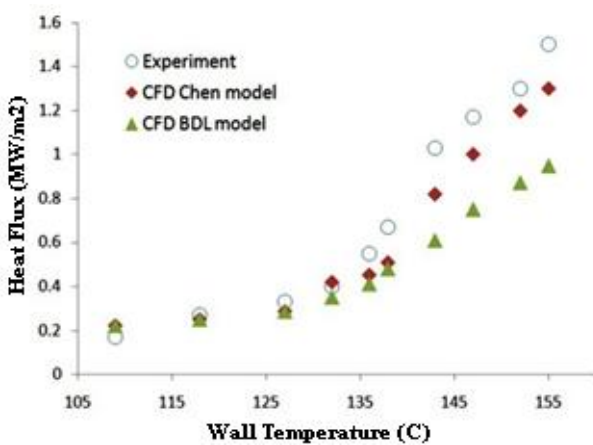
نتایج شبیه‌سازی گروه ۴



نتایج شبیه‌سازی گروه ۵



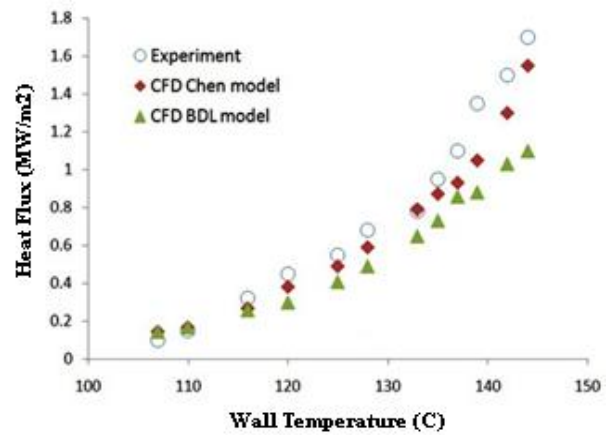
نتایج شبیه‌سازی گروه ۶



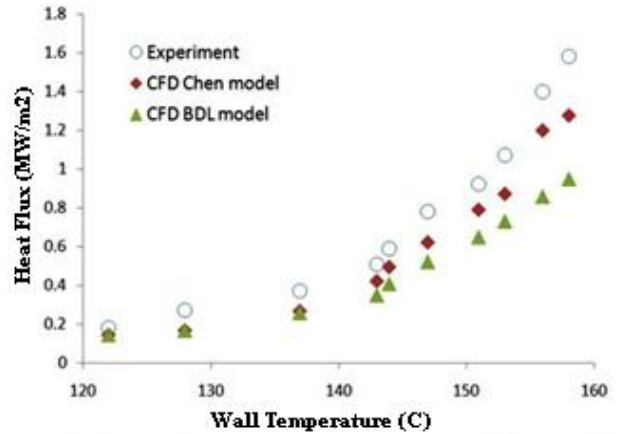
ادامه شکل ۶: نتایج شبیه‌سازی برای گروه‌های ۴ تا ۶ [۲]

مطلب است. در ناحیه جوشش، شبیه‌سازی چن تطابق بیشتری با داده‌های تجربی دارد.

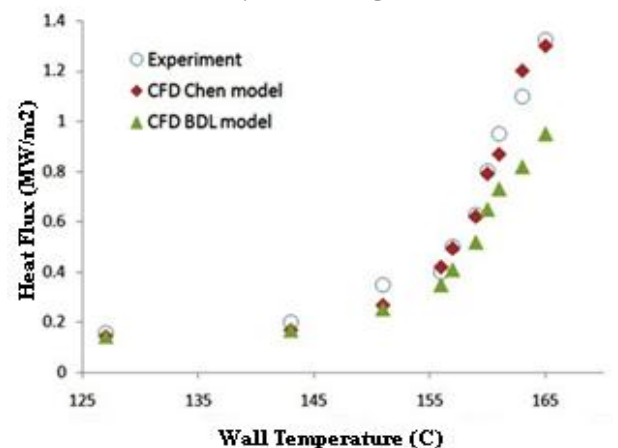
نتایج شبیه‌سازی گروه ۱



نتایج شبیه‌سازی گروه ۲



نتایج شبیه‌سازی گروه ۳



شکل ۶: نتایج شبیه‌سازی برای گروه‌های ۱ تا ۳ [۲]
(ادامه این شکل در ستون کناری آمده است.)

