

بهینه‌سازی چندهدفی انتقال گرما و میدان سیال با پرنتل های مختلف در مبادله‌کن‌های جریان عرضی

حامد صفی خانی*
عرفان جباری

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

در این مقاله بهینه‌سازی چندهدفی انتقال گرما و میدان سیال در مبادله‌کن‌های جریان عرضی با آرایش مثلثی و مربعی، با بهره‌گیری از تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی و الگوریتم ژنتیک چندهدفی انجام می‌گیرد. در ابتدا، جریان سیال به صورت عددی در ۱۵۰ مبادله‌کن با شکل هندسی مختلف با استفاده از تکنیک‌های عددی حل شده و تمامی پارامترهای عملکردی مهم شامل: میزان شار حرارتی، حداکثر دمای دیواره‌ها، افزایش دمای سیال و افت فشار سیال در مبادله‌کن‌های مذکور محاسبه می‌شود. سپس، داده‌های عددی محاسبه شده برای بهینه‌سازی چندهدفی جریان سیال در مبادله‌کن‌های جریان عرضی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فرآیند بهینه‌سازی چندهدفی، دو پارامتر هندسی به عنوان متغیر طراحی وجود دارند و توابع هدف متضاد نیز، حداکثر نمودن مقدار انتقال گرما و حداقل نمودن افت فشار در مبادله‌کن‌ها می‌باشند. در قسمت نتایج، نمودار پارتو که شامل اطلاعات مهم و مفید در طراحی حرارتی و سیالاتی مبادله‌کن‌های مذکور می‌باشد، برای هر دو چیدمان مثلثی و مربعی ارائه شده است و به تفصیل به بحث و بررسی در مورد ابعاد مختلف آن پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: مبادله‌کن‌های جریان عرضی، بهینه‌سازی چندهدفی، دینامیک سیالات محاسباتی، الگوریتم ژنتیک چندهدفی.

Multi-objective optimization of heat transfer and flow field with different Pr numbers in cross-flow heat exchangers

H. Safikhani
E. Jabbari

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

Abstract

In this paper, multi-objective optimization (MOO) of heat transfer and flow field in cross-flow heat exchangers with triangular and square arrangement is performed using Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques and Non-dominated Sorting Genetic Algorithms (NSGA II). At first, fluid flow is solved numerically in 150 various heat exchanger using CFD techniques. Finally, the CFD data will be used for Pareto based multi-objective optimization of fluid flow in cross flow heat exchanger using NSGA II algorithm. In the MOO process there are two geometrical parameters and the conflicting objective functions are to simultaneously maximize the amount of heat transfer and minimize the pressure drop. The Pareto front including optimum design variables and objective functions for two triangular and square heat exchangers are shown in results. It is shown that the achieved Pareto solution includes important design information on fluid flow in the heat exchangers.

Keywords: Cross flow heat exchangers, multi-objective optimization, CFD, NSGA II.

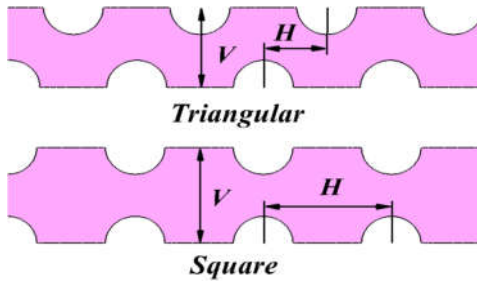
گرمایی پوسته-لوله را بهینه‌سازی نمودند. برخی دیگر از پژوهشگران [۱۵-۱۰] نیز مجموع آنتروپی در مبادله‌کن‌های پوسته-لوله را کمینه کردند. تیان و همکاران [۱۶] با استفاده از مدلسازی عددی رابطه جدیدی را میزان انتقال گرما در تبخیرکن‌ها ارائه نمودند. آنها پس از صحت‌گذاری رابطه خود با روابط تجربی و مقایسه رابطه با روابط موجود، دقت بیشتر در رابطه ارائه شده خود را گزارش نمودند. هوآنگ و همکاران [۱۷] با ارائه یک روش با محوریت مدلسازی حجم محدود، جریان سیال در مبادله‌کن‌های گرمایی با لوله و پره‌های متغیر را مدلسازی نمودند. آنها در پایان بهبود عملکرد مبادله‌کن را با استفاده از مدل ارائه شده توسط خود، گزارش نمودند. تیان و همکاران [۱۸] با استفاده از مدلسازی شبکه‌های عصبی، عملکرد چگالنده‌های جریان موازی را بررسی نمودند. آنها نتایج خود را با نتایج موجود مقایسه نمودند و گزارش بسیار خوبی از نتایج شبکه‌های عصبی خود ارائه نمودند. راتو و پاتل [۱۹] با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورها، عملکرد یک مبادله‌کن گرمایی صفحه‌ای پره دار را به صورت چندهدفی بهینه‌سازی نمودند. آنها در پایان با ارائه نمودار پارتو، هندسه بهینه چگالنده را ارائه نمودند.

