

Multi-objective Optimization of microchannel heat transfer including elastic wall

Farzad Havasi ^{1,*}

¹ Department of mechanical engineering, Tabriz, Iran

E-mails: farzadhavasi@gmail.com

* Corresponding Author

Abstract

In this study, a multi-objective optimization of microchannel performance is conducted using Computational Fluid Dynamics (CFD) and the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method. The primary objective is to enhance heat transfer while minimizing pressure drop within the flow system. The ALE equations are employed to simulate flow and heat transfer in the microchannel, allowing for geometric deformations and boundary displacements. Experimental data are analyzed using software, and multi-objective optimization is performed utilizing the NSGA-II genetic algorithm. The obtained optimal point includes $Re = 10$, $f = 0.125$ Hz, $Ae = 0.165$ mm, and $T_{in} = 279.75$ K) where indicated Reynolds number, frequency of elastic wall, amplitude of elastic wall and temperature), resulting in a thermal performance ratio of $TPR = 1.3294$. The findings of this study contribute to improving microchannel design in cooling systems and other microfluidic applications.

Keywords

Heat transfer, fluid-structure interaction (FSI), microchannel, optimization, convection, Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE), thermal performance ratio (TPR).

بهینه سازی عملکرد میکروکانال های شامل دیواره الاستیک نوسانی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و

مینی تب

فرزاد هواسی^{۱*}

دپارتمان مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی، ایران

ایمیل نویسنده: farzadhavasi@gmail.com

چکیده

در این پژوهش، بهینه سازی چندهدفه عملکرد میکروکانال ها با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و مدل لاگرانژی-اولری اختیاری (ALE) برای بررسی تاثیر برهمکنش سازه-سیال انجام شده است. هدف اصلی، افزایش انتقال حرارت و کاهش افت فشار در سیستم جریان است. برای شبیه سازی جریان و انتقال حرارت در میکروکانال، از معادلات ALE استفاده شده که امکان مدل سازی تغییرات هندسی و جابجایی مرزها را فراهم می کند. داده های تجربی با استفاده از نرم افزار مربوطه تحلیل شده و بهینه سازی چندهدفه با بهره گیری از الگوریتم ژنتیک NSGA-II انجام گرفته است. نتایج نشان می دهند که نقطه بهینه به دست آمده عبارت است از $Re=10$, $f=0.125$ Hz, $Ae=0.165$ mm, $Tin=279.75$ K (به ترتیب نشانگر دمای ورودی، دامنه دیواره الاستیک، فرکانس دیواره الاستیک، و عدد رینولدز می باشند) که منجر به نسبت عملکرد حرارتی $TPR = 1.3294$ * شده است. این پژوهش می تواند به بهبود طراحی میکروکانال ها در سیستم های خنک کننده و سایر کاربردهای میکروفلوئیدیک کمک کند.

کلمات کلیدی: انتقال حرارت، برهم کنش سیال-سازه، میکروکانال، بهینه سازی، همرفت، مدل لاگرانژی-اولری، نسبت عملکرد حرارتی

نام نویسنده مسئول: فرزاد هواسی

ایمیل نویسنده مسئول: farzadhavasi@gmail.com

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

تاریخ (های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۴

۱- مقدمه

پرداخت (Zăvoianu et al., 2017). در نهایت، توجه به جوانب اقتصادی و محیطی در طراحی میکروکانال ها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. بهینه سازی در این زمینه نه تنها می تواند به بهبود عملکرد سیستم ها منجر شود، بلکه می تواند به کاهش مصرف انرژی و هزینه های عملیاتی کمک کند (Gao et al., 2016). با توجه به این موارد، پژوهش در زمینه میکروکانال ها و بهینه سازی آن ها می تواند نقشی کلیدی در پیشرفت فناوری های نوین ایفا کند. برهمکنش سیال-سازه (FSI) به تعاملات میان جریان سیال و سازه های جامد اطلاق می شود که در آن تغییرات نیروهای ناشی از جریان سیال می تواند بر رفتار سازه و بالعکس تاثیر بگذارد. این برهمکنش به ویژه در سیستم های میکروفلوئیدیک و میکروکانال ها از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا طراحی مؤثر میکروکانال ها می تواند منجر به بهبود انتقال حرارت و کاهش افت فشار شود (Wen et al., 2019).

در میکروکانال ها، تغییر شکل های ناشی از فشار سیال و جریان می تواند بر الگوهای جریان تأثیر بگذارد و باعث ایجاد نواحی جدید انتقال حرارت شود. به عنوان مثال، تغییرات در هندسه میکروکانال به واسطه برهمکنش با سیال می تواند منجر به افزایش سطح تماس و بهبود انتقال حرارت شود (Chakraborty et al., 2012). این تغییرات می توانند به شکل انحناهای دینامیکی، انبساط و انقباض سازه ها یا تغییر در شرایط مرزی ایجاد شوند که همگی به افزایش کارایی انتقال حرارت کمک می کنند. تحقیقات اخیر نشان داده اند که به کارگیری مواد نرم و انعطاف پذیر در طراحی میکروکانال ها می تواند به بهبود عملکرد انتقال حرارت منجر شود. با استفاده از مدل سازی های عددی و شبیه سازی های آزمایشی، این رویکردها نشان داده اند که برهمکنش سیال-سازه می تواند به افزایش ضریب انتقال حرارت به طور قابل توجهی کمک کند (Zhao et al., 2023). به طور کلی، طراحی میکروکانال ها با در نظر گرفتن

