مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۳/ صفحه ۲۲۷–۲۳۷



یهینهسازی لولههای خان دار بوبلر نیروگاه شازند اراک با استفاده از الگوریتم ژنتیک

حمید مختاری*۱۰ امیر محمودی بنهنگی و رامین حقیقی خوشخو ^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

جكيده

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، كاهش افت فشار در كل سيركولاسيون طبيعي درام، يرداخته شود. انتخاب تابع هدف اول، با توجه به آناليز 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 می-دهد. بهینه سازی، 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.

كلمات كليدى: افت فشار؛ بهينه سازى؛ سيركولاسيون طبيعى؛ جريان دوفازى؛ لولههاى خاندار.

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

H. Mokhtari1^{*1}, A. Mahmoodi¹, R. Haghighi 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 twophase 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 dicussed 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.

^{*} نویسنده مسئول؛ تلفن: ۷۳۹۳۲۶۵۳؛ فکس: ۷۷۳۱۱۴۴۶

آدرس يست الكترونيك: hamid.1900@yahoo.com

۲۲۸

مختاري و همكاران

۱– مقدمه

ساخت لولهها یا مجاری خاندار، یک روش افزایش انتقال حرارت است که بهطور گسترده مورد استفاده برای جریان تک فاز قرار می گیرد[۱]، در جوشش و در چگالش، لوله آجدار موجب افزایش حرارت و انتقال جرم به دلیل ایجاد گردش جریان و متلاطم می شود. در لولههای مدور، دندهها موجب راندن مایع به سمت دیواره لوله و بخار به سمت مرکز استفاده از شار حرارتی بحرانی بالاتر (CHF) را مهیا می سارد. این مسئله مورد تحقیق و پژوهش وایزمن و همکاران[۲] قرار 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 به صورت جریان دوفازی در فشار اتمسفر در لولههای افقی با قطر داخلی ۱/۹ سانتی متر مورد مطالعه قراردادند و مدل کردند.

محاسبات مربوط به سیر کولاسیون 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 سیر کولاسیون ارائه کردهاند.

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

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

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 دربارهای 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 می پردازد؛ درنتیجه مباحث مربوط به محاسبه شار حرارتی ($\binom{r}{2}$) که در معادلات بیان شده است را می توان 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.

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

$$f = \frac{1.97912}{\text{Re}^{0.5479}} + 0.03822 \tag{(1.)}$$

زبری سطح لوله آهن ریختهگری (^ع) شده برابر ۲۶/۰میلیمتر در نظر گرفتهشده 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 می شود:

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

که G فلاکس جرمی و Cpf، ظرفیت گرمای 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 می توان میزان طول جوشش را طبق رابطه (۱۲) محاسبه کرد:

$$L_{B} = \frac{\dot{m}_{pipe} \left(i_{F} - i_{i} \right)}{h_{i} \left(D_{o} \pi \right) \left(T_{w} - T_{fi} \right)}$$
(17)



شکل ۱- مقاومت حرارتی بین دیواره و آب

۲-۲ - محاسبهی افت فشار در طول تک فاز در طول داون کامر 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 می آید [۷]:

$$ACH_4 + (.7653N_2 + .2035O_2 + .0303H_2O_2)$$

 $+.000345CO_2) \rightarrow$

$$(1+\lambda)(X_{N_2}N_2 + X_{O_2}O_2 + X_{H_2O}H_2O + X_{CO_2}CO_2)$$
(1)

$$\lambda = \frac{\dot{n}_f}{\dot{n}_{air}}, 1 + \lambda = \frac{\dot{n}_{\rm Pr}}{\dot{n}_{air}} \tag{(Y)}$$

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

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

$$Q_{cv} - W_{cv} + n_f \overline{i_f} + n_{air} \overline{i}_{air} - n_{\rm Pr} \overline{i_{\rm Pr}} = 0 \tag{(7)}$$

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 می شود: $CR = \frac{1}{2}$

درام، از خواص متناسب با i_m استفاده میشود که از روابط (۵-۹) محاسبه میشود:

$$\begin{split} i_e &= x i_g + (1-x) i_f & (\Delta) \\ i_{fw} &+ C R i_e &= i_g + C R i_m & (\mathcal{F}) \end{split}$$

