

بررسی عددی تحلیل حرارتی و سیالاتی اثر ارتفاع پرواز و فوم فلزی متخلخل بر خنک کننده روغن هواپیمای آموزشی

محمد صدیقی^۱، احمدرضا ایوبی^{۲*}، احسان امینیان^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه پیش برنده، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳)

چکیده

استفاده از فوم های فلزی متخلخل یکی از روش های مرسوم برای افزایش انتقال حرارت در سیستم های صنعتی از جمله مبدل های حرارتی می باشند. محیط های متخلخل ضمن افزایش انتقال حرارت منجر به افزایش افت فشار می شوند. در این مقاله به بررسی سه بعدی اثرات ارتفاع پرواز: $5000m < H < 1000m$ و فوم فلزی متخلخل با عدد دارسی $10^{-1} < Da < 10^{-4}$ در یک خنک کننده روغن هواپیما آموزشی پرداخته شد. ضریب تخلخل برای همه حالات دارای فوم متخلخل ۰٫۹ فرض شد. برای شبیه سازی جریان روغن 20W50 در محیط متخلخل، از معادله دارسی-برینکمن-فورچهایمر استفاده شد. خواص ترموفیزیکی روغن شامل چگالی، لزجت و ضریب هدایت حرارتی با استفاده از داده های آزمایشگاهی برحسب دمای کاری استخراج شد. روغن داغ با شرایط مرزی $T_{in} = 390K$ وارد خنک کننده روغن می شود. شرایط مرزی روغن خروجی $T_{out} = 300K$ است. دیواره خنک کننده شرط مرزی عدم لغزش و ضریب انتقال حرارت جابجایی هوا متناسب با ارتفاع می باشد. معادلات حاکم بر اساس روش حجم محدود (FVM) با استفاده از نرم افزار فلونت گسسته شده اند. با افزایش ارتفاع پرواز به $H=5000m$ ، در حالت روغن خالص، انتقال حرارت، افت فشار و برآوردگر معیار ارزیابی عملکرد به ترتیب، ۰٫۴۵٪، ۰٫۴۹٪ و افزایش می یابد. فوم فلزی متخلخل با عدد دارسی دارای $Da = 10^{-1}$ منجر به افزایش عدد ناسلت $Nu/Nu_b = 23.55$ ، افزایش افت فشار $\Delta p/\Delta p_b = 1.18$ و دارای بیشترین معیار ارزیابی عملکرد $PEC=31.75$ می باشد. فوم فلزی متخلخل با عدد دارسی $Da = 10^{-4}$ دارای بیشترین افت فشار $\Delta p/\Delta p_b = 25.82$ و بیشترین افزایش انتقال حرارت $Nu/Nu_b = 25.04$ می باشد. با توجه به نتایج به دست آمده عدد دارسی $Da = 10^{-1}$ بهینه ترین حالت از منظر برآوردگر معیار ارزیابی عملکرد است.

واژه های کلیدی: فوم فلزی متخلخل، دینامیک سیالات محاسباتی، پرنده بونانزا، ارتفاع پرواز، خنک کننده روغن

Numerical investigation of thermal and fluid analysis of the effect of flight altitude and porous metal foam on the oil cooler of training airplane

Abstract

using porous metal foams is one of the conventional methods to increase heat transfer in industrial systems, including heat exchangers. Porous media increase heat transfer and lead to an increase in pressure drop. In this paper, the three-dimensional effects of flight altitude ($1000m < H < 5000m$) and porous metal foam with Darcy number ($0.1 < Da < 0.0001$) in a training airplane oil cooler were investigated. The porosity coefficient was assumed to be 0.9 for all cases with porous foam. The Darcy-Brinkman-Forchheimer equation was used to simulate a 20 W50 oil flow in a porous medium. The thermophysical properties of the oil including density, viscosity and thermal conductivity were extracted using laboratory data in terms of operating temperature. Hot oil with boundary condition $T_{in} = 390K$ enters the oil cooler. The boundary condition of the output oil is $T_{out} = 300K$. The cooling wall is the boundary condition of non-slip and the heat transfer coefficient of air movement is proportional to the height. The governing equations are discrete based on the finite volume method using commercial computational fluid dynamics FLUENT. With increasing flight altitude, in pure oil mode, heat transfer, pressure drop and performance evaluation criteria increase by 0.65%, 0.45% and 0.49%, respectively. Porous metal foam with Darcy number having $Da = 10^{-1}$ leads to increase of Nusselt number $Nu/Nu_b = 23.55$, increase of pressure drop $\Delta p/\Delta p_b = 1.18$ and has the highest performance evaluation criterion $PEC=31.75$. Porous metal foam with Darcy number $Da = 10^{-4}$ has the highest pressure drop $\Delta p/\Delta p_b = 25.82$ and the highest heat transfer increase $Nu/Nu_b = 25.04$. According to the obtained results, Darcy's number $Da = 10^{-1}$ is the most optimal performance evaluation parameter.

