

کاربرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری در بهینه‌سازی نیروگاه بوشهر با رویکرد آنالیز اکسرژی برای اتصال آب‌شیرین‌کن

چکیده: این پژوهش با هدف بهینه‌سازی ترمودینامیکی نیروگاه اتمی بوشهر با رویکرد آنالیز اکسرژی برای اتصال آب‌شیرین‌کن و تولید آب‌شیرین با حداقل هزینه ممکن انجام شده است. پس از آنالیز اکسرژی و تعیین منابع اتلاف از الگوریتم‌های فرا ابتکاری گرگ خاکستری و ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی سیستم استفاده شده است. عملکرد این الگوریتم‌ها در حل تابع راسترینگ ارزیابی گردیده و مسئله اصلی با الگوریتم برتر برای یافتن دماها و فشارهای بهینه حل شده است. سپس یک واحد آب‌شیرین‌کن تقطیر چند مرحله‌ای همراه با ترموکمپرسور با ظرفیت ۲۴۰۰۰ متر مکعب در روز به یکی از جریان‌های بهینه خروجی از توربین کم فشار متصل گردیده است. نتایج نشان دادند که بیشترین میزان برگشت ناپذیری با مقدار ۱۵۱۰/۵۰۰ مگاوات در ابتدا به راکتور و سپس با مقدار ۱۴۴/۵۰۰ مگاوات به ژنراتور بخار تعلق دارد. هزینه تولید آب‌شیرین نیز در شرایط بهینه نیروگاه ۱/۱۸۰ دلار به ازای هر متر مکعب می‌باشد.

واژه‌های راهنما: نیروگاه اتمی بوشهر، آب‌شیرین‌کن، اکسرژی، الگوریتم گرگ خاکستری، الگوریتم ازدحام ذرات.

آزاده ناصر بگی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

محمد باقر

محمد صادقی آزاد*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

مهدی آقایی

استادیار، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

فرزاد چوبدار رحیم

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

مقاله علمی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴

Application of meta-heuristic algorithms in Bushehr nuclear power plant optimization with exergy analysis approach to couple a desalination plant

Abstract: This research has been carried out with the aim of thermodynamic optimization of Bushehr nuclear power plant with the approach of exergy analysis for the connection of desalination plant and the production of freshwater at the lowest possible cost. After exergy analysis and determination of destruction, gray wolf optimizer and particle swarm algorithms have been used to optimize the system. The performance of these algorithms in solving the Rastrigin function has been evaluated and the main problem has been solved with the superior algorithm to find the optimal temperatures and pressures. Then, a multi-stage distillation desalination unit with a Thermo vapor compressor with a capacity of 24,000 cubic meters per day has been connected to one of the outlet flows of the low-pressure turbine. The results showed that the highest rate of irreversibility and loss with 1510.50 MW belongs first to the reactor and then to 144.50 MW to the steam generator. The cost of producing fresh water in optimal conditions of the power plant is estimated at \$ 1.18 per cubic meter.

Keywords: Bushehr nuclear power plant, Desalination plant, Exergy, GWO, PSO.

A.Naserbegi
PhD Student,
Department of Nuclear
Engineering, Shahid
Beheshti University,
Tehran

**M.M.Sadeghi
Azad***

Associate Professor,
Department of Mechanical
Engineering, Azarbaijan
Shahid Madani University,
Tabriz

M.Aghaie

Assistant Professor,
Department of Nuclear
Engineering, Shahid
Beheshti University,
Tehran

F.Choobdar Rahim

PhD Student, Department
of Mechanical
Engineering, Urmia
University of Technology,
Urmia

۱- مقدمه

در آن یک چهارم متوسط جهانی است و تنها ۰/۳۴ درصد از آب-های موجود در جهان را در اختیار دارد. این بدان معناست که حتی با بالاترین راندمان و بهره‌وری ممکن در مصرف آب، برای تأمین نیازها آب کافی در اختیار نخواهد بود؛ بنابراین علاوه بر حفظ منابع آب شیرین موجود باید به فکر شیرین‌سازی آب‌های شور نیز بود [۸].

در سال‌های اخیر بسیاری از کشورهای جهان به انرژی هسته‌ای برای تأمین انرژی موردنیازشان جهت فرآیند شیرین‌سازی، روی آورده‌اند. در ایران نیز با توجه به بحران کمبود آب در ده سال آینده، تولید آب شیرین با استفاده از فناوری هسته‌ای امری ضروری محسوب می‌شود. در راستای نیل به این هدف توجه ویژه به نیروگاه اتمی بوشهر معطوف گردیده است. نیروگاه اتمی بوشهر اولین نیروگاه هسته‌ای ایران است که در جنوب کشور واقع شده است و با در نظر گرفتن نیاز مردم جنوب کشور به آب شیرین، شاید بتوان گفت که تولید آب شیرین با استفاده از این نیروگاه یکی از مهم‌ترین توانایی‌های این مرکز می‌تواند باشد [۹].

در زمینه اتصال واحدهای آب‌شیرین‌کن و به‌طور کلی اتصال واحدهای مصرف گرما به نیروگاه‌های اتمی و بهینه‌سازی ترمودینامیکی این نیروگاه‌ها تاکنون مطالعات فراوانی صورت گرفته است. در یک پژوهش انصاری و همکارانش یک نیروگاه PWR اسمی را با اتصال واحد آب‌شیرین‌کن با ظرفیت ۲۴۰۰۰ مترمکعب در روز مورد آنالیز و تحلیل اکسرژی قرار داده‌اند و با بهینه‌سازی ترمودینامیکی منابعی که موجب تخریب انرژی و افزایش هزینه سیستم می‌شود را تخمین زده‌اند. مطالعات آن‌ها نشان داد که افزایش کارایی و کاهش تخریب در یک سیستم ترمودینامیکی منوط به افزایش هزینه نهایی سیستم خواهد بود [۱۰]. در سال ۲۰۲۰ ویلدینگ و همکارانش بهینه‌سازی چندهدفه را برای حل مسئله افزایش راندمان در فرآیند طراحی یک نیروگاه هسته‌ای PWR ارائه دادند و با استفاده از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک راندمان نیروگاه را از ۳۴/۸۱۰ به ۳۵/۶۳۰ ارتقا دادند [۱۱]. در تحقیقی دیگر ابراهیم گل و همکارانش به بهینه‌سازی اکسرژی راکتور WWER-1000 با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری پرداخته‌اند. آن‌ها برای جست‌وجوی مقادیر مطلوب الگوریتم ژنتیک، الگوریتم وال و الگوریتم ازدحام ذرات را به کار گرفته‌اند و منابع تخریب اکسرژی را تعیین کرده‌اند. روش ارائه‌شده توسط آن‌ها بازده نیروگاه اتمی را از ۳۳/۶۶۰ درصد به ۳۶/۴۲۰ درصد ارتقا داده است [۱۲].

در اغلب مطالعات موجود سهم ارزیابی اقتصادی در بهینه‌سازی و تولید آب شیرین بسیار محدود بوده و یا مورد توجه قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر ابتدا تحلیل انرژی و اکسرژی با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای نیروگاه هسته‌ای بوشهر توسط کد نویسی در نرم‌افزار متلب انجام شده است. سپس بهینه‌سازی سیستم با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری به‌عنوان یک الگوریتم نوین در بهینه‌سازی اکسرجتیکی اجرا گردیده است. پس از مشخص شدن دما و فشار بهینه جریان‌های نیروگاه یک واحد آب‌شیرین‌کن MED-TVC با ظرفیت ۲۴۰۰۰ مترمکعب در روز به آن متصل شده و هزینه تولید آب شیرین با استفاده از شبیه‌ساز آنالیز اقتصادی قدرتمند DEEP5.1 در

روند بسیار فزاینده مصرف انرژی در دنیای کنونی به‌ویژه در بخش برق مشکلات عدیده‌ای را در طی سال‌های اخیر ایجاد کرده است. حساسیت‌های جهانی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تلاش برای حفظ محیط‌زیست، منجر به استفاده گسترده از سایر منابع غیر فسیلی تولید برق همچون انرژی هسته‌ای شده است [۱، ۲]. از میان منابع آبی تأمین برق، انرژی هسته‌ای به‌عنوان یک روش تولید انرژی با انتشار در حد صفر گازهای گلخانه‌ای در سطح جهان شناخته‌شده است که علاوه بر این مزیت دارای ویژگی‌هایی همچون تأمین مقدار بسیار چشمگیری از انرژی الکتریکی با مصرف سوخت بسیار ناچیز و اطمینان دسترسی به منبع سوخت می‌باشد که به‌عنوان یک گزینه مناسب در کنار سایر منابع تأمین برق در دهه‌های آتی مدنظر قرار خواهد گرفت [۳، ۴].

