



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

سال چهل و پنج، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۲، صفحه ۹۳ تا ۱۰۸  
Vol. 45, No.1, Summer 2013, pp. 93-108



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)  
(AJSR - ME)

## بهینه‌سازی چند هدفه بازتوانی به روش گرمایش آب تغذیه موازی یک نیروگاه بخار بوسیله الگوریتم ژنتیک

عبدالله مهرپناهی<sup>۱</sup>، سید مصطفی حسینعلی‌پور<sup>۲\*</sup>، سوران سیجانپوندی<sup>۳</sup>

۱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۲ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران

۳ دانشجوی کارشناسی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت ۱۳۹۰/۱/۳۰، پذیرش ۹۱/۸/۶)

### چکیده

افزودن واحد(های) توربین گاز به نیروگاه‌های بخار برای ارتقاء خصوصیات سیکل بخار و امکان بازیاب حرارت از سیکل(های) الحاقی به عنوان بازتوانی شناخته شده است. روش‌های بازتوانی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند، روش‌های بازتوانی جزئی ۱ و کلی ۲. یکی از روش‌های جدید بازتوانی جزئی، روش گرمایش آب تغذیه موازی ۳ است. در این مقاله با توجه به خصوصیات ممتاز روش گرمایش آب تغذیه موازی برای نیروگاه‌های نسبتاً جدید، به اعمال آن بر نیروگاه شهید رجایی پرداخته شده است. تابع هزینه برق تولیدی و راندمان آگزرژی بعنوان توابع هدف در انجام بهینه‌سازی تک هدفه و دوهدفه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بهینه‌سازی توسط روش الگوریتم ژنتیک ۴ انجام شده و دبی بخارات زیرکشی‌ها و خط اصلی ۶ بعنوان متغیرهای مستقل مد نظر بوده‌اند. در پایان با توجه به شاخصهای مطلوب فنی و اقتصادی، حالت ۴ زیرکشی برای اعمال این روش انتخاب شده است. طرح انتخابی برای حالت توربین گاز توان ثابت، هزینه برق تولیدی  $404/15 \text{ Rial/kWh}$  (به ازای توان افزوده) و ارتقاء  $1/55\%$  راندمان آگزرژی و برای حالت توربین گاز وابسته، هزینه تولید  $396/22 \text{ Rial/kWh}$  (به ازای توان افزوده) و ارتقاء  $1/73\%$  راندمان آگزرژی سیکل جدید را داشته است.

### کلمات کلیدی

بازتوانی، روش گرمایش آب تغذیه موازی، نیروگاه بخار، توربین گاز

\* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: alipour@iust.ac.ir

## ۱- مقدمه

ارتقاء سیستم‌های انرژی از نظر کیفیت محصولات تولیدی از مواردی است که با توجه اهمیت روزافزون منابع انرژی، پیوسته مد نظر محققان بوده است. خصوصیات مطلوب فنی و اقتصادی در عملکرد این سیستم‌ها از موارد جذاب در صنایع مختلف برای پاسخگویی به نیاز بازار و افزایش میل به سرمایه‌گذاری در این بخش‌ها است. نیروگاه‌های برق از ارکان اساسی تولید و از سیستم‌های استراتژیک انرژی در هر کشور به شمار می‌آیند. در این میان نیروگاه‌های حرارتی بخش قابل ملاحظه‌ای از ناوگان تولید برق در بسیاری از کشورها بشمار می‌آیند تا جاییکه در ایران حدود ۸۵٪ از برق تولیدی بوسیله این نیروگاه‌ها تامین می‌شود. از مهم‌ترین بخش‌های ناوگان تولید برق در میان نیروگاه‌های حرارتی کشور، نیروگاه‌های بخار هستند که با وجود تغییر رویه صنعت برق کشور در ایجاد این دسته از نیروگاه‌ها، حدود ۳۰ درصد از توان مورد نیاز کشور از آنها فراهم می‌شود [۱]. در حال حاضر تعداد قابل توجهی از نیروگاه‌های بخار با وجود عمر نه چندان زیاد، دارای راندمان قابل قبولی نیستند. از جمله کارهایی که در زمینه بهبود وضعیت تولید نیروگاه‌های بخار و بالا بردن راندمان آنها می‌تواند مورد توجه قرار بگیرد، بررسی انجام عملیات بازتوانی و اثر آن بر روی این نیروگاه‌ها است. بازتوانی به دو روش کلی انجام می‌شود، بازتوانی کامل و بازتوانی جزئی. بازتوانی کامل، به تبدیل نیروگاه موجود به یک نیروگاه سیکل ترکیبی گفته می‌شود که در آن بویلر موجود با یک بویلر بازیاب حرارت و توربین(های) گاز جایگزین می‌شود. اغلب نیروگاه‌هایی برای انجام این عملیات مد نظر قرار می‌گیرند که دارای عمر بالای ۲۵ سال باشند [۲و۷]. روش‌های بازتوانی جزئی نیز به سه صورت انجام می‌شود که این روشها عبارتند از:

۱. روش جعبه هوای داغ: این روش با افزودن توربین(های) گاز به واحد موجود و فرستادن گازهای خروجی از توربین گاز به جعبه هوای داغ بویلر موجود انجام می‌شود. نیروگاه‌های مدنظر برای انجام این روش، نیروگاههای جدید، مدرن و ترجیحا بزرگتر هستند [۲و۸و۹].

۲. روش گرمایش آب تغذیه: در این روش از هوای خروجی از توربین گاز برای گرمایش آب تغذیه بویلر موجود استفاده می‌شود. نیروگاه‌های مناسب برای انجام این روش همان نیروگاه‌های مناسب برای روش جعبه هوای داغ هستند [۲و۸و۹].

۳. روش بویلر کمکی: این روش شامل افزودن مجموعه توربین(های) گاز و بویلر کمکی به واحد موجود است بدون آنکه بویلر موجود برداشته شود. بویلر بازیاب حرارت می‌تواند به شکل‌های مختلفی به سیکل موجود اضافه شود. این حالتها با توجه

به مسیر گازهای خروجی توربین گاز از بویلر بازیاب و مسیر بخار خروجی از بویلر بازیاب قابل تقسیم‌بندی است [۷و۹]:  
مسیر گازهای خروجی توربین گاز از بویلر بازیاب:

- ۱- به سمت بویلر موجود
- ۲- به خارج از بویلر

مسیر بخارخروجی از بویلر بازیاب:

- ۱. به سمت توربینهای بخار فشار بالا و فشار پایین
- ۲. به سمت توربینهای بخار فشار بالا و متوسط
- ۳. به سمت توربین بخار فشار بالا و بازگرمایش بخار تحویلی به توربین فشار متوسط

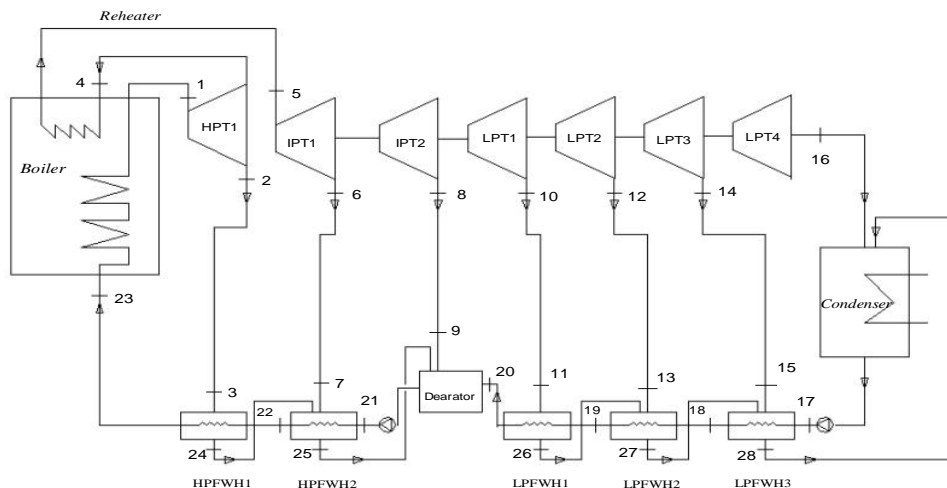
بازتوانی به این روش ممکن است با استفاده دو بویلر بازیاب نیز انجام شود [۹].

