

Optimization of Power-Water Cogeneration in Thermal Power Plants

Farshid Parhizkar¹ and Omid Pour-Ali^{2*}

1- M.Sc. Student, Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

*Corresponding Author, Email: pourali@kntu.ac.ir

Received: 18/6/2017

Revised: 23/8/2017

Accepted: 26/8/2017

Abstract

In recent years, due to the overexploitation of natural water resources and increase in demand for water, various methods of water desalination have attracted enormous interest. Seawater desalination process can be used as a suitable method in order to supply drinking and industrial water. Thermal power plants are one of the major water consuming industries many of which are located in coastal area. Therefore, the power and water can be generated simultaneously using cogeneration technique, which consequently increases the efficiency of the existing power plants. In this paper, cogeneration of power (in an existing thermal power plant) and water (using the steam extraction turbine outlet of the existing power plant) has been investigated. According to the results, desalinated water production by a combination of reverse osmosis and thermal desalination, or multi-stage flash distillation (MSF), at flow rates higher than 800 m³/h is economically feasible.

Keywords: Genetic Algorithm, Optimization, Water and power cogeneration, Water desalination.

بهینه‌سازی تولید هم‌زمان آب شیرین و توان در نیروگاه‌های حرارتی

فرشید پرهیزکار^۱ و امید پورعلی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
*نویسنده مسئول، ایمیل: pourali@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۲۸

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۶/۶/۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۴

چکیده

در سال‌های اخیر با توجه به برداشت‌های بیش از حد از منابع طبیعی آب شیرین و افزایش مصرف آن، روش‌های متنوع شیرین‌سازی آب بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. به‌منظور تامین آب آشامیدنی و آب مصرفی واحدهای صنعتی، می‌توان از فرآیند شیرین‌سازی آب دریا به‌عنوان یک روش مناسب استفاده نمود. نیروگاه‌های حرارتی یکی از مهم‌ترین صنایع مصرف‌کننده آب هستند که تعداد قابل ملاحظه‌ای از آن‌ها در مجاورت دریاها قرار دارند. بنابراین، با بهره‌گیری از علم تولید هم‌زمان می‌توان توان و آب شیرین را به‌صورت هم‌زمان تولید نمود و به‌دنبال آن، راندمان کلی نیروگاه‌های موجود را افزایش داد. در این مقاله تولید هم‌زمان توان (در یک نیروگاه حرارتی موجود) و آب شیرین (با استفاده از خروجی توربین بخار زیرکش‌دار آن نیروگاه) بررسی شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، تولید آب شیرین با ترکیبی از آب شیرین‌کن‌های اسمز معکوس و حرارتی (MSF) در دبی‌های بیشتر از ۸۰۰ m³/h توجیه اقتصادی دارد.

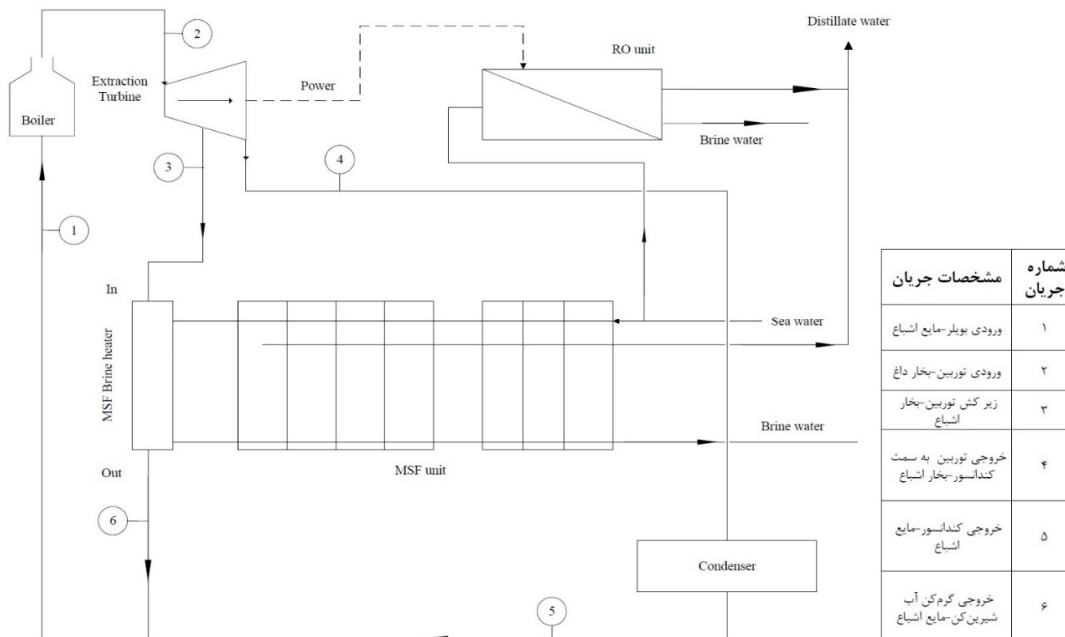
کلمات کلیدی: تولید هم‌زمان آب و توان، شیرین‌سازی آب، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک.