در کشور ما با توجه به اهمیت استراتژیک انرژی هسته‌ای و هزینه بالای چرخه سوخت هسته‌ای، بهینه‌سازی و مدیریت مصرف این انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. احداث تأسیسات تولید انرژی الکتریکی از طریق نیروگاه‌های هسته‌ای نیاز به هزینه‌های زیادی دارد. هزینه‌های سوخت برای نیروگاه‌های هسته‌ای جزئی از کل هزینه‌های تولید هستند و به‌طور کلی میزان هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت برای این نیروگاه‌ها، به دلیل بالا بودن هزینه تولید سوخت برای کشور ما بیشتر از نیروگاه‌هایی است که با سوخت فسیلی کار می‌کنند. از این رو کاهش مصرف انرژی الکتریکی به میزان فراوانی در حفظ و بقاء سرمایه‌های ملی به‌ویژه در بخش هسته‌ای مؤثر است [۵].

نیروگاه‌ها به‌عنوان یکی از عرصه‌های مهم تولید انرژی برق و یکی از محورهای عمده توسعه در جوامع در دوران معاصر محسوب می‌گردند و چنانچه در فرآیند طراحی، تولید و بهره‌برداری آن‌ها ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی موردتوجه قرار نگیرد نقش تخریبی آن‌ها بر جامعه بیش از نقش سازندگی آن‌ها خواهد شد. با توجه به حجم بالای انرژی تبدیل یافته و درصد بالای تلفات انرژی در نیروگاه‌ها، اگر بتوان راندمان نیروگاه‌ها را افزایش داد، صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه‌ای در سوخت و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی به عمل خواهد آمد [۶].

تجهیز نیروگاه‌ها برای بالا بردن راندمان و همچنین کاهش هزینه‌ها یکی از مهم‌ترین مسائل وزارت نیرو در شاخه تولید می‌باشد. در این راستا روش انتگرالسیون فرآیندها به بررسی اثر متقابل فرآیندها و تأثیر آن‌ها بر یکدیگر و بر کل سیستم، می‌پردازد. به کمک چنین تکنیک‌هایی می‌توان سیستم‌های انرژی از جمله نیروگاه‌های حرارتی را بهینه‌سازی نمود. یک روش مهم در این زمینه آنالیز اکسرژی است. روش آنالیز اکسرژی تکنیک جدیدی برای ارزیابی اتلاف‌های ترمودینامیکی جریان‌ها در طی یک فرآیند می‌باشد. به‌کارگیری این روش در مورد نیروگاه‌های حرارتی می‌تواند اصلاح حرارتی برج‌های خنک‌کن، کندانسورها و همچنین بهینه‌سازی بویلرها و توربین‌ها را در پی داشته‌باشد [۷]. علاوه بر محدود بودن منابع انرژی و حساسیت در زمینه بهینه‌سازی مصرف آن‌ها از لحاظ اقلیم‌شناسی نیز ایران جز مناطق خشک جهانی طبقه‌بندی شده است و میزان بارندگی

تابع راسترینگ داشته است. در PSO بعد از ۱۰۰۰ تکرار مینیمم تابع به مقدار ۰/۳۷۰۲۷ می‌رسد درحالی‌که GWO با همین تعداد تکرار مقدار ۱۱-۱/۳۰e را به‌عنوان مینیمم تابع راسترینگ می‌یابد؛ بنابراین با توجه به عملکرد بهتر GWO این الگوریتم برای حل مسئله اصلی یعنی مینیمم کردن تخریب اکسرژی انتخاب شده است.

شرایط بهینه برآورد شده و با هزینه آب شیرین تولیدی توسط سوخت‌های فسیلی مقایسه شده است.

۲- الگوریتم‌های بهینه‌سازی و کمینه‌سازی تابع راسترینگ

الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (Gray Wolf Optimizer) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization) از مهم‌ترین الگوریتم‌های فرا ابتکاری هوشمند به شمار می‌روند که در حوزه هوش مصنوعی جای می‌گیرند. این الگوریتم‌ها با الهام از رفتار اجتماعی حیواناتی چون گرگ‌های خاکستری، ماهی‌ها و پرندگان که در گروه‌هایی کوچک و بزرگ کنار هم زندگی می‌کنند، طراحی شده‌اند. در الگوریتم گرگ خاکستری رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری برای به دست آوردن طعمه مدل‌سازی شده است درحالی‌که در الگوریتم ازدحام ذرات کشف الگوهای حاکم بر پرواز پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر آن‌ها به کار گرفته شده است [۱۳، ۱۴]. الگوریتم گرگ خاکستری از رهبری سلسله مراتبی و مکانیزم شکار گرگ خاکستری در طبیعت تقلید می‌کند. از چهار نوع گرگ خاکستری به نام‌های آلفا، بتا، دلتا و امگا برای شبیه‌سازی رهبری سلسله مراتبی استفاده می‌شود. در هنگام طراحی GWO، به منظور مدل کردن ریاضی سلسله مراتب اجتماعی گرگ‌ها مناسب‌ترین راه حل را به‌عنوان آلفا (α) در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه از بین بهترین راه‌حل‌ها، دومین و سومین آن‌ها را بتا (β) و دلتا (δ) نام‌گذاری می‌کنند. مابقی راه‌حل‌های کاندید شده امگا (ω) در نظر گرفته می‌شوند. در الگوریتم GWO، فرآیند شکار (بهینه‌سازی) توسط α ، β و δ هدایت می‌گردد. گرگ‌های ω از این سه گروه پیروی می‌کنند و به این ترتیب الگوریتم با پیروی از پاسخ‌های برتر در هر مرحله به سمت بهترین پاسخ سوق داده می‌شود. با توجه به ارائه روش‌های نوین بهینه‌سازی به‌وسیله الگوریتم‌های فرا ابتکاری، برای انتخاب الگوریتم مناسب لازم است که در ابتدا عملکرد این الگوریتم‌ها در حل یک مسئله مشترک مورد ارزیابی قرار گیرند. برای مقایسه قدرت بهینه‌سازی الگوریتم‌های معرفی شده تابع راسترینگ با ضابطه‌ای مطابق با معادله ۱ مورد بررسی قرار گرفته است.

$$f(x) = An + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)] \quad (1)$$

این تابع دارای تعداد زیادی مینیمم محلی است و مینیمم مطلق آن در نقطه $f(0,0)=0$ وجود دارد. مقدار مینیمم برای مقادیر $A=10$ و 30 متغیر در دامنه جست‌وجوی $-5.120 \leq x_i \leq 5.120$ توسط الگوریتم گرگ خاکستری و الگوریتم ازدحام ذرات بررسی شده است [۱۵].

عملکرد هر یک از الگوریتم‌ها برای یافتن مینیمم‌ها در تعداد تکرارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند و ۱۰ نتیجه برتر الگوریتم PSO در جدول ۱ و الگوریتم GWO در جدول ۲ گزارش شده است. این نتایج با وارد کردن ضابطه تابع راسترینگ در کد اصلی این الگوریتم‌ها در متلب در محدوده دامنه جست‌وجو حاصل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم گرگ خاکستری با یافتن مقادیر کمتر قدرت بیشتری در کمینه کردن

جدول ۱ بهترین نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات

شماره اجرا	تعداد تکرار	مقدار تابع هدف
۱	۱۰۰	۸۷/۳۱۰
۲	۲۰۰	۷۴/۷۸۱
۳	۳۰۰	۵۵/۱۷۸
۴	۴۰۰	۳۵/۰۲۵
۵	۵۰۰	۳۲/۹۵۱
۶	۶۰۰	۳۰/۲۷۹
۷	۷۰۰	۲۷/۴۷۸
۸	۸۰۰	۲۷/۳۲۱
۹	۹۰۰	۲۷/۱۴۸
۱۰	۱۰۰۰	۲۷/۰۳۷
میانگین	۵۵۰	۴۲/۴۵۱

جدول ۲ بهترین نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم گرگ خاکستری

شماره اجرا	تعداد تکرار	مقدار تابع هدف
۱	۱۰۰	۱۵/۷۱۲
۲	۲۰۰	۱۲/۲۰۲
۳	۳۰۰	۴/۳۲۵
۴	۴۰۰	۰/۰۰۲
۵	۵۰۰	۲/۴e-۰۵
۶	۶۰۰	۲/۹e-۰۶
۷	۷۰۰	۵/۴e-۰۹
۸	۸۰۰	۴/۲e-۱۰
۹	۹۰۰	۲/۹e-۱۱
۱۰	۱۰۰۰	۱/۳e-۱۱
میانگین	۵۵۰	۳/۲۲۴

