



## شبیه‌سازی انتقال حرارت در موقع خاموش شدن موتور با کوپل حرارتی جامد و سیال

صادق جهان تیغی<sup>۱</sup>، امیره نوربخش<sup>۲\*</sup>، آرش محمدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر رجایی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت:

بازنگری:

بذیرش:

ارائه آنلاین:

### کلمات کلیدی:

موتور احتراق داخلی

زمان خاموشی

انتقال حرارت جوشش جریانی

**چکیده:** در هنگام خاموشی موتور بیشترین امکان جوشش وجود دارد زیرا در چند ثانیه پس از خاموش شدن پمپ آب، دمای سیال خنک کننده که در تماس با سرسیلندر داغ قرار دارد افزایش پیدا می‌کند که اگر در طراحیان دقت نشود می‌تواند باعث جوشش لایه‌ای در راهگاه آب موتور شود. در زمان خاموشی موتور، سیلندر در تماس مستقیم با پیستون ساکن قرار دارد و اگر دمای سیلندر به سرعت کاهش نیابد باعث چسبیدن پیستون به سیلندر، و آسیب جدی به موتور می‌شود. همچنین کاهش انتقال حرارت از گازهای داغ محفظه احتراق به سیال خنک کننده به علت توقف گردش آن در راهگاه آب می‌تواند باعث سوختن واشر سرسیلندر شود. بنابراین با به دست آوردن توزیع دمای بلوک و سرسیلندر در حین خاموشی می‌توان از این آسیب جلوگیری نمود. در این مقاله کوشش شده اثر انتقال حرارت بعد از توقف گردش موتور و ایجاد پدیده جوشش در شرایط گذرا بعد از خاموشی موتور با شبیه سازی بررسی گردد. در کار حاضر شبیه سازی ناپایا با کوپل حرارتی همزمان راهگاه آب، بلوک و سرسیلندر موتور با استفاده از نرم افزار AVL-Fire انجام شده است. ابتدا اعتبارسنجی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی دما در چهار نقطه در در سرسیلندر انجام شده است که همخوانی خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. نتایج فشار، ضریب انتقال حرارت جابه جایی، شار حرارتی در راهگاه آب و توزیع دما در بلوک و سرسیلندر در حالت گذرا نشان داده شده است. در انتها اثر خاموش شدن موتور روی دمای ماکزیمم سیال خنک کننده و پوسته جامد در بلوک و سرسیلندر و توزیع شار حرارتی و دمای سرسیلندر در حالت گذرا بررسی شده است.

### ۱- مقدمه

نمی‌روند و همراه با جریان حرکت می‌کنند. در صورت افزایش بیشتر دمای سطح، نرخ تولید حبابها افزایش می‌یابد و سرانجام لایه‌ای از بخار بر روی سطح ایجاد می‌گردد و جوشش وارد ناحیه لایه‌ای ۴ می‌شود. این پدیده منجر به کاهش ناگهانی شار حرارتی از سطح به سیال و افزایش چشمگیر دمای سطح می‌شود [۱]. در زمینه شبیه سازی فرآیند جوشش در گذشته کارهای بسیاری انجام شده است. تاو بو [۲] از مدل جریان تک فاز ۵ برای شبیه سازی جوشش مادون سرد در راهگاه آب استفاده کرد. آن‌ها ابتدا مدل پیشنهادی را با نتایج آزمایشگاهی رابینسون [۳] و زایتون [۴] صحت‌گذاری کردند. سپس از نتایج جریان در دو لوله افقی و عمودی استفاده کردند تا توانمندی مدل را در پیش‌بینی جوشش در راهگاه افقی و عمودی مورد بررسی قرار دهند. نتایج حاصل نیز درستی مدل را نشان داد. آن‌ها از مدل مذکور برای شبیه‌سازی جوشش مادون سرد در راهگاه آب موتور شش سیلندر خورجینی استفاده کردند. پس از تحلیل انتقال حرارت در نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی VECTIS، نتایج را وارد نرم‌افزار المان محدود کرده و به تحلیل دمایی بلوک پرداختند. لی‌یو چانگ [۵] به منظور اصلاح واشر سرسیلندر شبیه سازی جریان را انجام دادند. ایشان کانال‌های ارتباطی بین راهگاه بلوک و سرسیلندر را شماره گذاری کرده و قطرهای آنها را در سه مرحله تغییر دادند. فای دونگ

افزایش دما در نقاط داغ داخل موتور مانند سوپاپ دود و تاج پیستون باعث ایجاد پدیده سوزش در این نقاط می‌گردد. اگر انتقال حرارت در دیواره محفظه احتراق به خوبی صورت نگیرد دما در نواحی مانند سوپاپ دود و تاج پیستون به شدت افزایش می‌یابد که می‌تواند زمینه پدیده ناک را فراهم کند. به طور کلی خنک کاری در موتور به منظور نگه داشتن دمای اجزای موتور در یک محدوده خاص است، به طوری که به کارایی قطعات موتور صدمه وارد نشود و روغن نیز خاصیت روانکاری خود را از دست ندهد. جوشش نقطه‌ای ۱ بر حسب دمای بالک سیال به جوشش مادون سرد ۲ و جوشش اشباع ۳ تقسیم می‌شود. در جوشش نقطه‌ای مادون سرد، دمای توده سیال کمتر از دمای اشباع آن است و در جوشش اشباع، دمای توده سیال برابر دمای اشباع است. در ناحیه جوشش مادون سرد، به علت دمای کمتر توده سیال نسبت به دمای اشباع آن، حباب‌های تشکیل شده با حرکت از سطح (که دمای آن بیشتر از دمای جوشش است) به سمت بالا، چگالیده می‌شوند. با رسیدن دمای توده سیال به دمای اشباع، حباب‌های تولیدی دیگر از بین

- 1 Nucleate boiling
- 2 Sub-cooled boiling
- 3 Saturated boiling

- 4 Film boiling
- 5 Single phase boiling

توقف چرخش پمپ آب و افت شدید ضریب انتقال حرارت، افزایش پیدا می‌کند. این پدیده باعث افزایش دما در نقاط بحرانی در سرسیلندر می‌شود که اگر از حد معینی بالاتر برود باعث سوختن واشر سرسیلندر و از کارافتادن موتور در استارت بعدی می‌باشد. بنابراین بررسی حاضر کاربرد بسیار مهمی در طراحی موتور دارد.

## ۲- روابط و مدل‌های ریاضی حاکم بر جوشش جریانی مادون سرد

معادله بقای جرم برای جریان تراکم ناپذیر در حالت ناپایا:

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

معادله بقای مومنتوم برای جریان تراکم ناپذیر:

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

معادله بقای انرژی برای جریان تراکم ناپذیر در سرعتهای کم:

$$\rho c_v \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T \quad (3)$$

مدل توربولانسی  $\epsilon - k - f$

از آنجا که راهگاه آب درون موتور دارای پیچ و خم‌های بسیاری بوده و موانع زیادی بر سر راه جریان است، جریان سیال عموماً مغشوش می‌باشد. در نتیجه بررسی مدل‌های اغتشاش و مقایسه آنها با یکدیگر امری ضروری بوده، تا مدلی دارای دقت خوب و زمان حل مناسب برای شبیه‌سازی انتخاب گردد. این مدل توسط هانجالیگ توسعه یافته است [۱۷]. هدف ایشان ایجاد روشی بر اساس یک روش پیشنهادی به نام ادی-ویسکوزیته است. پارامتر ادی-ویسکوزیته از معادله (۴) به دست می‌آید:

$$V_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

پارامترهای جریان  $\kappa$  و  $\epsilon$  و  $\zeta$  و  $f$  از معادلات زیر به دست می‌آید:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \rho (P_k - \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \rho \frac{C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \epsilon}{T} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

$$\rho \frac{D}{Dt} = \rho f - \rho \frac{P_k}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

$$f - L^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_j} = \left( C_1 + C_2 \frac{P_k}{T} \right) \left( \frac{2}{3} - \right) \quad (8)$$

برای مقیاس زمان آشفتگی و طول آشفتگی داریم:

[۶] به بررسی چهار مدل جوشش در داکت افقی با مقطع T شکل در شرایط کارکرد سامانه خنک‌کاری موتورهای احتراق داخلی پرداختند و سپس از دو مدل موجود که تطابق خوبی با داده‌های تجربی داشت برای شبیه‌سازی جوشش در راهگاه آب استفاده کردند. محمدی [۹-۷] نتایج ضریب انتقال حرارت جوشش را با مدل تک فاز و مدل دو فاز جریانی در راهگاه آب موتور دیزل سواری مقایسه کردند. آن‌ها از نرم‌افزار فلوئنت به همراه کد تعریف شده توسط کاربر<sup>۱</sup> برای مدل‌سازی جوشش استفاده نمودند و برای صحت‌گذاری مدل‌ها از داده‌های مایونگ [۱۰ و ۱۱] استفاده نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ضریب انتقال حرارت جوشش که با استفاده از شبیه‌سازی مدل تک فاز چن به دست می‌آید به نتیجه ضریب انتقال حرارت جوششی که از تحلیل جریانی دو فاز مخلوط<sup>۲</sup> به دست می‌آید نزدیک است. جعفرآبادی [۱۲] راهگاه آب موتور دیزل را با در نظر گرفتن پدیده جوشش و مدل بی دی آل شبیه‌سازی نمودند. همت خانلو و همکاران [۱۳ و ۱۴] شبیه‌سازی انتقال حرارت با فرض پدیده جوشش در راهگاه آب موتور پرخوران EF7-TC را با نرم‌افزار AVL-FIRE انجام دادند. آن‌ها نتایج رابینسون [۳] را با نتایج مدل‌های چن و بی دی ال برای شبیه‌سازی استفاده نمودند. نتیجه مقایسه نشان داد که هر چند هر دو مدل نتیجه قابل قبولی اراده می‌دهند ولی مدل چن به نتایج واقعی نزدیکتر است. آن‌ها ضریب انتقال حرارت با در نظر گرفتن جوشش را محاسبه نمودند که مقدار ماکزیمم آن  $41000 \text{ K.W/m}^2$  است. همچنین با تغییر قطر سوراخ‌های واشر سرسیلندر و بستن تعدادی از آنها، اثر خنک‌کاری دقیق<sup>۳</sup> در راهگاه آب را بررسی کردند. از جمله کارهای صورت گرفته در این زمینه می‌توان به پیشبینی دمای محفظه موتور پس از ایجاد جوشش توسط عبدالنور [۱۵] اشاره کرد. ایشان با شبیه‌سازی موتور دیزل ۳۱۲۶ کاترپیلار در حین خاموشی موتور میزان بیشینه دمای سطح خارجی محفظه موتور و دمای هوای اطراف محفظه موتور را در هنگام خاموشی و روشن بودن فن بررسی نمودند. جهان تیغی و همکاران [۱۶] به بررسی عملکرد حرارتی موتور ملی در حالت پایا پرداختند و اثر خنک‌کاری دقیق بر انتقال حرارت را بررسی نمودند. خنک‌کاری دقیق به اثر تغییر هندسه جزئی در راهگاه آب موتور و تأثیر آن روی سرعت جریان، افت فشار و دمای بلوک و سرسیلندر با در نظر گرفتن جوشش احتمالی می‌پردازد.

در زمینه شبیه‌سازی کوپل حرارتی بدنه جامد و سیال خنک‌کننده در شرایط کارکرد پایای موتور، کارهای مختلفی انجام شده است که به تعدادی از آنها اشاره شد. کارهای بسیار محدودی به حل همزمان جامد و سیال خنک‌کننده بعد از زمان خاموشی موتور انجام شده است. در کار حاضر، به بررسی خاموش شدن موتور و اثرهای حرارتی آن روی توزیع دمای بلوک و سرسیلندر و جوشش احتمالی در اثر توقف حرکت سیال در اثر توقف چرخش پمپ آب در دور ۶۰۰۰ دور در دقیقه و بار کامل موتور پرداخته می‌شود. موتور وقتی بصورت ناگهانی از حرکت باز می‌ایستد، ماکزیمم دمای سیلندر در اثر

- 1 User Defined Function (UDF)
- 2 Mixture model
- 3 Precise cooling

نرم افزار AVL-FIRE [۲۰]،  $S_{Chen}$  را به صورت تابع چند ضابطه‌ای زیر نمایش می‌دهد:

$$S_{Chen} = \begin{cases} S_{Chen} = 1 & Re < 1 \times 10^4 \\ 3.4 - 0.6 \log(Re) & 1 \times 10^4 \leq Re \leq 4 \times 10^5 \\ S_{Chen} = 3.876 \times 10^{-2} & Re > 4 \times 10^5 \end{cases} \quad (۱۶)$$

### ۲-۲- مدل BDL

در مدل BDL مقدار ضریب تصحیح  $S$  به دینامیک حباب و میدان جریان پیرامون آن وابسته است. ابتدا ژنگ [۲۱] رابطه‌ای برای ضریب تصحیح  $S$  پیشنهاد کرد. مطابق فرض ژنگ، حباب ابتدا در نقطه‌ای به نام هسته حباب‌زا ایجاد شده، سپس در شعاع  $r_d$  از هسته حباب‌زا جدا شده و در حالی که روی سطح داغ می‌لغزد حرارت را از سطح داغ جذب می‌کند، تا زمانی که 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 جریان سیال نفوذ می‌کند. در رابطه پیشنهادی ژنگ، ضریب تصحیح از دو قسمت تشکیل شده است که مقادیر آن‌ها به قطر حباب در لحظات جدایش و صعود بستگی دارد [۱۳]:

$$S_{BDL} = S_{BDL1} S_{BDL2}$$

$$S_{BDL1} = \left( \frac{d_D}{d_L} \right)^n \quad (۱۷)$$

$$S_{BDL2} = \frac{S_{BDL1} h_{mic}}{1 + C_{BDL} Nu}$$

$n$  مقداری ثابت است که از کالیبراسیون مدل به دست می‌آید. برای حل جریان در حالت خاموشی موتور لازم است سه معادله پیوستگی، مومنتم و انرژی در حالت ناپایا حل شوند.

### ۲-۳- روش حل کوپل

با استفاده از این روش معادلات حاکم بر جریان شامل پیوستگی، مومنتوم و انرژی و اجزاء شیمیایی به طور همزمان حل می‌شوند. معادلات حاکم برای اسکالره‌ای اضافی به صورت جدا از یکدیگر حل خواهند شد. از آن‌جا که معادلات حاکم غیرخطی‌اند چندین تکرار در حلقه فرآیند حل قبل از به دست آوردن حل همگرا، باید انجام گیرد [۲۰].

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- شبیه‌سازی

در تحقیق حاضر، از حل انتقال حرارت جامد و سیال به صورت کوپل استفاده شده است. در روش حل همزمان انتقال حرارت جامد و سیال،

$$T = \max \left( \min \left( \frac{k}{\varepsilon}, \frac{a}{\sqrt{6} C_\mu^v |S|} \right), C_T \left( \frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (۹)$$

$$L = C_L \max \left( \min \left( \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon}, C_\eta \frac{v^{\frac{3}{4}}}{\varepsilon^{\frac{1}{4}}} \right) \right) \quad (۱۰)$$

چن [۱۸] آزمایش‌هایی را برای بررسی انتقال حرارت در لوله جریان عمودی انجام داد و برای محاسبه انتقال حرارت، رابطه پیشنهادی جمع آثار روزنف [۱۹] را اصلاح نمود. چن انتقال حرارت جوشش جریانی را بصورت مجموع دو مکانیزم ماکرو (جابجایی اجباری) و میکرو (جوشش هسته‌ای) ارائه کرد:

$$h_{total} = h_{mac} + h_{mic} \quad (۱۱)$$

منظور از  $h_{mac}$  ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری است که در حل دینامیک سیالات محاسباتی از تابع دیواره<sup>۱</sup> برای به دست آوردن  $h_{mac}$  استفاده می‌شود [۲۰]. همچنین  $h_{mic}$ ، ضریب انتقال حرارت جوشش مادون سرد می‌باشد که از رابطه فاستر-زوبر<sup>۲</sup> [۱۸] مطابق ذیل به دست می‌آید:

$$h_{mic} = 0.00122 \times \left( \frac{k_l^{0.79} c_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} h_{lg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} \right) \Delta T_s^{0.24} \Delta P_s^{0.75} \quad (۱۲)$$

$$\Delta T_s = T_w - T_{sat}, \quad \Delta P_s = P_w - P_{sat}$$

رابطه فاستر-زوبر برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جوشش استخری مورد استفاده قرار می‌گیرد. می‌توان به دلیل وجود جریان، با یک ضریب تصحیح  $S$ ، مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش نقطه‌ای را اصلاح نمود. دو مدل برای محاسبه ضریب تصحیح  $S$  پیشنهاد می‌گردد: مدل چن و مدل BDL. شار حرارتی کل نیز بصورت رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$q_{total} = \phi h_{mac} (T_w - T_\infty) + Sh_{mic} (T_w - T_{sat}) \quad (۱۳)$$