۱- مقدمه

امروزه مبادله‌کن‌های گرمایی به صورت وسیع در صنایع مختلف کاربرد دارند. یکی از انواع مبادله‌کن‌های گرمایی بسیار پرکاربرد، مبادله‌کن‌های است که در آن سیال دارای جریان عرضی است. امروزه با کاهش منابع انرژی، لزوم بهینه بودن این نوع مبادله‌کن‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. در سالهای اخیر پژوهش‌های زیادی در زمینه مدلسازی عددی و بهینه‌سازی هندسه و شرایط حاکم بر این نوع مبادله‌کن‌ها انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره خواهد شد. صنایع و حاج‌عبداللهی [۱] مبادله‌کن‌های پوسته-لوله را با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفی به صورت چندهدفی بهینه‌سازی کردند. آنها توابع هدف را هزینه و کارایی گرفته و در نهایت نمودار پارتو را در شرایط جریانی و فرآیندی مختلف ارائه نمودند. کاستا و کیروش [۲] و راماناندا و شیراناسا [۳] نیز میزان سطح انتقال گرما در مبادله‌کن‌های پوسته-لوله را بهینه‌سازی نمودند. برخی از پژوهشگران [۹-۴]، با جمع نمودن دو تابع هدف انتقال گرما و افت فشار، مبادله‌کن‌های انتقال

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

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 بهینه سازی چندهدفی

جدول ۱- متغیرهای طراحی و حدود تغییرات هر یک

نام متغیر	از (میلیمتر)	تا (میلیمتر)
فاصله افقی (H)	۷	۲۰
فاصله عمودی (V)	۷	۱۵

۲-۳- معادلات حاکم

در این مقاله، متغیرهای طراحی طوری تغییر می‌کند که رژیم جریان در طول فرآیند بهینه‌سازی، به صورت لایه‌ای باقی می‌ماند و معادلات حاکم عبارتند از: پیوستگی، مومنوم و انرژی. این معادلات عبارتند از:

- پیوستگی

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

- مومنوم (ناویر - استوکس)

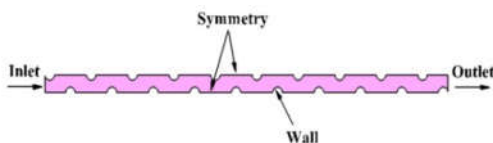
$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) + \rho g \quad (2)$$

- انرژی

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} C_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

۳-۳- شرایط مرزی

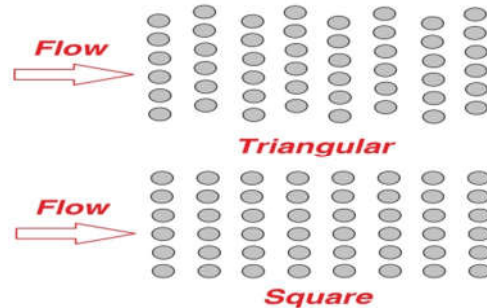
برای شبیه‌سازی عددی، معادلات بخش قبلی باید با شرایط مرزی مناسب حل شوند. شرایط مرزی مرتبط، در شکل ۳ نشان داده شده است. سیال با دبی و دمای مشخص به مبادله‌کن وارد شده و با فشار مشخص خارج می‌شود. استوانه‌ها، دیوارهایی با دما و سرعت مشخص (صفر) هستند، و شرایط مرزی متقارن برای خطوط تقارن اعمال می‌شود.



شکل ۳ - شرایط مرزی مورد استفاده در این مقاله

فابری [۲۰] با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفی هندسه بهینه‌ترین پین‌های موجود در یک مبادله‌کن گرمایی را به دست آورد. در پژوهش مذکور افزایش میزان انتقال گرما و افزایش میزان کارایی مبادله‌کن دو تابع هدف مورد استفاده بودند. آنها هندسه پین‌ها را با استفاده از روش بزیر پارامتری نمودند. کوبوس و کاواناف [۲۱] در یک میزان انتقال گرما ثابت، کمترین حجم یک مبادله‌کن انتقال گرمایی را محاسبه نمودند.

