نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

J. Energy Conversion

Volume: 13, Issue:1, 2026: 1-16

دوره ۱۳، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص: ۱-۱۶

بررسی عددی مبدل حرارتی یک هواپیمای تجاری و بهینه‌سازی آن با استفاده از مولد گرداب

محمدحسن نوبختی*[۱]، کیوان اکبری راد[۲]، علی علی‌نیا[۳]

*۱- استادیار، گروه مکانیک، دانشکده مکانیک،برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران،ایران، m.nobakhti@srbiau.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مکانیک،برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران،ایران، kayvan628@gmail.com

۳- استادیار، گروه مکانیک، دانشکده مکانیک،برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران،ایران، alialinia@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۴، بازنگری: ۱۴۰۵/۱/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۲۰

چکیده

مبدل‌های حرارتی خنک شونده با هوا بخش مهمی از فناوری صنعتی در حوزه انتقال حرارت را شامل می‌شوند.در میان انواع مختلف مبدل‌های حرارتی که در صنایع مختلف برای سرمایش یا گرمایش سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرند مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند. مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به‌خاطر مزیت‌های خاص خود مانند بازده و انعطاف‌پذیری بالا، تلفات حرارتی و هزینه‌ی تعمیر و نگهداری کم، تمیزکاری راحت و جمع و جور بودن نسبت به سایر مبدل‌ها دامنه‌ی نفوذ گسترده‌تری داشته‌اند که این امر باعث انجام اقدامات زیادی در حوزه‌ی تحقیق و توسعه‌ی مبدل‌های صفحه‌ای شده است. در این مقاله برای افزایش عملکرد انتقال حرارت مبدل حرارتی صحفه‌ای پره‌دار با استفاده از مولد گرداب، تغییر در شکل هندسی پره‌ها و تغییر در مسیر صفحات مبدل حرارتی بررسی شده است. هنگامی‌که جریان سیال از مولد گرداب عبور می‌کند، با توجه به جدایی جریان در لبه مولد گرداب، گرداب‌هایی در جهت جریان در میدان جریان تولید می‌شود که باعث اختلاط در بخش عمده جریان و تغییر در لایه مرزی و بی ثباتی آن می‌شود. در این تحقیق انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای پره‌دار با استفاده از نرم‌افزار کانورج استودیو شبیه‌سازی و محاسبه عددی شده است. از میان مدل‌های توربولانسی مدل k-ε استفاده شده است که نتایج بهتری را ارائه می‌دهد و نتایج آن با یک نمونه از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای که طراحی و ساخته شده، مقایسه شده است. با تغییر در شکل هندسی پره‌ها و با تغییر در مسیر صفحات مبدل حرارتی، تغییر رژیم جریان هوای عبوری از صفحات مبدل حرارتی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد در محدوده رینولدز ۱۹۶۵۳۲۴با دمای هوای گرم ورودی ۶۱۶ درجه کلوین و دمای هوای سرد ورودی ۲۲۲ درجه کلوین در ارتفاع ۱۰۰۰۰ پا از سطح دریا راندمان ۵۲ درصد به‌دست آمده است.

کلمات کلیدی: محاسبه عددی–مبدل حرارتی–گرداب مولد- مبدل حرارتی صفحه‌ای پره‌دار

* **عهده‌دار مکاتبات:** m.nobakhti@srbiau.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله محمدحسن نوبختی، کیوان اکبری راد، علی علی‌نیا. بررسی عددی مبدل حرارتی یک هواپیمای تجاری و بهینه‌سازی آن با استفاده از مولد گرداب. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۵; ۱۳ (۱): ۱۶-۱.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]

۱- مقدمه

مبدل حرارتی وسیله‌ای است که انرژی حرارتی را از سیالی به یک یا چند سیال دیگر که دارای درجه حرارت‌های متفاوتی هستند منتقل می‌کند. این تعریف به‌طور ضمنی بیان می‌کند که در یک مبدل حرارتی حداقل دو سیال وجود دارند که حرارت بین آن دو جابه‌جا می‌شود. هرچند که این تعریف از جامعیت کافی برخوردار است، با این وجود موارد خاصی از مبدل‌های حرارتی وجود دارند که در این تعریف نمی‌گنجند. از جمله این موارد می‌توان گفت مبدل حرارتی دستگاه‌های تبادل حرارتی هستند که در سفینه‌های فضایی و یا هر وسیله‌ای که در خلاء کار می‌کند مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مبدل‌های حرارتی در تمام زمینه های صنعتی ، تجاری و زندگی روزمره که به نحوی با تبادل انرژی سروکاردارند مورد استفاده قرار می گیرند. هر موجود زنده به طریقی به مبدل حرارتی مجهز است[۱] .

مبدل‌های حرارتی در اندازه‌های بسیار کوچک و بسیار بزرگ ساخته شده‌اند.کوچک‌ترین آن‌ها (کم‌تر از ۱ وات) برای مصارف الکترونیکی فوق هادی‌ها، هدایت موشک‌هائی که به‌وسیله منبع حرارتی کنترل می‌شوند و بزرگ‌ترین آن‌ها (ظرفیت حرارتی بزرگ‌تر از ۱۰۰۰ مگاوات) در نیروگاه‌های بزرگ به‌عنوان دیگ بخار، کندانسور یا برج خنک‌کن به‌کار می‌روند.

مبدل‌های حرارتی به‌طور گسترده‌ای در صنعت هوافضا برای سرمایش و گرمایش استفاده می‌شود. آن‌ها در هواپیماهای با اندازه‌های مختلف، بال ثابت و چرخشی و در بسیاری از سیستم‌های مختلف هواپیما استفاده می‌شوند. در هواپیماهای تجاری از مبدل‌های حرارتی برای گرفتن گرما از سیستم روغن موتور برای گرم‌کردن سوخت سرد و هم‌چنین تهویه مطبوع استفاده می‌شود. نحوه‌ی کارکرد مبدل‌های حرارتی در هواپیما به این صورت می‌باشد که هوای پرفشار با دمای بالا از مرحله آخر کمپرسور خارج شده و از طریق سامانه دریافت هوا از موتو وارد مبدل حرارتی می‌شود و سپس وارد توربو فن می‌شود که باز دما و فشار آن کاهش پیدا کرده و به صفر نزدیک می‌شود. سپس هوای خروجی از توربین توسط یک شیر کنترلی با هوای مبدل حرارتی و هوای گرفته شده از موتور مخلوط شده به‌طوری‌که دما و فشار آن مناسب کابین باشد و رطوبت آن به‌وسیله رطوبت گیرگرفته شده و وارد کابین می‌شود. در این مطالعه با تغییر در پارامترهای هندسی مؤثر (محل استقرار، نحوه استقرار، زاویه حمله) در مولد گرداب تغییرات انتقال حرارت مورد بررسی می‌شود.

هادی پاکدامن و همکارانش[۲] بررسی عددی انتقال حرارت و افت فشار در مبدل حرارتی صفحه‌ای با صفحات شورون را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق جریان مغشوش درون کانال‌های یک مبدل حرارتی صفحه‌ای با صفحات موج‌دار، برای بررسی پارامترهای حرارتی- هیدرولیکی، افت فشار و انتقال حرارت به‌کمک دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل‌های سه بعدی صفحات موج‌دار با زوایای شورون (β) 45-45 و ۶۰-۶۰ درجه که در عمل کاربرد وسیع‌تری دارند با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت[1] شبیه‌سازی شد و نهایتاً تأثیر زاویه‌ی شورون و عدد رینولدز (۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰) بر ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و الگوی جریان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی موجود مقایسه و ارائه گردیده است. نتایج به‌دست آمده از حل عددی، حاکی از تطابق خوب نتایج تجربی و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی می‌باشد.