شایان ذکر است که در برخی مقالات با توجه به نوع مسئله و شرایط کاری سامانه، شبیه‌سازی BDL همخوانی بهتری با نتایج تجربی دارد که این موضوع تنها به ماهیت و شرایط حاکم بر مسئله بستگی دارد. نکته مشهودی که در تمامی نمودارهای شکل (۶) به چشم می‌آید این است که با افزایش فشار، منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی چن به سمت راست منحرف می‌گردند. بیشینه خطا در محدوده دمایی کارکرد موتور حدود ۱۰ درصد است.



شکل ۷: هندسه سه بعدی راهگاه آب موتور پرخوران



شکل ۸: شبکه بندی راهگاه آب موتور ملی پرخوران

برای شبیه سازی انتقال حرارت در راهگاه آب نیازمند دمای دیوار می باشیم که مقادیر آن از تحلیل هندسه کامل موتور با در نظر گرفتن شرایط مرزی برای تمامی نواحی موتور همچون محفظه احتراق، راهگاه روغن، جریان هوای محیط، راهگاه ورودی از نرم افزار ABAQUS به دست آمده است [۲۱]. سپس مقادیر دمای حاصل بر روی تمامی گره های دیواره راهگاه آب در نرم افزار AVL-FIRE نگاشته شده است.

۵) بحث بر روی نتایج

بر اساس مدل چن، شبیه سازی موتور پرخوران به منظور بررسی جریان و انتقال حرارتی انجام شد. پس از تنظیم شرایط مرزی، شرایط اولیه و سایر موارد، حل با استفاده از روش ساده (الگوریتم سیمپل)^۲ شروع می شود و تکرارها تا آنجا ادامه می یابد که خطاها کمتر از مقدار معینی شود. در نهایت مقادیر توزیع فشار، توزیع سرعت و توزیع ضریب انتقال حرارت با و بدون فرض جوشش در راهگاه آب به دست می آید.

از جمله عوامل مؤثر در اختلاف مقادیر شبیه سازی با نتایج تجربی می توان به این موارد اشاره کرد:

- جوشش پدیده ای است دو حالتی که در این پژوهش با شبیه سازی های تک حالت شبیه سازی شده است که برای محاسبه ضرایب انتقال حرارت از خواص گرمایی مخلوط آب و اتیلن- گلیکول استفاده می شود. در حالی که در وجه مشترک مایع و دیوار داغ سیال ابتدا تبخیر می شود و موجب می گردد تا وجه مشترک مایع- بخار از سیالی که سریعتر تبخیر می گردد، غنی گردد.
- لزجت سیال بشدت به دمای آن وابسته است. از این رو سیال نزدیک دیوار گرمتر و لزجت کوچکتری نسبت به توده سیال دارد که این موضوع در تابع دیواره^۱ لحاظ نشده است.
- از دیگر عوامل خطا می توان به خطای دستگاه های اندازه گیری و خطای کاربر در ثبت داده ها اشاره کرد.

۴) آماده سازی شبکه محاسباتی

نمای هندسی موتور در شکل (۷) نشان داده شده است. برای ایجاد شبکه محاسباتی از نرم افزار تولید شبکه های پرمش استفاده شده است ۳۰۲۶۸۲ سلول در دامنه حل ایجاد شده است. همان طور که در شکل (۷) دیده می شود، سیال پس از خروج از تلمبه آب وارد بدنه می گردد و پس از عبور از روزنه های لایبی بستار وارد بستار می گردد و از سمت مخالف بستار خارج می گردد. در شکل (۸) شبکه بندی موتور نشان داده شده است. برای تحلیل شبیه سازی در نرم افزار AVL-FIRE، سرعت ورودی سیال خنک کننده ۲ متر بر ثانیه و دمای ورودی آن ۸۵ درجه سانتیگراد است که از داده های آزمون خنک کاری موتور ملی پرخوران در دور ۵۵۰۰ دور در دقیقه استفاده شده است [۱۹]. یادآوری می شود که چون سیال در دمای ۸۵ درجه سانتی گراد به داخل موتور وارد می شود و دمای آن پایین تر از دمای اشباع سیال خنک کننده در راهگاه آب است، بنابراین اگر جوشش رخ دهد از نوع جوشش جریانی مادون سرد خواهد بود. فشار کاری سامانه خنک کاری موتور ملی پرخوران مطابق داده های آزمایشگاهی برابر ۱٫۹۵ بار است [۱۹]. در مرز خروجی سیال از شرط مشتق صفر استفاده شده است. سیال بکار رفته در حل مسئله، ترکیب آب و اتیلن گلیکول با درصد حجمی (۵۰-۵۰) است. جریان از نوع تراکم ناپذیر، لزج و مغشوش فرض شده است. برای حل اغتشاش جریان از شبیه سازی آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده شده است. از تابع دیوار در نزدیکی دیوار استفاده می شود، زیرا که این موضوع سبب می شود که بتوان از دانه بندی های درشت تر در نزدیکی دیوار استفاده کرد.

