

بهینه سازی چندهدفی شکل صفحه فداشونده در گرم کننده های نیروگاه شهر شازند با استفاده از ترکیب CFD و الگوریتم NSGA II

حامد صفی خانی*
غلامرضا ابراهیمی زاده
حسام الدین مشیدی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران
شرکت مدیریت تولید برق شازند، شازند، ایران
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

استفاده از گرم کننده های فشار بالا در صنایع مختلف نفت و گازی و نیروگاهی همانند نیروگاه شهر شازند بسیار مرسوم است. در نیروگاه مذکور جهت محافظت از تیوب شیت، از روش های مختلفی همانند استفاده از صفحه فداشونده در ورودی سمت لوله ها و پیش از تیوب شیت استفاده می گردد. هدف از این مقاله یافتن شکل بهینه صفحه فداشونده به صورت چندهدفی با استفاده از ترکیب دینامیک سیالات محاسباتی و الگوریتم های بهینه سازی چندهدفی می باشد. با پارامتری نمودن هندسه، صفحه فداشونده کاملاً آزادانه می تواند در شکل های مختلف تغییر شکل دهد به نحوی که به صورت همزمان: بیشترین سرعت ظاهر شده در گرم کننده (که در میزان فرسایش، خوردگی و کلوناسیون مؤثر می باشد) و همچنین نیروی وارده بر صفحه فداشونده کمینه گردند. خروجی نهایی این فرآیند، نمودار بسیار مهم و پرکاربرد به نام نمودار پارتو می باشد که در قسمت نتایج ارائه شده و مورد بحث قرار خواهد گرفت. با استفاده از این نمودار نکات طراحی بسیار زیادی را می توان استخراج نمود که تنها با استفاده از رویکرد ارائه شده در این مقاله یعنی ترکیب دینامیک سیالات محاسباتی و بهینه سازی چندهدفی قابل استخراج می باشد. در پایان لازم به ذکر است که فرآیند بهینه سازی چندهدفی در دو مرحله جداگانه انجام شده است به نحوی که در یک مرحله ضخامت صفحه فداشونده می بایست ثابت بماند (شرایط فعلی نصب شده در نیروگاه) و در حالت دوم ضخامت صفحه فداشونده نیز می تواند تغییر نماید.

واژه های کلیدی: صفحه فداشونده، بهینه سازی شکل، بهینه سازی چندهدفی، دینامیک سیالات محاسباتی، الگوریتم NSGA II.

Multi-objective Optimization of Devotee Plate of Heaters in Shazand Thermal Power Plant using CFD and NSGA II Algorithm

H. Safikhani
Gh. Ebrahimzadeh
H. Moshayyedi

Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran
Shazand Thermal Power Plant, Shazand, Iran
Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, by employing the Computational Fluid Dynamics (CFD) and applying the NSGA II algorithm, the geometry of devotee plate of high pressure heaters in Shazand thermal power plant is multi-objectively optimized. In the optimization process, three geometrical design variables are changed so as to simultaneously minimize the maximum velocity in heater and minimize the force applied to the devotee plate. The three design variables are: inlet diameter of devote plate, thickness of straight part and thickness of indirect part. In the results section, the Pareto front will be presented, and it will be demonstrated that the Pareto front conveys very important results for the designing of the shape of devotee plates. Such important optimal principles would not have been obtained without the use of both CFD modeling and the multi-objective Pareto optimization approach. It should be mentioned that the MOO is performed two times. One for the case that the thickness of devotee plate is fixed and equal to 25 mm and the second times which the thickness of devotee plate can varied and is one of the design variables.

Keywords: Devotee plate, Shape optimization, Multi-objective optimization, CFD, NSGA II.

۱- مقدمه

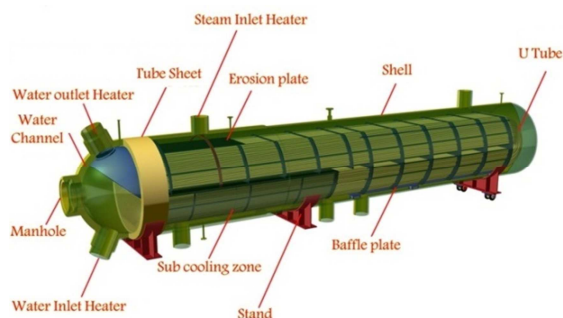
مراجع نسبتاً زیادی به بهینه سازی ابعاد مختلف فرآیندی و هندسی مبدل ها و گرم کننده ها پرداخته اند [۱-۱۵]. صنایع و حاج عبدالمی [۱] مبدل های پوسته-لوله را با استفاده از الگوریتم NSGA II به صورت چندهدفی بهینه سازی کردند. آنها توابع هدف را هزینه و کارایی گرفته و در نهایت نمودار پارتو را در شرایط جریانی و فرآیندی مختلف ارائه نمودند. کاستا و کبروش [۲] و راماناندا و شیرانواسا [۳] نیز میزان سطح انتقال گرما در مبدل های پوسته-لوله را بهینه سازی نمودند. برخی از پژوهشگران [۴-۹]، با جمع نمودن دو تابع هدف انتقال گرما و افت فشار، مبدل های انتقال حرارتی پوسته-لوله را بهینه سازی نمودند. برخی دیگر از پژوهشگران [۱۰-۱۲] نیز مجموع آنتروپی در مبدل های پوسته لوله را کمینه کردند. تیان و همکاران [۱۶] با استفاده از مدلسازی عددی

