

## بهینه‌سازی چندهدفه توسط الگوریتم ژنتیک برای افزایش انتقال حرارت در میکرومبدل‌های حرارتی

رضا بیگزاده<sup>۱\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۰۴ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۱۳	در این تحقیق، بهینه‌سازی انتقال حرارت در میکرولوله‌های منحنی‌شکل با روش بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته است. میزان انتقال حرارت و افت فشار سیال در میکرولوله‌های مارپیچ با ابعاد هندسی متفاوت (شامل شعاع انحنا و طول مستقیم بین خم‌ها) به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، اعداد بدون بعد شامل عدد ناسلت و ضریب اصطکاک، برای تحلیل و بهینه‌سازی نتایج محاسبه شدند. ثابت‌های دو معادله تجربی برای تخمین عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با دقت مناسب، با تکنیک الگوریتم ژنتیک تعیین گردیدند. نتایج، بیانگر خطای نسبی ۷/۴۹ درصد برای تخمین عدد ناسلت و ۹/۷۶ درصد برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک است. در نهایت، این دو معادله تجربی برای تعریف توابع هدف در بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شده، نتایج بهینه‌سازی شامل مجموعه پارتو ارائه گردید. نتایج بهینه‌سازی شامل ابعاد هندسی مناسب برای میکروکانال‌های مورد بررسی جهت طراحی مبدل‌های حرارتی میکروکانالی است.
<b>واژگان کلیدی:</b> انتقال حرارت، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، میکرومبدل حرارتی، میکرولوله منحنی‌شکل، مجموعه پارتو.	

### ۱- مقدمه

گسترش فناوری ساخت دستگاه‌های کوچک‌مقیاس، موجب پژوهش‌های بسیاری در زمینه دستگاه‌های میکروسیال از جمله میکرومبدل‌های حرارتی شده است. در سیستم‌های مختلف میکروسیال، میکروکانال‌های منحنی‌شکل برای تغییر جهت حرکت سیال، افزایش طول مسیر جریان و افزایش انتقال حرارت در یک فضای فشرده مورد استفاده قرار می‌گیرند. بازده بیشتر و مصرف انرژی کمتر، دو مزیت مشترک برای میکروکانال‌ها در تمام کاربردهاست. از کاربردهای میکروکانال‌ها می‌توان به افزایش انتقال حرارت در جریان دوفازی [۱]، خنک‌سازی فرایند احتراق [۲] و میکروآکتورها جهت افزایش بازده واکنش [۳،۴] اشاره کرد. مبدل‌های حرارتی میکروکانالی، کاربردی عملی

از کانال‌هایی با مقیاس میکرو هستند. دلیل گسترش تحقیق در زمینه این نوع مبدل‌های حرارتی، وجود سطح بالای انتقال حرارت نسبت به واحد حجم مبدل است. مبدل‌های ساخته‌شده در مقیاس میکرو، نسبت سطح به حجمی تقریباً صد برابر بیشتر از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای و حدوداً چهارصد برابر بیشتر از مبدل‌های حرارتی لوله‌ای دارند. گاه ضریب انتقال حرارت کلی به‌دست‌آمده توسط مبدل‌هایی با مقیاس میکرو به  $56 \text{ kW/m}^2\text{K}$  می‌رسد. این مقدار حدوداً بیست برابر بیشتر از مقادیر حاصل از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای ساخته‌شده با استفاده از فناوری‌های معمول است [۵ و ۶].  
حسن و همکاران [۷] تأثیر ابعاد هندسی مبدل‌های حرارتی میکروکانال را بر عملکرد حرارتی برای جریان متقابل،

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: r.beigzadeh@uok.ac.ir  
۱. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کردستان

کارال و همکاران [۱۱]، مطالعاتی را روی کانال‌های ماریپیچی با شکل‌های هندسی مختلف انجام دادند. آن‌ها ابتدا در یک حالت خاص، با انجام آزمایش‌ها و بررسی‌های هیدرودینامیکی و حرارتی روی یکی از شکل‌های هندسی کانال ماریپیچی، نتایج آزمایشگاهی را در این نمونه با نتایج شبیه‌سازی CFD مقایسه کردند و پس از پی بردن به اینکه مدل‌سازی CFD در این کانال‌ها نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد، در سایر آرایش‌های هندسی صرفاً با شبیه‌سازی به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی پرداختند.

ژانگ و همکاران [۱۲-۱۴] تحقیقات متعددی را در زمینه انتقال حرارت در کانال‌های ماریپیچی با آرایش و سطح مقطع مختلف انجام دادند. آن‌ها در این تحقیقات، با استفاده از شبیه‌سازی CFD، به بررسی چگونگی الگوی جریان و شدت و نحوه تشکیل این گرداب‌ها در رژیم‌های جریان مختلف پرداختند.

تکنیک مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک با الگو گرفتن از قانون بقای داروین، پارامترهای خود را تنظیم و تصحیح می‌کند و در نهایت، به رابطه‌ای منطقی بین ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله می‌رسد. این تکنیک به شاخه خاصی از علوم محدود نمی‌شود و تقریباً در تمام رشته‌ها استفاده شده است که این، یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد آن است. از جمله کاربردهای الگوریتم ژنتیک در علوم مهندسی، مدیریت انرژی در خودروهای هیبرید پیل سوختی [۱۵]، بهینه‌سازی زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل قطعات در صنعت خودرو [۱۶] و بهینه‌سازی کنترلر فشار در تونل باد فراصوت [۱۷] می‌توان نام برد.

احمدی و بطحایی [۱۵] راهبردهای کنترل منطق فازی در خودروهای هیبرید پیل سوختی و باتری را توسط الگوریتم ژنتیک بهینه کردند. راهبردهای بهینه‌شده به صورت برخط قابل استفاده هستند و نتایج قابل قبولی را به دنبال خواهند داشت.

گاسلین و همکاران [۱۸] در مقاله‌ای مروری، بحث جامعی را درباره استفاده از الگوریتم ژنتیک در مسائل مربوط به انتقال حرارت ارائه دادند. این تحقیق، مسائل بهینه‌سازی (تعیین بهترین میزان بازده حرارتی در مقابل کمترین هزینه)، تخمین خواص حرارتی (مانند ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه) و همچنین ارائه روابط

بررسی کردند. روش‌های عددی برای حل معادلات سه‌بعدی جریان و انتقال حرارت، جهت تعیین تأثیر شکل و اندازه میکروکانال‌ها بر بازده حرارتی استفاده شد. کانال‌هایی با مقاطع دایره‌ای، مربعی، مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای مطالعه شدند که سطح مقطع دایره، بهترین عملکرد را از نظر انتقال حرارت و هیدرودینامیک داشت.

