

طراحی هوشمند مبدل‌های حرارتی با سطوح گسترش یافته توسط الگوریتم ژنتیک و پردازش تصویر

بهادر ابولپور* (دانشیار)

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سرجان

رامتین حکمت‌خواه (کارشناسی ارشد)

دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

امیرباک انصاری (استادیار)

دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۲۵-۳۵، (پژوهشی)

تحلیل انتقال حرارت جابه‌جایی در یک کانال برای بسیاری از انواع مبدل‌های حرارتی، اساس طراحی، ساخت و بهینه‌سازی این تجهیزات می‌باشد. استفاده از سطوح گسترش یافته در کانال، یک روش کاربردی برای افزایش ضریب انتقال حرارت می‌باشد. در پژوهش حاضر، طراحی هوشمند یک مبدل حرارتی نانو سیال دو بعدی، به منظور دستیابی به شرایط عملکرد مطلوب از نظر نرخ انتقال حرارت، میزان رسوب ذرات نانو در ساختار مبدل و همچنین افت فشار سیال در طول عبور از آن، به روش عددی، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی ساختار هندسی از طریق ترکیب الگوریتم ژنتیک و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای این کانال، می‌توان به افزایش ۱/۱۴ درصدی در آنتالپی نانوسیال عبوری، کاهش ۱۱/۱۲۱ درصدی در افت فشار نانوسیال در طول عبور و همچنین کاهش ۸/۴۴ درصدی در میزان رسوب نانوذرات درون کانال دست یافت. در مجموع، این بهبودها منجر به افزایش ۲۴/۸۲ درصدی در تابع برازش تعریف شده در پژوهش شده است.

bahadorabolpor1364@yahoo.com
ramtin.hekmatkhah@ut.ac.ir
a.b.ansari @kgut.ac.ir

واژگان کلیدی: مبدل حرارتی، نانو سیال، سطوح گسترش یافته، دینامیک سیالات محاسباتی، الگوریتم ژنتیک، پردازش تصویر.

۱. مقدمه

مبدل‌های حرارتی، انرژی حرارتی را بین جریان‌های مختلف سیال و اجسام جامد انتقال می‌دهند. یک مشکل مهندسی مهم در این تجهیزات، بهبود سرعت نرخ انتقال حرارت با افت فشار قابل قبول جریان سیال عبوری است. هر یک از فازهای گاز، مایع یا جامد این فرایند که مقاومت انتقال حرارت بالایی دارند، با توجه به مقاومت‌های انتقال حرارت دیگر فازها، نرخ انتقال حرارت کلی را در این تجهیزات کنترل می‌کنند.^[۱] اگر یک فازگازی یا مایع این پدیده را کنترل کند، حداقل تنش برشی دیوار و حداکثر سرعت انتقال حرارت در همسایگی ناحیه جریان جدایی لایه مرزی رخ می‌دهد.^[۲] استفاده از نانوسیال‌ها که حاوی نانوذرات معلق مانند فلزات و اکسیدها هستند، راهی برای افزایش انتقال حرارت در این مناطق است.^[۳] این نانوسیالات، خواص حرارتی سیال پایه را بهبود می‌بخشند.^[۴-۷] از طرف دیگر، جدایی جریان و اتصال مجدد آن ناشی از افزایش اثرات اصطکاک بین لایه‌های جریان سیال و در نتیجه افزایش افت فشار جریان، یکی از مسائل مهم موجود در این تجهیزات است.^[۸-۱۲]

مبدل‌های حرارتی کاربردهای گسترده‌ای در سیستم‌های مختلف صنعتی دارند. هدف اصلی استفاده از این تجهیزات، انتقال حرارت بین جریان‌های مختلف سیال و اجسام جامد است. بنابراین، افزایش نرخ انتقال حرارت یک چالش مهم در این تجهیزات است. عبور سیال از میان مبدل‌های حرارتی انجام می‌شود و اجزای جامد مختلف این تجهیزات تأثیر مهمی بر سرعت انتقال حرارت دارند. از این جهت، اجزایی که مقاومت انتقال حرارت بالایی دارند، نسبت به سایر موارد، سرعت انتقال حرارت کلی در داخل مبدل را کنترل می‌کنند. با توجه به نوع کنترل‌کنندگی نرخ انتقال حرارت، مکانیسم‌های مختلفی برای کاهش مقاومت انتقال حرارت و بهبود نرخ کلی انتقال حرارت مبدل حرارتی ارائه شده‌اند.^[۱۳] استفاده از اشکال و طرح‌های مختلف بافل‌ها، روشی شناخته‌شده برای بهبود این نرخ در فرایند کنترل توسط جریان سیال است.^[۱]

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۵/۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۲۷.

استناد به این مقاله:

ابولپور، بهادر، حکمت‌خواه، رامتین، و انصاری، امیرباک، ۱۴۰۲. طراحی هوشمند مبدل‌های حرارتی با سطوح گسترش یافته توسط الگوریتم ژنتیک و پردازش تصویر. مهندسی

مکانیک شریف، ۳۹(۲)، صص. ۲۵-۳۵. DOI:10.24200/J40.2022.60770.1649

اگرچه نانوسیال‌ها را می‌توان به راحتی در تجهیزات فعلی با حداقل تغییر طراحی استفاده کرد، اما ممکن است به تدریج بر روی سطوح رسوب کرده و یا سطوح داخلی را دچار خوردگی کند. از همین رو، این عامل درصد نانوذرات استفاده شده را محدود می‌کند. بنابراین، افزایش ضریب انتقال حرارت با افزودن نانوذرات، هدف مناسبی برای بررسی جداگانه نیست. مطالعه جابه‌جایی اجباری، موضوعی کاملاً مهم در بسیاری از کاربردهای تکنولوژیکی مانند خنک‌سازی قطعات الکترونیکی، سیستم‌های مبدل حرارتی، بویلرها، راکتورهای کاتالیزوری شیمیایی، کلکتورهای خورشیدی، خنک‌سازی پره‌های توربین گاز و غیره است. [۱۳-۱۷]

افزایش عملکرد انتقال حرارت در مقیاس‌های ماکرو و میکرو^۲ کانال‌ها نیز بسیار مهم است. استفاده از سطوح گسترش‌یافته در کانال، یک روش کاربردی برای افزایش ضریب انتقال حرارت است. [۱۸-۲۰] پیروز و همکاران، انتقال حرارت ترکیبی را در یک کانال مستطیلی بررسی کرده‌اند. [۲۱] آن‌ها گزارش داده‌اند که کاهش فاصله بین موانع باعث انحراف و شتاب جریان سیال در مجاورت آن‌ها و افزایش سرعت انتقال حرارت جابجایی در نزدیکی موانع می‌شود. بیسواس و همکاران، شبیه‌سازی‌های عددی دو بعدی را با استفاده از LBM برای درک اثر شناوری مقاطع بر روی جریان همرفتی ترکیبی و انتقال حرارت در یک کانال عاج‌دار مورد مطالعه قرار داده‌اند. [۲۲] آنها به این نتیجه رسیده‌اند که این انتقال حرارت از دو مکانیسم پیروی می‌کند. در مکانیسم اول، انتقال حرارت به دلیل تاخیر در شکل‌گیری لایه مرزی حرارتی در لبه جلویی دنده اتفاق می‌افتد و در مکانیسم دوم، انتقال حرارت در شرایطی که عدد رینولدز جریان بیش از یک مقدار بحرانی که ناشی از مکانیسم‌های ریزش گردابه و اختلاط می‌باشد، رخ می‌دهد.

یکی از راه‌های ابتکاری در بهبود نرخ انتقال حرارت در سیالات، تعلیق نانوذرات جامد (قطر ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) در یک سیال پایه، معروف به نانوسیال است. نانوسیال پایدار و در مقایسه با ذرات معلق با ابعاد میلی‌متری یا میکرومتری که دارای معایب متعددی مانند رسوب‌گذاری، فرسایش و افزایش افت فشار کانال جریان می‌باشد و با افت فشار قابل قبول، پایداری بسیار بهتری از خود نشان می‌دهد. [۲۳، ۲۴] ایزدی و همکاران، یک کد عددی برای در نظر گرفتن جریان اجباری و آرام یک نانوسیال متشکل از Al_2O_3 و آب نوشته‌اند. [۲۵] نتایج آنها نشان داد که وابستگی ضریب اصطکاک به غلظت نانوذرات رابطه معناداری دارد. انوریگ و همکاران، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی جریان جابه‌جایی آرام نانوسیال‌ها Al_2O_3 آب را در یک لوله با شرایط دمای دیواره ثابت مورد مطالعه قرار داده‌اند. [۲۶] شبیه‌سازی آنها نشان داد که ضریب انتقال حرارت به‌طور مشخص با افزایش غلظت ذرات نانوسیال افزایش می‌یابد.

رشیدی و همکاران، جریان جابه‌جایی اجباری آرام و انتقال حرارت نانوسیال مس - آب را برای یک کانال موجی شکل برای پیش‌بینی دقت مدل‌های تک فاز و دو فاز مختلف بررسی کردند. [۲۷] یانگ و لای، شبیه‌سازی به روش LBM را بر روی انتقال حرارت نانوسیال در یک میکروکانال انجام داده‌اند. [۲۸] آنها به این نتیجه رسیدند که عملکرد انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و غلظت نانوسیال افزایش می‌یابد. سیدیک و همکاران، راندمان حرارتی را در جریان درون یک کانال با استفاده از روش LBM مطالعه کرده‌اند. در این مرجع، استفاده از فین‌ها و همچنین نانوسیال را برای افزایش انتقال حرارت در نظر گرفته است. [۲۹] آنها به این نتیجه رسیدند که راندمان انتقال حرارت به شدت به عدد رینولدز و ضریب هدایت فین‌ها بستگی دارد.