در روابط بالا i آنتالیی(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 (۲) و ضریب مودی نیز با توجه به رابطـه (۸) تعیـین میشود این پارامترها به ترتیب برای لولـه خـاندار از روابـط (۹) و (۱۰) تعیین میگردد:

$$\frac{h_i D_i}{k} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (\operatorname{Re}_f - 1000) \operatorname{Pr}}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} \left(\operatorname{Pr}^{\left(\frac{2}{3}\right)} - 1\right)} \tag{Y}$$

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

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{dc} = f_{dc} \frac{1}{D_{h}} 2\rho V_{dc}^{2}$$
(17)

. c, det la reaction is a single for the second second

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

شتابی[۱۰]:

$$\Delta P'_{acl} = 9.8607 \times 10^{-9} (\upsilon_f - \upsilon_i) (G)^2$$
(۱۶)

گ انشه [۱۰]:

$$\Delta P'_{\rm grav} = 1.93587 \times 10^{-4} \frac{L_{\rm B}}{\upsilon_{\rm f} + \upsilon_{\rm i}} \tag{1V}$$

۲-۳- محاسبهی افت فشار در جریان دوفازی

افت فشار دوفازی در طول لوله صاف را می توان از مرجع [۸] تعیین کرد برای تعیین افت فشار در لوله خان دار به منظور ساده سازی روابط و محاسبات در کاربردهای مهندسی، اطلاعات و داده های افت فشار اصطکاکی جریان دوفازی با استفاده از مفهوم ضریب تقویت دوفازی بررسی می شود که به صورت رابطه (۱۸) تعریف می شود: (۱۸)

$$\phi_{lo}^2 = \frac{\Delta P_{tp}}{\Delta P_{lo}}$$

 $\rho_{\bar{m}} = \frac{\rho_m + \rho_g}{2}$

برای ضریب تقویت دوفازی [۶]:

$$\phi^2 = 1 + \left(\frac{\rho_l}{\rho_l} + 1\right) (C(x) + x^2)$$
(۱۹)

$$(\rho_{g}^{-1})^{(0,0)} = (\rho_{g}^{-1})^{(0,0)}$$
برای لولههای خاندار حرارتی [۶]:

$$\Delta P_{g} = \frac{\rho_{l}g\left(L - L_{B}\right)}{\left(x_{e} - x_{i}\right)\left(\frac{\rho_{l}}{\rho_{g}} - 1\right)} \ln \left[\frac{1 + x_{e}\left(\frac{\rho_{l}}{\rho_{g}} - 1\right)}{1 + x_{i}\left(\frac{\rho_{l}}{\rho_{g}} - 1\right)}\right]$$
(Y1)

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

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

با توجه به اینکه تنها در این مدلسازی در لولههای واتروال از لولههای خاندار استفادهشده است؛ درنتیجه برای افت فشار دوفازی در لولههای رابزر نیز، از همان معادلات جریان دوفازی لولههای صاف استفاده می شود. افت فشار در درام ۲۶۱ در نظر گرفته شده است [۸].

۳- قيود حاكم بر طراحي لولههاي 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؛ درنتیجه 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 می شود. تعیین این سرعت، بهواسطه جلوگیری از خوردگی مکانیکی (سرعتبالا) و خوردگی شیمیایی (سرعتپایین) در مبدلها بیان شده است.