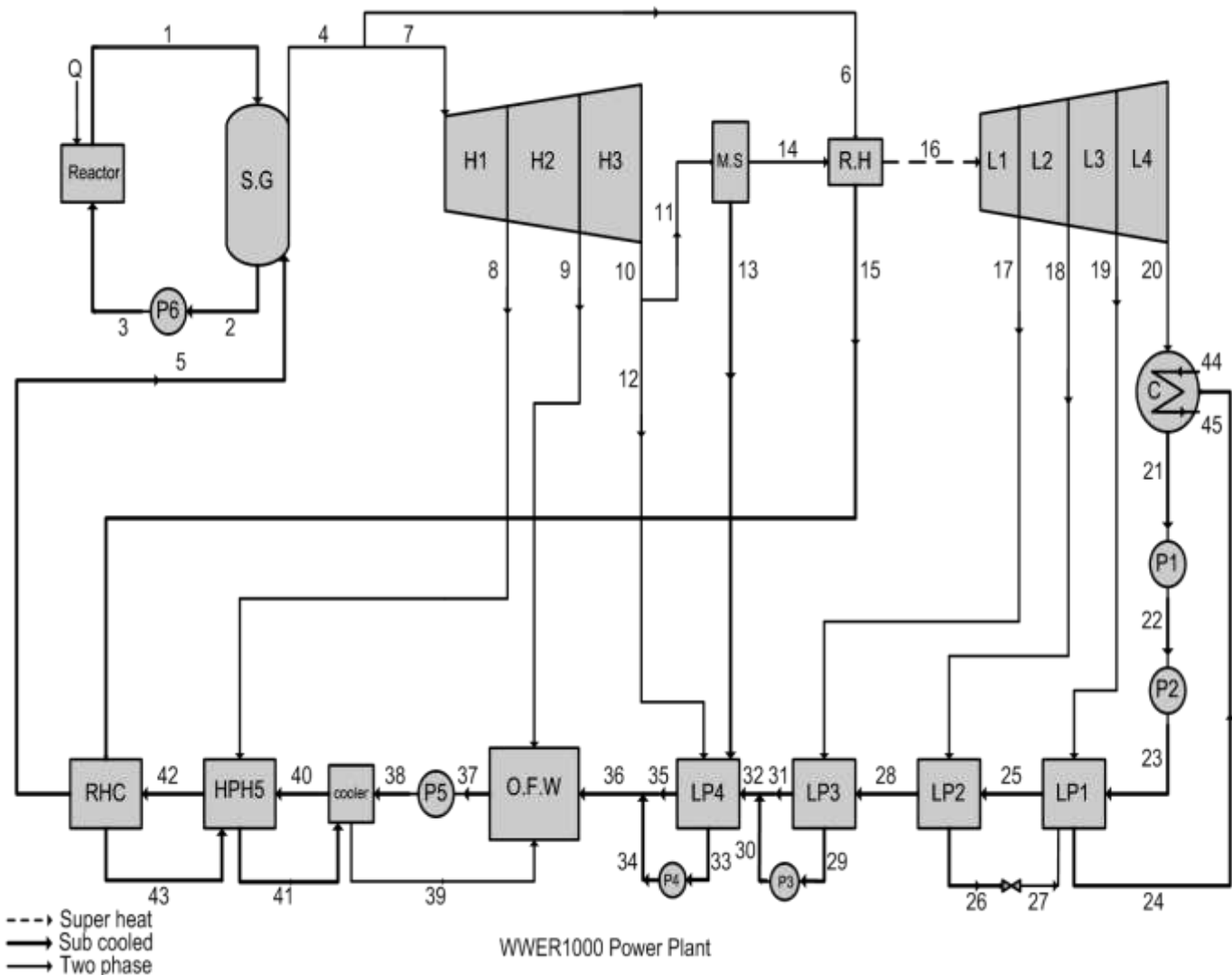
۳- محاسبات اکسرژی جریان‌ها و اجزای نیروگاه بوشهر

در این تحقیق، نیروگاه هسته‌ای بوشهر با قدرت خالص MW ۱۰۰۰ و ظرفیت حرارتی MWt ۳۰۰۰ به‌منظور بهینه‌سازی اکسرژی و سپس اتصال آب‌شیرین‌کن در نظر گرفته شده است. نیروگاه هسته‌ای بوشهر اولین نیروگاه هسته‌ای ایران از نوع آب تحت فشار با مدل راکتور WWER-1000 است. در این نوع راکتورها از آب سبک به‌عنوان خنک‌کننده و تعدیل‌کننده نوترون

جدول ۳ ویژگی‌های اصلی مدار اول

مقادیر	ویژگی‌ها
۳۰۰۰	توان اسمی نیروگاه (MWt)
۸۴۸۰۰	دبی آب‌خنک کننده (m ³ /h)
۱۵/۷۰۰	فشار آب‌خنک کننده در خروجی از قلب راکتور (MPa)
۴	تعداد لوپ‌ها
۴۳۷	دبی بخار (kg/s)
۲۷۸	دمای بخار (°C)
۶/۲۸۰	فشار بخار (MPa)
۲۲۰	دمای آب تغذیه (°C)
۳۲۰	دمای آب ورودی به ژنراتور بخار (°C)
۲۸۶	دمای آب خروجی از ژنراتور بخار (°C)

در فرآیند شکافت هسته‌ای استفاده می‌شود. این نیروگاه شامل دو مدار اولیه و ثانویه است. مدار اولیه حاوی آب تحت فشار به‌عنوان خنک‌کننده اصلی و کندکننده نوترون است. مدار ثانویه نیز همان چرخه بخار است که به توربین متصل شده و تحت سیکل رانکین عمل می‌کند. در مدار اول، انرژی حرارتی آزاد شده از واکنش تجزیه سوخت هسته‌ای در قلب راکتور توسط خنک‌کننده برداشت شده و حرارت از مدار اولیه به مدار ثانویه توسط ژنراتور بخار انجام می‌گیرد. ویژگی‌های اصلی مدار اول این نیروگاه در جدول ۳ گزارش شده است و نمودار جریان‌های مربوط به کل مدار اول و مدار دوم نیروگاه در شکل ۱ رسم گردیده است [۶].



شکل ۱ طرح‌واره جریان‌های سیال ورودی و خروجی به اجزای مدار اول و مدار دوم نیروگاه اتمی بوشهر

شماره	دبی جرمی (kg/s)	کسر بخار
۵	۱۶۶۱/۱۱	۰
۶	۱۱۷/۵۳	۰/۹۹۴
۷	۱۵۴۳/۵۸	۰/۹۹۴
۸	۱۲۹/۹۴	۰/۹۲۵
۹	۶۴/۶۳	۰/۸۸۵
۱۰	۱۳۴۹	۰/۸۶۱
۱۱	۱۲۲۱/۵۸	۰/۸۶۱
۱۲	۱۲۷/۴۲	۰/۸۶۱
۱۳	۱۶۴/۳۰	۰
۱۴	۱۰۵۷/۲۷	۰/۹۹۶
۱۵	۱۱۷/۵۲	۰
۱۶	۱۰۵۷/۲۷	۱
۱۷	۴۶/۷۲	۰/۹۹۸
۱۸	۴۳/۵۵	۰/۹۶۳
۱۹	۴۵/۷۲	۰/۹۳۱
۲۰	۹۲۱/۲۷	۰/۸۹۸
۲۱	۱۰۱۰/۵۰	۰
۲۲	۱۰۱۰/۵۵	۰
۲۳	۱۰۱۰/۵۵	۰
۲۴	۸۹/۲۷	۰
۲۵	۱۰۱۰/۵۵	۰
۲۶	۴۳/۵۵	۰
۲۷	۴۳/۵۵	۰/۰۳۴
۲۸	۱۰۱۱۰/۵۵	۰
۲۹	۴۶/۷۲	۰
۳۰	۴۶/۷۲	۰
۳۱	۱۰۱۰/۵۵	۰
۳۲	۱۰۵۷/۲۷	۰
۳۳	۲۹۱/۷۲	۰
۳۴	۲۹۱/۷۲	۰
۳۵	۱۰۵۷/۲۷	۰
۳۶	۱۳۴۹/۰۰	۰
۳۷	۱۶۶۱/۱۱	۰
۳۸	۱۶۶۱/۱۱	۰
۳۹	۲۴۷/۴۶	۰/۰۸۹
۴۰	۱۶۶۱/۱۱	۰
۴۱	۲۴۷/۴۶	۰
۴۲	۱۶۶۱/۱۱	۰
۴۳	۱۱۷/۵۲۰	۰
۴۴	۶۱۹۱۲	۰
۴۵	۶۱۹۱۲	۰