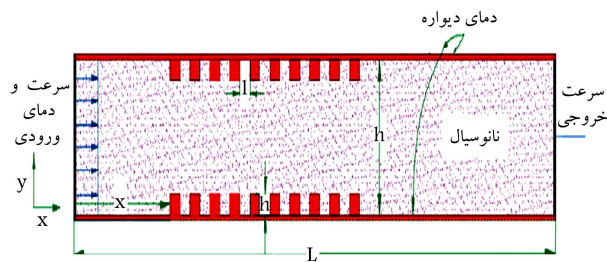
محققان زیادی جریان حرارت و سیال در شکل‌های مختلف کانال‌ها، به صورت

عددی و تجربی، مانند یک کانال دارای بافل در ناحیه ورودی، یک کانال مستطیل شکل با دو صفحه بافل نصب شده بر روی دیوارهای بالایی و پایینی، یک کانال مربعی با آرایش‌های مختلف از فین‌ها، یک لوله مبدل حرارتی با یک بافل در داخل لوله، یک مبدل حرارتی پوسته و لوله مجهز به محدوده‌های، کانال مستطیلی با بافل‌های توپر و سوراخ‌دار و بلوک‌های متداخل داخل کانال صفحات موازی را مورد بررسی قرار داده‌اند. [۳۰-۳۵]

برنرو همکاران، جریان آشفته در یک کانال با چندین صفحه بافل را مورد مطالعه قرار دادند. [۳۶] نتایج آنها نشان داد که با اعداد رینولدز مختلف، تعداد بافل‌های متفاوتی برای به دست آوردن یک شرط مرزی تناوبی مناسب ضروری است. حبیب و همکاران، تأثیر عدد رینولدز و ارتفاع بافل بر ضریب انتقال حرارت و همچنین افت فشار یک جریان متلاطم در داخل یک مجرای مستطیلی با شار حرارتی یکنواخت در دیوارها را مورد مطالعه قرار دادند. [۳۷] آنها نواحی چرخش بزرگ و گردادیان‌های شدید سرعت را در پشت این بافل‌ها مشاهده کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش عدد رینولدز، افت فشار با سرعت بیشتری نسبت به ضریب انتقال حرارت، افزایش می‌یابد.

کائو و همکاران، انتقال حرارت و خصوصیات جریان سیال مبدل‌های حرارتی با بافل ماریچی را با کمک تحلیل‌های عددی و تجربی بررسی کرده‌اند. [۳۸] آنها از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چند هدفه استفاده کرده‌اند. متغیرهای طراحی مانند: تعداد لوله، ابعاد لوله و زاویه ماریچ به عنوان متغیرهای طراحی تعریف شده‌اند. نتایج آنها نشان داد که افزایش انتقال حرارتی و کاهش سرعت محوری سیال با زاویه ماریچ و نسبت هم‌پوشانی محوری مرتبط است. آنها مجموعه‌ای از راه حل‌های پارتو را برای بهینه‌سازی ترمودینامیکی و اقتصادی به دست آوردند. مقایسه روش‌های بهینه‌سازی نشان داد که روش بهینه‌سازی چند هدفه مناسب‌تر از استراتژی بهینه‌سازی تک هدفه است. هانزیو و همکاران، طرحی مبتنی بر ابزار چند هدفه برای بهینه‌سازی عملکرد مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله ارائه داده‌اند. [۳۹] امکان اجرای ابزارهای هوش مصنوعی برای طراحی مبدل‌های حرارتی با هدف کاربردهای صنعتی در کار آنها بررسی شده است. مجموعه داده برای آموزش شبکه‌های عصبی توسعه یافته و در نرم افزار متلب مدل‌سازی شده است. پیکربندی بهینه مبدل حرارتی و پارامترهای طراحی (افت فشار در سمت پوسته، افت فشار در سمت لوله و نرخ انتقال حرارت) بهینه شده است. کایا و اوست، روش‌های مختلف بهینه‌سازی را مقایسه کردند. [۴۰] آنها روش جستجوی تک متغیره را برای بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی با استفاده از روش بهینه‌سازی تک هدفه، با حرکت از دو بازو در جبهه پارتو معرفی کردند. برای کاهش زمان محاسباتی، روش جستجوی تک متغیره انتخاب و از الگوریتم ژنتیک نیز در مطالعه آنها استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک مقادیر برازندگی بهتری نسبت به روش جستجوی تک متغیره ارائه کرده است. با این حال، روش جستجوی تک متغیره محدوده طراحی مناسب‌تری را در جبهه پارتو^۳ ارائه کرده است. دنیش و سایجال، یک مدل عددی برای بررسی اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد مبدل حرارتی پوسته و لوله با بافل‌های متحرک توسعه داده‌اند. [۴۱] از الگوریتم ژنتیک برای به حداکثر رساندن سرعت انتقال حرارت و در عین حال به حداقل رساندن افت فشار نیز استفاده کرده‌اند.

چن و همکاران، آزمایش انتقال حرارت آب - آب را برای مقایسه هیدرودینامیک و ویژگی‌های انتقال حرارت سه مبدل حرارتی با بافل‌های سه‌لایه، دولایه و قطعه‌یی طراحی کرده‌اند. [۴۲] داده‌های تجربی نشان می‌دهد که با سرعت جریان یکسان، ضرایب انتقال حرارت پوسته‌ای مبدل حرارتی پوسته و لوله با بافل‌های سه‌لایه و دو



شکل ۱. شماتیکی از کانال‌های دوبعدی با سطوح گسترش یافته که مورد مدل‌سازی قرار گرفته‌اند.

گسترش یافته و فشار خروجی اتمسفریک در نظر گرفته شده است. در خروجی، گرادیان متغیرها در امتداد محور x نادیده گرفته شده است.

معادلات حاکم بر حالت پایا برای جریان سیال و حرارت که به‌طور هم‌زمان حل شده‌اند، طبق نماد انیشتین به شرح زیر نشان داده شده است: [۲۴]

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

$$\frac{d^* x_p}{dt^*} = \frac{1}{1 + 2/52 \lambda \rho_p d_p} \left(u - \frac{dx_p}{dt} \right) + \xi \left(\frac{8/286 \times 10^{-22} \pi \mu T d_p}{\Delta t} \right)^{0.5} \quad (4)$$

$$\frac{d^* y_p}{dt^*} = \frac{1}{1 + 2/52 \lambda \rho_p d_p} \left(v - \frac{dy_p}{dt} \right) + \xi \left(\frac{8/286 \times 10^{-22} \pi \mu T d_p}{\Delta t} \right)^{0.5} \quad (5)$$

که در آن Γ ، λ و ξ به ترتیب ضریب نفوذ گرمایی مولکولی، ضریب ثابت استفاده شده در ضریب تصحیح کانینگهام^۹ و عدد تصادفی گاوسی^{۱۰} مستقل از واریانس واحد می‌باشند. معادلات ۴ و ۵ بیانگر اثرات مومنتوم و نیروی برلونی^{۱۱} بر حرکت ذره هستند.

روش حجم محدود^{۱۲} برای حل این معادلات، بر اساس مفهوم گسسته‌سازی قانون - توانی،^{۱۳} شبکه جابه‌جا شونده^{۱۴} و الگوریتم سیمپل^{۱۵} استفاده شده است. [۲۵]

ضرایب تخفیف^{۱۶} برای P ، v ، u و T به ترتیب برابر با $3/5$ ، $3/5$ ، $7/5$ و $7/5$ در نظر گرفته شده‌اند. [۲۶] حداکثر 5000 تکرار و حداقل دقت 10^{-6} برای همگرایی قابل قبول متغیرهای محاسبه شده (یعنی P ، v ، u و T) در نظر گرفته شده است. پس از حل معادلات حاکم، میدان‌های سرعت، فشار و دما برای تمام نقاط محاسباتی تعیین می‌شوند. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی صورت گرفته، جهت شبیه‌سازی حرکت نانوسیال از دیدگاه اویباری^{۱۷} استفاده شده است و تنها در مورد تعیین میزان رسوب نانو ذرات بر روی سطوح کانال از دیدگاه لاگرانژی^{۱۸} برای مطالعه حرکت ذرات استفاده شده است. بر اساس این دیدگاه، معادله حرکت این ذرات جامد با در نظر گرفتن نیروهای اینرسی و برلونی، به‌صورت زیر تعریف می‌گردد: [۲۷]

$$\rho = \varphi_{CuO} \rho_{CuO} + (1 - \varphi_{CuO}) \rho_{water} \quad (6)$$

لایه بالاتر از ضرایب انتقال حرارت، با فل قطعه‌ای سنتی است. تاندیل و کوداکانو، شبیه‌سازی عددی را با استفاده از روش تاگوچی^۴ برای بهینه‌سازی پوسته و لوله مبدل با بافل‌های^۵ متحرک و به حداکثر رسانیدن نرخ انتقال حرارت و به حداقل رسانیدن افت فشار است، ارائه کرده‌اند. [۲۳] در این مطالعه، نرخ انتقال حرارت محاسبه شده و افت فشار کل در سراسر پوسته با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به دست آمده است.

