

بهینه‌سازی چندهدفی جریان سیال و انتقال گرما در میکروکانال‌های منقطع مورد استفاده در تراشه‌های رایانه

حامد صفی خانی*
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

سید علیرضا مصطفوی
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

در این مقاله بهینه‌سازی چندهدفی انتقال گرما و جریان سیال در میکروکانال‌های منقطع (تکه‌تکه شده) جاذب گرما با پره‌های مستطیلی مورد استفاده در تراشه‌های کامپیوتری، با بهره‌گیری از تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی و الگوریتم ژنتیک چندهدفی انجام گرفته است. در ابتدا، جریان سیال به صورت عددی در ۱۰۰ میکروکانال منقطع با شکل هندسی مختلف با استفاده از تکنیک‌های عددی حل شده و تمامی پارامترهای عملکردی مهم اعم از میزان شار گرمایی، حداکثر دمای دیواره‌ها، افزایش دمای سیال و افت فشار سیال در میکروکانال‌های مذکور محاسبه می‌شود. سپس، داده‌های عددی محاسبه شده برای بهینه‌سازی چندهدفی جریان سیال در میکروکانال‌های منقطع با پره‌های مستطیلی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فرآیند بهینه‌سازی چندهدفی، سه پارامتر هندسی به عنوان متغیر طراحی وجود دارند و توابع هدف متضاد نیز، حداکثر مقدار انتقال گرما و حداقل افت فشار در میکروکانال‌ها می‌باشند. در قسمت نتایج، نمودار پارتو که شامل اطلاعات مهم و مفید در طراحی گرمایی و سیالاتی میکروکانال‌های مذکور می‌باشد، ارائه شده است و به تفصیل به بحث و بررسی در مورد ابعاد مختلف آن پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: میکروکانال‌های منقطع جاذب گرما، پره‌های مستطیلی، تراشه‌های رایانه، بهینه‌سازی چندهدفی، دینامیک سیالات محاسباتی، الگوریتم ژنتیک چندهدفی.

Multi-objective optimization of heat transfer and flow field in interrupted micro channel heat sinks (MCHS) used in computer chips

H. Safikhani

Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

S. A. R. Mostafavi

Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Abstract

In this paper, multi-objective optimization (MOO) of heat transfer and flow field in interrupted micro channel heat sinks (MCHS) with rectangular fins using in computer chips is performed using Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques and Non-dominated Sorting Genetic Algorithms (NSGA II). At first, fluid flow is solved numerically in 100 various interrupted MCHS with rectangular fins using CFD techniques. Finally, the CFD data will be used for Pareto based multi-objective optimization of fluid flow in MCHS with rectangular fins using NSGA II algorithm. In the MOO process there are three geometrical parameters and the conflicting objective functions are to simultaneously maximize the amount of heat transfer and minimize the pressure drop. It is shown that the achieved Pareto solution includes important design information on fluid flow in MCHS with rectangular fins.

Keywords: Interrupted microchannel heat sink (MCHS), rectangular fins, computer chips, multi-objective optimization, CFD, NSGA II.

۱- مقدمه

بازسازی توسعه لایه‌های گرمایی بررسی کردند. این تحقیق شامل میکروکانال‌های موازی طولی و چندین کانال عرضی بود. میکروکانال عرضی برای منقطع کردن کل طول جریان، به چند بخش مستقل استفاده می‌شد. آنها دریافتند که دقت محاسبات به دلیل کاهش طول کلی جریان منقطع برای میکروکانال، بهبود یافته است. در این پژوهش مشاهده شد که افت فشار و انتقال گرما، با استفاده از میکروکانال‌های منقطع، نسبت به میکروکانال‌های معمولی بهبود یافته است. به عنوان نمونه دیگری از پژوهش‌های مشابه، چنگ [۶] جریان و انتقال گرما در یک میکروکانال دو لایه انباشته شده را، با چند ریزپردازنده ادغام شده، مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش تأثیر نسبت ارتفاع دیواره پره به ارتفاع میکرو کانال، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میکروکانال‌های مذکور دارای عملکرد بهتری نسبت به میکروکانال‌های سنتی می‌باشند. تحقیق در مورد میکروکانال‌های منقطع (تکه تکه شده) سه بعدی در میکرو حفره‌های عرضی نیز، توسط چای و همکارانش [۹]، به روش تجربی و روش‌های عددی به خوبی نشان داده شده است. آنها

