

## بررسی اثر نانو ذرات بر انتقال حرارت راهگاه آب موتور با در نظر گرفتن پدیده جوشش

پیشرفت روزافزون صنعت خودروسازی، محققان را به سمت طراحی و بهره برداری از موتورهایی با وزن و حجم کم و بازده بالا سوق داده است. افزایش توان تولیدی بدون افزایش حجم یکی از اهداف طراحان موتور می باشد این امر باعث شده است که روشهای جدید در خنک کاری موتور از اهمیت ویژه ای برخوردار باشد. در این مقاله اثرات افزودن نانوذرات به سیال عامل آب جهت خنک کاری موتور خودرو مورد بررسی قرار میگیرد. برای این منظور یک مدل سه بعدی CFD برای شبیه سازی جریان و انتقال حرارت در موتور خودرو یکبار با سیال عامل آب خالص و بار دیگر با نانوسیال مورد ارزیابی قرار گرفته است. به دلیل آنکه در مجرای خنک کاری مهمترین رژیم، رژیم جوشش سرد می باشد مدلسازی سه بعدی این موضوع معرفی شده است. تغییرات میزان انتقال حرارت موثر در خنک کاری خودرو با استفاده از نانوسیال  $TiO_2$  مورد بررسی قرار میگیرد. در نهایت نشان داده می شود که استفاده از نانوسیال ۱٪ حجمی  $TiO_2$  قابلیت افزایش میزان انتقال حرارت را تا ۳۷٪ بیشتر از سیال عامل آب خالص دارا است.

زهرا بنی عامریان<sup>۱</sup>

استادیار

رامین مهدی پور<sup>۲</sup>

دانشیار

واژه‌های راهنما: انتقال حرارت جوششی، نانو سیال، موتور، راهگاه خنک کاری.

### ۱- مقدمه

پیشرفت روزافزون صنعت خودروسازی، محققان را به سمت طراحی و بهره برداری از موتورهایی با وزن و حجم کم و بازده بالا سوق داده است. تنش حرارتی در بعضی از نقاط موتور بنزینی تا حدود ۱۳ برابر تنش فشاری می‌باشد [۱] به همین دلیل طراحی مناسب سیستم خنک کاری جهت کاهش وزن و انتخاب مواد سبک برای بدنه از اهمیت ویژه برخوردار می باشد. آب بعنوان سیال عامل سیستم خنک کاری با عبور از مجاری خنک کاری و دریافت حرارت از بدنه به دمای جوشش می‌رسد و حباب‌هایی در آن شکل می‌گیرند. فرایند تغییر فاز باعث جذب انرژی بیشتر توسط آب شده و کارایی سامانه خنک کاری را بهبود می‌بخشد. اما هنگامی که شار حرارتی بیش از حد بوده و سرعت سیال توانایی کندن حباب‌های تشکیل شده را ندارد، حبابها روی دیواره باقی مانده و تشکیل یک لایه بخار را می‌دهند (پدیده خفگی).

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش amerian@tafreshu.ac.ir

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش mehdipour@tafreshu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۱۵، تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۲/۰۱

تشکیل لایه بخار، علاوه بر افزایش افت فشار، به دلیل بالا بودن مقاومت حرارتی هوا، باعث بالا رفتن دمای دیواره و تنش حرارتی می شود. به شار حرارتی این نقطه، شار حرارتی بحرانی (CHF) گفته می شود. لذا به منظور بهره گیری از کارایی انتقال حرارت جوشش، باید حتی المقدور از رخداد پدیده CHF جلوگیری نمود. سیستم های خنک کاری جوششی<sup>۱</sup> به دلیل افزایش قابل توجه ضریب انتقال حرارت نسبت به سیستم های تکفاز و نیز امکان کاهش وزن موتور، کاهش وزن مبدل و کاهش توان تلمبه<sup>۲</sup> سیال خنک کننده در چند دهه اخیر مورد استقبال بسیار زیادی قرار گرفته اند.

جریان جوششی برای خنک کاری بدنه موتور، با مشکلاتی نیز همراه است :

۱- جوشش باعث افزایش خوردگی در راهگاه آب می گردد. لذا معمولاً با گذاشتن مخزنی قبل از رادیاتور، بخار موجود در آب جداسازی شده و به مایع تبدیل می شود.

۲- سامانه خنک کاری با پدیده جوشش به دلیل دو فاز بودن مایع خنک کاری نیاز به موادی با جنس مرغوبتر و عملیات ساخت پیچیده تر دارد که باعث بالاتر رفتن قیمت سامانه می شود.

۳- کنترل دینامیک حرکت سیال و تعیین دبی جریان به گونه ای که پدیده خفگی پیش نیاید، امر پیچیده ای است.

۴- رژیم جریان جوششی به صافی و جنس سطح حساس می باشد.

به دلیل پیچیده بودن پدیده جوشش، اکثر فعالیتهای صورت گرفته در این زمینه جنبه آزمایشگاهی دارند. کرمنگیل و همکاران [۲] در آزمایش تجربی به بررسی انتقال حرارت جابجایی در موتور پرداختند. آزمایشهای ایشان نشان می دهد که در ۳ سیلندر پدیده جوشش اتفاق می افتد و در یک سیلندر فیلم بخار حاصل شده است در این تحقیق بر اهمیت تخمین محل های تشکیل حباب تاکید شده است.

هو سونگ لی و همکاران [۳] در یک فعالیت آزمایشگاهی به بررسی تجربی اثر پدیده جوشش در موتور بنزینی پرداخته اند. روش اندسکوپی یکی دیگر از روشهای تجربی می باشد که در آشکارسازی پدیده جوشش استفاده می گردد. نمونه ای از این نتایج را در گزارش شرکت AVL [۴] می توان مشاهده نمود. عکسهای ویژه در مجاری خنک کاری نشان داده است که در شرایط ۱۰۰٪ بار روی موتور تا حدود حداکثر ۶۰٪ سطح را پدیده جوشش در بر میگیرد [۴].

هتسرونی و همکاران [۵] به بررسی مدل های متفاوت ریاضی پدیده جوشش و پایداری این پدیده در موتور احتراق پرداخته اند. در گزارش AVL [۴] دقت مدل های متفاوت Bdl و Chun و شرایط پاسخگویی این مدلها سنجیده شده است. Steiner و همکاران [۶] به بررسی تاثیر پارامترهای متفاوت، مانند سرعت سیال بر انتقال حرارت راهگاه های خنک کاری پرداخته اند. روش دیگری که به منظور افزایش کارایی انتقال حرارت مورد توجه محققین قرار گرفت استفاده از نانوسیالات بعنوان سیال عامل انتقال حرارت بجای سیال خالص است. نانو سیالات که از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می شوند، نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار زیاد در کاربردهای صنعتی هستند. اندازه ذرات مورد استفاده در نانو سیالات از ۱ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر می باشد.

<sup>1</sup> Boiling-mode cooling systems

<sup>2</sup> Water pump

این ذرات از جنس ذرات فلزی همچون مس، نقره و... یا اکسید فلزی همچون اکسید آلومینیوم، اکسید مس و... هستند. به علت اشکالات موجود در استفاده از سیالات سنتی و حتی میکرو سیال ها، از جمله رسوب یا ته نشینی ذرات، سائیدگی، مسدود نمودن لوله‌ها و افزایش افت فشار در مجرای سیال، محققان به نانو سیالات روی آوردند. در سال (۱۹۹۵) ایده نانو سیال توسط چوی [۷] مطرح شد و انقلاب بزرگی در زمینه انتقال حرارت در سیالات پدید آمد. در واقع نگاه تازه ای به سوسپانسیون سیال با ذراتی جامد در ابعاد نانو مطرح شد. همچنین به علت کوچک بودن ذرات به مقدار زیادی خوردگی، ناخالصی و مشکلات افت فشار کاهش پیدا کرده و پایداری سیالات در مقابل رسوب گذاری بهبود چشمگیری یافت. طبق تحقیقات انجام شده هدایت گرمایی نانو سیالات در مواردی تا صد برابر سیال خالص است [۷] و علاوه بر این شار حرارتی بحرانی را نیز به طور قابل ملاحظه ای افزایش می دهند [۸-۱۰].

عطف به عملکرد انتقال حرارتی سیستم های گرمایی خواص ترموفیزیکی سیال از جمله چگالی، حرارت مخصوص، هدایت گرمایی، لزجت و کشش سطحی از عوامل مهم به شمار می رود. بنابراین چگونگی تغییرات خواص ترموفیزیکی نانو سیال ها نسبت به سیال پایه قبل از استفاده از آنها باید تعیین شود. برای چگالی و حرارت مخصوص استفاده از مدل مخلوط می تواند راهگشا باشد. با این حال تغییرات خواص هدایت گرمایی، لزجت و کشش سطحی از پیچیدگی های بیشتری برخوردار است. و در زمینه گرمای نهان تبخیر نانو سیالات نیز مطالعات کمی انجام شده است. علاوه بر این به وسیله انتخاب سنجیده سیال پایه و نانو ذرات مناسب، اندازه نانو ذرات، درصد غلظت نانو ذرات می توان عملکرد سیستم های خنک کاری را بهبود بخشید.

