



## ایجاد بهبود قابل توجه در عملکرد یک مبدل حرارتی فشرده با استفاده از نانوذرات هیبریدی و شبیه سازی

### آن به کمک نرم افزار SOLIDWORKS

<sup>1</sup> دیار منذر موسی عباس المعموری؛ <sup>2\*</sup> سید علیرضا موسوی شیرازی  
<sup>1</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه مهندسی مکانیک- ساخت و تولید (تحصیلات تکمیلی)  
<sup>2</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه فیزیک

#### چکیده

در این مقاله، یک مدل سه بعدی از یک مبدل حرارتی فشرده (رادیاتور) با استفاده از نرم افزار SOLIDWORKS شبیه سازی می شود. برای این منظور ابتدا یک فرم کلی برای نصب لوله و پره های خنک کننده رادیاتور و همچنین مخزن ورود و خروج سیال طراحی شدند و همچنین نانو سیالات بکار رفته با توجه به مشخصه های ترموفیزیکی شان نظیر چگالی، ضریب هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارتی برای نرم افزار SOLIDWORKS تعریف می گردند. نتایج مدل سازی نشان می دهند که افزودن نانوذرات و ایجاد نانو سیال در طراحی رادیاتور منجر به همگرایی دمایی در دمای خروجی رادیاتور می گردد. همچنین تغییرات دمایی بر روی سطح رادیاتور نشان می دهد که عبور جریان هوا با یک دمای آزمایشگاهی در تماس با پره های رادیاتور باعث جذب شدن گرما از نانو سیال و متعاقباً کاهش دمای نانو سیال به میزان 12.8% می گردد که نشان از بهبود قابل توجه در عملکرد رادیاتور می باشد. علاوه بر این، دمای خروجی رادیاتور به دمایی معادل 73.5°C همگرا شده و بر روی این دما ثابت باقی می ماند.

**کلمات کلیدی:** تغییرات دمایی، رادیاتور، مبدل حرارتی، نانو ذره، نانو سیال، نرم افزار SOLIDWORKS.

#### ۱- مقدمه

<sup>1</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد

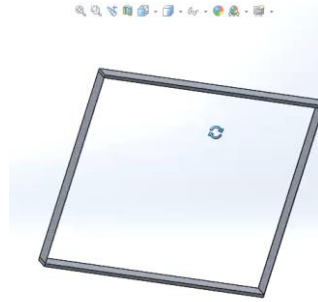
<sup>2\*</sup> استادیار و عضو هیات علمی

\*Email: [a\\_moosavi@azad.ac.ir](mailto:a_moosavi@azad.ac.ir)

مبدل های حرارتی اجزای مهمی در نیروگاه ها، صنایع فرآیندهای شیمیایی، گرمایشی، تهویه مطبوع، سیستم های تبرید و خنک کاری سیستم های الکترونیکی هستند. امروزه مبدل های حرارتی در بخش وسیعی از صنایع کاربرد دارند. از آن جمله می توان به نیروگاه ها، توربین های گازی، تهویه مطبوع، صنایع تبرید، صنایع گرمایشی و بسیاری از صنایع دیگر اشاره کرد [1]. افزایش راندمان و بهبود مصرف انرژی در صنایع همواره مورد توجه محققان بوده است. بهبود انتقال حرارت در سیستم های گرمایشی و سرمایشی نیز از این قاعده مستثنی نیست، از این رو تحقیقات گسترده ای برای استفاده از سیالات جایگزین بجای سیالات متداول نظیر آب و اتیلن گلیکول، که بتواند خواص حرارتی مناسب تری را بروز دهد انجام شده است. از سوی دیگر خواص چند برابری هدایت حرارتی فلزاتی نظیر مس و آلومینیوم در مقایسه با مایعات متداول باعث شده تا ایده پخش کردن ذرات فلزی در مایعات مطرح شود. نانو سیالات در معنای امروزی را می توان سیالاتی دانست که ذرات بسیار ریز در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، در داخل سیال پایه مانند آب و یا اتیلن گلیکول پایدار شده اند. نانو سیالات در سال های گذشته در بسیاری از عرصه های مهندسی مانند سیستم های خورشیدی، خنک کاری قطعات الکترونیکی، کاربردهای پزشکی، پیل های سوختی، راکتورهای هسته ای و افزایش راندمان سیستم های حرارتی مورد توجه قرار گرفته اند. تحقیقات گسترده ای در زمینه خواص این سیالات در شرایط مختلف به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته که بسیاری از آنها نمایانگر افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت نانو سیال نسبت به سیال پایه است [2, 3].