تحلیل عددی جریان توسعه‌یافته برای مبدل‌های حرارتی میکروکانالی با جریان موازی توسط النیمر و همکاران [۸] مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مطالعه‌شده در این تحقیق عبارت‌اند از: عدد نادسن<sup>۱</sup>، نسبت ظرفیت حرارتی، کارایی و تعداد واحدهای انتقال<sup>۲</sup>. نتایج بیانگر این بود که با افزایش عدد نادسن، پخش دمایی در طول دیواره افزایش می‌یافت. همچنین افزایش تعداد واحدهای انتقال، باعث افزایش ضریب تأثیر می‌شود، در حالی که افزایش نسبت ظرفیت حرارتی منجر به کاهش ضریب تأثیر و عدد نادسن خواهد شد.

یانگ و همکاران [۹] به بررسی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی میکروکانال‌های منحنی شکل با شعاع انحنای مختلف پرداختند. میکروکانال‌هایی با قطر هیدرولیک ۱۶۷ تا ۱۸۲ میکرومتر در آزمایش‌ها مورد مطالعه قرار گرفتند. مشاهده شد که ناحیه گذر از جریان آرام به درهم، تحت تأثیر شعاع انحنای میکروکانال است. همچنین اثر شعاع انحنا روی ضریب اصطکاک بررسی شد و مشاهده گردید که با افزایش شعاع انحنا، ضریب اصطکاک میکروکانال کاهش می‌یابد. با استفاده از مدل‌سازی عددی، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که معادله ناویر-استوکس در شکل معمول خود برای این سیستم صادق نیست و نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی دارای تفاوت فراوان هستند. برای رفع این مشکل و تطبیق مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی، از مدل زبری-ویسکوزیته<sup>۳</sup> استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی، تطبیق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت.

چو و همکاران [۱۰] نتایج تجربی را برای رفتار آب در میان میکروکانال‌های منحنی شکل، با مقطع مستطیلی و با نسبت سطح مقطع و همچنین شعاع انحنای مختلف، در محدوده رینولدز ۱۰ تا ۶۰۰ ارائه کردند. آن‌ها نتایج آزمایشگاهی به دست آمده را با نتایج حاصل از آنالیز عددی و همچنین روابط تجربی موجود، مقایسه کردند.

<sup>3</sup> Viscous-Roughness

<sup>1</sup> Knudsen number, Kn

<sup>2</sup> Number of Transfer Units, NTU

اصطکاک ارائه گردیدند که ثابت‌های این معادلات نیز توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شدند. نتایج بهینه‌سازی می‌تواند در برآورد اقتصادی طراحی میکرومبدل‌های حرارتی از جنبه افزایش میزان انتقال حرارت (اثر مثبت) یا افزایش انرژی پمپاژ (اثر منفی) سیال، مورد توجه قرار گیرد. به‌طور ویژه، اهمیت و نوآوری مقاله عبارت است از: بررسی آزمایشگاهی شکل خاصی از میکرومبدل‌های حرارتی، ارائه معادلات تجربی با دقت بالا برای آن‌ها و استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه توسط الگوریتم ژنتیک به‌عنوان روشی کارآمد جهت یافتن ابعاد هندسی مناسب با توجه به اولویت طراحی از نظر انتقال حرارت بیشتر یا نیروی پمپاژ کمتر.

## ۲- بخش تجربی و روش آزمایش

مجموعه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده برای تعیین مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار در میکرولوله‌هایی با ابعاد هندسی متفاوت، در شکل (۱) نمایش داده شده است. آزمایش‌ها با هدف بررسی تأثیر هندسه میکرولوله‌های مارپیچ بر عملکرد حرارتی-هیدرولیکی این مبدل‌های حرارتی انجام گرفت.

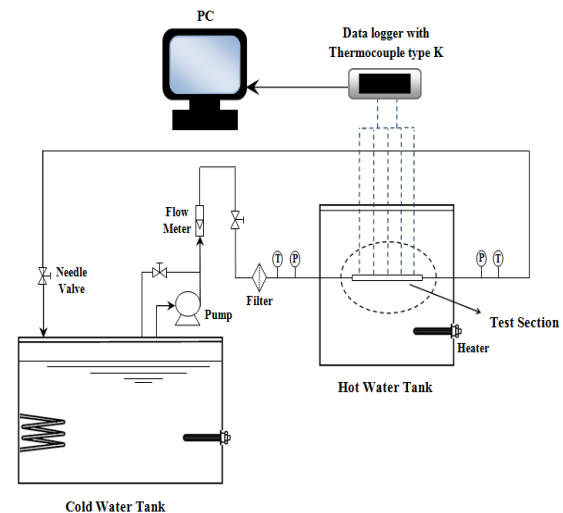
در آزمایش‌ها ۶ میکرولوله مارپیچی با ابعاد هندسی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت.

ابعاد هندسی مورد بررسی در لوله‌های مارپیچی، شعاع انحنا و طول صاف بین خم‌ها است. ابعاد و جزئیات هندسی میکرولوله‌های مارپیچی مورد بررسی، شامل شعاع انحنا ( $R_c$ )، طول مستقیم بین خم‌های منحنی ( $L_s$ )، طول کلی میکروکانال‌ها ( $L$ ) و نسبت‌های بدون بعد  $R_c/d$  و  $L_s/d$  در جدول ۱ و محدوده متغیرهای مورد بررسی در جدول ۲ لیست شده‌اند. قطر ( $d$ ) تمامی لوله‌های استفاده‌شده در آزمایش‌ها ۰/۷۸۷۴ میلی‌متر است. چند نمونه از میکرولوله‌های استفاده‌شده در آزمایش‌ها و شماتیک آن همراه با ابعاد هندسی اصلی در شکل (۲) نشان داده شده است.

در آزمایش‌ها آب سرد به درون میکرولوله‌ها هدایت شده، دمای بیرون میکرولوله‌ها ثابت و در دمایی بیشتر از جریان ورودی به لوله‌ها نگه داشته می‌شود. برای ثابت نگه داشتن دمای سیال بیرون این میکرولوله‌ها از یک حمام آب گرم استفاده شد که مجهز به سیستم کنترل دماست.

تجربی (مانند تخمین ضریب انتقال حرارت) را شامل می‌شود.