در پژوهش حاضر، یک مدل عددی دو بعدی برای انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری یک نانوسیال (اکسید مس - آب، به‌عنوان یک نمونه) در یک کانال جریان حاوی سیال آرام با ناحیه‌ی گسترش یافته، به‌منظور افزایش نرخ انتقال حرارت، توسط نرم افزار متلب^۶ توسعه داده شده است. مش^۷ محاسبه بر روی میدان جریان با روش پردازش تصویر ایجاد شده است. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای مدل‌سازی جریان آرام حالت پایا پیاده‌سازی و از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی و حل معادلات حاکم استفاده می‌شود. جهت اعتبارسنجی، نتایج مدل حاضر با داده‌های تجربی و عددی مراجع برای یک کانال ساده با سطوح گسترش یافته متقارن، مقایسه می‌شوند و نتایج نشان می‌دهد که در این مقایسه، تطابق خوبی وجود دارد.

در مطالعه حاضر، ادغام روش حجم محدود با الگوریتم ژنتیک^۸ و روش پردازش تصویر به‌صورت یک رویداد کاملاً همگرا، منجر به توسعه یک روش نوین برای بهینه‌سازی هندسه کانال شده است که در منابع قبلی دیده نشده است. استفاده از پردازش تصویر به کاربر کمک می‌کند بدون استفاده از هرگونه نرم‌افزار اضافی و آموزش جداگانه، با در دست داشتن یک تصویر دیجیتال که امروزه با توجه به در دسترس بودن گوشی‌های هوشمند، شبکه مش مورد نظر را جهت شبیه‌سازی تولید کند. علاوه بر این، انجام محاسبات در مش تولید شده بر پایه پردازش تصویر، این امکان را فراهم می‌سازد که بهینه‌سازی ساختارهای هندسی با ایجاد تغییراتی در پیکسل‌های شکل هندسی انجام شود. این روش امکان کار بر روی شکل‌های هندسی پیچیده که قابلیت تعریف با استفاده از چند پارامتر ساده و مشخص مانند قطر، ضخامت، شعاع انحنا و غیره برای آنها موجود نیست را فراهم می‌سازد. نوآوری اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی طراحی هندسه سطوح گسترش یافته درون یک کانال با مقیاس نانو با هدف افزایش حداکثری دمای خروجی، کاهش افت فشار جریان نانوسیال عبوری و کاهش میزان رسوب گذاری مناسب ذرات نانو بر روی ناحیه گسترش یافته با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. برای این منظور، تابع وزنی خطی پارامترها به‌عنوان تابع هدف برای این مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، طبق روش مقیاس‌بندی خطی پارتو، در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، جبهه پارتو و هندسه بهینه به‌دست آمده و سپس گرادیان سرعت، فشار و دمای جریان نانوسیال آرام عبوری از این ساختار بهینه و همچنین میزان به دام افتادن ذرات نانو در آن، ارزیابی می‌شود.

۲. معادلات حاکم و شرایط مرزی

شکل ۱ ساختار فیزیکی از طرح اولیه از کانال‌های مدل شده را جهت درک مفهوم کانال‌هایی با سطوح گسترش یافته و همچنین شرایط مرزی تعریف شده در مدل‌سازی نشان می‌دهد. یک جریان آب - اکسید مس (۵٪ وزنی) آرام دو بعدی (با سرعت ورودی افقی 0.045 m/s بر ثانیه و دمای ورودی 300 K) به یک کانال مستطیلی گرم شده با دمای دیواره ثابت برابر با 350 K درجه کلوین وارد می‌شود. شرایط مرزی بدون لغزش ($u = 0$ ، $v = 0$ با $T = T_w$) در دیوارها و سطح

$$Cp = \frac{\varphi_{CuO} \rho_{CuO} C_{pCuO} + (1 - \varphi_{CuO}) \rho_{water} C_{pwater}}{\rho} \quad (7)$$

$$\mu = \frac{\mu_{water}}{(1 - \varphi_{CuO})^{2/5}} \quad (8)$$

$$k = k_{water} \left[1 + 3\varphi_{CuO} \frac{(\frac{k_{CuO}}{k_{water}} - 1)}{(\frac{k_{CuO}}{k_{water}} + 2) - \varphi_{CuO}(\frac{k_{CuO}}{k_{water}} - 1)} \right] \quad (9)$$

که در آن φ_{CuO} نشان‌دهنده کسر جرمی مس اکسید می‌باشد.

۳. مدل‌سازی و روش عددی

در رویکرد بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، متغیرهای مسئله (20° پره با عرض یکسان و ارتفاع متغیر، به صورت متقارن در دو سمت کانال تعریف شده است که به عنوان سطح گسترش یافته شناخته می‌شود) ژن نامیده می‌شود. ارتفاع هر یک از این پره‌ها متغیر مسئله است و هر کدام به عنوان یک ژن شناخته می‌شوند. ترکیبی از این 200 ژن‌ها یک کروموزوم 200 (یک سطح گسترش یافته حاصل از این پره‌ها) و مجموعه‌ای از 200 کروموزوم یک جمعیت می‌سازند. عرض این پره‌ها یکسان و ثابت اما ارتفاع این پره‌ها متغیر بوده و در هر کروموزوم 200 مقدار جدید برای این 200 ژن (یعنی همین ارتفاع 200 پره) مورد آزمون قرار می‌گیرد. پارامترهای این الگوریتم، نسل 21 (35)، احتمال بقا 22 ($0/5$)، میانگین احتمال 23 ($0/33$)، احتمال تقاطع 24 ($0/17$)، احتمال جهش 25 (1) و بزرگی جهش 26 ($0/3$)، درکد متلب نوشته شده، تعریف شده‌اند. پس از تولید مش، معادلات حاکم در این سلول‌های محاسباتی حل شده‌اند. پارامترهای هدف فرایند بهینه‌سازی چند هدفه به عملکرد مورد انتظار از مبدل حرارتی بستگی دارد (که در این مطالعه عبارتند از: ΔP ، ΔH ، درصد رسوب نانو ذرات جامد بر روی دیواره کانال).

روش بهینه‌سازی ارائه شده در این پژوهش شامل یافتن ساختار هندسی بهینه برای سطح گسترش یافته در این جریان آرام درون کانال دوبعدی عبور دهنده نانوسیال آب - اکسید مس (5% حجمی) است و خواص مورد نیاز این نانوسیال در مراجع به صورت $\rho_{CuO} = 6500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ، $\varphi_{CuO} = 0/05$ ، $k_{CuO} = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ، $Cp_{CuO} = 535/6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [۴۸، ۴۹] ارائه شده است.

برای بهبود عملکرد مبدل حرارتی، توجه به اهداف مختلف بهینه‌سازی و اهمیت واحدهای مختلف آنها بسیار ضروری است. در این پژوهش، به عنوان یک نمونه، هر سه پارامتر (یعنی ΔH در سیال ورودی و خروجی، ΔP در سیال ورودی و خروجی و درصد رسوب نانو ذرات جامد بر روی دیواره کانال) به مقادیر مربوط به یک کانال ساده بدون هیچ ناحیه گسترش یافته تقسیم شده‌اند تا عملاً مقادیری بدون بعد و هم‌وزن قابل مقایسه ایجاد شوند. برای حل این مسائل چندهدفه، مقیاس‌بندی خطی پارامترهای هدف ذکر شده با وزن‌های ثابت، به صورت $Fit = \sum_{i=1}^N w_i \psi_i$ در نظر گرفته شده است. [۴۹-۵۱] انتخاب این وزن‌ها (w_i)، با توجه به اهمیت هر یک از توابع هدف (ψ_i) و عملکرد مورد انتظار از مبدل حرارتی، به توضیح حل مسئله بهینه‌سازی را تغییر می‌دهد. به عنوان مثال، در مطالعه حاضر، ψ_1 نسبت ΔH به ΔH کانال ساده، ψ_2 نسبت ΔP به ΔP کانال ساده و ψ_3 نسبت نانوذرات رسوب کرده به رسوب در کانال ساده با ضرایب وزنی $w_1 = +1$ ، $w_2 = -0/1$ ، $w_3 = -0/1$ می‌باشد. در واقع مقدار ΔH ده برابر مهم‌تر از دیگر پارامترهای هدف در نظر گرفته شده است.

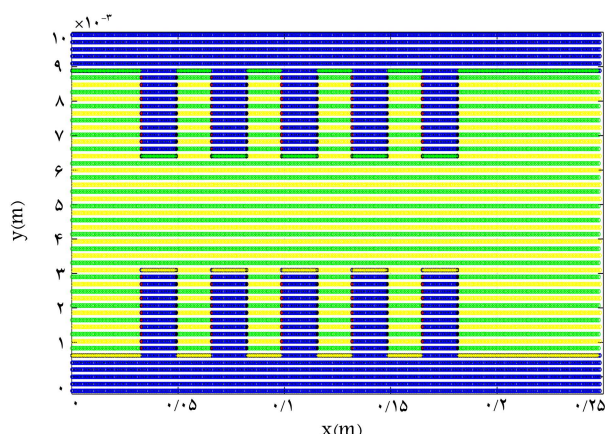
با توجه به حداکثر رساندن مقدار تابع Fit ، عملکرد مناسب در نظر گرفته شده برای مبدل حرارتی را به حداکثر می‌رساند. با این وجود، برای چنین مسائلی بهینه‌سازی

چندهدفه، هیچ راه‌حل واحدی وجود ندارد که به طور همزمان هر تابع هدفی را بهینه کند و با توجه به این واقعیت که هیچ یک از این اهداف را نمی‌توان بدون کاهش کیفیت سایر توابع هدف، بهبود بخشید، احتمالاً تعداد بی‌شمار جواب بهینه پارتو وجود دارد. [۵۲، ۵۳] لازم به ذکر است که این مسئله بهینه‌سازی چندهدفه از دیدگاه‌های مختلف قابل بررسی است و در نتیجه اهداف حل متفاوتی دارد. بنابراین، راه حل‌های بهینه پارتو و همچنین جبهه پارتو برای این مسائل به دست آمده است که مجموعه راه حل‌های بهینه را با مقادیر مختلف w_i نشان می‌دهد.