استفاده از گرم کننده های فشار بالا در صنایع مختلف نیروگاهی و نفت و گازی همانند نیروگاه شهر شازند بسیار مرسوم است. گرم کننده در واقع یک مبادله کن گرما است (معمولاً از نوع پوسته-لوله) که هدف از آن تبادل گرما بین دو سیال سرد و گرم است. به وسیله گرم کننده، سیال سرد قبل از ورود به بویلر به وسیله سیال داغ بعد از توربین گرم می شود. گرم کننده ها می توانند شکل های مختلفی داشته باشند که در این مقاله گرم کننده به شکل مبدل پوسته-لوله مد نظر می باشد. بهینه بودن هندسه قسمت های مختلف گرم کننده ها می تواند به مقدار بسیار زیاد بر پارامترهای عملکردی گرم کننده ها همانند: مقدار تبادل انتقال گرما، میزان خوردگی، کلوناسیون و ... اثرگذار باشد. در سال های اخیر

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: h-safikhani@araku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۰۴

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۳۱

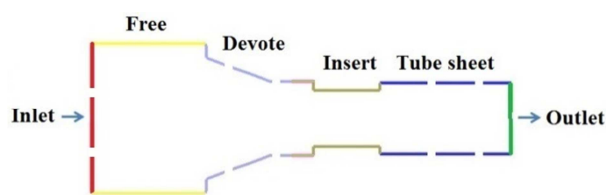


شکل ۱- هندسه طرح واره اجزای به کار رفته در گرم کننده های فشار بالای شهر شازند

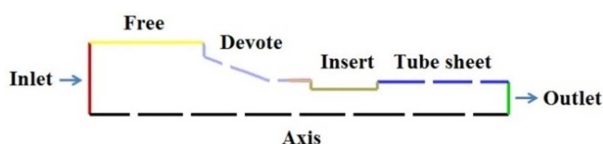
هندسه ساده شده طرح واره برای ناحیه مربوط به یک لوله در شکل ۲ نمایش داده شده است. همانگونه که از این شکل مشخص است، ناحیه مورد بررسی در این گزارش از ناحیه ورود سیال به گرم کننده تا پایان تیوب شیت برای یک لوله می باشد. از شکل مذکور مشخص است که پس از ناحیه ورودی به ترتیب، قسمت آزاد اطراف هر لوله در عدسی، صفحه فداشونده، کلدینگ، اینزرت، تیوب شیت و ناحیه خروجی وجود دارد. از آنجا که این ناحیه کاملاً متقارن است، جهت صرفه جویی در زمان، می توان از مدل متقارن محوری^۳ با هندسه نمایش داده شده در شکل ۳ استفاده نمود.

۲-۲- تولید شبکه

پس از ایجاد هندسه، می بایست جهت انجام محاسبات عددی، شبکه محاسباتی (مش) تولید نمود. تلاش شده است تا بهترین و با کیفیت ترین مش برای گرم کننده های مورد بررسی تولید گردد. شکل ۴ مش تولید شده برای یکی از حالات مورد بررسی را نمایش می دهد. در مش های تولید شده حدوداً به طور متوسط ۳۰۰۰۰ عدد المان وجود دارد و همچنین در نزدیکی دیواره ها به دلیل گرادیان بالای پارامترها، مش ها ریزتر تولید شده اند. آزمون استقلال از شبکه نیز انجام شده است.