خصوص جنبه‌های اقتصادی و بهینه‌سازی تولید هم‌زمان توان و آب شیرین صورت گرفته است که (Lianying et al., 2013) یک نمونه از این سری پژوهش‌ها است. در این کار پژوهشی، با مدل‌سازی تجهیزات نیروگاهی و آب‌شیرین‌کن‌های حرارتی و اسمز معکوس (کربلایی و همکاران، ۱۳۹۵; El-dessouky and Ettouney, 2002) و با استفاده از توابع اقتصادی (شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و جاری) (Reyhani et al., 2003; Seider et al., 2016) و بهره‌گیری از بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک (Burke and Kendall, 2010) بهترین میزان آب شیرین تولیدی و هزینه بهینه نهایی تولید آب شیرین تعیین شده است.

۲- شرح فرآیند

در این کار پژوهشی، هدف دستیابی به مقدار بهینه تولید هم‌زمان توان و آب شیرین از نقطه‌نظر اقتصادی می‌باشد. بدین منظور، یک سیستم ترکیبی آب‌شیرین‌کن (شامل آب‌شیرین‌کن حرارتی و اسمز معکوس) جدید به یک نیروگاه حرارتی موجود (با توان تولیدی ۲۵۰ MW) متصل خواهد شد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود بخار تولیدشده در بویلر وارد توربین

اکثر کشورهای خشک و نیمه‌خشک با مشکلات کمبود آب مواجه می‌باشند، در نتیجه این کشورها درصد تأمین آب شرب و آب مصرفی صنایع از طریق شیرین‌سازی منابع قابل‌ملاحظه آب شور (مانند دریاها) هستند. یکی از مهم‌ترین صنایع مصرف‌کننده آب و انرژی نیروگاه‌های حرارتی می‌باشند که با استفاده از حرارت اتلافی قسمت‌های مختلف نیروگاه‌ها می‌توان هزینه تولید آب شیرین با استفاده از سیستم‌های آب‌شیرین‌کن متداول مانند آب‌شیرین‌کن حرارتی تقطیری چندمرحله‌ای^۱ و اسمز معکوس^۲ را تا حد قابل‌توجهی کاهش داد. در نیروگاه‌های حرارتی که از توربین‌های بخار زیرکشدار^۳ برای تولید توان استفاده می‌شود، می‌توان در یک دما و فشار خاص بخار باکیفیت موردنظر را از توربین دریافت نموده و آن را برای تولید هم‌زمان توان و آب استفاده نمود. با توجه به مزیت‌های تولید هم‌زمان تاکنون پژوهش‌های مختلفی در این زمینه صورت گرفته است (Al-Sofi et al., 1992; Awerbuch, 1997). به‌عنوان نمونه، تحلیل انرژی ترکیب توربین گازی و مجموعه آب‌شیرین‌کن حرارتی توسط Cardona and Piacentino (2004) بررسی شده است. در پژوهش‌های صورت گرفته مطالعات بسیار کمی در



شکل ۱- شمایی از ترکیب مجموعه نیروگاهی موجود با آب‌شیرین‌کن‌های حرارتی و اسمز معکوس

زیرکش دار مجموعه نیروگاهی موجود می‌شود و سپس مقداری از این بخار از زیرکش توربین خارج شده تا به منظور تولید آب شیرین توسط مجموعه آب شیرین کن حرارتی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مقداری از توان تولید شده توسط این توربین به منظور تولید آب شیرین توسط مجموعه آب شیرین کن اسمز معکوس استفاده می‌شود.

۳- مدل سازی سیستم

معادلات حاکم در قسمت زیر ارائه شده است:

۳-۱- بویلر

بخار داغ توسط بویلر تأمین می‌شود که برای تولید هم‌زمان توان و آب شیرین مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار حرارت مورد نیاز در بویلر با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید (Lianying et al., 2013; Seider et al., 2003):

$$Q_{bo} = M_{s.bo}(h_{bo.out} - h_{bo.in}) \quad (1)$$

که Q_{bo} : مقدار حرارت مورد نیاز بویلر، $h_{bo.out}$ دبی جرمی بخار خروجی از بویلر، آنتالپی بخار خروجی از بویلر، $h_{bo.in}$: آنتالپی آب ورودی به بویلر هستند.