جاشوا ال. آنیبال و همکارانش[۳] بهینه‌سازی شکل مبدل حرارتی با پره صفحه‌ای را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی[2] را مورد مطالعه قرار داده‌اند. مبدل‌های حرارتی پره صفحه‌ای به‌دلیل اندازه فشرده و سبک وزن در کاربردهای هوافضا رایج هستند. این مبدل‌های حرارتی برای کاربردهای هواپیما مانند خنک‌کننده روغن موتور، سیستم‌های کنترل محیطی و مدیریت حرارتی قطعات الکتریکی حیاتی هستند.

هریهاران کلاث و همکارانش[۴] به مطالعه عددی یکنواختی جریان در داخل منیفولدهای جانبی فشار بالا مبدل حرارتی هوای خنک‌کننده پرداخته‌اند که در نتیجه بهبود ۱۸/۸ درصدی در یکنواختی، یک کاهش ۱۰/۶ درصدی در افت فشار، یک افزایش ۰/۴ درصدی در نرخ انتقال حرارت و یک کاهش ۲۲/۵ درصدی در وزن را نشان داداند.

میگول چاوز-مودنا و همکاران[۵] بهینه‌سازی عددی آزمایش های شکل پره یک مبدل حرارتی سطحی هوا/روغن را مورد مطالعه قرار داده‌اند که نتیجه برای هندسه بهینه شده، کاهش قابل توجهی از افت فشار را با تغییرات کمی در انتقال حرارت نشان

[1] Fluent
[2] Computational Fluid Dynamics (CFD)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]

می‌دهد. فرشید مرزبان و همکارانش[۶] تحلیل عددی افزایش انتقال حرارت با تغییر در زاویه حمله مولدهای گرداب در مبدل‌های حرارتی مورد بررسی قرار داده‌اند که در نتیجه در محدوده رینولدز هوای ورودی به کانال از ۴۰۰ تا ۱۶۰۰ انتقال حرارت از ۱۶/۳تا ۲۷ درصد در آرایش خطی ۷/۷۸ تا ۲۳/۱۸ درصد در آرایش متناوب خواهیم داشت. آرون کومار تیواری و همکارانش[۷] به بررسی عددی انتقال حرارت و جریان سیال در مبدل حرارتی صفحه با استفاده از نانوسیال پرداخته‌اند. شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی نشان می‌دهد که الگوی موج‌دار شدن صفحه باعث ایجاد توربولانس و گردابه‌های سیال می‌شود که منجر به نرخ انتقال حرارت بالایی می‌گردد. هاایتائوهو و همکارانش[۸] یک مدل شبیه‌سازی حالت پایدار سیستم خنک‌کننده تکمیلی ادغام شده با سیکل‌های تبرید فشرده‌سازی بخار برای هواپیماهای تجاری را مورد مطالعه قرار داده‌اند و انحرافات مدل ظرفیت خنک‌کننده، دما و فشار به‌ترتیب در ۸٪، ۸± درجه سانتی‌گراد و ۱۰ ±٪ می‌باشد. یو پن و همکارانش[۹] به تأثیر زبری سطح بر توزیع رسوب ذرات در اطراف نازل‌های هوای تأمین کابین چند شیار هواپیماهای تجاری پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که صیقل دادن سطوح نازل‌های هوای تأمین کابین ممکن است به‌طور موثر مشکل رسوبات افزایش یافته در کابین هواپیما را حل نکند. تائو چن و همکارانش[۱۰] بررسی عددی تاثیر ساختارهای مختلف مبدل حرارتی صفحه‌ای پره‌دار مورد استفاده در راکتور خنک‌کننده با گاز دما بالا[1] را انجام داده‌اند. چهار ساختار پره و چهار ساختار کار شرایط برای بررسی دقیق عملکرد مبدل حرارتی صفحه‌ای پره‌دار اتخاذ شده است. تجزیه و تحلیل دقیق توزیع سرعت، توزیع فشار، توزیع دما و انتقال حرارت انجام شد.

نتایج نشان می‌دهد که منحنی‌های سرعت پره‌های موج‌دار دارای ویژگی‌های آشکار دو پیک سیال هستند سرعت بالا رفتار غلظتی در نزدیکی پره‌ها دارد. تحت همان سرعت متوسط ورودی، دمای سیال برای پره‌های موج‌دار یکنواخت‌تر خواهد بود. درحالی‌که برای پره‌های ساده، طبقه‌بندی شده توزیع دمای سیال مشهود است. متفاوت بودن با پره‌های ساده، پره‌های موج‌دار می‌تواند لایه مرزی را به‌صورت دوره‌ای از بین ببرد و بی‌نظمی میدان جریان را تقویت کند و در نتیجه باعث شود لایه مرزی پره‌های موج‌دار نازک‌تر از پره‌های ساده است، بنابراین عملکرد تبادل حرارت آن بهتر است با این‌حال، نسبت به پره‌های ساده، افت فشار ساختار پره‌های موج‌دار به‌ترتیب افزایش می‌یابد.

علی مهاجر، محمدحسن نوبختی و علیرضا نظام‌آبادی[۱۱] بررسی عددی تأثیر آشوب‌گرهای مخروطی شکل ناقص بر بهبود انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی لوله‌ای با نانوسیال آب/اکسید زیرکونیوم را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از آشوب‌گرهای سوراخ‌دار در مسیر جریان منجر به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت می‌شود . آشوب‌گرهای مخروطی سوراخ‌دار با ایجاد جریان‌های گردشی مجدد و جدایشی در حضور نانوسیال باعث بهبود انتقال حرارت در نتیجه برهم‌زدن لایه مرزی حرارتی و ایجاد اختلال بیش‌تر در جریان سیال در طول مبدل حرارتی لوله‌ای می‌شود .آشوب‌گرهای ارائه شده در این تحقیق در صورت تعیین مناسب پارامترها می‌تواند عملکرد حرارتی را تا ۷۶ درصد نسبت به لوله صاف افزایش دهند .حداکثر ضریب عملکرد حرارتی برابر ۱/۷۶در حالت N=1 , M=1, وRe=4000 به‌دست آمده است.

یه وانگ همکارانش[۱۲] به بهینه‌سازی عملکرد مبدل حرارتی پره صفحه‌ای با مولدهای گردابی منحنی براساس روش سطح پاسخ را مورد بررسی قرار داده‌اند. هدف این مطالعه توسعه یک مبدل حرارتی پره صفحه‌ای مجهز به ژنراتورهای گردابی است که دارای ظرفیت انتقال حرارت بالا و افت فشار کم است. ژنراتورهای گردابی منحنی بر روی دیواره‌های بالایی و پایینی مبدل حرارتی به‌صورت حالت پلکانی نصب می‌شوند. شبیه‌سازی‌های عددی برای مقایسه اثرات شکل مولد گرداب و پارامترهای ساختاری مختلف، از جمله ابعاد یک مولد گرداب مثلثی راست‌زاویه مسطح، فاصله طولی بین یک جفت بال ژنراتور گردابی نوک بالادست، فاصله عرضی بین ژنراتور گردابی زاویه‌دار جریان نوک منحنی گرما و ویژگی‌های مولد جریان گردابی در نوک منحنی انتقال دهنده گرما و ویژگی‌های مولد جریان گردابی در نوک منحنی جریان بالادست و ویژگی‌های مولد جریان گردابی و حمله‌کننده‌ها انجام شد. در این تحقیق از یک مبدل حرارتی پره صفحه‌ای با مقطع مستطیلی استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که مبدل حرارتی صفحه پره مولد گرداب خمیده طراحی شده در این مطالعه به‌طور قابل توجهی ظرفیت انتقال حرارت را افزایش می‌دهد در حالی‌که مقاومت جریان زیاد نیست. در مقایسه با نتایج منتشر شده، مقدار متوسط ضریب JF به‌دست آمده توسط

[1] High-temperature gas-cooled reactor(HTGR)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]