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

$$G_{c} = \begin{cases} \exp\left(\sum_{j=0}^{5} \sum_{i=0}^{5} M_{1i,j} p^{j} H^{i}\right) & 15psi (Yf)$$

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

$$q_{\rm max} = \frac{A + 0.25D_i G \Delta i_s}{C + L_{\mu}} \tag{7}$$

$$A = \frac{0.5792i_{fg}D_iGF_1}{1 + 0.0143F_2D_i^{0.5}G}$$
(YF)

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

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 m_{dc} میشود؛ درنتیجه نباید میزان دبی محاسبهشده از میزان m_{dc} بیشتر باشد که در رابطه (۲۵) بیان شده است [۱۲]:

$$m_{dc} = \sqrt{\frac{2\rho_f A_{dc} \left(\rho_f - \rho_g\right) g \,\overline{\alpha}_v V_r}{f}} \tag{(7\Delta)}$$

f که Vr حجم رایزرها، A_{dc} مساحت لوله یداون کامر و f ضریب اصطکاک در لولههای داون کامر است $\overline{\alpha}$ کسر حجمی بخار است که بهصورت رابطه (۲۶) پیشنهاد شده است[۱۲]:

$$\bar{\alpha}_{v} = \frac{\rho_{f}}{\rho_{f} - \rho_{g}} \left(1 - \frac{\rho_{g}}{\left(\rho_{f} - \rho_{g}\right)x} \ln \left(1 + \frac{\rho_{f} - \rho_{g}}{\rho_{g}} \right) x \right)$$
(79)

۴- اعتبار سنجی

کد نوشته شده با نرم افزار MATLAB با اطلاعات نیروگاه شازند 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 $^{\circ}$ ۳۰۰ فشار و دمای بخار زنده خروجی از بویلر ۱۷۴ بار و $^{\circ}$ ۵۴۰ است. درصد هوای اضافه ۵٪ و میزان دبی سوخت در بار است. درصد هوای اضافه ۵٪ و میزان دبی سوخت در بار ۱۰۰٪ برابر $^{s/s}$ ۲/۱۹ است. دمای هوای ورودی به کوره اهه ۲/۱۰ و اطلاعات لوله خاندار برابر mm ۱۵۶۳ و اطلاعات لوله خاندار برابر MT

جدول ۱- ترکیبات سوخت

درصد مولی(./)	تركيبات سوخت
٨۵/٠٠٩	متان
٩/٩٧	اتان
37/87	پروپان
١/• • ٧	ايزوبوتان
• / \ ۵	ايزو پنتان
•/1۴	نيتروژن
• / \	دى اكسيد كربن

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

مختاری و همکاران ۲۳۱



شکل ۲- شماتیکی از لوله خاندار در نیروگاه شازند اراک

اختلاف	دادەھاي	دادەھاي	. 11
(/.)	اندازه گیری شده	شبيەسازى	پارامىر
۱/۴۵	۲۸۸/۸	274/21	دبی بخار (kg/s)
۱/۶	۶.	۵۹	ارتفاع درام (m)
۲/۳	۳۴۳/۸	۳۳۵/۶	میانگین شار حرارتی کورہ (kW/m ²)
٩	r'/r	٣	درصد مولى CO ₂ (./)
١/۵	٩٢٨	٩٢٣	دمای خروجی از کوره (C°)

جدول ۲- نتایج حاصل از اعتبار سنجی

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 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 می آورد. در هر مرحله، مجموعهای از فرضیهها که جمعیت نامیده میشوند، از طریق جایگزینی بخشی از جمعیت فعلی با فرزندانی به دست می آید که از بهترین فرضیههای موجود حاصل شدهاند.

الگوریتم ژنتیک دارای ویژگیهای زیر میباشد:

- توانایی بهینهسازی بهصورت 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 ٢٣٢

مختاري و همكاران

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؛ درنتیجه مسیر بهینهسازی طوری 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 همچنین برای کامل تر شد بحث بهینهسازی کاهش افت فشار نیز بهصورت تک هدف بهینهسازی خواهد شد و نتایج باحالت دو هدفه مقایسه میشوند..

8- نتايج

در شکل ۳، کیفت بخار و کسر حجمی در طول جریان دوفازی که به ۸۰ قسمت تقسیم شده که در طول لوله واتر وال نشان داده شده است. مشاهده می شود، کیفت بخار به صورت خطی تغییر می یابد دلیل این امر نیز، شار ثابتی است که در مدل سازی برای آن فرض شده است؛ همچنین کسر حجمی نشان می دهد 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 دادهشده 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 می شود.