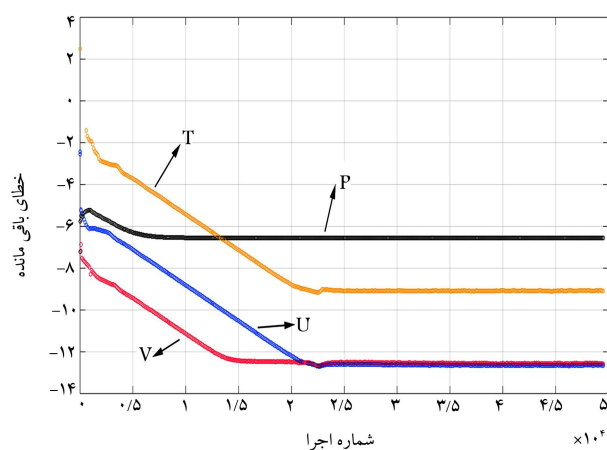
در بخش پردازش تصویر، یک تصویر دیجیتال با فرمت JPEG و با طیف رنگی از سفید تا مشکی که طیفی خاکستری را تشکیل می‌دهد، از کانال‌های دو بعدی تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک (به عنوان نمونه، کانال نشان داده شده در شکل ۱) به کد وارد می‌شود. جهت پردازش تصویر، هر پیکسل از عکس دیجیتالی وارد شده توسط کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب به یک کد مجزا که بیانگر طیف رنگ است، تبدیل می‌شود. حداکثر و حداقل طیف رنگ به ترتیب برای رنگ مشکی و رنگ سفید با کد شناسایی 0 و 255 در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه هر پیکسل بعد از شناسایی با توجه به طیف رنگی که داراست، یک کد شناسایی مشخص پیدا می‌کند. کنتراست 27 و روشی 28 به عنوان دو ابزار فیلتر رنگ در این پژوهش، جهت حذف تمام اختلال‌های (نویز 29) موجود، اعمال شده است. در کد نوشته شده در این پژوهش، تمامی پیکسل‌هایی که مقدار کد شناسایی آنها بالاتر از عدد 200 باشد، به عنوان پیکسلی با رنگ سفید و پایین‌تر از عدد 200 به عنوان پیکسلی با رنگ مشکی در نظر گرفته می‌شود. این روش فیلتراسیون کمک می‌کند تا تصاویر با فرمت دیجیتال در مقیاس طیف خاکستری را به رنگ‌های سیاه و سفید مطلق بدون هیچ نویز و طیف رنگی تبدیل شود. این روش، مقدمه‌یی برای پردازش تصویرهای رنگی با پیکسل‌های بی‌شمار می‌باشد.

در کد نوشته شده، هر پیکسل با پیکسل‌های همسایگی خود مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرد. این کار کمک می‌کند تا تمایز بین میدان سیال و جسم ایجاد گردد. در نتیجه، تمامی لبه‌های سطوح گسترش یافته نسبت به میدان جریان متمایز می‌شود. پس از تشخیص لبه‌ها، سلول‌های محاسباتی جهت تولید شبکه مش مناسب به طور خودکار در اطراف سطوح ایجاد می‌شود. شکل ۲ نمونه‌یی از این شبکه ایجاد شده را نشان می‌دهد.

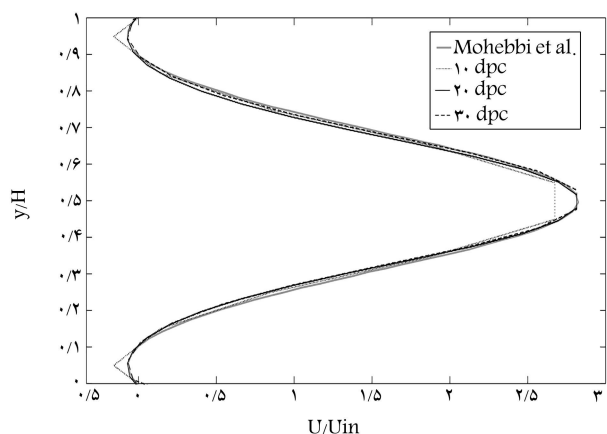
شکل ۳ فلوجارتی از روش حل مسئله را ارائه می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، در ابتدا 200 کروموزوم (معادل 20° ساختار هندسی کانال) مختلف به صورت



شکل ۲. مش محاسباتی تولید شده توسط پردازش تصویر (از کانال ارائه شده در شکل ۱).



شکل ۴. همگرایی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل.

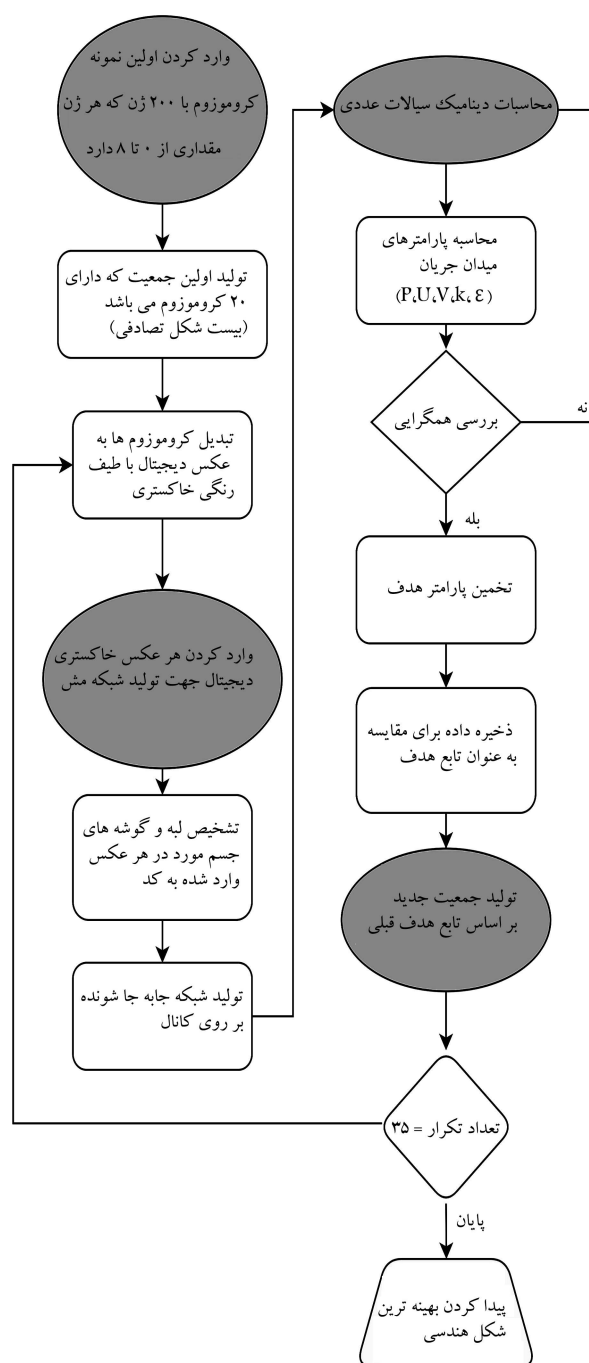


شکل ۵. اعتبار سنجی پیش‌بینی مدل و همچنین مطالعه مش با مقایسه سرعت افقی سیال عبوری در $x/L = 0/3$ و $Re = 40$.

و حرارتی مورد نیاز به منظور محاسبه پارامترهای هدف مورد نظر ذخیره می‌گردند. با محاسبه ترکیبی از این پارامترها، تابع تناسب مورد نظر برای هر ساختار (کروموزوم) مشخص می‌گردد. ملاک تولید نسل بعدی توسط الگوریتم ژنتیک هستند.