۳-۲- توربین بخار

در این پژوهش از یک توربین بخار زیرکش دار (به دلیل نیاز به بخار اشباع در سطح فشار و دمای مشخص برای استفاده

در آب شیرین کن حرارتی) استفاده خواهد شد (شکل ۲). بخار خروجی از زیرکش این توربین (به علت تولید توان در طول توربین) فشار پایین تری نسبت به بخار ورودی به توربین دارد. بنابراین، با انتخاب این توربین می‌توان با استفاده از بخار خروجی از زیرکش توربین که به سطح فشار مشخص برای ورودی به مجموعه آب شیرین کن حرارتی رسیده است، به تولید آب شیرین در کنار تولید توان (بدون استفاده از بویلر کمکی) پرداخت. جریان‌های ورودی و خروجی از توربین بخار زیرکش دار شامل یک جریان بخار ورودی از بویلر و دو جریان خروجی از توربین (به صورت‌های چگالیده^۴ از انتهای توربین و بخار اشباع در فشار و دمای مورد نظر) است که با اعمال قوانین بقای جرم و انرژی می‌توان دبی و توان قسمت‌های مختلف توربین را به صورت زیر محاسبه نمود (Seider et al., 2003):

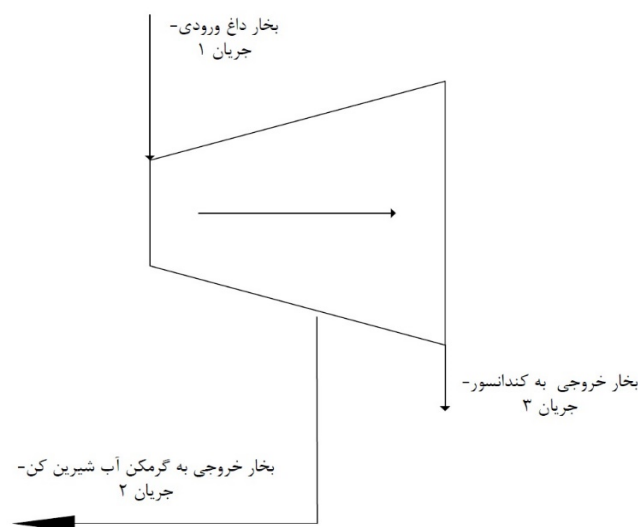
$$M_{s.bo} = M_{s.t} \quad (2)$$

که $M_{s.t}$: دبی جرمی بخار ورودی به توربین است.

$$M_{s.t} = M_{s.cond} + M_{s.ext} \quad (3)$$

در معادله فوق $M_{s.cond}$: دبی بخار اشباع ارسالی به کندانسور (خروجی شماره ۳ در شکل ۱) و $M_{s.ext}$: دبی بخار اشباع مورد نظر ارسالی به مجموعه آب شیرین کن حرارتی (خروجی شماره ۲ در شکل ۱) می‌باشند.

$$W_{tot} = W_{ext} + W_{cond} \quad (4)$$



شکل ۲- شمایی از توربین بخار زیرکش دار نیروگاه حرارتی

استفاده شده است. این آب شیرین کن ۲۱ مرحله‌ای بوده و حرارت مورد نیاز برای شیرین‌سازی آب دریا، از بخار اشباع خروجی از توربین بخار زیرکش‌دار تأمین می‌شود. با استفاده از روابط (۹) تا (۱۱) می‌توان به دبی آب شیرین خروجی از آب شیرین کن و بخار مورد نیاز برای تبخیر آب دریا دست یافت. لازم به ذکر است غلظت نمک در آب دریا ۳۶۰۰۰ ppm و در شورآب خروجی از آب شیرین کن (با توجه به قوانین سازمان بهداشت جهانی (WHO) World Health Organization و به دلیل رعایت مسائل محیط‌زیستی) ۷۰۰۰۰ ppm در نظر گرفته شده است.

