



بهینه‌سازی لوله‌های خان‌دار بویلر نیروگاه شازند اراک با استفاده از الگوریتم ژنتیک

حمید مختاری^{۱*}، امیر محمودی بنهنگی^۱ و رامین حقیقی خوشخو^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

^۲ استادیار، دانشکده مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۰۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۸/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۲۴

چکیده

افزایش افت فشار به دلیل استفاده از لوله‌های خان‌دار و افزایش ضریب انتقال حرارت در ناحیه تک فاز جریان در طول جوشش، باعث شد که در این مقاله با الگوریتم تکاملی ژنتیک، به بهینه‌سازی پارامترهای لوله خان‌دار، باهدف افزایش ضریب انتقال حرارت در ناحیه تک فاز و هدف دوم، کاهش افت فشار در کل سیرکولاسیون طبیعی درام، پرداخته شود. انتخاب تابع هدف اول، با توجه به آنالیز افت فشار در هر قسمت از چرخه درام و نیز به دلیل تغییرات شدیدی صورت پذیرفته است که نسبت به تغییر پارامترهای لوله خان‌دار از خود نشان می‌دهد. بهینه‌سازی، طی دو سناریو بر اساس تعداد لوله‌های ثابت (سناریو اول) و فلاکس جرمی ثابت (سناریو دوم) انجام شد. نتایج نشان دادند که طراحی در حالت تعداد لوله‌های ثابت که بر اساس عدم‌تغییر طول و عرض بویلر نیروگاه شازند اراک تعریف شده است، منجر به کاهش ارتفاع بویلر از ۶۰ متر در حالت فعلی، به ۲۷/۲۳ متر شد؛ درنهایت نقش پارامترهای لوله خان‌دار و فلاکس جرمی در این سناریو نسبت به سناریو اول در کاهش افت فشار کاملاً مشخص و منجر به تعیین ارزش پارامترهای لوله خان‌دار گردید.

کلمات کلیدی: افت فشار؛ بهینه‌سازی؛ سیرکولاسیون طبیعی؛ جریان دوفازی؛ لوله‌های خان‌دار.

Optimization of Shazand Arak Power Plant Boiler Rifled Tubes using Genetic Algorithm

H. Mokhtari^{1*}, A. Mahmoodi¹, R. Haghghi Khoshkhoo²

¹ Msc. Student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran.

² Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran.

Abstract

Increase in pressure drop due to the use of rifled tubes and also increase the heat transfer coefficient in two-phase flow and during boiling length (single-phase region) caused that using evolutionary genetic algorithm to optimize the parameters of rifled tubes, with the goal of increasing the heat transfer coefficient over the single-phase region and reduce the pressure drop in natural circulation system of drum should be discussed in this paper. Choice of objective function was done with respect to the analysis of the pressure drop in each part of the drum circle and its large changes relative to the change of rifled tubes parameters. The optimization was done using two scenarios based on constant number of tubes (scenario I) and constant mass flux (scenario II). The results showed that the design in case of constant number of tubes which is defined base on no changes in length and width of the Shazand Arak power plant boiler, led to reduce the height of boiler from 60m to 27.23m. Finally, the role of rifled tubes parameters and mass flux in this scenario relative to first scenario in reduce of pressure drop was led to set values of the rifled tubes parameters.

Keywords: Pressure Drop; Optimization; Natural Circulation; Two-Phase Flow; Rifled Tubes.

۱- مقدمه

برجسته که در این مقاله بیان شده است، شامل موارد زیر است:

- مدل‌سازی سیکل درام با توجه به سلسله مراتبی بودن ساختار نیروگاه.
- مدل‌سازی جریان دوفازی در لوله‌های خان‌دار.
- تأثیر عملکرد سیکل درام در بارهای نسبی نیروگاه در حالت استاتیکی تغییر بار.
- بهینه‌سازی پارامترهای لوله خان‌دار شامل: طول خان، ارتفاع خان، زاویه خان با خط افق، قطر داخلی لوله و تعداد خان‌ها.
- طراحی لوله‌های واتروال بر اساس دو سناریو فلاکس جرمی ثابت و تعداد لوله‌های ثابت برای یک نمونه مطالعاتی.
- یافتن بهترین پارامترهای لوله خان‌دار و منحنی پرتو آن با متغیر در نظر گرفتن فلاکس جرمی بر اساس تغییر سرعت سیال داخل لوله‌ها و قیود حاکم بر جریان دوفازی.

۲- مدل‌سازی افت فشار در لوله‌های خان‌دار

با توجه به سلسله مراتبی بودن کنترل نیروگاه لازم است که درام به‌عنوان زیرمجموعه‌ای از بویلر تحت پارامترهای آن طراحی گردد.

با توجه به اینکه این مقاله تنها به بحث ترموهیدرولیکی کوره بویلر نیروگاه شازند اراک می‌پردازد؛ در نتیجه مباحث مربوط به محاسبه شار حرارتی (q) که در معادلات بیان شده است را می‌توان در مرجع [۱۳] دنبال کرد.

در گام اول، ابتدا با توجه به قانون اول ترمودینامیک، نیاز به یافتن میزان دبی بخار تولید در بویلر است که برای محاسبه آن نیاز است تا گام‌های زیر طی گردد:

- ۱- محاسبه دبی هوا با توجه به درصد هوای اضافه.
- ۲- محاسبه دمای مشعل و درصد ترکیبات گازهای حاصل از احتراق با دبی هوا و دبی سوخت مشخص.
- ۳- استفاده از قانون اول ترمودینامیک برای یافتن میزان دبی بخار تولید در بویلر.
- ۴- یافتن میزان دمای خروجی از اواپراتور و درام با توجه به تعیین کیفیت بخار خروجی از لوله‌های واتروال و رایزر.

ساخت لوله‌ها یا مجاری خان‌دار، یک روش افزایش انتقال حرارت است که به‌طور گسترده مورد استفاده برای جریان تک فاز قرار می‌گیرد [۱]، در جوشش و در چگالش، لوله آجدار موجب افزایش حرارت و انتقال جرم به دلیل ایجاد گردش جریان و تلاطم می‌شود. در لوله‌های مدور، دنده‌ها موجب راندن مایع به سمت دیواره لوله و بخار به سمت مرکز لوله شده، در نتیجه این جداسازی دو فاز حاشیه کافی برای استفاده از شار حرارتی بحرانی بالاتر (CHF) را مهیا می‌سازد. این مسئله مورد تحقیق و پژوهش وایزمن و همکاران [۲] قرار گرفت. اخیراً، استفاده از لوله‌های آجدار در چگالش و جذب در پمپ‌های حرارتی توصیه شده است. بررسی جریان‌های حلقوی و جریان حبابی، توسط کیم و همکاران [۳] صورت پذیرفت. زارنت چارلز [۴]، جریان هوا در آب به‌صورت جریان دوفازی در فشار اتمسفر در لوله‌های افقی با قطر داخلی ۱/۹ سانتی‌متر مورد مطالعه قرار دادند و مدل کردند.