² Simple algorithm

¹ Wall function

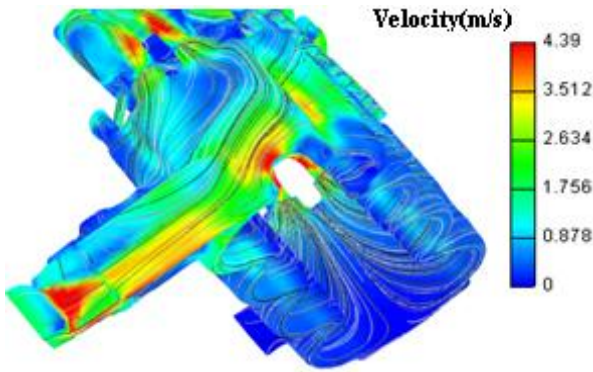
۱-۵) توزیع فشار و سرعت

همان طور که پیش‌بینی می‌گردید به خاطر روزنه‌های ریز در لایه بستار، افت فشار محسوسی در سیال خنک‌کننده رخ می‌دهد. افت فشار راهگاه آب از نتایج عددی برابر ۳۱ کیلو پاسکال است این مقدار در آزمون تجربی ۳۵ کیلو پاسکال گزارش شده است [۱۹] که یکی از علل این اختلاف می‌تواند وجود رسوب در راهگاه آب باشد. شکل‌های (۱۰-۱۱) مقادیر توزیع سرعت را نشان می‌دهند.

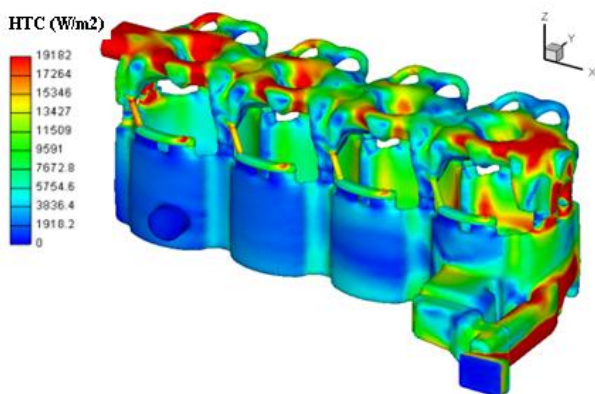
واضح است که سرعت حداکثر در روزنه‌های ارتباطی بین بدنه و بستار قرار دارد. همان طور که در شکل (۱۱) دیده می‌شود، سیال پس از خروج از تلمبه آب از دو قسمت وارد بدنه موتور می‌گردد، قسمتی از آن به سمت راست موتور و بقیه آن به سمت سایر استوانه‌ها هدایت می‌شود و در نهایت دو جریان در نواحی خروجی به یکدیگر می‌رسند و از بستار خارج می‌گردند. این موضوع موجب افزایش سرعت در نواحی خروجی و اطراف استوانه ۴ می‌گردد.

۲-۵) توزیع ضریب انتقال حرارت در راهگاه آب

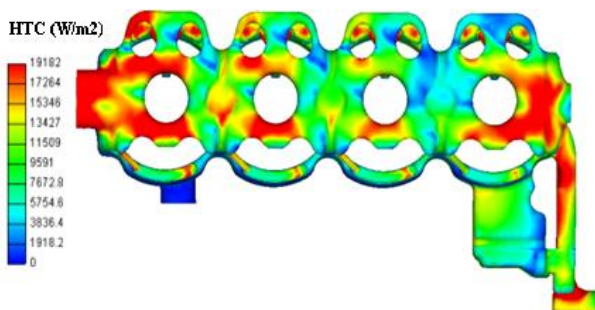
برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی تک حالت از معادله (۴) استفاده شد. در این معادله پس از حل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی، تمامی خواص گرمایی سیال در دامنه حل به دست آمد. شکل‌های (۱۲-۱۳) توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی را نشان می‌دهند.