میکروکانال ها به عنوان ساختارهای میکروسکوپی با ابعاد کوچک، در سال های اخیر به طور گسترده ای در صنایع مختلف و پژوهش های علمی مورد توجه قرار گرفته اند. این کانال ها به دلیل نسبت سطح به حجم بالا و توانایی انتقال حرارت مؤثر، در سیستم های خنک کننده الکترونیکی، میکروپمپ ها، جداسازی بیولوژیکی و آزمایشگاه های روی تراشه کاربرد دارند (Dixit & Ghosh, 2015). در این زمینه، میکروکانال ها به دلیل طراحی بهینه و امکان کنترل دقیق بر روی فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی، توانسته اند به عنوان یک راه حل مؤثر برای چالش های موجود در انتقال حرارت و سیال ها شناخته شوند (Kose et al., 2022).

بهینه سازی عملکرد میکروکانال ها به عنوان یک زمینه تحقیقاتی مهم، می تواند به بهبود کارایی سیستم های مختلف منجر شود. عوامل متعددی مانند هندسه کانال، نوع سیال، و شرایط عملیاتی می توانند تأثیر زیادی بر روی انتقال حرارت و افت فشار در این سیستم ها داشته باشند (Zhuang et al., 2020). به عنوان مثال، هندسه های غیرمتعارف، نظیر میکروکانال های با مقاطع عرضی متفاوت، می توانند به طور قابل توجهی بهبود در انتقال حرارت و کاهش افت فشار را فراهم کنند (Hetsroni et al., 2005). روش های بهینه سازی متنوعی برای بهبود عملکرد میکروکانال ها وجود دارد، از جمله شبیه سازی های عددی، تحلیل های تجربی، و الگوریتم های بهینه سازی. استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی مانند ANSYS و COMSOL به پژوهشگران این امکان را می دهد تا رفتار جریان و انتقال حرارت را به دقت بررسی کنند و پارامترهای مؤثر بر عملکرد میکروکانال ها را شناسایی کنند (Khan & Fartaj, 2011). علاوه بر این، با بهره گیری از تکنیک های آماری و یادگیری ماشین، می توان به تحلیل دقیق تری از داده های آزمایشی و بهینه سازی طراحی میکروکانال ها

در این مقاله از روش ALE استفاده شده است (Donea et al., 2004). معادلات بخش سیال به صورت زیر است:

پیوستگی:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

مومنتم:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + ((U - U_m) \cdot \nabla)U = \nu \nabla^2 U - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (2)$$

انرژی:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (U - U_m) \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T \quad (3)$$

U نمایانگر بردار سرعت سیال، U_m نمایانگر سرعت مش، P نمایانگر فشار جریان سیال، T دما، ρ چگالی سیال، ν ویسکوزیته سینماتیکی، α پخش حرارتی و t نشان دهنده زمان است.

۲.۱.۲ دامنه سازه

از طرف دیگر معادلات بخش سازه به صورت:

$$\rho_s \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} = \nabla \cdot FS \quad (4)$$

که d جابجایی سازه، F تانسور تغییر شکل، S نشان دهنده تانسور تنش دوم Piola-Kirchhoff بصورت زیر تعریف شده است:

$$F = I + \nabla d$$

$$S = 2 \frac{\partial W}{\partial C}$$

I تانسور واحد، W تابع چگالی انرژی و C تانسور تغییرات Cauchy-Green است.

۲.۱.۳ شرایط اولیه و مرزی

شرایط اولیه مسأله به صورت زیر تعریف می شود:

$$U(x, y, 0) = 0, P(x, y, 0) = 0, T(x, y, 0) = 293.15K, d(x, y, 0) = 0$$

دمای دیواره کانال $T_w = 360K$ ، پروفیل سرعت توسعه یافته به صورت:

$$U_{in} = 4\bar{U} \left(\frac{y}{H} \right) (H - y) \quad (5)$$

\bar{U} سرعت میانگین سیال در ورودی کانال است. عدد رینولدز، عدد ناسلت، عدد ناسلت میانگین و ضریب اصطکاک به ترتیب به صورت زیر می باشند:

$$Re = \frac{U D_h}{\nu} \quad (6)$$

$$Nu = \frac{h D_h}{k_f} \quad (7)$$

$$\bar{Nu} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu(x, t) dx \quad (8)$$

$$\bar{Nu} = \frac{1}{L} \int_0^L \bar{Nu}(x) dx \quad (9)$$

$$f = \frac{2 D_h \Delta P}{\rho U^2 L} \quad (10)$$

۲.۲ شبکه مسأله

انتخاب شبکه در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) اهمیت زیادی دارد، زیرا دقت نتایج را مستقیماً تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مطالعه، برای بررسی حساسیت شبکه، چهار شبکه مختلف به کار رفته است. جدول ۲ تعداد سلول‌ها و مقادیر میانگین عدد ناسلت و افت فشار را برای شبکه‌های مختلف در سرعت رینولدز ۶۰۰ برای یک میکروکانال با دیواره الاستیک نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که تفاوت ناچیزی در میانگین عدد نوسلت (۰.۰۰۰۶۲٪) و افت فشار (۰.۰۰۴۴۵٪) بین شبکه‌های سوم (با ۷۳،۰۰۰