محاسبات مربوط به سیرکولاسیون و طراحی بویلر، سابقه زیادی دارد و کمپانی‌ها و افراد زیادی در این زمینه فعالیت کرده و مشغول به فعالیت هستند، کمپانی‌هایی چون بابکوک و ویلکاکس [۵]، میتسوبیشی، زیمنس روابط و طرح‌های فراوانی برای بویلر و روابط سیرکولاسیون ارائه کرده‌اند.

نتایج بررسی برای بویلر نیروگاه توس، بیانگر کاهش متوسط عدد چرخش هنگام استفاده از لوله‌های خان‌دار شد و حاشیه اطمینان را در بارهای مختلف متناظر با میزان سوخت و آب تغذیه غیر نامی و یا به هنگام بروز نوسان‌های هیدرولیکی، افزایش می‌دهد [۶]. افزایش قابل‌توجه حاشیه اطمینان عملکرد لوله‌های واتروال‌ها در بخش کوره، منجر به شکل‌گیری روشی برای طراحی بهینه بویلر با ابعاد کوچک‌تر می‌شود [۶].

در این مقاله، به مدل‌سازی جریان دوفازی داخل لوله‌های خان‌دار و نیز محاسبه افت فشار برای ایجاد سیرکولاسیون طبیعی برای نیروگاه بخار صورت پذیرفته است که در این بین، نتایج با اطلاعات نیروگاه شازند اراک مقایسه و اعتبار سنجی شده‌اند. در ادامه، به بهینه‌سازی پارامترهای لوله خان‌دار پرداخته شده است که با توجه به تعریف دو سناریو بهترین ارزش این پارامترها شناسایی می‌شود. کارهای

$$\frac{f}{8} = St Pr^{\frac{2}{3}} = \frac{h_i}{\rho_m V_{pip,f} C p_m} \times \left(\frac{C p_m \mu_m}{k_m} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

$$f = \frac{1.97912}{Re^{0.5479}} + 0.03822 \quad (10)$$

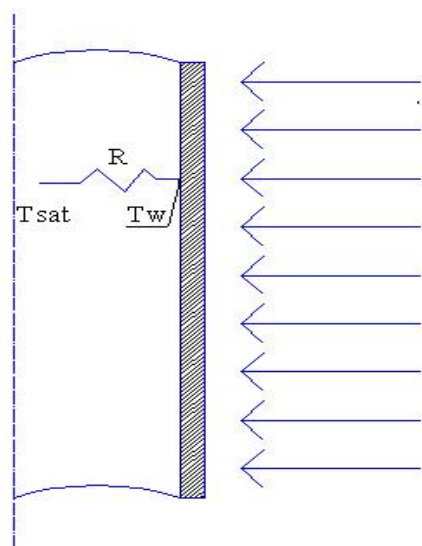
زبری سطح لوله آهن ریخته‌گری (ϵ) شده برابر ۰/۲۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [۹]. برای محاسبه رینولدز برای لوله خان‌دار از قطر هیدرولیکی استفاده شده است.

پس از محاسبه ضریب انتقال حرارت از رابطه (۱۱)، میزان دمای دیواره تعیین می‌شود:

$$T_w = T_{fi} + q'' \left(\frac{4L_B}{GC_{pf} D} + \frac{1}{h_i} \right) \quad (11)$$

که G فلاکس جرمی و C_{pf} ظرفیت گرمایی ویژه سیال مایع است. با توجه به شکل ۱، تنها مقاومت حرارتی بین دمای سطح و آب، ضریب انتقال حرارت داخلی است که در این شرایط می‌توان میزان طول جوشش را طبق رابطه (۱۲) محاسبه کرد:

$$L_B = \frac{\dot{m}_{pipe} (i_f - i_i)}{h_i (D_o \pi) (T_w - T_{fi})} \quad (12)$$

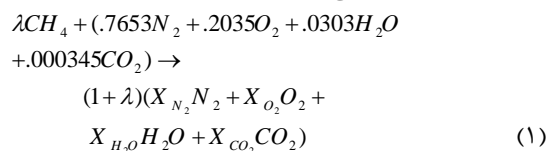


شکل ۱- مقاومت حرارتی بین دیواره و آب

۲-۲- محاسبه‌ی افت فشار در طول تک فاز

در طول داون‌کامر با توجه به ناحیه تک فاز و عدم انتقال حرارت در آن می‌توان افت فشار را به صورت رابطه (۱۳) محاسبه کرد:

با توجه به سوخت که بیشترین جزء آن را متان تشکیل می‌دهد و درصد اجزای هوا، سیکل مورد نظر معادله احتراق از رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:



$$\lambda = \frac{\dot{n}_f}{\dot{n}_{air}}, 1 + \lambda = \frac{\dot{n}_{Pr}}{\dot{n}_{air}} \quad (2)$$

که n تعداد مول‌ها و زیرنویس‌های a, p, f به ترتیب، مربوط به هوای احتراق، محصولات احتراق و سوخت است.

حال اگر قانون اول ترمودینامیک را برای بویلر به عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفته شود، می‌توان رابطه (۳) نوشت:

$$Q_{cv} - W_{cv} + n_f \bar{i}_f + n_{air} \bar{i}_{air} - n_{Pr} \bar{i}_{Pr} = 0 \quad (3)$$

در این حجم، کنترل اتلاف حرارتی از بویلر برابر است با $Q_{cv} = Q_{Loss}$ که با توجه به داده‌های نیروگاهی مورد مطالعه اتلاف حرارتی [۷] محاسبه شده است.

عدد سیرکولاسیون معکوس کیفیت بخار در خروجی لوله‌های واتروال است که به شرح رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$CR = \frac{1}{x} \quad (4)$$

برای محاسبه خواص در طول محاسبات سیرکولاسیون درام، از خواص متناسب با i_m استفاده می‌شود که از روابط (۵-۶) محاسبه می‌شود:

$$i_e = x i_g + (1-x) i_f \quad (5)$$

$$i_{fw} + CR i_e = i_g + CR i_m \quad (6)$$

در روابط بالا i آنتالپی (KJ/Kg)، x کیفیت بخار است [۸].

۲-۱- محاسبه طول جوشش هسته‌ای

برای ضریب انتقال حرارت در لوله صاف در قسمت تک فاز از رابطه‌ی (۷) و ضریب مودی نیز با توجه به رابطه (۸) تعیین می‌شود این پارامترها به ترتیب برای لوله خان‌دار از روابط (۹) و (۱۰) تعیین می‌گردد:

$$\frac{h_i D_i}{k} = \frac{(f/8)(Re_f - 1000) Pr}{1 + 12.7(f/8)^{0.5} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log_{10} \left[\left(\frac{\epsilon/D_h}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \quad (8)$$

که L طول درام است زیر وند i و e برای ورودی و خروجی می‌باشد و برای افت فشار مربوط به شتاب در جریان دوفازی رابطه (۲۲) برقرار است [۱۱]:

$$\Delta P_a = G^2 (x_e - x_i) \left(\frac{1}{\rho_g} - \frac{1}{\rho_l} \right) \quad (22)$$

با توجه به اینکه تنها در این مدل‌سازی در لوله‌های واتروال از لوله‌های خان‌دار استفاده شده است؛ در نتیجه برای افت فشار دوفازی در لوله‌های رابزر نیز، از همان معادلات جریان دوفازی لوله‌های صاف استفاده می‌شود. افت فشار در درام Ψ ۰/۲ در نظر گرفته شده است [۸].