^۱ Darcy-Brinkman-Forchheimer

Key words: Porous metal foam, Computational fluid dynamics, Bonanza plane, Flight altitude, Oil cooling

۱- مقدمه

امروزه به دلیل رشد تقاضای انرژی، محدودیت منابع توان و اتلاف حرارتی بالا در سیستم های انتقال حرارت محققین مجبور شده اند راهی موثر برای کاهش این اتلافات پیدا کنند. همه روش های افزایش انتقال حرارت به دو دسته فعال^۲ و غیر فعال^۳ تقسیم می شوند. روش های غیرفعال شامل روکش کردن سطوح، ایجاد زبری در سطوح، افزایش مساحت سطح با استفاده از صفحات مشبک یا پره، اضافه کردن افزودنی به سیال مانند ذرات نانو، جایگذاری فوم فلزی متخلخل و... می باشد. روش های فعال نیز شامل ارتعاش سیال، ارتعاش سطح، استفاده از میدان مغناطیسی و... می باشد. در روش های فعال با استفاده از نیروی خارجی انتقال حرارت را بهبود می دهند. در روش های غیر فعال هیچ نیروی خارجی اعمال می شود و صرف افزودن مواد یا سطح می باشد.

در اقدامات اولیه برای مطالعه محیط متخلخل تلاش اصلی محققین مربوطه برای یافتن الگویی برای پروفیل جریان سیال متمرکز بوده است. برای دست یافتن به این مهم، آن ها سعی در ارائه یک مدل ساده و کلاسیک خطی بین افت فشار و سرعت فیلتراسیون داشتند، برای نمونه می توان از معادله دارسی نام برد. در ادامه تحقیقات، محققین برای کامل کردن و بهبود بخشیدن به معادلات حرکت قبلی، ترم فرچهپایمر، که برآوردگری غیر خطی است را پیشنهاد کردند. به علاوه آن ها برآوردگر برینکمن را نیز برای جلوگیری از خطاهای مربوط به شرط عدم لغزش در دیواره به معادلات مذکور اضافه نمودند. تاثیر مدل دارسی-برینکمن-فرچهپایمر در داخل محیط متخلخل موضوعی است که توسط بسیاری از محققین مورد مطالعه قرار گرفته است.

وفایی و کیم [1] جابجایی اجباری توسعه یافته را در داخل یک کانال بررسی کردند، آن ها توانستند راه حل دقیقی را با استفاده از فرض لایه مرزی برای انتقال حرارت ارائه دهند و عدد ناسلت را بر حسب دارسی بیان کنند. سیستمی که آن ها

مورد بررسی قرار داده بودند از یک کانال که تحت شرایط مرزی شار ثابت قرار داشت، تشکیل شده بود.

هومن و رنجبر [2] جابجایی اجباری توسعه یافته در داخل یک لوله که با محیط متخلخل اشباع شده بود و تحت شرط مرزی شار ثابت قرار داشت، را بررسی کردند. آن ها از مدل دارسی-برینکمن-فرچهپایمر استفاده کرده بودند. در معادله انرژی از اثرات اتلاف حرارتی صرف نظر کرده بودند و عدد ناسلت را برای دو حد دارسی های بسیار بزرگ و دارسی های بسیار کوچک محاسبه نمودند.

هومن و رنجبر [3] در تحقیقی دیگر، مطالعه عددی بر روی لوله ای که با محیط متخلخل کاملاً پوشیده شده بود و تحت شرط مرزی دما ثابت قرار داشت، را انجام دادند. آن ها عدد ناسلت را با روش تقریبی دو حالت حدی دارسی های خیلی بزرگ و دارسی های خیلی کوچک به دست آوردند و همچنین نشان دادند که عدد ناسلت بین ۵,۷۸ و ۳,۶۶ تغییر می کند.

لو و جیانگ [4] جریان سیال و انتقال حرارت در یک کانال با صفحه برنزی متخلخل به صورت عددی بررسی کردند. آن ها نشان دادند ضریب انتقال حرارت محلی روی سطح با دبی جرمی افزایش می یابد.

پولیکاکوس [5] جابجایی اجباری توسعه یافته را در کانالی که با محیط متخلخل پوشیده شده بود، تحت دو شرط مرزی شار ثابت و دما ثابت بررسی کردند. آن ها نشان دادند که وابستگی عدد ناسلت روی ضخامت لایه متخلخل یکنواخت نیست و در یک ضخامت بحرانی عدد ناسلت کمترین است.

پاول و محمد [6] به صورت عددی و تجربی اثرات استفاده از محیط متخلخل درون لوله با شرایط مرزی شار ثابت را بررسی کردند. آن ها نشان دادند شعاع محیط متخلخل، ضریب تخلخل، عدد دارسی، عدد رینولدز و نسبت ضریب هدایت موثر به ضریب هدایت سیال در افت فشار و انتقال حرارت تاثیر می گذارد. مهدوی و همکاران [7] با بررسی دو آرایش متفاوت از جایگذاری محیط متخلخل در درون لوله ۱- محیط متخلخل در نزدیک دیواره ۲- محیط متخلخل در مرکز لوله اثرات عدد دارسی، ضخامت محیط متخلخل و ضریب هدایت حرارتی بر عدد ناسلت و آنتروپی تولیدی بررسی کردند. با کاهش عدد

^۲Active

^۳Passive

داری در حالت اول و دوم درصد افزایش عدد ناسلت در حالت اول بیشتر از حالت دوم است.

وانگ و همکارانش [8] [9] با تغییرات خطی قطر دانه بندی و ضریب تخلخل در راستای Y و Z در دو هندسه کانال و لوله به صورت مجزا به این نتیجه رسیدند که تغییرات در راستای Y شعاع لوله منجر به ضریب عملکرد بالاتری می شود.