برای انجام محاسبات اکسرژی نوشتن معادلات بالانس جرم و انرژی در کل سیستم امری ضروری است. اکسرژی ماکزیمم کار به دست آمده از یک مقدار مشخص انرژی است. برای محاسبه اکسرژی فیزیکی یک جریان در شرایط T و P باید آن را نسبت به حالت محیطی در T0 و P0 بسنجیم. لذا قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای آن مانند روابط ۲ و ۳ نوشته می شوند.

$$Q - W = H_0 - H \quad (۲)$$

در روابط فوق Q گرمای فرآیند، W کار انجام شده و H آنتالپی سیستم است.

$$s_0 - s - \frac{Q}{T_0} = 0 \quad (۳)$$

مطابق با رابطه ۳ (قانون دوم)، Q گرمای فرآیند، S آنتروپی سیستم و T0 دمای حالت مرجع است. اگر مقدار Q را از قانون دوم ترمودینامیک به دست آورده و در قانون اول جایگذاری کنیم رابطه ۴ به دست خواهد آمد.

$$W = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (۴)$$

در نتیجه می توان مقدار کار ماکزیمم یا همان اکسرژی فیزیکی را به صورت رابطه ۵ بیان نمود.

$$EX = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (۵)$$

در رابطه فوق H0 و S0 به ترتیب آنتالپی و آنتروپی سیستم در شرایط مرجع (دمای ۱۵ درجه سانتی گراد و فشار اتمسفر) می باشند. برای محاسبه آنتالپی و آنتروپی هر جریان با مشخصات T و P و نیز در شرایط مرجع از یک ام فایل متلب با نام Xsteam استفاده شده است. Xsteam بر اساس استاندارد IAPWS IF-97 خواص بخار و آب را از ۰ تا ۱۰۰۰ بار و از ۰ تا ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد ارائه می دهد. این ام فایل در غالب یک تابع در هر مرحله از بهینه سازی برای خواندن ویژگی های ترمودینامیکی فراخوانی می شود.

مطابق با رابطه ۵ اکسرژی جریان های نقاط مختلف نیروگاه بوشهر قابل محاسبه خواهد بود [۷]. در جدول ۴ نیز دبی جرمی و کسر بخار نقاط مختلف نیروگاه نشان داده شده است. در ادامه تمامی معادلات بالانس انرژی و اکسرژی برای اجزای نیروگاه به طور مجزا ارائه گردیده است.

جدول ۴ دبی جرمی و کسر بخار نقاط مختلف نیروگاه

شماره	دبی جرمی (kg/s)	کسر بخار
۱	۱۶۸۰۰	۰
۲	۱۶۸۰۰	۰
۳	۱۶۸۰۰	۰
۴	۱۶۶۱/۱۱	۰/۹۹۴

$$\varepsilon_p = \frac{\sum_i \dot{E}_i - \sum_e \dot{E}_e}{\dot{w}_p} \quad (13)$$

$$\sum_i \dot{E}_{in} - \sum_e \dot{E}_{out} = \dot{w}_p + \dot{E}_D$$

معادلات ۱ تا ۱۴ معادلاتی خطی هستند که با معلوم بودن دماها، فشارها و دبی‌های جرمی ورودی و خروجی به هر یک از اجزای نیروگاه و سپس محاسبه آنتالپی و آنتروپی با استفاده از مشخصات ترمودینامیکی هر جریان قابل حل هستند. با داشتن مقدار آنتالپی و آنتروپی جریان‌ها میزان اکسرژی جریان‌ها نیز قابل محاسبه است.

در این مطالعه برای سادگی تجزیه و تحلیل، فرض می‌شود که انرژی با سرعت ثابت و در شرایط پایا از واکنش شکافت سوخت در راکتور حاصل می‌گردد. در واقع فرض می‌شود که کل انرژی شکافت مطابق با رابطه ۱۵ به کار مفید تبدیل می‌گردد. میزان بازده اکسرژی و تخریب اکسرژی برای راکتور نیز مانند سایر اجزا با استفاده از روابط ۱۶ و ۱۷ محاسبه می‌گردد [۶].

$$w_{u\max} \cong c_v T_{fiss} \cong u_{fiss} = q_{fiss} \quad (15)$$

$$\varepsilon_R = \frac{\sum_{out} \dot{E} - \sum_{in} \dot{E}}{\dot{Q}_{fiss}} \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{fiss} + \sum_i \dot{E} - \sum_e \dot{E} = \dot{E}_D \quad (17)$$

نسبت تخریب اکسرژی ($y_{D,k}$) یا نسبت برگشت‌ناپذیری عبارت است از تخریب اکسرژی در یک جزء (k) شاخص جزء است) به اکسرژی کل سوخت نیروگاه WWER و با معادله ۱۸ ارائه می‌شود [۱۰].

$$y_{D,K} = \frac{\dot{E}_{D,K}}{\dot{E}_{F,tot}} \quad (18)$$

در این تحقیق هدف از انجام بهینه‌سازی یافتن دماها و فشارهای بهینه‌ای است که مطابق با آن‌ها مجموع تخریب اکسرژی در کل سیستم به حداقل برسد. برای این منظور تابع هدف مطابق با رابطه ۱۹ تعریف شده است.

$$Fitness = \sum \dot{E}_{D,K} \quad (19)$$

دما و فشار ۱۰ نقطه از نمودار جریان‌ها به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب شده‌اند. از آنجایی که تغییرات فشار در طول توربین‌ها و به‌تبع آن تغییرات دما در مبدل‌های حرارتی تأثیرات اساسی بر تغییرات بازده و تخریب خواهد داشت این پارامترها به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب شده‌اند. در واقع متغیرهای تصمیم‌گیری در فرایند بهینه‌سازی به حالت

معادلات بالانس انرژی، تخریب اکسرژی و بازده اکسرژی برای توربین به ترتیب مطابق با روابط ۶ تا ۸ ارائه شده است. کار توربین به‌صورت اختلاف آنتالپی‌های ورودی و خروجی از آن تعریف می‌شود و بازده اکسرژتیک آن از تقسیم مقدار کار بر اختلاف اکسرژی فیزیکی (جریان‌های ورودی و خروجی از آن محاسبه می‌گردد. مطابق رابطه ۸ میزان تخریب اکسرژی (\dot{E}_D) توربین نیز با در دست داشتن اکسرژی جریان‌ها و کار توربین قابل محاسبه است [۶].

$$\dot{w}_t = (\dot{w}_u)_t = \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_e \dot{m}_e h_e \quad (6)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\dot{w}_t}{\sum_i \dot{E}_i - \sum_e \dot{E}_e} \quad (7)$$

$$\sum_i \dot{E}_{in} - \sum_e \dot{E}_{out} = \dot{w}_T + \dot{E}_D \quad (8)$$

معادلات بالانس انرژی، تخریب اکسرژی و بازده اکسرژی برای مبدل‌های حرارتی نیز به ترتیب مطابق با روابط ۹ تا ۱۱ تعریف می‌شوند. مبدل‌های حرارتی وظیفه انتقال حرارت بین دو جریان غیر هم‌دما را به عهده‌دارند و در طول انتقال حرارت کار انجام‌شده توسط این اجزا مطابق رابطه ۹ برابر با صفر است.

$$\dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e = 0 \quad (9)$$

بازده اکسرژی مبدل‌ها بر طبق رابطه ۱۰ از تقسیم اختلاف اکسرژی فیزیکی جریان‌های گرم شونده بر اختلاف اکسرژی فیزیکی جریان‌های گرم‌کننده موجود در مبدل به دست می‌آید. میزان تخریب اکسرژی (\dot{E}_D) برای این اجزا نیز برابر با اختلاف اکسرژی فیزیکی جریان‌های ورودی و خروجی از آن است [۷].

$$\varepsilon = \frac{\Delta \dot{E}_{stream.to.be.heated}}{\Delta \dot{E}_{stream.used.for.heating}} \quad (10)$$

$$\sum_i \dot{E}_{in} - \sum_e \dot{E}_{out} = \dot{E}_D \quad (11)$$

پمپ‌ها برخلاف توربین‌ها به‌عنوان مصرف‌کننده کار در یک نیروگاه به شمار می‌روند و روابط بالانس انرژی، تخریب اکسرژی و بازده اکسرژی برای آن‌ها به ترتیب مطابق با روابط ۱۲ تا ۱۴ تعریف می‌گردد.