مکانیزم‌های توسعه در روش‌های خنک‌کاری برای المان‌های الکترونیکی جریان شار گرما بالا، توسط تاگرم [۱] برای میکرو کانال‌های جاذب گرما^۱ با استفاده از دستگاه سیلیکون در دهه ۱۹۸۰ آغاز شد. میکروکانال‌های مستطیلی، دارای ویژگی‌های جرم و حجم کوچک، ضریب انتقال گرمای بزرگ، و نسبت سطح به حجم بالا است. اخیراً محققان در حال توسعه تکنیک‌های خنک‌کننده‌های جدیدی هستند که قادر به افزایش میزان شار گرما بالا برای کاربردهای میکرو الکترونیک می‌باشند [۱۵-۱۲]. انتقال گرما می‌تواند با کاهش ضخامت لایه مرزی، افزایش مخلوط شدگی در جریان اصلی در ناحیه نزدیک به دیواره و افزایش شدت آشفتگی با ایجاد جریان ثانویه چرخشی، افزایش یابد. با این حال، تکنیک‌هایی که برای افزایش این اثرات مورد استفاده قرار گرفته‌اند معمولاً باعث افزایش افت فشار می‌شوند [۳]. در سال‌های اخیر، ژو و همکارانش [۵-۴]، بهبود انتقال گرما را با استفاده از مفهوم

¹ Micro channel heat sink (MCHS)

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: safikhani_hamed@aut.ac.ir

منقطع، به صورت چندهدفی انجام می‌شود. شکل هندسی و دامنه محاسباتی در شکل ۱ نشان داده شده است. در فرآیند بهینه‌سازی، سه متغیر طراحی هندسی تغییر می‌کنند، تا همزمان مقدار انتقال گرما را به حداکثر رسانده و میزان افت فشار را به حداقل برسانند. در بخش نتایج، نمودار پارتو، که همزمان تغییرات انتقال گرما و افت فشار را به همراه متغیرهای طراحی مرتبط با آنها در شرایط بهینه نشان می‌دهد، ارائه می‌شود و نشان داده می‌شود که نمودار پارتو نتایج بسیار مهمی را برای طراحی گرمایی میکروکانال‌های مستطیلی جاذب گرما با پره مستطیلی، ارائه می‌دهد.

۲- متغیرهای طراحی

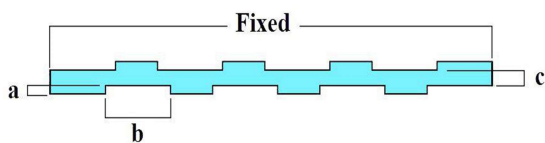
در این مقاله، سه متغیر طراحی مستقل وجود دارد: نیمی از ضخامت باله (a)، طول باله (b)، نیمی از عرض کانال (c). نمای طرحواره‌ای متغیرهای طراحی در شکل ۲ نشان داده شده و محدوده تغییر هر یک، در جدول ۱ نشان داده شده است. با تغییر متغیرهای طراحی بر اساس جدول ۱، طرح‌های مختلف توسط دینامیک سیالات محاسباتی ایجاد و شبیه‌سازی می‌شوند که بعداً برای بهینه‌سازی چندهدفی میکرو کانال‌های منقطع استفاده می‌شوند.

۳- مدل سازی ریاضی

داده‌های مورد نیاز برای انجام بهینه‌سازی چند هدفی در این مقاله با استفاده از مدل سازی عددی به دست آمده است. جزئیات این روش در این بخش شرح داده می‌شود.