لونگو و همکاران [۱۱] انتقال حرارت نانو سیال آب-آلومینیوم و نانو سیال آب-تیتانیوم را بررسی کرده اند. آنها دریافته اند که انتقال حرارت نانو سیال رابطه مستقیمی با کسر حجمی نانو ذرات و درجه حرارت کارکرد دارد. همچنین طبق بررسی آنها رفتار نانو سیال همانند سیال نیوتونی می باشد. در شرایط آزمایشگاهی یکسان نرخ انتقال حرارت نانو ذرات آلومینیوم-آب سه برابر نانو ذرات تیتانیوم-آب، بدست آمده است. نگوین و همکارانش [۱۲] افزایش انتقال حرارت نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم (با قطر ۳۶ و ۴۷ نانومتر) را به طور تجربی بررسی کرده اند. نتایج آنها نشان می دهد که برای نانو ذرات به قطر ۳۶ نانومتر و غلظت ۰٫۸٪ ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه ۴۰٪ افزایش می یابد. آنها همچنین پی بردند که ضریب انتقال حرارت برای نانو ذرات ۳۶ نانومتر در شرایط یکسان بیشتر از نانو ذرات با قطر ۴۷ نانومتر است.

فرج الهی و همکارانش [۱۳] خصوصیات انتقال حرارت نانو سیال های آب-اکسید تیتانیوم و آب-اکسید آلومینیوم را در یک مبدل حرارتی بررسی کرده اند. آنها ضریب انتقال حرارت را برای نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم در غلظت های ۰٫۳، ۰٫۵، ۰٫۷۵، ۱ و ۲٪ را به ترتیب ۴۶، ۵۶، ۴۶، ۳۸ و ۱۹٪ بیشتر از سیال پایه گزارش کرده اند. به طور مشابه ضریب انتقال حرارت را برای نانو سیال آب-اکسید تیتانیوم در غلظت های ۰٫۱۵، ۰٫۳، ۰٫۵ و ۰٫۷۵٪ را به ترتیب ۲۰، ۵۶، ۴۶، ۳۳ و ۱۸٪ بیشتر از سیال پایه گزارش کرده اند. در جریانهای جوشش نانو سیالات، این نانو ذرات معلق در سیال نه فقط در تولید و رشد حباب ها اثر می گذارند بلکه حرکت حباب ها و درآمیختگی حباب ها در جریان سیال نیز را تحت تاثیر قرار می دهند.

تنش های برشی و گرادیان دمایی سیال ممکن است سبب پخش غیریکنواخت نانوذرات در سیال پایه شود و به سبب آن بر پخش حباب ها و رژیم های جریان اثر بگذارد. بنابر این ضریب انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی به علت اثرات نانوذرات معلق متفاوت از سیال پایه باشد.

چهارده و همکارانش [۱۴] انتقال حرارت جوشش جریانی سیال خالص و نانوسیال آب-نقره به طور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده اند. نتایج آنها نیز نشان می دهد که با اضافه کردن نانوذرات ضریب انتقال حرارت نسبت به آب افزایش می یابد و با افزایش غلظت نانوذرات ضریب انتقال حرارت نیز بیشتر می شود ولی دمای دیواره نانوسیال نسبت به آب خالص کاهش می یابد. همچنین نتایج آنها نشان می دهد که در کیفیت بخار بالا حضور نانوذرات در سیال آب هیچ تاثیری در ضریب انتقال حرارت موضعی ندارد.

موریرا و همکاران [۱۵] ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم به صورت تجربی بررسی کرده اند. هدف اصلی این تحقیق بررسی تاثیر غلظت نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت است.

در این تحقیق ضریب انتقال حرارت نانوسیال بیش از سیال پایه گزارش شده است. یکی از محدودیت های استفاده از جریان دوفازی تماس بخار با سطح انتقال حرارت است که در شار حرارتی بحرانی روی می دهد و به موجب آن دمای دیواره کانال به طور ناگهانی افزایش می یابد. کیم و همکاران [۱۶] آب-اکسید آلومینیوم را در گذر از یک لوله مسی عمودی مورد بررسی قرار داده اند. آنها گزارش کرده اند که شار حرارتی بحرانی جوشش جریانی آب-اکسید آلومینیوم حدود ۵۰٪ نسبت به سیال پایه افزایش می یابد. سانگ کیم و همکاران [۱۷] در مطالعه ای اثر نانوذرات آلومینیوم در آب را بر افزایش شار حرارتی بحرانی بررسی کرده اند و آنها نشان دادند شار حرارتی بحرانی می تواند تا ۳۰ درصد نسبت به حالت بدون نانوذرات افزایش یابد. سانگ کیم و همکاران در مقاله دیگر [۱۸] علاوه بر نانوذرات آلومینیوم، تاثیر الماس و اکسید روی را (برای غلظت های کمتر از ۰٫۱٪) بر انتقال حرارت جوششی مورد بررسی قرار داده اند.

افزایش شار حرارتی بحرانی را برای آلومینیوم، اکسید روی و الماس به ترتیب ۵۳، ۵۳ و ۳۸٪ نسبت به سیال پایه گزارش داده اند. کیم و همکاران [۱۹] به صورت تجربی اثر نانو ذرات آلومینیوم در آب را در افزایش شار حرارتی بحرانی جوشش جریانی بررسی کرده اند. افزایش شار حرارتی بحرانی اجازه می دهد تجهیزات گرمایی در محدوده شرایط کارکرد بالاتری به کار گرفته شوند. آنها ۷۰٪ افزایش در شار حرارتی بحرانی نانوسیال نسبت به سیال پایه را در همه شرایط آزمایشگاهی گزارش داده اند.

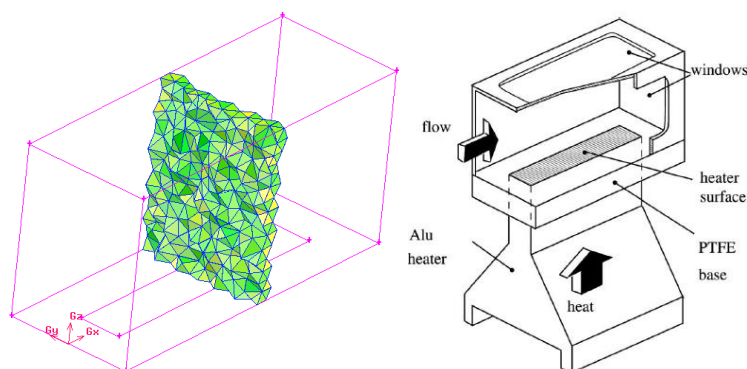
کیم و همکاران [۲۰] در مطالعه ای اثر نانوذرات آلومینیوم با کسر حجمی (۰٫۰۰۱ و ۰٫۰۰۱٪) و نانوذرات آلومینیوم ته نشین شده را بر شار حرارتی بحرانی جوشش جریانی بررسی کرده اند. در تحقیق حاضر، نحوه مدل سازی دو فازی مجرای خنک کاری موتور معرفی می شود. مدل سازی معرفی شده قابل استفاده برای هندسه های سه بعدی نیز می باشد. در این مدل می توان نقاط تشکیل حباب، کیفیت و تجمع حبابها را تخمین زد. مدل سازی یکبار برای سیال عامل آب خالص و بار دیگر برای نانوسیال  $TiO_2$  انجام شده است. تغییرات خواص ترموفیزیکی نانوسیال نسبت به سیال پایه مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجاکه روابط جامعی در تاریخچه این موضوع در رابطه محاسبه آنتالپی نهان تبخیر (تحت تاثیر نانوسیالات) وجود ندارد لذا در این مقاله با استفاده از ستاپ آزمایشگاهی ساخته شده آنتالپی نهان تبخیر نانوسیال محاسبه میشود و در نهایت تغییرات ضریب انتقال حرارت و دمای سطح مجاری خنک کاری محاسبه می شود.

در این تحقیق نشان داده شده است که نانو ذرات  $TiO_2$  باعث می شود که ضریب انتقال حرارت بهتر گردد و آنتالپی تغییر فاز بزرگ شود. هر دو پدیده باعث خنک تر شدن سطح مجرای خنک کاری شده است و از طرف دیگر شار بحرانی نیز افزایش می یابد.

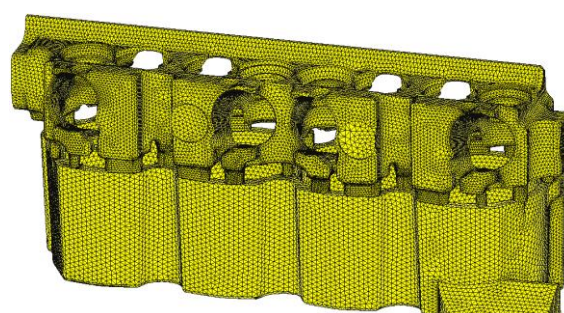
## ۲- تولید هندسه و شبکه بندی

برای بررسی عملکرد نانو ذرات و اثر آن بر انتقال حرارت جوششی مخصوصا در شرایط مشابه مجرای خنک کاری موتور هندسه نشان داده شده در شکل (۱) مبنای کاری بوده است. این هندسه مجرای استاندارد برای بررسی انتقال حرارت جوششی می باشد. در مرجع [۶] نتایج تست تجربی برای انتقال حرارت جوششی این کانال گزارش شده است. این هندسه به منظور ارزیابی اثر نانو ذرات و بررسی دقت مدل معرفی شده در این تحقیق مورد استفاده قرار می گیرد.