$$\dot{w}_p = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e \quad (12)$$

انرژی حرارتی، یک روش پایدار جهت تولید آب شیرین محسوب می‌گردد. در سال‌های اخیر به‌کارگیری این روش با کاهش مستمر هزینه‌های فناوری‌های انرژی تجدید پذیر از جذابیت اقتصادی بیشتری برخوردار گردیده است [۱۶]. راکتورهای اتمی می‌توانند انرژی موردنیاز را برای آب‌شیرین‌کن‌های با تکنولوژی‌های حرارتی مانند تقطیر فلش چندمرحله‌ای (MSF) یا تقطیر چند اثر (MED) و تکنولوژی‌های مبتنی بر غشاء مانند اسمز معکوس (RO) تأمین کنند. در زمینه اتصال ایمن واحدهای آب‌شیرین‌کن به راکتورهای هسته‌ای دپارتمان فیزیک هسته‌ای عمومی، به نمایندگی از آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، شبیه‌ساز DEEP را به‌عنوان نرم‌افزاری برای آنالیز اقتصادی و پیش‌بینی هزینه نهایی تولید آب شیرین ارائه داده است. در این شبیه‌ساز اتصال واحد آب‌شیرین‌کن به نیروگاه هسته‌ای از طریق یک مدار میانی فراهم می‌گردد که این مدار شامل یک مبدل حرارتی و یک مخزن فلش برای تبخیر آب گرم است و برای حفظ ایمنی در شرایط خاص، باید امکان جدایش سریع مدار شیرین‌سازی از نیروگاه از طریق عملکرد سریع یک شیر اتفاق بیفتد. در این تحقیق تکنولوژی تقطیر چندمرحله‌ای به همراه ترموکمپرسور به دلیل دارا بودن راندمان بالا در بین روش‌های حرارتی برای اتصال به نیروگاه هسته‌ای بوشهر انتخاب شده است. پارامترهای موردنیاز برای شبیه‌سازی این واحد توسط دیپ در جدول ۶ گزارش شده‌اند.

جدول ۶ مشخصات واحد آب‌شیرین‌کن

مقادیر	مشخصات واحد
تقطیر چند مرحله‌ای به همراه ترموکمپرسور	نوع تکنولوژی شیرین‌سازی
۲۴۰۰۰	ظرفیت شیرین‌سازی (m ³ /day)
۲۵	دمای آب‌شور (°C)
۷۰	بیشینه دمای آب ورودی به سیستم شیرین‌سازی (°C)
۳۵۰۰۰	کل مواد جامد محلول در آب‌شور (PPm)
۲۵	کل مواد جامد محلول در آب شیرین (PPm)
۲/۵	میانگین افت دما بین افکت‌های واحد شیرین‌سازی (°C)
۲	میانگین افت دمای بخار در لوپ میانی (°C)

۵- نتایج و بحث

پس از کد نویسی معادلات بالانس انرژی و اکسرژی در متلب مقادیر بازده اکسرژی، تخریب اکسرژی و نسبت تخریب اکسرژی برای هر مؤلفه نیروگاه محاسبه شده و نتایج به‌دست‌آمده برای تحلیل انرژی و اکسرژی به‌طور مجزا در جدول ۷ و جدول ۸ گزارش شده‌اند. مطابق با نتایج بیشترین میزان برگشت‌ناپذیری (تخریب اکسرژی) با مقدار MW ۱۵۱/۵۰ در ابتدا به راکتور و

ترمودینامیکی این نقاط در مدار دوم اختصاص داده شده‌اند. در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های حرارتی، شناسایی دو نوع متغیر مستقل مناسب است. این متغیرها، متغیرهای تصمیم و پارامترهای عملیاتی هستند. متغیرهای تصمیم ممکن است در روند بهینه‌سازی ثابت شوند. تمام متغیرهای دیگر متغیرهای وابسته هستند و مقادیر آن‌ها از متغیرهای مستقل با استفاده از مدل ترمودینامیکی محاسبه می‌گردد [۷]. محدوده دما و فشار برای متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب شده در طول فرآیند بهینه‌سازی در جدول ۵ گزارش شده است. با تغییر مقادیر این متغیرها به طور مکرر در طول فرآیند بهینه‌سازی معادلات بالانس انرژی و اکسرژی که در این بخش برای تمامی اجزای نیروگاه معرفی شدند حل شده و مقادیر تخریب اکسرژی و بازده اکسرژی برای هر مولفه از نیروگاه محاسبه می‌گردد. برای مثال با تغییر دما و فشار جریان شماره ۸ و ۹ و به دنبال آن تغییر آنتالپی و آنترپی این دو جریان اکسرژی این جریان‌ها مطابق با رابطه ۵ و کار توربین پرفشار مطابق با رابطه ۶ محاسبه می‌گردد؛ سپس با معلوم بودن میزان کار توربین و اکسرژی جریان‌های ورودی و خروجی از آن میزان بازده اکسرژی و تخریب اکسرژی به ترتیب مطابق با روابط ۷ و ۸ برای این جزء محاسبه می‌گردد. مجموع تخریب اکسرژی تمام مولفه‌ها نیز تابع هدف را تشکیل می‌دهد. با محاسبه تخریب اکسرژی برای تمام اجزاء به همین ترتیب تابع هدف در هر اجرای الگوریتم محاسبه می‌گردد و زمانی که کمترین مقدار ممکن برای این تابع حاصل شود الگوریتم متوقف می‌گردد.

جدول ۵ محدوده دما و فشار برای متغیرهای تصمیم‌گیری

متغیرهای تصمیم‌گیری	کران پایین	کران بالا
فشار جریان شماره ۸ (bar)	۲۴/۷۰	۲۵/۲۰
فشار جریان شماره ۹ (bar)	۱۰/۰۰	۱۶/۰۰
فشار جریان شماره ۱۷ (bar)	۱/۸۰	۲/۳۰
فشار جریان شماره ۱۸ (bar)	۰/۷۰	۱/۱۰
فشار جریان شماره ۱۹ (bar)	۰/۲۵	۰/۳۶
دمای جریان شماره ۲۵ (°C)	۵۶/۰۰	۶۸/۰۰
دمای جریان شماره ۲۸ (°C)	۷۸/۰۰	۹۷/۰۰
دمای جریان شماره ۳۱ (°C)	۱۰۳/۰۰	۱۱۵/۰۰
دمای جریان شماره ۳۶ (°C)	۱۶۰/۰۰	۱۶۶/۰۰
دمای جریان شماره ۴۲ (°C)	۲۱۷/۰۰	۲۲۳/۵۰

پس از انجام عملیات بهینه‌سازی توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری با مشخص شدن دماها و فشارهای بهینه یک واحد آب‌شیرین‌کن (MED-TVC) در نرم‌افزار دیپ طراحی شده و پس از اتصال به نیروگاه هزینه تولید آب شیرین در شرایط بهینه نیروگاه برآورد می‌شود.

۴- نمک‌زدایی با استفاده از تکنولوژی هسته‌ای

نمک‌زدایی آب با استفاده از راکتورهای هسته‌ای به‌عنوان منبع

کار برگشت پذیر (MWt)	کار واقعی (MWt)	اجزای نیروگاه
-۳/۸۷	-۱۰/۷۷	پمپ آب تغذیه
-۰/۰۳	-۰/۵۵	پمپ شماره ۱
-۰/۰۵	-۱/۶۷	پمپ شماره ۲
-۰/۰۳	-۰/۱۹	پمپ شماره ۳
-۰/۱۴	-۰/۳۵	پمپ شماره ۴

جدول ۸ نتایج حاصل از تحلیل اکسرژی

نرخ برگشت ناپذیری (%)	بازده اکسرژی (%)	تخریب اکسرژی (MWt)	اجزای نیروگاه
مدار اول			
۵۰/۳۱	۴۹/۶۵	۱۵۱۰/۵۰	راکتور
۴/۸۸	۹۱/۱۷	۱۴۴/۵۰	ژنراتور بخار
۰/۱۸	۹۹/۵۰	۵/۰۳	پمپ خنک کننده راکتور
بخش تولید توان			
۲/۲۲	۹۵/۶۳	۶۶/۴۴	توربین فشار بالا
۳/۸۹	۸۷/۱۲	۱۱۸/۹	توربین فشار پایین
۰/۷۴	۷۳/۲۸	۲۳/۸۷	ری هیتر
۰/۱۷	۹۴/۹۱	۵/۵۶	جداساز رطوبت
بخش کندانس			
۱/۷۶	-	۵۵/۸۰	کندانسور
پیش گرم کن ها			
۰/۱۷	۶۱/۶۸	۵/۴۱	پیش گرم کن فشار پایین ۱
۰/۱۲	۷۸/۰۶	۳/۶۴	پیش گرم کن فشار پایین ۲
۰/۱۳	۸۳/۷۳	۴/۹۱	پیش گرم کن فشار پایین ۳
۰/۳۶	۸۳/۹۰	۱۲/۵۳	پیش گرم کن فشار پایین ۴
۰/۱۲	۹۶/۱۱	۳/۶۷	پیش گرم کن فشار بالا ۵
۰/۰۴	۴۹/۶۵	۱/۵۷	کولر
۰/۰۵	۸۵/۵۹	۱/۴۵	ری هیتر کولر
۰/۰۳۳	-	۱/۳۵	دی اریتور
۰/۲۱	۹۶/۸۵	۶/۹۰	پمپ آب تغذیه
۰/۰۲	۶۰/۷۴	۰/۵۲	پمپ شماره ۱
۰/۰۴	۹۱/۶۲	۱/۶۲	پمپ شماره ۲
۰/۰۰۴	۹۳/۱۲	۰/۱۵۴	پمپ شماره ۳
۰/۰۰۵	۹۹/۴۰	۰/۲۱	پمپ شماره ۴