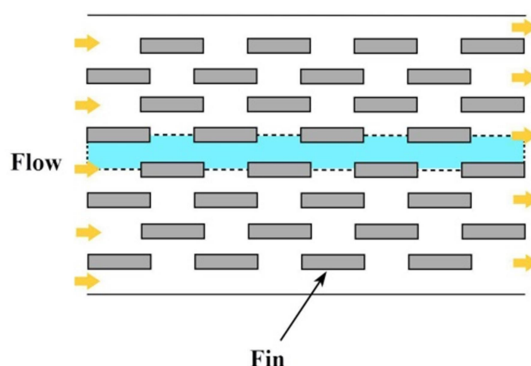
۳-۱- هندسه

هندسه مورد بررسی در این مقاله در شکل ۱، به صورت طرحواره نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، میکروکانال به تعدادی دامنه محاسباتی موازی تقسیم شده است. از آنجایی که در این میکروکانال‌ها، میدان جریان در هر دامنه محاسباتی یکسان است، معادلات حاکم به صورت عددی برای یک دامنه حل شده اند و در نهایت در تعداد کل نواحی محاسباتی، ضرب شده است.



شکل ۲- متغیرهای طراحی مورد استفاده در فرآیند بهینه‌سازی چندهدفی

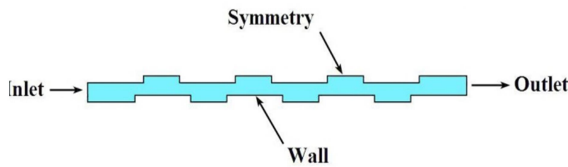
ویژگی‌های افت فشار و انتقال گرما را در ابعاد و موقعیت‌های مختلفی از دیواره‌های مستطیلی در میکروحفره‌های عرضی، بررسی کردند. وانگ و لی [۲] شبیه‌سازی عددی میدان جریان در میکروکانال‌های با دیواره‌های مثلثی، در میکروحفره‌های عرضی را، مورد بررسی قرار دادند. آنها یک مطالعه پارامتری انجام دادند و در نهایت یک میکرو کانال با عملکرد بهینه ارائه نمودند. جریان سیال در میکروکانال‌های منقطع، موجب افزایش انتقال گرما و افزایش افت فشار می‌شود. از این رو، با بهینه‌سازی چندهدفی^۱ و ارائه نمودار پارتو، نقاط طراحی بهینه باید شناسایی شوند. در این مقاله، بهینه‌سازی چند هدفی جریان سیال در میکروکانال‌های منقطع با پره‌های مستطیلی با استفاده از تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی^۲ و الگوریتم ژنتیک چندهدفی^۳ انجام می‌شود. در سال‌های اخیر بسیاری از محققان شبکه‌های عصبی را برای مدل سازی پارامترهای مختلف در مسائل مهندسی، مورد استفاده قرار داده اند [۱۶-۱۸]. الگوریتم NSGA II یکی کامل‌ترین و بهترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفی است که در این مقاله نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم که برای اولین بار توسط دب [۱۹] پیشنهاد شده است، برای بهینه‌سازی چند هدفی مسائل مهندسی در سال‌های اخیر بکار گرفته شده است [۲۰-۲۲]. از این الگوریتم در سال‌های اخیر نیز به صورت مکرر برای بهینه‌سازی چندهدفی برخی سیستم‌های مهندسی استفاده شده است [۲۳-۲۵]. بر اساس اطلاعات ما، تاکنون، هیچ بهینه‌سازی چند هدفی برای میکروکانال‌های منقطع جاذب گرما با پره‌های مستطیلی با استفاده از ترکیب دینامیک سیالات محاسباتی و NSGA II، انجام نشده است که هدف آن افزایش میزان انتقال گرما تمامی پره‌ها، و کاهش افت فشار باشد.



شکل ۱- شماتیک میکروکانال‌های منقطع جاذب گرما مورد استفاده در تراشه‌های رایانه‌ها به همراه دامنه محاسباتی مورد استفاده در این مقاله (ناحیه فیروزه‌ای رنگ)

در این مقاله، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و بهره برداری از الگوریتم NSGA II، فرایند خنک‌کاری میکروکانال‌های جاذب گرما