ساختار بهینه شده در این مطالعه ۲۵/۳ درصد افزایش یافته است. در نتیجه، ساختار مبدل حرارتی پیشنهاد شده در این مطالعه به‌طور موثر چالش افزایش افت فشار را برطرف می‌کند و در عین‌حال کارایی تبادل حرارت را افزایش می‌دهد.
روی لی و همکارانش[۱۳] روش‌های محاسباتی با کارایی بالا برای طراحی یک پیش خنک‌کننده موثر با پره صفحه را مورد مطالعه قرار داده‌اند. پیش خنک‌کننده به‌عنوان یک جزء حیاتی در موتورهای هوایی، برای خنک کردن سریع گازهای با دمای بالا طراحی شده است. جریان سیال داخلی آن ناهمگن است، تحت تأثیر لایه‌های مرزی حرارتی، که منجر به اختلاف قابل توجهی بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده می‌شود. برای پر کردن شکاف بین پیش‌بینی‌های نظری و اندازه‌گیری‌های واقعی، یک روش محاسباتی جدید برای ارزیابی جریان و اثر خنک‌کننده پیش‌کولرهای پره صفحه‌ای توسعه داده شده است که رویکرد مورد استفاده برای مبدل‌های حرارتی پره صفحه‌ای را گسترش می‌دهد. این روش دمای خروجی پیش کولر و راندمان انتقال حرارت را در نظر می‌گیرد و یک بخش آشفتگی را در خروجی گاز با دمای بالا معرفی می‌کند. روش پیشنهادی اختلاف بین دمای خروجی سمت گرم محاسبه شده و آزمایش شده را نشان می‌دهد که از ۳/۹۸٪ تا ۵/۲۱٪ (متوسط ۴/۶۳٪) متغیر است، و برای دمای خروجی سمت سرد، محدوده ۱/۳۲٪ تا ۳٪ (متوسط ۲/۳۲٪) است. اختلاف قسمت تلاطم جانبی داغ در مقایسه با بخش پیش خنک کننده بدون افزایش بین ۲/۶۶٪ و ۶/۳۴٪ (میانگین ۴/۶۲٪) است. این روش ارزیابی محاسباتی نه‌تنها قابلیت اطمینان خود را تأیید می‌کند، بلکه ابزاری سریع برای ارزیابی عملکرد پیش‌سردکن‌های با پره صفحه‌ای فراهم می‌کند. در این مطالعه با تغییر در پارامترهای هندسی مؤثر (شکل هندسی پره‌ها و نحوه ی استقرار پره‌ها) در مولد گرداب تغییرات انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت محاسبات عددی و بهینه‌سازی مبدل حرارتی، ابتدا به بررسی مبدل‌های حرارتی و ضریب کارایی مبدل در مقالات و هم‌چنین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی درون پره‌های مبدل، بدون در نظر گرفتن مولد گرداب خواهیم پرداخت و سپس به بهینه‌سازی آن‌ها پرداخته و هر دو روش با هم مقایسه و نتایج بررسی خواهد گردید.

۲- توصیف مسئله

استفاده از مبدل‌های صفحه‌ای به‌عنوان تجهیزاتی استاندارد برای گرم و سرد کردن سیالات در جریان‌های تک‌فازی و دوفازی، بسیار مورد توجه بوده است. مبدل‌های صفحه‌ای از تعدادی صفحه‌ی نازک با سطح موج‌دار تشکیل شده‌اند که جریان سیال گرم و سرد را از هم جدا می‌کنند. صفحات به نحوی چیده شده‌اند که دو سیال عامل (سرد و گرم) به‌صورت یک در میان بین صفحات جریان داشته باشند. زاویه‌ی موج صفحات موج‌دار که نقش اساسی در میزان انتقال حرارت و افت فشار دارد در محاسبات مورد بررسی قرار گرفته است. جهت انجام محاسبات عددی و هم‌چنین بهینه‌سازی مبدل حرارتی با استفاده از مولد گرداب، مراحل ذیل مدنظر قرار گرفته است:

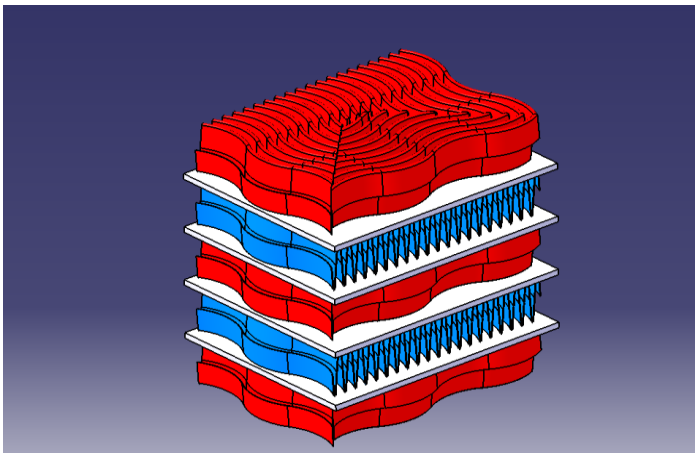
- بررسی مبدل‌های حرارتی و ضریب کارایی مبدل در مقالات و هم‌چنین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی درون پره‌های مبدل، بدون در نظر گرفتن مولد گرداب.
- بهینه‌سازی مبدل حرارتی و ضریب کارایی مبدل با استفاده از مولدهای گردابه و هم‌چنین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی درون فین‌های مبدل با در نظرگرفتن مولدهای گردابه در مبدل.
- مقایسه دو روش و اعلام نتایج.

هندسه این مبدل حرارتی در نرم‌افزار کتیا طراحی گردیده است و در نرم‌افزار کانورج استودیو[1] مش‌بندی شده است و سپس فضای حل با شبکه‌ی غیرسازمان یافته در نرم‌افزار گسسته سازی می‌شود. همان‌طور که در شکل(۱) مشاهده می‌شود، مدل اولیه آورده است. قسمت‌های قرمز رنگ بیان‌گر بخش گرماده و قسمت‌های آبی بیان‌گر بخش گرماگیر است. جهت ساده‌سازی حل مسئله یک بخش کوچکی از سطوح صفحات موج‌دار مبدل حرارتی به ابعاد۳۰×۴۰ میلی‌متر و ضخامت صفحات ۰/۱ میلی‌متر که بین هر کدام از صفحات موج‌دار یک صفحه واسطه با ابعاد ۳۰×۴۰ و ضخامت یک میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

[1] CONVERGE_Studio

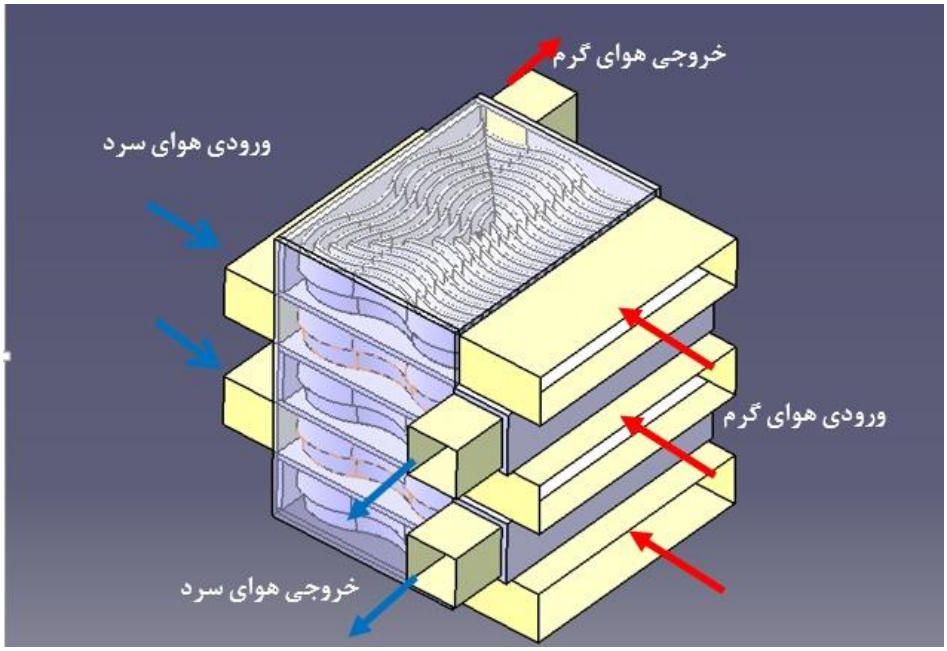
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]



شکل۱: مدل سه بعدی صفحات موج‌دار در نرم‌افزار کتیا

در شکل (۲) جهت حل مدل در نرم‌افزار ورودی‌های هوای سرد و گرم با ابعاد۹ ×۴۰ میلی‌متر و خروجی‌های آن‌ها با ابعاد ۹×۹ میلی‌متر جانمایی شده است.