شکل ۲- طرح واره ناحیه اطراف یک لوله در گرم کننده و المان های مرتبط با آن



شکل ۳- استفاده از مدل متقارن محوری

رابطه جدیدی را میزان انتقال گرما در اواپراتورها ارائه نمودند. آنها پس از صحنه گذاری 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 مدل سازی حجم محدود، جریان سیال در مبدل های حرارتی با لوله و پره های متغیر را مدل سازی نمودند. آنها در پایان بهبود عملکرد مبدل را با استفاده از مدل ارائه شده توسط خود، گزارش نمودند. تیان و همکاران [۱۸] با استفاده از مدل سازی شبکه های عصبی، عملکرد چگالنده های جریان موازی را بررسی نمودند. آنها نتایج خود را با نتایج موجود مقایسه نمودند و گزارش بسیار خوبی از نتایج شبکه های عصبی خود ارائه نمودند. رائو و پاتل [۱۹] با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورها، عملکرد یک مبدل حرارتی صفحه ای پره دار را به صورت چندهدفی بهینه سازی نمودند. آنها در پایان با ارائه نمودار پارتو، هندسه بهینه چگالنده را ارائه نمودند. فابری [۲۰] با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی چندهدفی هندسه بهینه پین های موجود در یک مبدل حرارتی را به دست آورد. در پژوهش مذکور افزایش میزان انتقال گرما و افزایش میزان کارایی مبدل دو تابع هدف مورد استفاده بودند. آنها هندسه پین ها را با استفاده از روش بزیر پارامتریک نمودند. کوپوس و کاواناف [۲۱] در یک میزان انتقال گرما ثابت، کمترین حجم یک مبدل انتقال حرارتی را محاسبه نمودند.

برای جلوگیری از ایجاد فرسایش، خوردگی و کاویتاسیون در گرم کننده های فشار بالای شهر شازند، چندین مکانیزم اصلاحی همانند قراردادن یک صفحه فداشونده در سمت لوله ها و پیش از تیوب شیت انجام شده است. بر اساس اطلاعات و بررسی های ما، تاکنون در مراجع مختلف هندسه بهینه صفحات فداشونده در گرم کننده های فشار بالا با استفاده از ترکیب علوم عددی و بهینه سازی چندهدفی انجام نشده است. یافتن هندسه دقیق صفحه فداشونده مذکور به نحوی که سبب کاهش اثرهای فرسایش، خوردگی و کاویتاسیون گردد، در این مقاله با استفاده از ترکیب دینامیک سیالات محاسباتی^۱ و الگوریتم های بهینه سازی چندهدفی^۲ به عنوان نوآوری اصلی این مقاله انجام شده است.

۲-۲- مدل سازی عددی

۲-۱- هندسه

اولین قدم جهت یافتن شکل بهینه صفحه فداشونده در گرم کننده ها، مدل سازی و پارامتری نمودن هندسه می باشد. شکل ۱ هندسه طرحواره اجزای به کار رفته در گرم کننده های فشار بالای نیروگاه شهر شازند را نشان می دهد. از آنجا که گرم کننده مورد بررسی دارای ۱۰۴۴ عدد لوله می باشد و از طرف دیگر برای بهینه سازی، نیاز به انجام شبیه سازی های بسیار زیاد وجود دارد، بنابراین می بایست هندسه به نحوی ساده سازی گردد که از یک طرف، خطا وارد روش مدل سازی نگردد و هندسه ساده سازی شده بیانگر هندسه اصلی باشد و از طرف دیگر به قدری ساده باشد که انجام شبیه سازی های زیاد به لحاظ زمانی میسر باشد.

¹ CFD

² NSGA II

³ Axisymmetric

۵-۲- شرایط مرزی

در ورودی لوله‌های گرم کننده، دبی، دما و میزان اغتشاش مشخص است و در خروجی فشار مشخص تعبیه شده است. همچنین در دیواره‌ها از شرط مرزی دیواره و در مرکز نیز از شرط مرزی تقارن استفاده شده است.

۶-۲- صحنه گذاری نتایج عددی

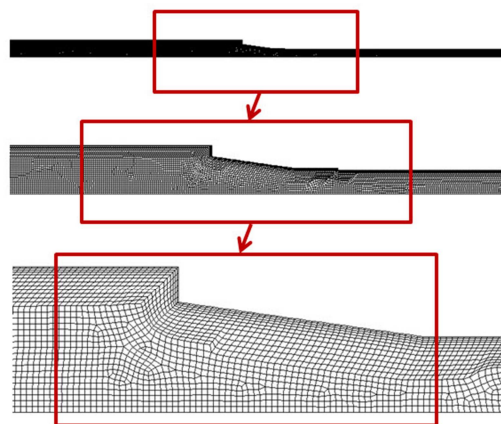
یکی از مهمترین مراحل در یک شبیه‌سازی عددی صحنه‌گذاری نتایج و مقایسه داده‌های عددی به دست آمده با نتایج تجربی، عددی و یا تحلیلی موجود می‌باشد. شکل ۵ عدد ناسلت در داخل یک لوله در جریان مغشوش را که با استفاده از روش عددی محاسبه شده است با داده‌های تحلیلی و تجربی موجود در منابع معتبر مقایسه می‌کند. همانگونه که مشخص است، داده‌های عددی با دقت خوبی مقادیر مختلف را محاسبه می‌نمایند. بنابراین میتوان با اطمینان خاطر از روش عددی ارائه شده در این گزارش جهت مدلسازی عددی جریان سیال در گرم کننده‌های فشار بالا استفاده نمود.