۳- قیود حاکم بر طراحی لوله‌های واتروال

دبی آب ورودی به لوله، نباید از میزان دبی بحرانی در شرایط دوفازی بیشتر باشد. افزایش شار حرارتی، باعث افزایش گردش و سرعت آب داخل لوله می‌شود؛ در نتیجه با توجه به افزایش و رسیدن به ماخ برابر واحد، حالت شوک در لوله اتفاق می‌افتد. روابط (۲۳) و (۲۴)، برای فلاکس جرمی بحرانی آب داخل لوله در حالت تک فاز و دوفازی [۸] بیان شده‌اند.

در لوله‌ها واتروال برای سرعت داخل لوله‌ها در مرجع [۸] قید بین ۰/۹۸ و ۲/۵ متر بر ثانیه لحاظ می‌شود. تعیین این سرعت، به‌واسطه جلوگیری از خوردگی مکانیکی (سرعت بالا) و خوردگی شیمیایی (سرعت پایین) در مبدل‌ها بیان شده است.

$$G_{\max} = \rho \sqrt{g \left(\frac{dp}{d\rho} \right)_s} \quad (23)$$

$$G_c = \begin{cases} \exp \left(\sum_{j=0}^5 \sum_{i=0}^5 M_{1i,j} p^j H^i \right) & 15 \text{ psi} < p < 200 \text{ psi} \\ \sum_{j=0}^5 \sum_{i=0}^5 M_{2i,j} p^j H^i & 200 \text{ psi} < p < 3000 \text{ psi} \end{cases} \quad (24)$$

شار حرارتی، نباید از شار حرارتی بحرانی (q_{CHF}) بیشتر باشد. شار بحرانی، برای لوله‌های خان‌دار رابطه (۲۵) پیشنهادی مرجع [۱۱] به کار می‌رود:

$$q_{\max} = \frac{A + 0.25 D_i G \Delta T_s}{C + L_H} \quad (25)$$

$$A = \frac{0.5792 i_{fg} D_i G F_1}{1 + 0.0143 F_2 D_i^{0.5} G} \quad (26)$$

$$C = \frac{0.077 F_3 D_i G}{1 + 0.347 F_4 (G/136)^n} \quad (27)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{dc} = f_{dc} \frac{1}{D_h} 2 \rho V_{dc}^2 \quad (13)$$

در طول ارتفاع جوشش افت فشار شامل سه ترم است.

هد استاتیکی:

$$\Delta P_g = \frac{g L_B}{v_m} \quad (14)$$

در این قسمت نیز، میزان افت فشار از رابطه (۱۲) تعیین می‌شود. در این رابطه، سرعت داخل هر لوله واتروال و ضریب اصطکاک مربوط به لوله‌های خان‌دار که از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود و به جای ρ از رابطه زیر استفاده می‌شود که ρ_m و نیز از i_m تعیین می‌گردد [۸].

$$\rho_m = \frac{P_m + P_g}{2} \quad (15)$$

شتابی [۱۰]:

$$\Delta P'_{acl} = 9.8607 \times 10^{-9} (v_f - v_i) (G)^2 \quad (16)$$

گرانشی [۱۰]:

$$\Delta P'_{grav} = 1.93587 \times 10^{-4} \frac{L_B}{v_f + v_i} \quad (17)$$

۳-۲- محاسبه‌ی افت فشار در جریان دوفازی

افت فشار دوفازی در طول لوله صاف را می‌توان از مرجع [۸] تعیین کرد برای تعیین افت فشار در لوله خان‌دار به‌منظور ساده‌سازی روابط و محاسبات در کاربردهای مهندسی، اطلاعات و داده‌های افت فشار اصطکاک‌ی جریان دوفازی با استفاده از مفهوم ضریب تقویت دوفازی بررسی می‌شود که به‌صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود:

$$\phi_{to}^2 = \frac{\Delta P_{fp}}{\Delta P_{to}} \quad (18)$$

برای ضریب تقویت دوفازی [۶]:

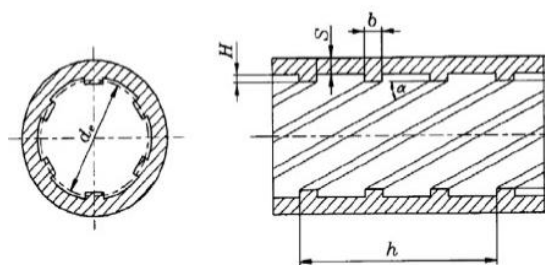
$$\phi_{to}^2 = 1 + \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} + 1 \right) \left(C(x) + x^2 \right) \quad (19)$$

برای لوله‌های خان‌دار حرارتی [۶]:

$$C(x) = 1.447691 x^{0.70569} (1-x)^{0.0396} \quad (20)$$

با استفاده از مدل جریان همگن برای افت فشار گرانشی:

$$\Delta P_g = \frac{\rho_l g (L - L_B)}{(x_e - x_i) \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right)} \ln \left[\frac{1 + x_e \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right)}{1 + x_i \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right)} \right] \quad (21)$$



شکل ۲- شماتیکی از لوله خان‌دار در نیروگاه سازند اراک

جدول ۲- نتایج حاصل از اعتبار سنجی

| پارامتر | داده‌های شبیه‌سازی | داده‌های اندازه‌گیری شده | اختلاف (%) |
|--|--------------------|--------------------------|------------|
| دبی بخار (kg/s) | ۲۸۴/۶۱ | ۲۸۸/۸ | ۱/۴۵ |
| ارتفاع درام (m) | ۵۹ | ۶۰ | ۱/۶ |
| میانگین شار حرارتی کوره (kW/m ²) | ۳۳۵/۶ | ۳۴۳/۸ | ۲/۳ |
| درصد مولی CO ₂ (%) | ۳ | ۳/۳ | ۹ |
| دمای خروجی از کوره (°C) | ۹۲۳ | ۹۲۸ | ۱/۵ |

باید توجه داشت که تمامی لوله‌ها خان‌دار در نظر گرفته شده است، در کد میزان کیفیت بخار ۳۷٪، CR=۲/۶۴، افت فشار ۳/۷۲ و هد موجود ۳/۷۲ bar است.

۵- الگوریتم ژنتیک و تعیین تابع هدف

الگوریتم ژنتیک فرضیه‌های جدید را با تغییر و ترکیب متوالی اجزاء، بهترین فرضیه‌های موجود را به دست می‌آورد. در هر مرحله، مجموعه‌ای از فرضیه‌ها که جمعیت نامیده می‌شوند، از طریق جایگزینی بخشی از جمعیت فعلی با فرزندی به دست می‌آید که از بهترین فرضیه‌های موجود حاصل شده‌اند.