1 Multi-Objective Optimization (MOO)
2 Computational Fluid Dynamics (CFD)
3 NSGA II



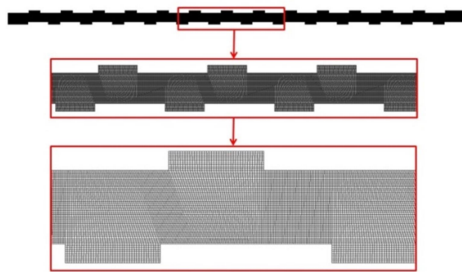
شکل ۳ - شرایط مرزی مورد استفاده در این مقاله

۳-۴ - روش های عددی

در این مقاله شبیه سازی عددی با استفاده از روش حجم محدود انجام می شود. برای جداسازی متغیرهای مختلف از جداسازی مرتبه دوم پیش رو^۱ استفاده شده است و الگوریتم SIMPLE برای حل کوپل بین میدان های سرعت و فشار استفاده شده است. برای اطمینان از اینکه نتایج به دست آمده مستقل از اندازه و تعداد شبکه های تولید شده است، چندین شبکه با اندازه های مختلف در جهت های مختلف برای هر میکروکانال منقطع آزمایش شده است و برای هر یک بهترین شبکه، با بالاترین دقت و کمترین هزینه انتخاب شده است. نمونه ای از تولید شبکه برای فرآیند بهینه سازی چندهدفی در شکل ۴ نشان داده شده است. متوسط تعداد مش های مورد استفاده حدوداً ۶۰ هزار سلول می باشد. علاوه بر این، برخی از شرایط عملیاتی که در شبیه سازی عددی استفاده می شود، در جدول ۲ نشان داده شده است. نمونه های از کانتور دما در نتایج عددی در شکل ۵ نشان داده شده است.

۳-۵ - اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی عددی

برای دستیابی به اعتماد در مورد شبیه سازی های عددی، لازم است که نتایج شبیه سازی را با داده های موجود و موقت مقایسه شود. شکل ۶ نتایج عدد ناسلت و ضریب اصطکاک بر اساس عدد رینولدز را در مطالعه حاضر، با داده های تجربی چای و همکارانش [۶] و شبیه سازی عددی وانگ و لی [۲] مقایسه می کند. همانطور که نشان داده شده است، همبستگی خوبی بین نتایج شبیه سازی کنونی و گزارش های تجربی و عددی گزارش شده، وجود دارد.



شکل ۴ - نمونه ای از تولید شبکه برای میکروکانال های منقطع

جدول ۱- متغیرهای طراحی و حدود تغییرات آنها

متغیر طراحی	از (میکرون)	تا (میکرون)
<i>a</i>	۲۰	۳۰
<i>b</i>	۲۲۵	۲۷۵
<i>c</i>	۸۰	۱۰۰

لازم به ذکر است که به دلیل موازی بودن دامنه های محاسباتی، افت فشار در یک ناحیه با افت فشار در کل میکروکانال برابر است و نیازی به ضرب در تعداد نواحی نمی باشد. افت کلی فشار و انتقال گرما برای مجموعه ای از میکروکانال های منقطع به شرح زیر محاسبه می شود:

$$Q_{tot} = n q_1 \quad (1)$$

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_1 \quad (2)$$

$$n = \frac{W}{2(c + 2a)} \quad (3)$$

در این مقاله ابعاد اصلی میکروکانال منقطع *L* و *W* ثابت و برابر با ۵ میلی متر است، در حالی که عرض کانال *D* از ۱۶۰ تا ۲۰۰ میکرومتر متغیر است. به این ترتیب، کانال های مورد بررسی به عنوان میکرو کانال طبقه بندی می شوند.

۳-۲ - معادلات حاکم

در این مقاله، ابعاد کانال ها طوری تغییر می کند که رژیم جریان در طول فرآیند بهینه سازی، به صورت آرام باقی می ماند و معادلات حاکم عبارتند از: پیوستگی، مومنوم و انرژی. این معادلات عبارتند از:

• پیوستگی

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

• مومنوم (ناویر - استوکس)

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) + \rho g \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) + \rho g$$

• انرژی

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} C_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} C_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T)$$