۳- بهینه سازی چندهدفی شکل صفحه فداشونده

در این مقاله فرآیند بهینه سازی به صورت جداگانه دو مرتبه انجام گرفته است. مرتبه اول برای صفحه فداشونده با ضخامت ثابت و دقیقاً برابر با مقداری که هم اکنون در نیروگاه شازند نصب و در حال کار است و مرتبه دوم ضخامت صفحه فداشونده نیز به عنوان یک پارامتر طراحی در نظر گرفته شده است و مجاز است کاهش یا افزایش یابد. نتایج هر دو قسمت به صورت جداگانه ارائه شده است.

۳-۱- بهینه سازی چندهدفی شکل صفحه فداشونده با ضخامت ثابت

همانگونه که از عنوان این قسمت مشخص است، ضخامت کلی صفحه فداشونده در این قسمت ثابت است و برابر با ۲۵ میلیمتر می‌باشد. بنابراین در مجموع دو متغیر طراحی: ۱- قطر دهانه ورودی و ۲- ضخامت قسمت افقی (یا ضخامت قسمت مورب که به یکدیگر وابسته هستند)، وجود دارد که می‌بایست در فرآیند بهینه‌سازی آنها را تغییر داد. دو متغیر مذکور به صورت شماتیک در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. تغییر ضخامت در قسمت دوم طبیعتاً سبب تغییر در هزینه ساخت و تولید صفحه فداشونده خواهد شد که می‌بایست میزان بهبود عملکرد در کنار تغییر قیمت به طور همزمان مورد ارزیابی قرار گیرد. با استفاده از مجموعه نظریه‌هایی که در مورد الگوریتم NSGA II [۲۵-۲۲] وجود دارد، بهینه‌سازی چندهدفی شکل صفحه فداشونده انجام شده است و نتایج در ادامه ارائه خواهد شد.



شکل ۴- نمونه ای از مش منظم تولید شده

۳-۲- معادلات حاکم

با قدری محاسبه می‌توان دریافت که عدد رینولدز در شرایط کاری نامی، در هریک از لوله‌ها حدوداً برابر با ۲۷۰۰۰ می‌باشد و چون این عدد از ۲۳۰۰ (رینولدز بحرانی) بیشتر می‌باشد، پس جریان سیال در لوله‌ها دارای رژیم مغشوش (توربولنت) می‌باشد. معادلات حاکم در جریان مغشوش و پایا بدین ترتیب می‌باشد:

پیوستگی:

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

مومنتم:

$$\nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau - \tau_t) + \rho g \quad (2)$$

انرژی:

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

انرژی جنبشی اغتشاش:

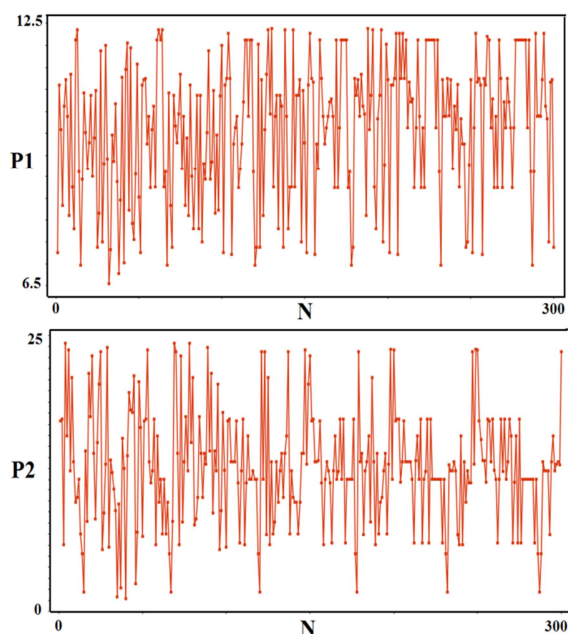
$$\nabla \cdot (\rho V k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G - \rho \varepsilon \quad (4)$$

نرخ اتلاف اغتشاش:

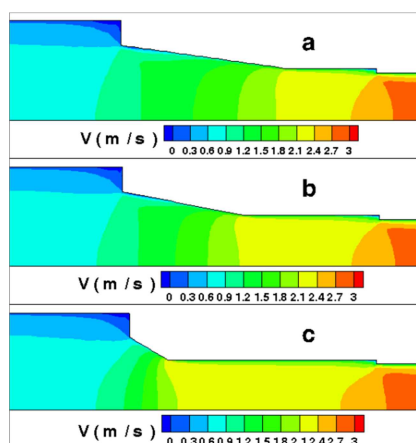
$$\nabla \cdot (\rho V \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \quad (5)$$