نحوه مش زدن و مشخصات کامل هندسه در مرجع [۲۱] آورده شده است. برای بررسی اثر نانو ذرات بر انتقال حرارت موتور، از هندسه واقعی مجرای خنک کاری موتور ملی (EF7) کمک گرفته شده است. در شکل (۲) هندسه مجرا و مش نهایی نشان داده شده است. در مرجع [۲۲-۲۳] مشخصات مش و نحوه تولید مش برای رسیدن به نتایج مطلوب بحث شده است.



شکل ۱- هندسه و شبکه بندی مورد استفاده در مدلسازی حاضر



شکل ۲- شبکه بندی هندسه مجرای آب موتور EF7

### ۳- مدلسازی

یکی از روشهای مدلسازی انتقال حرارت جوشش، مدلسازی دو فاز می باشد. در این روش به کمک محاسبه تعداد و قطر حباب، روند تشکیل حباب در هر المان به طور مجزا بدست می آید و نحوه نفوذ و از بین رفتن حباب شبیه سازی می گردد. در این حل، فیزیک حباب به طور کامل شبیه سازی شده و تاثیر حبابها بر انتقال حرارت و حرکت سیال در نظر گرفته می شود. در این روش ۸ معادله (معادله پیوستگی، معادله ممنتوم (۳ معادله)، معادله توربولانس (۲ معادله)، معادله غلظت و معادله انرژی) به طور هم زمان باید حل گردد.

#### ۳-۱- انتقال حرارت جوشی در راهگاههای خنک کاری

در مدل دو فاز برای مدلسازی انتقال حرارت جوشش از رابطه زیر کمک گرفته می شود.

$$Q_{tot} = Q_F + Q_Q + Q_E \quad (1)$$

$Q_F$ : نشان دهنده انتقال حرارت جابجایی (توربولانس) می باشد. این بخش از انرژی از رابطه زیر محاسبه می شود [۲۴]:

$$q_F = h(T_w - T_L^{cell})(1 - \Omega) \quad (2)$$

$\Omega$  نشان دهنده درصدی از سطح می باشد که توسط حباب پوشانده شده است:

$$\Omega = \min(\pi \frac{(ad_w)^2}{4}, 1) \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $a$  ضریب نفوذ است که در مدل حاضر  $a=2$  در نظر گرفته شده است [۲۴].  $h$  ضریب انتقال حرارت جریان آشفته می باشد. در صورت اعمال نانوسیال بجای سیال خالص، ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از رابطه معروف دوانگ و وونگوایزز [۴۰] قابل محاسبه است:

$$Nu = 0.074 Re^{0.707} Pr^{0.385} \phi^{0.074} \quad (4)$$

$$3000 < Re < 18000, \quad 0 < \phi < 2\%$$

$\phi$  در رابطه بالا نشان دهنده کسر حجمی نانو ذرات است.

حالت جامع تر رابطه بالا به صورت زیر می باشد:

$$q_F = h(1 - \Omega)(\nabla T \cdot \vec{n}) \quad (5)$$

$q_Q$ : نشان دهنده انتقال حرارت به دلیل جایگزین شدن سیال با دمای متوسط لایه های بالایی به جای حباب جدا شده می باشد. که توسط رابطه زیر شبیه سازی می شود [۲۱]:

$$q_Q = h_Q(T_w - T_{LW})\Omega \quad (6)$$

$$T_{LW} = T_w - \frac{T_{y^+(LW)}^+}{T_{y^+(L)}^+}(T_w - T_L)$$

در رابطه فوق  $T_{y^+(LW)}^+$  دمای بی بعد در فاصله  $y^+(LW)$  می باشد و  $h_Q$  نشان دهنده ضریب جابجایی جوشش می باشد. برای محاسبه ضریب جابجایی جوشش از فرمول Mikic and Rohsenow استفاده می شود [۲۴]:

$$h_Q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} f \sqrt{t_w k_L \rho_L C_{PL}} \quad (7)$$

که در فرمول مذکور  $f, t_w$  نشان دهنده زمان و فرکانس جداسازی دو حباب متوالی می باشد. انتقال انرژی ناشی از تبخیر سیال است که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$Q_E = \dot{m}_w h_{LG} \quad (8)$$

در این رابطه،  $\dot{m}_w$  مقدار جرم سیال تبخیر شده است.

برای محاسبه جرم بخار تبخیر شده می توان از رابطه زیر استفاده کرد [۲۴]:

$$\dot{m}_w = \rho_g \frac{\pi d_w^3}{6} N_a f A \quad (9)$$

در رابطه فوق  $d_w$  قطر جداسازی حباب  $f$  فرکانس جداسازی حباب  $N_a$  چگالی سطحی حباب روی سطح می باشد. در محاسبات مربوط به پدیده جوشش تخمین دقیق قطر جداسازی مهمترین پارامتر موثر در دقت نهایی می باشد. در مرجع [۲۴] برای محاسبه  $d_w$  فرمول زیر پیشنهاد شده است.

$$d_w = \min(0.6[mm] \exp(\frac{-\Delta T_{sub,LW}}{45}), 1.4[mm]) \quad (10)$$

برای محاسبه  $N_a$  (چگالی حباب روی سطح) فرمول زیر استفاده می شود [۲۴]:

$$N_a [m^{-2}] = (185 \Delta T_{sup} [K])^{1.805} \quad (11)$$

برای محاسبه فرکانس جداسازی حباب از فرمول Cole (۱۹۶۰) استفاده میشود.

$$f = \sqrt{\frac{4g(\rho_L - \rho_G)}{3d_w \rho_L}} \quad (12)$$

### ۳-۲- مدلسازی دو فاز

برای مدلسازی دو فاز از مدل میکسچر استفاده شده است. در این روش در هر المان غلظت بخار آب قابل محاسبه است. در این مدل معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی برای مخلوط و یک معادله کسر حجمی برای فاز ثانویه و نیز تعدادی معادله جبری برای محاسبه سرعتهای نسبی دو فاز مورد محاسبه قرار می گیرند. در این روش اثر خواص فیزیکی هر فاز کاملاً دیده می شود. به عنوان مثال برای معادله پیوستگی می توان رابطه زیر را نوشت [۲۱]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m) = 0 \quad (13)$$

بطوریکه  $\bar{v}_m$  سرعت متوسط جرمی و  $\rho_m$  چگالی مخلوط جریان است که توسط روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$v_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \bar{v}_k}{\rho_m} \quad (14)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (15)$$

$\alpha_k$  در روابط فوق کسر حجمی فاز k ام را نشان می دهد.

### ۳-۳-۳- مدلسازی اثر نانو ذرات

با فرض ترکیب همگن نانوذرات در سیال پایه، خواص ترموفیزیکی نانوسیالات قابل محاسبه می باشند. این امر برای خواصی همچون چگالی، ویسکوزیته، ظرفیت حرارتی، ضریب رسانش گرمایی و ... در مراجع متفاوتی گزارش شده است.

#### ۳-۳-۱- چگالی نانوسیال

با فرض همگن بودن نانوسیال چگالی نانوسیال را می توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود [۲۵]:

$$\rho_{nf} = \rho_p \phi + \rho_l (1 - \phi) \quad (16)$$

بطوریکه، اندیس  $p$  مربوط به نانوذرات است، اندیس  $l$  مربوط به سیال پایه در حالت مایع و اندیس  $nf$  مربوط به نانوسیال در حالت مایع است. همچنین  $\phi$  کسر حجمی نانوذرات را نشان می دهد.

#### ۳-۳-۲- لزجت دینامیکی نانوسیال

برای محاسبه لزجت دینامیکی نانوسیالی می توان از رابطه زیر استفاده نمود [۲۶]:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_l}{(1 - 34.87(d_p/d_f)^{-0.3} \phi^{1.03})} \quad (17)$$

که در رابطه فوق  $d_f$  به صورت رابطه (۱۸) تعریف می شود [۲۵]:

$$d_f = 0.1 \left( \frac{6M}{N\pi\rho_{l,ref}} \right) \quad (18)$$

$N$  ثابت آووگادرو است،  $M$  جرم مولی سیال پایه است و  $\rho_{l,ref}$  چگالی سیال پایه در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد است.

#### ۳-۳-۳- هدایت گرمایی نانوسیال

هدایت گرمایی نانوسیال به واسطه هدایت گرمایی بالای نانوذرات، مرتب سازی نانولایه<sup>۱</sup>، ساختار خوشه ای نانوذرات<sup>۲</sup> و حرکت برونین نانوذرات افزایش می یابد [۲۷].

<sup>1</sup> Nanolayer ordering

<sup>2</sup> cluster structure



علاوه بر این اثرات برونین منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت هم می شوند (رابطه ۴). یکی از معروفترین روابطی که در محاسبه هدایت گرمایی نانوسیالات از آن استفاده می شود رابطه همیلتون-کراسر است [۲۷]:

$$k_{nf} = k_f \left[ \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (19)$$

در این رابطه  $k_{nf}, k_f, k_p$  ضریب رسانش گرمایی نانوذرات، ضریب رسانش گرمایی سیال و ضریب رسانش گرمایی نانوسیال است. در این رابطه  $n$  فاکتور شکلی نانوذرات است که برای ذرات کروی ۳ و برای ذرات استوانه ای ۱,۵ در نظر گرفته می شود.