۳-۳ - شرایط مرزی

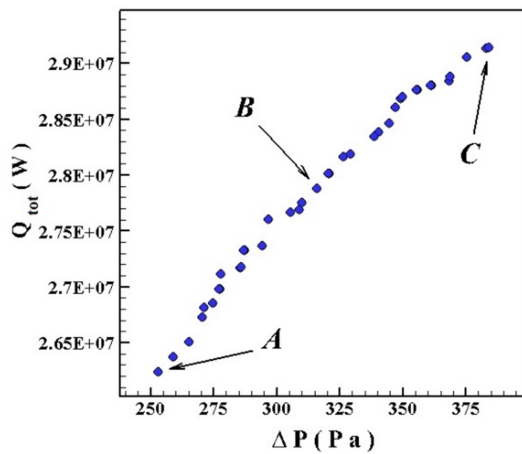
برای شبیه سازی عددی، معادلات بخش قبلی باید با شرایط مرزی مربوطه حل شوند. شرایط مرزی مرتبط، در شکل ۳ نشان داده شده است. مایع با سرعت و دمای مشخص به کانال وارد شده و با فشار مشخص خارج می شود. پره ها، دیوارهایی با دما و سرعت مشخص (صفر) هستند، و شرایط مرزی متقارن برای خطوط تقارن اعمال می شود.

۴- نتایج بهینه سازی چندهدفی

به منظور بررسی عملکرد مطلوب و بهینه جریان سیال در میکروکانال های منقطع، روش بهینه سازی چندهدفی با استفاده از الگوریتم NSGA II مورد استفاده قرار گرفت. در تمام نتایج الگوریتم ژنتیک جمعیتی با اندازه 60 انتخاب شده است که مقادیر احتمال متقاطع (PC) و احتمال جهش (PM) آن به ترتیب 0.7 و 0.07 می باشند. دو هدف متضاد در این مطالعه عبارتند از Q_{Tot} و ΔP که باید به طور همزمان با توجه به متغیرهای طراحی a ، b و c (جدول ۱ و شکل ۲) بهینه شوند. مسأله بهینه‌سازی چندهدفی در مجموع می‌تواند به شکل زیر فرموله گردد:

$$\begin{cases} \text{Maximize } Q_{total} = f_1(a, b, c) \\ \text{Minimize } \Delta P = f_2(a, b, c) \\ \text{subjected to } 20 \leq a \leq 30 (\mu m) \\ 225 \leq b \leq 275 (\mu m) \\ 80 \leq c \leq 100 (\mu m) \end{cases} \quad (7)$$

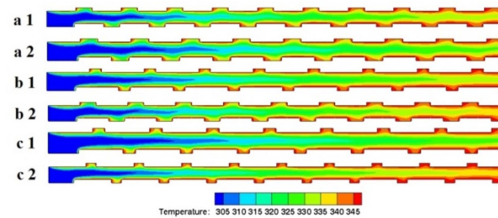
شکل‌های ۷ (انتقال گرما بر اساس افت فشار) و ۸ (افزایش دمای سیال بر اساس افت فشار) نمودار پارتوی توابع ذکر شده را نشان می‌دهند. همانگونه که واضح است در هر دو نمودار، نقاط هیچ برتری نسبت به یکدیگر ندارند، به این معنی که هیچ دو نقطه‌ای را نمیتوان پیدا کرد که یکی از توابع هدف آنها یکسان و دیگری متفاوت باشد. به عبارت دیگر، همانطور که از یک نقطه به نقطه دیگر حرکت می‌شود، قطعاً یکی از توابع هدف بهتر شده و دیگری بدتر می‌شود. در نمودار پارتو، سه نقطه بهینه به نام های A ، B و C تعیین شده اند، می‌توانند در این شکل مشاهده شوند، که متغیرهای طراحی مربوط به آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده‌اند.