دهقان و همکارانش [10] اثر متغیر ضریب هدایت حرارتی در ناحیه توسعه یافته به وسیله صفحات موازی با دمای ثابت پوشیده از محیط متخلخل با روش آشفتگی^۴ تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها از معادلات داری- برینکمن-فرچهایمر استفاده کردند. ضریب هدایت حرارتی را تابعی خطی با دما در نظر گرفتند. نشان دادند توزیع پروفیل دما و عدد ناسلت تابعی از ضریب هدایت حرارتی و برآوردگر هندسی محیط متخلخل است.

بررسی انتقال حرارت در حالت عدم تعادل حرارتی و با استفاده از مدل غیر داری توسط امیری و وفایی [11] انجام گرفته است و با حل عددی به مطالعه جریان سیال غیر قابل تراکم در بستر محیط متخلخل پرداخته شده است. در این تحلیل عددی اثرات تغییر نسبت تخلخل و اثرات اینرسی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

جیانگ و رن [12] تاثیرات فرضیات مختلف برای شرایط مرزی در معادله انرژی در مدل عدم تعادل حرارتی را با آزمایشات تجربی مقایسه کرد. ضریب انتقال حرارت به دست آمده از مدل عدم تعادل حرارتی با فرض شرط مرزی امیری و همکارانش [13] با نتایج تجربی در ضریب هدایتی بالا و پایین محیط متخلخل متناظر است. همچنین اثرات اتلافات لزجت روی ضریب انتقال حرارت بررسی کرد. اتلافات لزجت ضریب انتقال حرارت را کاهش می دهد.

طالبش بهرامی و همکاران [14] اثر ارتفاع بلوک های دارای داری های گرادیانی در داخل لوله را بررسی کردند. بهترین حالت از منظر عدد عملکرد $PN=2$ مربوط به ارتفاع بی بعد ۰,۲۵ و دارای نفوذپذیری خطی کاهشی در شعاع لوله گزارش کردند.

در این مقاله در ابتدا مدل سازی سه بعدی هندسه خنک کننده روغن هواپیما آموزشی (بونانزا)، انجام شد. هدف این مقاله، بررسی تاثیر استفاده از فوم فلزی متخلخل در خنک

کننده روغن هواپیما آموزشی، به دلیل عدم خنک کاری مناسب روغن در شرایط آب و هوایی گرم و تابستانی می باشد. سپس خواص ترموفیزیکی روغن مورد استفاده در پرنده (20w50) در برابر دمای کاری توسط آزمایشگاه به صورت تجربی اندازه گیری می شود. با استفاده از جایگذاری فوم فلزی متخلخل با اعداد داری مختلف $10^{-4} < Da < 10^{-1}$ درون خنک کننده در ارتفاع پرواز $5000m < H < 10000m$ از سطح دریا شبیه سازی انجام می شود. در این شبیه سازی از نرم افزار انسیس فلونت استفاده شد.

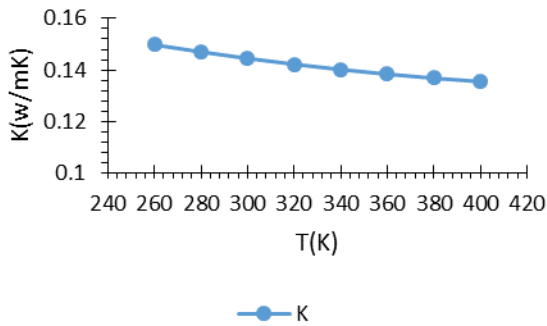
تاثیر اعداد داری و ارتفاع پرواز از سطح دریا بر روی عدد ناسلت، افت فشار و برآوردگر معیار ارزیابی عملکرد بررسی شده است.

۱-۲- مدل فیزیکی

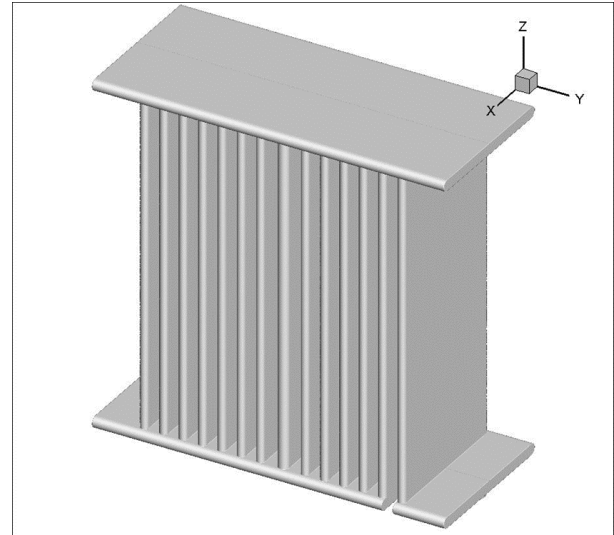
در این مقاله انتقال حرارت روغن 20w50 درون یک مبادله گر خنک کننده پرنده بونانزا- که توسط فوم فلزی متخلخل AISI304 در اعداد داری مختلف $10^{-4} < Da < 10^{-1}$ پوشیده شده است، بررسی می شود [15]. ارتفاع پرواز از سطح دریا نیز در بازه $5000m < H < 10000m$ در نظر گرفته شد. در این مقاله قطر ورودی $14,7mm$ و قطر خروجی $14,7mm$ در نظر گرفته شد. دمای ورودی $T_{in} = 390K$ و سرعت ورودی $u_{in} = 1m/s$ می باشد. شرایط دمای خروجی $T_{out} = 300K$ نیز می باشد. شرایط مرزی بر روی دیواره به صورت جریان همرفتی محاسبه می شود. جریان درون سیال، پایا، آرام، تراکم ناپذیری فرض شد.