شکل ۱۱: خطوط جریان در ورودی راهگاه آب



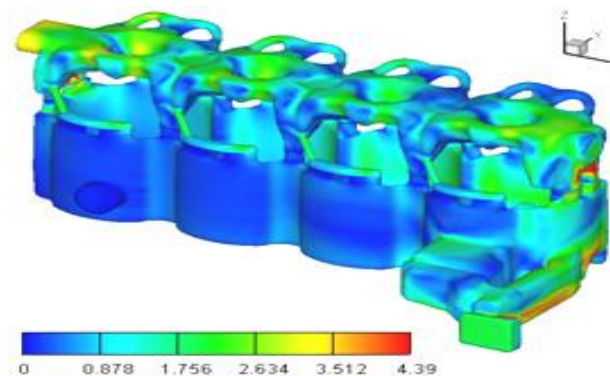
شکل ۱۲: توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در راهگاه آب



شکل ۱۳: توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در راهگاه آب



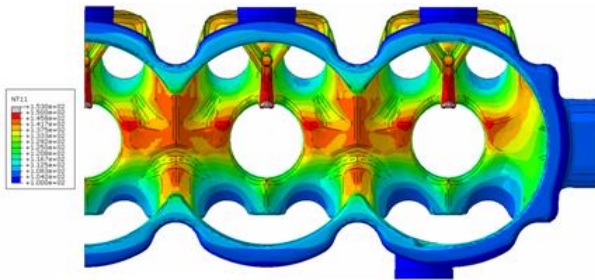
شکل ۹: توزیع فشار مطلق در راهگاه آب



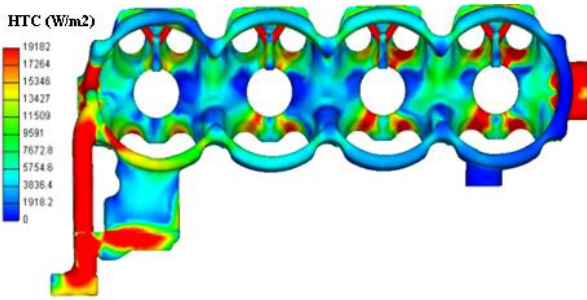
Velocity (m/s)

شکل ۱۰: توزیع سرعت در راهگاه آب (بر حسب متر بر ثانیه)

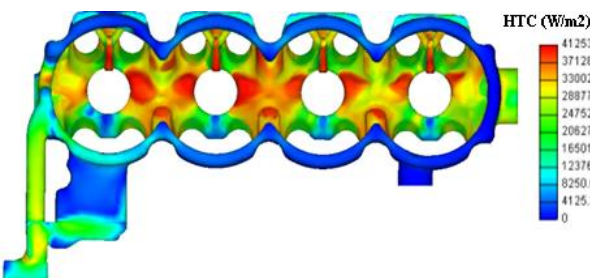
مطابق شکل‌های فوق، کمترین مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی در مرزهای ورودی و خروجی سیال می‌باشد زیرا انتقال حرارت جابجایی پدیده‌ای مرزی است. همچنین، مقدار بیشینه ضریب انتقال حرارت نیز در حدود $20000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ است که در فاصله مکانی دو استوانه قرار دارد. در حالت کلی شباهت بسیاری بین نمودارهای مرزبندی سرعت و ضریب انتقال حرارت جابجایی مشاهده می‌شود. در شکل (۱۴) نتایج [۲۱] برای ضریب انتقال حرارت جابجایی موتور ملی پرخوران (بدون فرض جوشش) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی حاصل از شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۲-۱۳) با نتایج [۲۱] در شکل (۱۴)



شکل ۱۵: توزیع دما بر حسب درجه سانتیگراد [۲۰]



شکل ۱۶: توزیع ضریب انتقال حرارت بدون فرض جوشش ($W/m^2.K$)



شکل ۱۷: توزیع ضریب انتقال حرارت با فرض جوشش ($W/m^2.K$)