نجفی و همکاران [۱۹] یک مبدل حرارتی صفحه و پره را از نظر انرژی و هزینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کردند. متغیرهای هندسی مبدل حرارتی به‌عنوان پارامترهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. ممیز و همکاران [۲۰] ثابت‌های یک معادله توانی را برای تخمین عدد استانتون<sup>۱</sup> در یک لایه نازک بر روی یک سطح مقعر با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه کردند.



شکل ۱- مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده برای بررسی انتقال حرارت و افت فشار در میکرولوله‌ها

آن‌ها با استفاده از شناخت فیزیکی مسئله روابطی توانی با متغیرهای مختلف ارائه و دقت فرمول‌ها را مقایسه کردند. استفاده از میکروکانال‌های منحنی‌شکل، مزایایی از جمله افزایش ضریب انتقال حرارت و امکان استفاده در دستگاه‌های کوچک‌مقیاس دارد؛ ولی معایبی نیز به همراه خواهد داشت. به علت کوچک شدن مجرای عبور سیال و نیز ایجاد جریان ثانویه به دلیل وجود انحنای کانال، افت فشار افزایش خواهد یافت که این مسئله، افزایش انرژی مصرفی پمپاژ را به همراه خواهد داشت. این مسئله، اهمیت بهینه‌سازی ابعاد هندسی میکرومبدل‌های حرارتی را آشکار می‌سازد.

در این تحقیق با به‌کارگیری روش بهینه‌سازی چندهدفه توسط الگوریتم ژنتیک، سعی شده است تا ابعاد هندسی بهینه برای میکروکانال‌های مارپیچ ارائه شود. برای این منظور، دو تابع هدف برای تخمین عدد ناسلت و ضریب

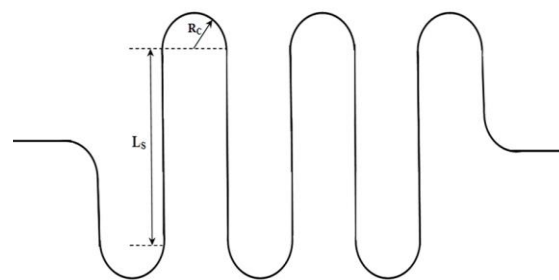
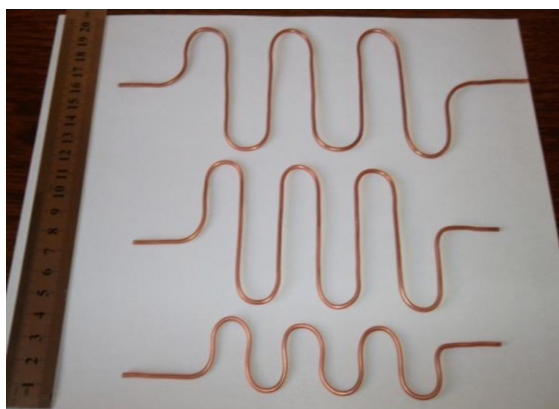
<sup>۱</sup> Stanton number

جدول ۱- جزئیات هندسی میکرولوله‌های مارپیچی

شماره میکرولوله	Rc, cm	Ls, cm	L, cm	Rc/d	Ls/d
۱	۰/۷۵	۵	۴۹/۸۷	۹/۵۲۵	۶۳/۵۰
۲	۱	۵	۵۶/۸۹	۱۲/۷۰۰	۶۳/۵۰
۳	۱/۲۵	۵	۵۵/۱۳	۱۵/۸۷۵	۶۳/۵۰
۴	۱/۵	۵	۶۳/۸۶	۱۹/۰۵۰	۶۳/۵۰
۵	۱	۲/۵	۳۶/۹۶	۱۲/۷۰۰	۳۱/۷۵
۶	۱	۱	۳۴/۸۴	۱۲/۷۰۰	۱۲/۷۰

جدول ۲- محدوده متغیرهای مورد بررسی

متغیر	متغیر
عدد ناسلت (Nu)	۱۳/۴۰ - ۲/۱۶
ضریب اصطکاک (f)	۰/۳۷۵۰ - ۰/۴۳۰۷
عدد رینولدز برای Nu	۲۷۷/۳ - ۳۰۶۱/۷
عدد رینولدز برای f	۲۳۹/۴ - ۳۳۴۰/۹
عدد پرناندل (Pr)	۳/۵۰ - ۵/۴۱
نسبت Rc/d	۹/۵۳ - ۱۹/۰۵
نسبت Ls/d	۱۲/۷۰ - ۶۳/۵۰



شکل ۲- چند نمونه از میکرولوله‌های بررسی شده در آزمایش‌ها و شماتیک آن همراه با ابعاد هندسی اصلی

عدد بدون بعد رینولدز در درجه حرارت حجمی سیال گرم با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (1)$$

در اینجا V سرعت سیال،  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیک و d قطر کانال است.

برای تحلیل هیدرودینامیک سیال در امتداد میکروکانال‌های مارپیچ، از عدد بدون بعد ضریب اصطکاک استفاده می‌شود:

$$f = \frac{2 \Delta P d}{\rho V^2 L} \quad (2)$$

<sup>2</sup> Friction factor, f

آب از مخزن، توسط پمپ سانتریفوژ به سمت میکرولوله جریان می‌یابد. برای تنظیم شدت جریان آب، از شیر سوزنی استفاده شده است. دمای سیال ورودی و خروجی میکرولوله‌ها توسط دو ترموکوپل نوع K اندازه‌گیری شد. فشار جریان ورودی و خروجی نیز با سنسور فشار، اندازه‌گیری و در نمایشگر متصل به آن مشاهده شد. میکرولوله‌ها در آب داخل حمام غوطه‌ور شده، جریان آب سرد از داخل آن عبور داده شد. دمای سطح بیرونی میکرولوله نیز با جوش کردن سه یا پنج ترموکوپل (با توجه به طول لوله) به صورت متقارن و به ترتیب در نزدیک ناحیه ورودی، میانی و خروجی میکرولوله اندازه‌گیری و ثبت گردید. تمام ترموکوپل‌های به کاررفته از نوع K است. از میانگین دماهای اندازه‌گیری شده توسط این ترموکوپل‌ها به عنوان متوسط دمای دیواره برای محاسبه ضریب انتقال حرارت استفاده شد. خواص آب برای هر آزمایش در متوسط دمای سیال (میانگین دمای ورودی و خروجی) محاسبه می‌شود.

### ۳- محاسبه عدد ناسلت<sup>۱</sup> و ضریب اصطکاک<sup>۲</sup>

به منظور تحلیل عملکرد حرارتی- هیدرولیکی میکرولوله‌ها از مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار، یعنی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک استفاده شده است.