الگوریتم ژنتیک دارای ویژگی‌های زیر می‌باشد:

- توانایی بهینه‌سازی به صورت چندهدفه.
- یافتن مینیمم مطلق از بین مینیمم‌های نسبی.
- دارای بازده محاسباتی بالایی است.

هدف، کاهش ارتفاع بویلر است. باید دید که چه بخش‌هایی از بویلر دارای لوله خان‌دار می‌باشند و موجب افزایش ارتفاع بویلر می‌شوند و محدودیت ایجاد می‌کند که این بخش‌ها در آنالیز حساسیت مشخص شدند. دو عامل در تقابل با یکدیگر

از دیگر قیود مدنظر، میزان دبی عبوری از لوله‌های داون-کامر است که نباید از میزان طراحی بیشتر باشد. با توجه به رابطه (۲۵) میزان دبی طراحی مربوط به داون‌کامر محاسبه می‌شود؛ در نتیجه نباید میزان دبی محاسبه‌شده از میزان m_{dc} بیشتر باشد که در رابطه (۲۵) بیان شده است [۱۲]:

$$m_{dc} = \sqrt{\frac{2\rho_f A_{dc} (\rho_f - \rho_g) g \bar{\alpha}_v V_r}{f}} \quad (25)$$

که V_r حجم رایزرها، A_{dc} مساحت لوله‌ی داون‌کامر و f ضریب اصطکاک در لوله‌های داون‌کامر است $\bar{\alpha}_v$ کسر حجمی بخار است که به صورت رابطه (۲۶) پیشنهاد شده است [۱۲]:

$$\bar{\alpha}_v = \frac{\rho_f}{\rho_f - \rho_g} \left(1 - \frac{\rho_g}{(\rho_f - \rho_g)x} \ln \left(1 + \frac{\rho_f - \rho_g}{\rho_g} x \right) \right) \quad (26)$$

۴- اعتبار سنجی

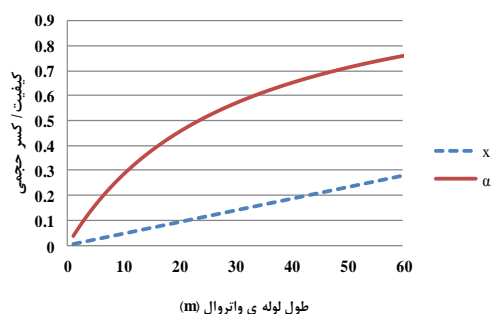
کد نوشته شده با نرم افزار MATLAB با اطلاعات نیروگاه سازند اراک اعتبار سنجی شده‌اند. اطلاعات ورودی به کد شامل مواردی از قبیل، درصد ترکیبات سوخت است که در جدول ۱ نشان داده است. دمای آب ورودی به درام ۳۰۰°C، فشار و دمای بخار زنده خروجی از بویلر ۱۷۴ بار و ۵۴۰°C است. درصد هوای اضافه ۵٪ و میزان دبی سوخت در بار ۱۰۰٪ برابر ۱۶/۲۹ kg/s است. دمای هوای ورودی به کوره ۱۳۶°C و اطلاعات لوله خان‌دار برابر $b=4/2$ mm، $N=8$ ، $H=1/15$ mm درجه که شماتیک آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- ترکیبات سوخت

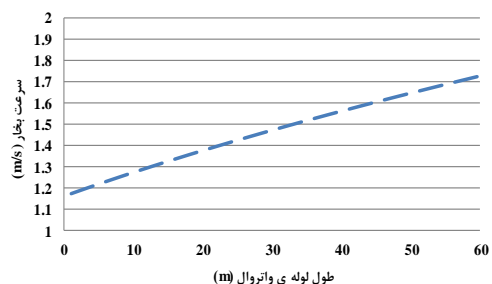
| ترکیبات سوخت | درصد مولی (%) |
|---------------|---------------|
| متان | ۸۵/۰۰۹ |
| اتان | ۹/۹۷ |
| پروپان | ۳/۶۲ |
| ایزوبوتان | ۱/۰۰۷ |
| ایزوپنتان | ۰/۱۵ |
| نیترژن | ۰/۱۴ |
| دی اکسید کربن | ۰/۱ |

قطر لوله‌های داون‌کامر و رایزر به ترتیب، ۵۵۸ و ۱۵۹ میلی‌متر می‌باشد. در این نیروگاه، تعداد لوله‌های واتروال برای ۶۳۲ عدد می‌باشد.

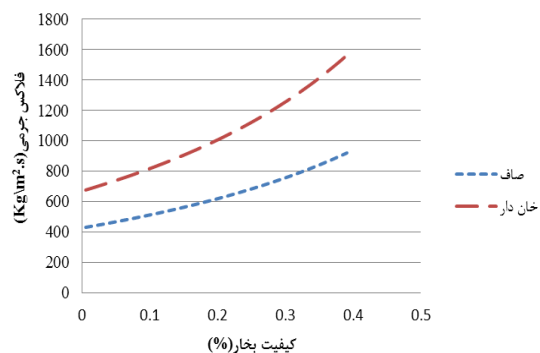
سانتی‌گراد به‌شدت کاهش داده است که این دو عامل بیان شده، از سوختگی لوله‌ها جلوگیری می‌کند.



شکل ۳- تغییر کیفیت و کسر حجمی در طول جریان دوفازی



شکل ۴- تغییر سرعت بخار داخل طول جریان دوفازی



شکل ۵- مقایسه بین فلاکس جرمی لوله خان‌دار و صاف در تعداد لوله ثابت

ضریب انتقال حرارت در جریان دوفازی در طول لوله در شکل ۶ نشان داده شده است؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود، این ضریب در طول لوله و با افزایش کاهش فشار درون لوله کاهش می‌یابد با توجه به افزایش افت فشار در لوله، میزان

موجب رسیدن به هدف بهینه‌سازی یعنی کاهش ارتفاع بویلر می‌شوند. این دو عامل، ضریب انتقال حرارت و افت فشار در بخش تک‌فاز است که بیشترین سهم در افت فشار مسیر سیرکولاسیون را دارد؛ در نتیجه مسیر بهینه‌سازی طوری انتخاب شد تا ضریب انتقال حرارت افزایش و افت فشار کاهش یابد تا مجموعه این توابع هدف، موجب کاهش ارتفاع بویلر شود. با توجه به اینکه در ادامه مسیر سیرکولاسیون جریان دوفازی می‌شود و ضریب انتقال در این بخش بالاست در نتیجه تنها بخش تک فاز در این بهینه‌سازی دخیل شد. همچنین برای کامل‌تر شدن بحث بهینه‌سازی کاهش افت فشار نیز به‌صورت تک هدف بهینه‌سازی خواهد شد و نتایج باحالت دو هدفه مقایسه می‌شوند.