سپس با MW ۱۴۴/۵۰ به ژنراتور بخار تعلق دارد. در واقع تقریباً نیمی از اکسرژی سوخت در راکتور تخریب می گردد. میزان بالای تخریب اکسرژی در راکتور به دلیل بالا بودن دمای واکنش شکافت و افزایش بازگشت ناپذیری فرآیند شکافت می باشد. کمترین میزان تخریب اکسرژی نیز در هوازدا و پمپ ها رخ می دهد. راندمان اکسرژی و تخریب اکسرژی اجزاء به ترتیب در شکل ۲ و شکل ۳ مقایسه شده اند. پرواضح است که مؤلفه هایی با میزان تخریب کمتر بازده بالاتری دارند. راندمان اکسرژی پمپ ها در مقایسه با پیش گرم کن های آب تغذیه بالاتر و به تبع آن تخریب اکسرژی در آن ها پایین تر است؛ زیرا کار مکانیکی انجام شده توسط پمپ ها اتلاف حرارتی کمتری را نسبت به انتقال حرارت توسط پیش گرم کن ها ایجاد می کند. نکته قابل توجه دیگر در این دو نمودار بالا بودن میزان بازده برای هوازدا نسبت به سایر گرم کن های آب تغذیه می باشد. دلیل بالا بودن این مقدار کاهش میزان اتلاف حرارت به دلیل تماس مستقیم جریان ها در این جزء است؛ زیرا تماس مستقیم جریان ها اتلافات حرارتی سطحی را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. برای صحت سنجی کد نوشته شده از مقایسه نتایج به دست آمده از کد با نتایج عملیاتی در جدول ۹ استفاده شده است. همان گونه که مشخص است میزان خطای مقادیر تئوری با مقادیر عملیاتی برای تمامی پارامترهای مورد مقایسه کمتر از ۲ درصد می باشد.

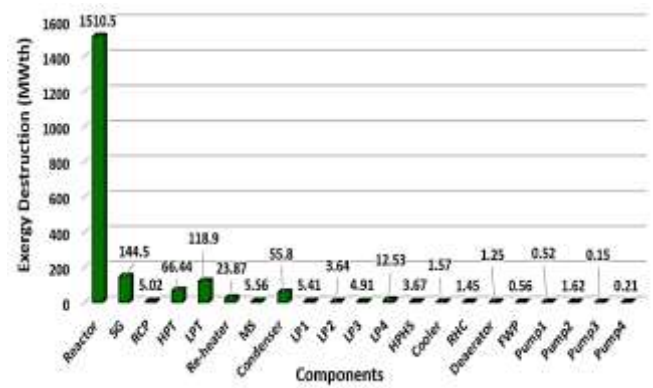
جدول ۷ نتایج حاصل از تحلیل انرژی

کار برگشت پذیر (MWt)	کار واقعی (MWt)	اجزای نیروگاه
مدار اول		
۳۰۰۱/۸۰	۱۴۹۱/۳۰	راکتور
۱۵/۰۵	۰	ژنراتور بخار
-۵/۱۲	-۱۰/۱۵	پمپ خنک کننده راکتور
بخش تولید توان		
۴۹۲/۹۵	۴۲۶/۵۱	توربین فشار بالا
۷۲۰/۵۲	۶۰۱/۶۲	توربین فشار پایین
۲۳/۸۷	۰	ری هیتر
۵/۲۱	۰	جداساز رطوبت
بخش کندانس		
۵۵/۸۰	۰	کندانسور
پیش گرم کن ها		
۵/۴۱	۰	پیش گرم کن فشار پایین ۱
۳/۶۴	۰	پیش گرم کن فشار پایین ۲
۴/۹۱	۰	پیش گرم کن فشار پایین ۳
۱۲/۵۳	۰	پیش گرم کن فشار پایین ۴
۳/۶۷	۰	پیش گرم کن فشار بالا ۵
۱/۵۷	۰	کولر
۱/۴۵	۰	ری هیتر کولر
۱/۳۵	۰	دی اریتور

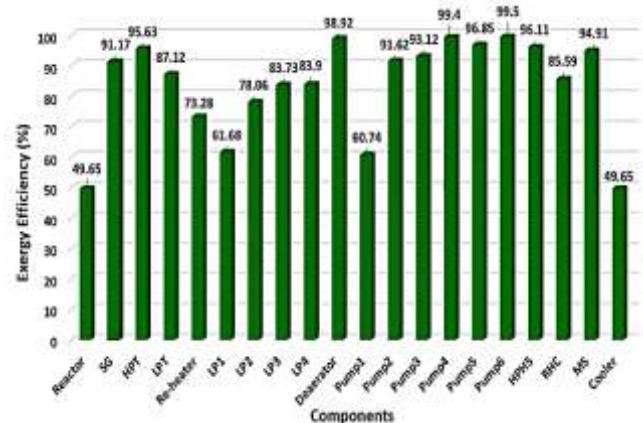
۱۹۶۹/۵۱ MW است. مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری و مقدار تابع هدف حاصل از این متغیرها برای ۲ اجرای برتر الگوریتم GWO در جدول ۱۰ گزارش شده است. در شکل ۴ نیز نحوه کاهش تابع هدف در ۱۰۰ تکرار متوالی برای ۱۰ اجرای برتر در نمودارهای مجزا نشان داده شده است. به‌عنوان مثال در اجرای نمودار GWO1 ابتدا الگوریتم محدودهای از متغیرهای تصمیم‌گیری را انتخاب نموده است که مطابق با آنها مجموع تخریب اکسرژی بیشتر از ۱۹۶۴ است اما در تکرارهای بعدی با یافتن مقادیر بهتر میزان تخریب در هر تکرار کاهش می‌یابد تا جایی که یافتن مقادیر بهینه‌تر از تکرار ۲۲ به بعد متوقف می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که با پیاده‌سازی روش بهینه‌سازی، مجموع تخریب اکسرژی در حالت بهینه به ۱۹۴۵/۸۵ MW کاهش یافته است و با ارائه این روش می‌توان از تخریب کامل اکسرژی در نیروگاه به میزان ۲۳/۶۰ MW جلوگیری کرد.

جدول ۱۰ نتایج برتر حاصل از الگوریتم گرگ خاکستری

متغیرها	جمعیت برتر ۱	جمعیت برتر ۲
فشار جریان شماره ۸ (bar)	۲۴/۸۹۰	۲۴/۸۴۰
فشار جریان شماره ۹ (bar)	۱۳/۵۷۰	۱۱/۱۳۰
فشار جریان شماره ۱۷ (bar)	۰/۲۲۸	۰/۲۲۵
فشار جریان شماره ۱۸ (bar)	۰/۹۰۱	۰/۹۸۳
فشار جریان شماره ۱۹ (bar)	۰/۳۳۳	۰/۳۳۲
دمای جریان شماره ۲۵ (°C)	۶۱/۵۰۰	۶۴/۳۷۰
دمای جریان شماره ۲۸ (°C)	۸۲/۱۰۰	۸۰/۰۰۰
دمای جریان شماره ۳۱ (°C)	۱۰۷/۴۲۰	۱۱۵/۵۰۰
دمای جریان شماره ۳۶ (°C)	۱۶۲/۶۵۰	۱۶۲/۶۳۰
دمای جریان شماره ۴۲ (°C)	۲۲۰/۴۳۰	۲۲۲/۳۲۰
مقدار تابع هدف (MWt)	۱۹۴۵/۸۵۸	۱۹۴۵/۸۷۱