### ۳-۳-۴- ظرفیت گرمایی نانوسیال

محاسبه ظرفیت گرمایی نانوسیال نیز با استفاده از رابطه (۲۰) صورت گرفته است [۲۵]:

$$c_{p_{nf}} = \frac{\phi(\rho c_p)_p + (1-\phi)(\rho c_p)_l}{\rho_{nf}} \quad (20)$$

## ۴- آنتالپی نهان تبخیر نانوسیال

برخلاف سایر خواص ترموفیزیکی نانوسیالات، مطالعات و آزمایشهای اندکی جهت محاسبه آنتالپی نهان تبخیر در تاریخچه موجود می باشد. در اکثر مدلسازی های صورت گرفته، آنتالپی نهان تبخیر با آنتالپی سیال خالص یکسان فرض شده است. این درحالیست که آنتالپی نهان تبخیر بواسطه افزوده شدن نانوذرات به سیال پایه دستخوش تغییر می شود [۲۹ و ۳۰]. با افزوده شدن نانوذرات به سیال پایه دو حالت ممکن است رخ دهد: حالت اول تشکیل پیوند جدید بین مولکولهای سیال پایه و نانوذرات اضافه شده که منجر به افزایش استحکام سیال نسبت به حالت خالص آن شده و در نتیجه آنتالپی نهان تبخیر افزایش می یابد [۳۱-۳۳] این در حالیست که در برخی شرایط حالت دومی رخ می دهد و آن شکسته شدن پیوندهای مولکولی سیال پایه برای جادادن نانوذرات است. در این شرایط نانوسیال حاصل شده استحکام پایین تری نسبت به سیال خالص داشته و در نتیجه آنتالپی نهان تبخیر پایین تری دارد [۳۴]. برخلاف دیگر خواص ترموفیزیکی نانوسیال، برای آنتالپی نهان تبخیر نانوسیال روابط تئوری بسیار محدود می باشد. روابط موجود در تاریخچه نیز در اکثر شرایط با یکدیگر در تناقض هستند [۳۵ و ۳۶]. از آنجه که آنتالپی نهان تبخیر یکی از فاکتورهای مهم در محاسبه شار حرارتی بحرانی است، در این پژوهش محاسبه آنتالپی نهان تبخیر بر مبنای آزمایش اندازه گیری و محاسبه می شود.

### ۴-۱- معرفی دستگاه تست آزمایشگاهی و تئوری آزمایش

#### ۴-۱-۱- معرفی دستگاه تست

دستگاه تست مورد استفاده جهت محاسبه و اندازه گیری آنتالپی نهان تبخیر نانوسیالات، دیگ مارست است. دیگ مارست دستگاهی است که برای شبیه سازی ترمودینامیکی فرایند جوشش مورد استفاده قرار می گیرد (شکل ۳). این دستگاه آزمایشگاهی از یک مخزن فشار استیل که به یک هیتر مجهز است تشکیل شده است.

حجم مخزن ۳۱۵۰ میلی لیتر است. فشار سنج با دقت  $\pm 10 \text{ Pa}$ ، سوپاپ اطمینان و نمایشگر فشار و نیز دماسنج با دقت  $(\pm 0.1, 1^\circ \text{C})$ ، سایر اجزای این دستگاه آزمایشگاهی هستند. با پرشدن مخزن با سیال مورد نظر، هیتر روشن می شود تا شرایط جوشش در مخزن برقرار شده و مایع داخل مخزن شروع به تبخیر کند. در این شرایط دما و فشار در حالت اشباع مرتباً از روی نمایشگرها رویت و ثبت می شوند.

#### ۴-۲- مبانی آزمایش

انتقال فاز از مایع به گاز حین فرایند تبخیر با استفاده از معادله کلایوس-کلاپیرون مدلسازی می شود. حین تغییر فاز خواص سیال مورد بررسی از جمله دما و فشار دستخوش تغییر می شوند. بعنوان مثال مایعی که بر مبنای دریافت حرارت به فاز بخار تبدیل می شود تغییرات حجم ناگهانی خواهد داشت. بر مبنای رابطه کلایوس-کلاپیرون می توان نوشت:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{h_{fg}}{T\Delta V} \quad (21)$$

$dP/dT$  شیب تغییرات فشار نسبت به دماست،  $h_{fg}$ ، آنتالپی نهان تبخیر است و  $\Delta V$  تغییرات حجم ناشی از تغییر فاز است (اختلاف حجم مخصوص فاز مایع با اندیس  $f$  و فاز بخار با اندیس  $g$ )

$$\Delta V = v_f - v_g \quad (22)$$

از آنجا که حین تغییر فاز المان گازی شکل بصورت ناگهانی حجم بالایی را اشغال می کند، می توان از حجم مخصوص مایع نسبت به گاز صرف نظر نمود و رابطه را به شکل ساده تر زیر نوشت:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{h_{fg}}{Tv_g} \quad (23)$$

با اعمال فرض گاز ایده آل  $v_g = \frac{RT}{P}$  رابطه فوق به شکل زیر بازنویسی می شود:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{Ph_{fg}}{T^2R} \quad (24)$$



شکل ۳- دستگاه دیگ مارست

به کمک نقاط اندازه گیری شده بر روی خط تغییر فاز ماده می توان رابطه فوق را به شکل ساده تر زیر نیز نوشت:

$$\frac{dP}{P} = \frac{h_{fg}}{R} \frac{dT}{T^2} \quad (25a)$$

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} = \frac{h_{fg}}{R} \int \frac{dT}{T^2} \quad (25b)$$

$$\ln \frac{P_1}{P_2} = -\frac{h_{fg}}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (25c)$$

نانوسیال مورد استفاده در این آزمایشها آب-TiO<sub>2</sub> است که با درصد حجمی های 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5%, 3% مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفته است.

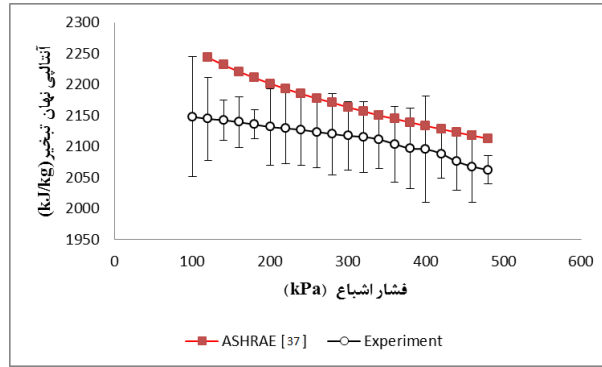
#### ۴-۳- آنالیز عدم قطعیت

پیش از انجام آزمایش کلیه ابزارهای اندازه گیری کالیبر شدند. آنالیز عدم قطعیت بر مبنای تئوری موفت [۳۷] انجام شده است. در آزمایش حاضر اطلاعات دما و فشار از طریق ابزارهای موجود اندازه گیری می شوند. فشارسنج با دقت  $\pm 10$  Pa و دماسنج با دقت  $(\pm 0.1^\circ\text{C})$  ابزارهای اندازه گیری این آزمایش هستند. با چشم پوشی از خطای قطع و خطای دید کاربر حین آزمایش، عدم قطعیت آزمایش حاضر که بیشتر مربوط به زمان پاسخ دماسنجهها هستند ۰.۴۵٪ و عدم قطعیت در اندازه گیری فشار نیز حدود ۰.۱٪ است. لذا عدم قطعیت آزمایش حاضر کمتر از ۰.۵٪ محاسبه می شود.

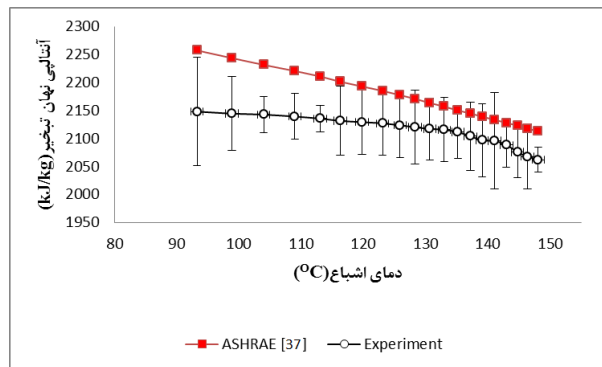
#### ۵- روند شبیه سازی

به منظور شبیه سازی انتقال حرارت در مجاری خنک کاری خودرو ابتدا به مدلسازی سه بعدی هندسه واقعی راهگاه آب بدنه و بستار با در نظر گرفتن واشر بین آنها پرداخته می شود. در ادامه نمونه کامل راهگاه آب (بستار، بدنه و واشر) با استفاده از نرم افزار تولید مش، مش بندی می شود. برای بدست آوردن مش مناسب، لازم است که مدل در نرم افزار مذکور کاملا تصحیح شده و خطوط زاید آن حذف گردد. برای حل عددی جریان و انتقال حرارت از نرم افزار فلونت استفاده میگردد. برای مدلسازی متد مذکور به دلیل محدودیت در شرایط مرزی در فلونت و خاص بودن این موضوع باید برنامه کامپیوتری نوشته شود که فیزیک مذکور در حل جریان محاسبه گردد. به همین دلیل از قابلیت برنامه نویسی تحت فلونت استفاده شده این قابلیت به نام udf نویسی معروف می باشد.