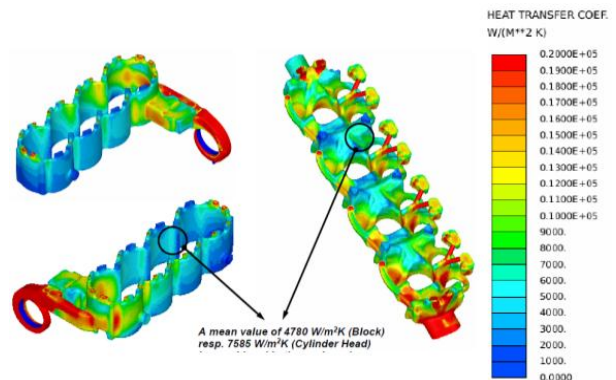
۶ نتیجه گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی انتقال حرارت با فرض جوشش مادون سرد در راهگاه آب موتور ملی پرخوران به کمک نرم‌افزار AVL-FIRE صورت گرفت. در این مقاله از شبیه‌سازی جوشش تک حالت استفاده شده است که نسبت به شبیه‌سازی‌های دو حالتی بسیار سریع‌تر جواب می‌دهند و همچنین معادلات شبیه‌سازی آن نسبت به معادلات دو حالتی ساده‌تراند. ابتدا شبیه‌سازی جوشش مادون سرد بر اساس نتایج تجربی در داخل مجرای افقی اعتبارسنجی شد. سپس جریان و انتقال حرارت در راهگاه آب بررسی شد و شکل‌های فشار، سرعت، ضریب انتقال حرارت با و بدون فرض جوشش به دست آمد. نتایج به شرح آتی‌اند:

(۱) با توجه به خواص گرمایی سیال خنک‌کننده و توزیع دمای دیوار راهگاه آب، پدیده جوشش امری بدیهی است که باید در مطالعه انتقال حرارت موتور محاسبه شود.

همخوانی خوبی دارد. ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از شبیه‌سازی چن تطبیق خوبی با نتایج تجربی جوشش در مجرای یک راهگاه مستطیلی تحت شرایط کاری موتور دارد. به همین دلیل برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جوشش در راهگاه آب موتور ملی پرخوران از شبیه‌سازی چن استفاده می‌شود. در نهایت ضریب انتقال حرارت کلی را مطابق معادله (۲) از مجموع ضریب انتقال حرارت جابجایی و جوشش بر پایه شبیه‌سازی چن به دست می‌آوریم. در شکل (۱۵) توزیع دما دیده می‌شود [۲۰]. این توزیع دما روی دیوار راهگاه آب نگاشت شده است. در شکل‌های (۱۶-۱۷) توزیع ضریب انتقال حرارت با و بدون فرض جوشش نشان داده شده است.

بر اساس شکل‌های (۱۶-۱۷)، ضریب انتقال حرارت با فرض جوشش در نقاطی از راهگاه آب که دما در آن نقاط گرمتر است، افزایش چشمگیری داشته است و همچنین این مقدار در نقاط بین دو دریچه که سرعت در آن بسیار کند است، نیز از سایر نقاط بزرگتر است که این موضوع عکس ضریب انتقال حرارت جابجایی تک حالت است. مقدار بیشینه ضریب انتقال حرارت جابجایی تک حالت در حدود $20000 W/m^2.K$ است که در نقاط تند راهگاه یعنی در راهگاه‌های اتصال بین بدنه و بستار رخ داده است، درحالی که با فرض پدیده جوشش، مقدار بیشینه ضریب انتقال حرارت کلی تا حدود $41000 W/m^2.K$ افزایش یافته است که با توجه به توزیع دما و توزیع سرعت، مقادیر بیشینه در نواحی نزدیک شمع رخ داده است. شبیه‌سازی جوشش در حالت بحرانی موتور ملی پرخوران یعنی در 5500 دور در دقیقه انجام شده است، اما یکی از شرایطی که ملاحظه جوشش در آن ضروری است حالت خاموشی موتور است زیرا در این حالت سیال خنک‌کننده از حرکت می‌ایستد و همان‌طور که گفته شد با کاهش سرعت سیال تمایل به سمت پدیده جوشش بیشتر می‌گردد، که این را می‌توان به عنوان پدیده‌ای در کارهای بعدی بررسی کرد.