^۴ Perturbation

شکل ۳ چگالی روغن موتور 20w50 بر حسب دما

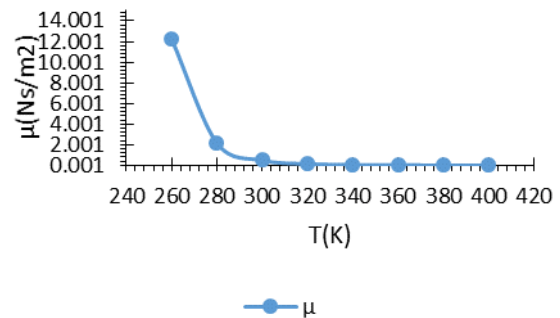


شکل ۴ ضریب هدایت حرارتی روغن موتور 20w50 بر حسب دما

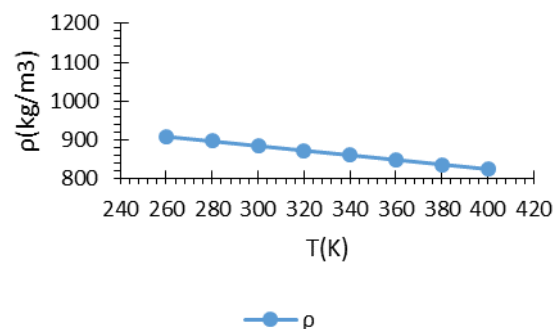


شکل ۱ شکل سه بعدی خنک کننده روغن پرنده بونانزا

در شکل ۲، ۳ و ۴ خواص ترموفیزیکی روغن موتور 20w50، لزجت، چگالی و ضریب هدایت حرارتی در شرایط دمایی کاری پرنده به صورت آزمایشگاهی رسم شده است. برای خواص لزجت روغن، از روش اندازه گیری براساس ASTM D2270 که در آزمایشگاه مرکزی علم و صنعت ایران انجام شده است، استفاده شد. اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی و چگالی نیز توسط دستگاه شرکت رادمان صنعت اندازه گیری شد. با استفاده از خواص به دست آمده از نتایج آزمایشات خواص ترموفیزیکی روغن، در نرم افزار شبیه سازی انجام می شود.



شکل ۲ لزجت روغن موتور 20w50 بر حسب دما



۲-۲- معادلات حاکم

در مدل سازی انتقال حرارت فرض تعادل حرارتی موضعی بین فازهای جامد و سیال برقرار است. مدل دارسی-برینکمن-فرچهایمر با فرض عدم اتلاف حرارتی محلی^۵ برقرار است. ناسلت متوسط بر روی سطح دیواره توسط معادلات ۱ و ۲ محاسبه می شود معادلات بقاء جرم، تکانه و انرژی نیز به صورت زیر است [۱۸-۲۰].

$$\overline{Nu} = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (1)$$

$$\overline{Nu} = \frac{hL}{k} \quad (2)$$

بقاء جرم:

$$\nabla \cdot (\epsilon_f \mathbf{V}) = 0 \quad (3)$$

بقاء تکانه:

$$\frac{\rho_f}{\epsilon} (\mathbf{V} \cdot \nabla) = -\nabla p - \left(\frac{\mu_f}{K} + \frac{\rho_f C}{\sqrt{K}} |\mathbf{V}| \right) \mathbf{V} + \frac{\mu_f}{\epsilon} \nabla^2 \mathbf{V} \quad (4)$$

ضریب محیط متخلخل توسط کوزنی و کارمن^۶ به صورت زیر است:

$$C = \frac{1.75}{\sqrt{150} \epsilon^3} \quad (5)$$

بقاء انرژی:

$$(\rho c) (\mathbf{V} \cdot \nabla T) = k_e \nabla^2 T \quad (6)$$

k_e ضریب هدایت حرارتی موثر به صورت زیر تعریف می شود:

$$k_e = \epsilon k_f + (1 - \epsilon) k_s \quad (7)$$

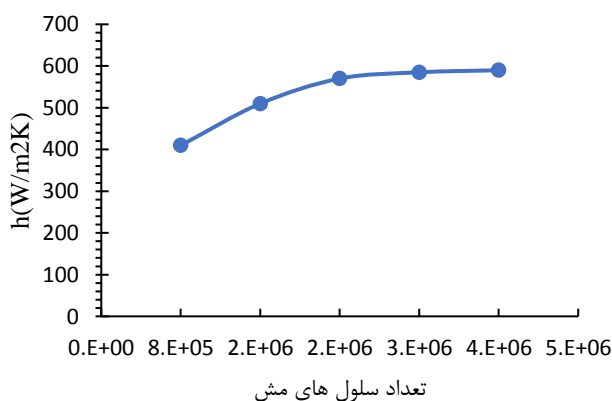
^۵ Local Thermal Non-Equilibrium

^۶ Kozeny-Carman

در این مقاله، تحلیل عددی به وسیله نرم افزار تجاری دینامیک سیالات محاسباتی انسیس-فلوئنت انجام شده است. معادلات حاکم توسط روش حجم کنترل حل می شوند. الگوریتم سیمپل برای حل میدان جریان استفاده شده است. گسسته سازی معادله انرژی و تکانه توسط روش بالادست مرتبه دوم انجام شده است. شرط همگرایی برای همه معادلات (جرم، تکانه و انرژی) به صورت باقیمانده کمتر از 1×10^{-6} تعریف شده است.