شکل۲: مدل سه بعدی ورودی و خروجی‌های سیال

۲-۱-معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله حاضر شامل معادله پیوستگی، ممنتوم و انرژی می‌باشد که با توجه بر جریان تراکم ناپذیر، سه بعدی و دائم که شکل برداری آن‌ها به‌صورت زیر می‌باشد [۱۴].

- معادله بقای جرم یا پیوستگی

معادله بقای جرم یا پیوستگی به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{\nabla}.\vec{V} = 0 \quad (1)$$

معادلات بقای اندازه حرکت یا ممنتوم

برای یک سیال نیوتنی معادله ممنتوم را می‌توان به شکل برداری زیر نوشت:

$$(\vec{\nabla}.\vec{V})\vec{V} = -\overrightarrow{\nabla p} + \vec{\nabla}.\vec{\sigma} - \rho\vec{g} \quad (2)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]

که σ تانسور تنش است و به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_{ij} = (\mu + \mu_t).S_{ij} \quad , i , j = ۱,۲,۳ \qquad (۳)$$

و

$$S_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}) \qquad (۴)$$

μ و μ_t به‌ترتیب لزجت مولکولی و لزجت اغتشاشی هستند.

- معادله انرژی

معادله انرژی در محیط سیال به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\rho(\vec{V}.\vec{\nabla})T = -\vec{\nabla}.[(\Gamma + \Gamma_t)\vec{\nabla}T] \qquad (۵)$$

Γ و Γ t به ترتیب هدایت حرارتی مولکولی و اغتشاشی هستند.

۲-۲- مدل‌های اغتشاشی

جریان مغشوش را به‌وسیله میدان نوسانات سرعت توصیف می‌کنند این نوسانات باعث مخلوط شدن کمیت‌های انتقالی نظیر مومنتوم، انرژی و ... می‌گردند. باتوجه به این‌که این نوسانات دارای مقیاس کوچک و فرکانس بالا هستند ازنظر محاسباتی شبیه‌سازی آن‌ها پرهزینه است . ازاین‌رو به‌جای حل دقیق معادلات می‌توان با متوسط‌گیری، نوسانات کوچک را حذف کرد که این خود منجر به ظهور متغیرهای جدیدی می‌گردد که برای مشخص کردن آن‌ها به مدل‌های اغتشاشی نیاز می‌باشد به صراحت می‌توان گفت که مدل اغتشاشی واحدی که برتمام مسائل اشراف داشته باشد وجود ندارد.

وجود صفحات موج دار که باعث ایجاد هندسه‌ای با پیچیدگی خاص می‌گردد ، موجب ایجاد گردابه‌ها و گسستن و اتصال مجدد لایه‌های مرزی می‌شود که این امر، جریان را به‌شدت مغشوش می‌سازد. اما نمی‌توان به‌صورت مطمئن یک مدل را برای مدل‌سازی جریان مغشوش، مناسب دانست و انتخاب مدل مغشوش به ملاحظاتی مانند فیزیک جریان، میزان دقت موردنیاز، قدرت منابع محاسباتی و تجربیات حاصل از شبیه‌سازی وابسته است. هم‌چنین، به‌خاطر پیچیدگی خاص هندسه‌ی این مدل، ماهیت جریان بین صفحات کاملاً روشن نیست. بنابراین چهار مدل توربولانسی دو معادله‌ای مختلف، مورد بررسی قرار گرفته می‌شود و مدلی که بهتر با نتایج تجربی مطابقت داشت، انتخاب می‌گردد. براساس مطالعه مقالات و کارهای مشابه انجام شده، بهترین پیشنهاد از بین مدل‌های اغتشاش برای حل مسأله‌ی پیش‌رو، مدل k-ε استاندارد می‌باشد؛ زیرا بهترین نتایج را برای جریان‌های پیچیده و گردابی با انتقال حرارت دیواره‌ها می‌دهد؛ با این‌حال برای اطمینان از این مطلب اقدام به اعتبارسنجی این معادلات برای مسأله ی حاضرشده است.

مدل k-ε استاندارد یک مدل نیمه تجربی است که بر پایه معادلات انتقال برای انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ اتلاف آن پایه‌گذاری شده است. درهنگام استخراج مدل k-ε فرض براین بوده که جریان کاملاً مغشوش می‌باشد و اثرات لزجت مولکولی قابل چشم‌پوشی است پس می‌توان گفت که مدل k-ε استاندارد فقط برای جریان‌های کاملاً مغشوش اعتبار دارد.

معادلات انتقال برای مدل k-ε استاندارد

رابطه (۲) برای حالتی نوشته شده است که در آن جملاتی از متوسط گیری زمانی حاصل می شوند با مقادیر معادل خود جایگزین شده‌اند.

چنان‌چه از معادله ممنتوم متوسط‌گیری زمانی شود، با در نظر گرفتن جمله شناوری می‌توان آن‌را به شکل تنسوری زیر نوشت:

$$\rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{v_i v_j}) + \rho g_i \qquad (۶)$$

هم‌چنین برای معادله انرژی می‌توان نوشت:

$$\rho v_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i}(-\rho\overline{v_i \acute{T}}) \qquad (۷)$$

تصحیحات ρvi vj و $-\rho\ \overline{\text{vıT'}}$ که در معادله ممنتوم و معادله انرژی ظاهر می‌شوند، در حقیقت جملات مربوط پخش ممنتوم و حرارت به‌وسیله اغتشاش هستند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]

$\rho\overline{vi\ vj}$ به‌عنوان تنش‌های اغتشاشی و $-\rho\overline{vi\ T'}$ به‌عنوان شارهای حرارتی عمل می‌کنند و این تصحیحات باید به‌وسیله یک مدل اغتشاشی،قبل از حل معادلات اصلی، در ابتدای امر تعیین شوند. چنان‌چه از مدل k-ε استفاده شود برای تصحیحات مذکور می‌توان نوشت:

$$-\rho\overline{v_i v_j} = \mu_t\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j}+\frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right) \quad (۸)$$

که رابطه بالا باتوجه به ارتباط تنش‌های اغتشاشی با گرادیان‌های سرعت حاصل شده است.

$$-\rho\overline{v_i T} = \Gamma_t\left(\frac{\partial T}{\partial x_j}\right) \quad (۹)$$

و رابطه بالا نیز از ارتباط شارهای حرارتی با گرادیان‌های دمایی حاصل شده است. در این مدل، وضعیت اغتشاش در هر نقطه به‌وسیله دو کمیت k-ε مشخص می‌گردد که اولی انرژی جنبشی اغتشاشی و دومی نرخ اتلاف آن است.