همان طور که در شکل۵ 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؛ درنتیجه 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 سانتی گراد به ۹ درجه

سانتی گراد به شدت کاهش داده است که این دو عامل بیان شده، از سوختگی لولهها جلوگیری می کند.



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 دادهشده است؛ همان طور که مشاهده می شود، این ضریب در طول لوله و با افزایش کاهش فشار درون لوله کاهش می ابد با توجه به افزایش افت فشار در لوله، میزان

فشار در هر محل کاهشیافته 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. همان طور که در شکل ۷ نشان دادهشده است، کاهش سرعت، میزان افت فشار در لولههای خان دار را کاهش میدهد. این کاهش با افزایش قطر لولههای واتروال کاهشیافته، سپس افزایش مییابد.



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



واتروال در سرعتهای مختلف برای لولهی خاندار

در بررسیهای انجامشده روی نمودار شکل ۷، قطر لوله دارای مقدار مینیمم از جهت کمترین افت فشار موجود است که با افزایش سرعت زیاد میشود؛ برای مثال در سرعت ۱۹۸۰ متر بر ثانیه قطری که دارای کمترین افت فشار است، برابر ۱۱۵ میلیمتر است و برای سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه، دارای

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، بهجز افت فشار گرانشی تغییر محسوسی ندارند. کاهش افت فشار اصطکاکی از یکسو و افزایش افت فشار گرانشی از سوی دیگر، نقطه اپتیمم را برای قطر داخلی لولههای واتروال ازنظر کاهش تلفات به وجود آورده است.

بررسی دقیق تر روی افت فشارهای ناشی از گرانش به تفکیک هر جزء از این تلفات در شکل ۹ انجامشده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش قطر و کاهش ضریب انتقال حرارت، میزان هد استاتیکی و تلفات گرانشی در طول جوشش به واسطه افزایش طول جوشش افزایش می-یابد.



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

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 درنتیجه میزان کیفیت بخار خروجی از درام است. این پارامتر که به میزان توان تولیدی و نقطه کارکرد نیروگاه وابسته است؛ نمی تواند تغییرات محسوسی را ازنقطهنظر تلفات فشار در سیکل درام به خود اختصاص دهد؛ درنتیجه در این بخش، تنها به بررسی این پارامتر روی افت فشار در سیکل درام دربارهای مختلف پرداخته شده است.

مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۳

مختاری و همکاران ۲۳۴



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 بهواسطه تولید بخار کمتر، افزایش مییابد؛ همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده است، با کاهش فشار، میزان کیفیت بخار خروجی کاهشیافته، درنتیجه 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 دربارهای مختلف نیروگاه، همان طور 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 داون کامر برابر ۴، در بار ۱۰۰٪ 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 بهنحوی که می توان با توجه به سیر کولاسیون طبیعی میزان تلفات موجود در سیکل درام را کاهش داد.





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؛ درنتیجه در بهینهسازی روی پارامترهای تأثیرگذار بر این افت فشار، توابع هدف تعیین شدند.

بهینه سازی صورت گرفته شده با دو سناریو مختلف صورت پذیرفته، سناریو اول با فلاکس جرمی ثابت و تنها با تغییر پارامترهای لوله یخان دار و در سناریو دوم بهینه سازی با تعداد لوله های ثابت با این رویکرد که بویلر برای لوله های واتروال دارای میزان محیط ثابتی است و نمی توان تغییر در طول و عرض بویلر تغییر ایجاد نمود. در این سناریو، نقش سرعت داخل لوله ها نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در هر دو سناریو، ارتفاع درام در بهینه سازی ثابت و برابر طراحی (۲۰ m) در نظر گرفته شده است.

9-۱- بهینه سازی 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) بهصورت دو هدفه با الگوریتم ژنتیک به بهینهسازی پارامترهای لوله خاندار که در جدول۳ بیان شده است، بهینهسازی صورت می پذیرد و به تحلیل نتایج پرداخته می-شود.