۶- نتایج

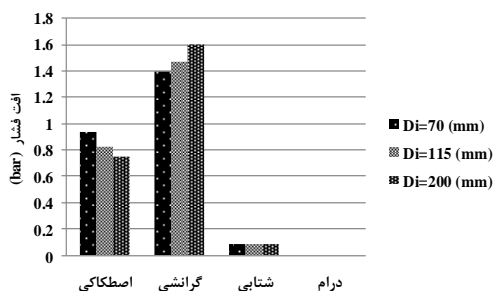
در شکل ۳، کیفیت بخار و کسر حجمی در طول جریان دوفازی که به ۸۰ قسمت تقسیم شده که در طول لوله‌ی واتر وال نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، کیفیت بخار به‌صورت خطی تغییر می‌یابد دلیل این امر نیز، شار ثابتی است که در مدل‌سازی برای آن فرض شده است؛ همچنین کسر حجمی نشان می‌دهد که در انتهای لوله تقریباً ۸۳٪ از حجم را بخار تشکیل داده است.

افزایش کسر حجمی، به‌واسطه تغییر میزان کیفیت بخار و سرعت آن است. سرعت بخار نیز که در شکل ۴ نشان داده شده است، در طول، جریان دوفازی افزایش می‌یابد و در انتهای لوله، به ۱/۸ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد؛ این افزایش موجب تغییر فلاکس جرمی با توجه به ثابت بودن دبی جرمی در طول لوله می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، به دلیل افزایش سرعت بخار و سیال آب میزان فلاکس جرمی افزایش می‌یابد که با توجه به شرایط تعداد لوله‌های ثابت مشاهده می‌شود که فلاکس جرمی در قیاس لوله صاف افزایش یافته است و این افزایش در انتهای لوله شدیدتر شده، اختلاف زیادی بین فلاکس جرمی بین این دو لوله به وجود می‌آید؛ در نتیجه استفاده از لوله خان‌دار، موجب افزایش فلاکس جرمی شده که در این بررسی مشاهده شد، این افزایش و نیز افزایش ضریب انتقال حرارت اختلاف دما ما بین دیواره و میانگین دمای سیال را از ۵۴ درجه سانتی‌گراد به ۹ درجه

قطر ۱۶۵ میلی‌متر است. شکل ۸، تأثیر قطر داخلی روی هر جزء از افت فشارهای تشکیل‌دهنده در سیکل درام را نشان می‌دهد که DP_f تلفات اصطکاکی، DP_G تلفات ناشی از افت فشار گرانشی دوفازی و هد ایستایی و DP_A تلفات ناشی از شتاب می‌باشد. با افزایش قطر، روند تغییرات افت فشار اصطکاکی کاهش می‌یابد و افت فشارهای دیگر، به جز افت فشار گرانشی تغییر محسوسی ندارند. کاهش افت فشار اصطکاکی از یک سو و افزایش افت فشار گرانشی از سوی دیگر، نقطه اپتیمم را برای قطر داخلی لوله‌های واتروال از نظر کاهش تلفات به وجود آورده است.

بررسی دقیق‌تر روی افت فشارهای ناشی از گرانش به تفکیک هر جزء از این تلفات در شکل ۹ انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش قطر و کاهش ضریب انتقال حرارت، میزان هد استاتیکی و تلفات گرانشی در طول جوشش به واسطه افزایش طول جوشش افزایش می‌یابد.



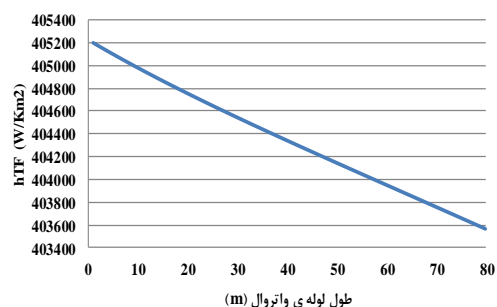
شکل ۸- بخش‌های تشکیل‌دهنده‌ی افت فشار در سرعت ۰/۹۸ متر بر ثانیه در طول قطرهای مختلف لوله‌های واتروال

همچنین با توجه به فرمول جریان دوفازی افزایش طول جوشش میزان تلفات ناشی از افت فشار جریان دوفازی را کاهش می‌دهد. افت فشار در رایزرها نیز، با توجه به ثابت بودن پارامترهای آن تغییری نیافته است.

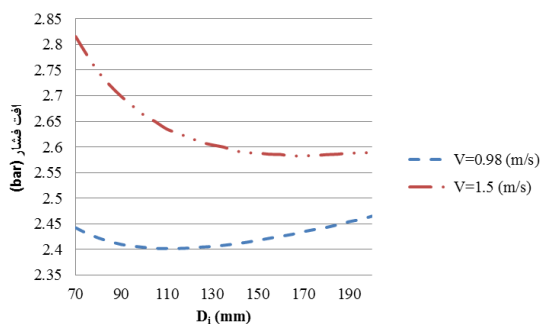
یکی دیگر از پارامترهای مهم، میزان تغییر فشار درام و در نتیجه میزان کیفیت بخار خروجی از درام است. این پارامتر که به میزان توان تولیدی و نقطه کارکرد نیروگاه وابسته است؛ نمی‌تواند تغییرات محسوسی را از نقطه نظر تلفات فشار در سیکل درام به خود اختصاص دهد؛ در نتیجه در این بخش، تنها به بررسی این پارامتر روی افت فشار در سیکل درام در بارهای مختلف پرداخته شده است.

فشار در هر محل کاهش یافته و این فشار روی اختلاف دمای ما بین سطح لوله و سیال داخل آن تأثیر گذاشته و آن را افزایش می‌دهد با افزایش این اختلاف، دما ضریب انتقال حرارت داخل لوله کاهش می‌یابد.

یکی از پارامترهای بسیار تأثیرگذار، تعیین سرعت داخل لوله‌های واتروال با توجه به حداکثر فلاکس جرمی عبوری از هر لوله است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، کاهش سرعت، میزان افت فشار در لوله‌های خان‌دار را کاهش می‌دهد. این کاهش با افزایش قطر لوله‌های واتروال کاهش یافته، سپس افزایش می‌یابد.

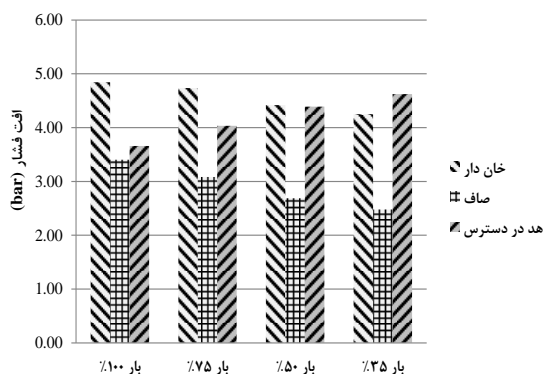


شکل ۶- تغییر ضریب انتقال حرارت در جریان دوفازی در هر قسمت از لوله دوفازی



شکل ۷- تغییرات افت فشار بر حسب افزایش قطر لوله‌های واتروال در سرعت‌های مختلف برای لوله‌ی خان‌دار

در بررسی‌های انجام شده روی نمودار شکل ۷، قطر لوله دارای مقدار مینی‌موم از جهت کمترین افت فشار موجود است که با افزایش سرعت زیاد می‌شود؛ برای مثال در سرعت ۰/۹۸ متر بر ثانیه قطری که دارای کمترین افت فشار است، برابر ۱۱۵ میلی‌متر است و برای سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه، دارای