#### ۲-۱- مدل چن

این رابطه ابتدا برای جریان جوششی اشباع به کار رفت ولی بعدها برای استفاده در جوشش نقطه‌ای نیز گسترش پیدا کرد. چن ضریب تصحیح را به شکل زیر پیشنهاد داد [۱۹]:

$$S_{Chen} = \frac{1}{(Re \phi^{1.25})^{1.17}} \quad (۱۴)$$

که با تروث آن را به شکل زیر اصلاح کرد [۲۰]:

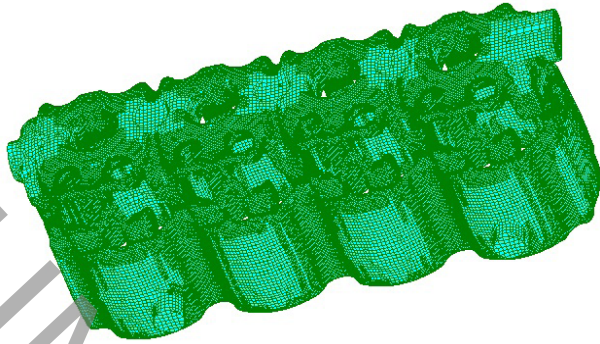
$$S_{Chen} = \frac{1}{1 + 2.53 \times 10^{-6} (Re_l \phi^{1.25})^{1.17}} \quad (۱۵)$$

3 Departure Radius

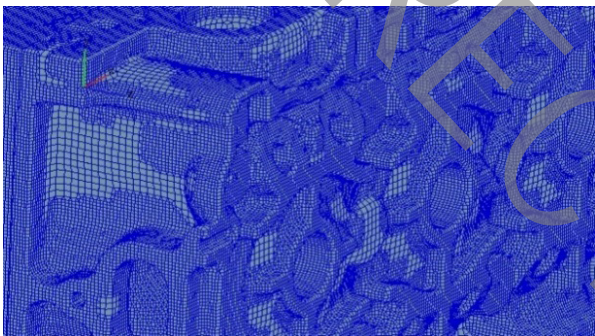
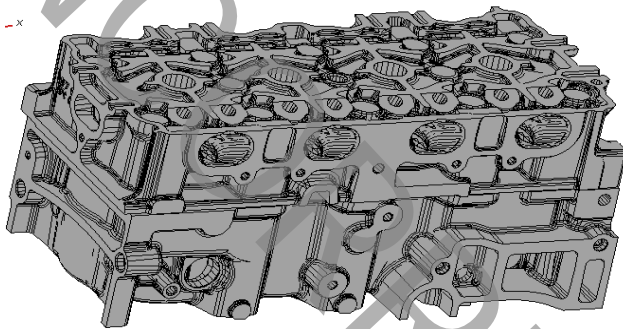
4 Lift-off Radius

1 Wall Function

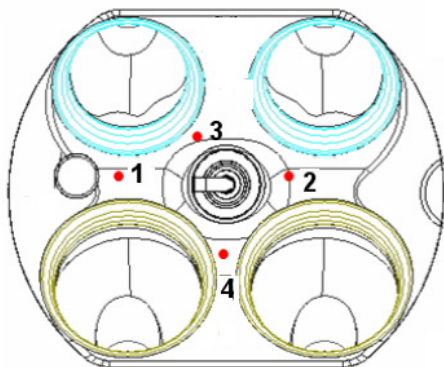
2 Faster-Zooper



شکل ۹: شبکه محاسباتی مربوط به ناحیه سیال



شکل ۱۰: ناحیه‌ای از شبکه محاسباتی مربوط به ناحیه جامد



شکل ۱۱: نقاطی که در آنها ترموکوپل جهت اندازه گیری دما کاشته شده است

راهگاه آب و قسمت بدنه‌ی جامد موتور (بلوک و سرسیلندر) به صورت مجزا شبکه‌بندی شده و شبیه‌سازی می‌گردند و در هر مرحله اطلاعات شرایط مرزی انتقال حرارت، بین مرز سیال و جامد تبادل می‌شود. این عمل تا همگرایی و عدم تغییر در شرایط مرزی دو حل ادامه می‌یابد. ضریب حرارت جابه‌جایی به کمک تابع دیوار به دست می‌آید. هدف این پژوهش، این است که بلوک و سرسیلندر به همراه راهگاه آب، با در نظر گرفتن اثر جوشش در حالت گذرا با استفاده از مدل چن، شبیه‌سازی شود و توزیع دما و ضریب انتقال حرارت در بلوک، سرسیلندر و راهگاه سیال به دست آید.

### ۳-۱-۱- شرایط مرزی

شرایط مرزی داخل محفظه احتراق دمای گاز  $900^{\circ}\text{C}$  و ضریب انتقال حرارت داخل محفظه احتراق از رابطه وشنی محاسبه شده است. ضریب انتقال حرارت در راهگاه هوای ورودی و خروجی و مسیر روغن مطابق جدول ۱ می‌باشد [۲۳].

جدول ۱: دما و ضریب انتقال حرارت در دریچه‌ها و راهگاه‌ها [۲۳]

HTC [W/m <sup>2</sup> K]	T [°C]	
۲۷۵	۵۰	هوای ورودی
۴۲۵	۹۰۰	هوای خروجی
۱۵۰	۱۳۰	روغن

### ۳-۱-۲- آماده‌سازی و استقلال از شبکه راهگاه سیال

برای به دست آوردن استقلال از شبکه از چهار شبکه مختلف استفاده شد که نتایج و تعداد شبکه‌ها در جدول ۲ آمده است. دبی ورودی  $123/5$  لیتر بر دقیقه و دمای سیال ورودی  $85$  درجه سانتیگراد گزارش شده است. سیال خنک کن ترکیب  $50-50$  اتیلن گلیکول و آب با فشار مرجع  $197500$  پاسکال و چگالی  $1012 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  و دمای مرجع  $346$  کلوین  $\mu = 7 \times 10^{-4} \text{ kg/(m.s)}$  در نظر گرفته شد. پارامترهای توربولانسی در ورودی سیال: انرژی جنبشی توربولانس:  $k = 1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$  مقیاس طولی توربولانس:  $l = 0.002 \text{ m}$  [۲۰]. از آنجا که اختلاف فشارها محسوس نیست،  $1200000$  شبکه به عنوان مبنای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۹).

جدول ۲: استقلال شبکه در راهگاه سیال خنک‌کننده توسط بررسی افت فشار در راهگاه

تعداد مش	فشار ورودی	فشار خروجی	اختلاف فشار
۸۰۰۰۰۰	۲۰۳۳۳۰	۱۶۰۱۴۰	۴۳/۱۹۰
۱۲۰۰۰۰۰	۲۱۴۳۵۱	۱۸۲۳۱۸	۳۲/۰۳۳
۱۵۰۰۰۰۰	۲۱۰۹۶۸	۱۷۶۰۴۳	۳۴/۹۲۵
۱۸۰۰۰۰۰	۲۰۹۳۹۵	۱۷۵۶۳۹	۳۳/۷۵۶

### ۳-۱-۳- آماده‌سازی شبکه محاسباتی برای ناحیه جامد

$2500000$  شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی قسمت جامد مورد استفاده قرار گرفت که در شکل ۱۰ نمایی از آن آمده است. برای اعتبار سنجی نتایج

با هم مقایسه شده است. مطابق شکل ماکزیمم خطای محاسباتی کمتر از ۵ درصد می‌باشد.