به منظور بررسی استقلال از شبکه نتایج، نتایج بر روی شبکه‌هایی در تعداد سلول‌های مختلف $8,000,000$ ، $16,000,000$ ، $24,000,000$ ، $32,000,000$ و $40,000,000$ ارزیابی شد. بعد از چک کردن، شبکه با سایز $32,000,000$ انتخاب شد. شبکه مش زنی از نوع ساختار بی سازمان می باشد. در همه محاسبات به بیش از 4000 تکرار برای همگرایی نیاز نیست. در این مقاله ضریب تخلخل 0.9 ثابت می باشد. در شکل ۵ ضریب انتقال حرارت برای شبکه‌های مختلف رسم می شود.

استقلال از شبکه



شکل ۵ استقلال از شبکه برای ضریب انتقال حرارت

۳-۳-۳- اعتبار سنجی نتایج حل عددی

به منظور اعتبار سنجی برای جریان سیال در محیط متخلخل، یک مقایسه بین نتایج عددی فعلی آن و نتایج آزمایشگاهی پاول و محمد [۶] و نتایج عددی مهدوی و همکاران [۷] برای جریان آرام در داخل لوله که با محیط متخلخل وبا شار ثابت در مرز خارجی پوشیده شده، مورد

k_s و k_f به ترتیب ضریب هدایت حرارتی سیال و فوم فلزی متخلخل است.

۳- شبیه سازی عددی

۳-۱- برآوردگرهای تعریفی

محیط متخلخل با سه برآوردگر ϵ ضریب تخلخل، C_1 ضریب مقاومت لزجت و C_2 ضریب مقاومت اینرسی تعریف می شود [16]:

$$C_1 = \frac{1}{K} = \frac{150(1-\epsilon)^2}{d_p^2 \epsilon^3} \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\epsilon)}{d_p \epsilon^2} \quad (9)$$

عملکرد جریان سیال توسط ضریب اصطکاک و عدد رینولدز ارزیابی می شود [۱۶، ۱۷].

ضریب اصطکاک:

$$f = \frac{1}{2} \frac{D_h \Delta p}{L \rho u_{in}^2} \quad (10)$$

عدد رینولدز:

$$Re = \frac{\rho_f u_{in} D_h}{\mu_f} \quad (11)$$

عملکرد انتقال حرارت سیال توسط عدد ناسلت متوسط و ضریب انتقال حرارت مشخص می شود.

عدد ناسلت متوسط:

$$Nu_m = \frac{h_m D_h}{k_f} \quad (12)$$

ضریب انتقال حرارت متوسط:

$$h_m = \frac{q''}{(T_w - T_m)} \quad (13)$$

T_m دمای میانگین سیال است.

$$T_m = \frac{\int_0^R u T r dr}{\int_0^R u r dr} \quad (14)$$

برآوردگر معیار ارزیابی عملکرد:

$$PEC = \frac{\left(\frac{Nu}{Nu_b}\right)}{\left(\frac{f}{f_b}\right)^{1/3}} \quad (15)$$

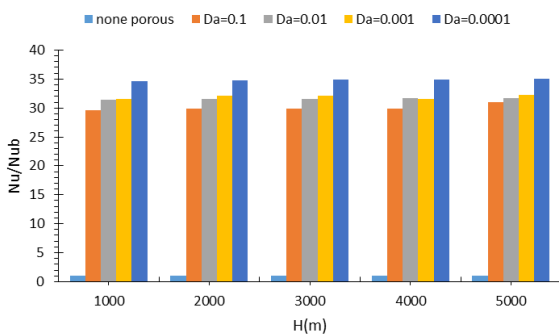
عدد بی بعد داری:

$$Da = \frac{K}{D_h} \quad (16)$$

۳-۲- روش عددی

۴-۱- بررسی عدد ناسلت

در شکل ۸ نسبت عدد ناسلت به عدد ناسلت پایه (حالت پایه) که روغن موتور 20w50 برحسب ارتفاع پرواز از سطح دریا نمایش می دهد. با افزایش ارتفاع این نسبت افزایش می یابد. دلیل این امر کاهش دما در ارتفاعات بالاتر می باشد. بیشترین افزایش نسبت در ارتفاع ۵۰۰۰ متر و برای عدد دارسی ۰,۰۰۰۱ گزارش شد. این نسبت ۳۵,۰۴ می باشد. با کاهش عدد دارسی انتقال حرارت به دلیل تجمع سیال در کنار دیواره ها افزایش می یابد.

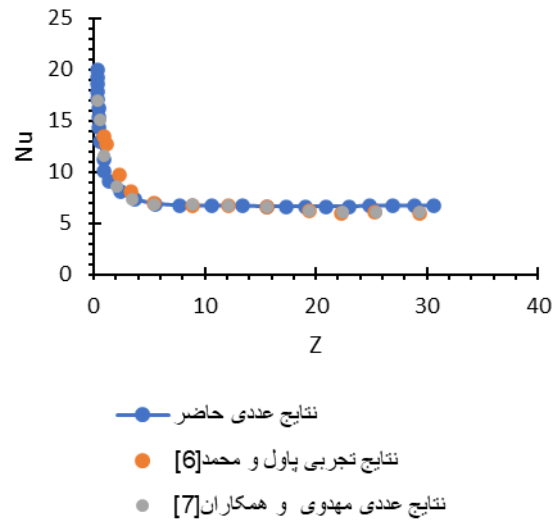


شکل ۸ نسبت عدد ناسلت به حالت پایه برحسب ارتفاع پرواز از سطح دریا در اعداد دارسی مختلف