الگوریتم ژنتیک چندهدفی^۱ 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 [۲۲] پیشنهاد شده است، برای بهینه‌سازی چند هدفی مسائل مهندسی در سال‌های اخیر بکار گرفته شده است [۲۳-۲۸]. در این مقاله، بهینه‌سازی چند هدفی و آنالیز حساسیت انتقال گرما و جریان سیال با اعداد پرتل مختلف در جریان عرضی روی مجموعه سیلندرهای افقی با آرایش مثلثی و مربعی که در شکل ۱ به صورت طرحواره نشان داده شده است، با سه نوع سیال مختلف (آب، روغن و جیوه) انجام خواهد شد. روابط بدست آمده بین پارامترهای مختلف به صورت نمودار پارتو ارائه خواهد شد که حاوی نکات بسیار مهمی جهت طراحی بهینه هیدرودینامیکی و حرارتی مبادله‌کن‌ها می‌باشد.



شکل ۱- طرحواره مجموعه استوانه‌های افقی با آرایش‌های مثلثی و مربعی

۲- متغیرهای طراحی

در این مقاله، دو متغیر طراحی مستقل وجود دارد: فاصله افقی مرکز تا مرکز استوانه‌ها (H) و فاصله عمودی استوانه‌ها (V). نمای شماتیک 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 در مراحل بعد برای بهینه‌سازی چندهدفی استفاده می‌شوند.

۳- مدل سازی ریاضی

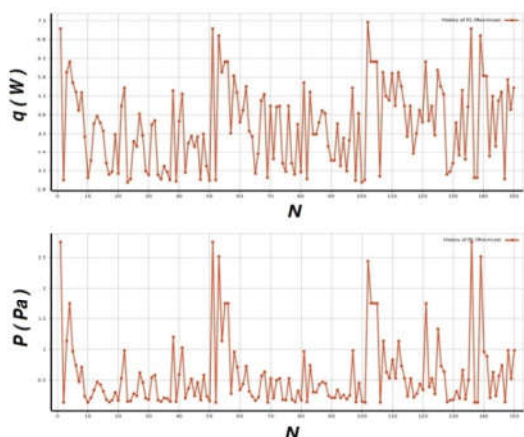
۱-۳- هندسه

هندسه مورد بررسی در این مقاله در شکل ۲، به طور طرحواره نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، تعدادی دامنه محاسباتی موازی کنار یکدیگر قرار گرفته و در نتیجه، میدان جریان در هر دامنه

¹ NSGA II

است که مقادیر احتمال متقاطع (PC) و احتمال جهش (PM) آن به ترتیب 0.02 و 0.7 می باشند. دو هدف متضاد در این مطالعه عبارتند از Q_{Tot} و ΔP که باید به طور همزمان با توجه به متغیرهای طراحی H و V (جدول ۱ و شکل ۲) بهینه شوند. مسأله بهینه‌سازی چندهدفی در مجموع می‌تواند به شکل زیر فرموله گردد:

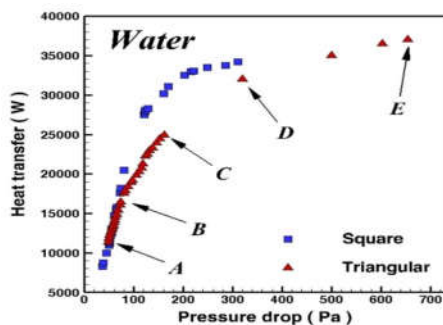
$$\begin{cases} \text{Maximize } Q_{total} = f_1(H, V) \\ \text{Minimize } \Delta P = f_2(H, V) \\ \text{subjected to } \begin{cases} 7 \leq H \leq 20 \text{ (mm)} \\ 7 \leq V \leq 15 \text{ (mm)} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$



شکل ۶- ۱۵۰ شبیه سازی مختلف در بازه های مشخص شده برای متغیر های طراحی

تمامی نواحی بازه‌های مذکور در طی ۱۵۰ شبیه سازی عددی به طور کامل پوشانده شده است که در شکل ۶ نمایش داده شده است. به عبارت دیگر ۱۵۰ مبادله‌کن با شکل‌های مختلف به طور خودکار، حل عددی شده است.