جدول ۴، نتایج حاصل نیروگاه شازند اراک را نشان می-دهد که در مدلسازی بهدستآمده میتوان از مقایسه آن با نتایج حاصل از منحنی پرتو شکل ۱۲ دریافت که الگوریتم ژنتیک نتوانسته است، پارامتر ضریب انتقال حرارت داخل لوله در جریان طول جوشش را بهخوبی افزایش دهد؛ بهنحویکه در حداکثر افت فشار محاسبهشده (۳/۸ بار) این ضریب از میزان طراحی کمتر است؛ درنتیجه با توجه به اهمیت افت فشار در سیرکولاسیون طبیعی درام و کاهش ارتفاع بویلر نقطه حد پایین منحنی پرتو باحالت طراحی مقایسه میشود. مشاهده میشود که با کاهش ۲/۷٪ ضریب انتقال حرارت

در حالت تک فاز طول جوشش به میزان ۳ متر افزایش می-یابد و با توجه به پارامترهای بهینه که در جدول ۵ نشان دادهشده 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.

جدول۳- پارامترهای بهینهسازی لولهی خاندار

حد بالا	حد پايين	نماد	پارامتر
٨٠	۲.	Di	قطر داخلی (mm)
•/••9	•/•••٢	b	طول خان (mm)
• / • ٩	•/••9	Н	ارتفاع خان (mm)
۱۵	٢	Ν	تعداد خانها (-)
۷۵	۵	α	زاويه ($^{\circ}$)

جدول۴- مقایسه نتایج طراحی نیروگاه با حالت بهینه برای لوله خاندار

بهينه	ارزش	پارامتر
٨/٢٠	$\Delta/\Upsilon\Lambda$	طول لوله جوشش (m)
٩/۵٧	٨/٨٣	اختلاف دما بین دیواره و سیال (°C)
222	837	تعداد لولهها (-)
۷۴۳/۰۶	V40/1X	فلاکس جرمی لوله (kg/m².s)
•/•Y&Y	۰/۰۴۵۱	قطر هیدرولیکی (m)
۵۵۹۷۳	۵۶۹۵۹	ضریب انتقال در طول جوشش (W/m ² .C)
344/7	٣/٧٢٧	افت فشار (bar)

جدول ۵- پارامترهای بهینه لولهی خاندار در حالت دو

	، در سناريو اول	هدفه
ارزش	نماد	پارامتر
۲۲/۵۴	d_i	قطر داخلی (mm)
•/••١٢٨	В	طول خان (mm)
۰/۰۱۰۹۸	Н	ارتفاع خان (mm)
٣	Ν	تعداد خانها (-)
14/82	α	زاويه (°)





در این قسمت، بهینهسازی تک هدفه تنها با انتخاب تابع هدف افت فشار در سیرکولاسیون طبیعی در درام صورت می گیرد (شکل۱۳).

نتایج حاصل از این بهینهسازی با بهترین نقطه منحنی پرتو دو هدفه در جدول ۶ مقایسه می شود. 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 سیر کولاسیون به صورت طبیعی صورت پذیرد. همان طور که در جدول ۲ با توجه به نتایج حاصل از پارامترهای بهینه مشاهده می شود، انتخاب مناسب پارامترها در بهینه سازی دو هدفه به نحوی بوده است که منجر کاهش ارتفاع درام به میزان ۲۰/۵ 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 بهصورت تک هدفه

مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۳

مختاری و همکاران ۲۳۶

جدول۶- مقایسه نتایج بهینه سازی دو هدفه و تک هدفه

دو هدفه	تک هدفه	پارامتر
۶/۸۱	V/AV	طول لوله جوشش (m)
٩/١۶	٩/۴٩	اختلاف دما بین دیواره و سیال (C°)
۳۵۱	247	تعداد لولهها (-)
۲۴۵/۵Y	741/12	فلاکس جرمی لوله (kg/m².s)
۰/۰۶۰۵	•/•٧٢١	قطر هیدرولیکی (m)
56674	56.14	ضریب انتقال در طول جوشش (W/m ² .C)
3.16.2	٣/۴۶	افت فشار (bar)