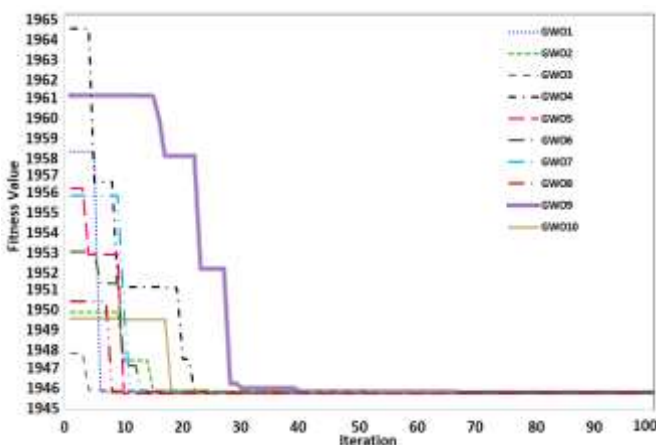
شکل ۲ تخریب اکسرژی در اجزای نیروگاه



شکل ۳ بازده اکسرژی در اجزای نیروگاه

جدول ۹ مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از کد با نتایج عملیاتی

پارامترها	مقادیر عملیاتی	مقادیر محاسبه‌شده	درصد خطا
توان حرارتی راکتور (MWt)	۳۰۱۲	۳۰۰۱/۸۰	۰/۳۴
توان خالص خروجی (MWt)	۱۰۱۹	۱۰۲۸/۱۳	۰/۸۸
کار واقعی توربین پرفشار (MWt)	۴۱۹/۸۰	۴۲۶/۵۱	۱/۵۷
کار واقعی توربین کم‌فشار ۱۸ (MWt)	۶۰۰/۱۰	۶۰۱/۶۰	۰/۲۵
بازده خالص نیروگاه (%)	۳۳/۸۳	۳۴/۲۰	۱/۰۸
حرارت خالص ورودی به کندانسور (MWt)	۲۱۵۳	۲۱۵۳/۸۳	۰/۰۳
حرارت خالص خروجی از کندانسور (MWt)	۱۹۸۱	۱۹۸۱/۲۰	۰/۰۱



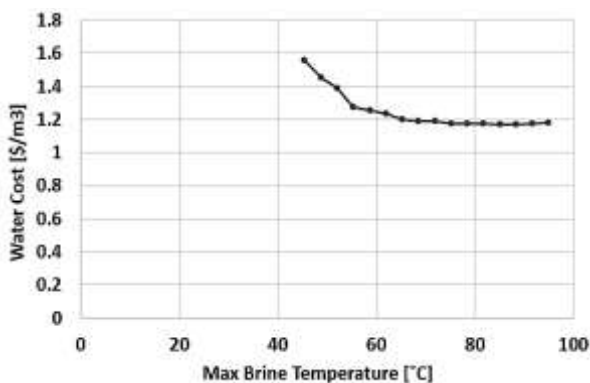
شکل ۴ مقادیر تابع هدف در هر تکرار برای نتایج برتر

پس از بهینه‌سازی، واحد آب‌شیرین‌کن MED-TVC با ظرفیت ۲۴۰۰۰ مترمکعب در روز به اولین جریان بخار خروجی از توربین فشار پایین نیروگاه متصل شده است. شکل ۵ طرح‌واره‌ای از جریان‌های ورودی و خروجی از آب‌شیرین‌کن را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است در صورتی که جریان

پس از تحلیل اکسرژی عملیات بهینه‌سازی توسط الگوریتم گرگ خاکستری انجام شده و مقادیر بهینه دما و فشار به‌دست‌آمده‌اند. مقدار تابع هدف یا همان مجموع تخریب اکسرژی در تمام مؤلفه‌های نیروگاه قبل از کمینه‌سازی برابر با

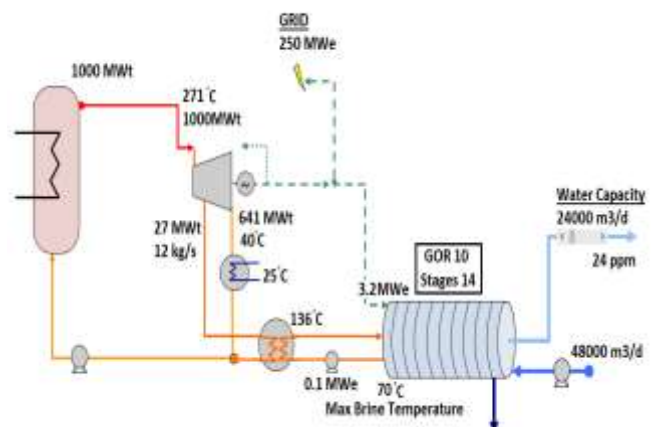
تخمین هزینه	
۱۳۰	هزینه‌های احتمالی واحد
۱۵۴	بهره هزینه در طول ساخت و ساز
۱۶۶۵	کل هزینه‌های ثابت
۰/۴۳۰	کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت سالانه
هزینه‌های عملیاتی واحد شیرین سازی (\$/m³)	
هزینه انرژی	
۰/۳۶۰	هزینه انرژی گرمایی
۰/۲۲۰	هزینه انرژی الکتریکی
۰/۵۸۰	کل هزینه انرژی
هزینه بهره‌برداری و نگهداری	
۰/۰۲۰	هزینه مدیریت
۰/۰۵۰	هزینه نیروی کار
۰/۰۷۰	هزینه مواد
۰/۰۲۰	هزینه بیمه
۰/۱۷۰	مجموع بهره‌برداری و نگهداری
۱/۱۸۰	هزینه نهایی تولید آب
کل هزینه سرمایه‌گذاری (M\$)	
۲۸۸۶	
مدت زمان برگشت سرمایه (year)	
۱۱	

شکل ۶ روند کاهش تقریبی هزینه تولید آب شیرین با افزایش دمای آب ورودی به واحد آب شیرین کن را نشان می‌دهد. افزایش دمای آب ورودی باعث می‌شود که برای یک شیرین سازی مشخص تعداد استیج‌های کمتری موردنیاز باشد بنابراین موجب کاهش هزینه‌های ثابت و عملیاتی واحد خواهد شد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشخص است مقادیر دمای بهینه برای حداقل شدن هزینه تولید آب در اطراف ۷۰ درجه وجود دارند و با افزایش دما از این میزان تغییرات نامحسوسی در کاهش هزینه ایجاد می‌گردد. شکل ۷ نیز نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت شیرین سازی می‌توان هزینه نهایی تولید آب شیرین را کاهش داد؛ این امر به سبب آن است که با افزایش ظرفیت واحد شیرین سازی هزینه‌های ثابت واحد با شیب کمتری نسبت به حالت قبل در حال افزایش خواهند بود و بنابراین در میزان هزینه نهایی تولید آب شیرین به‌طور محسوس تأثیرگذار خواهند بود؛ اما باید توجه شود که ظرفیت نهایی شیرین سازی توسط میزان مجاز برداشت حرارت از نیروگاه محدود می‌گردد. روند کلی بهینه‌سازی نیروگاه و اتصال آب شیرین کن به آن در شکل ۸ به‌صورت مرحله‌به‌مرحله نمایش داده شده است.



شکل ۶ تغییرات هزینه تولید آب شیرین با افزایش دمای آب ورودی

آب شور ورودی به آب شیرین کن دارای حداقل دمای ۷۰ درجه باشد با یک واحد با ۱۴ مرحله غلظت آب شور از ۳۵۰۰۰ PPM به ۲۵ PPM کاهش داده می‌شود. بازده یک آب شیرین کن (GOR) به صورت حاصلضرب گرمای نهان تبخیر در دبی جرمی آب شیرین تولیدی بخش بر میزان گرمای ورودی به سیستم محاسبه می‌شود. در واقع این پارامتر میزان راندمان و کارآمدی سیستم را بیان می‌کند. هرچه میزان این عدد بزرگتر از یک باشد به این معناست که انرژی کمتری به ازای تولید هر واحد آب شیرین موردنیاز است. مقدار GOR با پارامترهای طراحی برای این سیستم عدد ۱۰ است که توسط دیپ محاسبه شده است. برای انجام عملیات شیرین‌سازی انرژی معادل ۲۷ MWt موردنیاز است. این مقدار انرژی توسط ۱۲ کیلوگرم بر ثانیه از جریان شماره ۱۷ تأمین می‌گردد. همان‌طور که بیان شد محاسبه هزینه نهایی تولید آب شیرین مهم‌ترین پارامتر موردبررسی در استقرار یک سیستم بهینه تولید آب شیرین می‌باشد. پارامترهای اقتصادی بسیاری به‌طور مستقیم و غیرمستقیم در محاسبه این هزینه نقش دارند. جدول ۱۱ مقادیر این پارامترهای اساسی را نشان می‌دهد که نرم‌افزار دیپ برای محاسبه هزینه نهایی آب شیرین از آن‌ها استفاده می‌کند. این پارامترها هزینه‌های ثابت و هزینه‌های عملیاتی را پوشش می‌دهند. مطابق با جزئیات گزارش شده هزینه تولید هر مترمکعب آب ۱/۱۸ دلار تخمین زده شده است. این در حالی است که قیمت تولید هر مترمکعب آب توسط سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ تا ۱/۷۸ دلار به ازای مترمکعب نیز گزارش شده است [۱۷]. حتی در سیستم‌های بهینه‌شده چندمنظوره شامل صفحات خورشیدی، توربین بادی و سیستم تولید آب شیرین؛ هزینه تولید آب تا ۳/۰۸ دلار به ازای مترمکعب برآورد شده است [۱۸].