### ۳-۲- بررسی اثر خاموشی موتور بر روی نواحی مختلف سرسیلندر

در هنگام خاموشی موتور بیشترین امکان جوشش وجود دارد. زیرا در چند ثانیه پس توقف چرخش پمپ آب، سیال خنک کننده در معرض دیوار داغ محفظه احتراق قرار می‌گیرد و دمای آن به شدت افزایش می‌یابد. این افزایش دما باعث آسیب در نواحی نشیمنگاه سوپاپ و نواحی بحرانی موتور (از نظر آب‌بندی و ...) می‌گردد. لذا سعی شد تا این شرایط در موتور شبیه‌سازی شده و ایجاد پدیده جوشش در این شرایط نیز بررسی گردد. برای این کار در ابتدا نحوه اجرای محاسبات را از حالت پایا به حالت غیر پایا و گذرا تغییر داده و میزان زمان حل، روی ۲۰ ثانیه تنظیم و میزان گام زمانی هر مرحله ۳-۱۰ ثانیه انتخاب شد. شرایط مرزی تا ۱۰ ثانیه اول مانند شرایط مرزی قبل تعریف گردید. اما پس از خاموشی دمای گازهای داغ روی مرزها تغییری نکرده ولی ضریب انتقال حرارت به میزان ۷۰٪ کاهش می‌یابد.

### ۳-۲-۱- توزیع فشار درون راهگاه سیال

از آنجاکه تغییرات فشار تأثیر مستقیم بر روی جوشش دارد، لازم است تغییرات فشار را پس از خاموشی موتور بررسی نماییم. در شکل ۱۳، فشار سیال در مدت ۱۲ ثانیه دیده می‌شود. تا مدت ۱۰ ثانیه موتور به صورت روشن شبیه‌سازی شده و توزیع فشار همانند حل پایای موتور روشن می‌باشد. اختلاف فشار نیز در نواحی مختلف راهگاه پس از خاموشی به سمت صفر میل می‌کند. همانطور که در شکل ۱۳ دیده می‌شود با گذشت زمان میزان فشار داخل سیستم به فشار اتمسفر نزدیک می‌شود که این امر باعث کاهش دمای جوشش می‌شود. از این رو با خاموش شدن موتور و در پی آن خاموش شدن پمپ آب، امکان ایجاد جوشش افزایش می‌یابد.

### ۳-۲-۲- توزیع دمای درون راهگاه سیال

در شکل ۱۴، مقدار دمای ماکزیمم سیال بر حسب زمان در قسمت سرسیلندر مابین دو سیلندر نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود دما از زمان خاموشی موتور به شدت افزایش می‌یابد و پس از ۱۰ ثانیه دمای سیال تا ۹۴ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و اثری از پدیده جوشش در راهگاه دیده نمی‌شود. اما بعد از ۱۰ ثانیه از خاموشی موتور مطابق شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد که دمای سیال تا ۱۶۰ درجه بالا رفته و پدیده جوشش فیلمی اتفاق می‌افتد. از آنجا که در این شرایط میزان ضریب انتقال حرارت از مقدار بحرانی خود بیشتر شد، حل به صورت خودکار توسط نرم افزار قطع گردید. شکل ۱۵ نحوه افزایش دما در راهگاه سیال را در زمان‌های ۲ و ۴ و ۶ و ۸ و ۱۰ ثانیه در زمان کارکرد موتور نمایش می‌دهد.

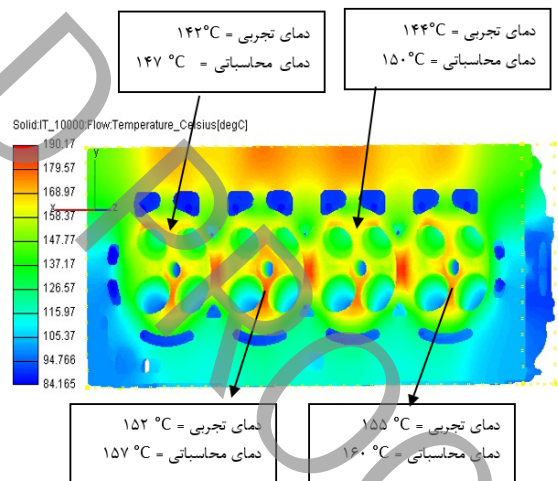
عددی از نتایج آزمایشگاهی دما در سرسیلندر مطابق شکل ۱۱ استفاده شده است. در شکل ۱۱ چهار ترموکوپل نوع K در دو میلی متری بالای محفظه احتراق کار گذاشته شده است [۲۳]. در جدول‌های ۳ و ۴ نتایج عددی و آزمایشگاهی در نقاط ۱ تا ۴ و مربوط به سیلندرها دوم و چهارم در ماکزیمم دور و بار کامل می‌باشد. همانطور که دیده می‌شود مقدار ماکزیمم خطا کمتر از ۵ درصد می‌باشد. بنابراین نتایج شبیه سازی قابل اعتماد است.

جدول ۳: نتایج دما در سرسیلندر شماره ۲ دو میلی متر بالاتر از سطح محفظه احتراق [۲۳]

شماره نقطه	دمای تجربی °C	دمای محاسباتی °C	خطای محاسباتی
۱	۱۴۰	۱۴۵	۴
۲	۱۴۵	۱۵۱	۴
۳	۱۵۰	۱۵۴	۳
۴	۱۵۲	۱۵۷	۳

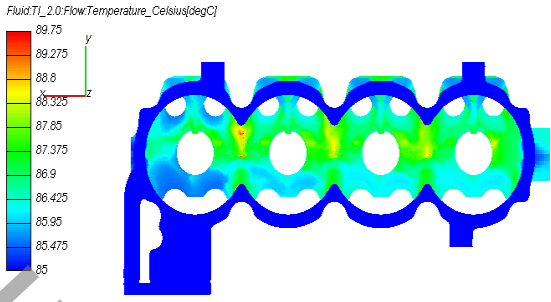
جدول ۴: نتایج دما در سرسیلندر شماره ۴ دو میلی متر بالاتر از سطح محفظه احتراق [۲۳]

شماره نقطه	دمای تجربی °C	دمای محاسباتی °C	درصد خطا
۱	۱۴۵	۱۴۹	۳
۲	۱۴۹	۱۵۵	۴
۳	۱۵۳	۱۵۷	۳
۴	۱۵۵	۱۶۰	۳

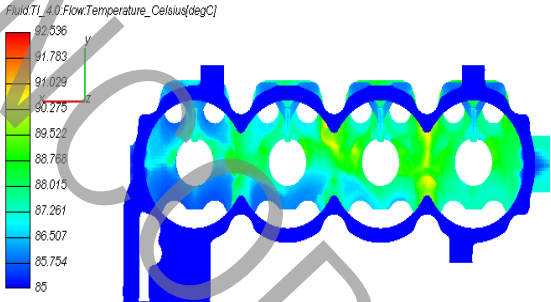


شکل ۱۲: کانتور توزیع دما در سرسیلندر و مقایسه نتایج تجربی [۲۳] و عددی

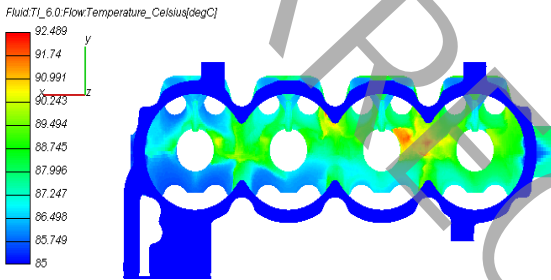
در شکل ۱۲ دمای تجربی و آزمایشگاهی در چهار نقطه در سیلندرها شماره ۱ تا ۴، در دو میلی متر بالاتر از سطح محفظه احتراق مطابق شکل



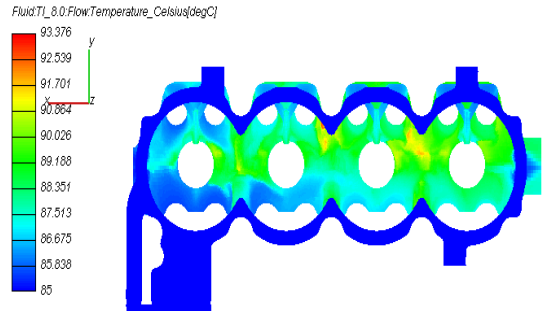
الف) توزیع دما در راهگاه سیال در قسمت سرسیلندر با فرض جوشش بعد از ۲ ثانیه