UDF ها برنامه‌هایی تحت زبان C اما با دستوراتی خاص نرم افزار FLUENT هستند که بوسیله آنها می توان در این نرم افزار انواع شرایط مرزی، خواص مواد، ترمهای منبع و ... را به صورت دلخواه تعریف نمود. به منظور حل عددی جریان با معادلات حاکم شرح داده شده از روش سیمپل بر مبنای حجم محدود و گسسته سازی مرتبه اول استفاده شده است. گسسته سازی ترم جابجایی با استفاده از روش upwind گسسته شده است و برای مدلسازی آشفتگی جریان از مدل  $k-\epsilon$ -RNG استفاده شده است. رژیم جریان حبابی با استفاده از مدل mixture مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۴- تغییرات آنتالپی نهان تبخیر با فشار اشباع، مقایسه با نتایج هندبوک اشری



شکل ۵- تغییرات آنتالپی نهان تبخیر با دمای اشباع، مقایسه با نتایج هندبوک اشری

## ۶- صحت سنجی

صحت سنجی نتایج بدست آمده در این پژوهش در دو بخش مختلف صورت گرفته است. بخش اول به بررسی صحت نتایج آزمایشگاهی آنتالپی نهان تبخیر می پردازد و در بخش دوم صحت نتایج مدلسازی عددی مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۶-۱- صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی آنتالپی نهان تبخیر

به منظور حصول اطمینان از اندازه گیری و محاسبات انجام شده حین انجام آزمایش، ابتدا آزمایش برای سیال آب خالص انجام می شود. بدین منظور مخزن دیگ مارست با آب خالص دیونیزه پر شده و یکبار آزمایش بر این مبنا انجام می شود.

به منظور صحت سنجی نتایج از نتایج موجود در هندبوک اشری استفاده می شود. به منظور بالا بردن دقت آزمایش و حذف خطاهای احتمالی هر یک از آزمایشها سه بار تکرار شده اند. مقایسه کار آزمایشگاهی با نتایج هندبوک اشری [۳۸] که در شکل (۵ و ۴) نمایش داده شده اند حاکی از آن است که بیشترین خطا ۰,۸٪ و خطای میانگین ۲,۷٪ می باشد. پس از حصول اطمینان از دقت قابل قبول آزمایشهای انجام شده مخزن دیگ مارست جهت اندازه گیری آنتالپی نهان نانوسیالات با نانوسیال مورد بررسی پر می شود.

## ۶-۲- صحت سنجی مدلسازی عددی دو فاز

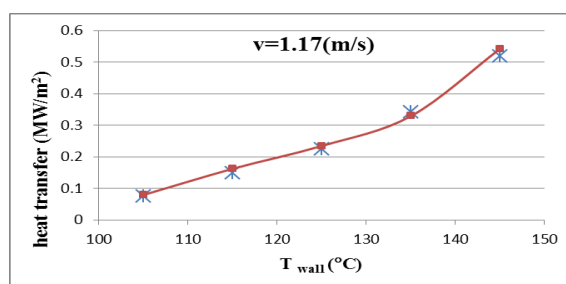
به منظور بررسی درستی مدلسازی عددی انجام شده از نتایج آزمایشگاهی استینر [۶] استفاده می شود. شرایط تست تحقیق انجام شده توسط استینر مشابه عملکرد موتور احتراقی است و قطر هیدرولیکی هندسه مورد بررسی در این مقاله با مقاله استینر یکسان در نظر گرفته شده تا بتوان مقایسه منطقی بین نتایج داشت. مقطع تست آزمایش استینر کانالی آلومینیومی با عرض و طول ۴۰ و ۳۰ میلی متر است که از پایین به هیتز مجهز شده است. گرما به سیال عامل جاری در کانال از طریق صفحه با ابعاد ۶۰ و ۱۰ میلیمتر منتقل می شود. دما و شار دیواره با استفاده از ابزارهای موجود اندازه گیری می شوند. سیال عامل مورد بررسی، آب، با دمای  $95^{\circ}\text{C}$  به محفظه وارد می شود. مدل دوفاز مورد بررسی در کار عددی حاضر روی هندسه آزمایش استینر پیاده سازی شده است (شکل (۶)). تعداد ۵۰۰۰۰ مش چهار وجهی مورد استفاده قرار گرفته است. (هندسه و مش مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است).

دو حالت مختلف با دو عدد رینولدز ۴۰۰۰۰ و ۱۳۰۰۰ (متناسب با سرعتی به ترتیب ۱،۱۷ و ۰،۳۹ m/s) مورد بررسی قرار گرفته اند. جالب توجه است که مدل عددی حاضر برای رینولدز پایین (۱۳۰۰۰) خطایی در حدود ۱۸٪ دارد و این درحالیست که خطای مدل برای رینولدز (۴۰۰۰۰) تا ۹٪ کاهش می یابد.

## ۷- نتایج

### ۷-۱- نتایج دستگاه تست نانو

هنگامی که نانوذرات به سیال پایه اضافه می شوند، موجب در هم شکستن برخی از پیوندهای مولکولی سیال پایه می شوند تا بدین ترتیب فضایی برای جایگیری خود در سیال پیدا کنند. چندی بعد هیدروژن های آزاد تشکیل پیوندهای جدیدی با نانوذرات می دهند. اینکه در مجموع آنتالپی نهان تبخیر نانوسیال نسبت به سیال پایه بیشتر و یا کمتر است کاملاً مربوط به انرژی پتانسیل پیوندهای جدید است. در صورتیکه پتانسیل پیوندهای تشکیل شده از پتانسیل از دست رفته بواسطه شکستن پیوندهای آب خالص بیشتر باشد نانوسیال آنتالپی نهان بیشتری نسبت به سیال پایه خواهد داشت و در غیر اینصورت آنتالپی نهان نانوسیال از سیال پایه کمتر است. تشکیل پیوند جدید بین مولکولهای سیال پایه و نانوذرات به مواردی چون جنس نانوذره، شکل، سایز و درصد حجمی نانوذرات در سیال وابسته است. علاوه بر این فشار کارکرد نیز در این راستا نقش بسیار مهمی ایفا می کند.



شکل ۶- انتقال حرارت دیواره نسبت به تغییرات دمای دیواره ( $U_b = 1.17\text{m/s}$ ,  $p = 1.5\text{ bar}$ ,  $T_b = 95^{\circ}\text{C}$ )

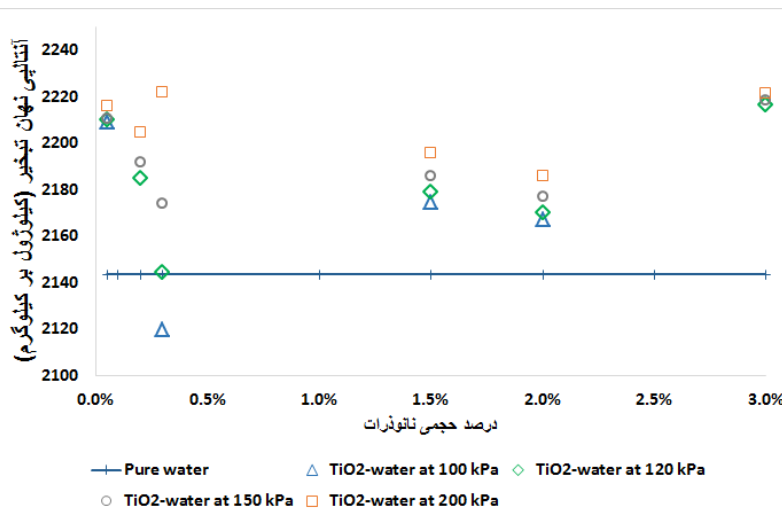
■ نتایج مدلسازی حاضر و \* نتایج آزمایشگاهی

شکل (۷) تغییرات آنتالپی نهان تبخیر نانوسیال  $\text{TiO}_2$ -آب را در درصدهای حجمی مختلف نانوذره در فشار های کارکرد مختلف نشان می دهد. در فشار کارکرد ۱۰۰ کیلوپاسکال بیشترین میزان افزایش آنتالپی نهان تبخیر نانوسیال  $\text{TiO}_2$  نسبت به سیال آب خالص ۳۰٪ است. در فشار ۱۱۰-۱۲۰ کیلوپاسکال، بیشترین میزان افزایش آنتالپی نهان تبخیر نانوسیال  $\text{TiO}_2$  نسبت به سیال آب خالص ۳۸٪ و در فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال، بیشترین میزان افزایش آنتالپی نهان تبخیر نانوسیال  $\text{TiO}_2$  نسبت به سیال آب خالص ۴۱٪ می باشد.

از آنجا که محدوده فشاری جریان در مجاری خنک کاری بین ۱۱۰-۱۴۰ کیلو پاسکال است نتایج فشارهای بالاتر در این بخش ارائه نمی شود. آنچه مشخص است افزایش فشار به تشکیل پیوندهای جدید مولکولی کمک کرده و منجر به افزایش آنتالپی نهان تبخیر سیال می شود. این افزایش آنتالپی در فشار ۳۶۰ کیلوپاسکال تا ۴۹٪ ادامه پیدا می کند (جدول (۱)). ماکزیمم میزانهای افزایش آنتالپی نهان تبخیر در کلیه فشارها برای درصد حجمی ۱٪ این نانوذره حاصل می شود. جالب توجه است که بیشترین میزان افزایش ضریب انتقال حرارت (۲۶٪) نیز در همین درصد حجمی رخ می دهد. [۳۹].