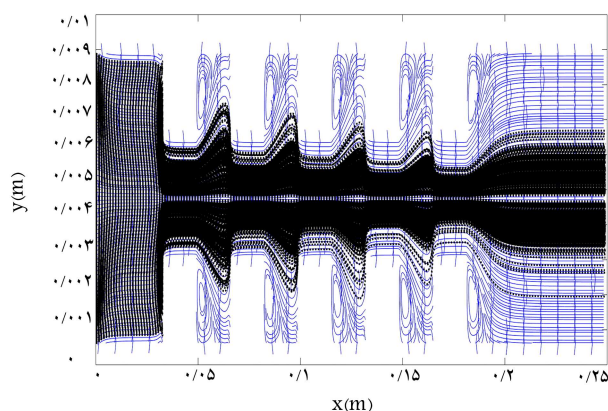
۴. نتایج و بحث

در شکل ۴، مقادیر باقیمانده به‌ازای تکرار برای پارامترهای میدان جریان و به‌منظور نشان دادن میزان همگرایی، نشان داده شده است. برای اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته، حرکت و جابه‌جایی تک ذره‌ی توسط دیدگاه لاگرانژی در امتداد کانال مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج به‌دست آمده با نتایج عددی منتشر شده توسط محبی و همکاران [۵۴] برای یک کانال ساده مطابق شکل ۱، مقایسه شده است. شکل ۵، نتیجه این مقایسه و همچنین مطالعه اثر شبکه را در دقت شبیه‌سازی نشان می‌دهد (با اندازه‌های مختلف، یعنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ نقطه در هر سانتی‌متر (dpc)). نتایج حاکی از تطابق نتایج حاصل از این پژوهش و مرجع [۵۴] می‌باشد. با توجه به هزینه محاسباتی کمتر، مش ۲۰ dpc برای فرایند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. وجود انحراف بین نتایج به‌دست آمده با مرجع ارائه شده در شکل ۵، مربوط به نتایج با اندازه شبکه ۱۰ dpc می‌باشد که نشان دهنده پایین بودن دقت این مش در اجرا و به دست آوردن نتایج می‌باشد.

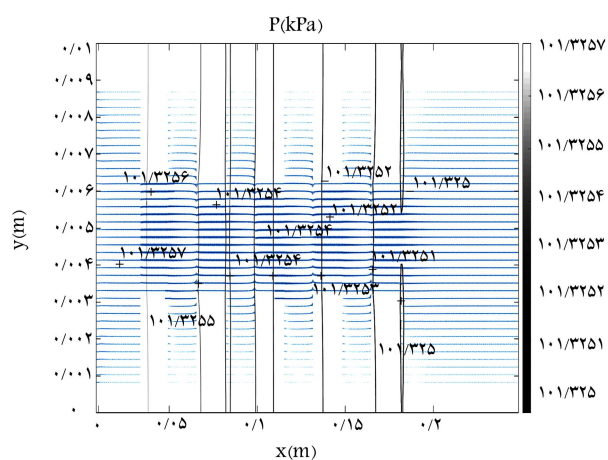


شکل ۳. فلوچارت حل مسئله.

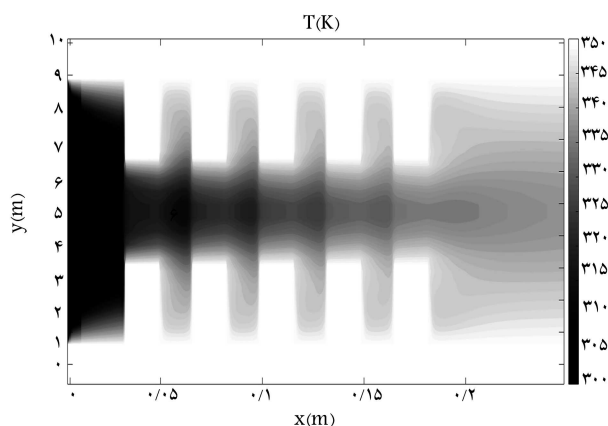
تصادفی توسط الگوریتم ژنتیک به‌عنوان جمعیت اولیه تولید می‌شود. هر کروموزوم از ۲۰۰ ژن (طول میله‌هایی که ناحیه گسترش یافته کانال را تشکیل می‌دهند) تشکیل شده است و هر ژن می‌تواند مقداری بین ۰ تا ۸ را به خود اختصاص دهد. این ساختارهای هندسی به‌صورت تصاویر خاکستری (با مقادیر بین ۰ تا ۲۵۵ برای هر پیکسل) پردازش تصویر می‌شوند و سپس مش محاسباتی مربوط به هر ساختار تولید می‌شود. در این مرحله، لبه‌ها و گوشه‌ها تشخیص داده شده و سپس ناحیه عبور سیال به‌صورت شبکه جابه‌جا شده، مش‌بندی می‌شود. در مرحله بعد، این مش محاسباتی جهت محاسبات عددی معادلات حاکم بر هیدرودینامیک سیال عبوری و همچنین انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفته و پس از همگرایی پارامترهای سیالاتی



شکل ۶. خطوط جریان سیال و مسیر حرکت نانوذرات پیش‌بینی شده توسط مدل برای کانال ارائه شده در شکل ۲.



شکل ۷. بردارهای سرعت و خطوط هم‌فشار پیش‌بینی شده از جریان سیال توسط مدل برای کانال ارائه شده در شکل ۲.



شکل ۸. کانتور دمای سیال پیش‌بینی شده توسط مدل برای کانال ارائه شده در شکل ۲ با دمای دیواره ۳۵۰ درجه کلوین.

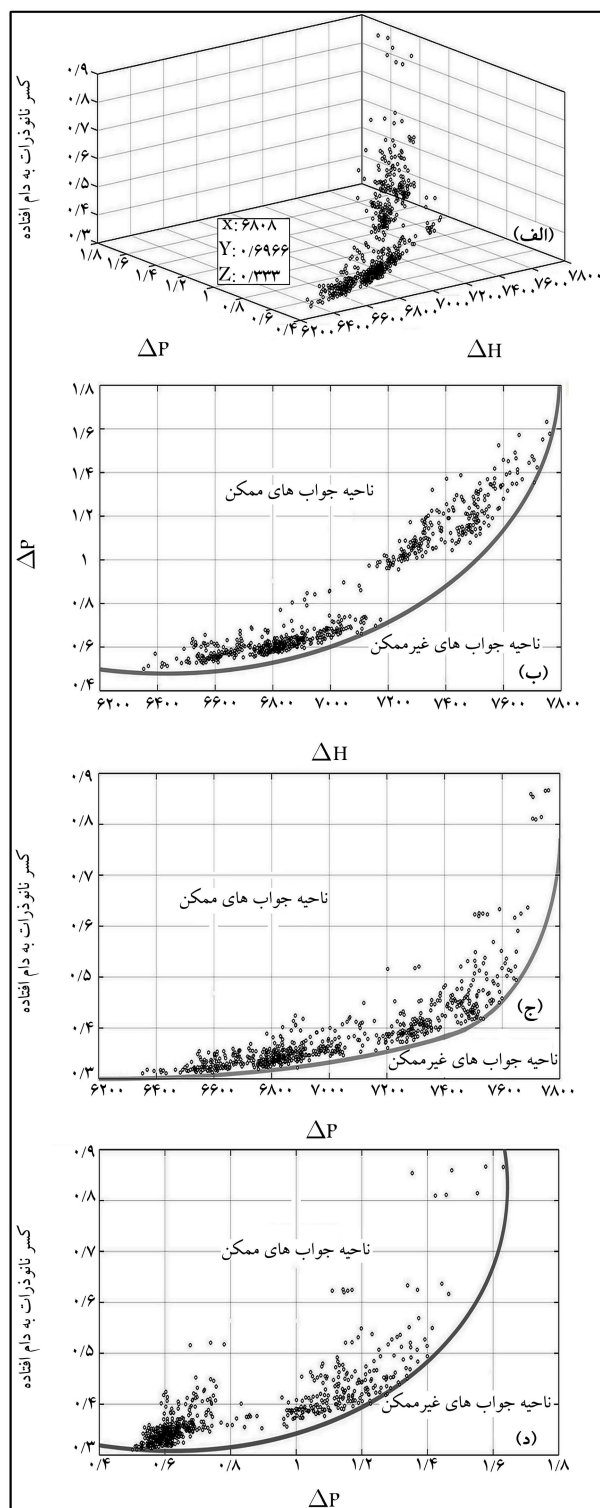
شکل ۱۲ نیز راه‌حل بهینه به‌دست آمده را (به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های پارتو با w_i های نشان داده شده در قسمت قبل) نمایش می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که ساختاری همگرا و اگر تکرار شوند در ناحیه گسترش یافتگی سطوح می‌تواند عملکرد مطلوبی با توجه به نوع توابع هدف و همچنین ضرایب تعریف شده

پس از اعتبارسنجی مدل دینامیک سیالات محاسباتی توسعه‌یافته، برای یک کانال ساده طبق شکل ۱ شبیه‌سازی انجام شد و نتایج شبیه‌سازی برای جریان آب - اکسید مس عبوری کانال در شکل‌های ۶ تا ۸ ارائه شده است. جریان سیال با شرایط ورودی ثابت از سمت چپ وارد کانال می‌شود. بردارهای سرعت، خطوط هم‌فشار و کانتور دمای جریان آب - اکسید مس عبوری از داخل کانال بر روی سطوح گسترش یافته متقارن هم‌اندازه ارائه شده است. خطوط آب رنگ نشان‌دهنده خط‌های جریان و نقاط مشکلی خط سیر نانو ذرات هستند. نواحی گردابه‌های ایجاد شده در بین سطوح گسترش یافته به خوبی دیده می‌شود. هر چند که این کانال نرخ انتقال حرارت قابل قبولی با افت فشار معین برای جریان آب - اکسید مس عبوری دارد، هدف این پژوهش، بهبود عملکرد این کانال به‌عنوان نمونه‌یی از مبدل‌های حرارتی با سطوح گسترش یافته با استفاده از ترکیبی از نانوذرات‌های رایج است. در ادامه، نتایج به‌دست آمده برای سطوح گسترش یافته بهینه شده با حالت ساده مقایسه شده است.