$$M_{d.msfc} = \frac{M_f}{1 - (1 - y)} \quad (9)$$

که M_f : دبی جرمی آب ورودی از دریا به آب شیرین کن حرارتی و y : ضریب وابسته به عوامل حرارتی آب شیرین کن می‌باشد (که با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود):

$$y = \frac{C_p \cdot \Delta T_{msfc}}{\lambda_{ave}} \quad (10)$$

که C_p : ظرفیت گرمایی آب دریا، ΔT_{msfc} : اختلاف دما در مراحل آب شیرین کن حرارتی و λ_{ave} : گرمای نهان تبخیر آب دریا در دمای میانگین هستند.

$$M_{s.ext} = \frac{M_f \cdot C_p \cdot (T_{TBT} - T_0)}{h_{fg}} \quad (11)$$

که T_{TBT} : دمای آب خروجی از گرم کن آب شیرین کن، T_0 : دمای آب ورودی به گرم کن آب شیرین کن و h_{fg} : گرمای نهان بخار موجود در گرم کن آب شیرین کن حرارتی می‌باشند.

۳-۳-۲- آب شیرین کن اسمز معکوس (RO)

آب شیرین کن اسمز معکوس به کمک پمپ‌های فشار بالا (که از توان الکتریکی تولیدی، توسط توربین بخار زیرکش‌دار استفاده می‌کنند) عمل شیرین‌سازی آب دریا را انجام می‌دهند. با بهره‌گیری از رابطه زیر می‌توان به دبی‌های مورد نظر دست یافت:

$$M_{sea.ro} = M_{d.ro} + M_{b.ro} \quad (12)$$

که $M_{sea.ro}$: دبی آب ورودی دریا به اسمز معکوس، $M_{d.ro}$: دبی آب شیرین خروجی از اسمز معکوس و $M_{b.ro}$: دبی شورآب

که W_{tot} : مقدار کل کار تولیدشده، W_{ext} : مقدار کار تولیدی قسمت زیرکش توربین و W_{cond} : کار تولیدی قسمت مرتبط با کندانسور هستند که از روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$W_{ext} = M_{s.t}(h_1 - h_2) \quad (5)$$

که h_1 : آنتالپی جریان ورودی به توربین آنتالپی و h_2 : جریان زیرکش خروجی از توربین است.

$$W_{cond} = M_{s.cond}(h_2 - h_3) \quad (6)$$

h_3 : آنتالپی جریان بخار خروجی از توربین به سمت کندانسور است.

۳-۳-۳- واحد آب شیرین کن

در این کار پژوهشی از آب شیرین کن‌های حرارتی تقطیری چندمرحله‌ای (MSF) و اسمز معکوس (RO) به صورت هم‌زمان استفاده شده است. یکی از اهداف این مطالعه، دستیابی به بهترین نوع چینش این آب شیرین کن‌ها و یافتن مقدار بهینه تولید توسط هر مجموعه آب شیرین کن است. محاسبات مربوط به میزان تولید آب شیرین^۵ و همچنین شورآب^۶ تولیدی در واحدهای آب شیرین کن به صورت زیر است (Lianying et al., 2013):

$$M_d = M_{d.msfc} + M_{d.ro} \quad (7)$$

که M_d : مقدار کلی آب شیرین تولیدشده و $M_{d.msfc}$ و $M_{d.ro}$: آب شیرین تولیدشده توسط آب شیرین کن‌های حرارتی و اسمز معکوس هستند.

$$M_{bd} = M_{bd.msfc} + M_{bd.ro} \quad (8)$$

که M_{bd} : کل آب شور خارج شده از سیستم‌های آب شیرین کن و $M_{bd.msfc}$ و $M_{bd.ro}$: آب شور خارج شده از آب شیرین کن‌های حرارتی و اسمز معکوس هستند. جزئیات و محاسبات هر کدام از آب شیرین کن‌ها در ادامه ارائه شده است.

۳-۳-۱- آب شیرین کن حرارتی تقطیری چند مرحله ای (MSF)

همان‌طور که گفته شد، برای تولید آب شیرین در مجموعه مطالعاتی مورد نظر از آب شیرین کن حرارتی از نوع MSF

خروجی از اسمز معکوس می‌باشند.

۳-۵- مدل‌سازی اقتصادی

قیمت محاسبه شده برای این سیستم شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای خرید تجهیزات (جدول ۱) و هزینه‌های جاری سالیانه (انرژی مصرفی، مواد شیمیایی، نیروی کار) است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه با استفاده از توابع هم‌سطح‌سازی قیمت‌ها (جدول ۲) به هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه تبدیل می‌شوند که برای این هم‌سطح‌سازی عمر مفید تجهیزات ۲۰ سال و نرخ تورم ۱۹ درصد است.