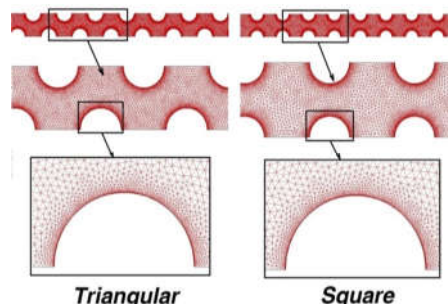
شکل های ۷ تا ۹ نمودارهای پارتوی انتقال گرما بر اساس افت فشار را برای سه سیال آب، روغن و جیوه نشان می‌دهند.



شکل ۷- نمودار پارتو برای آب در دو چیدمان مثلثی و مربعی

۴-۳- روش های عددی

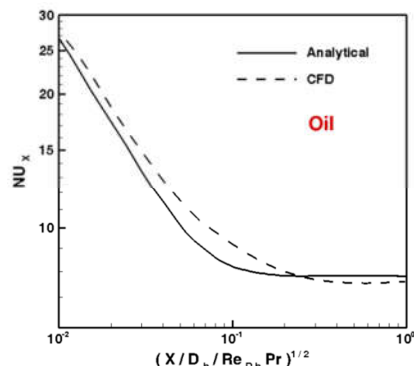
در این مقاله شبیه سازی عددی با استفاده از روش حجم محدود انجام می‌شود. برای اطمینان از اینکه نتایج به دست آمده مستقل از اندازه و تعداد شبکه‌های تولید شده است، چندین شبکه با اندازه های مختلف در جهت های مختلف برای هر مجموعه استوانه ها آزمایش شده است و برای هر یک بهترین شبکه، با بالاترین دقت و کمترین هزینه انتخاب شده است. شبکه نهایی دارای بین ۲۰۰ تا ۲۲۰ هزار المان می باشد. نمونه ای از تولید شبکه برای فرآیند بهینه سازی چندهدفی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- نمونه‌ای از تولید شبکه برای مجموعه استوانه با آرایش مثلثی و مربعی

۵-۳- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی

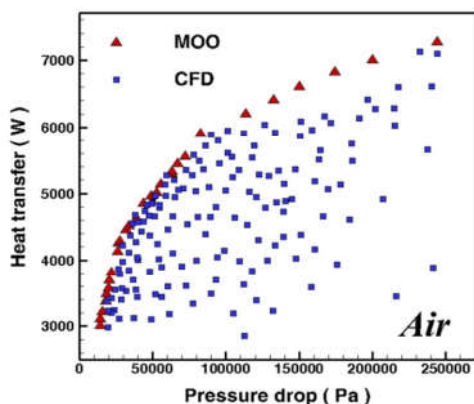
برای دستیابی به اعتماد در مورد شبیه‌سازی‌های عددی، لازم است که نتایج شبیه‌سازی را با داده‌های موجود و موثق مقایسه کنیم. شکل ۵ نتایج عددی ناسلت و ضریب اصطکاک بر اساس عدد رینولدز را در مطالعه حاضر، با داده‌های تحلیلی مشابه مقایسه می‌کند. همانطور که نشان داده شده است، همبستگی خوبی بین نتایج شبیه‌سازی کنونی و گزارش‌های تحلیلی وجود دارد.



شکل ۵- صحنه گذاری نتایج عددی [۲۹]

۴- نتایج بهینه سازی چندهدفی

به منظور بررسی عملکرد مطلوب و بهینه جریان سیال در مبادله‌کن‌های عرضی با چیدمان های مثلثی و مربعی، روش بهینه سازی چندهدفی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفی مورد استفاده قرار گرفت. در تمام نتایج الگوریتم ژنتیک جمعیتی با اندازه 60 انتخاب شده



شکل ۱۰ - همپوشانی داده‌های عددی و نمودار پارتوی استخراج شده

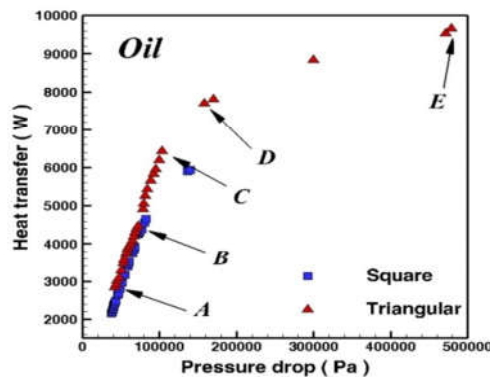
در نهایت، جالب و مفید خواهد بود اگر ۱۵۰ داده به دست آمده اولیه با داده‌های شبیه‌سازی عددی و نمودار پارتوی به دست آمده، مقایسه گردد. شکل ۱۰ همپوشانی نمودار پارتو و داده‌های عددی اولیه را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که نمودار پارتو دقیقاً بهترین مرز داده‌های عددی را در جهت کمترین افت فشار و بالاترین مقدار انتقال گرما تشخیص داده است که این پدیده اعتبار روند بهینه‌سازی چندهدفی را تأیید می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