۴-۲- مدلسازی اغتشاش

به طور کلی برای مدلسازی جریان اغتشاشی می‌توان از دو دسته مدل‌های رینولدز پایین (همانند مدل‌های Spallart-Almaras و $k-\omega$) و یا رینولدز بالا (همانند $k-\varepsilon$) استفاده نمود. تفاوت عمده این دو دسته از مدل‌های اغتشاشی در مقادیر عدد رینولدزی می‌باشد که می‌توانند مدلسازی نمایند. در این گزارش به دلیل نیاز به مدلسازی جریان در اعداد رینولدز بالا (۲۷۰۰۰)، مدل اغتشاشی $k-\varepsilon$ مورد استفاده قرار گرفته است. تفاوت عمده دیگر در این دو دسته از مدل‌های اغتشاشی در نحوه مدلسازی جریان در نزدیکی دیواره‌ها می‌باشد که در قسمت بعد به طور مفصل بررسی خواهد شد. در این گزارش با توجه به استفاده از مدل رینولدز بالای $k-\varepsilon$ ، در نزدیکی دیواره‌ها از توابع دیواره مناسب استفاده خواهد شد. در تولید شبکه تلاش شده است تا شرط $60 \leq y^+ \leq 300$ در شبیه‌سازی‌های مختلف نیز رعایت گردد.



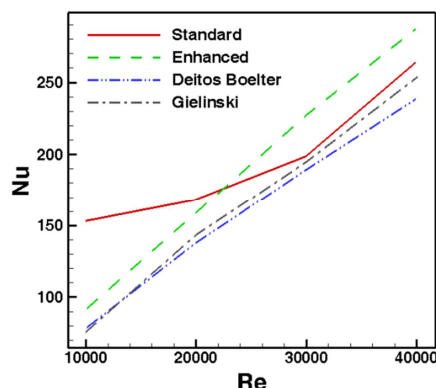
شکل ۷-۳۰۰ ران مختلف برای حالت ضخامت کلی صفحه ثابت انجام شده است



شکل ۸- توزیع سرعت در سه نمونه از صفحه فداشونده در حالت ضخامت کلی ثابت (a), $P_2 = 4 \text{ mm}$ (b), $P_2 = 10 \text{ mm}$ (c), $P_2 = 20 \text{ mm}$

نمودار پارتو که بیانگر نتایج بهینه سازی چندهدفی برای حالت ضخامت ثابت می باشد، در شکل ۹ نمایش داده شده است. هریک از نقاط نمایش داده شده بیانگر یک صفحه فداشونده منحصر بفرد و بهینه می باشند. همانگونه که مشخص است دو تابع بیشینه سرعت و بیشینه نیروی وارده بر صفحه فداشونده با یکدیگر تضاد دارند، یعنی هرگاه یکی از آنها بهتر شود دیگری تخریب می گردد و بالعکس.

با دقت در این نمودار مشخص است که تغییرات نیرو بسیار کم و ناچیز است و بین مقادیر ۶۳۴۱ و ۶۳۴۷ نیوتن تغییر می کند، بنابراین می توان تنها تغییرات بیشینه سرعت را لحاظ نمود. صفحه فداشونده با کمترین سرعت بیشینه دارای قطر و ضخامت افقی برابر با به ترتیب ۲۱ و ۲ میلی متر می باشد. شکل ۱۰ شماتیک هندسه صفحه فداشونده بهینه با ضخامت ثابت (ضخامت ثابت و برابر با مقدار فعلی نصب شده در نیروگاه ۲۵ میلی متر) را نشان می دهد.



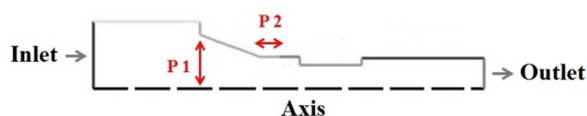
شکل ۵- داده های ناسلت عددی محاسبه شده و مقادیر تجربی و تحلیلی

در این مقاله توابع هدف متضاد، V_{max} و F می باشند که می بایست با توجه به متغیرهای طراحی P_1 و P_2 بهینه گردند. در واقع صورت مسأله نهایی بهینه سازی را می توان این چنین تعریف نمود:

$$\begin{aligned} V_{max} &= f_1(P_1, P_2) \rightarrow \text{کمینه گردد} \\ F_{Devotee} &= f_2(P_1, P_2) \rightarrow \text{کمینه گردد} \\ \{ 12.9 \text{ mm} < P_1 < 25 \text{ mm} \\ 0 \text{ mm} < P_2 < 25 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6)$$

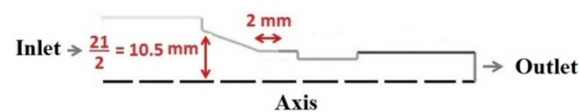
در مسأله ای حاضر دو و سه متغیر بهینه سازی وجود دارد که در نگاه اول، استفاده از الگوریتم های جستجوی فراگیر را مناسب تر به نظر می رساند. از طرفی، گرچه تعداد متغیرها کم است اما تحلیل هر مدل نیاز به زمان قابل توجهی در فرآیند بهینه سازی دارد. در نتیجه استفاده از الگوریتم های تکاملی در مورد فوق توجیه بیشتری دارد.