<sup>1</sup> Nusselt number, Nu

جامعی را درباره الگوریتم‌های ژنتیک می‌توان در مراجع [۲۲-۲۵] یافت. این روش‌ها به سرعت پس از بخش کوچکی از فضای جست‌وجو به جواب‌های بهینه هم‌گرا شده، به صورت کارآمدی در زمینه‌های مختلف مهندسی به منظور حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده به کار گرفته می‌شوند. با تعریف یک رابطه مناسب که با استفاده از شناخت سیستم تعیین می‌شود، می‌توان ثابت‌های معادله را توسط روش الگوریتم ژنتیک با دقتی بسیار بالا تعیین کرد. الگوریتم ژنتیک با استفاده از یک روش جست‌وجوی عددی تصادفی قادر است مقادیر بهینه ثابت‌ها را تعیین کند. ضعف روش‌های کلاسیک، مانند روش حداقل مربعات در به دست آوردن جواب بهینه کلی را می‌توان توسط الگوریتم ژنتیک جبران کرد. با استفاده از داده‌های آزمایشی رابطه‌ای بین عدد ناسلت، ضریب اصطکاک، عدد رینولدز و نیز اعداد بدون بعد نسبت انحنای و نسبت طول مستقیم به قطر میکروکانال در نظر گرفته شد. در مقالات، به صورت معمول روابط توانی را به کار می‌برند [۲۶-۲۸]:

$$Nu = C_1 Re^{C_2} Pr^{C_3} \left(\frac{R_c}{d}\right)^{C_4} \left(\frac{L_s}{d}\right)^{C_5} \quad (9)$$

$$f = C_1 Re^{C_2} \left(\frac{R_c}{d}\right)^{C_3} \left(\frac{L_s}{d}\right)^{C_4} \quad (10)$$

که در آن،  $C_i$  ثابت معادله است. توابع خطا<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده بین داده‌های هدف و پیش‌بینی به صورت زیر است:

$$E(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Nu_i^{Target} - Nu_i^{Predict})^2 \quad (11)$$

$$E(C_1, C_2, C_3, C_4) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i^{Target} - f_i^{Predict})^2 \quad (12)$$

که در این معادلات،  $N$  تعداد داده‌هاست. فرایند بهینه‌سازی با یک مجموعه جمعیت (راه‌حل) اولیه که به صورت تصادفی تعیین شده‌اند، شروع می‌شود و از طریق تکرارهای (تولید نسل) پی‌درپی به سمت راه‌حل‌های بهتر پیش می‌رود. اجزای اصلی الگوریتم ژنتیک شامل ارزیابی، انتخاب، نخبه‌گرایی<sup>۲</sup>، ترکیب و جهش است که البته نخبه‌گرایی را می‌توان جزء تکمیلی الگوریتم ژنتیک در نظر گرفت.

به طور کلی از سه معیار به‌عنوان معیار توقف جست‌وجوی الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود: ۱. مدت زمان جست‌وجو

$\Delta P$  افت فشار،  $\rho$  دانسیته سیال و  $L$  طول میکروکانال است. نرخ انتقال حرارت به سیال داخل میکرولوله‌های مارپیچ، طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = mC_p(T_o - T_i) \quad (3)$$

که در آن،  $m$  دبی جرمی،  $C_p$  ظرفیت حرارتی ویژه و  $T$  دمای سیال گرم در ورودی و خروجی لوله‌ها است. این میزان، برابر با حرارت منتقل شده از طریق مکانیسم جابه‌جایی از دیواره لوله به سیال داخل لوله است.

$$Q_{Conv} = hA(T_b - \tilde{T}_w) \quad (4)$$

$h$  ضریب انتقال حرارت،  $A$  سطح انتقال حرارت و  $T_b$  درجه حرارت حجمی است. درجه حرارت حجمی متوسط سیال به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_b = \frac{T_i + T_o}{2} \quad (5)$$

درجه حرارت متوسط دمای روی لوله نیز متوسط حسابی دمای تمامی  $n$  نقطه اندازه‌گیری شده بر روی سطح لوله است:

$$\tilde{T}_w = \frac{\sum T_w}{n} \quad (6)$$

که  $T_w$  دمای اندازه‌گیری شده در هریک از نقاط روی لوله است. از برابری معادلات ۳ و ۴، برای تعیین ضریب انتقال حرارت متوسط و نیز عدد ناسلت، مطابق فرمول‌های زیر عمل می‌شود:

$$h = \frac{mC_p(T_i - T_o)}{A(T_b - \tilde{T}_w)} \quad (7)$$

$$Nu = \frac{hd}{k_f} \quad (8)$$

$k_f$  ضریب هدایت حرارتی سیال است.

#### ۴- روش مدل‌سازی

الگوریتم ژنتیک، یک روش جست‌وجو در علم کامپیوتر برای یافتن راه‌حل تقریبی برای بهینه‌سازی است. الگوریتم ژنتیک، نوعی خاص از الگوریتم‌های تکاملی است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی مانند وراثت و جهش بهره می‌برد. الگوریتم ژنتیک معمولاً گزینه‌ای مناسب برای تخمین متغیرها بر مبنای رگرسیون است. این الگوریتم با الهام گرفتن از مراحل تکامل، یک روش جست‌وجوی عددی تصادفی است که ابتدا توسط هلند [۲۱] مطرح شد. مباحث

<sup>2</sup> Elitism

<sup>1</sup> Error (fitness) function

پیش‌بینی‌شده با استفاده از تکنیک‌های تحلیلی ساده و با فرض بدون لزجت بودن سیال است.

در میکروکانال‌های مارپیچی مورد بررسی، افزایش سهم قسمت منحنی‌شکل از کل طول لوله موجب افزایش عدد ناسلت و نیز افزایش ضریب اصطکاک می‌شود. به طور کلی، مسافت طولانی‌تر بین خم‌ها (بخش مستقیم کانال) منجر به افزایش قسمت مربوط به توسعه‌یافتگی جریان بعد از خم‌ها و تضعیف گرداب‌های به‌وجودآمده در خم‌ها می‌شود. از طرفی، مسافت کمتر بین خم‌ها و نزدیک‌تر شدن خم‌ها به یکدیگر منجر به تجدید قوای گرداب‌ها بلافاصله بعد از خم‌ها می‌شود.