جدول ۷- تأثیر پارامترهای لوله خاندار در اختلاف ارتفاع

و دوهدفه	هدفه	تک	حالت	دو	بين	دام
----------	------	----	------	----	-----	-----

				-	
	هد در دسترس	افت فشار کل	ارتفاع درام		
	(m)	(bar)	(m)		
	۲/۵۵	۲/۵۴۴	4.120		
	۲/۵۰	۲/۵۰۶	۳٩/۵	تک هدفه	
	۲/۵۵	۲/۵۳۲	4.120		
	۲/۵۰	۲/۴۹۵	۳٩/۵	دو هدفه	
-					•

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

در جدول ۸، پارامترهای سیرکولاسیون طبیعی در دو سناریو با يكديگر مقايسه مىشوند. در اين سناريو، ارتفاع بويلر نسبت به سناريو اول ۱۲/۱۸ متر كاهشيافته است. انتخاب بهترين پارامترها در سناریو دوم با توجه به منحنی پرتو شکل۱۴ 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 قيود حاكم بر مسئله است. در اين حالت، الگوريتم ژنتيک مي تواند با تغيير قطر هيدروليکي افت فشار را به حداقل ممکن برساند. در سناریو دوم با توجه به ثابت بودن سرعت، خود قیدی را بر الگوریتم ژنتیک تحمیل می-کند که تغییر پارامترهای لوله خاندار را با محدودیت مواجه میکند؛ درنتیجه افت فشار تا حد امکان کاهش نمییابد. با ثابت بودن بازههای بهینهسازی در هر دو سناریو، مشاهده می شود 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 ضريب انتقال حرارت ميزان طول جوشش كاهشيافته و درنهایت منجر به کاهش ارتفاع بویلر شده است.

پارامترهای لوله خاندار در این بهینهسازی، دارای تعداد خان برابر ۵، قطر داخلی ۶۲/۱۸ میلیمتر، ارتفاع خان ۲۰/۲۳ میلیمتر، طول خان ۲۰/۱۸۲ 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 درنهایت فلاکس جرمی در لوله کاهشیافته که مجموعه این عوامل طول جوشش را کاهش میدهد.



جدول ۸- مقایسه پارامترهای سیرکولاسیون طبیعی در دو

سناريو در حالت بهينه

سناريو اول	سناريو دوم	پارامتر
٨/٢٠	۴/۹۰	طول لوله جوشش (m)
٩/۵٧	۱۰/۲۰	اختلاف دما بين ديواره و سيال (C°)
222	۶۳۲	تعداد لولهها (-)
۲۴۳/۰۶	۶۳۰	فلاکس جرمی لوله (kg/m ² .s)
•/•Y&Y	•/•۴٩•	قطر هيدروليكي (m)
۵۵۹۷۳	4221	ضریب انتقال در طول جوشش (W/m ² .C)
٣٩/۵	22/22	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 نمی-توانند افت فشار ایجاد شده توسط لولههای خاندار را با توجه به هد درام ایجاد شده جبران کند، درنتیجه نیاز به تغییر پارامترهای طراحی است. نتایج نشان دادند با افزایش تعداد

یک سازهها و شارهها / سال ۱۳۹۵ / دوره 7 / شماره ۳
--

مختاری و همکاران ۲۳۷

two-phase flow in vertical round tube with wirecoil inserts. Int J Multiphase Flow 27: 2063-2081.

- [4] Zarnett GD, Charles ME (1969) Co-current gasliquid 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.

[۷] مختاری ح، عامری م (۱۳۹۱) آنالیز انرژی، اگزرژی،

اگزرژیاقتصادی و اثرات زیستمحیطی و بهینهسازی سیکل

ترکیبی به همراه HRSG. 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. Hlwf iuas 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.

پاياننامه دوره كارشناسي ارشد، دانشگاه شهيد بهشتي.

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 می شود.

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 تریب به میزان ۴۰٪ ، ۱۵/۲٪ و ۳۵/۲٪ می-توان ارتفاع درام را به میزان ۱۲/۱۸ متر نسبت به حالت طراحی فلاکس جرمی ثابت کاهش داد.

۸- مراجع

- Ansari M.R, Arzandi B (2012) Two-phase gasliquid 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