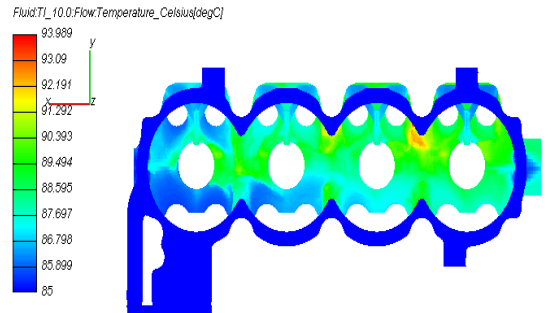
ب) توزیع دما در راهگاه سیال در قسمت سرسیلندر با فرض جوشش بعد از ۴ ثانیه



ج) توزیع دما در راهگاه سیال در قسمت سرسیلندر با فرض جوشش بعد از ۶ ثانیه

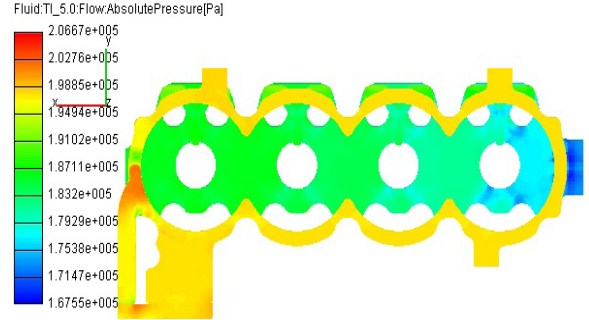


د) توزیع دما در راهگاه سیال در قسمت سرسیلندر با فرض جوشش بعد از ۸ ثانیه

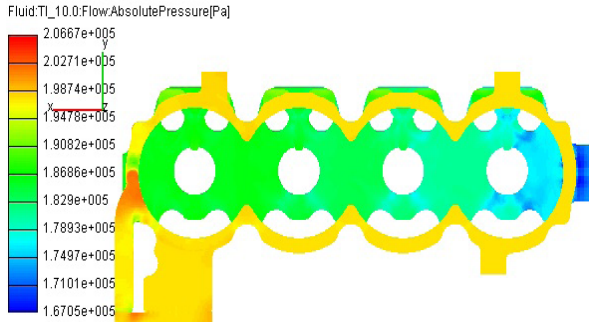


و) توزیع دما در راهگاه سیال در قسمت سرسیلندر با فرض جوشش بعد از ۱۰ ثانیه

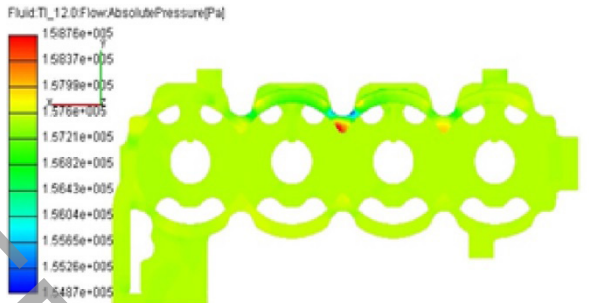
شکل ۱۵: کانتور توزیع دما در سیال در زمان روشن بودن موتور



الف) توزیع فشار در راهگاه سیال در قسمت سرسیلندر با فرض جوشش بعد از ۵ ثانیه

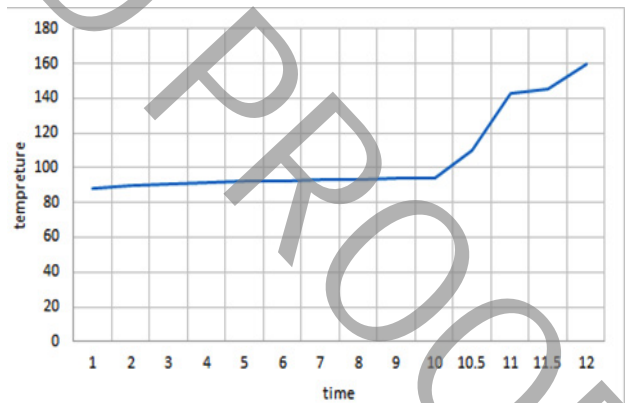


ب) توزیع فشار در راهگاه سیال در قسمت سرسیلندر با فرض جوشش بعد از ۱۰ ثانیه



ج) توزیع فشار در راهگاه سیال در قسمت سرسیلندر با فرض جوشش بعد از ۱۲ ثانیه

شکل ۱۳: کانتور توزیع فشار در سیال طی ۱۲ ثانیه



شکل ۱۴: روند افزایش دمای بیشینه در سیال

شکل ۱۶ دما در راهگاه سیال را در زمان‌های ۱۰/۵ و ۱۱ و ۱۱/۵ و ۱۲ ثانیه نمایش می‌دهد. در زمان ۱۰ ثانیه موتور خاموش می‌شود و توزیع دما

سانتیگراد می‌رسد. پس از ۱۲/۳ ثانیه دمای سیال از ۱۶۰ درجه بیشتر شده و جوشش وارد ناحیه فیلمی می‌شود.

### ۳-۲-۳- توزیع شار حرارتی

در شکل ۱۷ شار حرارتی جوشش از زمان ۱۰ ثانیه (لحظه خاموشی موتور) تا ۱۲ ثانیه (۲ ثانیه پس از خاموشی موتور) دیده می‌شود. مطابق شکل جوشش تا ۱۰ ثانیه اول اتفاق نمی‌افتد و میزان شار حرارتی جوششی صفر می‌باشد. بعد از خاموش شدن موتور و قطع کار پمپ آب، جوشش شروع می‌شود. میزان شار حرارتی جوشش در ۲ ثانیه پس از خاموشی در شکل ۱۷ آورده شده است. همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، شار حرارتی جوشش در کسری از ثانیه به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته سپس ثابت باقی مانده است. بیشترین انتقال حرارت جوششی  $7 \text{ MW/m}^2$  است که مابین دو سیلندر دیده می‌شود.

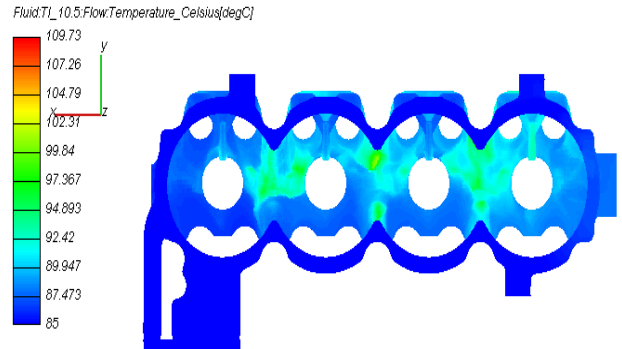
در شکل ۱۸ توزیع شار انتقال حرارت جوششی از زمان خاموش شدن موتور نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود شار حرارتی جوشش در زمان روشن بودن موتور صفر است و اثری از پدیده جوشش در راهگاه دیده نمی‌شود. اما بعد از ۱۰ ثانیه از خاموشی موتور مطابق شکل ۱۸ مشاهده می‌گردد که شار حرارتی جوشش تا  $8/2 \text{ MW/m}^2$  بالا رفته و پدیده جوشش فیلمی اتفاق می‌افتد. از آنجا که در این شرایط میزان شار حرارتی از مقدار بحرانی خود بیشتر شد، حل به صورت خودکار توسط نرم افزار قطع گردید.

### ۳-۲-۳- توزیع ضریب انتقال حرارت در سطح راهگاه سیال

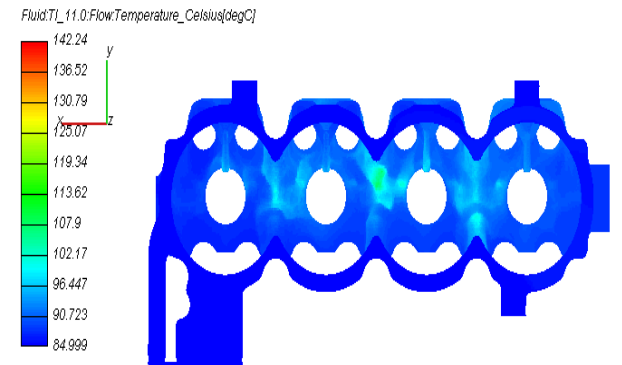
در شکل ۱۹ ضریب انتقال حرارت جابجایی در زمان‌های ۵ و ۱۰ و ۱۲ ثانیه قبل و بعد از خاموشی دیده می‌شود. در شکل ۱۹ ضریب انتقال حرارت جابجایی نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود از زمان خاموش شدن موتور ضریب انتقال حرارت جابجایی به سمت صفر میل می‌کند. بعد از خاموش شدن موتور شار حرارتی از مقدار بحرانی خود بیشتر شد، حل به صورت خودکار توسط نرم افزار قطع گردید.