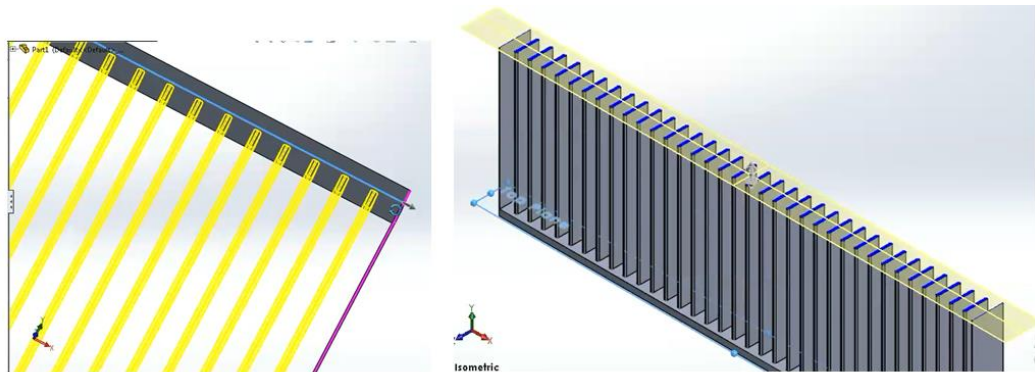
نانو سیالات، محیط جدیدی از انتقال حرارت هستند که از سوسپانسیون ذرات معمولاً فلزی در ابعاد نانو در سیال پایه تشکیل شده اند. نانو سیالات دارای ضریب هدایت حرارتی و جابجایی بالاتری نسبت به سیالات معمولی هستند که باعث شده است کاربرد آنها در مبدل های حرارتی علاوه بر صرفه جویی در مصرف انرژی، باعث کاهش ابعاد مبدل و افزایش راندمان آنها شود. عوامل زیادی از قبیل سرعت جریان نانو سیال ورودی به مبدل، غلظت نانو ذره در سیال پایه، اندازه نانو ذره، دمای نانو سیال بر ضریب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانو سیال اثرگذارند [1, 4]. هدف اصلی از این تحقیق، بررسی اثرات افزودن شدن نانو ذرات هیبریدی  $Al_2O_3$  و  $SiC$  به سیال خنک کاری موتور خودرو است. در واقع هدف کاربردی این تحقیق، بهبود انتقال حرارت در سیستم خنک کاری موتور است.

در این تحقیق، مدل سه بعدی رادیاتور در نرم افزار SOLIDWORKS شبیه سازی شد. در این بخش، مراحل طراحی توضیح داده شده است. برای این منظور ابتدا یک فرم کلی برای نصب لوله و پره های خنک کننده رادیاتور و همچنین مخزن ورود و خروج سیال طراحی شدند.

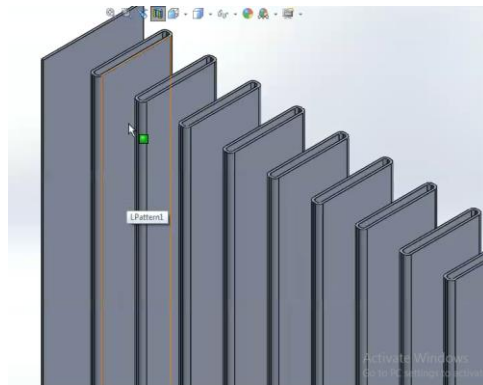


شکل ۱- طراحی قاب اصلی رادیاتور

در شکل ۲ سمت چپ، ابتدا محل ایجاد لوله های رادیاتور تعیین شد و مطابق شکل ۲ سمت راست به آنها حجم داده شد اما ضخامت تمامی مجاری یا همان لوله های رادیاتور باید یکسان باشد لذا مطابق شکل ۳، تمامی سطوح تعریف شده به ضخامت ۰/۵ میلیمتر سوراخکاری شدند.