بنابراین افزایش ضریب انتقال حرارت توسط تغییر ابعاد هندسی میکروکانال‌ها در نهایت منجر به افت فشار سیال خواهد شد. افت فشار بالای سیال مصرف انرژی پمپاژ بیشتری را به همراه خواهد داشت. در نتیجه، یک اثر مثبت (افزایش میزان انتقال حرارت) با یک اثر منفی (افزایش افت فشار) همراه خواهد بود. این مسئله، اهمیت بهینه‌سازی جهت یافتن ابعاد هندسی مناسب را برای این‌گونه مبدل‌های حرارتی آشکار می‌سازد.

ثابت‌های معادلات ۹ و ۱۰ با استفاده از تکنیک جست‌وجوی الگوریتم ژنتیک تعیین شدند و در نهایت، روابط زیر به دست آمد:

$$Nu = 0.06 Re^{0.432} Pr^{0.275} \left(\frac{R_c}{d}\right)^{0.778} \left(\frac{L_s}{d}\right)^{-0.176} \quad (15)$$

$$f = 3.537 Re^{-0.792} \left(\frac{R_c}{d}\right)^{0.912} \left(\frac{L_s}{d}\right)^{-0.131} \quad (16)$$

با توجه به داده‌های آزمایشگاهی مورداستفاده جهت برازش معادلات بالا، این روابط در گستره پارامترهای طراحی ارائه‌شده در جدول ۲ برای میکروکانال‌های مارپیچ معتبرند. فرمول‌های استفاده‌شده در این تحقیق برای به دست آوردن خطا عبارت‌اند از: متوسط خطای نسبی (MRE) و متوسط مربع خطا (MSE):

$$MRE (\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{|E_i - Y_i|}{E_i} \right) \quad (17)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - Y_i)^2 \quad (18)$$

توسط الگوریتم؛ ۲. هم‌گرایی به مقدار خطای مورد نظر؛ ۳. تعداد نسل‌های ایجادشده. در این مطالعه، از تعریف تعداد نسل‌های تولیدشده به‌عنوان معیار توقف جست‌وجوی الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

در این تحقیق، پارامترهای بهینه‌سازی استفاده‌شده شامل ۴۰۰ تکرار تولید نسل، جمعیت اولیه جست‌وجو شامل ۱۰۰ کروموزوم، احتمال ترکیب ۰/۸ با تابع ترکیب متوسط و احتمال جهش ژنتیکی ۰/۰۱ است. تولید نسل با رسیدن به پاسخ مطلوب، متوقف می‌شود.

بهینه‌سازی هم‌زمان چند تابع هدف را بهینه‌سازی چندهدفه می‌نامند. بسیاری از مسائل واقعی مهندسی شامل یافتن بیشینه یا کمینه چند تابع هدف به‌صورت هم‌زمان است. در مسائلی که با بهینه‌سازی چند تابع مواجه هستند، پاسخ یکتا وجود ندارد. بنابراین در بهینه‌سازی چندهدفه، هدف، یافتن مجموعه‌ای از راه‌حلهایی است که به پاسخ‌های بهینه پارتو<sup>۱</sup> معروف هستند. الگوریتم ژنتیک، یک روش بهینه‌سازی مناسب برای یافتن پاسخ‌های پارتو، به‌منظور حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است.

در این تحقیق برای به دست آوردن پارامترهای هندسی بهینه مربوط به میکرولوله‌های مارپیچ که منجر به کمترین افت فشار (ضریب اصطکاک) و بیشترین انتقال حرارت (عدد ناسلت) شوند، از روش بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. بنابراین دو تابع هدف برای بهینه‌سازی به‌صورت زیر تعریف شدند:

$$OF_1(\delta, \gamma, Re) = 1/(1 + Nu) \quad (13)$$

$$OF_2(\delta, \gamma, Re) = f \quad (14)$$

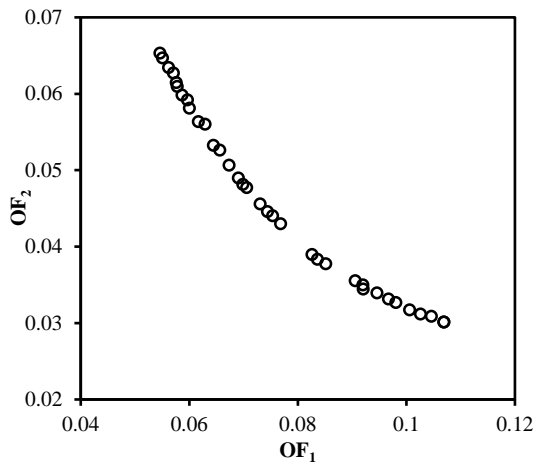
کمینه کردن دو تابع هدف  $OF_1$  و  $OF_2$  موجب یافتن به ترتیب بیشترین عدد ناسلت و کمترین ضریب اصطکاک می‌شود.

## ۵- بحث و بررسی نتایج

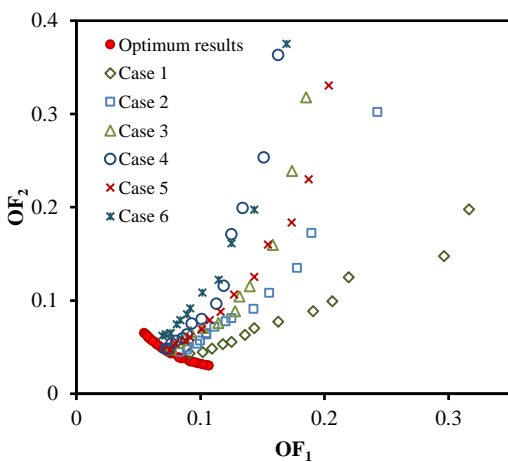
در کانال‌های مارپیچ نیروی گریز از مرکز وارد به سیال، منجر به ایجاد جریان ثانویه<sup>۲</sup> می‌شود که این امر در نهایت، موجب افزایش میزان افت فشار و انتقال حرارت سیال خواهد شد. در دینامیک سیالات، یک جریان ثانویه، یک جریان نسبتاً کوچک اضافه‌شده بر جریان اولیه است، جایی که جریان اولیه معمولاً بسیار مطابق بر الگوی جریان

<sup>2</sup> Secondary flow

<sup>1</sup> Pareto



(الف)



(ب)

شکل ۳- الف) نقاط بهینه پاسخ‌های پارتو، ب) مقادیر  $OF_1$  و  $OF_2$  برای داده‌های آزمایشگاهی

همچنین سه متغیر مورد نظر برای بهینه‌سازی ( $Re$ ,  $Rc/d$ ,  $Ls/d$ ) و مربوط به مجموعه پارتو در شکل (۴) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر بهینه عدد رینولدز تقریباً ثابت و نزدیک به بالاترین حد خود قرار دارد که دلیل آن، مقادیر بیشتر عدد ناسلت و مقادیر کمتر ضریب اصطکاک در این اعداد رینولدز است. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک، نسبت  $Rc/d$  افزایش و نسبت  $Ls/d$  کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، عدد رینولدز تأثیری بسزا بر مجموعه پارتو حاصل از بهینه‌سازی دارد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بیشتر عدد ناسلت و مقادیر کمتر ضریب اصطکاک در اعداد رینولدز بالاتر حاصل می‌شوند. بنابراین پارامترهای هندسی بهینه باید در یک عدد رینولدز مشخص تعریف شوند.