شکل ۱۴: تغییرات ضریب انتقال حرارت در راهگاه آب موتور EF7-TC

شبیه‌سازی شرکت FEV [۲۱]

| | | |
|-------------|------------------------|---|
| P | فشار | ۲) در شبیه‌سازی انتقال حرارت با فرض جوشش در مجرای افقی |
| Pr | عدد پرانتل | تحت شرایط کارکرد موتورهای احتراق داخلی سمبه‌ای، مشخص |
| q | نرخ انتقال حرارت مخصوص | گردید که معادله چن با اندازه‌گیری‌های تجربی تطابق نسبت خوبی |
| Re | عدد رینولدز | دارد. |
| S | ضریب تصحیح جوشش | ۳) در تحلیل راهگاه آب موتور ملی پرخوران، افت فشار در حدود ۳۱ |
| T | دمای سیال | کیلوپاسکال است که در حالت تجربی ۳۵ کیلوپاسکال اندازه‌گیری |
| V | سرعت سیال | شده است. |
| X_{tt} | عدد مارتینلی | ۴) در تحلیل جریان مشخص گردید که سرعت بیشینه در روزه‌های |
| | علائم یونانی | لایی بستار رخ می‌دهد که مقدار آن برابر ۴,۳۹ متر بر ثانیه است. |
| ρ | چگالی | ۵) در تحلیل راهگاه آب موتور ملی پرخوران دیده شد که ضریب |
| σ | کشش سطحی | انتقال حرارت تک حالت (جابجایی محض) بشدت به سرعت سیال |
| μ | لزجت دینامیکی | وابسته است و از دمای دیوار مستقل است. |
| ξ | کسر جرمی | ۶) با توجه به توزیع دما (شکل ۱۵)، در برخی از نقاط دمای دیوار بیش |
| φ | ضریب تصحیح جابجایی | از ۱۳۰ درجه سانتیگراد است که در این نقاط احتمال پدیده جوشش |
| | زیرنویس‌ها | وجود دارد. |
| <i>boil</i> | جوشش | ۷) در تحلیل گرمایی راهگاه آب مشخص گردید که مقدار بیشینه |
| <i>conv</i> | جابجایی | ضریب انتقال حرارت جوشش تک حالت در حدود $20000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ |
| <i>l</i> | سیال | است که در نقاط سرعت تند راهگاه یعنی در راهگاه‌های بین بدنه و |
| <i>g</i> | بخار | بستار رخ داده است که مقدار آن در حدود $20000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ است. |
| <i>mac</i> | ماکرو | همچنین با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی جابجایی تک حالت با |
| <i>mic</i> | میکرو | نتایج شبیه‌سازی [۲۱] به این نتیجه می‌رسیم که نتایج تطابق خوبی با |
| <i>sat</i> | اشباع | یکدیگر دارد. |
| <i>w</i> | دیوار | ۸) در شبیه‌سازی انتقال حرارت راهگاه آب با فرض جوشش، در نقاط |

References

- [1] K.K. Katta, Phase change cooling application, MSc thesis, University of Texas at El Paso, 2008
- [2] K. Robinson, IC engine coolant heat transfer studies, PhD thesis, University of Bath, 2001
- [3] H.S. Lee, Heat transfer predictions using the chen correlation on subcooled flow boiling in a standard IC engine, SAE International, Paper No. 2009-01-1530, 2009
- [4] H. Helali, Effects of water contamination on sub cooled flow boiling heat transfer, International Journal of Energy Conversion and Management, pp. 2288-2295, 2011
- [5] A. Hosny, Z. Abou-Ziyan, Forced convection and sub-cooled flow boiling heat transfer in asymmetrically heated ducts for T-section, Journal of Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp.1043-1065, 2009
- [6] F. Dong, Q.Y. Fan, Y. Kai, W. Norihiko, Numerical simulation of boiling heat transfer in water jacket of IC engine, SAE International, Paper No. 2010-01-0262, 2010

۹) پدیده جوشش می‌تواند ضریب انتقال حرارت را تغییر دهد، لذا محاسبه آن در طراحی راهگاه آب اهمیت دارد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از کارشناسان شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) که کمک شایانی در اجرای این پژوهش داشتند، تشکر و قدردانی می‌شود.