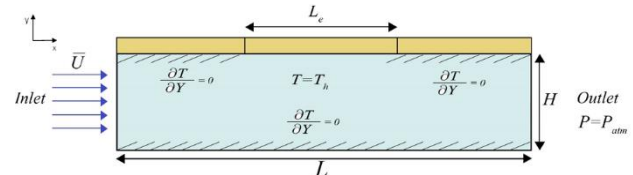
برهمکنش‌های سیال-سازه می‌تواند به عنوان یک استراتژی کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های خنک‌کننده و میکروفلوئیدیک مطرح شود.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در طراحی و بهینه‌سازی میکروکانال‌ها، هنوز هم ضعف‌هایی در زمینه عملکرد میکروکانال‌های با دیواره الاستیک وجود دارد که نیاز به بررسی دقیق‌تری دارد. این گپ‌ها شامل عدم شناخت کامل تأثیر تغییرات هندسی دیواره‌ها بر رفتار جریان و انتقال حرارت و همچنین عدم وجود مدل‌های دقیق برای پیش‌بینی عملکرد این سیستم‌ها است. در این پژوهش، به بررسی این گپ‌ها پرداخته و رویکردهایی برای بهینه‌سازی عملکرد میکروکانال‌های با دیواره الاستیک ارائه می‌شود. با مدل‌سازی برهمکنش‌های پیچیده بین سیال و دیواره‌ها، به شناسایی پارامترهای کلیدی مؤثر بر انتقال حرارت پرداخت. علاوه بر این، یک رابطه جدید برای نسبت عملکرد حرارتی به دست آمده است که می‌تواند به عنوان ابزاری مفید برای مهندسان و محققان در طراحی و بهینه‌سازی میکروکانال‌ها استفاده شود. این همبستگی، رابطه‌ای را بین عدد ناسلت و پارامترهای مختلف هندسی و عملیاتی فراهم می‌آورد و امکان پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد میکروکانال‌ها را فراهم می‌سازد. نتایج این پژوهش می‌تواند به بهبود درک از رفتار میکروکانال‌های با دیواره الاستیک و افزایش کارایی سیستم‌های خنک‌کننده و میکروفلوئیدیک کمک کند.

۲ شرح مسأله

برای بهینه‌سازی میکروکانال با دیواره الاستیک فرضیات زیر را در نظر گرفته شده است:

۱. خواص ثابت سیال
۲. جریان سیال دو بعدی، ناپایا، تراکم ناپذیر، توسعه یافته با رژیم جریان آرام
۳. میکروکانال دارای عرض ۳ میلی‌متر و عرض ۱ میلی‌متر است.
۴. دیواره بالایی میکروکانال الاستیک است.
۵. تمامی دیواره‌ها عایق است بجز ۱ میلی‌متر از میانه دیواره بالایی شکل ۱ شماتیک میکروکانال را نشان می‌دهد. طول کانال با L ، طول بخش الاستیک با L_e و عرض H را نشان می‌دهد. دیواره بالایی از جنس پلی پروپیلن است که خواص آن در جدول ۱ نشان داده شده است.



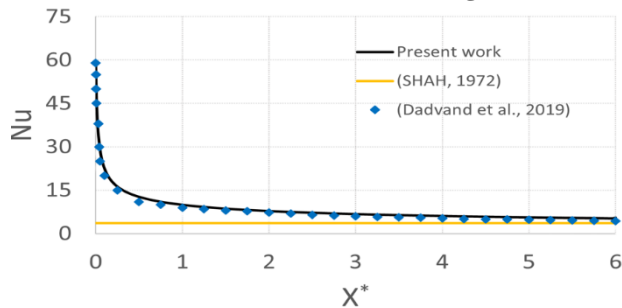
شکل ۱. شماتیک کلی میکروکانال با دیواره الاستیک

جدول ۱. خواص پروپیلن (Turek & Hron, 2006).

| خاصیت | نماد | مقدار | واحد |
|-------------------|----------|-------|-------------------|
| چگالی | ρ_s | ۱۱۰۰ | Kg/m ³ |
| مدول | E_s | ۹۵۸ | Pa |
| ضریب پواسون | ν_s | ۰.۴۲ | - |
| ظرفیت گرمایی | C_p | ۷۰ | J/(Kg.K) |
| ضریب هدایت گرمایی | k_s | ۰.۲ | W/(m.K) |

۲.۱ معادلات حاکم
۲.۱.۱ دامنه سیال

قابلیت اطمینان مدل محاسباتی را برای تحلیل جابجایی اجباری حرارت در میکروکانال تأیید می کند.