### ۳-۲-۵- توزیع دما درون راهگاه و بلوک و سرسیلندر

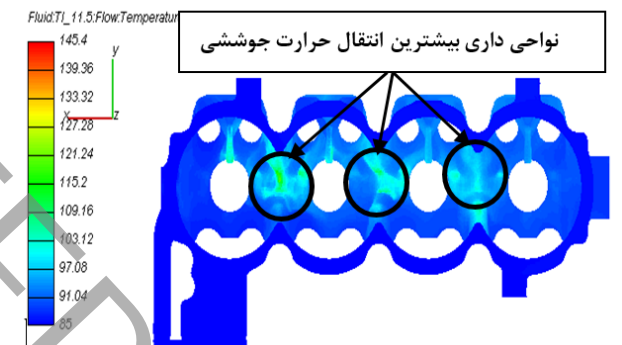
در شکل ۲۰ نمودار ماکزیمم دما بر حسب زمان، آورده شده است که مابین دو سیلندر مشاهده شد. همان طور که دیده می‌شود ماکزیمم دمای بلوک موتور پس از خاموشی کاهش می‌یابد. ولی دمای سیال خنک کننده مطابق شکل ۱۴ افزایش می‌یابد و از ۹۰ درجه به ۱۶۰ درجه افزایش می‌یابد که سیال خنک کننده به جوش می‌آید و افزایش دمای ۷۰ درجه آن قابل توجه است. بعد از ۱۲ ثانیه حل نرم افزار قطع می‌شود زیرا جوشش وارد ناحیه لایه‌ای می‌شود که روابط انتقال حرارت آن با جوشش نقطه‌های متفاوت است.



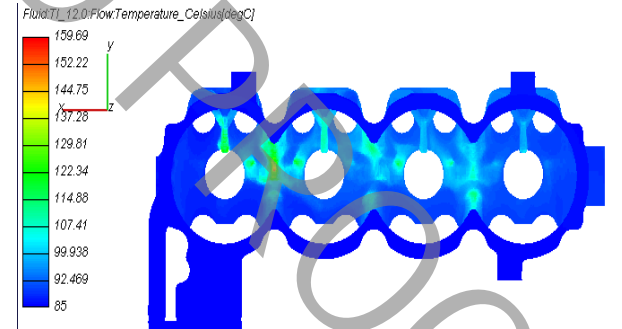
الف) توزیع دما در راهگاه سیال در قسمت سرسیلندر با فرض جوشش بعد از ۱۰/۵ ثانیه



ب) توزیع دما در راهگاه سیال در قسمت سرسیلندر با فرض جوشش بعد از ۱۱ ثانیه



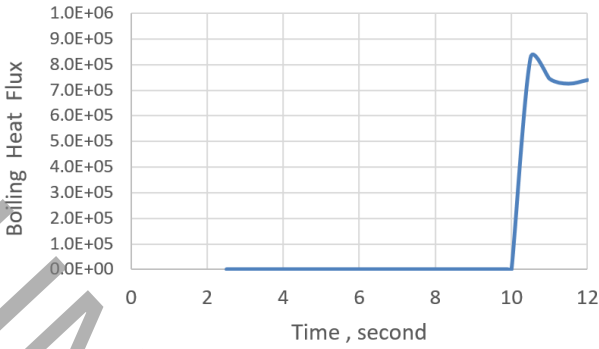
ج) توزیع دما در راهگاه سیال در قسمت سرسیلندر با فرض جوشش بعد از ۱۱/۵ ثانیه



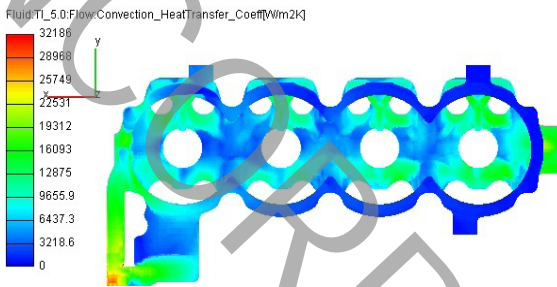
د) توزیع دما در راهگاه سیال در قسمت سرسیلندر با فرض جوشش بعد از ۱۲ ثانیه

### شکل ۱۶: کانتور توزیع دما در سیال در زمان خاموش شدن موتور

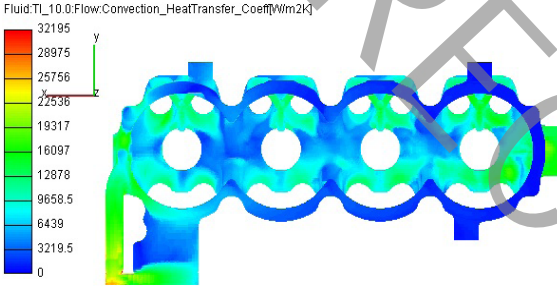
در این دو ثانیه پس از خاموش شدن موتور می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، پس از خاموشی موتور، دمای سیال خنک کن به شدت بالا می‌رود، به طوری که پس از ۱۲ ثانیه بیشینه دمای سیال به ۱۵۹ درجه



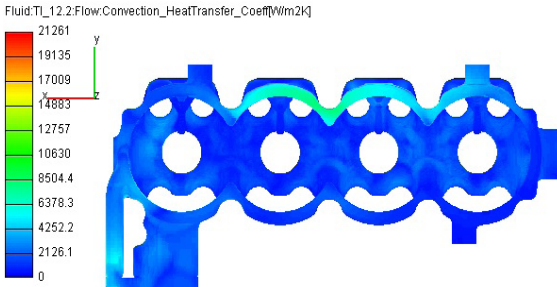
شکل ۱۸: نمودار ماکزیمم شار انتقال حرارت جوششی در سیال



الف) توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در زمان ۵ ثانیه (قبل از خاموشی موتور)



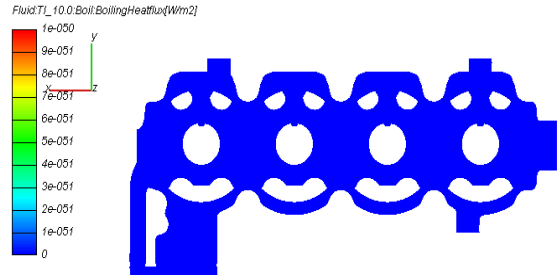
ب) توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در زمان ۱۰ ثانیه (بعد از خاموشی موتور)



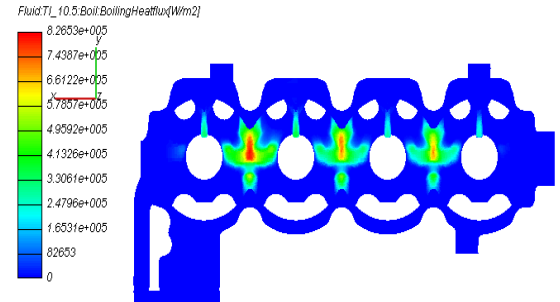
ج) توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در زمان ۱۲ ثانیه (بعد از خاموشی موتور)

شکل ۱۹: کانتور توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در سیال، قبل و بعد از خاموشی موتور

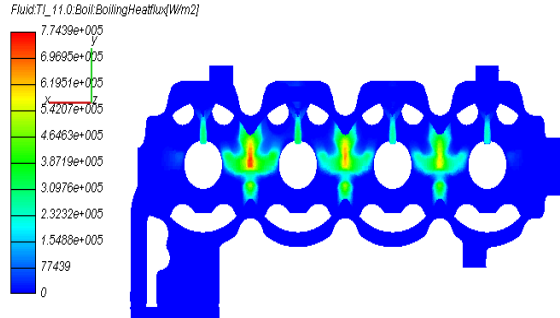
در شکل ۲۱ توزیع دما در سر سیلندر قبل و پس از خاموشی موتور بین زمان‌های ۵ تا ۱۲ ثانیه آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ماکزیمم دما در ناحیه بین دو سیلندر و اطراف دریچه دود و شمع قرار دارد. همانطور که پیش بینی می‌شد دمای پوسته جامد به دلیل کم شدن انتقال حرارت از سمت گازهای داخل سیلندر بعد از خاموشی بالا نمی‌رود اما به دلیل