۴-۲- بررسی افت فشار

در شکل ۹ نسبت افت فشار به افت فشار پایه (حالت پایه) که روغن موتور 20w50 برحسب ارتفاع پرواز از سطح دریا نمایش می دهد. با افزایش ارتفاع این نسبت افزایش می یابد. بیشترین نسبت افت فشار به افت فشار پایه در ارتفاع ۵۰۰۰ متر و برای عدد دارسی ۰,۰۰۰۱ گزارش شد. این نسبت ۲۵,۸۳ می باشد. جایگذاری فوم فلزی متخلخل در خنک کننده روغن منجر به افزایش افت فشار و کاهش سرعت سیال می شود. با کاهش عدد دارسی نفوذپذیری سیال نیز کاهش می یابد.

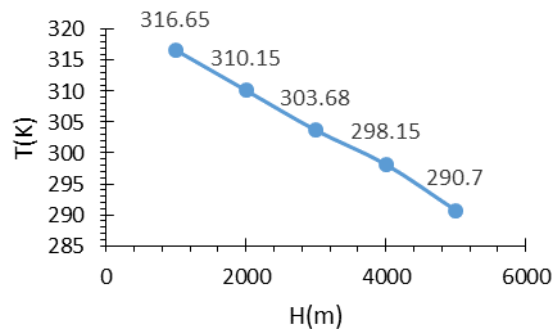
استفاده قرارگرفت که نتایج در شکل ۶ نشان داده شد. تغییرات عدد ناسلت بر حسب طول بی بعد شده لوله $Z = \frac{z}{r}$ رسم شد. مقایسه نتایج نشان می دهد نتایج عددی حاضر با نتایج تجربی و عددی اختلاف قابل توجهی ندارد.



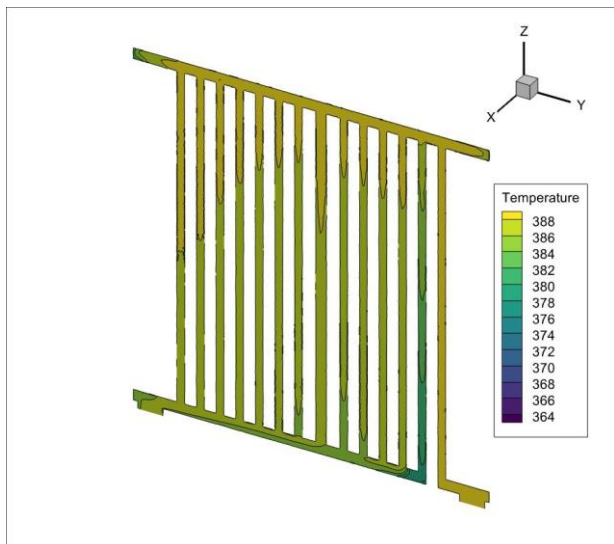
شکل ۶ مقایسه نتایج حاضر با نتایج آزمایشگاهی پاول و محمد [6] و نتایج عددی مهدوی و همکاران [7]

۴-۳- تحلیل و بررسی نتایج

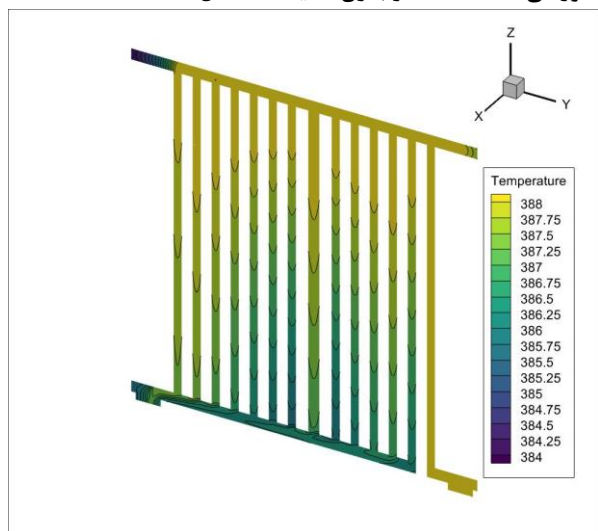
در این بخش از مقاله اثرات ارتفاع پرواز از سطح دریا و بر روی عدد ناسلت، افت فشار و برآوردگر معیار ارزیابی عملکرد به منظور بهبود انتقال حرارت و شرایط بهینه جریان سیال در داخل خنک کننده روغن بونانزا بررسی شد. تغییرات دمایی آب و هوا براساس منطقه پرواز و ارتفاع از سطح دریا نیز در شکل ۷ آورده شد.