شکل ۳. مقایسه بین عدد ناسلت کار حاضر با کارهای پیشین

$$X^* = x/H$$

۳.۲ بهینه سازی چندهدفه میکروکانال با دیواره الاستیک

ین بخش به طراحی جدیدی از میکروکانال می پردازد که شامل یک سطح ارتجاعی نوسانی است. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر این نوع تعامل ساختاری-سیالی (FSI) بر عملکرد انتقال حرارت است. تمرکز اصلی بر درک تأثیر فرکانس و دامنه سطح نوسانی بر انتقال حرارت می باشد. سطح ارتجاعی با فرکانس نوسان (f) و دامنه (Ae) مشخص می شود. نسبت دامنه به عرض کانال در محدوده‌ای از ۰.۰۵ تا ۰.۳۳ تغییر داده می شود. تأثیر فرکانس بر عملکرد انتقال حرارت از طریق عدد بدون بعد استروهال (Strouhal number) مطالعه می شود. عدد استروهال به عنوان حاصلضرب فرکانس و طول ویژگی تقسیم بر سرعت سیال تعریف می شود ($St=f \cdot U/D_H$) فرکانس در بازه ۰.۱۲۵ تا ۱ هرتز بررسی می شود. علاوه بر این، تأثیر عدد پراتل (Pr) بر میانگین زمانی عدد ناسلت که دمای ورودی از ۲۷۹.۷۵ تا ۳۰۰ کلون تغییر می کند، مورد بررسی قرار میگیرد. عدد پراتل نمایانگر اهمیت نسبی انتشار مومنتوم (به دلیل ویسکوزیته) و انتشار حرارتی (به دلیل هدایت حرارتی) در یک سیال است. عدد پراتل یک عامل بدون بعد حیاتی در تحلیل انتقال حرارت است که بینش‌هایی در مورد رفتار سیال و توانایی آن در انتقال حرارت به طور مؤثر فراهم می آورد. طراحی آزمایش و تحلیل داده‌ها نیز با استفاده از نرم افزار Design Expert انجام شده است. از طراحی مرکب مرکزی (CCD) برای ایجاد ماتریس آزمایشی استفاده شده است که اطمینان می دهد فضای آزمایشی به طور جامع بررسی شود و امکان ارزیابی اثرات خطی و درجه دوم متغیرهای مستقل بر پاسخ فراهم آید. جدول ۳ متغیرهای فرآیندی و داده‌های CFD مربوطه Nu_{CFD} را ارائه می دهد. متغیرهای مستقل در بازه‌های زیر تغییر می کنند: عدد رینولدز (Re) از ۱۰ تا ۱۵۰۰، عدد پراتل (Pr) از ۰.۷۱۷۱۸ تا ۰.۷۱۸۶۸، فرکانس از ۰.۱۲۵ تا ۱ هرتز و دامنه بدون بعد (Ae/H) از ۰.۰۵ تا ۰.۳۳.

یک رابطه دارای ضریب تعیین (R^2) بسیار عالی به مقدار ۰.۹۸۸ و خطای نسبی میانگین ۱.۷٪ داده شده است. این مقدار R^2 نشان می دهد که مدل ۹۸.۸٪ از تغییرات داده‌ها را توضیح می دهد. به عبارت دیگر، مدل بسیار خوب قادر است رابطه میان متغیرها را شبیه سازی کرده و می تواند به طور قابل اعتماد برای پیش بینی در دامنه داده‌هایی که برای توسعه آن استفاده شده‌اند، به کار رود. بنابراین، معادله (۱۱) می تواند برای برآورد نسبت عملکرد حرارتی در شرایط مشابه برای طراحی‌ها و تحلیل‌های آینده استفاده شود.

$$TPR = 101.99(Re^{-0.0412} Pr^{13.023} f^{0.0015} \frac{Ae}{H})^{-0.0114}$$

(۱۱)

سلول) و چهارم (با ۱۳۰,۰۰۰ سلول) وجود دارد؛ از این رو، شبکه سوم با ۷۳,۰۰۰ سلول برای ادامه شبیه سازی‌ها مناسب تشخیص داده شد.

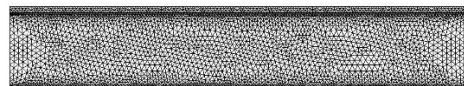
شکل ۲ شبکه محاسباتی را در ناحیه FSI (قسمت میانی صفحه بالایی) نشان می دهد که از ترکیبی از عناصر مثلثی و چهارضلعی تشکیل شده است. در این ناحیه، به منظور ثبت دقیق اثرات لایه مرزی، وضوح شبکه در نزدیکی دیواره بالاتر است (شکل ۲ الف). همچنین، در شبیه سازی‌های ALE (روش‌های شبکه متحرک)، شبکه اطراف جسم جامد همراه با حرکت آن تغییر شکل می دهد که در شکل ۲ ب نشان داده شده است.