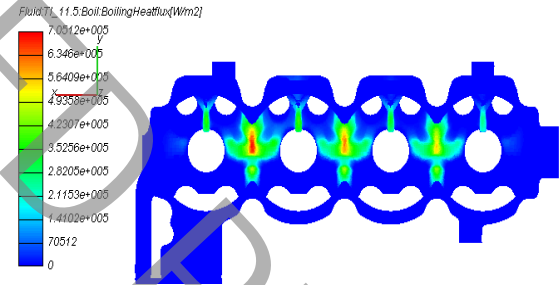
الف) توزیع شار انتقال حرارت جوششی در لحظه خاموش شدن موتور در زمان ۱۰ ثانیه



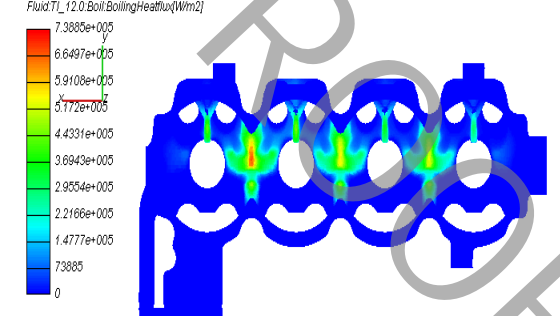
ب) توزیع شار انتقال حرارت جوششی در زمان خاموش شدن موتور بعد از ۱۰/۵



ج) توزیع شار انتقال حرارت جوششی در زمان خاموش شدن موتور بعد از ۱۱ ثانیه



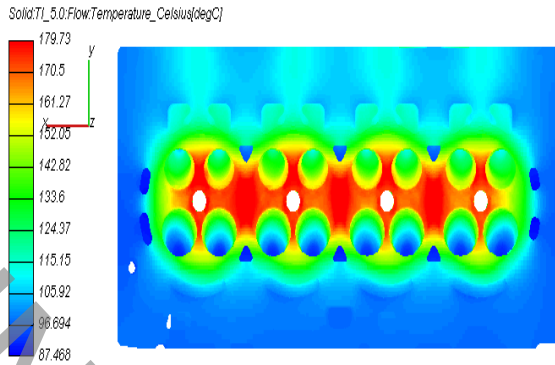
د) توزیع شار انتقال حرارت جوششی در زمان خاموش شدن موتور بعد از ۱۱/۵



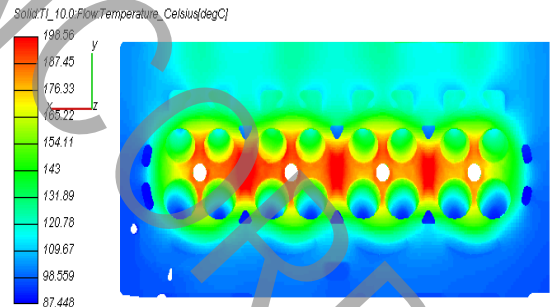
و) توزیع شار انتقال حرارت جوششی در زمان خاموش شدن موتور بعد از ۱۲

شکل ۱۷: توزیع شار حرارتی جوششی قبل و بعد از خاموشی موتور

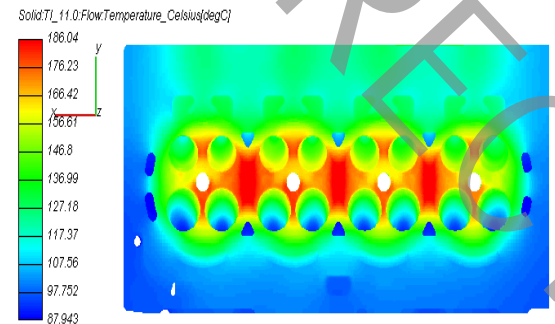




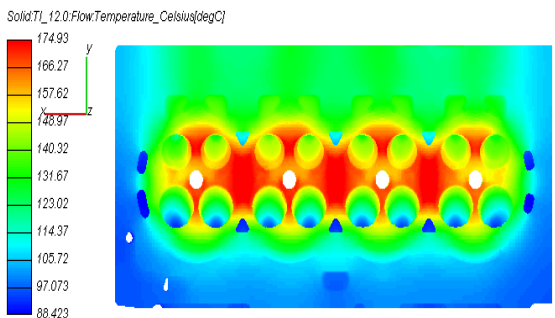
الف) کانتور توزیع دما در سرسیلندر بعد از ۵ ثانیه (قبل از خاموشی)



ب) کانتور توزیع دما در سرسیلندر بعد از ۱۰ ثانیه (لحظه خاموشی)



ج) کانتور توزیع دما در سرسیلندر بعد از ۱۱ ثانیه (بعد از خاموشی)

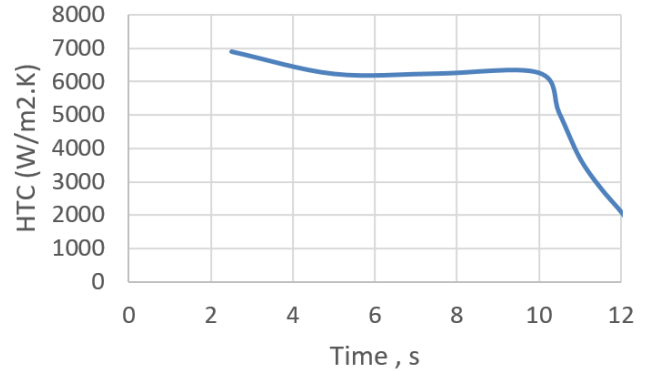


د) کانتور توزیع دما در سرسیلندر بعد از ۱۲ ثانیه (بعد از خاموشی)

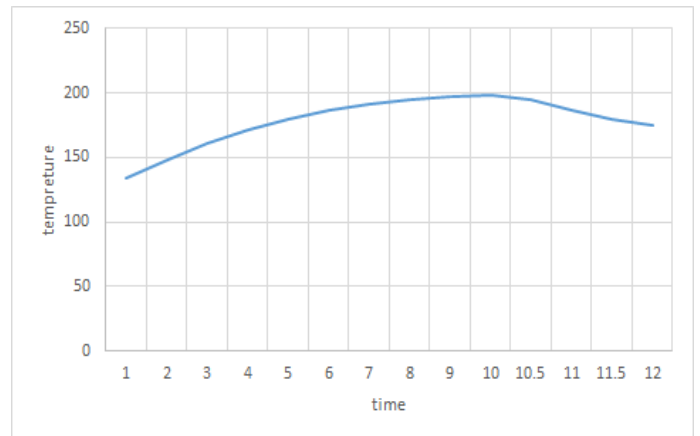
شکل ۲۱: کانتور توزیع دما در سرسیلندر قبل و بعد از خاموشی موتور

داخل سیستم به فشار اتمسفر نزدیک می‌شود که این امر باعث کاهش دمای جوشش می‌شود. از این رو با خاموش شدن موتور و در پی آن خاموش شدن پمپ آب، امکان ایجاد جوشش افزایش می‌یابد.