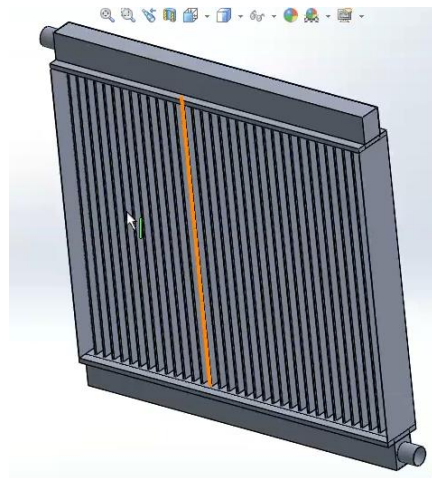


شکل ۲- طراحی لوله های اصلی رادیاتور



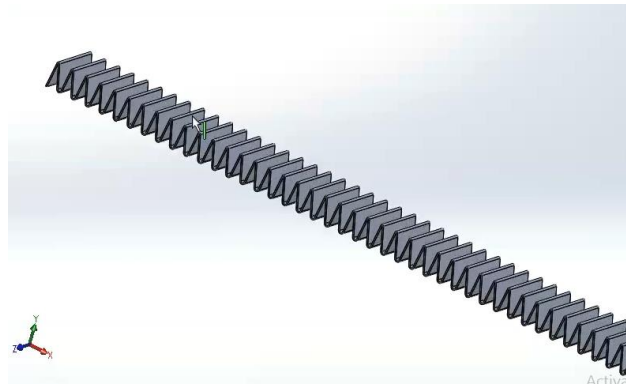
شکل ۳- مدل نهایی لوله های انتقال سیال

مطابق شکل ۴، مدل نهایی رادیاتور طراحی شد. سپس مخزن بالایی و پایینی به طور جداگانه مطابق شکل طراحی و بر روی رادیاتور نصب شدند. مخزن بالایی آب جوش موتور به آن وارد شده و از طریق لوله های نشان داده شده در شکل ۴، جریان سیال به مخزن پایینی، که حاوی آب خنک شده است، منتقل می گردد.

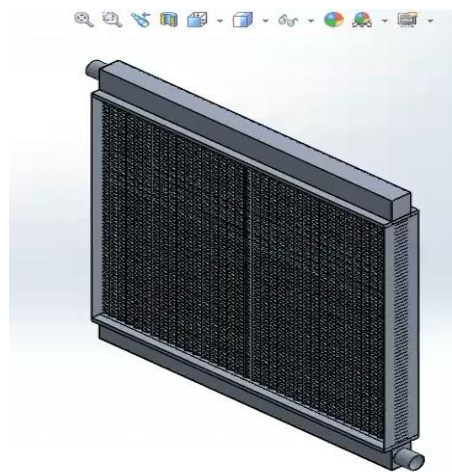


شکل ۴- طراحی مخزن بالایی و پایینی رادیاتور

پره های رادیاتور در مرحله آخر جهت ایجاد گردش مناسب هوا بین لوله ها طراحی شدند. در شکل ۵، پره های زیگزاگی طراحی شده نشان داده شده است. در بین ردیف های لوله در رادیاتور این پره ها مطابق شکل ۶ نصب شدند.



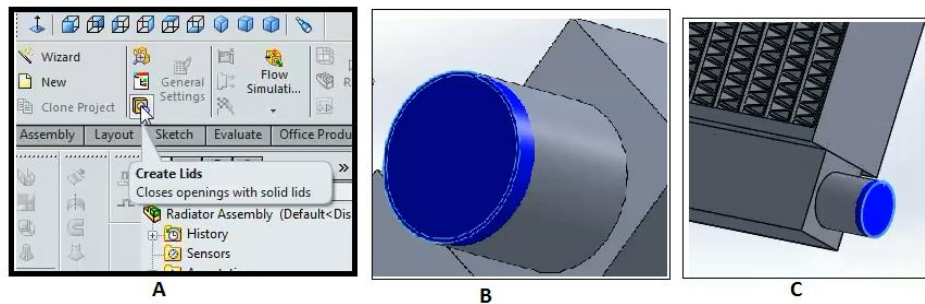
شکل ۵- پره های رادیاتور



شکل ۶- مدل نهایی رادیاتور طراحی شده

## ۲-۱- مدل سازی عددی و انتقال حرارت

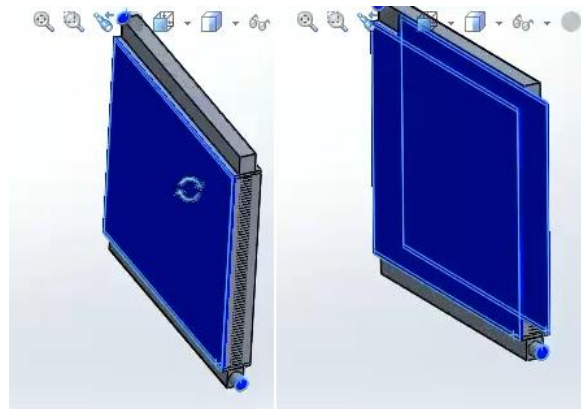
فرآیند انتقال حرارت و مدل سازی عددی انتقال حرارت در رادیاتور، در بخش Flow Simulation نرم افزار SOLIDWORKS انجام شد. در گام اول، مدل طراحی شده به محیط نرم افزار فراخوانی شد. با توجه به اینکه مدل رادیاتور طراحی شده با محیط اطراف در ارتباط است لذا در گام اول باید قید Lid برای ایزوله کردن محیط یا تعریف همان شرایط مرزی ایجاد شود. در این تحقیق، دو سیال، مورد مطالعه است. جریان آب که در داخل رادیاتور در حال حرکت است و جریان هوا که فرآیند خنک کاری را انجام می دهد. مطابق شکل ۷، ابتدا قید Lids فعال شده و سطوح ورودی و خروجی رادیاتور را توسط این قید، از محیط حل مسئله جدا می کنیم. لذا شرایط مرزی مسئله چنین تعریف شده است که محیط داخل Lid ها، مسأله مورد تحقیق است.