شکل ۱۱- تأثیر تغییر بار (CR) بر روی تلفات سیکل درام در حالت طراحی

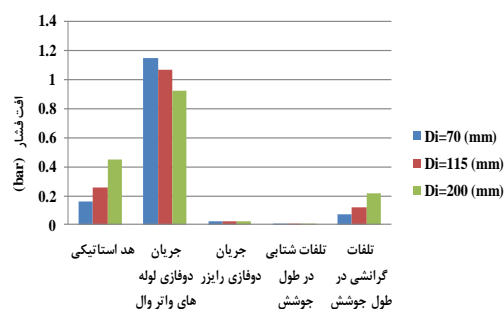
همان‌طور که در آنالیز افت فشارها در طول سیکل درام نشان داده شد، افت فشار استاتیکی در طول جوشش و افت فشار گرانشی در طول جریان دوفازی، بیشترین سهم از افت فشارها را به خود اختصاص می‌دهد؛ در نتیجه در بهینه‌سازی روی پارامترهای تأثیرگذار بر این افت فشار، توابع هدف تعیین شدند.

بهینه‌سازی صورت گرفته شده با دو سناریو مختلف صورت پذیرفته، سناریو اول با فلاکس جرمی ثابت و تنها با تغییر پارامترهای لوله‌ی خان‌دار و در سناریو دوم بهینه‌سازی با تعداد لوله‌های ثابت با این رویکرد که بویلر برای لوله‌های واتروال دارای میزان محیط ثابتی است و نمی‌توان تغییر در طول و عرض بویلر تغییر ایجاد نمود. در این سناریو، نقش سرعت داخل لوله‌ها نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در هر دو سناریو، ارتفاع درام در بهینه‌سازی ثابت و برابر طراحی (۶۰ m) در نظر گرفته شده است.

۶-۱- بهینه‌سازی با فلاکس جرمی ثابت (سناریو اول)

در این قسمت با توجه به توابع هدف تعیین شده یعنی افزایش ضریب انتقال حرارت (h_i) و کاهش افت فشار (DP) به صورت دو هدفه با الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی پارامترهای لوله خان‌دار که در جدول ۳ بیان شده است، بهینه‌سازی صورت می‌پذیرد و به تحلیل نتایج پرداخته می‌شود.

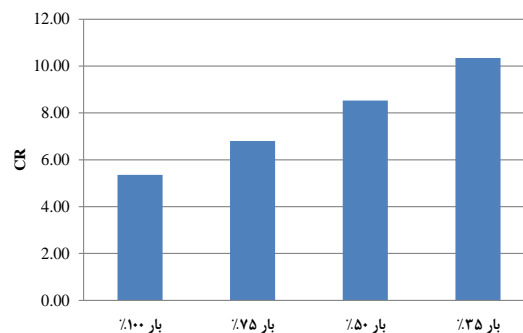
جدول ۴، نتایج حاصل نیروگاه شازند اراک را نشان می‌دهد که در مدل‌سازی به دست آمده می‌توان از مقایسه آن با نتایج حاصل از منحنی پرتو شکل ۱۲ دریافت که الگوریتم



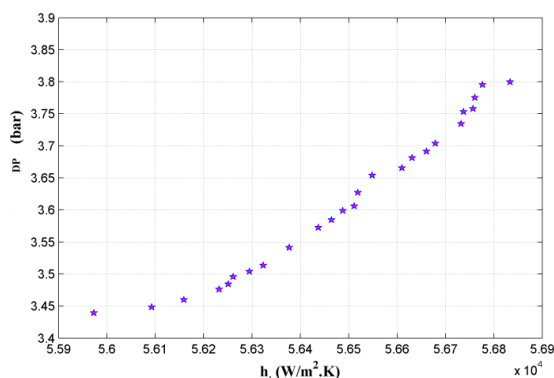
شکل ۹- بخش‌های تشکیل‌دهنده‌ی افت فشار گرانشی برای لوله‌ی خان‌دار در سرعت ۰/۹۸ متر بر ثانیه در قطرهای مختلف لوله‌های واتروال

با کاهش بار نیروگاه و به طبع کاهش فشار در درام، میزان گردش به واسطه تولید بخار کمتر، افزایش می‌یابد؛ همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده است، با کاهش فشار، میزان کیفیت بخار خروجی کاهش یافته، در نتیجه میزان CR افزایش می‌یابد که می‌توان مقادیر آن را در شکل ۱۰ مورد بررسی قرار داد.

در بررسی دیگر روی افت فشار موجود در لوله‌های صاف و خان‌دار در بارهای مختلف نیروگاه، همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، در ارتفاع درام در ۳۰ متری و سرعت ۱ متر بر ثانیه در لوله‌های واتروال و تعداد لوله‌های داون‌کامر برابر ۴، در بار ۱۰٪ تنها هد موجود توانسته است، میزان افت فشار در لوله‌های صاف را پوشش دهد و افت فشار در لوله‌های خان‌دار از هد موجود بیشتر است. با افزایش CR در بار ۷۵٪ برای تولید کمتر بخار از میزان تلفات کاسته شده به نحوی که می‌توان با توجه به سیرکولاسیون طبیعی میزان تلفات موجود در سیکل درام را کاهش داد.



شکل ۱۰- تغییر CR در بارهای مختلف نیروگاه

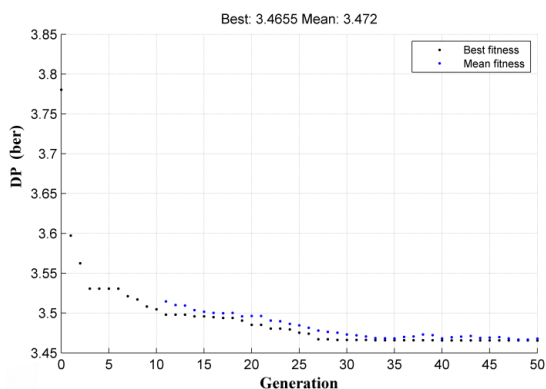


شکل ۱۲- منحنی پرتو دو هدفه با هدف افزایش ضریب انتقال حرارت در طول تک فاز و کاهش افت فشار

در این قسمت، بهینه‌سازی تک هدفه تنها با انتخاب تابع هدف افت فشار در سیرکولاسیون طبیعی در درام صورت می‌گیرد (شکل ۱۳).