جدول ۲. میانگین زمانی و مکانی عدد ناسلت و افت فشار برای

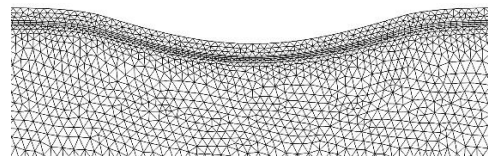
$$Re=600 \text{ و } \frac{Ae}{H}=0.19 \text{ و } f=0.5 \text{ Hz}$$

| # | مورد ۱ | مورد ۲ | مورد ۳ | مورد ۴ |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| تعداد | ۱۱۲۵ | ۲۵۵ | ۷۳۰۰ | ۱۳۰۰ |
| تعداد سلول | ۰ | ۵۷ | ۰ | ۰ |
| \bar{Nu} | ۷۹.۱۱ | ۰.۱۱ | ۹۳.۱۱ | ۹۳.۱۱ |
| | ۶۷۵ | ۸۷۲ | ۲۰۳ | ۱۲۹ |
| ΔP (pa) | ۲۱.۹۳ | ۰.۲۱ | ۴۷.۲۲ | ۴۸.۲۲ |
| | | ۹۷ | | |

الف



ب



شکل ۲. مش مسأله الف) مش غیرهم شکل کل میکروکانال ب) شبکه

دیواره مسأله حین نوسان

۳ نتایج و بحث

۳.۱ اعتبارسنجی

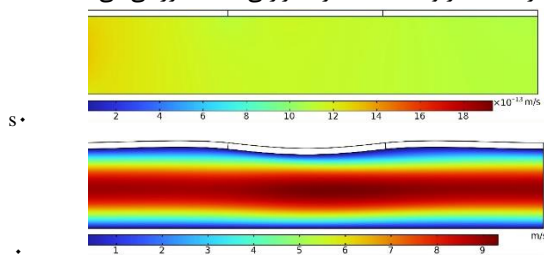
در این بخش، برای اعتبارسنجی مدل محاسباتی، یک میکروکانال با ابعاد مشابه مطالعات (Dadvand et al., 2019) و با استفاده از آب به عنوان سیال بررسی شده است. سطح بالای میکروکانال در دمای ثابت ۳۰۰ کلون نگه داشته می شود و سیال با پروفایل جریان خطی توسعه یافته وارد کانال می شود. نتایج مدل جریان جبرانی میکروکانال با نتایج مدل عددی (Dadvand et al., 2019) و مدل‌های ارائه شده توسط (SHAH, 1972) مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان می دهد که تغییرات عدد ناسلت (Nu) در امتداد میکروکانال، در شبیه سازی حاضر و در مطالعات قبلی مشابه است. این کاهش در Nu به دلیل کاهش تفاوت دمایی بین دیواره و سیال در طول جریان است. همچنین، نتایج شبیه سازی حاضر به مقدار محدود $Nu=3.66$ که توسط (SHAH, 1972) برای حالت کاملاً توسعه یافته پیشنهاد شده است، نزدیک می شود، که نشان دهنده همگرایی خوب مدل است. توافق نتایج شبیه سازی با مطالعات قبلی، دقت و

جدول ۳. متغیرهای فرآیندی و داده های دینامیک سیالات محاسباتی

| Re | Pr | St | Ae/H | \overline{Nu}_{CFD} |
|--------|---------|--------------|------|-----------------------|
| 755 | 0.71769 | 4.311800E-05 | 0.19 | 12.85188 |
| 1127.5 | 0.71724 | 4.281800E-05 | 0.26 | 14.94868 |
| 382.5 | 0.71721 | 4.207270E-05 | 0.12 | 9.68844 |
| 382.5 | 0.71718 | 1.262180E-04 | 0.26 | 10.12041 |
| 382.5 | 0.71816 | 1.291660E-04 | 0.12 | 9.5283 |
| 755 | 0.71868 | 4.414620E-05 | 0.19 | 12.63693 |
| 1127.5 | 0.7182 | 1.460620E-05 | 0.26 | 14.702 |
| 755 | 0.71774 | 8.623660E-05 | 0.19 | 11.43521 |
| 755 | 0.7177 | 4.311830E-05 | 0.33 | 13.42861 |
| 382.5 | 0.71718 | 4.207270E-05 | 0.26 | 10.12005 |
| 755 | 0.71772 | 4.311830E-05 | 0.05 | 11.95798 |
| 1127.5 | 0.7182 | 4.381860E-05 | 0.26 | 14.70243 |
| 382.5 | 0.71721 | 1.262180E-04 | 0.12 | 9.6885 |
| 382.5 | 0.71816 | 4.305520E-05 | 0.12 | 9.52824 |
| 1500 | 0.71773 | 2.170330E-05 | 0.19 | 16.47874 |
| 382.5 | 0.71813 | 4.305520E-05 | 0.26 | 9.95328 |
| 1127.5 | 0.71822 | 4.381860E-05 | 0.12 | 14.02903 |
| 755 | 0.71835 | 4.311830E-05 | 0.19 | 12.85188 |
| 10 | 0.71835 | 3.302730E-03 | 0.19 | 1.79343 |
| 1127.5 | 0.71725 | 4.281800E-05 | 0.12 | 14.26576 |
| 1127.5 | 0.71724 | 1.427270E-05 | 0.26 | 14.94827 |
| 1127.5 | 0.71822 | 1.460620E-05 | 0.12 | 14.02895 |
| 1127.5 | 0.71725 | 1.427270E-05 | 0.12 | 14.26568 |
| 755 | 0.71769 | 1.050160E-05 | 0.19 | 12.90835 |
| 382.5 | 0.71813 | 1.291660E-04 | 0.26 | 9.95364 |
| 755 | 0.71729 | 4.211550E-05 | 0.19 | 13.06396 |