شکل ۷- سمت راست: قیدگذاری برای خروجی رادیاتور، سمت وسط: قیدگذاری برای ورودی رادیاتور، سمت چپ:

### فرآیند تعریف قید Lid

در ادامه و مطابق شکل ۸، فرآیند Lid گذاری برای محل عبور جریان هوا نیز تعریف شد و بدین وسیله، شرایط مرزی مسئله به طور کامل تعریف شد و مسئله تحقیق و محیط از هم تفکیک شدند.

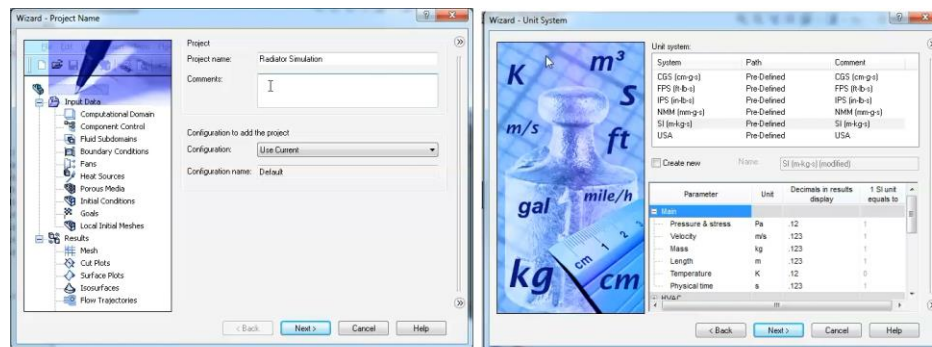


شکل ۸- تعریف قیود برای جداسازی محیط از مسئله برای سیال هوا

بعد از تعریف شرایط مرزی مسئله، باید شرایط حل مسئله تعریف شود. برای این منظور مطابق شکل ۹، از بخش Flow Simulation و از زیر بخش Wizard شروع به تعریف پارامترهای مسئله تحقیق می کنیم. در ادامه مطابق شکل ۱۰، در گام اول باید اطلاعات اولیه پروژه مانند نام پروژه تعریف شود. در گام دوم، نوع واحد مدنظر انتخاب می شود. مطابق شکل ۱۰ سمت راست، واحد انتخابی در این تحقیق SI انتخاب شد. لازم به ذکر است در این بخش، نرم افزار به صورت پیش فرض واحد دما را کلوین انتخاب کرده است که باید به درجه سلسیوس تغییر داده شود.