نتایج حاصل از این بهینه‌سازی با بهترین نقطه منحنی پرتو دو هدفه در جدول ۶ مقایسه می‌شود. در جدول ۶، نشان داده شده است که انتخاب پارامترها در حالت تک هدفه به نحوی است که نیاز به ارتفاع درام بیشتری است تا سیرکولاسیون به صورت طبیعی صورت پذیرد. همان‌طور که در جدول ۷ با توجه به نتایج حاصل از پارامترهای بهینه مشاهده می‌شود، انتخاب مناسب پارامترها در بهینه‌سازی دو هدفه به نحوی بوده است که منجر کاهش ارتفاع درام به میزان ۰/۷۵ متر نسبت به حالت تک هدفه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالت تک هدفه افت فشار به حداقل ممکن رسیده است، در این حالت ارتفاع درام از ۶۰ متر به مقدار ۴۰/۲۵ متر کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳- مینیمم مقدار افت فشار به صورت تک هدفه

ژنتیک نتوانسته است، پارامتر ضریب انتقال حرارت داخل لوله در جریان طول جوشش را به خوبی افزایش دهد؛ به نحوی که در حداکثر افت فشار محاسبه شده (۳/۸ بار) این ضریب از میزان طراحی کمتر است؛ در نتیجه با توجه به اهمیت افت فشار در سیرکولاسیون طبیعی درام و کاهش ارتفاع بویلر نقطه حد پایین منحنی پرتو با حالت طراحی مقایسه می‌شود. مشاهده می‌شود که با کاهش ۱/۷٪ ضریب انتقال حرارت در حالت تک فاز طول جوشش به میزان ۳ متر افزایش می‌یابد و با توجه به پارامترهای بهینه که در جدول ۵ نشان داده شده است، در این حالت ارتفاع بویلر از ۶۰ متر به ۳۹/۵ متر کاهش خواهد یافت که نقش پارامترهای لوله خان‌دار در مقایسه با ضریب انتقال حرارت کاملاً مشهود است.

جدول ۳- پارامترهای بهینه‌سازی لوله‌ی خان‌دار

| پارامتر | نماد | حد پایین | حد بالا |
|------------------|----------|----------|---------|
| قطر داخلی (mm) | Di | ۲۰ | ۸۰ |
| طول خان (mm) | b | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۹ |
| ارتفاع خان (mm) | H | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۹ |
| تعداد خان‌ها (-) | N | ۲ | ۱۵ |
| زاویه (°) | α | ۵ | ۷۵ |

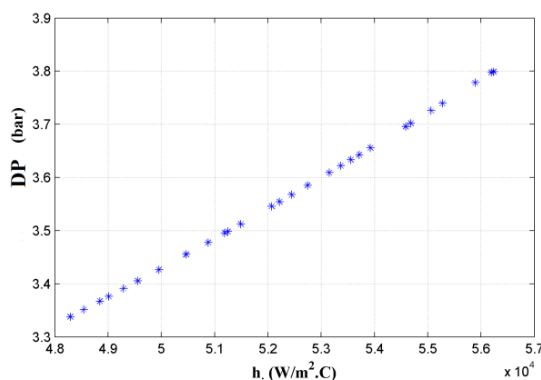
جدول ۴- مقایسه نتایج طراحی نیروگاه با حالت بهینه برای لوله خان‌دار

| پارامتر | ارزش | بهینه |
|---|--------|--------|
| طول لوله جوشش (m) | ۵/۲۸ | ۸/۲۰ |
| اختلاف دما بین دیواره و سیال (°C) | ۸/۸۳ | ۹/۵۷ |
| تعداد لوله‌ها (-) | ۶۳۲ | ۲۲۵ |
| فلاکس جرمی لوله (kg/m ² .s) | ۷۴۵/۱۸ | ۷۴۳/۰۶ |
| قطر هیدرولیکی (m) | ۰/۰۴۵۱ | ۰/۰۷۵۷ |
| ضریب انتقال در طول جوشش (W/m ² .C) | ۵۶۹۵۹ | ۵۵۹۷۳ |
| افت فشار (bar) | ۳/۷۲۷ | ۳/۴۴۷ |

جدول ۵- پارامترهای بهینه لوله‌ی خان‌دار در حالت دو هدفه در سناریو اول

| پارامتر | نماد | ارزش |
|------------------|----------------|---------|
| قطر داخلی (mm) | d _i | ۷۷/۵۴ |
| طول خان (mm) | B | ۰/۰۰۱۲۸ |
| ارتفاع خان (mm) | H | ۰/۰۱۰۹۸ |
| تعداد خان‌ها (-) | N | ۳ |
| زاویه (°) | α | ۱۴/۸۲ |

پارامترهای لوله خان‌دار در این بهینه‌سازی، دارای تعداد خان برابر ۵، قطر داخلی ۶۲/۱۸ میلی‌متر، ارتفاع خان ۰/۰۲۳ میلی‌متر، طول خان ۰/۰۱۸۲ میلی‌متر و زاویه ۳۰/۳ درجه توسط الگوریتم ژنتیک محاسبه شده است. انتخاب تعداد لوله‌های ثابت (سرعت متغیر) در اطراف بویلر، منجر به کاهش قطر هیدرولیکی شد که به طبع آن موجب افزایش فلاکس جرمی می‌شود، اما با تغییر سرعت و کاهش آن در نهایت فلاکس جرمی در لوله کاهش یافته که مجموعه این عوامل طول جوشش را کاهش می‌دهد.



شکل ۱۴ - منحنی پرتو سناریو دوم

جدول ۸- مقایسه پارامترهای سیرکولاسیون طبیعی در دو سناریو در حالت بهینه

| سناریو اول | سناریو دوم | پارامتر |
|------------|------------|---|
| ۸/۲۰ | ۴/۹۰ | طول لوله جوشش (m) |
| ۹/۵۷ | ۱۰/۲۰ | اختلاف دما بین دیواره و سیال (°C) |
| ۲۲۵ | ۶۳۲ | تعداد لوله‌ها (-) |
| ۷۴۳/۰۶ | ۶۳۰ | فلاکس جرمی لوله (kg/m ² .s) |
| ۰/۰۷۵۷ | ۰/۰۴۹۰ | قطر هیدرولیکی (m) |
| ۵۵۹۷۳ | ۴۸۲۹۱ | ضریب انتقال در طول جوشش (W/m ² .C) |
| ۳۹/۵ | ۲۷/۳۲ | ارتفاع بویلر (m) |

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله توانسته شد، افت فشار در لوله‌های خان‌دار مدل‌سازی گردد و نتایج نیز اعتبار سنجی شوند. نتایج نشان دادند که استفاده از پارامترهای طراحی لوله‌های صاف نمی‌توانند افت فشار ایجاد شده توسط لوله‌های خان‌دار را با توجه به هد درام ایجاد شده جبران کند، در نتیجه نیاز به تغییر پارامترهای طراحی است. نتایج نشان دادند با افزایش تعداد

جدول ۶- مقایسه نتایج بهینه سازی دو هدفه و تک هدفه

| پارامتر | تک هدفه | دو هدفه |
|---|---------|---------|
| طول لوله جوشش (m) | ۷/۸۷ | ۶/۸۱ |
| اختلاف دما بین دیواره و سیال (°C) | ۹/۴۹ | ۹/۱۶ |
| تعداد لوله‌ها (-) | ۲۴۸ | ۳۵۱ |
| فلاکس جرمی لوله (kg/m ² .s) | ۷۴۲/۷۳ | ۷۴۵/۵۷ |
| قطر هیدرولیکی (m) | ۰/۰۷۲۱ | ۰/۰۶۰۵ |
| ضریب انتقال در طول جوشش (W/m ² .C) | ۵۶۰۱۷ | ۵۶۴۸۸ |
| افت فشار (bar) | ۳/۴۶ | ۳/۶۰۳ |