یکی از روش‌های بازتوانی جزئی روش گرمایش آب تغذیه است. ویژگی‌های فنی-اقتصادی از جمله سادگی و انعطاف‌پذیری، کم هزینه بودن و در پایان قیمت واحد برق تولیدی پایین تر را می‌توان از مزیت‌های برتر روش گرمایش آب تغذیه نسبت به سایر روشهای بازتوانی جزئی برشمرد [۱۰]. برای اعمال هر کدام از روشهای بازتوانی یک سری از محدودیتهای فنی وجود خواهد داشت. حداقل عمر باقیمانده ۱۵ سال تجهیزات اصلی نیروگاه مورد بررسی و نیز اولویت انجام این روشها در نیروگاه‌های جدیدتر و بزرگتر از این محدودیتها بشمار می‌آیند [۲و۸و۹]. نیروگاه شهید رجایی با توجه به خصوصیات بیان شده و نیز با در نظر گرفتن اهمیت آن، چه از لحاظ میزان توان تولیدی و نیز موقعیت قرارگیری، مستعد اعمال روشهای مختلف بازتوانی جزئی است. در این نیروگاه با توجه به فضای موجود در بخش شرقی واحدهای بخار، امکان احداث واحدهای توربین گاز در محدوده مناسب برای انجام بازتوانی جزئی مورد بررسی قرار گرفته است. مدلسازی نیروگاه موجود با توجه به مدارک و در بار نامی انجام شده است [۳]. برای انجام مدل‌سازی از نرم‌افزار "ای ای اس" استفاده شده است. در مرحله بعد، توابع هدف راندمان انرژی و هزینه هر کیلووات ساعت برق تولیدی برای اعمال در سیکل بازتوانی معرفی می‌شوند. برای انجام عملیات بازتوانی، بهترین حالت فنی-اقتصادی ممکن برای تعیین مشخصات متغیرهای حرارتی موازی، مورد بحث قرار خواهد گرفت. شرایط کلی برای ایجاد بهترین حالت‌های موجود در تعیین مقادیر زیرکشیها برای ارتقاء خصوصیات فنی و اقتصادی سیکل توسط

محققان داخلی قرار گرفته است [۱۱ و ۲۰] اما بررسی پارامتری مشخصه‌های فنی و اقتصادی سیکل بازتوانی در شکل موازی آن بر روی نیروگاه‌های بخار که کارکرد مناسب آنها در موارد جدید انجام بازتوانی به اثبات رسیده است، کمتر مورد توجه بوده است (بخصوص در مورد بکارگیری روش‌های بهینه‌سازی مانند روش الگوریتم ژنتیک تحقیقات قابل ملاحظه‌ای صورت نپذیرفته است). چنانچه هدف نیروگاه بالا بردن مقدار مشخصی از توان تولیدی باشد، روش گرمایش آب تغذیه موازی یکی از بهترین گزینه‌های موجود با در نظر گرفتن شرایط آن در اعمال تغییرات خواهد بود. زیرا می‌توان از حرارت گازهای خروجی توربین گاز به بهترین شکل ممکن برای بالا بردن توان و راندمان سیکل موجود استفاده نمود. در کد نوشته شده توان توربین گاز به دو صورت مورد بررسی قرار گرفته است:

- ۱- به عنوان متغیری وابسته از میزان کاهش زیرکشی‌ها برای دستیابی به بهترین حالت موجود
- ۲- توربینی با توان ثابت

اعمال روش الگوریتم ژنتیک تعیین شده است. حالت مطلوب از میان موارد ممکن با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در سیکل موجود برای اعمال این روش تعیین شده و با توجه به مقادیر کاسته شده زیرکشی‌ها، به جایگزینی گرمکن‌های آب تغذیه موجود با گرمکن‌های کوچکتر اقدام شده است. گرمایش بخش دیگر جریان آب تغذیه بوسیله مبدل‌های حرارتی انجام شده است. مبدل‌های حرارتی افزوده شده به سیکل برای گرمایش آب تغذیه از گرمای گازهای داغ خروجی از توربین(های) گاز استفاده می‌نمایند. در تحلیل انجام شده، مقادیر بخارات گذرنده از زیرکشی‌ها و دبی بخارات خروجی از بویلر بعنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده و توابع هدف (چه در حالت تک هدفه چه در حالت دو هدفه) توسط این تغییرات بهینه خواهند شد. در پایان با توجه به حالت‌های موجود و توانایی سیکل برای ارتقاء خصوصیات فنی-اقتصادی، در چند حالت ممکن به تعیین بهینه-ترین حالت در سیکل جدید پرداخته شده است. اگرچه روش گرمایش آب تغذیه به عنوان یکی از روش‌های موثر و قابل قبول در انجام بازتوانی جزیی در طی سال‌های اخیر مورد توجه



شکل (۱): طرح کلی نیروگاه شهید رجایی

## ۲- معرفی نیروگاه بخار

نیروگاه از نوع واتر تیوپ، سیرکوله طبیعی و درامدار بوده که دارای ده جفت مشعل است. از گاز طبیعی به عنوان سوخت اول بویلر موجود استفاده می‌شود و مازوت سوخت دوم آن محسوب می‌شود. قدرت نامی ژنراتور این نیروگاه ۳۱۲/۵ مگاوات آمپر و از نوع دیود گردان بدون زغال است. طرح نیروگاه موجود توسط شرکت میتسوبیشی داده شده است. سیکل نیروگاه موجود در شکل (۱) نشان داده شده است. مشخصات ترمودینامیکی نقاط مختلف سیکل نیز در جدول (۱) آورده شده است. سیکل مدل-سازي شده با توان ۲۵۰ مگاواتی و در نظر گرفتن مصارف داخلی آن دارای راندمان انرژی ۳۵/۱۶٪ است. در محاسبات، راندمان مکانیکی و الکتریکی ژنراتور ۹۹٪ در نظر گرفته شده است.

نیروگاه بخار شهید رجایی شامل ۴ واحد بخار ۲۵۰ مگاواتی در استان قزوین و در کیلومتر ۲۵ اتوبان قزوین-تهران واقع شده است (شکل (۱)). این نیروگاه دارای ۷ توربین بخار از نوع عکس-عملی و عکس‌عملی ضربه‌ای است که ۴ عدد از آنها به عنوان توربین فشار ضعیف، ۲ عدد از آنها به عنوان توربین فشار متوسط و یکی نیز توربین فشار قوی به شمار می‌آید. چگالنده سیستم دارای فشار ۰/۰۲ مگاپاسکال بوده، همچنین برج خنک کن از نوع خشک (هلر) انتخاب شده است. از دیگر اجزای سیکل مورد نظر می‌توان به یک دی اریتور، دو عدد گرمکن آب تغذیه فشار قوی و سه عدد گرمکن آب تغذیه فشار ضعیف اشاره نمود. بویلر

مقایسه نتایج مدلسازی با مقادیر داده‌های نیروگاه در جدول (۲)  
 نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات ترمودینامیکی نقاط مختلف مدلسازی سیکل نیروگاه شهید رجایی [۳]