در جدول ۱، مقدار حرارت موردنیاز در قسمت گرم‌کن آب شیرین‌کن حرارتی، اختلاف دمای لگاریتمی نهایی در قسمت گرم‌کن آب شیرین‌کن حرارتی، اختلاف فشار در داخل محفظه گرم‌کن آب شیرین‌کن حرارتی و اختلاف فشار در داخل لوله‌های گرم‌کن آب شیرین‌کن حرارتی، کل حرارت تأمین شده برای پیش‌گرمایش آب ورودی دریا (در طی مراحل آب شیرین‌کن حرارتی)، اختلاف دمای لگاریتمی نهایی آب دریا در طی مراحل آب شیرین‌کن حرارتی، اختلاف دمای هر مرحله در آب شیرین‌کن حرارتی و اختلاف فشار آب شور دریا در داخل لوله‌های گذرنده در مراحل آب شیرین‌کن حرارتی، توان مصرفی توسط پمپ آب شیرین‌کن حرارتی و راندمان پمپ‌های مورد استفاده در آب شیرین‌کن حرارتی می‌باشند.

۳-۴- مدل‌سازی ریاضی

برای مدل‌سازی ریاضی ترکیبی از نیروگاه حرارتی موجود با مجموعه‌های آب شیرین‌کن حرارتی و اسمز معکوس (شکل ۱) در نظر گرفته شده که به منظور انجام بهینه‌سازی برای تولید آب شیرین و توان، فرضیات زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با مدل‌سازی ریاضی و با استفاده از بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک می‌توان به مقادیر بهینه تولید توان و آب شیرین در این واحد نیروگاهی اصلاح شده دست یافت.

- بویلر، توربین و آب شیرین‌کن حرارتی به صورت آدیباتیک فرض شده و از تلفات حرارتی در آن‌ها صرف نظر شده است.
- محصول آب شیرین‌کن حرارتی بدون نمک فرض شده است.

- غلظت نمک در شورآب خروجی آب شیرین‌کن‌های حرارتی و اسمز معکوس به دلیل مسائل محیط زیستی و قوانین سازمان بهداشت جهانی (WHO) ۷۰۰۰ ppm در نظر گرفته شده است.

- کارکرد این مجموعه ترکیبی ۸۰۰۰ ساعت در سال در نظر گرفته شده است.

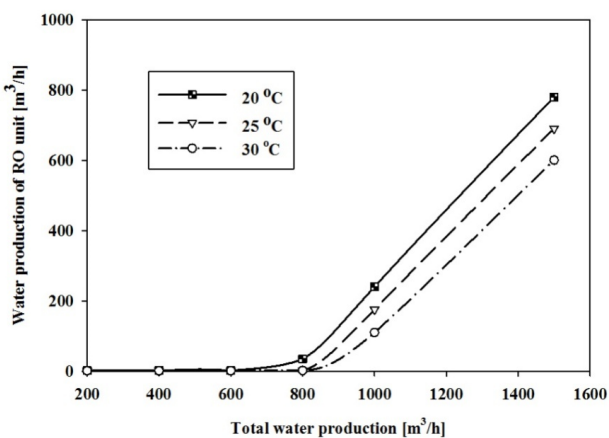
جدول ۱- توابع قیمت‌های تجهیزات کاربردی (کربلایی اکبری و همکاران، ۱۳۹۵؛ Seider et al., 2003)

تجهیزات	توابع قیمت
توربین	$3344.3(W_{tot}^{0.7}) - 61.3(W_{tot}^{0.95})$
آب شیرین‌کن اسمز معکوس	$\exp(0.802 \log(M_{dro}) + 0.01775(\log M_{dro})^2)$
گرم‌کن آب شیرین‌کن حرارتی	$430 \times 0.367 Q_{BH} TTD_{BH}^{-0.7} \Delta P_{tBH}^{-0.008} \Delta P_{sBH}^{-0.004}$
بازیافت و دفع حرارت	$430 \times 1.6 Q_s TTD_c^{-0.5} \Delta T_n^{-0.75} \Delta P_{tS}^{-0.1}$
پمپ	$705.48 W_{pump}^{0.71} (1 + \frac{0.2}{1 - \eta_{pump}})$

جدول ۲- توابع هم‌سطح‌سازی اقتصادی (Shakib et al., 2011)