جدول ۷- تأثیر پارامترهای لوله خان‌دار در اختلاف ارتفاع

درام بین دو حالت تک هدفه و دوهدفه

| ارتفاع درام (m) | افت فشار کل (bar) | هد در دسترس (m) | تک هدفه |
|-----------------|-------------------|-----------------|---------|
| ۴۰/۲۵ | ۲/۵۴۴ | ۲/۵۵ | |
| ۳۹/۵ | ۲/۵۰۶ | ۲/۵۰ | |
| ۴۰/۲۵ | ۲/۵۳۲ | ۲/۵۵ | دو هدفه |
| ۳۹/۵ | ۲/۴۹۵ | ۲/۵۰ | |

۶-۲- بهینه سازی با تعداد لوله‌های ثابت (سناریو دوم)

در جدول ۸، پارامترهای سیرکولاسیون طبیعی در دو سناریو با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در این سناریو، ارتفاع بویلر نسبت به سناریو اول ۱۲/۱۸ متر کاهش یافته است. انتخاب بهترین پارامترها در سناریو دوم با توجه به منحنی پرتو شکل ۱۴ صورت پذیرفته است. نکته حائز اهمیت در مقایسه بین دو سناریو این است که نقش پارامترهای لوله خان‌دار در کنار سرعت داخل لوله‌ها از اهمیت بالایی در کاهش افت فشار برخوردار است و برای کاهش بیشتر افت فشار نیاز به تغییر سرعت با توجه به قیود حاکم بر مسئله است. در این حالت، الگوریتم ژنتیک می‌تواند با تغییر قطر هیدرولیکی افت فشار را به حداقل ممکن برساند. در سناریو دوم با توجه به ثابت بودن سرعت، خود قیدی را بر الگوریتم ژنتیک تحمیل می‌کند که تغییر پارامترهای لوله خان‌دار را با محدودیت مواجه می‌کند؛ در نتیجه افت فشار تا حد امکان کاهش نمی‌یابد. با ثابت بودن بازه‌های بهینه‌سازی در هر دو سناریو، مشاهده می‌شود که با کاهش سرعت از ۱/۱۷ متر بر ثانیه در سناریو اول به ۰/۹۸۰۱ متر بر ثانیه با کاهش فلاکس جرمی و نیز ضریب انتقال حرارت میزان طول جوشش کاهش یافته و در نهایت منجر به کاهش ارتفاع بویلر شده است.

- two-phase flow in vertical round tube with wire-coil inserts. *Int J Multiphase Flow* 27: 2063-2081.
- [4] Zarnett GD, Charles ME (1969) Co-current gas-liquid flow in horizontal tubes with internal spiral ribs. *Can J Chem Eng* 47: 238.
- [5] TucakovicDragan R, StevanovicVeladimir D, ZivanovicTitislav D, JovovicAleksander A, IvanovicVladan B (2007) Thermal-hydraulic analysis of a steam boiler with rifled evaporating tubes. *Appl Th Eng* 27(2): 509-519.
- [۶] گلکار ب، حقیقی خوشخو ر، احمدوند م (۱۳۹۲) بررسی لوله‌های خان‌دار با لوله‌های صاف در بویلرهای نیروگاه با چرخش طبیعی. بیست و هشتمین کنفرانس بین‌المللی برق.
- [۷] مختاری ح، عامری م (۱۳۹۱) آنالیز انرژی، انرژی، انرژی، انرژی اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی و بهینه‌سازی سیکل ترکیبی به همراه HRSB. پایان‌نامه دوره کارشناسی، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور).
- [8] Ganapathy V (2001) Industrial boilers and heat recovery steam generators - design, applications, and calculations. McGraw-Hill, New York.
- [9] Munson BR, Young DF, Okiishi TH (2006) Fundamentals of fluid mechanics. Wiley, New Jersey.
- [10] Thom JRS (1964) Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water. *HLWfi uas Twuftv Perpamon Press* 707-724.
- [11] Dong Y, Jie P, Chenn Q, Xiaojing Z, Bi Q, Tingkuan C (2011) Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of vertical upward rifled tube in supercritical CFB boiler. *Exp Therm Fluid SCI* 35: 291-300.
- [12] Emara-Shabaik HE, Habib MA, Al-Zaharna I, (2009) Prediction of risers' tubes temperature in water tube boilers. *Appl Math Model* 33: 1323-1336.
- [۱۳] محمودی بنهنگی الف، حقیقی خوشخو ر (۱۳۹۲) بررسی پارامترهای مختلف جریان دوفازی در لوله‌های خان‌دار بویلر و انجام محاسبات مربوط به سیرکولاسیون طبیعی و ترموهیدرولیکی جهت برآورد افت فشار در این نوع لوله‌ها. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.
- لوله‌های داون کامر و کاهش سرعت جریان می‌توان افت فشار در لوله‌ها را کاهش داد؛ همچنین نشان داده شد، نمودار افت فشار برحسب قطر لوله‌های واتروال دارای نقطه مینیمم است، لذا با افزایش تعداد لوله‌های داون کامر و کاهش سرعت جریان و محاسبه قطر لوله متناسب با کمترین افت فشار در آن سرعت می‌توان افت فشار سیستم را تا حد امکان کاهش داد و به هد در دسترس نزدیک کرد.
- آنالیز روی افت فشارها در طول سیکل درام نشان داد که افت فشار استاتیکی در طول جوشش و افت فشار گرانشی در طول جریان دوفازی، بیشترین سهم از افت فشارها را به خود اختصاص می‌دهد.
- در بهینه‌سازی با دو سناریو نتایج نشان دادند که کاهش افت فشار در سناریو اول، منجر به کاهش ارتفاع درام از ۶۰ متر به ۳۹/۵ متر و در سناریو دوم به ۲۷/۳۲ می‌شود.
- یکی از پارامترهای تأثیرگذار در کاهش، افت فلاکس جرمی می‌باشد که کاهش آن منجر به کاهش شدید طول جوشش می‌شود.
- با کاهش طول جوشش، فلاکس جرمی و قطر هیدرولیکی به ترتیب به میزان ۴۰٪، ۱۵/۲٪ و ۳۵/۲٪ می‌توان ارتفاع درام را به میزان ۱۲/۱۸ متر نسبت به حالت طراحی فلاکس جرمی ثابت کاهش داد.

۸- مراجع

- [1] Ansari M.R, Arzandi B (2012) Two-phase gas-liquid flow regimes for smooth and ribbed rectangular ducts. *Int J Multiphase Flow* 38: 118-125.
- [2] Weisman J, Lan J, Disimile P (1994) Two-phase (air-water) flow patterns and pressure drop in the presence of helical wire ribs. *Int J Multiphase Flow* 20(5): 885-899.
- [3] Kim HY, Koyama S, Matsumoto W (2001) Flow patterns and flow characteristics for counter-current