لزجت گردابه‌ای را می‌توان به‌کمک رابطه زیر برحسب دو کمیت مذکور نوشت:

$$\mu_t = c_\mu\,\rho\frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۱۰)$$

پخش گردابه‌ای را نیز می‌توان برحسب لزجت گردابه‌ای و به‌کمک پرانتل اغتشاشی نوشت:

$$\Gamma_t = \frac{\mu_t}{\sigma_t} \quad (۱۱)$$

مقادیر k-ε از روابط نیمه تجربی زیر حاصل می‌شوند:

$$\rho v_i\frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)+\rho P+\rho G-\rho\varepsilon \quad (۱۲)$$

$$\rho v_i\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right)+C_1\frac{\varepsilon}{k}\rho P+C_3\frac{\varepsilon}{k}\rho G-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۱۳)$$

که:

$$P = \frac{\mu_t}{\rho}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j}+\frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (۱۴)$$

$$G = -\beta g\frac{\mu_t}{\rho\sigma_t}\frac{\partial T}{\partial y} \quad (۱۵)$$

P تولید انرژی جنبشی اغتشاشی ناشی از تنش‌های اغتشاشی و گرادیان‌های سرعت و G تولید آن کمیت به‌خاطر نیروهای شناوری است. هم‌چنین c1 و c2 و c3 ثابت‌های مدل و σk و σε به‌ترتیب اعداد پرانتل اغتشاش برای k و ε می‌باشد و cμ یک ثابت است.این ثابت‌ها مقادیر زیر هستند.

C3 =1.44 , C2=1.92 , C1=1.44 , Cμ=0.09 , σt=0.5 , σk=1 , σε=1.3

این مقادیر از آزمایش‌هایی که با آب و هوا بر روی جریان‌های پایه‌ای برشی و مغشوش انجام شده، به‌دست آمده‌اند و به‌نظر می‌رسد که به‌خوبی برای محدوده وسیعی ازجریان‌های برشی آزاد و محصور در دیواره کار می‌کنند.

۲-۳- مش بندی

برای گرفتن بهترین جواب، مش بندی نقش بسیار مهمی را ایفا می‌نماید. اگر مش با ابعاد بسیار کم زده شود معمولا" به جواب خوب می‌توان رسید، اما زمان حل مسئله بسیار بالا می‌رود و ابعاد بالای مش بندی دقت حل مسئله را پایین می‌آورد. در ادامه برای به‌دست آوردن مش مطلوب به‌صورت خلاصه مروری بر شرایط مش بندی بهینه صورت می‌گیرد.کیفیت مش براساس عوامل زیر تعیین می‌شود:

- نرخ همگرایی

نرخ همگرایی بیش‌تر،کیفیت مش را بالا می‌برد. این بدان معنی است که راه حل درست سریع‌تر به‌دست آمده است.

- دقت راه حل

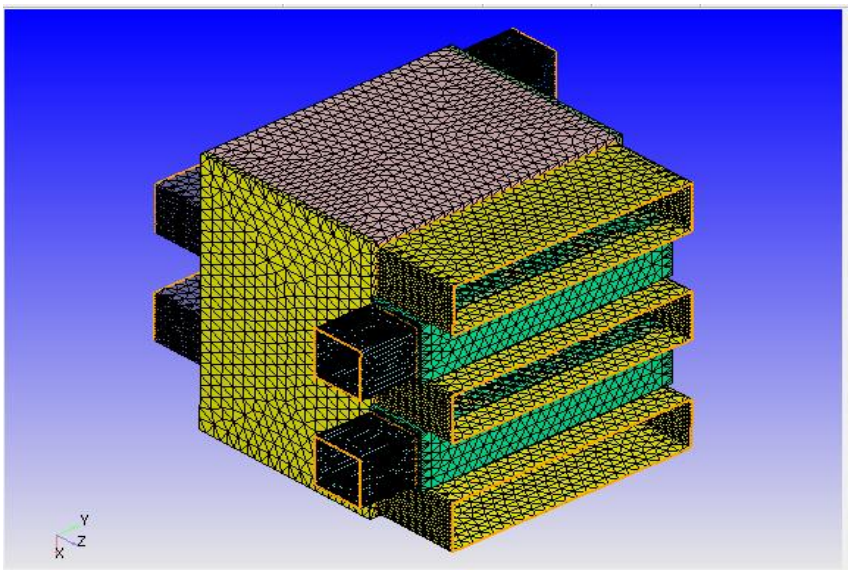
کیفیت مش بهتر یک راه حل دقیق‌تر را تضمین می‌کند. برای بهبود کیفیت مش، ممکن است نیاز به اصلاح مش در مناطق خاصی مثل ورودی‌ها و خروجی و یا در دیوارها از هندسه باشد.

- پیاده‌سازی مش بندی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]

پس از بررسی‌های انجام شده روی مدل موردنظر، مش با سایزهای مختلف و به تعداد۷۶۷۶۶ و از نوع چند وجهی مطابق با شکل (۳) پیاده‌سازی می‌شود.



شکل۳: نتیجه مش بندی در مدل سه بعدی مبدل حرارتی

همان‌طوری که در شکل (۳) مشخص است نحوه مش بندی در کانال‌های ورودی وخروجی و بر روی صفحات مبدل با هم تفاوت دارد و هر کدام با توجه به عملکردی که دارند مش بندی شده‌اند. شایان ذکر است رسیدن به جواب در شرایط مختلف و با پارامترهای مختلف امتحان گردیده است و نزدیک‌ترین جواب که تطابق بیش‌تری با حل مسئله دارد انتخاب شده است.

۲-۴-شرایط مرزی

حل معادلات حاکم بر جریان در محدوده مشخص امکان‌پذیر است، بنابراین برای حل این معادلات شرایطی را روی مرزهای محدوده حل باید اعمال کرد. در اینجا به اختصار شرایط مرزی استفاده شده در مدل‌های این پروژه را بیان می‌کنیم.

۱) شرط مرزی ورودی جریان جرمی

۲) شرط مرزی خروجی فشار

۳) شرط مرزی دیوار

شرط مرزی دیوار دراین پروژه به دو صورت کاربرد دارد:

۱) شرط مرزی دیوار برای آدیاباتیک قراردادن بخش‌های جانبی مبدل با تنظیم Heat flux=0

۲) دیوارهای دوطرفه

پس از ایجاد هندسه و شبکه بندی آن شرایط مرزی مسأله انتخاب و معین می‌گردند. شرایط مرزی در این مسأله شامل شرط مرزی ورودی، شرط مرزی خروجی، تقارن و دیواره است که در شرط مرزی ورودی، سرعت و دبی ورودی و در شرط مرزی خروجی، دبی خروجی انتخاب شده است. صفحه‌ی اول، سوم و پنجم به‌عنوان سیال هوای گرم و صفحه‌ی دوم و سوم به‌عنوان سیال هوای سرد در نظر گرفته می‌شود. در جدول (۱) شرایط مرزی این مسئله نشان داده شده است.

جدول۱: شرایط مرزی

سیال	دما(کلوین)	فشار(مگا پاسگال)	سرعت(m/s)
گرم	616	0.8	35.5
سرد	222	0.1	89.5

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]

بعد از تعیین شرایط مرزی، با استفاده از نرم‌افزار کانورج استودیو مدل‌های حل جریان مغشوش و هم‌چنین حل معادلات ممنتوم و انرژی در حالت پایا فعال می‌شود. بر پایه روش حجم محدود، شبیه‌سازی حرکت سیال و انتقال حرارت درون کانال‌های مبدل صورت گرفته می‌شود. هم‌چنین به‌منظور گسسته سازی معادلات از روش بالادست مرتبه دوم استفاده می‌شود و جهت کوپل کردن سرعت و فشار، الگوریتم سیمپل در نظر گرفته می‌شود.

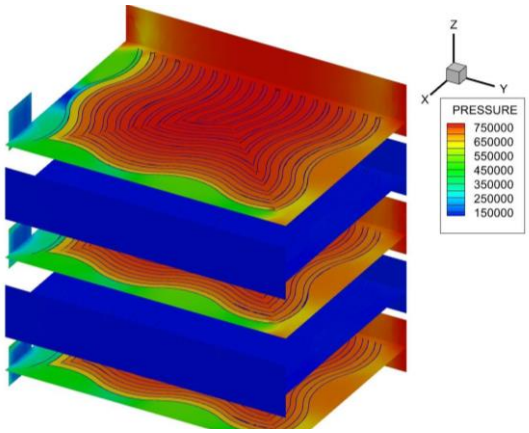
این مبدل حرارتی می‌تواند از یکی از سه ماده ساخته شود. فولاد ضد زنگ ۳۱۶، مس یا آلومینیوم. جدول (۲) مشخصات مواد را برای هر یک از این فلزات فهرست می‌کند. لازم به توضیح می‌باشد در این پژوهش از آلومینیوم برای حل مسئله در نظر گرفته شده است.