۲- ماکزیمم دما در ناحیه بین دو سیلندر و اطراف دریچه دود و شمع



شکل ۱۹: ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در سیال بر حسب زمان



شکل ۲۰: روند تغییر دمای ماکزیمم در بلوک بر حسب زمان

امکان چسبیدن سیلندر به پیستون زمان این تغییرات به منظور طراحی موتور و پروانه رادیاتور برای این شرایط بسیار مهم است. همانطور که مشاهده می‌گردد جوشش باعث افزایش سرعت خنک کاری سیلندر می‌گردد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق حل جریان و حرارت در بلوک، سرسیلندر و راهگاه آب با استفاده از نرم افزار AVL-FIRE به همراه یک کد میانجی برای حل همزمان انتقال حرارت در جامد و سیال بصورت ناپایا برای توزیع دما و رفتار سیال بعد از خاموشی موتور انجام شده است. ابتدا سلول محاسباتی مربوط به ناحیه سیال و جامد وارد نرم افزار شده و برای هر یک به صورت جداگانه یک محیط حل در نظر گرفته شد. سپس کد مربوط به حل همزمان به صورت یک فایل `ascii` توسط نرم افزار فراخوانی و حل اجرا گردید. برای فرض جوشش از مدل‌های تک فاز به دلیل زمان محاسبات پایین نسبت به حل معادلات جوشش به صورت دو فاز استفاده شده است. بعد از شبیه سازی، نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱- تا مدت ۱۰ ثانیه موتور به صورت روشن شبیه‌سازی شده و توزیع فشار همانند حل پایای موتور روشن می‌باشد. با گذشت زمان میزان فشار

$\mu$	لزجت دینامیکی
$\xi$	کسر جرمی
$\varphi$	ضریب تصحیح جابجایی

#### زیرنویس‌ها

<i>boil</i>	جوشش
<i>conv</i>	جابجایی
<i>l</i>	سیال
<i>g</i>	بخار
<i>mac</i>	ماکرو
<i>mic</i>	میکرو
<i>sat</i>	اشباع
<i>w</i>	دیوار

#### مراجع

- [1] F. Ohrby, Numerical modeling of subcooled nucleate flow boiling in engine cooling systems, Master's thesis in the Applied Mechanics programme, Chalmers university of Technology, 2014.
- [2] T. Boo, CFD homogeneous mixing flow modeling to simulate sub-cooled nucleate boiling flow, SAE International, Paper No. 2004-01-1512, 2004.
- [3] K. Robinson, IC engine coolant heat transfer studies, PhD thesis, University of Bath, 2001.
- [4] O. Zeitoun, M. Shoukri, Bubble behavior and mean diameter in sub-cooled flow boiling, ASME Journal of Heat Transfer, pp. 110-118, 2010.
- [5] L. You- Chang, G. Xiao-Hong, C. Dan, Research on cooling system for 4-cylinder diesel engine, SAE 2007-01-2064, 2007.
- [6] Dong, F., Fan, Q., Cai, Y. Norihiko, w., Lee, w. Numerical Simulation of Boiling Heat Transfer in Water Jacket of DI Engine, SAE 2010-01-0262, 2010.
- [7] A. Mohammadi, H. Hashemi, A. Jazayeri, Two phase flow simulation for nucleate boiling heat transfer calculation in water-jacket of diesel engine. In ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference, Japan, pp. 1721-1729, 2011.
- [8] A. Mohammadi, A. Jazayeri, M. Yaghoubi, Two Phase Flow Simulation for Film Boiling Heat Transfer Calculation in Water-jacket of Diesel Engine, Proceedings of the Seventh International Conference on Internal Combustion Engines, Tehran, Iran, 2011.
- [9] A. Mohammadi, M. Yaghoubi, Two Phase Flow Simulation for Subcooled nucleate Boiling Heat Transfer Calculation in Water-jacket of Diesel Engine, Engine research, Vol.22, pp.50-61, 2011.
- [10] Myeong-Gie Kang, Effects of pool subcooling on boiling

مشاهده می‌شود.

۳- جوشش تا ۱۰ ثانیه اول اتفاق نمی‌افتد و میزان شار حرارتی جوششی صفر می‌باشد. بعد از خاموش شدن موتور و قطع کار پمپ آب، جوشش شروع می‌شود. شار حرارتی جوشش در کسری از ثانیه به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته سپس ثابت باقی مانده است.

۴- در بررسی جوشش پس از خاموشی موتور مشاهده شد، پس از ۲/۳ ثانیه بعد از خاموشی موتور، دمای سیال درون راهگاه به ۱۶۰ درجه سانتیگراد رسیده و جوشش وارد ناحیه فیلمی می‌شود.

۵- وقتی که موتور به صورت ناگهانی از حرکت باز می‌ایستد و پمپ آب در اثر خاموشی از کار می‌افتد؛ ضریب انتقال حرارت بطور ناگهانی افت شدید می‌کند. در نتیجه میزان حرارتی که از بدنه و گازهای داغ داخل سیلندر به سیال خنک کننده منتقل می‌شود نیز بسیار کاهش خواهد یافت. این پدیده باعث افزایش دما در نقاط بحرانی در سرسیلندر می‌شود که اگر از حد معینی بالاتر رود باعث سوختن واشرسیلندر و از کارافتادن موتور در استارت بعدی می‌باشد. بنابراین بررسی حاضر نقش بسیار مهمی در طراحی موتور دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده به منظور محاسبه زمان مورد نیاز برای خنک سازی بلوک توسط پمپ آب پس از خاموشی نیاز به اطلاعات دمایی بلوک می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌گردد پس از خاموشی میزان تغییرات دمایی در صورت روشن ماندن پمپ نیز بررسی گردد تا زمان مورد نیاز برای خنک سازی محاسبه گردد.


تشکر و قدردانی

بدین وسیله از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) برای در اختیار قرار دادن اطلاعات لازم برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

#### فهرست علائم

$C_p$	گرمای ویژه در فشار ثابت
$d_l$	قطر جدایش
$D_h$	قطر هیدرولیکی
$h$	ضریب انتقال حرارت جابجایی
$k$	ضریب انتقال حرارت هدایت
$Nu$	عدد ناسلت
$p$	فشار
$q$	نرخ انتقال حرارت مخصوص
$Re$	عدد رینولدز
$S$	ضریب تصحیح جوشش
$T$	دمای سیال
$V$	سرعت سیال
<b>علائم یونانی</b>	
$\rho$	چگالی
$s$	کشش سطحی

- در نظر گرفتن پدیده جوشش در موتور ملی به روش حل هم زمان انتقال حرارت جامد و سیال و بررسی اثر خنک کاری دقیق بر انتقال حرارت. فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات موتور، شماره ۴۵، ص ۱۶-۳، ۱۳۹۵.
- [17] K., Hanjalić, M., Popovac, M., Hadžiabdić, A robust near-wall elliptic-relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, Issue. 6, pp.1047-1051, 2004.
- [18] J. C. Chen, A correlation for boiling heat transfer to saturated heat transfer to standard fluids in convective flow, 6th National Heat Transfer Conference, Boston, 1963.
- [19] W. M. Rohsenow, Heat Transfer, a Symposium, Engineering Research Institute, University of Michigan, Michigan, 1952.
- [20] AVL Fire User Manual, Version 2004.
- [21] L. Z., Zeng, J. F., Klausner, D. M., Bernhard, R., Mei, A unified model for the prediction of bubble detachment diameters in boiling systems, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 2271-2279, 1993.
- [22] I. C., Finlay, R. J. Boyle, J. P. Pirault, and T. Biddulph, Nucleate and film boiling of engine coolants flowing in a uniformly heated duct of small cross section, 1987.
- [23] Technical Report, Thermal survey test of EF7TC, Mahdi Ahmadi, 2007.
- heat transfer in a vertical annulus with closed bottom, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 48, pp. 255–263, 2005.
- [11] Myeong-Gie Kang, Effects of the location of side inflow holes on pool boiling heat transfer in a vertical annulus, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 51, pp. 1707–1712, 2008.
- [12] M. Jafarabadi, H. Chamani, A. Jazayeri, Improvement of a diesel engine water cooling performance through implementation of different cooling Designs, *Internal combustion Engine Division Fall Technical Conference*, 2013.
- [13] R. Hemmat Khanlou, A. Mohammadi, A. Jazayeri, M. Yaghoubi, Simulation of heat transfer considering boiling phenomenon in cooling passage of turbo-charged national engine, *Engine research*, Vol.29, pp.3-14, 2013.
- [14] R. Hemmat Khanloo, A. Mohammadi, M. Varmazyar, Research on modification of cooling passage for a 4-cylinder turbocharged SI engine with precise cooling view point, *Engine research*, Vol. 41, pp.31-29, 2016.
- [15] AbdulNour, B., Doroudian, M., Battoei-Avarzaman, M. (2011). Prediction of Transient Engine Compartment Temperature During After-Boil, *SAE Technical Paper*. (No. 01-0657).
- [16] جهان تیغی، ص.، نوربخش، او محمدی، آ. شبیه‌سازی انتقال حرارت با

<p>Please cite this article using: S. Jahantighi, A. Nourbakhsh, A. Mohammadi, Simulation of heat transfer in shutdown time of engine by conjugate heat transfer, <i>Amirkabir J. Mech. Eng.</i>, 51(4) (2019) 1-12. DOI:</p>	<p>برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:</p> 
---	---

UNCORRECTED PROOF