تمامی نواحی بازه های مذکور در طی ۳۰۰ حل عددی به طور کامل پوشانده شده است که تمامی داده های ورودی در شکل ۷ نمایش داده شده است. به عبارت دیگر ۳۰۰ صفحه فداشونده با شکل های مختلف به طور خودکار، حل عددی شده است. شکل ۸، توزیع سرعت سیال در صفحه فداشونده در سه نمونه از ۳۰۰ عدد شبیه سازی عددی انجام شده برای حالت ضخامت کلی ثابت را نشان می دهد.

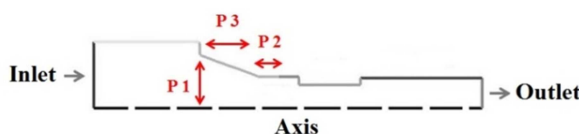


شکل ۶- متغیرهای طراحی جهت بهینه سازی شکل صفحه فداشونده در حالت ضخامت کلی ثابت

بیشینه سرعت را لحاظ نمود. صفحه فداشونده با کمترین سرعت بیشینه دارای قطر، ضخامت افقی و ضخامت مورب برابر با به ترتیب



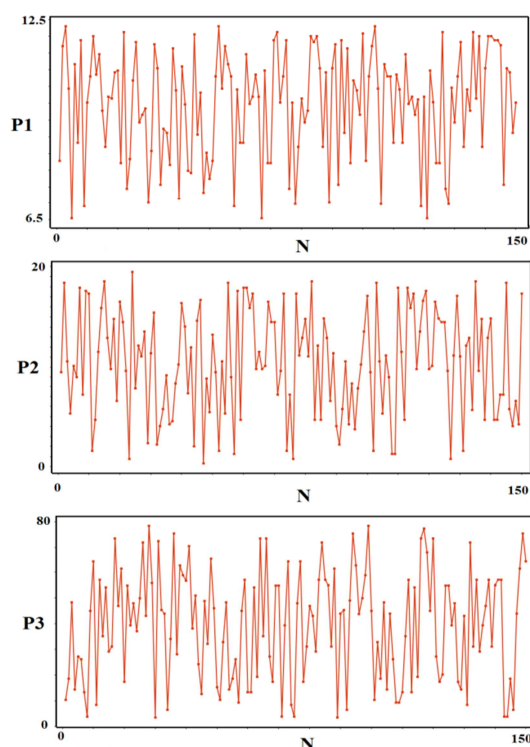
شکل ۱۰- شکل بهینه نهایی برای صفحه فداشونده در حالت ضخامت کلی ثابت



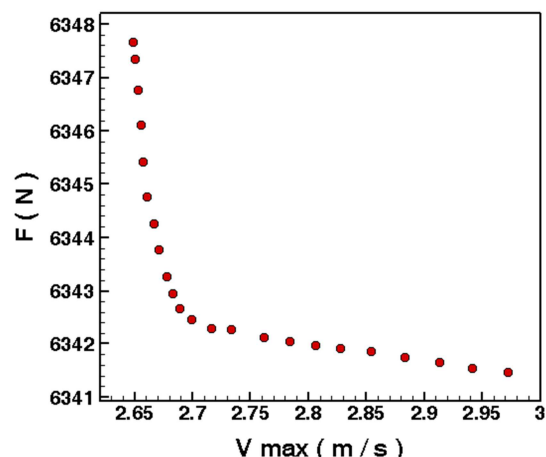
شکل ۱۱- متغیرهای طراحی جهت بهینه سازی شکل صفحه فداشونده در حالت ضخامت کلی متغیر

۲۱، ۲ و ۲۵ میلیمتر می باشد. شکل ۱۵ شماتیک هندسه صفحه فداشونده بهینه با ضخامت متغیر را نشان می دهد.

در پایان با مقایسه نتایج نهایی دو فرآیند بهینه سازی چندهدفی صفحه فداشونده در حالت ضخامت کلی ثابت و متغیر (به ترتیب در شکل های



شکل ۱۲- ۱۵۰ ران مختلف برای حالت ضخامت کلی صفحه متغیر انجام شده است.



شکل ۹- نمودار پارتو برای حالت ضخامت کلی صفحه فداشونده ثابت

۲-۳- بهینه سازی چندهدفی صفحه فداشونده در حالت ضخامت کلی متغیر

در این قسمت ضخامت کلی صفحه فداشونده نیز متغیر است و می تواند تا هر مقداری تغییر نماید. بنابراین در مجموع سه متغیر طراحی: ۱- قطر دهانه ورودی ۲- ضخامت قسمت افقی و ۳- ضخامت قسمت مورب، وجود دارد که می بایست در فرآیند بهینه سازی آنها را تغییر داد. سه متغیر مذکور به صورت شماتیک در شکل ۱۱ نشان داده شده اند.