جدول۲: مشخصات متریال صفحات مبدل حرارتی [۱۵]

Material	Cp(j/kg-k)	ρ (kg/m³)	K(w/m-k)
Stainless steel -316	502	8027	16.26
Aluminum	896	2707	220
copper	380	8954	386

۵-۲- خروجی فشار

برای بررسی شرایط ترمودینامیکی، توزیع فشار سیال در کل این مبدل حرارتی در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است توزیع فشار در ناحیه صفحات سرد تقریبا" به‌صورت یکنواخت و در ناحیه صفحات گرم دچار نوسانات بیش‌تر به‌دلیل افت دما قابل مشاهده است. توزیع فشار فقط در ناحیه صفحات گرم بین ۵۵۰۰۰۰ تا ۷۵۰۰۰۰ پاسگال در نوسان می‌باشد که البته این افت فشار بر روی صفحات جداکننده این مبدل حرارتی می‌تواند تا ۱۵۰۰۰۰ پاسگال نیز برسد. با افزیش رینولدز ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نیز افزایش می‌یابد. میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در آرایش پیچشی پره‌ها با افزایش رینولدز بیش‌تر از آرایش خطی پره‌ها می‌باشد. تغییرات افت فشار در گرو تغییرات ناسلت وهمین‌طور ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌باشد، به این معنی که برای افزایش میزان تغییرات انتقال حرارت جابه‌جایی از سطوح فین باید یک افت فشار اضافی در جریان را پذیرا باشیم. البته که افزایش انتقال حرارت در مبدل حرارتی ارزش بیش‌تری نسبت به افزایش افت فشار دارد.



شکل ۴: توزیع فشار در کل صفحات مبدل حرارتی برحسب پاسکال

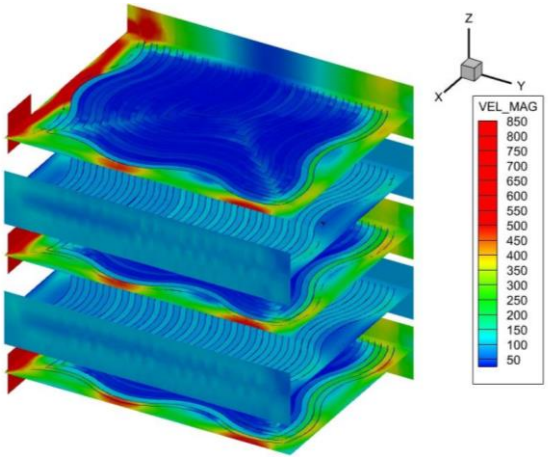
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]

توزیع فشار در ناحیه صفحات سرد را نشان می‌دهد که تقریبا" ثابت بوده وبین عدد ۱۰۰۷۰۲ تا ۱۰۸۷۳۵ پاسکال در نوسان می‌باشد که عدد قابل توجهی نمی‌باشد.

۶-۲- خروجی سرعت

در شکل (۵) توزیع سرعت در کل مبدل حرارتی نشان داده شده است که بروی صفحات گرم و سرد نوسات تغییر سرعت کم‌تر ولی بر روی صفحات جدا کننده هر چه به سمت کناره‌ها حرکت می‌کنیم به‌صورت محسوسی افزایش یافته است.



شکل ۵ : سرعت سیال در کل صفحات مبدل حرارتی برحسب متر بر ثانیه

توزیع سرعت بر روی صفحات گرم نشان داده شده بر روی صفحات موجدار بین ۲۰ تا ۸۰ متر برثانیه در نوسان می‌باشد اما هرچه به سمت صفحات جدا کننده حرکت می‌کند تا ۲۸۰ متر برثانیه هم می‌رسد.این توزیع سرعت در صفحات سرد بین ۲۰ تا ۸۰ متر برثانیه را نشان می‌دهد که دارای نوسات کم‌تری نسبت به خود صفحات موجدار گرم می‌باشد.

همان‌طور که در کانتور سرعت مشاهده می‌کنیم سرعت در نواحی پره صفحات گرم به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است و در مسیر تغییر جهت صفحات گرم و با تنگ کردن مقطع عبوری جریان باعث ایجاد مولد گرداب به‌عنوان یک تکنیک غیرفعال برای افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی شده است و این‌که باعث کاهش ناحیه عبوری جریان سیال و اصلاح لایه مرزی در مجاورت جداره‌ها می‌شود، سیال با مومنتم بالا را به این ناحیه ارسال می‌کند.

مولد گرداب با کاهش مجرای عبوری جریان سیال در قسمت تغییر مسیر پره‌ها نیز باعث می‌شود که، جریان عبوری از این مقطع با سرعت و شدت بالاتری به سطح بیرونی لوله برخورد نماید که این پدیده خود می‌تواند یکی از عوامل تأثیرگذار در افزایش انتقال حرارت باشد. می‌دانیم که هر چه شدت برخورد سیال به پره‌ها بیش‌تر باشد، میزان نرخ انتقال حرارت از آن سطح نیز بیش‌تر می‌شود.

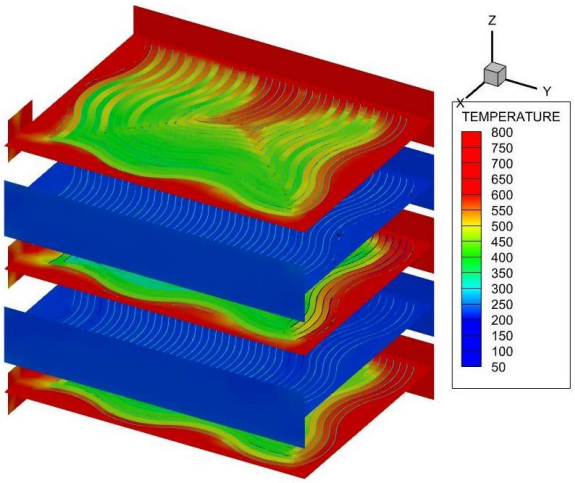
۷-۲- خروجی دما

در بیش‌تر مبدل‌ها، اختلاف دمای ایجاد شده اصلی‌ترین مورد برای بررسی عملکرد آن‌ها می‌باشد. هرچقدر که اختلاف دما میان سیال گرم ورودی و سیال سرد خروجی کم‌تر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که مبدل عملکرد بهتری دارد.در شکل (۶) توزیع دما در کل مبدل حرارتی نشان داده شده است.