توضیح	تابع
i : نرخ اسمی سود بانکی (۲۵ درصد) f : تورم سالیانه (۱۹ درصد)	$i = \frac{j - f}{1 + f}$
C_{acap} : هزینه هم‌سطح‌شده اولیه سالیانه Y_{proj} : عمر مفید تجهیزات	$C_{acap} = C_{cap} \cdot \frac{i \cdot (1 + i)^{Y_{proj}}}{(1 + i)^{Y_{proj}} - 1}$

هم‌زمان توان و آب شیرین با استفاده از توان و بخار خروجی تولیدشده از توربین زیرکش‌دار در یک واحد نیروگاهی موجود، بررسی شده است. براساس اطلاعات نمایش داده شده در شکل ۳، سهم آب شیرین تولیدی توسط سیستم اسمز معکوس برحسب کل مقدار آب شیرین تولیدشده نمایش داده شده است. براساس این شکل، در مقدارهای بیشتر از $800 \text{ m}^3/\text{h}$ مجموع آب شیرین‌کن‌های حرارتی و اسمز معکوس باید به‌صورت موازی کار کرده و در حالتیکه مقدار آب شیرین تولیدی کمتر از این مقدار باشد، آب شیرین‌کن حرارتی باید به‌تنهایی برای تولید آب شیرین مورد استفاده قرار گیرد تا از لحاظ هزینه‌ها وضعیت مطلوبی فراهم آید. همچنین مشخص است که در شرایطی که دمای آب ورودی دریا 20°C باشد، آب شیرین‌کن اسمز معکوس مقدار بیشتری آب شیرین نسبت به سایر حالت‌ها (که دمای آب ورودی از دریا 25°C و 30°C می‌باشد) تولید می‌کند. زیرا برای تبدیل آب شور 20°C به آب شیرین توسط آب شیرین‌کن حرارتی، باید بخار بیشتری (از زیرکش توربین) نسبت به آب شور 25°C و 30°C مصرف شود که موجب بالا رفتن هزینه‌ها خواهد شد.



شکل ۳- مقدار تولید بهینه آب شیرین‌کن اسمز معکوس برحسب مقدار کل آب شیرین تولیدی توسط مجموعه آب شیرین‌کن‌ها

شکل ۴ تغییرات قیمت تمام‌شده کلی برای هر مترمکعب آب شیرین تولیدی بر حسب مقدار کلی آب شیرین تولیدی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴، قیمت اولیه آب شیرین تولیدی در مقادیر بیشتر از $800 \text{ m}^3/\text{h}$ به‌صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. با توجه به اطلاعات کسب‌شده از دو نمودار ۳ و ۴،

در این کار پژوهشی، تابع هدف موردبررسی (معادله ۱۳) براساس قیمت کلی سالیانه (شامل قیمت سالیانه سرمایه‌گذاری و جاری) است که با کمینه کردن این تابع با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقدار بهینه تولید آب شیرین (توسط مجموعه آب شیرین‌کن‌های حرارتی و اسمز معکوس) و توان مشخص خواهد شد.

$$TAC = \text{Capital cost of (MSF + RO)} + \text{Operating cost of (MSF + RO)} \quad (13)$$

۴- اطلاعات مسئله

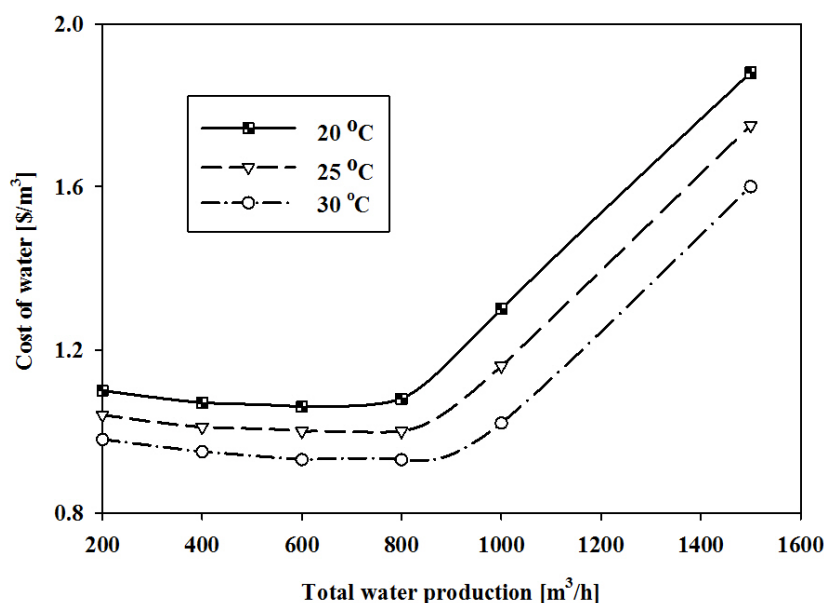
همان‌طور که در قسمت‌های قبل گفته شد، در این مقاله یک واحد نیروگاهی با توربین بخار زیرکش‌دار (با توان 250 MW) با آب شیرین‌کن‌های حرارتی و اسمز معکوس (برای تأمین $200 \text{ m}^3/\text{h}$ تا $1500 \text{ m}^3/\text{h}$) ترکیب شده است. اطلاعات مربوط به تجهیزات این فرآیندها در جدول ۳ آورده شده‌اند.