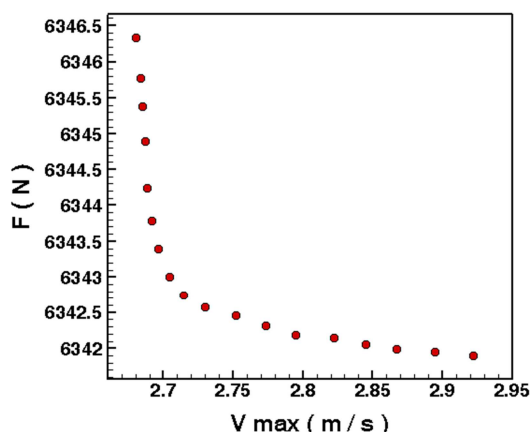
در این قسمت نیز همانند حالت قبل با استفاده از الگوریتم NSGA II بهینه سازی چندهدفی شکل صفحه فداشونده در حالت ضخامت کلی متغیر انجام شده است و نتایج در ادامه ارائه خواهد شد. در این حالت نیز توابع هدف متضاد، V_{max} و F می باشند که می بایست با توجه به متغیرهای طراحی P_1 ، P_2 و P_3 بهینه گردند. صورت مسئله بهینه سازی این چنین است:

$$\begin{aligned} V_{max} &= f_1(P_1, P_2, P_3) \rightarrow \text{کمینه گردد} \\ F_{Devotee} &= f_2(P_1, P_2, P_3) \rightarrow \text{کمینه گردد} \\ &\begin{cases} 12.9 \text{ mm} < P_1 < 25 \text{ mm} \\ 0 \text{ mm} < P_2 < 20 \text{ mm} \\ 0 \text{ mm} < P_3 < 80 \text{ mm} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

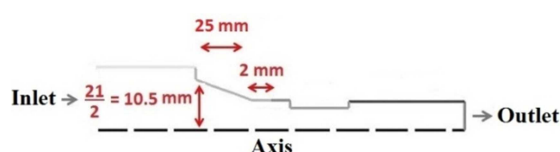
تمامی نواحی بازه های مذکور در طی ۱۵۰ ران عددی به طور کامل پوشانده شده است که تمامی داده های ورودی در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

به عبارت دیگر ۱۵۰ صفحه فداشونده با ضخامت کلی متغیر با شکل های مختلف به طور اتوماتیک، حل عددی شده است. شکل ۱۳، توزیع سرعت سیال در صفحه فداشونده در سه نمونه از ۱۵۰ عدد شبیه سازی عددی انجام شده برای حالت ضخامت کلی متغیر را نشان می دهد.

نمودار پارتو که بیانگر نتایج نهایی بهینه سازی چندهدفی برای حالت ضخامت کلی متغیر می باشد، در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. هریک از نقاط نمایش داده شده بیانگر یک صفحه فداشونده منحصر بفرد و بهینه می باشند. همانگونه که مشخص است در این حالت نیز دو تابع بیشینه سرعت و بیشینه نیروی وارده بر صفحه فداشونده با یکدیگر تضاد دارند، یعنی هرگاه یکی از آنها بهتر شود دیگری تخریب می گردد و بالعکس. با دقت در این نمودار مشخص است که در این حالت نیز همانند حالت قبل، تغییرات نیرو بسیار کم و ناچیز است و بین مقادیر ۶۳۴۰ و ۶۳۵۰ نیوتن تغییر می کند، بنابراین می توان تنها تغییرات



شکل ۱۴- نمودار پارتو برای حالت ضخامت کلی صفحه فداشونده متغیر



شکل ۱۵- شکل بهینه نهایی برای صفحه فداشونده در حالت ضخامت کلی ثابت

۵- فهرست علائم

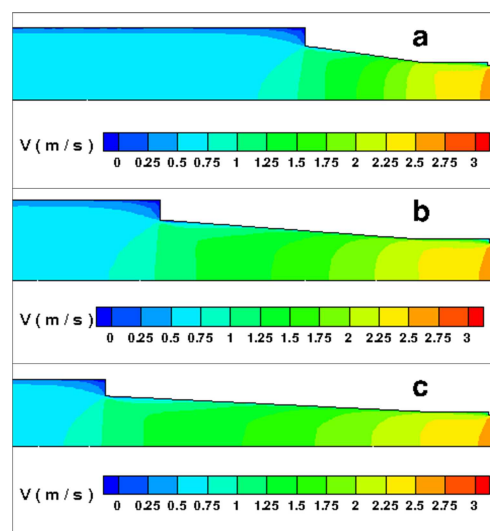
نیروی وارده بر صفحه فداشونده (N)	F
تولید اغتشاش در معادله اغتشاش (m^2/s^2)	G
تولید کلی اغتشاش در معادله اغتشاش (m^2/s^2)	k
تعداد شبیه سازی های عددی (-)	N
متغیرهای طراحی در فرآیند بهینه سازی (mm)	$P_1 - P_3$
دما (K)	T
اغتشاش (-)	t
بیشینه سرعت در گرم کننده (m/s)	V_{max}
فاصله بی بعد از دیوار (-)	y^+
نرخ اتلاف اغتشاش (m^2/s^3)	ε
لزجت (kg/s. m)	μ
چگالی (kg/m^3)	ρ