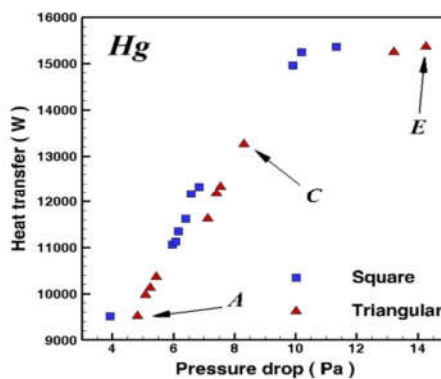
در این مقاله بهینه‌سازی چندهدفی انتقال گرما و جریان سیال در مبادله‌کن گرمایی جریان عرضی، با بهره‌گیری از دینامیک سیالات محاسباتی و الگوریتم ژنتیک چندهدفی انجام گرفت. در ابتدا، جریان سیال به صورت عددی در ۱۵۰ مبادله‌کن گرمایی جریان عرضی مختلف با دو آرایش مثلثی و مربعی با شکل هندسی مختلف با استفاده از تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی حل شد و تمامی پارامترهای عملکردی مهم شامل: میزان شار حرارتی، حداکثر دمای دیواره‌ها، افزایش دمای سیال و افت فشار سیال در مبادله‌کن‌های مذکور محاسبه گردید. سپس، داده‌های عددی محاسبه شده برای بهینه‌سازی چندهدفی جریان سیال در مبادله‌کن گرمایی جریان عرضی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفی مورد استفاده قرار گرفت. در فرآیند بهینه‌سازی چندهدفی، دو پارامتر هندسی به عنوان متغیر طراحی وجود داشت و توابع هدف متضاد نیز، حداکثر نمودن مقدار انتقال گرما و حداقل نمودن افت فشار در مبادله‌کن‌ها بود. در قسمت نتایج نمودار پارتو (شکل‌های ۸ تا ۱۲) که شامل اطلاعات مهم و مفید در طراحی حرارتی و سیالاتی مبادله‌کن‌های مذکور بود، ارائه گردید و به تفصیل به بحث و بررسی در مورد ابعاد مختلف آن پرداخته شد.

۶- نمادها

H	فاصله افقی استوانه‌ها
V	فاصله عمودی استوانه‌ها
A, B, C, D, E	نقاط بهینه در پارتو
n	تعداد کانال‌های مشابه
q	انتقال گرما از یک مجموعه استوانه‌ها (H)



شکل ۸- نمودار پارتو برای روغن در دو چیدمان مثلثی و مربعی



شکل ۹- نمودار پارتو برای جیوه در دو چیدمان مثلثی و مربعی

همانگونه که واضح است در هر 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.

نقاط نشان داده شده در شکل‌های ۷ تا ۹ دارای ویژگی‌های منحصر به فردی هستند. نقاط A و E 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 اندازه کافی راضی باشند، ایده آل خواهد بود. برای پیدا کردن چنین نقطه‌ای، از روش نگاشت^۱ [۲۰] استفاده شده است. بدین منظور مقادیر هر دو تابع هدف را بین ۰ و ۱ انتقال می‌دهیم و میانگین این توابع را محاسبه کنیم. نقطه دارای بالاترین مقدار میانگین، نقطه طراحی ایده آل است. نقطه C 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. همانگونه که در تمامی سیال‌ها در شکل‌های ۷ تا ۹ مشخص است با استفاده از چیدمان مثلثی می‌توان به مقادیر بزرگتری از انتقال گرما به نسبت چیدمان مربعی دست یافت. نقاط B و D نیز نقاطی هستند که مقدار انتقال گرما در جهت یک تابع هدف به نسبت تابع هدف دیگر بسیار متفاوت است و بنابراین می‌تواند گزینه خوبی برای انتخاب به عنوان طراحی نهایی باشد.