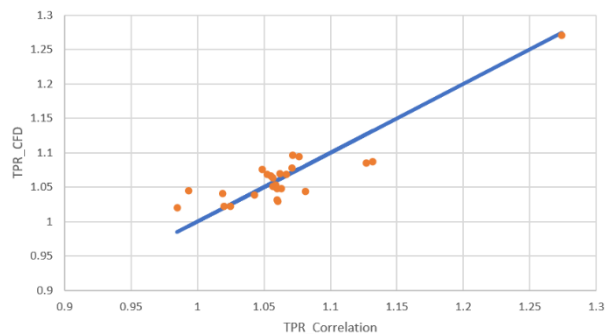
که در آن TPR نسبت عملکرد حرارتی است و به ترتیب f_o و Nu_o عدد ناسلت و عامل اصطکاک میکروکانال با دیواره ثابت به عنوان مینا هستند. این معیار نشان می‌دهد که یک طراحی زمانی قابل قبول است که نسبت آن بیشتر از یک باشد. به عبارت دیگر، افزایش عدد ناسلت که نشان‌دهنده بهبود انتقال حرارت است، باید بیشتر از افزایش افت فشار نسبت به مینا باشد. به عبارت دیگر، مزایای عملکردی بهبود انتقال حرارت باید هزینه‌های انرژی اضافی ناشی از افزایش افت فشار را جبران کند. همانطور که قبلاً ذکر شد، در بخش بهینه‌سازی، تمرکز بر بهبود انتقال حرارت بود.

شرایط بهینه حرارتی در عدد رینولدز (Re) معادل ۱۰، عدد پراوندتل (Pr) معادل ۰.۷۱۸۶۸، فرکانس (f) معادل ۰.۱۲۵ هرتز، و دامنه (Ae) معادل ۰.۱۶۵ میلی متر شناسایی شد. با این حال، تأثیر پارامترهای مورد مطالعه بر افت فشار برای بهینه‌سازی چندهدفه تحلیل نشده است. این مطالعه به‌طور خاص تأثیر دامنه را بر افت فشار و نسبت عملکرد حرارتی (TPR) بررسی می‌کند.



س۵

در شکل ۴. مقایسه بین معادله (۱۱) و داده های بدست آمده از شبیه سازی گرفته است. این تصویر نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده مطابقت قابل قبولی با داده های CFD دارد.



شکل ۴. مقایسه بین معادله نسبت عملکرد حرارتی (۱۱) کورولیشن با

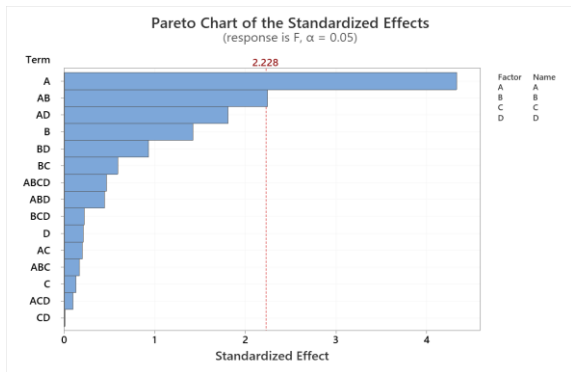
داده های CFD

۳.۳ عملکرد کلی میکروکانال با دیواره نوسانی

برای درک بهتر مزایای استفاده از دیواره‌های نوسانی، از یک معیار عملکرد شناخته شده، یعنی نسبت عدد ناسلت میانگین به عامل اصطکاک یا افت فشار، استفاده می‌شود:

$$TPR = \frac{Nu/Nu_o}{(f/f_o)^{1/3}} \quad (12)$$

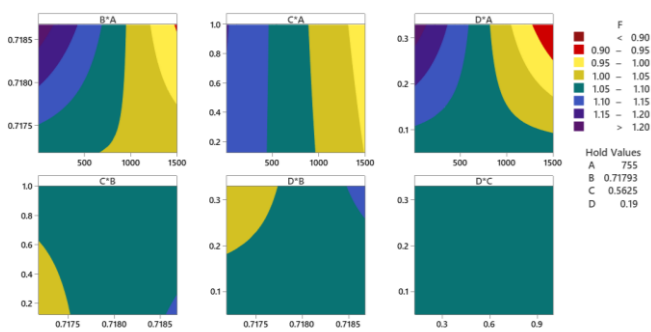
(۱۲)



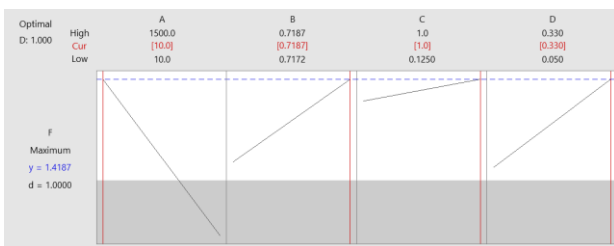
شکل ۷. مقایسه بین تاثیر ضرایب مختلف مسأله بر روی عدد ناسلت Nu
(A=Re, B=Pr, C=St, D=A_v/H)

در شکل های ۷ و ۸، تاثیر هر کدام از پارامترهای موثر در مسأله و ضریب تاثیر گروهی آنها را بر روی انتقال حرارت نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود عدد رینولدز دارای بیشترین تاثیر در انتقال است. اما افزایش عدد رینولدز همراه با هزینه های انرژی و اقتصادی است، از این رو سعی می شود با تغییرات در هندسه مسأله موجب افزایش آشفستگی جریان شد و انتقال حرارت از میکروکانال را بهبود بخشید.