در این معادلات،  $N$  تعداد داده‌ها،  $E$  داده آزمایشی و  $Y$  داده تخمینی است.

مقادیر متوسط خطای نسبی و متوسط مربع خطا برای معادله ۱۵ جهت تخمین عدد ناسلت در میکرولوله‌های ماریچ به ترتیب  $0.2896$  و  $7.49\%$  درصد است. این مقادیر برای معادله ۱۶ در پیش‌بینی ضریب اصطکاک میکروکانال‌ها به ترتیب  $2.07 \times 10^{-4}$  و  $9.76\%$  درصد است.

برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در معادلات ۱۳ و ۱۴ از معادلات تجربی ۱۵ و ۱۶ استفاده شد. برای هماهنگ‌سازی دو تابع، مقدار متوسط عدد پرنتل ( $4/43$ ) در نظر گرفته شد. محدوده عدد رینولدز استفاده‌شده تقریباً بین ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ بوده و محدوده پارامترهای هندسی  $Rc/d$  و  $Ls/d$  در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

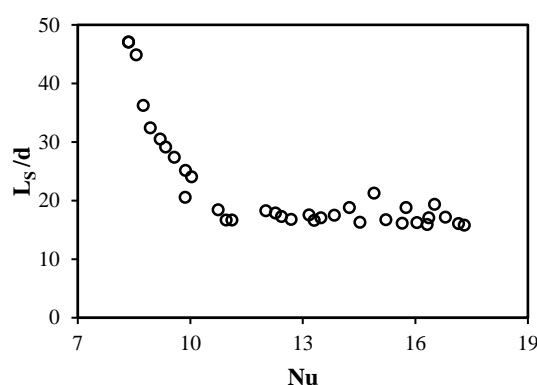
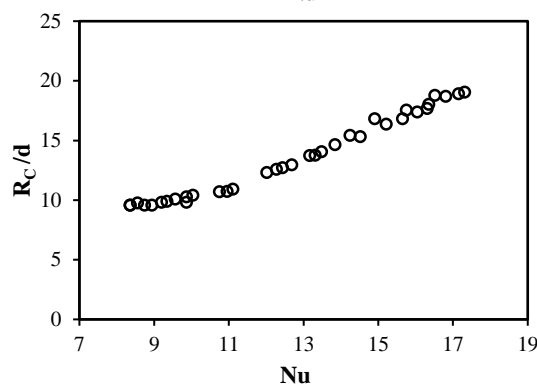
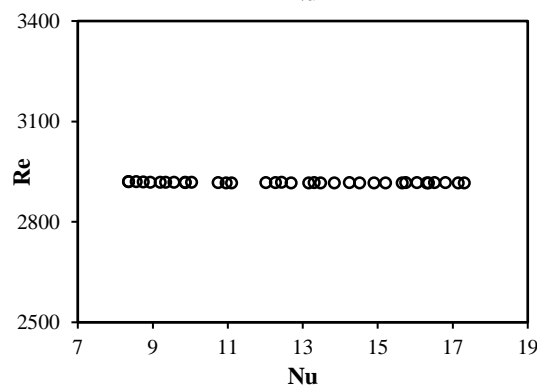
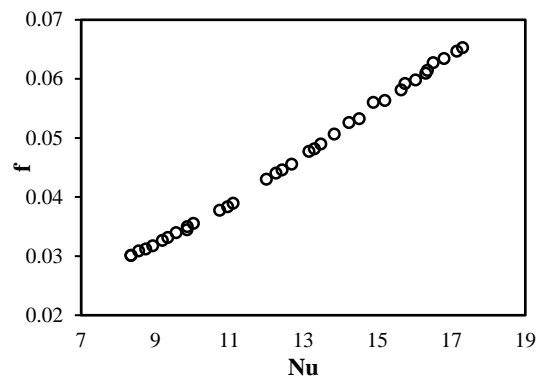
نتایج بهینه‌سازی در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند. شکل (۳ الف) نشان‌دهنده نتایج منحنی بهینه پارتو است که تضاد بین توابع هدف (معادلات ۱۳ و ۱۴) را بیان می‌کند. در واقع تمام نقاط ارائه‌شده در منحنی پارتو، نقاط بهینه حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه‌اند که این قابلیت را برای طراح میسر می‌سازند که با توجه به اولویت مورد نظر، فاکتورهای طراحی را انتخاب کند. مقادیر معادل  $OF_1$  و  $OF_2$  برای داده‌های آزمایشگاهی در شکل (۳ ب) نشان داده شده است. هریک از شش میکرولوله مورد آزمایش (که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است) در ۱۳ سرعت جریان مختلف یا در واقع در ۱۳ عدد رینولدز مورد بررسی قرار گرفته، عدد ناسلت ( $Nu$ ) و ضریب اصطکاک ( $f$ ) در این اعداد رینولدز محاسبه شدند. شکل (۳ ب) مقادیر  $OF_2$  ( $f$ ) بر حسب  $OF_1$  ( $1/(1+Nu)$ ) است. نقاط قرمز در این شکل همان نقاط ارائه‌شده در شکل (۳ الف) هستند که مقادیر بهینه به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهند. نقاط بهینه در محدوده داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر کمینه توابع هدف هستند.

مقادیر بهینه مربوط به عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در شکل (۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که هر تغییری در پارامترهای هندسی که منجر به افزایش عدد ناسلت یا شدت انتقال حرارت شود، باعث افزایش ضریب اصطکاک یا افت فشار خواهد شد. این مسئله، بیانگر نیاز به روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای یافتن طراحی بهینه میکرولوله‌هاست.

ژنتیک به دست آمده، در جدول ۳ لیست شده‌اند. طراح می‌تواند براساس اولویت و اهمیت انتقال حرارت یا افت فشار، پارامترهای مورد نظر خود را انتخاب کند. تمام مجموعه نقاط ارائه‌شده در جدول ۳ که به مجموعه «پارتو» معروف هستند، نقاط بهینه‌اند، به این صورت که اگر هدف طراح انتخاب پارامترهایی با کمترین مصرف انرژی پمپاژ باشد، بیشترین انتقال حرارت ممکن را نیز به دست می‌آورد و به همین صورت اگر به دنبال افزایش میزان انتقال حرارت باشد، کمترین مقدار ممکن در افت فشار را خواهد داشت.