توزیع دما بر روی صفحات گرم نشان داده شده است که این توزیع دما در ناحیه خروجی، دمایی بین۳۵۰ تا ۴۵۰ کلوین که از این خروجی می‌توان به‌عنوان دمای مطلوب جهت بررسی عملکرد این مبدل حرارتی استفاده نمود. به‌طور طبیعی با افزایش نسبت جریان سیال سرد به گرم ،اختلاف دما کاهش می‌یابد. توزیع دما بروی صفحات سرد نشان داده شده، دمایی بین ۱۸۰ تا ۲۴۰ درجه کلوین می‌باشد که در مقایسه با توزیع دمایی صفحات گرم دارای نوسان کم‌تری می‌باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]



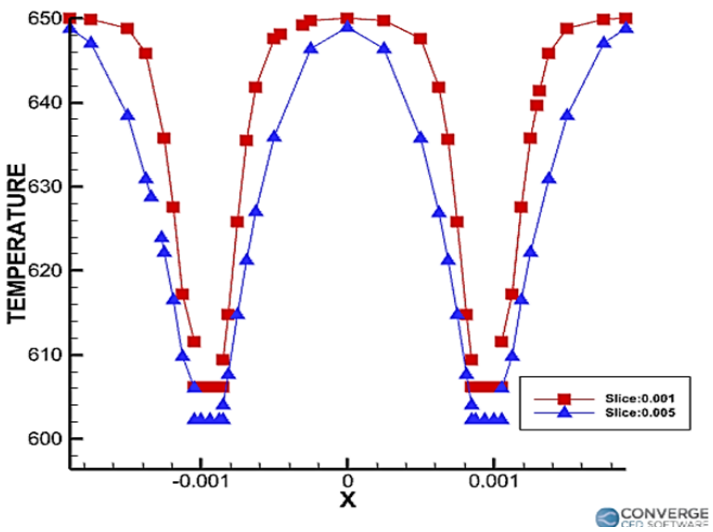
شکل ۶: توزیع دما سیال در کل صفحات مبدل حرارتی بر حسب کلوین

۳-بررسی و مقایسه نتایج مدل ساخته شده و شبیه‌سازی

این تحقیق شامل بررسی و مقایسه میان نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی و مدل ساخته شده توسط Tao Chen [۱۰] می‌باشد و بررسی برای این مبدل نیز در سه بخش توزیع دما، توزیع فشار و سرعت سیال با سیال عامل هوا می‌باشد. نتایج به‌دست آمده شامل بازدهی بین دو مبدل حرارتی می‌باشد. تمامی مقایسه‌ها برحسب دماها و فشار ورودی مقایسه می‌گردند.

۳-۱- خروجی تحلیل دما

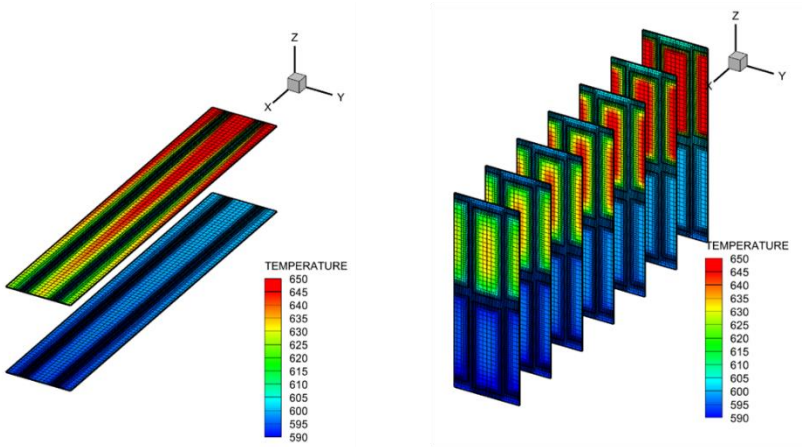
در بیش‌تر مبدل‌ها، اختلاف دمای ایجاد شده اصلی‌ترین مورد برای بررسی عملکرد آن‌ها می‌باشد. هر چقدر که اختلاف دما میان سیال گرم ورودی و سیال سرد خروجی کم‌تر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که مبدل عملکرد بهتری دارد. در شکل(۷) و (۸) توزیع دما در کل مبدل حرارتی نشان داده شده است. به‌طور طبیعی با افزایش نسبت جریان سیال سرد به گرم، اختلاف دما کاهش می‌یابد.



شکل ۷: توزیع دما سیال در کل صفحات مبدل حرارتی بر حسب کلوین

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

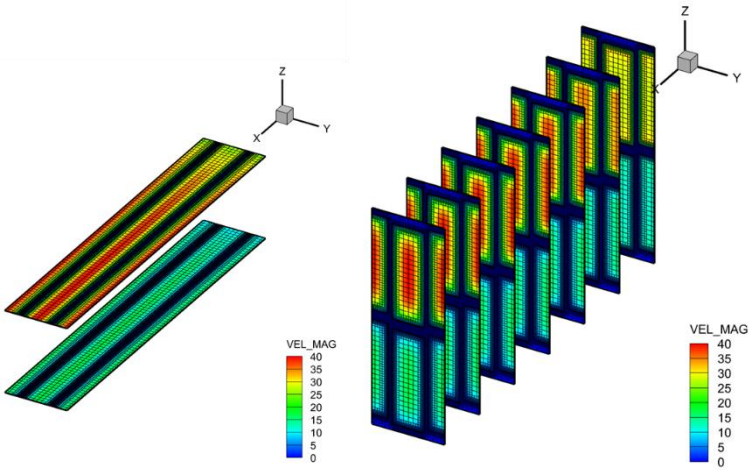
[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]



شکل ۸: توزیع دما سیال در کل صفحات مبدل حرارتی بر حسب کلوین

۳-۲- خروجی تحلیل سرعت

نمودارهای ارایه شده در شکل (۹) بیان‌گر توزیع سرعت سیال در کل مبدل حرارتی را نشان می‌دهد که بین ۵ تا ۴۰ متر برثانیه در نوسان می‌باشد در سمت صفحات سرد سیال توزیع سرعت تقریبا" ثابت می‌باشد ولی در سمت صفحات گرم مبدل هرچه به سمت خروجی مبدل حرکت می‌کنیم سرعت سیال به‌صورت محسوسی افزایش می‌یابد.



شکل ۹: سرعت سیال در کل صفحات مبدل حرارتی بر حسب متر بر ثانیه

۳-۳- خروجی های تحلیل عملکرد مبدل

تحلیل بازده مهم‌ترین بخش از بررسی عملکرد یک مبدل می‌باشد. برای تعریف بازده یا راندمان ε، ابتدا نرخ انتقال حرارت بیشینه (q_max) تعریف می‌شود که عبارت است از میزان انتقال یافته به‌صورت تئوری،که با رابطه زیر بیان می‌شود [۱۶].

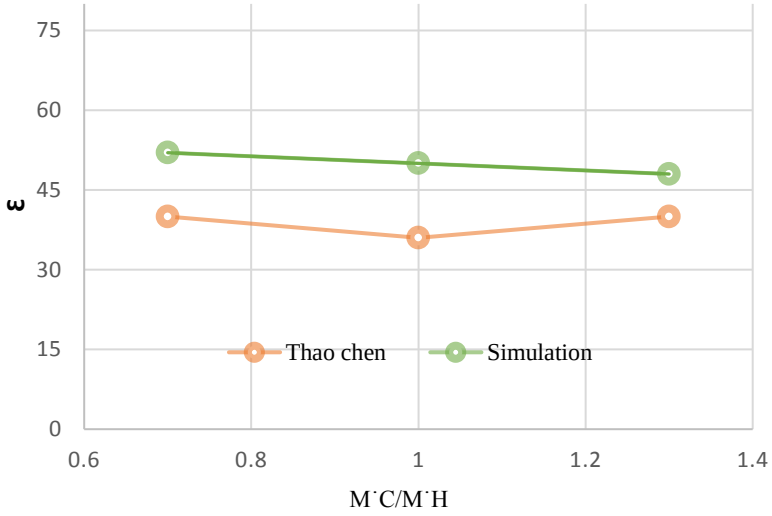
$$q_{max} = C_{p.min}(T_{e.i} - T_{c.i}) \quad (۱۸)$$

به‌طوری که C_min، کم‌ترین مقدار ظرفیت گرمایی در بین جریان های گرم و سرد می‌باشد. بازده به‌صورت نرخ انتقال حرارت واقعی به حداکثر نرخ انتقال حرارت ممکن تعریف می‌شود: [۱۶].

$$\varepsilon = \frac{q_{act}}{q_{max}} \quad (۱۹)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]



شکل ۱۰: بازده کلی در مدل شبیه سازی

$$\varepsilon = \frac{C_e(T_{e.in} - T_{e.out})}{C_{min}(T_{e.in} - T_{c.in})} \quad (۲۰)$$

$$\varepsilon = \frac{C_e(T_{c.out} - T_{c.in})}{C_{min}(T_{e.in} - T_{c.in})} \quad (۲۱)$$