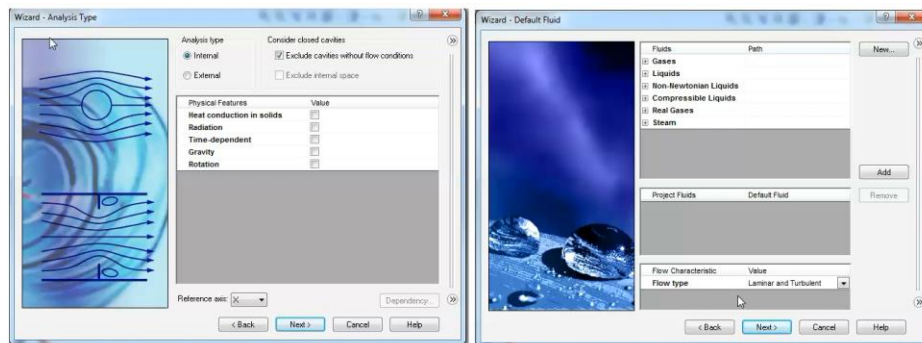


شکل ۹- انتخاب زیر بخش Wizard جهت تعریف مسأله



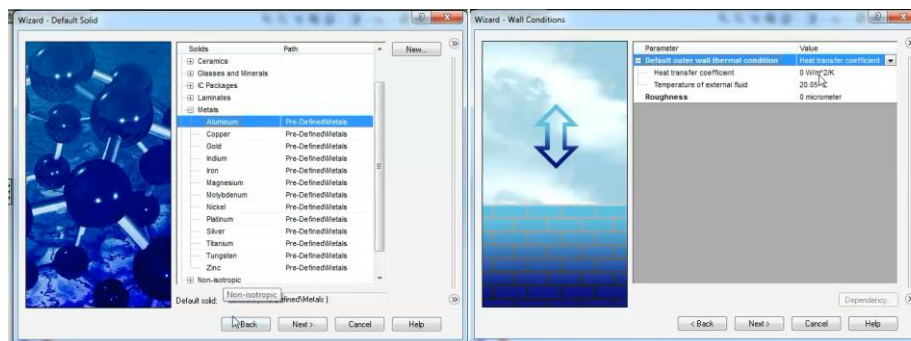
شکل ۱۰- سمت راست: تعریف واحد های انتخاب شده برای حل مسأله، سمت چپ: تعریف اطلاعات اولیه پروژه

در گام بعدی مطابق شکل ۱۱ سمت چپ، نوع تحلیل انتخاب شد. لذا در این بخش باید گزینه *Heat Conduction in Solid* انتخاب شود تا بتوان تغییرات انتقال حرارت در پوسته رادیاتور را نیز مشاهده کرد. در گام بعدی خواص سیالات مورد بررسی در این تحقیق تعریف می شود. در این تحقیق دو نوع سیال وجود دارد که یکی هوا است و از زیر بخش *Gases* می توان هوا را انتخاب کرد اما چون اطلاعات نانوسیالات خنک کننده در لیست سیالات نیست، انواع نانوسیالات با استفاده از گزینه *New* در شکل ۱۰ سمت راست تعریف شدند.

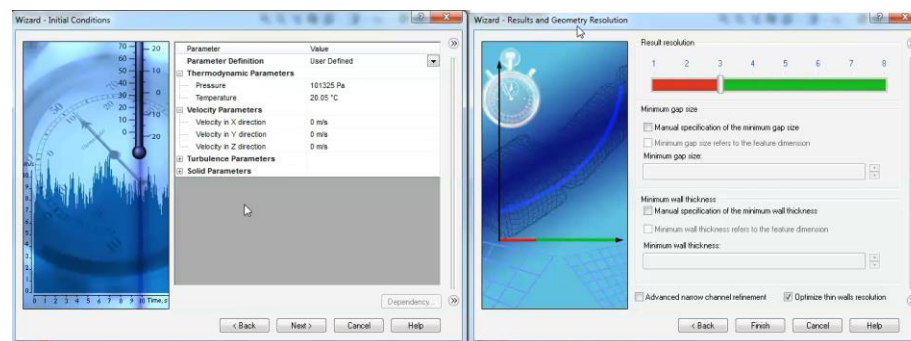


شکل ۱۱- سمت راست: تعریف سیالات مورد مطالعه در این تحقیق، سمت چپ: تعریف نوع تحلیل

در شکل ۱۲ سمت چپ، جنس موادی که انتقال حرارت در آن انجام می شود تعریف شد. برای این تحقیق فلز آلومینیوم انتخاب شد. در ادامه، شرایط انتقال حرارت از دیواره های رادیاتور انتخاب شد که برای این منظور مطابق شکل ۱۲ سمت راست، گزینه Hear Transfer Coefficient انتخاب و مقدار آن برای فلز آلومینیوم براساس مراجع تعریف شد. در گام بعدی و مطابق کل ۱۳ سمت چپ، شرایط اولیه حل مسأله شامل دمای ورودی سیال به رادیاتور، فشار انجام آزمایش، سرعت عبور سیال در داخل رادیاتور و ... تعریف شد. در نهایت و در گام آخر مطابق شکل ۱۳ سمت راست، نوع و سایز مش بندی برای حل مسأله انتقال حرارت در رادیاتور انتخاب شد.