جدول ۳- اطلاعات نیروگاه و آب شیرین‌کن‌های استفاده شده (Lianying et al., 2013)

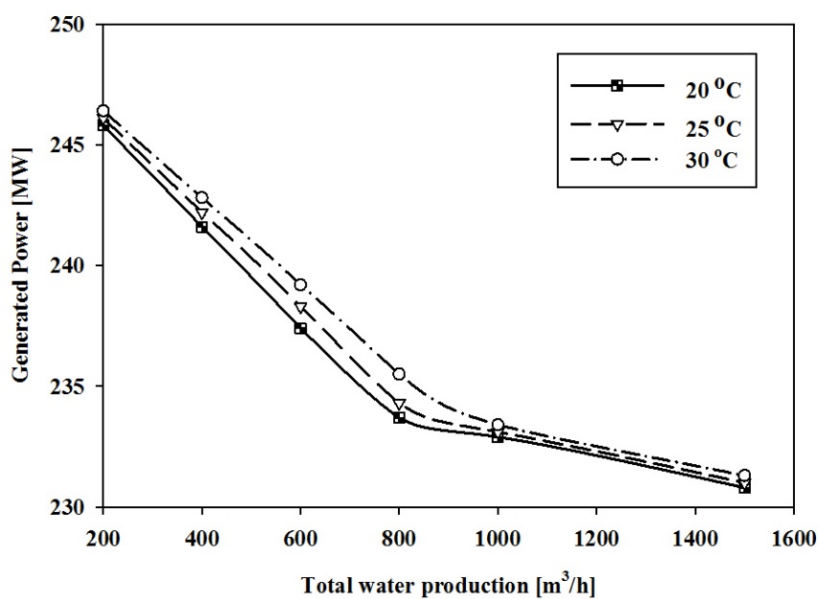
مقدار	عوامل
	توربین زیرکش‌دار
۵۸۵	دمای بخار ورودی به توربین ($^\circ\text{C}$)
۱۳۳	دمای بخار خروجی از زیرکش توربین ($^\circ\text{C}$)
۳/۸۵	فشار بخار خروجی از زیرکش توربین (MPa)
۰/۸۵	راندمان توربین
	آب شیرین‌کن حرارتی
۲۱	تعداد مراحل
۱۱۰	دمای خروجی از گرمکن MSF ($^\circ\text{C}$)
۴۲۰۰۰	غلظت آب دریا (ppm)
۳۰، ۲۵، ۲۰	دمای آب دریا ($^\circ\text{C}$)
۰/۳	فشار گرم‌کن MSF (MPa)
$8/33 \times 10^{-6}$	ضریب نفوذ پذیری آب
۰/۷۵	راندمان پمپ

۵- نتایج

یکی از ابزارهای پرکاربرد برای استفاده بهینه از حرارت تولیدی در نیروگاه‌ها و واحدهای صنعتی، روش تولید هم‌زمان توان و آب شیرین است. همان‌طور که گفته شد، در این مقاله، تولید



شکل ۴- هزینه آب شیرین تولیدی برحسب مقدار کل آب شیرین تولیدی توسط مجموعه آب شیرین کن‌ها



شکل ۵- میزان توان تولید شده برحسب مقدار کل آب شیرین تولیدی توسط مجموعه آب شیرین کن‌ها

کاهش تولید توان تا دبی $800 \text{ m}^3/\text{h}$ آب شیرین تولیدی کاملاً محسوس بوده و در دبی‌های بالاتر که سهم عمده‌ای از تولید آب شیرین توسط آب شیرین کن اسمز معکوس صورت می‌گیرد، این تغییرات (توان) با شیب کمتری صورت می‌گیرد.