مطابق هدف اصلی این پژوهش که به‌دست آوردن طراحی هندسی بهینه برای کانال با سطوح گسترش یافته برای برآورد اهداف مختلف است، این اهداف می‌توانند نرخ انتقال حرارت بالا (به‌عنوان مثال عدد Nu ، ΔT یا ΔH)، فاکتورهای افت فشار (به‌عنوان مثال ضرایب C_f یا ΔP) برای یک جریان آب عبوری با غلظت ۵٪ نانوذرات اکسیدمس اضافه شده، با توجه به رسوبگذاری درون کانال، باشند. در کنار پارامترهای مذکور، احتمال رسوب این ذرات بر روی دیواره کانال نیز برای به‌دست آوردن ساختار هندسی بهینه کانال با استفاده از رویکرد الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده است. شکل‌های ۹ تا ۱۱ مربوط به نتایج به‌دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

شکل ۹، نمونه‌هایی از دامنه‌های جست‌وجو شده برای متغیرهای ذکر شده (یعنی ارتفاع ۲۰۰ میله متقارن در دو سمت ناحیه گسترش یافته) را برای دستیابی به ساختار بهینه سطوح توسعه یافته، بر اساس جمعیت‌های ایجاد شده توسط این الگوریتم را نشان می‌دهد. در این شکل، محور افقی نشان‌دهنده شماره کروموزوم (در مجموع ۷۰۰ کروموزوم توسط ۳۵ نسل شامل ۲۰ کروموزوم ایجاد شده است) و محور عمودی نشان‌دهنده ارتفاع تعریف شده برای میله مورد نظر در یک جمعیت تولید شده خاص توسط الگوریتم ژنتیک است. همگرایی مقادیر تولید شده برای هر میله با پردازش این الگوریتم بهینه‌سازی در این شکل کاملاً مشخص است. این امر نشان‌دهنده پیشرفت الگوریتم به سمت جواب بهینه ایست که دنبال می‌کند. شکل ۱۰ نیز چگونگی رسیدن تابع تناسب (Fit) تعریف شده به ماکزیمم مقدار ممکن خودش را نشان می‌دهد. در این شکل، کلیه نتایج محاسبه شده برای تمامی کروموزوم‌های بررسی شده در جمعیت‌های مختلف، مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، این الگوریتم حدوداً پس از ۱۵ نسل (کروموزوم‌های شماره ۳۰۰) توانسته به مقدار بیشینه ممکن برای این تابع نزدیک گردد.

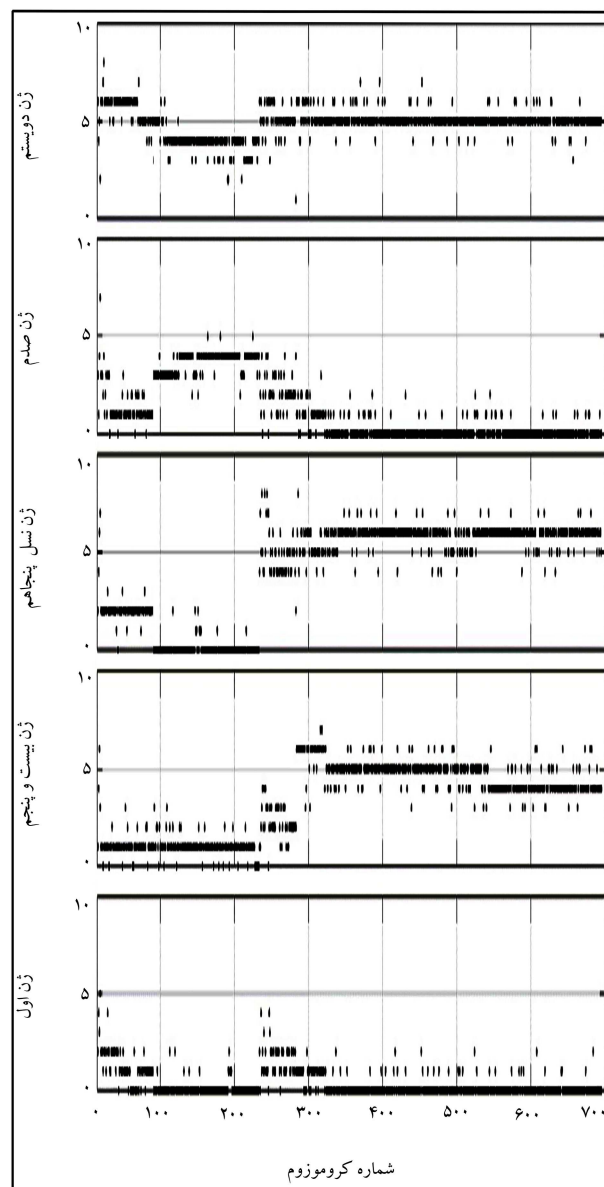
شکل ۱۱ مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای هدف ذکر شده را برای تمامی جمعیت‌های تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. همگرایی نتایج جمعیت‌های تولید شده نهایی به سمت بهترین راه‌حل‌های یافت شده (جبهه پارتو) در این شکل واضح است. این شکل عملکرد قابل قبول کد توسعه یافته برای الگوریتم ژنتیک در این مقاله را تأیید می‌کند. جبهه پارتو یک منحنی مرزی بین مناطق امکان پذیر و غیرممکن جواب‌ها برای مقادیر اهداف تعریف شده برای این مسئله است. پاسخ‌های قرارگرفته در این مرز، راه‌حل‌های پارتو هستند. در این شکل، مرزهای پارتو به‌صورت تخیلی و بر اساس نتایج بهینه‌سازی صورت گرفته مشخص شده‌اند. این مرز، بهترین راه‌حل‌های ممکن را برای مسئله با توجه به مقادیر مختلف ممکن w_i نشان می‌دهند.



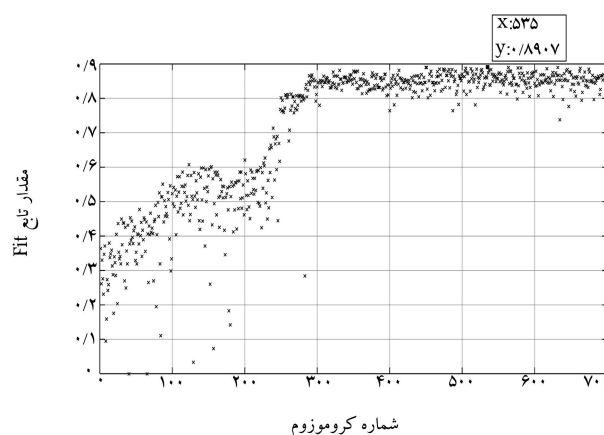
شکل ۱۱. مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای هدف برای تمامی جمعیت‌های تولید شده (نمای سه بعدی و سه نمای دو بعدی از جواب‌ها).



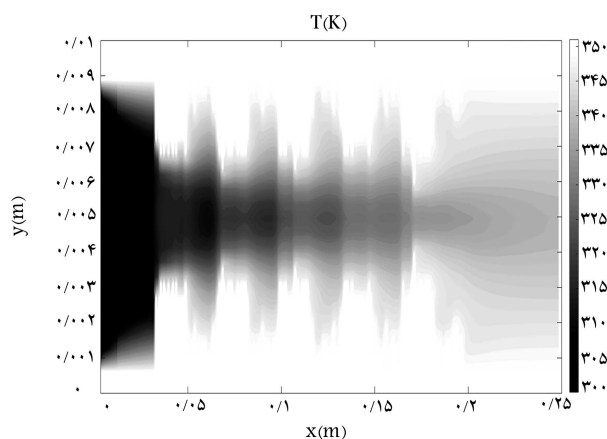
شکل ۱۲. ساختار هندسی بهینه به دست آمده (یکی از راه حل‌های پارتو).



شکل ۹. نمونه‌هایی از دامنه‌های جست‌وجو شده متغیرها برای دستیابی به ساختار بهینه.



شکل ۱۰. حرکت الگوریتم ژنتیک به سمت ماکزیمم مقدار تابع تناسب تعریف (Fit) شده.



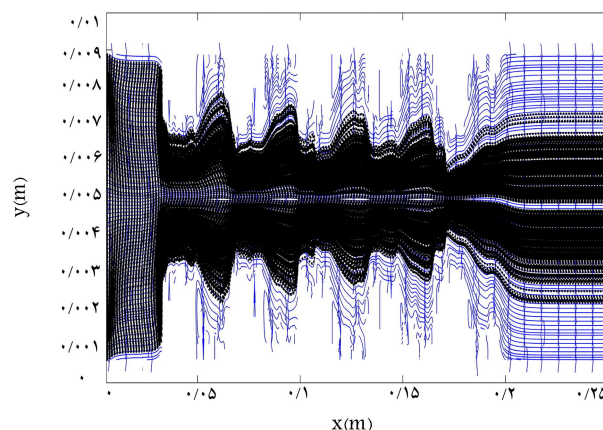
شکل ۱۵. کانتور دمای سیال پیش‌بینی شده توسط مدل برای کانال ارائه شده در شکل ۱۱ با دمای دیواره 350° درجه کلوین.