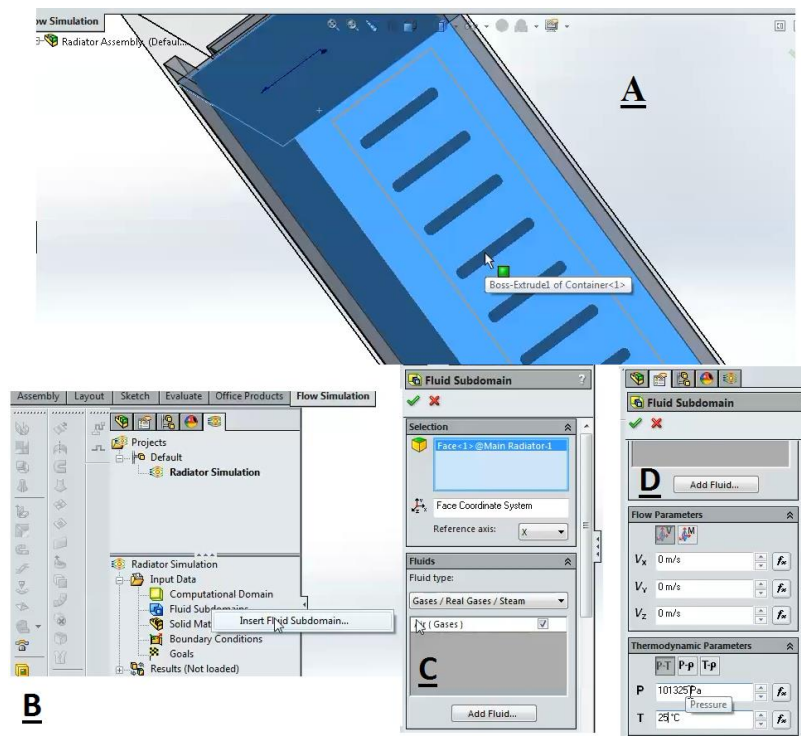
شکل ۱۲- سمت راست: تعریف شرایط دیواره های انتقال حرارت، سمت چپ: تعریف ماده اصلی رادیاتور



شکل ۱۳- سمت راست: انتخاب مش بندی و المان بندی، سمت چپ: تعریف شرایط اولیه مدل سازی

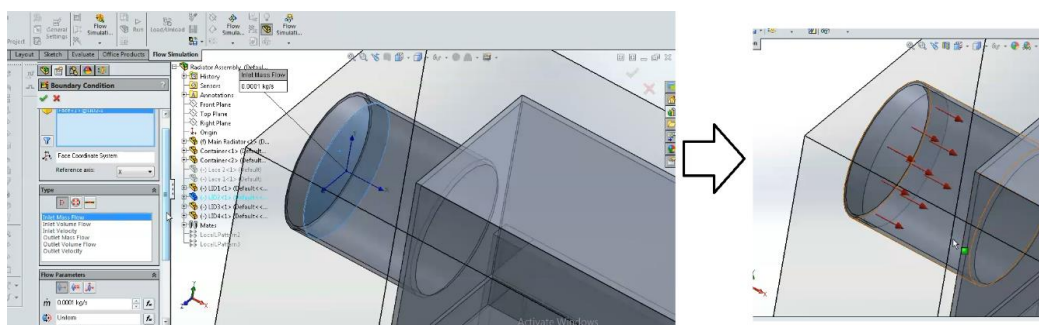
در گام بعد باید جریان حرکت هوا از روی پره های رادیاتور تعریف شود. برای این منظور مطابق شکل ۱۴ قسمت ب، در بخش Fluid Subdomains، کلیک راست کرده و گزینه Insert Fluid Subdomain را انتخاب می کنیم. در این بخش، سطوحی که باید با هوا در ارتباط باشد مطابق شکل ۱۴ قسمت الف تعریف شدند. در ادامه، در بخش Fluid type نوع سیال گاز را انتخاب کرده (شکل ۱۴ قسمت ج) و فشار و دمای سیال را بر روی ۱ اتمسفر و ۲۵ درجه سلسیوس تنظیم می نماییم (شکل ۱۴ قسمت د). با توجه به تغییر شرایط دمایی محیط، می توان این دما را تغییر کرد.