فهرست علائم

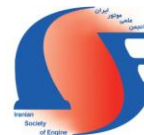
| | |
|-------|--|
| c_p | گرمای ویژه در فشار ثابت ($\text{J/kg}^\circ\text{K}$) |
| d_i | قطر جدایش |
| D_h | قطر هیدرولیکی، m |
| h | ضریب انتقال حرارت جابجایی، $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ |
| k | ضریب انتقال حرارت هدایت |
| Nu | عدد ناسلت |

- [14] S.C. Pang, M.A. Kalam, H.H. Masjuki, M.A. Hazrat, A review on air flow and coolant flow circuit in vehicles' cooling system, *International Journal of Heat and Mass transfer*, Vol. 55, Nos. 23-24, pp. 6295-6306, 2012
- [15] W.M. Rohsenow, Heat transfer, a symposium, engineering research institute, University of Michigan, Michigan, 1952
- [16] J.C. Chen, A correlation for boiling heat transfer to saturated heat transfer of standards fluid in convective flow, 6th National Heat Transfer Conference, Boston, 1963
- [17] D. Butterworth, the Correlation of cross flow pressure drop data by means of permeability concept, UKAEA Report, No. AERE-R9435, 1979
- [18] L.Z. Zeng, J.F. Klausner, D. Bernhard, R. Mei, A Unified model for the prediction of bubble detachment diameters in boiling systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 2271-2279, 1993
- [19] R. Situ, T. Hibiki, M. Ishii, M. Mori, Bubble lift-off size in forced convective sub-cooled boiling flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 5536-5548, 2005
- [20] Technical Report, Cooling functional test EF7-TC, IPCO, 2008
- [21] Technical Report, CAE report of structural analysis of EF7, FEV, 2005
- [7] A. Hosny, Z. Abou-Ziyan, Heat transfer characteristics of some oil used for engine cooling, *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 45, pp. 2553-2569, 2004
- [8] T. Boo, CFD homogeneous mixing flow modeling to simulate sub-cooled nucleate boiling flow, SAE International, Paper No. 2004-01-1512, 2004
- [9] O. Zeitoun, M. Shoukri, Bubble behavior and mean diameter in sub-cooled flow boiling, *ASME Journal of Heat Transfer*, pp. 110-118, 2010
- [10] M. Corre, S. Yao, C.H. Amon, A mechanistic model of critical heat flux under subcooled flow boiling conditions for application to one- and three-dimensional computer codes, *Journal of Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, No. 2, pp. 235-244, 2010
- [11] A. Mohammadi, H. Hashemi, S.A. Jazayeri, M. Ahmadi, Two phase flow simulation for nucleate boiling heat transfer calculation in water jacket of diesel engine, ASME-JSEME-KSME Conference, Paper No. 04038, 2011
- [12] M. Cardone, D. Senatore, D. Buono, M. Polcino, A model for application of Chen's correlation to a standard engine cooling system, SAE International, Paper No. 2008-01-1817, 2008
- [13] M. Jafarabadi, H. Chamani, S.A. Jazayeri, Improvement of diesel engine cooling system performance through implementation of different cooling system designs, ASME-ICEF Conference, Paper No. 2009-60189, 2009



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Simulation of heat transfer considering boiling phenomenon in cooling passage of turbo-charged national engine

R. Hemmat Khanlou¹, A. Mohammadi^{2*}, S.A. Jazayeri³, M. Yaghoubi⁴

¹K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, reza_hemmatkhanlou@sina.kntu.ac.ir

²Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, a_mohammadi@ip-co.com

³K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, jazayeri@kntu.ac.ir

⁴Shiraz University, Shiraz, Iran, yaghoubi@shirazu.ac.ir

*Corresponding Author, Phone Number: +98-912-3802360

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 30 September 2013

Accepted: 24 February 2014

Keywords:

Water jacket

Sub-cooled boiling

National turbocharged engine

Heat transfer coefficient

Simulation

ABSTRACT

Heat transfer plays an important role in the conceptual and the detailed design of cooling systems in internal combustion (IC) engines and has considerable influences over its operational performance. The demand for higher possible heat transfer rates has led to use a controlled transition from a single-phase convection to a sub-cooled boiling flow in hot regions, through the cylinder head. In order to achieve controlled boiling over a wide range of operating conditions, detailed flow and heat transfer analysis are essential. The computational fluid dynamic (CFD) simulation, incorporating the boiling model, is an effective approach for the thermal analysis of IC engines. In this paper, the water jacket of the national turbo-charged engine was simulated with the AVL-FIRE software to consider effects of boiling phenomena in the water jacket. For the validation of calculated results was performed through a test validation in a horizontal heated duct with two models, Chen and BDL models. It showed that the Chen boiling model was in better satisfactory with experimental data than the BDL model under the same conditions and could be used for calculating the boiling heat transfer in cooling passages of the engine. Contours of the pressure, the velocity, the heat transfer coefficient were demonstrated with and without consideration of boiling. Results showed that when boiling occurs, the heat transfer coefficient was significantly enhanced.