۶- تقدیر و تشکر

این مقاله با تعامل مشترک دانشگاه اراک، شرکت فناوران ثریای موعود (دانش بنیان) و نیروگاه حرارتی شهر شازند انجام گرفته است. علاوه بر نتایج علمی و فنی ارزنده ای که از خروجی این پروژه بدست آمد، می توان گفت این پروژه یک مصداق مناسب برای نحوه تعامل و ارتباط دانشگاه و صنعت است که بدین وسیله از تمامی ارگان های مذکور تشکر به عمل می آید.

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.



شکل ۱۳- توزیع سرعت در سه نمونه از صفحه فداشونده در حالت ضخامت کلی متغیر $P_3 = 60$ (c), $P_3 = 40$ mm (b), $P_3 = 21$ mm (a)

۱۰ و ۱۵) مشخص است که صفحه فداشونده ای که کاملاً بهینه باشد دارای ضخامت کلی ۲۷ میلیمتر می باشد که بیشتر از مقداری است که هم اکنون در نیروگاه شازند نصب شده است (۲۵ میلیمتر). در چنین شرایطی با افزایش ضخامت کلی صفحه فداشونده طبیعتاً هزینه تولید آن نیز افزایش می یابد. در چنین شرایطی می بایست بهبود عملکرد صفحه فداشونده را در کنار افزایش هزینه آن مقایسه نمود.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با ترکیب CFD و الگوریتم بهینه سازی چندهدفی NSGA II، شکل بهینه صفحه فداشونده در نیروگاه شهر شازند که برای محافظت از تیوب شیت در گرم کننده های فشار بالا نصب می گردد، استخراج شد.

هندسه صفحه فداشونده به نحوی مقید گردید که کاملاً آزاده بتواند در شکل های مختلف تغییر شکل دهد. پارامترهای هدف کاهش بیشینه سرعت در گرم کننده و کاهش نیروی وارد بر صفحه فداشونده انتخاب گردید. پارامترهای مذکور در میزان خوردگی، فرسایش و کلویتاسیون به وجود آمده در گرم کننده بسیار مؤثر می باشند. در مجموع جریان سیال در رژیم مغشوش در ۴۵۰ صفحه فداشونده با شکل های مختلف به صورت عددی حل شد و دو شکل بهینه استخراج گردید که شکل طرح واره این دو هندسه بهینه در شکل های ۱۰ و ۱۵ ارائه گردید و به طور مفصل در مورد نتایج استخراج شده بحث شد. نمودار پارتو نیز که حاوی اطلاعات بسیار مفید در طراحی چندهدفی می باشد، ارائه گردید و در مورد آن به طور کامل بحث گردید. نتایج به دست آمده در این مقاله تنها با استفاده از رویکرد ارائه شده در این مقاله یعنی ترکیب همزمان CFD و الگوریتم های بهینه سازی چندهدفی قابل استخراج می باشد.

- optimization of square cyclones using CFD and neural networks, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 89, pp. 301–309, 2011.
- [24] Safikhani H., A. Hajiloo and M. A. Ranjbar. Modeling and multi-objective optimization of cyclone separators using CFD and genetic algorithms, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 35, pp. 1064–1071, 2011.
- [25] Safikhani H., Abbassi A., Khalkhali A. and Kalteh M., Multi-objective optimization of nanofluid flow in flat tubes using CFD, artificial neural networks and genetic algorithms, *Advanced Powder Technology*, Vol. 25, pp. 1608–1617, 2014.
- [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 Rao K., Shrinivasa U. and Srinivasan J., Synthesis of cost optimal shell-and-tube heat 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] Özgelik 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., Tsatsaronis G. and Moran M., *Thermal design and optimization*. Wiley Interscience, 1995.
- [11] Johannessen E., Nummedal L. and Kjelstrup S., Minimizing the entropy production in heat exchange. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 2649–2654, 2002.
- [12] S. Sun, 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 Gupta S.K., 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., Janiga G., Baron R. and Thevenin D., 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 Cheng H., Multi-objective optimization design analysis of primary surface recuperator for microturbines. *Applied Thermal Engineering* Vol. 28 pp. 601–610, 2008.
- [16] Tian Z., Ma L., Gu B., Yang L., Liu F., 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., Aute V., Radermacher R., 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., Gu B., Yang L., Liu F., Performance prediction for a parallel flow condenser based on artificial neural network, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 63, pp. 459–467, 2014.
- [19] Rao R., Patel V., 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.
- [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., Cavanaugh R.B., 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. 182–197, 2002.
- [23] Safikhani H., Akhavan-Behabadi M. A., Nariman-Zadeh N. and Mahmoodabadi M. J., Modeling and multi-objective