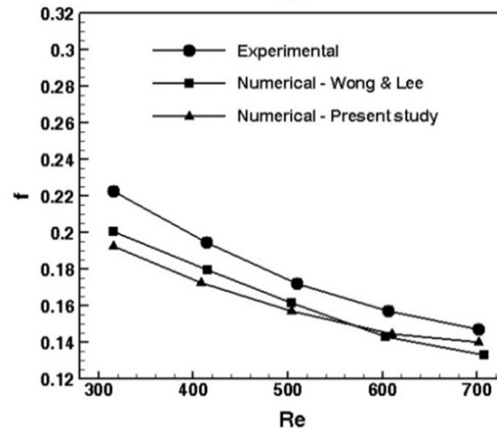
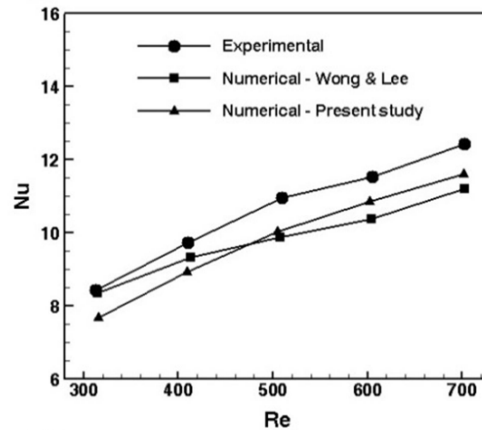
شکل ۷ - نمودار پارتو (انتقال گرما و افت فشار)

جدول ۲- برخی پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی ها

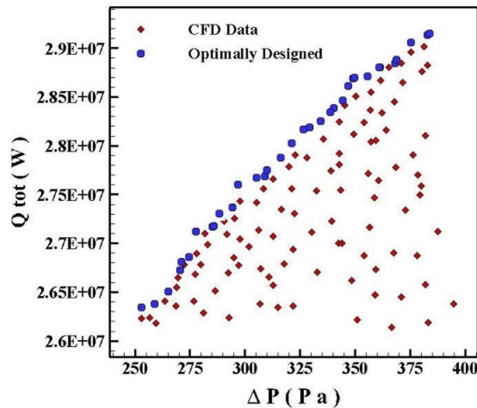
مقدار	پارامتر
۳۰۰	دمای ورودی سیال (کلوین)
۳۵۰	دمای دیواره پره ها (کلوین)
۰/۱	سرعت ورودی سیال (متر بر ثانیه)



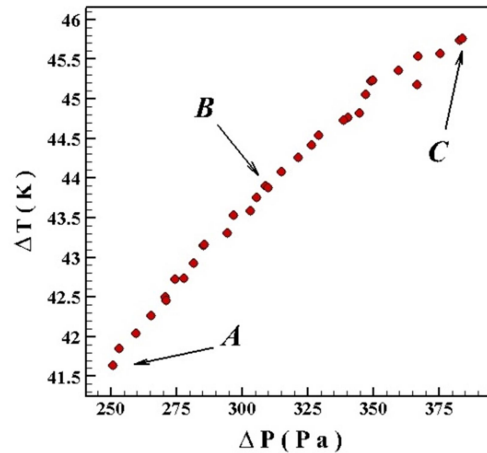
شکل ۵ - یک نمونه از کانتور دما در میکروکانال های منقطع



شکل ۶ - صحنه‌گذاری نتایج عددی (a) عدد ناسلت (b) ضریب اصطکاک برای میکروکانال های سنتی



شکل ۹ - همپوشانی داده‌های عددی و نمودار پارتوی استخراج شده



شکل ۸ - نمودار پارتو (افزایش دمای سیال و افت فشار)

در ابتدا، میدان سیال به صورت عددی در ۱۰۰ میکروکانال منقطع مختلف با شکل هندسی مختلف با استفاده از تکنیک‌های عددی حل شد

جدول ۳- جزئیات توابع ورودی و خروجی پارتو

Point	Design variable			Objective functions	
	a (μm)	b (μm)	c (μm)	Q_{tot} (MW)	ΔP (Pa)
A	22.5	225.5	100	26.2	252.1
B	22.5	240.1	95.2	27.9	318.5
C	25.5	240.1	90.1	29.2	388.4