Contour Plots of F

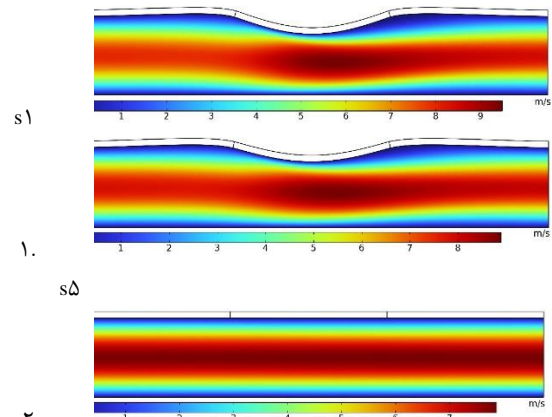


شکل ۸. کانتورهای مربوط به تاثیر همزمان پارامترهای موثر در مسأله

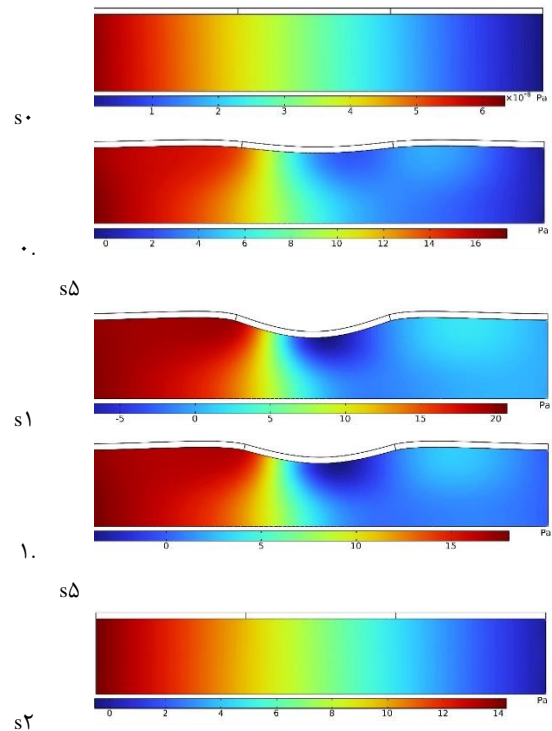


شکل ۹. نتایج بهینه سازی دو هدفه میکروکانال با دیواره الاستیک
(A=Re, B=Pr, C=St, D=A_v/H)

در شکل ۹، نتایج حاصل از بهینه سازی نشان داده شده است. هدف از این بهینه سازی، بیشینه سازی انتقال حرارت و کمینه سازی افت فشار در میکروکانال است. با توجه به نتایج بهینه سازی می توان دریافت که مدل در اعداد رینولدز پایین دارای انتقال حرارت بیشتر و افت فشار کمتر است، که این موضوع منجر به افزایش نسبت عملکرد حرارتی میکروکانال تحت این شرایط می شود. با بررسی دیگر پارامترهای موثر در مسأله می توان دریافت که دامنه دیواره الاستیک تاثیر بسزایی در افزایش انتقال حرارت در میکروکانال دارد که با ترکیب آن با اعداد رینولدز پایین می توان عدد ناسلت را افزایش داد بدون اینکه افت فشار در طول کانال افزایش یابد. همچنین دوره تناوب دیواره الاستیک نشان دهنده مدت زمان طی کردن سیکل دیواره الاستیک است. با افزایش دامنه دیواره الاستیک سطح مقطع عبوری جریان کاهش می یابد و منجر به افزایش سرعت جریان در آن مقطع می شود، این افزایش سرعت به



شکل ۵. کانتورهای سرعت در زمان مختلف در
Re=600 و $\frac{A_v}{H}=0.19$ و $f=0.5$ Hz



شکل ۶. کانتورهای فشار در زمان مختلف در
Re=600 و $\frac{A_v}{H}=0.19$ و $f=0.5$ Hz

در شکل های ۵ و ۶، کانتورهای فشار و سرعت در زمان های متفاوت را نشان می دهند. در این شکل ها نحوه سازوکار دیواره الاستیک و چگونگی تغییرات آن با زمان نشان داده شده است. با افزایش فرکانس دیواره الاستیک تعداد نوسان دیواره در یک ثانیه افزایش می یابد، و با افزایش دامنه دیواره الاستیک سطح مقطع عبوری جریان کاهش می یابد که باعث افزایش سرعت و افت فشار در راستای دیواره می شود.

passive oscillation of a flexible vortex generator. *Chemical Engineering Science*, 207, 556-580.