**جدول ۱-** میزان افزایش آنتالپی نهان تبخیر برای یک درصد حجمی نانوذره  $\text{TiO}_2$  در فشارهای مختلف

فشار (کیلوپاسکال)	۱۰۰	۱۱۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۷۰	۳۶۰
افزایش آنتالپی نهان	۳۰٪	۳۸٪	۳۹٪	۴۱٪	۴۵٪	۴۹٪



**شکل ۷-** تغییرات آنتالپی نهان تبخیر نانوسیال  $\text{TiO}_2$  با سیال پایه آب در مقایسه با سیال خالص آب در درصدهای مختلف برای فشار اشباع ۱۰۰kPa الی ۲۰۰kPa

## ۷-۲- نتایج اثر نانوذرات بر انتقال حرارت

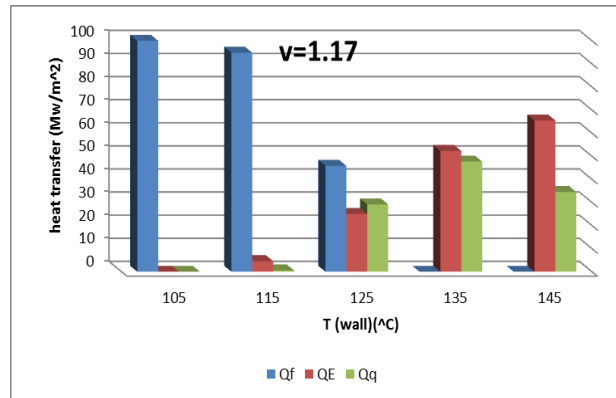
در این بخش اثر اعمال نانوذرات بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۸) سهم هر بخش از انتقال حرارت با شرط استفاده از سیال خالص نشان داده شده است. همانطور که از این شکل می‌توان دریافت که برای دماهای دیواره کمتر از  $105^{\circ}C$ ، از آنجا که هنوز فرایند جوشش آغاز نشده است، سهم بخش اول انتقال حرارت ( $Q_F$ ) به سایر بخشها غالب است. این فرایند تا دمای دیواره  $125^{\circ}C$  ادامه می‌یابد. به محض شروع پدیده جوشش دو بخش دیگر انتقال حرارت مقدار پیدا می‌کنند. برای دمای دیواره بیشتر از  $125^{\circ}C$ ، بخش سوم انتقال حرارت (بخش ناشی از تبخیر)، سهم غالب انتقال حرارت را دارد. در دماهای بالاتر خصوصاً در دمای  $145^{\circ}C$  سهم بخش اول انتقال حرارت به شدت کاهش می‌یابد. این امر نشان دهنده تشکیل فیلم حباب روی دیواره و رسیدن به شرایط شار حرارتی بحرانی است.

به منظور بررسی دقیقتر اثر نانوذرات بر رفتار حرارتی سیال، اثر هر یک از بخشهای انتقال حرارت برای سیال عامل خالص و نانوسیال بصورت جداگانه در شکلهای (۹-۱۱) نشان داده شده است. شکل (۹) بخش اول انتقال حرارت ( $Q_F$ ) را برای دمای مختلف دیواره برای سیال عامل خالص و نانوسیال نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل می‌توان دریافت در دماهای بالای دیواره که بعلت رخداده شرایط شار حرارتی بحرانی بخش اول انتقال حرارت سیال خالص صفر شده بود، در شرایط استفاده از نانوسیال این بخش همچنان مقدار غیر صفر دارد. این امر نشان دهنده اثر مطلوب نانوذرات در تعویق پدیده خشکی سطح و بالاتر بردن شار حرارتی بحرانی است. اثر نانوذرات بر دو بخش دیگر انتقال حرارت در شکلهای (۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۱۰) می‌توان دریافت سهم بخش دوم انتقال حرارت ( $Q_q$ ) با اضافه کردن ۱٪ حجمی نانوذرات  $TiO_2$  افزایش می‌یابد. همانطور که در بخش بررسی آنتالپی نهان تبخیر نانوسیال بحث شد، مهمترین نقش نانوذرات  $TiO_2$  در افزایش آنتالپی نهان تبخیر و در نتیجه افزایش سهم انتقال حرارت ناشی از تبخیر است (بخش سوم). این اثر در بررسی مجموع انتقال حرارت اهمیت چندانی ندارد. زیرا رژیم جریان مورد بررسی در مجاری خنک کاری موتور، رژیم مادون سرد (subcooled) است که در آن دمای متوسط جریان از دمای اشباع سیال پایین تر است. لذا بسته های مایع تبخیر شده در مجاورت جداره در لایه های بالاتر چگالش می‌یابند و سهم دریافت شده انتقال حرارت را به لایه های بالایی اضافه می‌کنند. این امر در بررسی کل انتقال حرارت تأثیری ندارد و صرفاً در راستای کاهش دمای دیواره مفید واقع می‌شود.

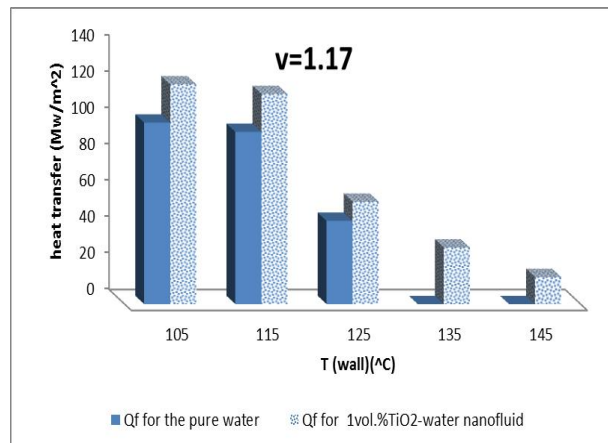
می‌توان مشاهده نمود که افزودن نانوذرات منجر به افزایش کلیه بخشهای انتقال حرارت شده است که در این میان بیشترین اثر افزودن نانوذرات روی بخش انتقال حرارت ناشی از تبخیر مشهود است. افزایش انتقال حرارت ناشی از تبخیر بعلت افزایش آنتالپی نهان تبخیر موجبات کاهش دمای دیواره و به تبع آن کاهش تنشهای حرارتی را فراهم می‌کند. این بخش از انتقال حرارت، در رژیم مورد بررسی در خنک کاری موتور، تأثیر زیادی بر مجموع انتقال حرارت نخواهد داشت.

به عبارت دیگر از آنجا که رژیم قالب انتقال حرارت جهت خنک کاری موتور، رژیم مادون سرد است انرژی دریافت شده از دیواره موتور صرف تبخیر بخشی از سیال مجاور دیواره مجرای خنک کاری می‌شود اما بسته تبخیر شده در لایه های بالاتر سیال مجدداً چگالش می‌یابد. زیرا دمای بالک سیال در رژیم مادون سرد پایین تر از دمای اشباع است.

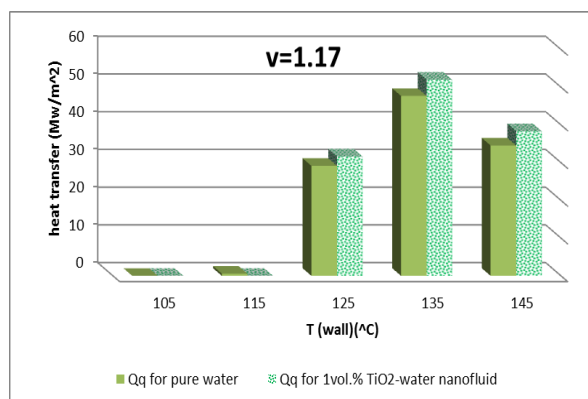
لذا افزایش آنتالپی نهان تبخیر در بهبود این بخش از انتقال حرارت ( $Q_E$ ) منجر به کاهش دمای بدنه شده و کاهش تنشهای حرارتی را به همراه خواهد داشت و مادامی که رژیم جریان داخل مجاری خنک کاری به حالت حبابی (رژیم جریان در دمای بالک اشباع) نرسیده است تاثیری بر بهبود انتقال حرارت کلی نخواهد داشت.