نانو در خروجی دارای توزیع وسیع‌تری در مقایسه با نتایج مشابه ارائه شده برای کانال ساده (شکل ۶) می‌باشد. دلیل این موضوع، کمتر بودن میزان به دام افتادن نانو ذرات است. مقایسه شکل ۱۴ با نتایج ارائه شده در شکل ۷ برای کانال ساده نشان می‌دهد که کانال با ساختار بهینه، دارای نواحی با سیال کم سرعت و همچنین افت فشار کمتر برای سیال عبوری می‌باشد. این دو هدف، به همراه میزان رسوب کمتر نانو ذرات درون کانال، پارامترهای هدفی بودند که بهینه‌سازی آنها هدف اصلی پژوهش حاضر است.

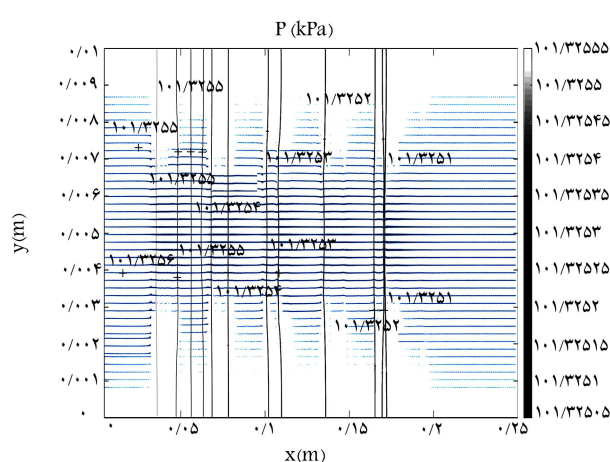
شکل ۱۵ نیز نمایشی از کانتور دمای سیال عبوری از کانال می‌باشد که افزایش دمای آن در طی عبور از این کانال به‌وضوح نمایش داده شده است. در مقایسه با شکل ۸ که همین کانتور را برای کانال با سطوح گسترش یافته ساده نشان می‌دهد، دمای سیال خروجی از این کانال با ساختار بهینه، دارای مقدار بالاتری می‌باشد، زیرا ناحیه سطح تماس سیال با دیواره به مراتب افزایش یافته است. این دمای بیشتر معادل شده با آنتالپی خروجی بیشتر در مقایسه با کانال قبل، یکی از پارامترهای هدف مورد مطالعه در این بهینه‌سازی است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل عددی دو بعدی برای انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال آب - اکسید مس در یک کانال جریان حاوی سیال آرام با سطوح گسترش یافته به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت، توسط نرم افزار متلب به صورت کد توسعه داده شد. در این کد، شبکه محاسباتی بر روی میدان جریان با روش پردازش تصویر ایجاد شد. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای مدل‌سازی جریان آرام پایا پیاده‌سازی و از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی و حل معادلات حاکم استفاده گردید. ارتباط روش حجم محدود با الگوریتم ژنتیک و روش پردازش تصویر در این پژوهش، یک رویکرد جدید برای بهینه‌سازی هندسه کانال را ایجاد کرد. پیش‌بینی‌های مدل حاضر با نتایج عددی که پیشتر ارائه شده بود، صحت محاسبات را تایید نمود. نوآوری اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی طراحی ساختاری ناحیه گسترش یافته درون این کانال با هدف افزایش حداکثری دمای خروجی، کاهش افت فشار جریان نانوسیال عبوری و میزان رسوب‌گذاری مناسب ذرات نانو بر روی ناحیه گسترش یافته با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. برای این منظور، تابع وزنی خطی پارامترها به عنوان تابع هدف برای این مسئله بهینه‌سازی چند هدفه، طبق روش مقیاس‌بندی خطی



شکل ۱۳. خطوط جریان سیال و مسیر حرکت نانو ذرات پیش‌بینی شده توسط مدل برای کانال ارائه شده در شکل ۱۱.



شکل ۱۴. بردارهای سرعت و خطوط هم‌فشار پیش‌بینی شده از جریان سیال توسط مدل برای کانال ارائه شده در شکل ۱۱.

برای آن داشته باشد. شکل ۱۱ بیانگر این است که ساختار هندسی بهینه کانال در مقایسه با کانال نشان داده شده در شکل ۱، میزان افزایش $1/14$ درصدی و ΔH ، کاهش $11/21$ درصدی ΔP و کاهش $8/44$ درصدی میزان رسوب نانو ذرات درون کانال و در مجموع موجب افزایش $24/82$ درصدی تابع Fit تعریف شده، را موجب شده است. سایر جواب‌های پارتو به دست آمده در شکل ۱۱، ساختارهای هندسی بهینه متفاوتی را نشان می‌دهد که به استراتژی‌های ممکن مختلف طرح (یعنی مقادیر متفاوت w_i) توجه می‌کنند.

پیش‌بینی‌های مدل برای جریان آب - اکسید مس عبوری از این کانال بهینه در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ ارائه شده است. بردارهای سرعت، خطوط هم فشار و کانتور دمایی جریان عبوری از این کانال در این شکل‌ها ارائه شده است. واضح است که این کانال نرخ انتقال حرارت بسیار مناسب‌تر با افت فشار و میزان رسوب ذرات نانو کمتری، در مقایسه با کانال ارائه شده در شکل ۱، برای جریان آب - اکسید مس عبوری دارد. بنابراین، می‌توان ادعا نمود که هوش مصنوعی می‌تواند به طراحی بهینه انواع مبدل‌های حرارتی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بپردازد.

در شکل ۱۳، گسترش سطوح در حالت بهینه منجر به کاهش نواحی گردابه‌ها نشان داده شده است که این امر در کاهش افت فشار و به دام انداختن نانو ذرات بسیار حائز اهمیت است و جریان در خروجی آرام‌تر خارج می‌شود. همچنین ذرات

d_p : قطر ذرات جامد (m)؛
 H : ارتفاع ورودی کانال (m)؛
 h : آنتالپی سیال ($kJ.kg^{-1}$)؛
 k : ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال ($W.m^{-2}.k^{-1}$)؛
 P : فشار (Pa)؛
 T : دمای سیال (K)؛
 T_{in} : دمای ورودی سیال (K)؛
 T_w : دمای دیواره (K)؛
 t : زمان (sec)؛
 U_{in} : سرعت ورودی سیال ($m.s^{-1}$)؛
 u : سرعت سیال در جهت x ($m.s^{-1}$)؛
 v : سرعت سیال در جهت y ($m.s^{-1}$)؛
 μ : ویسکوزیته سیال ($Pa.s$)؛
 ρ : دانسیته سیال ($kg.m^{-3}$)؛
 τ_w : تنش برشی در دیواره (Pa)؛

پارتو در نظر گرفته شد. در نهایت، جبهه پارتو و همچنین هندسه بهینه به دست آمد. سپس، میدان سرعت، فشار و دمای جریان نانوسیال آرام عبوری از این ساختار بهینه و همچنین میزان به دام افتادن ذرات نانو در آن ارزیابی شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که ساختار هندسی بهینه کانال در مقایسه با کانال ساده، افزایش $1/14$ درصدی ΔH ، کاهش $11/21$ درصدی ΔP و کاهش $8/44$ درصدی میزان رسوب نانوذرات درون کانال و در مجموع موجب افزایش $24/82$ درصدی تابع Fit تعریف شده را موجب شده است. کانال بهینه در مقایسه با کانال قبلی، نرخ انتقال حرارت بسیار مناسب‌تر، همراه با افت فشار و میزان رسوب ذرات نانوکمتری دارد. بنابراین، می‌توان ادعا نمود که الگوریتم ژنتیک می‌تواند به طراحی بهینه انواع مبدل‌های حرارتی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بپردازد.

نمادها

C_p : ظرفیت حرارتی سیال ($J.kg^{-1}.k^{-1}$)؛

پانویس‌ها

28. Brightness
29. Noise

منابع (References)

1. Solar Collectors
2. Macro and Micro Scales
3. Pareto Front
4. Taguchi Method
5. Baffles
6. MATLAB
7. Mesh
8. Genetic Algorithm
9. Cunningham
10. Gaussian
11. Brownian Force
12. Finite Volume Method
13. Power-Law Grid
14. Staggered Grid
15. SIMPLE Algorithm
16. Under-Relaxation Factors
17. Eulerian
18. Lagrangian
19. Gene
20. Chromosome
21. Generation
22. Survival Probability
23. Average Probability
24. Crossover Probability
25. Mutation Probability
26. Mutation Magnitude
27. Contrast
1. Holman, J.P., 2008. *Heat Transfer (SI Units)* Sie. Tata McGraw-Hill Education.
2. Bergman, T.L. and et al., 2011. *Introduction to Heat Transfer*. John Wiley & Sons.
3. Nie, J.H., Chen, Y. and Hsieh, H.T., 2009. Effects of a baffle on separated convection flow adjacent to backward-facing step. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(3), pp.618-625. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.05.015>.
4. Mohammed, H., Alawi, O.A. and Wahid, M., 2015. Mixed convective nanofluid flow in a channel having backward-facing step with a baffle. *Powder Technology*, 275, pp.329-343. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.046>.
5. Daungthongsuk, W. and Wongwises, S., 2007. A critical review of convective heat transfer of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5), pp.797-817. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.005>.
6. Wang, X.Q. and Mujumdar, A.S., 2007. Heat transfer characteristics of nanofluids: A review. *Interna-*