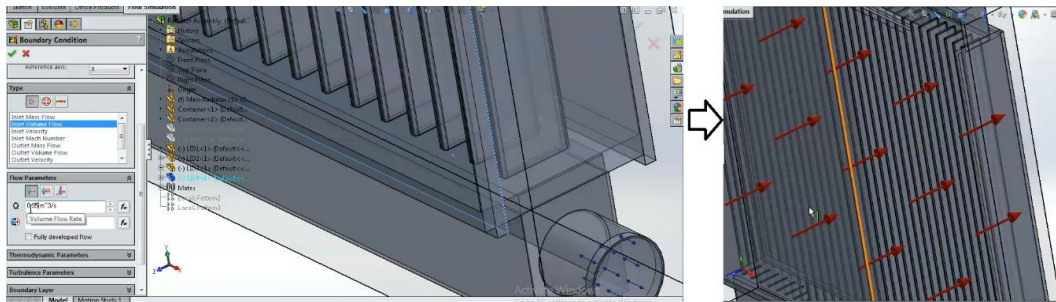


شکل ۱۴- روش تعریف سطح در تماس با جریان باد

به منظور تعریف میزان جریان ورودی به رادیاتور مطابق شکل ۱۵، از گزینه Boudnart Condition اقدام به انتخاب ورودی کرده و میزان نرخ آب ورودی به رادیاتور را تعریف می کنیم. در شکل ۱۵ سمت راست، فلش های قرمز رنگ نشان دهنده جهت جریان ورودی به رادیاتور است. در ادامه و در شکل ۱۶، شرایط مرزی برای جریان هوا بر روی رادیاتور تعریف شده است. مطابق شکل، بعد از تعریف و انتخاب سطح در تماس با جریان هوا، فلش های قرمز رنگ مسیر جریان هوا را نشان می دهند. در این تحقیق، دبی حجمی جریان هوا مقداری ثابت و برابر با ۰.۳۵ مترمکعب در ثانیه در نظر گرفته شد. در نهایت، بعد از انجام تمامی مراحل فوق، این برنامه اجرا می شود.



شکل ۱۵- تعریف جریان جرمی ورودی به رادیاتور



شکل ۱۶- تعریف جریان هوای خنک کننده سیال

بر اساس نتایج بدست آمده توسط محققین، با تغییر نوع و غلظت نانو ذرات در سیال پایه، مشخصه های ترموفیزیکی نانوسیال نیز تغییر خواهد کرد. محققین روابط عددی ذیل را جهت محاسبه مشخصه های ترموفیزیکی نظیر چگالی، ضریب هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارتی ایجاد کرده اند. بطوریکه ظرفیت گرمایی ویژه نانو سیال عبارتست از [5]:

$$Cp_{nf} = \frac{\varphi(\rho_s Cp_s) + (1 - \varphi)(\rho_{bf} Cp_{bf})}{\rho_{nf}}$$

ضریب هدایت حرارتی [6]:

$$K_{nf} = \frac{2K_{bf} + K_p + 2\varphi(K_p - K_{bf})}{2K_{bf} + K_p - \varphi(K_p - K_{bf})} K_{bf}$$

ویسکوسیته (لزجت) [7]:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 5300 \left( \frac{\varphi}{1 - \varphi} \right)^{2.8}$$

و چگالی نیز [8]:

$$\rho_{nf} = \varphi\rho_p + (1 - \varphi)\rho_f$$

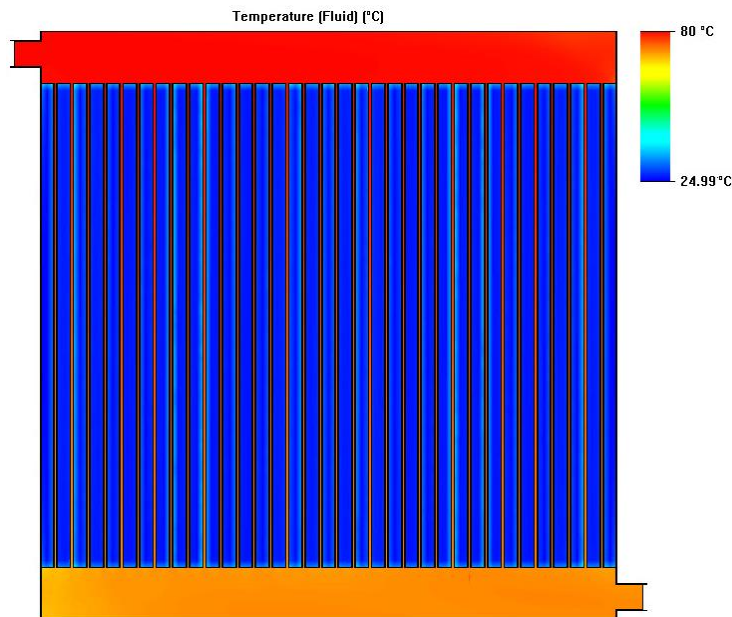
خواهد بود. بطوریکه:

$K$ : ضریب هدایت حرارتی بر حسب  $W/mK$ ،  $\varphi$ : غلظت نانو ذره،  $\mu$ : لزجت،  $\mu_{nf}$ : ایندکس نانو سیال،  $\mu_{bf}$ : ایندکس سیال پایه،  $\rho$ : چگالی بر حسب  $(kg/m^3)$ ،  $p$ : ایندکس های نانو ذره،  $f$ : ایندکس سیال پایه.