شکل ۸- سهم هر یک از بخشهای انتقال حرارت در دماهای مختلف دیواره [۲۱]

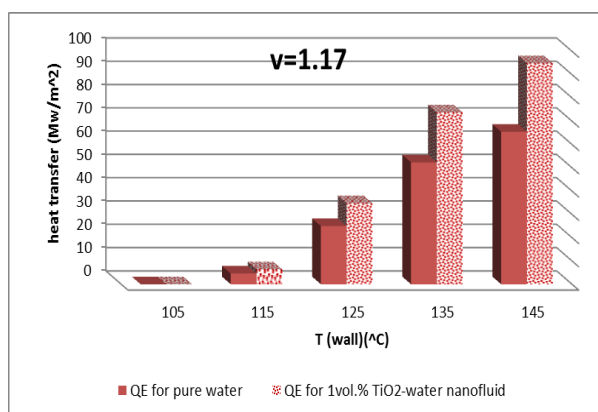


شکل ۹- اثر نانوذرات بر بخش اول انتقال حرارت ( $Q_F$ )



شکل ۱۰- اثر نانوذرات بر بخش دوم انتقال حرارت ( $Q_Q$ )



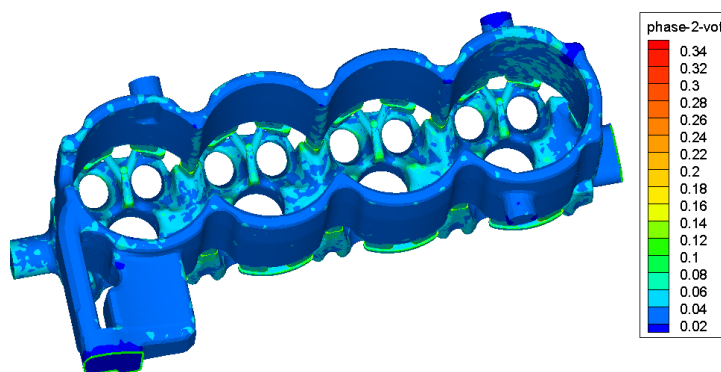


شکل ۱۱- اثر نانوذرات بر بخش سوم انتقال حرارت ( $Q_E$ )

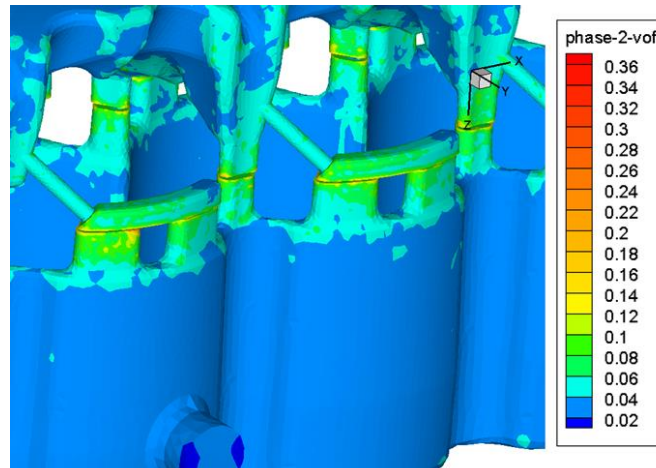
جدول ۲- تغییرات بخشهای مختلف انتقال حرارت بازای افزودن یک درصد حجمی نانوذرات  $TiO_2$  در دماهای مختلف دیواره

دمای دیواره (درجه سانتیگراد)	105	115	125	135	145
$Q_f$	+21%	+22%	+23%	+24%	+26%
$Q_q$	+2%	+6%	+7%	+8.5%	+9%
$Q_E$	+30%	+38%	+39%	+41%	+45%

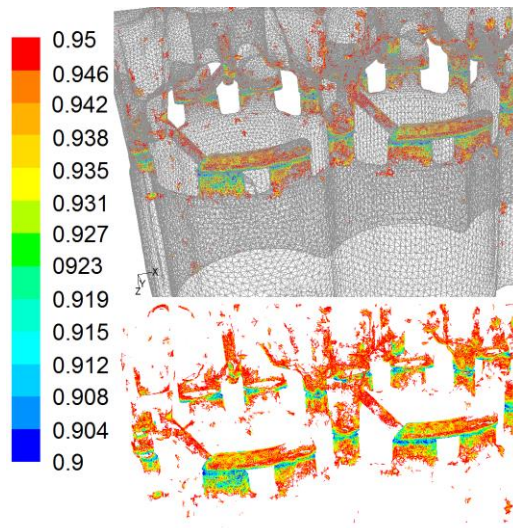
مدلسازی معرفی شده برای هندسه مجرای خنک کاری موتور اعمال گردید. شکل (۱۲ و ۱۳) غلظت حباب تشکیلی در دیواره را نشان می دهد. حباب تولیدی بعد از ورود به لایه های بالاتر کندانس میگردد. غلظت حباب داخل مجرا را در شکل (۱۴) گزارش شده است. در شکل (۱۴) در قسمت بالا غلظت حبابها همراه با هندسه مجرا نشان داده شده است و در شکل پایین برای کیفیت بیشتر مش حذف شده است. می توان نقاط بحرانی را از نظر حباب تشکیلی در این شکل بررسی نمود. دیوار سر سیلند و مجرای نزدیک به واشر بحرانی ترین شرایط را دارد.



شکل ۱۲- درصد حجمی حباب در سیال خنک کاری



شکل ۱۳- درصد حجمی حباب در سیال خنک کاری



شکل ۱۴- غلظت حباب تشکیل شده در داخل مجرای خنک کاری موتور

## ۸- نحوه اجرایی شدن طرح پیشنهادی

با توجه به محاسبات مطرح شده در بخشهای قبل اضافه کردن نانو ذرات  $TiO_2$  باعث بهبود عملکرد حرارتی و از طرف دیگر بالا رفتن شار حرارتی بحرانی (CHF) می شود. اثرات بهینه افزودن نانو ذرات در رژیم های جوششی از شرایط جریان تکفاز بسیار بیشتر است که این امر باعث خنکتر بودن دیواره مخصوصا در نقاط بحرانی از نظر تنش حرارتی می شود. سوال مهم آن است که استفاده از نانو ذرات را به چه نحو باید اجرایی نمود و آیا این موضوع از نظر اقتصادی قابل قبول هست؟

می توان نانو ذرات را در ترکیب ضد یخ اضافه نمود. می توان از فرهنگ و روند استفاده از ضد یخ برای جا انداختن مصرف نانو ذرات استفاده کرد. به دلیل استفاده از درصد پایین نانو ذرات (یک درصد حجمی) رسوب این ذرات از رسوب متداول آب بسیار کمتر است و اثر منفی رسوب در این روش نگران کننده نمی باشد.

کما اینکه بر مبنای گزارش بسیاری از تحقیقات انجام شده رسوب نانوذرات اثرات مثبتی بر افزایش شار حرارتی بحرانی خواهد داشت [۱۷-۲۰]. از طرف دیگر از نظر اقتصادی افزودن نانوذرات هزینه تمام شده ضد یخ را در حدود ۵٪ تغییر می دهد که این موضوع با توجه به بهبود عملکرد حرارتی و بالا رفتن شار نقطه بحرانی برای شرکت سازنده ضد یخ جذاب می باشد.

## ۹- جمع بندی

در این مقاله اثرات افزودن نانوذرات به سیال عامل آب جهت خنک کاری موتور خودرو مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شد که با استفاده از نانوسیال ۱٪ حجمی  $TiO_2$  انتقال حرارت به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. این امر در دماهای بالا مشهودتر است. بطوریکه در دمای بدنه ۱۴۵ درجه سانتیگراد میزان انتقال حرارت نانوسیال ۱٪ حجمی  $TiO_2$  در مجموع ۳۷٪ بیشتر از سیال عامل آب خالص است. علاوه بر این اثرات نانوذرات در بالا بردن شار حرارتی بحرانی و کاهش تنش های حرارتی ثابت شده است.

## مراجع

- [1] Hosny, Z., and Abou-Ziyan, K., "Heat Transfer Characteristics of Some Oils used for Engine Cooling", *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 45, pp. 2553–2569, (2004).
- [2] Karamangil, M.L., Kaynakli, O., and Surmen, A., "Parametric Investigation of Cylinder and Jacket Side Convective Heat Transfer Coefficients of Gasoline Engines", *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, pp. 800–816, (2006).
- [3] Lee, H.S., and Cholewczynski, L.W., "A Study on Convection and Boiling Heat-Transfer Modes in a Standard Engine Cooling System", In: *Proceeding of SAE VTMS6, Brighton*, (2003).
- [4] Ennemoser, A., "Engine Heat Transfer Boiling", *AVL Report for IPCO*, (2004).
- [5] Hetsroni, G., Mudawar, I., and Kandlikar, S.G., "Two-phase Pressure Drop, Boiling Heat Transfer, and Critical Heat Flux to Water in a Small-diameter Horizontal Tube", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28, No. 6, pp. 927-941, (2002).
- [6] Steiner, H., Kobor, A., and Gebhard, L., "A Wall Heat Transfer Model for Subcooled Boiling Flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 4161–4173, (2005).
- [7] Choi, S., and Eastman, J.A., "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles", *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Francisco*, November, pp. 12-17, (1995).