می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در دبی‌های کم، تولید آب شیرین به روش حرارتی مطلوب بوده و با افزایش دبی آب شیرین تولیدی روش اسمز معکوس از لحاظ هزینه‌ای مقبول‌تر است. شکل ۵ تغییرات میزان توان تولیدی را بر حسب میزان آب شیرین به‌دست‌آمده نمایش می‌دهد. با توجه به این نمودار، به دلیل مصرف بخار توسط سیستم آب شیرین کن حرارتی،

- MSF/SWRO plants”, *Desalination and Water Reuse*, Part 1, 2/3, 10-46.
- Awerbuch, L., (1997), “Power-desalination and the importance of hybrid ideas”, *IDA World Congress*, Madrid.
- Burke, E.K., and Kendall, G., (2010), *Search methodologies: Introductory tutorials in optimization and decision support techniques*, Springer.
- Cardona, E., and Piacentino, A., (2004), “Optimal design of cogeneration plants for seawater desalination”, *Desalination*, 166, 411-426.
- Ettouney, H.M., and El-Dessouky, H.T., (2002), *Fundamentals of salt water desalination*, Elsevier.
- Lianying, W., Yangdong, H., and Congjie, G., (2013), “Optimum design of cogeneration for power and desalination to satisfy the demand of water and power”, *Desalination*, 324, 111-117.
- Reyhani, H. A., Meratizaman, M., Ebrahimi, A., Pourali, O., and Amidpour, M., (2016), “Thermodynamic and economic optimization of SOFC-GT and its cogeneration opportunities using generated syngas from heavy fuel oil gasification”, *Energy*, 107, 141-164.
- Seider, J.D., Seader, W.D., and Lewin, D.R., (2003), *Product and process design principles: Synthesis, analysis and evaluation*, Wiley.
- Shakib, S.E., Amidpour, M., and Aghanajafi, C., (2012), “Simulation and optimization of multi effect desalination coupled to a gas turbine plant with HRSG consideration”, *Desalination*, 285, 366-376.

در این کار پژوهشی تولید هم‌زمان توان با استفاده از یک نیروگاه حرارتی موجود و آب شیرین به کمک ترکیب آب شیرین کن‌های حرارتی و اسمز معکوس با توربین زیرکش دار نیروگاه موجود بررسی شده است. با استفاده از توربین زیرکش دار می‌توان حرارت اولیه مورد نیاز آب شیرین کن حرارتی را تأمین و از طرفی با استفاده از برق تولیدی توسط آن توربین توان لازم برای تولید آب شیرین به وسیله آب شیرین کن اسمز معکوس را مهیا نمود. با انجام آنالیزهای اقتصادی و بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک، مقدار بهینه تولید آب توسط هر کدام از این مجموعه‌های آب شیرین کن تعیین شده‌اند. براساس نتایج کسب شده، هزینه تولید آب شیرین در دبی کمتر از m^3/h ۸۰۰ فقط با سیستم حرارتی و در دبی‌های بالاتر توسط هر دو سیستم آب شیرین کن حرارتی و اسمز معکوس قابل قبول می‌باشد. لازم به ذکر است که به منظور بالا بردن دقت محاسبات در تصمیم‌گیری‌ها، در پژوهش‌های آتی باید علاوه بر آنالیز اقتصادی هزینه‌ها، آنالیز درآمدها و همچنین سود خالص مدنظر قرار گیرد. به‌طور کلی می‌توان براساس نتایج این پژوهش نتیجه‌گیری نمود که تولید هم‌زمان توان و آب شیرین در واحدهای صنعتی مانند نیروگاه‌های حرارتی که در مناطق خشک ساحلی جنوبی کشور قرار دارند (و با بحران جدی آب شیرین مواجه بوده و به منابع کافی آب دریا به عنوان ماده اولیه آب شیرین کن‌ها دسترسی دارند) امکان‌پذیر است.

۷- پی‌نوشت‌ها

- 1- Multi-Stage Flash distillation (MSF)
- 2- Reverse Osmosis (RO)
- 3- Extraction steam turbine
- 4- Condensing
- 5- Fresh water
- 6- Brine

۸- مراجع

- کربلایی اکبری، ع.، قلی‌نژاد، م.، پورعلی، ا.، عمیدپور، م.، (۱۳۹۵). «بهینه‌سازی دوهدفه بازیافت حرارت و تولید آب شیرین از سیستم آب خنک‌کن یک‌بارگذر». *مجله علمی و پژوهشی شریف (مهندسی مکانیک)*، ۳۲، ۱۳۷-۱۴۷.
- Al-Sofi, M.A.K., Hassan, A.M., and El-Sayed, E.F., (1992), “Integrated and non-integrated power/