¹ Mapping Method

[20] Fabbri G., A genetic algorithm for fin profile optimization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 40, pp. 2165-2172, 1997.

[21] Kobus C.J., R.B. Cavanaugh, A theoretical investigation into the optimal longitudinal profile of a horizontal pin fin of least material under the influence of pure forced and pure natural convection with a diameter-variable convective heat transfer coefficient, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 128, 2006.

[22] Deb K., Agrawal S., Pratap A. and Meyarivan T., A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans Evolutionary Computation*, Vol. 6, pp. 182-97, 2002.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 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.

[29] Bejan A. *Convective Heat Transfer*, Wiley, 2003.

انتقال گرما از کل مجموعه استوانه ها (W)	Q
افت فشار (Pa)	ΔP
دما (K)	T

۷- مراجع

[1] Sanaye S. and Hajabdollahi H. Multi-objective optimization of shell and tube heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp. 1937-1945, 2010.

[2] Costa L.H. and Queiroz M. Design optimization of shell-and-tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 1798-1805, 2008.

[3] Ramananda K. Rao, U. Shrinivasa and J. Srinivasan. Synthesis of cost optimal shelland- tube exchangers. *Heat Transfer Engineering* Vol. 12, No. 3, pp. 47-55, 1991.

[4] Fesanghary M., Damangir E. and Soleimani I. Design optimization of shell and tube heat exchangers using global sensitivity analysis and harmony search algorithm. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 1026-1031, 2009.

[5] Ponce-Ortega J.M., Serna-Gonzalez M., Salcedo-Estrada L.I. and Jimenez- Gutierrez A.. Minimum-investment design of multiple shell and tube heat exchangers using a MINLP formulation. *Chemical Engineering Research and Design Part A* (October 2006).

[6] Ponce-Ortega J.M., Serna-Gonzalez M. and Jimenez-Gutierrez A.. Use of genetic algorithms for the optimal design of shell-and-tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 203-209, 2009.

[7] Ravagnani M.A.S.S. and Caballero J.A.. Optimal heat exchanger network synthesis with the detailed heat transfer equipment design. *Computers and Chemical Engineering* Vol. 31, pp. 1432-1448, 2007.

[8] Caputo A.C., Pelagagge P.M. and Salini P.. Heat exchanger design based on economic optimization. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 1151-1159, 2008.

[9] Özçelik Y.. Exergetic optimization of shell and tube heat exchangers using a genetic based algorithm. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 1849-1856, 2007.

[10] Bejan A., G. Tsatsaronis and M. Moran. *Thermal design and optimization*. Wiley Interscience (1995).

[11] Johannessen E., L. Nummedal and S. Kjelstrup. Minimizing the entropy production in heat exchange. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 2649-2654, 2002.

[12] Sun S., Y. Lu and C. Yan. Optimization in calculation of shell-and-tube heat exchanger. *International Communication in Heat and Mass Transfer* Vol. 20 pp. 675-685, 1993.

[13] Agarwal A. and S.K. Gupta. Jumping gene adaptations of NSGA-II and their use in the multi-objective optimal design of shell and tube heat exchangers. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 86, pp. 123-139, 2008.

[14] Hilbert R., G. Janiga, R. Baron and D. Thevenin. Multi-objective shape optimization of a heat exchanger using parallel genetic algorithms. *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol. 49, pp. 2567-2577, 2006.

[15] Liu Z. and H. Cheng. Multi-objective optimization design analysis of primary surface recuperator for microturbines. *Applied Thermal Engineering* Vol. 28 pp. 601-610, 2008.

[16] Tian Z., L. Ma, B. Gu, L. Yang, F. Liu. Numerical model of a parallel flow minichannel evaporator with new flow boiling heat transfer correlation. *International Journal of Refrigeration* Vol. 35 pp. 135-144, 2015.

[17] Huang L., V. Aute, R. Radermacher. A model for air-to-refrigerant microchannel condensers with variable tube and fin geometries. *International Journal of Refrigeration*. Vol. 40, pp. 269-281, 2014.

[18] Tian Z., B. Gu, L. Yang, F. Liu, Performance prediction for a parallel flow condenser based on artificial neural network, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 63, pp. 459- 467, 2014.

[19] Rao R., V. Patel, Thermodynamic optimization of cross flow plate-fin heat exchanger using a particle swarm optimization algorithm, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, pp. 1712-1721, 2010.