- [8] Kim, S.J., McKrell, T., Buongiorno, J., and Hu, L.W., "Enhancement of Flow Boiling Critical Heat Flux (CHF) in Alumina/Water Nano Fluids", *Advanced Science Letters*, Vol .2, pp. 100–102, (2009).
- [9] Kim, T.L., Jeong, Y.H., and Chang, S.H., "An Experimental Study on CHF Enhancement in Flow Boiling using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nano-fluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1015-1022, (2010).
- [10] Lee, T., Kam, D.H., Lee, J.H., and Jeong, Y., "Effects of Two-phase Flow Conditions on Flow Boiling CHF Enhancement of Magnetite-water Nano Fluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 74, pp. 278-284, (2014).
- [11] Longo, G. A., and Zilio, C., "Experimental Measurement of Thermophysical Properties of Oxide–water Nano-fluids Down to Ice-point", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, No. 7, pp. 1313-1324, (2011).
- [12] Longo, G. A., and Zilio, C., "Experimental Measurement of Thermophysical Properties of Oxide–water Nano-fluids down to Ice-Point", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, No. 7, pp. 1313-1324, (2011).
- [13] Farajollahi, B., Etemad, S.G., and Hojjat, M., "Heat Transfer of Nanofluids in a Shell and Tube Heat Exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 12–17, (2010).
- [14] Chehade, A.A., Gualous, H.L., Masson, S.L., Fardoun, F., and Besqet, A., "Boiling Local Heat Transfer Enhancement in Minichannels using Nanofluids", *Nanoscale Research Letters* Vol. 8, pp. 1–20, (2013).
- [15] Moreira, T. A., Nascimento, F.J., and Ribatski, G., "Flow Boiling of Nanofluids of Water and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inside a 1.1 mm Round Channel", In 9th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer, Boulder, CO, (2015).
- [16] Kim, S.J., McKrell, T., Buongiorno, J., and Hu, L.W., "Enhancement of Flow Boiling Critical Heat Flux (CHF) in Alumina/Water Nanofluids", *Advanced Science Letters*, Vol. 2, pp. 100–102, (2009).
- [17] Kim, S.J., McKrell, T., Buongiorno, J., and Hu, L.W., "Alumina Nanoparticles Enhance the Flow Boiling Critical Heat Flux of Water at Low Pressure", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 130, pp. 044501, (2008).
- [18] Kim, S.J., McKrell, T., Buongiorno, J., and Hu, L.W., "Experimental Study of Flow Critical Heat Flux in Alumina-water, Zinc-Oxide-Water, and Diamond-water Nano Fluids", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 131, No. 4, pp. 043204, (2009).
- [19] Kim, T.I., Jeong, Y.H., and Chang, S.H., "An Experimental Study on CHF Enhancement in Flow Boiling using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nano-fluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1015-1022, (2010).

- [20] Kim, T.I., Jeong, Y.H., and Chang, S.H., "Flow Boiling CHF Enhancement using  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Nanofluid and an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Nanoparticle Deposited Tube", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 9, pp. 2021-2025, (2011).
- [21] Mehdipour, R., Baniamerian, Z., and Delauré, Y., "Three Dimensional Simulation of Nucleate Boiling Heat and Mass Transfer in Cooling Passages of Internal Combustion Engines", *Heat Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 957-968, (2016).
- [22] Mehdipour, R., Nazaktabar, M., Baniamerian, Z., and Aghanajafi, C., "Simulation of Heat Transfer in the Cooling Passages of the "EF7" Engine Considering Boiling Phenomenon", *Journal of Engine Research*, Vol. 6, No. 19, pp. 63-72, (2010).
- [23] Baniamerian, Z., Nazaktabar, M., and Mehdipour, R., "Simulation of Boiling Heat Transfer within Water Jacket of 4 Cylinder Gasoline", *International Journal of Engineering*, Vol. 27, No. 12, pp. 1928-1935, (2014).
- [24] Krepper, E., Končar, B., and Egorov, Y., "CFD Modelling of Subcooled Boiling-Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design, Nuclear Engineering Design", Vol. 237, pp. 716-731, (2007).
- [25] Pak, B.C., and Cho, Y.I., "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles", *Exp. Heat Transfer*, Vol. 11, Issue. 2, pp. 151-170, (1998).
- [26] Corcione, M., "Empirical Correlating Equations for Predicting the Effective Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nano Fluids, Energy Conversion and Management, Vol. 52, No. 1, pp. 789-793, (2011).
- [27] Zhao, J.J., Duan, Y.Y., Wang, X., and Wang, B.X., "Effect of Nano Fluids on Thin Film Evaporation in Micro Channels", *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 13, No. 10, pp. 5033-5047, (2011).
- [28] Hamilton, R.L., and Crosser, O.K., "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems", *Industrial Engineering Chemistry and Fundamentals*, Vol. 1, pp. 187-191, (1962).
- [29] Ameen, M.M., Prabhul, K., Sivakumar, G., Abraham, P.P., Jayadeep, U.B., and Sobhan, C.B., "Molecular Dynamics Modeling of Latent Heat Enhancement in Nano Fluids", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 31, No. 6, pp. 1131-1144, (2010).
- [30] Christopher, C.Y., Tso, and Chao, Y.H., "Study of Enthalpy of Evaporation, Saturated Vapor Pressure and Evaporation Rate of Aqueous Nano Fluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 84, pp. 931-941, (2015).
- [31] Sanchez-Iglesias, A., Grzelczak, M., Altantzis, T., Goris, B., Perez-Juste, J., Bals, S., Tendeloo, G. V., Donaldson, S. H., Jr., Chmelka, B. F., Israelachvili, J.N., and Liz-Marzan, L. M., "Hydrophobic Interactions Modulate Self-assembly of Nanoparticles", *ACS Nano*, Vol. 6, pp. 11059-11065, (2012).

- [32] Zhu, L., Gu, Q., Sun, P., Chen, W., Wang, X., and Xue, G., “Characterization of the Mobility and Reactivity of Water Molecules on TiO<sub>2</sub> Nanoparticles by 1H Solid-state Nuclear Magnetic Resonance”, ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 5, pp. 10352–10356, (2013).
- [33] Strekalova, E. G., Mazza, M. G., Stanley, H. E., and Franzese, G., “Large Decrease of Fluctuations for Super Cooled Water in Hydrophobic Nano Confinement”, Phys. Rev Lett. Vol. 106, 145701, (2011).
- [34] Garai, J., “Physical Model for Vaporization”, Fluid Phase Equilibria, Vol. 283, No. 1, pp. 89-92, (2009).
- [35] Lee, S., Taylor, R.A., Dai, L., Prasher, R., and Phelan, P.E., “The Effective Latent Heat of Aqueous Nano Fluids”, Materials Research Express, Vol. 2, No. 6, 065004, (2015).
- [36] Mehregan, M., and Moghiman, M., “Propose a Correlation to Approximate Nano Fluids”, Enthalpy of Vaporization - A Numerical Study”, Int. J. Materials, Mech. and Manufac, Vol. 2, No. 1, pp. 73-76, (2014).
- [37] Moffat, R.J., “Describing the Uncertainties in Experimental Results”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 1, pp. 3-17, (1988).
- [38] ASHRAE. Organization(s), ASHRAE Handbook, Fundamentals Covers Basic Principles and Data used in the HVAC&R Industry, (2017).
- [39] Robinson, K., Hawley, J.G., and Campbell, N.A., “Experimental and Modelling Aspects of Flow Boiling Heat Transfer for Application to Internal Combustion Engines”, Proceeding of Institution of Mechanical Engineering Part D Journal of Automobile Engineering, Vol. 217, No. 10, pp. 877–890, (2003).
- [40] Duangthongsuk, W., and Wongwises, S., “An Experimental Study on the Heat Transfer Performance and Pressure Drop of TiO<sub>2</sub>–Water Nano Fluids Flowing under a Turbulent Flow Regime”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53 pp. 334–344, (2010).

### فهرست نمادهای انگلیسی

$C_p$ : ظرفیت گرمایی بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم کلوین

$h_{fg}$ : آنتالپی نهان تبخیر بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم

$h$ : ضریب انتقال حرارت جابجایی بر حسب وات بر متر مربع

$h_0$ : پارامتر تصحیح ضریب انتقال حرارت جابجایی

Na: چگالی حباب روی سطح

$\Delta p$ : فشار متوسط سیستم بر حسب بار

$Q_F$ : انتقال حرارت جابجایی (توربولانس)

$q_Q$ : نشان دهنده انتقال حرارت به دلیل جایگزین شدن سیال با دمای متوسط لایه های بالای

$T_w$ : دمای دیواره برحسب درجه سانتیگراد

$T_s$ : دمای جوشش برحسب درجه سانتیگراد

$\bar{v}_m$ : سرعت متوسط جرمی

### نمادهای یونانی

$\alpha_k$ : کسر حجمی فاز k ام

$\rho$ : دانسیته برحسب کیلوگرم بر مترمکعب

$\rho_m$ : چگالی مخلوط جریان

$\sigma$ : کشش سطحی برحسب نیوتون بر متر

$\mu$ : ضریب اصطکاک

$\Omega$ : درصدی از سطح می باشد که توسط حباب پوشانده شده است

$\phi$ : کسر حجمی نانوذرات

### زیرنویس

$l$ : سیال

$v$ : بخار

$w$ : دیواره

$p$ : نانوذرات

$l$ : سیال پایه در حالت مایع

$nf$ : نانوسیال

**Abstract**

Recent developments in automotive industry tend researchers to design engines of lower volumes and higher efficiencies. Volume reduction enhances the generated heat per volume which in turn requires effective cooling methods to avoid thermal stresses on the engine walls. Nowadays nanofluids are extensively welcomed and employed as effective working fluids with efficient cooling potentials. In the present study effects of adding nanoparticles to the pure water as the cooling working fluid in the radiator is assessed. The employed nanoparticle is  $\text{TiO}_2$ . A 3D model of engine with the cooling passages is simulated by CFD both for the pure fluid (water) and nanofluid. It will be shown employing 1%(vol)  $\text{TiO}_2$  nanofluid improves cooling heat transfer up to 37% in comparison with the pure water.