جدول ۳- تعدادی از نتایج بهینه‌سازی

Re	Rc/d	Ls/d	Nu	f
۳۰۰	۱۹/۰۲	۱۳.۷۰	۶.۶۴	۰.۴۰۲۲
۳۰۰	۱۸/۳۲	۱۴.۶۲	۶.۳۷	۰.۳۸۵۵
۳۰۰	۱۷/۰۲	۱۹.۳۰	۵.۷۳	۰.۳۴۷۴
۳۰۰	۱۵/۳۰	۱۴.۸۷	۵.۵۲	۰.۳۲۶۴
۳۰۰	۱۱/۸۱	۱۴.۷۵	۴.۵۲	۰.۲۵۸۰
۳۰۰	۹/۶۱	۲۸.۰۹	۳.۴۴	۰.۱۹۶۵
۳۰۰	۹/۶۶	۵۴.۷۸	۳.۰۷	۰.۱۸۰۸
۵۰۰	۱۹/۰۵	۱۲.۷۱	۸.۳۹	۰.۲۷۱۴
۵۰۰	۱۷/۵۷	۱۳.۴۴	۷.۸۱	۰.۲۵۰۳
۵۰۰	۱۴/۸۴	۱۳.۷۰	۶.۸۲	۰.۲۱۴۰
۵۰۰	۱۳/۸۹	۱۹.۴۹	۶.۰۹	۰.۱۹۲۴
۵۰۰	۱۱/۱۳	۱۴.۶۶	۵.۳۹	۰.۱۶۳۲
۵۰۰	۱۰/۶۰	۳۱.۱۰	۴.۵۷	۰.۱۴۲۵
۵۰۰	۹/۶۷	۶۳.۴۳	۳.۷۳	۰.۱۱۸۵
۱۰۰۰	۱۹/۰۵	۱۲.۷۰	۱۱.۳۳	۰.۱۵۶۸
۱۰۰۰	۱۶/۷۴	۱۵.۵۹	۹.۸۸	۰.۱۳۵۶
۱۰۰۰	۱۴/۹۱	۱۷.۵۷	۸.۸۴	۰.۱۲۰۲
۱۰۰۰	۱۱/۸۵	۲۰.۲۸	۷.۲۱	۰.۰۹۵۷
۱۰۰۰	۱۰/۴۴	۱۸.۵۹	۶.۶۳	۰.۰۸۶۲
۱۰۰۰	۱۰/۲۲	۳۳.۹۷	۵.۸۷	۰.۰۷۸۱
۲۰۰۰	۱۹/۰۴	۱۲.۷۵	۱۵.۲۷	۰.۰۹۰۵
۲۰۰۰	۱۸/۴۵	۱۵.۱۴	۱۴.۴۵	۰.۰۸۵۹
۲۰۰۰	۱۵/۷۱	۱۲.۹۵	۱۳.۱۱	۰.۰۷۵۸
۲۰۰۰	۱۳/۹۹	۱۴.۹۷	۱۱.۶۸	۰.۰۶۶۹
۲۰۰۰	۱۲/۲۲	۱۲.۸۷	۱۰.۸۰	۰.۰۶۰۳
۲۰۰۰	۱۰/۳۱	۳۹.۰۴	۷.۷۸	۰.۰۴۴۶
۳۰۰۰	۱۹/۰۲	۱۲.۹۰	۱۸.۱۴	۰.۰۶۵۴
۳۰۰۰	۱۶/۰۴	۱۲.۹۱	۱۵.۸۸	۰.۰۵۶۰
۳۰۰۰	۱۳/۹۶	۱۷.۴۲	۱۳.۵۲	۰.۰۴۷۵
۳۰۰۰	۱۲/۳۳	۱۵.۷۷	۱۲.۴۹	۰.۰۴۲۹
۳۰۰۰	۹/۸۶	۲۸.۷۴	۹.۴۵	۰.۰۳۳۴
۳۰۰۰	۹/۵۴	۵۲.۸۶	۸.۲۷	۰.۰۲۹۰



شکل ۴- نقاط بهینه مجموعه پارتو برای پارامترهای بهینه‌سازی

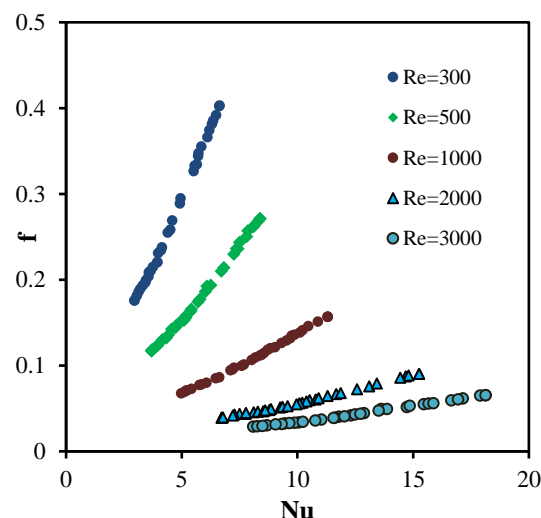
هر مقداری از پارامترهای عملیاتی را می‌توان مطابق هدف و کاربرد مورد نظر انتخاب کرد. مجموعه‌ای از پارامترهای طراحی انتخاب‌شده و نیز عدد ناسلت و ضریب اصطکاک مربوط به آن‌ها که توسط بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم



میکروکانالها بود. افزایش و کاهش هم‌زمان دو پارامتر انتقال حرارت و افت فشار، اهمیت بهینه‌سازی ابعاد هندسی میکروکانالها را آشکار می‌سازد.

با به‌کارگیری داده‌های آزمایشگاهی دو رابطه تجربی جهت تخمین عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در میکروکانال‌های مارپیچ ارائه شدند. ثابت‌های این معادلات توسط تکنیک الگوریتم ژنتیک تعیین گردیدند. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج تخمینی معادلات، بیانگر دقت مناسب روابط بود که نشان‌دهنده توانایی الگوریتم ژنتیک در ارائه معادلات تجربی است.