و تمامی پارامترهای عملکردی مهم اعم از میزان شار گرمایی، حداکثر دمای دیواره‌ها، افزایش دمای سیال و افت فشار سیال در میکروکانال‌های مذکور محاسبه گردید. سپس، داده‌های عددی محاسبه شده برای بهینه‌سازی چندهدفی جریان سیال در میکروکانال‌های منقطع با پره‌های مستطیلی با استفاده از الگوریتم NSGA II مورد استفاده قرار گرفت. در فرآیند بهینه‌سازی چندهدفی، سه پارامتر هندسی به عنوان متغیر طراحی وجود داشت و توابع هدف متضاد نیز، حداکثر مقدار انتقال گرما و حداقل افت فشار در میکروکانال‌ها بود. در قسمت نتایج نمودار پارتو (شکل‌های ۷ و ۸) که شامل اطلاعات مهم و مفید در طراحی گرمایی و سیالاتی میکروکانال‌های مذکور بود، ارائه گردید و به تفصیل به بحث و بررسی در مورد ابعاد مختلف آن پرداخته شد.

۶- نمادها

a	نصف عرض پره (μm)
b	طول پره (μm)
c	نصف عرض مسیر سیال (μm)
A, B, C	نقاط بهینه در پارتو
L	طول مجموعه کانال‌ها (μm)
W	عرض مجموعه کانال‌ها (μm)
n	تعداد کانال‌های مشابه
q	انتقال گرما از یک کانال (W)
Q	انتقال گرما مجموعه کانال‌ها (W)

نقاط نشان داده شده در شکل‌های ۷ و ۸ دارای ویژگی‌های منحصر به فردی هستند. نقاط A و C نشان دهنده حداقل افت فشار و بیشترین مقدار انتقال گرما هستند. به طور کلی، پیدا کردن یک نقطه که در آن هر دو تابع هدف به مقدار برابر ارضا شوند، ایده آل خواهد بود. برای پیدا کردن چنین نقطه‌ای، از روش نگاشت [۲۰] استفاده می‌شود. بدین منظور مقادیر هر دو تابع هدف بین ۰ و ۱ انتقال داده می‌شود و نرم این توابع محاسبه می‌گردد. نقطه دارای بالاترین مقدار نرم، نقطه طراحی ایده آل است. نقطه B نقطه‌ای است که از این رویکرد بدست آمده است و می‌توان گفت که به طور کلی هر دو تابع هدف انتقال گرما و افت فشار را برآورده می‌کند.

در نهایت، جالب و مفید خواهد بود اگر ۱۰۰ داده به دست آمده اولیه با داده‌های شبیه‌سازی عددی و نمودار پارتوی به دست آمده، مقایسه گردد. شکل ۹ همپوشانی نمودار پارتو و داده‌های عددی اولیه را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که نمودار پارتو دقیقاً بهترین مرز داده‌های عددی را در جهت کمترین افت فشار و بالاترین مقدار انتقال گرما تشخیص داده است که این پدیده اعتبار روند بهینه‌سازی چندهدفی را تأیید می‌کند.

۵- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله بهینه‌سازی چندهدفی انتقال گرما و جریان سیال در میکروکانال‌های منقطع (تکه تکه شده) جاذب گرما با پره‌های مستطیلی مورد استفاده در تراشه‌های کامپیوتری، با بهره‌گیری از دینامیک سیالات محاسباتی و الگوریتم NSGA II انجام گرفت.