که در معادلات بالا مقدار از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$C_{min} = C_{max.} \quad or \quad C_c = C_h \quad (۲۲)$$

$$C_c = \dot{m}_c C_p \quad , \quad C_h = \dot{m}_h C_p \quad , \quad (۲۳)$$

برای حرارت جذب شده در قسمت گرم از رابطه زیر به‌دست می آید:

$$Q = \dot{m}_e C_{p.e}(T_{e.in} - T_{e.out}) \quad (۲۴)$$

ونیز برای حرارت دفع شده از قسمت سرد از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$Q = \dot{m}_e C_{p.c}(T_{c.in} - T_{c.out}) \quad (۲۵)$$

باتوجه به رابطه به‌دست آمده برای بازده، مقادیر آن‌را با دماهای خروجی مدل Tho chen مقایسه می‌گردد. نمودارهای ارایه شده در شکل (۱۰) بیان‌گر عملکرد مدل ساخته شده وشبیه‌سازی می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

سیستم‌های معمول و مرسوم انتقال حرارت در مهندسی به‌منظور ایجاد سرمایش و گرمایش نیاز به توان خارجی، صرف هزینه جاری علاوه بر هزینه ساخت اولیه و در اغلب موارد دارای قطعات متحرک هستند. با این وجود یک سیستم مبدل حرارتی با یک ساختمان نسبتا" ساده با چند صفحه موجدار که بدون هیچ قسمت متحرکی، قابلیت انتقال مقادیر زیادی حرارت در شرایط کاری مختلف را در پی خواهد داشت.

در این پژوهش معادلات مربوط به مبدل‌های صفحه‌ای موجدار نگارش گردیده و سپس یک سیستم که در آن از سیال هوا استفاده شده است شبیه‌سازی شد. نهایتا" نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج مدل ساخته شده توسط تأو چن مقایسه گردید.

نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی و تحلیل های عددی را می‌توان به‌صورت ذیل دسته بندی نمود:

- افزایش دبی جرمی و افزایش دمای ورودی به مبدل حرارتی باعث افزایش شار حرارتی انتقال یافته در مبدل حرارتی خواهد شد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]

- افزایش دبی جرمی باعث افزایش راندمان سیستم خواهد شد، اما افزایش دما الزاماً افزایش راندمان را در پی نخواهد داشت.
- سرعت، فشار و دما در صفحات مبدل حرارتی به‌طور پیوسته در حال نوسان می‌باشد و این نوسانات بیش‌تر در صفحات گرم مبدل قابل مشاهده می‌باشد.

هم‌چنین از شکل (۱۰) و خروجی‌های نرم‌افزار استنباط می‌شود که راندمان مبدل‌های حرارتی با شکل هندسی صفحات و نحوه‌ی چیدمان آن‌ها رابطه مستقیم دارد.

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی			
مساحت، m^2	A	افت فشار	ΔP
ضریب حرارتی در فشار ثابت، J/(kg.k)	C_p	عدد رینولدز	Re
ضریب انتقال حرارت، $W/(m^2.k)$	h	ضخامت صفحه،m	t
گرمای نهان تبخیر، W/kg	h_{fg}	میانگین	av
طول، m	L	واقعی	act
دبی جرمی، kg/s	$\dot{m}$	کانال هوای سرد	C
فشار، pa	P	کانال هوای گرم	e
شار حرارتی،W	q	ورودی	i,in
مقاومت گرمایی، $(\frac{m^2.k}{W})$	R	حداقل	Min.
دما، C°	T	حداکثر	Max.
ضریب انتقال حرارتی کلی، $(\frac{W}{m^2.K})$	U	خروجی	O,out
ثابت فون کارمن ۰.۴۲	k	ضریب اصطکاک	f
ثابت تجربی ۹.۸۱	E	مختصات کارتزین	x
سرعت سیال	V	مختصات کارتزین	y
میزان حرارت مبادله شده بین دو سیال	Q	ضریب ناسلت	Nu
قطر هیدرولیکی،m	d		
علائم یونانی			
هدایت حرارتی اغتشاشی	Γ	بازده مبدل	ε
چگالی، kg/m^3	ρ	اختلاف	Δ

مراجع

[1] https://mechanicsayalat.com

[۲] هادی پاکدامن، محمدرضا علیزاده و ولی کلانتر(۱۳۹۲) بررسی عددی انتقال حرارت و افت فشار در مبدل حرارتی صفحه‌ای با صفحات شورون، تألیف نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، تهران، ایران.

[3]Joshua L. Anibal1 and Joaquim R. R. A. Martins ,Adjoint-based shape optimization of a plate-fin heat exchanger using CFD ،Department of Aerospace Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 48109 ،(2024).

[4] Hariharan Kallath, Foster Kwame Kholi, Qingye Jin, Man Yeong Ha, SangHu Park, Hyeon-jun Kim, Jason Chetwynd-Chatwin, June Kee Min ،Numerical Study of the Flow Uniformity Inside the High-

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]

Pressure Side Manifolds of a Cooled Cooling Air Heat Exchanger ،School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Republic of Korea ،Pusan ،(2021).

[5]Miguel Chávez-Modena, Leo Miguel González, Eusebio Valero ,Numerical optimization of the fin shape experiments of a heat conjugate problem surface air/oil heat exchanger (SACOC) School of Aeronautics, Universidad Politécnica de Madrid, Plaza Cardenal Cisneros 3, Madrid E-28040, Spain ، Madrid ،(2022).

[۶] فرشید مرزبان، مهرزاد احمدی، سید علی آقا میر جلیلی, (۱۳۹۵) تحلیل عددی افزایش انتقال حرارت با تغییر در زاویه حمله مولدهای گرداب در مبدل‌های حرارتی,"پنجمین کنفرانس بین المللی پژوهش درعلوم وتکنولوژی"، لندن، انگلستان.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]

Numerical investigation of a commercial aircraft heat exchanger and its optimization using a vortex generator (Eddy)

M.H. Nobakhti *, K. Akbarirad, A. Alinia

Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: Winter 2026 Accepted: Spring 2026

Abstract

Air-cooled heat exchangers are an important part of industrial technology in the field of heat transfer. Among the different types of heat exchangers used in various industries for cooling or heating fluids, plate heat exchangers have a special place. Plate heat exchangers have a wider scope of influence than other exchangers due to their specific advantages such as high efficiency and flexibility, low heat losses and maintenance costs, easy cleaning and compactness, which has led to many efforts in the field of research and development of plate heat exchangers. In this paper, in order to increase the heat transfer performance of a plate-fin heat exchanger using a vortex generator (Eddy), changes in the geometric shape of the fins and changes in the direction of the heat exchanger plates have been investigated. When the fluid flow passes through the vortex generator, due to the flow separation at the edge of the vortex generator, vortices are generated in the flow direction in the flow field, which causes mixing in the bulk of the flow and changes in the boundary layer and its instability.In this study, heat transfer in a finned plate heat exchanger has been simulated and calculated numerically using Converge Studio software. Among the turbulence models, the k-ε model has been used, which provides better results, and its results have been compared with a sample of plate heat exchangers that have been designed and manufactured. By changing the geometric shape of the fins and changing the direction of the heat exchanger plates, the change in the air flow regime passing through the heat exchanger plates has been investigated. The results show that in the Reynolds number range of 1965324 with a hot air inlet temperature of 616 degrees Kelvin and a cold air inlet temperature of 222 degrees Kelvin at an altitude of 10,000 feet above sea level, an efficiency of 52 percent has been achieved.

Key words: Numerical calculation, heat exchanger, vortex generator(Eddy), finned plate heat exchanger
*corresponding author: m.nobakhti@srbiau.ac.ir

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.540]

Cite this article as: M.H. Nobakhti, K. Akbarirad, A. Alinia. Numerical investigation of a commercial aircraft heat exchanger and its optimization using a vortex generator (Eddy). **Journal of Energy Conversion, 2026, 13 (1), 1-16**.