با تعریف توابع هدف مناسب و بهره‌گیری از بهینه‌سازی چندهدفه توسط الگوریتم ژنتیک، ابعاد هندسی بهینه برای میکروکانال‌های مورد بررسی ارائه شدند. ابعاد هندسی بهینه، ارائه‌دهنده یک تعادل بین ضریب انتقال حرارت و افت فشار سیال هستند که طراح می‌تواند با توجه به اولویت طراحی (انتقال حرارت بیشتر یا نیروی پمپاژ کمتر) آن‌ها را انتخاب کند. این روش بهینه‌سازی می‌تواند به‌عنوان روشی کارآمد در بهینه‌سازی اقتصادی سیستم‌های حرارتی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵- تأثیر عدد رینولدز بر روی مجموعه پارتو

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر پارامترهای هندسی مهم در میکروکانال‌های منحنی‌شکل بر مشخصه‌های حرارتی و هیدرودینامیکی سیال به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. ابعاد هندسی مورد بررسی، شامل شعاع انحنا و طول مستقیم بین خم‌هاست. نتایج، بیانگر افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با افزایش بخش منحنی‌شکل

## مراجع

- [1] L. Yin, P. Jiang, R. Xu, H. Hu and L. Jia, "Heat transfer and pressure drop characteristics of water flow boiling in open microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 137, 2019, pp. 204–215.
- [2] D. Deng, Y. Xie, L. Chen, G. Pi and Y. Huang, "Experimental investigation on thermal and combustion performance of a combustor with microchannel cooling", *Energy*, Vol. 181, 2019, pp. 954–963.
- [3] B. Aghel, E. Heidaryan, S. Sahraie and S. Mir, "Application of the microchannel reactor to carbon dioxide absorption", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 231, 2019, pp. 723–732.
- [4] N. Yasvanthrajan, A. Nabera, S. Salike, D.T. Valan, P. Sivakumar, K. Muthukumar and A. Arunagiri, "An overview on the process intensification of microchannel reactors for biodiesel production", *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, Vol. 136, 2019, pp. 163–176.
- [5] J.J. Brandner, E. Anurjew, L. Bohn, E. Hansjosten, T. Henning, U. Schyulla, A. Wenka and K. Schubert, "Concepts and Realization of microstructure heat exchangers for enhanced heat transfer", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, 2006, pp. 801–809.
- [6] J.J. Brandner, T. Gietzelt, T. Henning, M. Kraut, H. Moritz and W. Pfleging, "Advanced Micro- and Nanosystems" Vol. 5: *Micro Process Engineering*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2006, pp. 267–320.
- [7] M.I. Hasan, A.A. Rageba, M. Yaghoubi and H. Homayoni, "Influence of channel geometry on the performance of a counter flow microchannel heat exchanger", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, 2009, pp. 1607–1618.
- [8] M.A. Al-Nimr, M. Muqableh, A.F. Khdrawi and S.A. Ammourah, "Fully developed thermal behaviors for parallel flow microchannel heat exchanger", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, 2009, pp. 385–390.
- [9] W.H. Yang, J.Z. Zhang and H.E. Cheng, "The study of flow characteristics of curved microchannel", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, 2005, pp. 1894–1907.

- [10] J.C. Chu, J.T. Teng, T.T. Xu, S. Huang, S. Jin, X.F. Yu, T. Dang, C.P. Zhang and R. Greif, "Characterization of frictional pressure drop of liquid flow through curved rectangular microchannels", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 38, 2012, pp. 171–183.
- [11] C.M. Karale, S.S. Bhagwat and V.V. Ranade, "Flow and Heat Transfer in Serpentine Channels", *AIChE Journal*, Vol. 59, 2013, pp. 1814–1827.
- [12] Z. Zheng, D.F. Fletcher and B.S. Haynes, "Laminar heat transfer simulations for periodic zigzag semicircular channels: Chaotic advection and geometric effects", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 62, 2013, pp. 391–401.
- [13] Z. Zheng, D.F. Fletcher and B.S. Haynes, "Chaotic advection in steady laminar heat transfer simulations: Periodic zigzag channels with square cross-sections", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, 2013, pp. 274–284.
- [14] Zheng, Z., D.F. Fletcher and B.S. Haynes, "Transient laminar heat transfer simulations in periodic zigzag channels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 71, 2014, pp. 758–768.
- [۱۵] سامان احمدی و محمدتقی بطحایی، «مدل‌سازی و شبیه‌سازی راهبردهای بهینه مدیریت انرژی در خودروی هیبرید پیل سوختی»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۵، شماره ۵۰، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۱–۱۶.
- [۱۶] محمدعلی بهشتی‌نیا و میلاد نوذری، «ارائه مدلی جهت زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل قطعات در صنعت خودرو (مطالعه موردی: شرکت ایران خودرو)»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۲۹۹–۳۰۹.
- [۱۷] مهرداد بزاززاده، مجتبی دهقان منشادی، امین نظریان شهرابکی و علی شهریاری، «طراحی کنترلر بهینه فشار در یک تونل باد فراصوت دمشی با استفاده از الگوریتم ژنتیک»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۴، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۵۵–۱۶۹.
- [18] L. Gosselin, M. Tye-Gingras and F. Mathieu-Potvin, "Review of utilization of genetic algorithms in heat transfer problems", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, 2009, pp. 2169–2188.
- [19] H. Najafi, B. Najafi and P. Hoseinpoori, "Energy and cost optimization of a plate and fin heat exchanger using genetic algorithm", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, 2011, pp. 1839–1847.
- [20] L. Momayez, P. Dupont, G. Delacourt, O. Lottin and H. Peerhossaini, "Genetic algorithm based correlations for heat transfer calculation on concave surfaces", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, 2009, pp. 3476–3481.
- [21] J. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial System*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [22] D.E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison–Wesley Longman, Inc, 2000.
- [23] Melanie Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press, 1998.
- [24] M. Gen and R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1997.
- [۲۵] علیرضا رضایی و سجاد رنجبران، آموزش کاربردی الگوریتم ژنتیک و فازی در نرم‌افزار MATLAB، انتشارات کتاب پدیده و فرهنگ متین، ایران، ۱۳۸۸.
- [26] H. Khosravi-Bizhaem, A. Abbassi and A.Z. Ravan, "Heat transfer enhancement and pressure drop by pulsating flow through helically coiled tube: An experimental study", *Applied Thermal Engineering*, 2019, In Press.
- [27] S. Huang, H. Chen, X. Zhang, Z. Wan and Y. Tang, "Experimental evaluation of thermal performance in a circular tube with Y-branch insert", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 106, 2019, pp. 15–21.
- [28] T. Ambreen and M.H. Kim, "Heat transfer and pressure drop correlations of nanofluids: a state of art review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 91, 2018, pp. 564–583.