Dixit, T., & Ghosh, I. (2015). Review of micro-and mini-channel heat sinks and heat exchangers for single phase fluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1298-1311.

Donea, J., Huerta, A., Ponthot, J. P., & Rodríguez-Ferran, A. (2004). Arbitrary L agrangian-E ulerian Methods. *Encyclopedia of computational mechanics*.

Gao, Q., Lizarazo-Adarme, J., Paul, B. K., & Haapala, K. R. (2016). An economic and environmental assessment model for microchannel device manufacturing: part 1-Methodology. *Journal of cleaner production*, 120, 135-145.

Hetsroni, G., Mosyak, A., Pogrebnyak, E., & Yarín, L. (2005). Heat transfer in micro-channels: Comparison of experiments with theory and numerical results. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(25-26), 5580-5601.

Khan, M. G., & Fartaj, A. (2011). A review on microchannel heat exchangers and potential applications. *International journal of energy research*, 35(7), 553-582.

Kose, H. A., Yildizeli, A., & Cadirci, S. (2022). Parametric study and optimization of microchannel heat sinks with various shapes. *Applied Thermal Engineering*, 211, 118368.

SHAH, R. K. (1972). *Laminar flow forced convection heat transfer and flow friction in straight and curved ducts--a summary of analytical solutions*. Stanford University.

Turek, S., & Hron, J. (2006). *Proposal for numerical benchmarking of fluid-structure interaction between an elastic object and laminar incompressible flow*. Springer.

Wen, J., Li, K., Wang, C., Zhang, X., & Wang, S. (2019). Optimization investigation on configuration parameters of sine wavy fin in plate-fin heat exchanger based on fluid structure interaction analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 385-402.

Zăvoianu, A.-C., Lughofer, E., Pollak, R., Meyer-Heye, P., Eitzinger, C., & Radauer, T. (2017). Multi-objective knowledge-based strategy for process parameter optimization in micro-fluidic chip production. 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI).

Zhao, L., Yu, K., Wu, W., He, Y., Dong, H., & Wang, J. (2023). Effects of elastic micropillar array on the hydrothermal characteristics of a microchannel heat sink. *Thermal Science and Engineering Progress*, 46, 102223.

Zhuang, D., Yang, Y., Ding, G., Du, X., & Hu, Z. (2020). Optimization of microchannel heat sink with rhombus fractal-like units for electronic chip cooling. *International Journal of Refrigeration*, 116, 108-118.

فرکانس یا دوره تناوب و دامنه سطح الاستیک بستگی دارد که با بهینه سازی انجام شده می توان با صرفه جویی انرژی بیشترین بازده را از نظر حرارتی از آن بهره مند شد.

۴ نتایج

این مقاله یک مدل در حال توسعه برای یک میکروکانال با دیواره الاستیک را برای افزایش انتقال حرارت و کاهش افت فشار ارائه داده است. اعتبار سنجی کار حاضر با کارهای پیشین نشان دهنده دقت شبیه سازی است. ۲۵ مورد آزمایش انجام شده نشان دهنده تاثیر فرکانس و دامنه دیواره الاستیک بر روی نسبت عملکرد حرارتی است. نسبت عملکرد حرارتی یک رابطه غیرخطی با فرکانس دیواره الاستیک دارد و عدد ناسلت با دامنه دیواره الاستیک یک رابطه مستقیم دارد. برهمکنش هایی بین افت فشار و دامنه الاستیک وجود دارد که نیاز به بررسی در مطالعات آتی دارد. یک رابطه جدید نیز برای نسبت عملکرد حرارتی ارائه شده است که می تواند رفتار این ضریب را به ازای پارامترهای موثر در مسأله را پیش بینی کند. هدف اصلی این مقاله بهینه سازی چندهدفه میکروکانال با دیواره الاستیک در حال نوسان در یک دامنه و فرکانس قابل تغییر بوده که با ارائه نقطه بهینه همراه شده است به نحوی که بیشینه عدد ناسلت و کمینه افت فشار یا بیشترین نسبت عملکرد حرارتی را دارا باشیم. نقطه بهینه بدست آمده عبارت است از $Re=10$, $f=0.125$ Hz, $Ae=0.165$ mm, $T_{in}=279.75$ که این نقطه دارای نسبت عملکرد $TPR=1.3294$ می باشد، که نسبت عملکرد حرارتی محاسباتی شده $TPR=1.295$ می باشد که دارای مطابقت قابل قبولی است.

مطالعات آتی بایستی هندسه های پیچیده تر با دیواره الاستیک را بررسی کرده و تاثیر آن را بر روی مختصه های انتقال حرارت و افت فشار را نشان دهند. همچنین می توان تاثیر همزمان دیواره الاستیک با مولدهای گرداب همچنین، تاثیر همزمان دیواره الاستیک با مواد متخلخل را بررسی کرد.

۵ منابع

Chakraborty, D., Prakash, J. R., Friend, J., & Yeo, L. (2012). Fluid-structure interaction in deformable microchannels. *Physics of Fluids*, 24(10).

Dadvand, A., Hosseini, S., Aghebatandish, S., & Khoo, B. C. (2019). Enhancement of heat and mass transfer in a microchannel via