شکل ۷ تغییرات دمایی هوا در منطقه پرواز بر حسب ارتفاع از سطح دریا



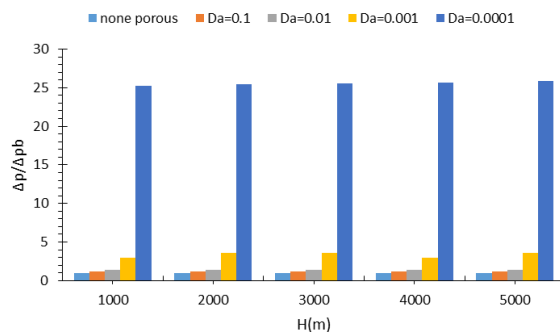
شکل 11 کانتور دما در وسط خنک کننده روغن پرنده آموزشی، $H=5000m$ و بدون محیط متخلخل



شکل 12 کانتور دما در وسط خنک کننده روغن پرنده آموزشی، $H=5000m$ و عدد دارسی 0.1

۵- نتیجه گیری

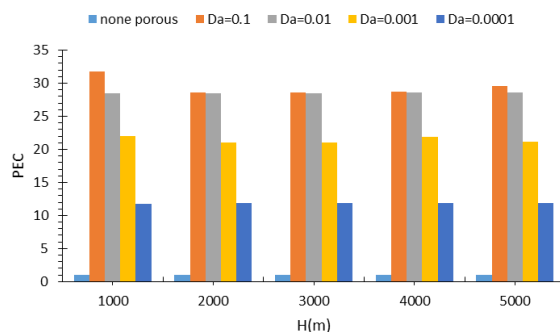
در این مقاله جریان جابجایی اجباری روغن 20W50 با استفاده از خواص ترموفیزیکی سیال برحسب دما که از آزمایشگاه به دست آمد در داخل یک خنک کننده روغن پرنده بونانزا شبیه سازی شد. این شبیه سازی برای ارتفاع پرواز های مختلف و با جایگذاری فوم فلزی متخلخل با ضریب تخلخل 0.9 و اعداد دارسی مختلف انجام شد. پس از شبیه سازی نتایج زیر به دست آمد:



شکل ۹ نسبت افت فشار به حالت پایه برحسب ارتفاع پرواز از سطح دریا در اعداد دارسی مختلف

۳-۴- بررسی معیار ارزیابی عملکرد

در شکل 10 برآوردگر PEC بر حسب ارتفاع پرواز از سطح دریا برای اعداد دارسی مختلف رسم شد. بیشترین $PEC=31.75$ مربوط به عدد دارسی 0.1 و ارتفاع پرواز 1000 متر می باشد.



شکل 10 برآوردگر معیار ارزیابی عملکرد برحسب ارتفاع پرواز از سطح دریا در اعداد دارسی مختلف

۳-۴- بررسی کانتورهای دما

در شکل 11 کانتور دما در وسط خنک کننده حرارتی برای ارتفاع پرواز 5000m درحالتی که محیط متخلخل وجود ندارد رسم شد. سپس در شکل 12 کانتور دما برای همان ارتفاع پرواز در حالتی که محیط متخلخل وجود دارد نیز رسم گردید. پس از مقایسه کانتورهای دما برای این دو حالت ، دمای خروجی در شکل 12 نسبت به شکل 11 کمتر می باشد. این امر نشان دهنده تاثیر فوم فلزی متخلخل در بهبود خنک کاری روغن می باشد.

| | |
|---------------|--|
| H | ارتفاع پرواز از سطح دریا (m) |
| علائم یونانی | |
| μ | لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$) |
| ρ | چگالی (kgm^{-3}) |
| ε | ضریب تخلخل |
| زیرنویس‌ها | |
| f | سیال |
| s | جامد |
| e | موثر |
| b | پایه |
| in | ورودی |
| m | متوسط |
| o | خروجی |

- ۱- با افزایش ارتفاع پرواز، در حالت روغن پایه، انتقال حرارت، افت فشار و معیار ارزیابی عملکرد به ترتیب، ۰٫۶۵٪، ۰٫۴۵٪ و ۰٫۴۹٪ افزایش می‌یابد.
- ۲- افزودن فوم فلزی متخلخل با عدد دارسی ۰٫۱ منجر به بهبود انتقال حرارت تا $Nu/Nu_b = ۳۳.۵۵$ ، افزایش افت فشار تا $\Delta p/\Delta p_b = ۱.۱۸$ و افزایش بیشترین $PEC=۳۱,۷۵$ می‌شود.
- ۳- بیشترین افزایش انتقال حرارت $Nu/Nu_b = ۳۵.۰۴$ ، افزایش افت فشار $\Delta p/\Delta p_b = ۲۵.۸۳$ برای محیط متخلخل با عدد دارسی $Da = ۱۰^{-۴}$ می‌باشد.
- ۴- کاهش عدد دارسی از ۰٫۱ به ۰٫۰۰۰۱ منجر به افزایش عدد ناسلت و افزایش افت فشار می‌شود. با کاهش عدد دارسی نفوذ جریان سیال به خنک‌کننده روغن سخت و زمان تبادل انتقال حرارت افزایش می‌یابد. این امر منجر به افزایش افت فشار و انتقال حرارت می‌شود.