- tional Journal of Thermal Sciences*, 46(1), pp.1-19. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010>.
7. Mohammed, H.A. and et al., 2012. Buoyancy-assisted mixed convective flow over backward-facing step in a vertical duct using nanofluids. *Thermophysics and Aeromechanics*, 19(1), pp.33-52.
8. Al-Aswadi, A. and et al., 2010. Laminar forced convection flow over a backward facing step using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(8), pp.950-957. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.06.007>.
9. Siavashi, M., Bahrami, H.R.T. and Aminian, E., 2018. Optimization of heat transfer enhancement and pumping power of a heat exchanger tube using nanofluid with gradient and multi-layered porous foams. *Applied Thermal Engineering*, 138, pp.465-474. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.066>.
10. Siavashi, M. and Iranmehr, S., 2019. Using sharp wedge-shaped porous media in front and wake regions of external nanofluid flow over a bundle of cylinders. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, <https://doi.org/10.1108/HFF-10-2018-0575>.
11. Mohebbi, R. and Heidari, H., 2017. Lattice Boltzmann simulation of fluid flow and heat transfer in a parallel-plate channel with transverse rectangular cavities. *International Journal of Modern Physics C*, 28(03), p.1750042. <https://doi.org/10.1142/S0129183117500425>.
12. Mohebbi, R. and et al., 2018. Lattice Boltzmann method based study of the heat transfer augmentation associated with Cu/water nanofluid in a channel with surface mounted blocks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117, pp.425-435. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.043>.
13. Mohebbi, R., Nazari, M. and Kayhani, M., 2016. Comparative study of forced convection of a power-law fluid in a channel with a built-in square cylinder. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 57(1), pp.55-68.
14. Mohebbi, R. and Rashidi, M., 2017. Numerical simulation of natural convection heat transfer of a nanofluid in an L-shaped enclosure with a heating obstacle. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 72, pp.70-84. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.006>.
15. Nazari, M., Kayhani, M. and Mohebbi, R., 2013. Heat transfer enhancement in a channel partially filled with a porous block: Lattice Boltzmann method. *International Journal of Modern Physics C*, 24(09), p.1350060. <https://doi.org/10.1142/S0129183113500605>.
16. Yadav, V. and et al., 2016. Numerical investigation of heat transfer in extended surface microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93, pp.612-622. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.023>.
17. Alamyane, A.A. and Mohamad, A.A., 2010. Simulation of forced convection in a channel with extended surfaces by the Lattice Boltzmann method. *Computers & Mathematics with Applications*, 59(7), pp.2421-2430. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2009.08.070>.
18. Peterson, G. and Ortega, A., 1990. Thermal control of electronic equipment and devices. In *Advances In Heat Transfer*, Elsevier, pp.181-314. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70028-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70028-5).
19. Incropera, F.P., 1988. Convection heat transfer in electronic equipment cooling. *J. Heat Transfer*, 110(4b), pp.1097-1111. <https://doi.org/10.1115/1.3250613>.
20. Kefayati, G.R., 2015. FDLBM simulation of magnetic field effect on mixed convection in a two sided lid-driven cavity filled with non-Newtonian nanofluid. *Powder Technology*, 280, pp.135-153. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.057>.
21. Pirouz, M.M. and et al., 2011. Lattice Boltzmann simulation of conjugate heat transfer in a rectangular channel with wall-mounted obstacles. *Scientia Iranica*, 18(2), pp.213-221. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.03.016>.
22. Biswas, S. and et al., 2015. Analysis of mixed convective heat transfer in a ribbed channel using the Lattice Boltzmann method. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 68(1), pp.75-98. <https://doi.org/10.1080/10407782.2014.965095>.
23. Kefayati, G.R., 2014. Mixed convection of non-newtonian nanofluids flows in a lid-driven enclosure with sinusoidal temperature profile using FDLBM. *Powder Technology*, 266, pp.268-281. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.040>.
24. Afifah, A., Syahrullail, S. and Sidik, N.C., 2015. Natural convection of alumina-distilled water nanofluid in cylindrical enclosure: An experimental study. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 12(1), pp.1-10.
25. Izadi, M., Behzadmehr, A. and Shahmardan, M., 2015. Effects of inclination angle on laminar mixed convection of a nanofluid flowing through an annulus. *Chemical Engineering Communications*, 202(12), pp.1693-702. <https://doi.org/10.1080/00986445.2014.910770>.
26. Beg, O.A. and et al., 2014. Comparative numerical study of single-phase and two-phase models for bio-nanofluid transport phenomena. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 14(01), p.1450011. <http://dx.doi.org/10.1142/S0219519414500110>.
27. Rashidi, M. and et al., 2014. Comparative numerical study of single and two-phase models of nanofluid heat transfer in wavy channel. *Applied Mathematics and Mechanics*, 35(7), pp.831-848.
28. Yang, Y.T. and Lai, F.H., 2011. Numerical study of flow and heat transfer characteristics of alumina-water nanofluids in a microchannel using the lattice Boltzmann method. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(5), pp.607-614. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.03.010>.
29. Sidik, N.A.C. and et al., 2013. Simulation of forced convection in a channel with nanofluid by the Lattice Boltzmann method. *Nanoscale Research Letters*, 8(1), pp.1-8. <https://doi.org/10.1186/1556-276x-8-178>.
30. Demartini, L.C., Vielmo, H.A. and Möller, S., 2004. Numeric and experimental analysis of the turbulent flow through a channel with baffle

- plates. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 26(2), pp.153-159. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782004000200006>.
31. Mokhtari, M. and et al., 2017. Numerical study of mixed convection heat transfer of various fin arrangements in a horizontal channel. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(3), pp.1106-1114. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.12.007>.
32. Siddiqui, M.K., 2007. Heat transfer augmentation in a heat exchanger tube using a baffle. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(2), pp.318-328. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.03.020>.
33. Mellal, M. and et al., 2017. Hydro-thermal shell-side performance evaluation of a shell and tube heat exchanger under different baffle arrangement and orientation. *International Journal of Thermal Sciences*, 121, pp.138-149. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.011>.
34. Dutta, P. and Hossain, A., 2005. Internal cooling augmentation in rectangular channel using two inclined baffles. *International Journal of Heat and fluid flow*, 26(2), pp.223-232. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.08.001>.
35. Guerroudj, N. and Kahalerras, H., 2010. Mixed convection in a channel provided with heated porous blocks of various shapes. *Energy Conversion and Management*, 51(3), pp.505-517. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.10.015>.
36. Berner, C., Durst, F. and DaM McEligot., 1984. Flow around baffles. *J. Heat Transfer*, 106(4), pp.743-749. <https://doi.org/10.1115/1.3246747>.
37. Habib, M. A. and et al., 1994. Experimental investigation of heat transfer and flow over baffles of different heights. *J. Heat Transfer*, 116(2), pp.363-368. <https://doi.org/10.1115/1.2911408>.
38. Cao, X. and et al., 2021. Performance investigation and multi-objective optimization of helical baffle heat exchangers based on thermodynamic and economic analyses. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 176, p.121489. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121489>.
39. de Andrés Honrubia, J.L. and et al., 2021. Development and application of a multi-objective tool for thermal design of heat exchangers using neural networks. *Mathematics*, 9(10), p.1120. <http://dx.doi.org/10.3390/math9101120>.
40. Kaya, I. and Ust, Y., 2021. A new method to multi-objective optimization of shell and tube heat exchanger for waste heat recovery. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, pp.1-18.
41. Saijal, K.K. and Danish, T., 2021. Design optimization of a shell and tube heat exchanger with staggered baffles using neural network and genetic algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(22), pp.5931-5946.
42. Chen, J. and et al., 2021. Experimental investigation of shell-side performance and optimal design of shell-and-tube heat exchanger with different flower baffles. *Heat Transfer Engineering*, 42(7), pp.613-626. <https://doi.org/10.1080/01457632.2020.1716485>.
43. Thondiyil, D. and Kodakkattu, S.K., 2021. Optimization of a shell and tube heat exchanger with staggered baffles using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 46 pp.9983-9988. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.092>.
44. Aslan, E., Taymaz, I. and Islamoglu, Y., 2016. Finite volume simulation for convective heat transfer in wavy channels. *Heat and Mass Transfer*, 52(3), pp.483-497. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1571-x>.
45. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 2007. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Pearson Education.
46. Ansys, I., 2013. Fluent theory guide. ANSYS Inc, USA [(accessed on 27 March 2020)].
47. Abolpour, B. and et al., 2017. Simulation of in-flight reduction of the fine iron ore concentrate by hydrogen. *Chemical Product and Process Modeling*, 12(1). <https://doi.org/10.1515/cppm-2016-0021>.
48. Vajjha, R.S. and Das, D.K. 2009. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(21.22), pp.4675-4682. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.027>.
49. Hwang, C.L. and Masud, A.S.M., 2012. Multiple objective decision making-methods and applications: A state-of-the-art survey. *Springer Science & Business Media*, 164.
50. Deb, K., 2011. *Multi-Objective Optimisation Using Evolutionary Algorithms: An Introduction*. In Multi-Objective Evolutionary Optimisation For Product Design and Manufacturing. Springer. pp.3-34.
51. Srinivas, N. and Deb, K., 1994. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, 2(3), pp.221-248. <https://doi.org/10.1162/evco.1994.2.3.221>.
52. Miettinen, K., 2012. *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Springer Science & Business Media, Vol. 12.
53. Hassanzadeh, H.R. and Rouhani, M., 2010. A multi-objective gravitational search algorithm. In *2010 2nd International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*. IEEE.
54. Mohebbi, R. and et al., 2018. Forced convection of nanofluids in an extended surfaces channel using lattice Boltzmann method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117, pp.1291-1303. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.063>.