¹ Mapping Method

- transfer and flow coefficients in micro channels using GMDH type neural networks and genetic algorithms, *Energy Conversion and Management* Vol. 49, pp. 311-325, 2008.
- [19] Deb K., Agrawal S., Pratap A. and Meyarivan T., A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II^o. *IEEE Trans Evolutionary Computation*, Vol. 6, pp. 182-97, 2002.
- [20] Safikhani H., Akhavan-Behabadi M. A., Nariman-Zadeh N. and Mahmoodabadi M. J., Modeling and multi-objective optimization of square cyclones using CFD and neural networks, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 89, pp. 301-309, 2011.
- [21] Sanaye S. and Hajabdollahi H., Thermal-economic multi-objective optimization of plate fin heat exchanger using genetic algorithm, *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 1893-1902, 2010.
- [22] Sanaye S. and Dehghandokht M., Modeling and multi-objective optimization of parallel flow condenser using evolutionary algorithm, *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 1568-1577, 2011.
- [23] Safikhani H., Modeling and multi-objective Pareto optimization of new cyclone separators using CFD, ANNs and NSGA II algorithm, *Advanced Powder Technology*, Vol. 27, pp. 2277-2284, 2016.
- [24] Damavandi MD, Mousavi SM, Safikhani H, Pareto optimal design of swirl cooling chambers with tangential injection using CFD, GMDH-type of ANN and NSGA-II algorithm, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 122, pp. 102-114, 2017.
- [25] Safikhani H, Eiamsa-Ard S, Multi-objective optimization of turbulent tube flows over diamond-shaped turbulators, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 37, pp. 1579-1584, 2016.
- [1] Tuckerman D.B., Pease R.F.W., High-performance heat sinking for VLSI, *IEEE Electron Device Lett.* Vol. 2, pp. 126-129, 1981.
- [2] Wong K. C., Lee J. H., Investigation of thermal performance of microchannel heat sink with triangular ribs in the transverse microchambers, *International Communications in Heat and Mass Transfer* Vol. 65, pp. 103-110, 2015.
- [3] Xia G., Chai L., Zhou M., Wang H., Effects of structural parameters on fluid flow and heat transfer in a microchannel with aligned fan-shaped reentrant cavities, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, pp. 411-419, 2011.
- [4] Xu J.L., Gan Y.H., Zhang D.C., Li X.H., Microscale heat transfer enhancement using thermal boundary layer redeveloping concept, *International Journal of Heat and mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1662-1674, 2005.
- [5] Xu J., Song Y., Zhang W., Zhang H., Gan Y., Numerical simulations of interrupted and conventional microchannel heat sinks, *International Journal of Heat and mass Transfer*, Vol. 51 pp. 5906-5917, 2008.
- [6] Cheng Y.J., Numerical simulation of stacked microchannel heat sink with mixing enhanced passive structure, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 295-303, 2007.
- [7] Korichi, L. Oufier, Heat transfer enhancement in oscillatory flow in channel with periodically upper and lower walls mounted obstacles, *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 1003-1012, 2007.
- [8] Chai L., Xia G., Zhou M., Li J., Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a microchannel heat sink with offset fan-shaped reentrant cavities in sidewall, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 577-584, 2011.
- [9] Chai L., Xia G., Zhou M., Li J., Qi J., Optimum thermal design of interrupted microchannel heat sink with rectangular ribs in the transverse microchambers, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 51 pp. 880-889, 2013.
- [10] Chai L., Xia G., Wang H., Zhou M., Cui Z., Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks with periodic expansion-constriction cross-sections, *International Journal of Heat and mass Transfer*, Vol. 62, pp. 741-751, 2013.
- [11] Xia G., Chai L., Wang H., Zhou M., Cui Z., Optimum thermal design of microchannel heat sink with triangular re-entrant cavities, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 1208-1219, 2011.
- [12] Hong F., Cheng P., Three dimensional numerical analyses and optimization of offset strip-fin microchannel heat sinks, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36 pp. 651-656, 2009.
- [13] Foong A.J., Ramesh N., Chandratilleke T.T., Laminar convective heat transfer in a microchannel with internal longitudinal fins, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 1908-1913, 2009.
- [14] Yang S.M., Tao W.Q., Third ed., *Heat Tran.High. Educ. Press*, Beijing, 1998.
- [15] Karwa R., Sharma C., Karwa N., Performance evaluation criterion at equal pumping power for enhanced performance heat transfer surfaces, *Journal of Solar Energy* 1-9, 2013.
- [16] Amanifard N., Nariman-Zadeh N., Farahani M. H. and Khalkhali A., Modeling of multiple short-length-scale stall cells in an axial compressor using evolved GMDH neural networks, *Energy Conversion and Management* Vol. 49, pp. 2588-2594, 2008.
- [17] Nariman-Zadeh N., Darvizeh A. and Ahmad-Zadeh R., Hybrid genetic design of GMDH-type neural networks using singular value decomposition for modeling and prediction of the explosive cutting process, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 217, pp. 779-790, 2003.
- [18] Amanifard N., Nariman-Zadeh N., Borji M., Khalkhali A. and Habibdoust A., Modeling and Pareto optimization of heat