منابع و مراجع

- [1] K. Vafai, S. J. Kim, "Forced Convection in a Channel Filled With a Porous Medium: An Exact Solution", *ASME*, vol. 111, no. 4, pp. 1103–1106, Nov. 1989.
- [2] K. Hooman, A. A. Ranjbar-Kani, "Forced convection in a fluid-saturated porous-medium tube with isoflux wall, Int. Commun." *Heat Mass Transf.*, vol. 30, no. 7, pp. 1015–1026, Oct. 2003.
- [3] A. A. Ranjbar-Kani, K. Hooman, "Viscous Dissipation Effects on Thermally Developing Forced Convection in A Porous Medium Circular Duct with Isothermal Wall, Int. Commun." *Heat Mass Transf.*, vol. 31, no. 6, pp. 897–907, Aug. 2004.
- [4] P.-X. Jiang, X.-C. Lu, "Numerical simulation [4] of fluid flow and convection heat transfer in sintered porous plate channels", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 9, pp. 1685–1695, May 2006.
- [5] D. Poulikakos, M. Kazmierczak, "Forced Convection in a Duct Partially Filled With a Porous Material", *ASME*, vol. 109, no. 3, pp. 653–662, Aug. 1987.
- [6] B. I. Pavel, A. A. Mohamad, "An experimental and numerical study on heat transfer enhancement for gas heat exchangers fitted with porous media", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, no. 23, pp. 4939–4952, Nov. 2004.
- [7] M. Mahdavi, M. Saffar-Avval, S. Tiari, Z. Mansoori, "Entropy generation and heat transfer numerical analysis in pipes partially filled with

فهرست علائم

| | |
|-----------|--|
| c_p | گرمای ویژه، ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) |
| d_p | قطر دانه بندی متخلخل، (m) |
| D | قطر، (m) |
| Da | عدد دارسی |
| C | ضریب محیط متخلخل |
| h | ضریب انتقال حرارت، ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) |
| k | ضریب هدایت حرارتی، ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) |
| K | نفوذ پذیری محیط متخلخل، (m^2) |
| L | طول خنک‌کننده روغن، (m) |
| Nu | عدد ناسلت |
| p | فشار، (psi) |
| r_o | شعاع خروجی، (m) |
| r_i | شعاع ورودی، (m) |
| Re | عدد رینولدز |
| PEC | برآوردگر معیار ارزیابی عملکرد |
| T | دما، (K) |
| u | سرعت محوری، (ms^{-1}) |
| \vec{v} | برداری سرعت، (ms^{-1}) |
| f | ضریب اصطکاک |

- vol. 22, no. 9, Art. no. 9, Sep. 2020, doi: 10.3390/e22091008.
- [18] E. Aminian, H. Moghadasi, and H. Saffari, "Magnetic field effects on forced convection flow of a hybrid nanofluid in a cylinder filled with porous media: a numerical study," *J Therm Anal Calorim*, vol. 141, no. 5, pp. 2019–2031, Sep. 2020, doi: 10.1007/s10973-020-09257-y.
- [19] M. Siavashi, H. R. Talesh Bahrami, E. Aminian, and H. Saffari, "Numerical analysis on forced convection enhancement in an annulus using porous ribs and nanoparticle addition to base fluid," *J. Cent. South Univ.*, vol. 26, no. 5, pp. 1089–1098, 2019.
- [20] M. Siavashi, H. R. Talesh Bahrami, and E. Aminian, "Optimization of heat transfer enhancement and pumping power of a heat exchanger tube using nanofluid with gradient and multi-layered porous foams," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 138, pp. 465–474, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.066.
- porous medium", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 79, pp. 496–506, Dec. 2014.
- [8] B. Wang *et al.*, "Numerical configuration design and investigation of heat transfer enhancement in pipes filled with gradient porous materials," *Energy Convers. Manag.*, vol. 105, pp. 206–215, Nov. 2015.
- [9] B. Wang, Y. Hong, L. Wang, X. Fang, P. Wang, and Z. Xu, "Development and numerical investigation of novel gradient-porous heat sinks," *Energy Convers. Manag.*, vol. 106, pp. 1370–1378, Dec. 2015.
- [10] M. Dehghan, M. S. Valipour, and S. Saedodin, "Temperature-dependent conductivity in forced convection of heat exchangers filled with porous media: A perturbation solution," *Energy Convers. Manag.*, vol. 91, pp. 259–266, Feb. 2015.
- [11] A. Amiri and K. Vafai, "Analysis of dispersion effects and non-thermal equilibrium, non-Darcian, variable porosity incompressible flow through porous media," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 6, pp. 939–954, Apr. 1994.
- [12] P.-X. Jiang and Z.-P. Ren, "Numerical investigation of forced convection heat transfer in porous media using a thermal non-equilibrium model," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 22, no. 1, pp. 102–110, Feb. 2001.
- [13] A. Amiri, K. Vafai, and T. M. Kuzay, "EFFECTS OF BOUNDARY CONDITIONS ON NON-DARCIAN HEAT TRANSFER THROUGH POROUS MEDIA AND EXPERIMENTAL COMPARISONS," *Numer. Heat Transf. Part Appl.*, vol. 27, no. 6, pp. 651–664, Jun. 1995.
- [14] H. R. Talesh Bahrami, E. Aminian, and H. Saffari, "Energy Transfer Enhancement Inside an Annulus Using Gradient Porous Ribs and Nanofluids," *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 142, no. 12, Dec. 2020, doi: 10.1115/1.4047312.
- [15] Y. Mahmoudi, N. Karimi, "Numerical investigation of heat transfer enhancement in a pipe partially filled with a porous material under local thermal non-equilibrium condition", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 68, pp. 161–173, Jan. 2014.
- [16] Z. F. Huang, A. Nakayama, K. Yang, C. Yang, W. Liu, "Enhancing heat transfer in the core flow by using porous medium insert in a tube", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, no. 5, pp. 1164–1174, Feb. 2010.
- [17] E. Aminian, H. Moghadasi, H. Saffari, and A. M. Gheitaghy, "Investigation of Forced Convection Enhancement and Entropy Generation of Nanofluid Flow through a Corrugated Minichannel Filled with a Porous Media," *Entropy*,