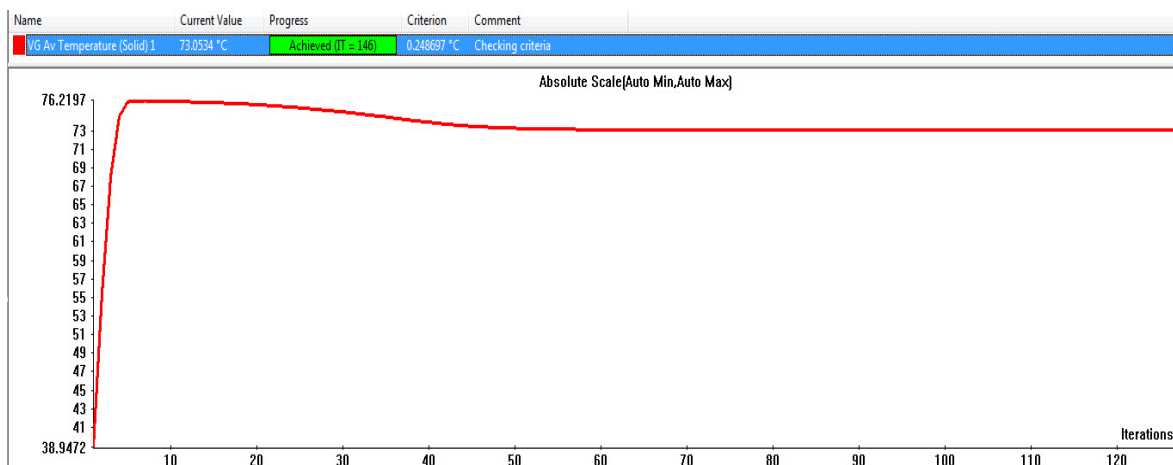
بنابراین مشخصه های ترموفیزیکی نانوسیالات توسط معادلات بالا تعریف می شود. پس با توجه به توضیحات فوق، نوع نانو سیالات بکارگیری شده در این تحقیق برای نرم افزار SOLIDWORKS تعریف می شود.

## ۳- نتایج و بحث

شکل ۱۷ نتایج مدل‌سازی تغییرات دمایی در یک رادیاتور را نشان می‌دهد. دمای مجرای آب ورودی به رادیاتور به رادیاتور در حدود  $80^{\circ}\text{C}$  و دمای باد فن نیز تقریباً  $25^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. خروجی رادیاتور یک دمایی در حدود  $73.5^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۸ نتایج همگرایی دمای خروجی از رادیاتور را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۷- رادیاتور مدل شده و تغییرات دمایی در رادیاتور



شکل ۱۸- همگرایی دمای خروجی از رادیاتور

## ۴- نتیجه گیری

تغییرات دمایی بر روی سطح رادیاتور نشان می دهد که جریان هوا با یک دمای  $25^{\circ}\text{C}$  در طول تماس با پره های رادیاتور، گرما را از نانو سیال جذب کرده و باعث می شود که دمای نانو سیال به میزان ۱۲.۸ درصد کاهش پیدا کند. همچنین نمودار شکل ۱۸ نتایج همگرایی دمای خروجی از رادیاتور را نشان می دهد. این نمودار نشان می دهد که در طول مدت زمان، دمای خروجی رادیاتور بر روی  $73.5^{\circ}\text{C}$  ثابت شده و باقی مانده است.

## مراجع

- [1] Kumar, P. and R. Sarviya, *Recent developments in preparation of nanofluid for heat transfer enhancement in heat exchangers: A review*. Materials Today: Proceedings, 2021. 44: p. 2356-2361.
- [2] Das, S.K., et al., *Nanofluids: science and technology*. 2007: John Wiley & Sons.
- [3] Murshed, S., K. Leong, and C. Yang, *Enhanced thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>—water based nanofluids*. International Journal of thermal sciences, 2005. 44(4): p. 367-373.
- [4] Li, Y., et al., *A review on development of nanofluid preparation and characterization*. Powder technology, 2009. 196(2): p. 89-101.
- [5] Ramadhan, A., W. Azmi, and R. Mamat. *Heat transfer characteristics of car radiator using tri-hybrid nanocoolant*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. IOP Publishing.
- [6] Maxwell, J.C., *A treatise on electricity and magnetism: Pt. III. Magnetism. pt. IV. Electromagnetism*. Vol. 2. 1881: Clarendon press.
- [7] Chandrasekar, M., S. Suresh, and A.C. Bose, *Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010. 34(2): p. 210-216.
- [8] Pak, B.C. and Y.I. Cho, *Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles*. Experimental Heat Transfer an International Journal, 1998. 11(2): p. 151-170.