شکل ۵ طرح‌واره‌ای از جریان‌های ورودی و خروجی از واحد آب شیرین کن

جدول ۱۱ پارامترهای اصلی تخمین هزینه تولید آب شیرین

تخمین هزینه	
۱۱۷۷	هزینه ساخت واحد
۶۵	هزینه ساخت لوپ میانی
۷۷	هزینه جریان‌های ورودی / خروجی
۶۲	هزینه‌های مالکیت واحد

۶- نتیجه گیری

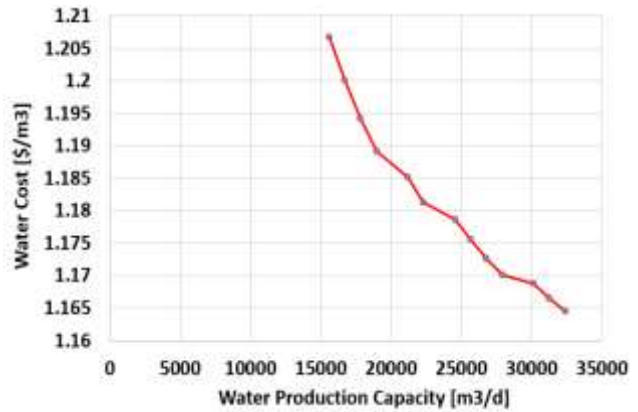
در این مقاله، با انتخاب حجم کنترل مناسب برای نیروگاه هسته‌ای بوشهر، سیکل نیروگاه از نظر قانون اول و دوم ترمودینامیک برای استفاده دو منظوره در جهت تولید آب شیرین تحلیل شده است. محاسبات انجام شده برای میزان تخریب اکسرژی و بازده هر مؤلفه از نیروگاه نشان دادند که بیشترین میزان اتلاف اکسرژی در نقاطی مانند قلب راکتور رخ می‌دهد که دمای واکنش در آن‌ها بسیار بالاست. روش بهینه‌سازی ارائه شده در این تحقیق یکی از قدرتمندترین ابزار جست‌وجوی غیر-مستقیم برای یافتن پارامترهای بهینه در علوم مهندسی به شمار می‌رود. نتایج بهینه‌سازی نشان دادند که با یافتن دماها و فشارهای بهینه با استفاده از این روش جست‌وجو می‌توان از حدود ۲۳/۶۰ MW تخریب در کل سیکل نیروگاه جلوگیری کرد. این مقدار با توجه به طول عمر یک نیروگاه هسته‌ای رقمی قابل توجه در افزایش بهره‌وری نیروگاه‌های دو منظوره است. علاوه بر این؛ تولید آب شیرین با حداقل هزینه به عنوان یکی از مزایای بسیار مهم این سیستم‌ها می‌تواند نویدبخش غلبه بر مشکل عدم دسترسی به آب شیرین به ویژه در مناطق جنوبی کشور باشد و استفاده از انرژی هسته‌ای به عنوان یک منبع پایدار در سیستم‌های دو منظوره می‌تواند در چشم‌انداز آینده جایگزینی مناسب برای منابع فسیلی تلقی گردد.

۷- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی	
EX	اکسرژی (J/kg)
H	آنتالپی (J/kg)
S	آنتروپی (J/kg)
u	انرژی درونی (J/kg)
D,K	تخریب اجزاء
ED	تخریب اکسرژی (J/kg)
F,K	جریان در اجزاء
out	خروجی
m	دبی جرمی (kg/s)
T	دما ($^{\circ}C$)
fiss	شکافت
0	شرایط مرجع
C	ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg \cdot ^{\circ}C$)
P	فشار (bar)
W	کار (J)
q	گرما (j)
y	نرخ بازگشت‌ناپذیری
in	ورودی

۸- مراجع

- [1] Sadekin S., Zaman S., Mahfuz M. and Sarkar R., Nuclear power as foundation of a clean energy future: A review. *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 513-518, (2019).



شکل ۷ تغییرات هزینه تولید آب شیرین با افزایش ظرفیت واحد شیرین سازی



شکل ۸ فلوچارت روند بهینه‌سازی و اتصال آب شیرین کن

- system with thermo-vapor compressor (MED-TVC). *Energy*, vol. 35(5), pp. 1981-1996, (2010).
- [11] Wilding P.R., Murray N.R. and Memmott, M.J., The use of multi-objective optimization to improve the design process of nuclear power plant systems. *Annals of Nuclear Energy*, vol. 137, p. 107079, (2020).
- [12] Ebrahimgol H., Aghaie M., Zolfaghari A. and Naserbegi A., A novel approach in exergy optimization of a WWER1000 nuclear power plant using whale optimization algorithm. *Annals of Nuclear Energy*, vol. 145, p. 107540, (2020).
- [13] Sezer KS, Bayhan N. Comparison of Metaheuristic Algorithm Performances for Optimization of Fractional Order PID Controllers Applied to Gas Turbine Power Plant. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*. vol. 30, 14(2), pp. 209-19, (2021).
- [14] Eltamaly AM. A novel strategy for optimal PSO control parameters determination for PV energy systems. *Sustainability*, vol. 13, pp. 1008, (2021).
- [15] Naserbegi A., Aghaie M. and Zolfaghari A., Implementation of Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm to multi-objective loading pattern optimization of a PWR reactor. *Annals of Nuclear Energy*, vol. 148, p. 107703, (2020).
- [16] Mukhtar A, Saqib S, Ullah S, Sagir M, Tahir MB, Mahmood A, Al-Sehemi AG, Assiri MA, Ibrahim M, Ali A. Nuclear Desalination. *In Sustainable Materials and Systems for Water Desalination*, pp. 121-135, (2021).
- [17] Rezaei A., Naserbeagi A., Alahyarizadeh G. and Aghaie M., Economic evaluation of Qeshm island MED-desalination plant coupling with different energy sources including fossils and nuclear power plants. *Desalination*, vol. 422, pp. 101-112, (2017).
- [18] Makkeh, S. A., Ahmadi, A., Esmailion, F., & Ehyaei, M. A. Energy, exergy and exergoeconomic optimization of a cogeneration system integrated with parabolic trough collector-wind turbine with desalination. *Journal of Cleaner Production*, vol. 273, pp. 123122, (2020).
- [2] Ağbulut Ü., Ceylan İ., Gürel A.E. and Ergün A., The history of greenhouse gas emissions and relation with the nuclear energy policy for Turkey. *International Journal of Ambient Energy*, pp. 1-9, (2019).
- [3] Veselov F.V. and Khorshev A.A., Optimal Scale of Development of Nuclear Energy in the UES of Russia to 2050. *Atomic Energy*, vol. 128(5), pp. 259-264, (2020).
- [4] Zhiznin S.Z., Timokhov V.M. and Gusev A.L., Economic aspects of nuclear and hydrogen energy in the world and Russia. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45(56), pp. 31353-31366, (2020).
- [5] Maronati G. and Petrovic B., Estimating cost uncertainties in nuclear power plant construction through Monte Carlo sampled correlated random variables. *Progress in Nuclear Energy*, vol. 111, pp.211-222, (2019).
- [6] Naserbegi A., Aghaie M., Minucmehr A. and Alahyarizadeh G., A novel exergy optimization of Bushehr nuclear power plant by gravitational search algorithm (GSA). *Energy*, vol. 148, pp. 373-385, (2018).
- [7] Sayyaadi H. and Sabzaligol T., Exergoeconomic optimization of a 1000 MW light water reactor power generation system. *International Journal of Energy Research*, vol. 33(4), pp. 378-395, (2009).
- [8] Zargan J. and Waez-Mousavi S.M., Water crisis in Iran: its intensity, causes and confronting strategies. *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9(44), pp.1-6, (2016).
- [9] Sadeghi K., Ghazaie S.H., Fedorovich E.D., Sokolova E.A. and Shirani, A.S., Economic Assessment of the Possible Desalination Processes for the First Unit of Bushehr Nuclear Power Plant. *Thermal Engineering*, vol. 67(5), pp. 271-281, (2020).
- [10] Ansari K., Sayyaadi H. and Amidpour M., Thermoeconomic optimization of a hybrid pressurized water reactor (PWR) power plant coupled to a multi effect distillation desalination