نقاط	فشار (مگاپاسکال)	دما (کلوین)	دبی (کیلوگرم بر ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول بر کیلوگرم)	آنتروپی (کیلوژول بر کیلوگرم درجه کلوین)
۱	۱۴/۱۸۵	۸۱۱/۲	۲۱۴/۸	۳۴۲۵	۶/۵۱۵
۲	۳/۷۹۹	۶۲۲/۸	۱۷/۴۵	۳۰۹۶	۶/۶۱۲
۳	۳/۴۲۵	۶۱۹/۴	۱۷/۴۵	۳۰۹۶	۶/۶۵۴
۴	۳/۷۹۹	۶۲۲/۸	۱۹۶/۸	۳۰۹۶	۶/۶۱۲
۵	۳/۵۱۶	۸۰۸/۹	۱۹۶/۸	۳۵۳۲	۷/۲۵۷
۶	۱/۷۵۳	۷۰۴/۱	۱۱/۹	۳۳۱۹	۷/۲۹۱
۷	۱/۵۹۳	۷۰۳/۱	۱۱/۹	۳۳۱۹	۷/۳۳۴
۸	۰/۷۵۶	۵۸۸/۹	۱۱/۸۱	۳۰۹۰	۷/۳۱۷
۹	۰/۷۱۸	۵۸۸/۵	۱۱/۸۱	۳۰۹۰	۷/۳۴
۱۰	۰/۲۲۷	۴۸۰/۶	۵/۹۴	۲۸۸۱	۷/۳۸
۱۱	۰/۲۶۱	۴۸۰/۳	۵/۹۴	۲۸۸۱	۷/۴۰۸
۱۲	۰/۱۴۸	۴۲۰/۵	۶/۷۹	۲۷۶۷	۷/۴۱۳
۱۳	۰/۱۴	۴۲۰/۲	۶/۷۹	۲۷۶۷	۷/۴۳۶
۱۴	۰/۰۶۴	۳۶۰/۷	۶/۱۲	۲۶۳۲	۷/۴۴۴
۱۵	۰/۰۶۰	۳۵۹/۴	۶/۱۲	۲۶۳۲	۷/۴۶۷
۱۶	۰/۰۲	۳۳۳/۲	۱۵۴/۲۵	۲۴۶۹	۷/۴۸۸
۱۷	۱/۰۹۴	۳۳۳/۲	۱۷۳/۱۳	۲۵۱/۳	۰/۸۲۸۵
۱۸	۰/۸۸۸	۳۵۶/۶	۱۷۳/۱۳	۳۳۸/۹	۱/۱۱۶
۱۹	۰/۷۹۹	۳۷۹/۸	۱۷۳/۱۳	۴۳۲/۴	۱/۳۸۱
۲۰	۰/۷۱۹	۳۹۹/۲	۱۷۳/۱۳	۵۱۲/۷	۱/۵۹۳
۲۱	۱۷/۷۳	۴۴۲/۲	۲۱۴/۸	۷۲۵/۴	۲/۰۱۳
۲۲	۱۷/۵۵	۴۷۶/۳	۲۱۴/۸	۸۷۶/۹	۲/۳۴۴
۲۳	۱۷/۳۸	۵۱۵/۵	۲۱۴/۸	۱۰۴۴	۲/۶۹۳
۲۴	۱/۸۶	۴۸۱/۹	۱۷/۴۵	۱۰۴۴	۶/۳۶۶
۲۵	۰/۸۸۷	۴۴۸	۱۱/۹	۸۵۷/۷	۶/۴۲۲
۲۶	۰/۱۵۴	۳۸۵/۴	۵/۹۴	۵۴۱/۷	۷/۰۳۸
۲۷	۰/۰۶۷	۳۶۲/۲	۶/۷۹	۴۵۸/۹	۷/۴۹
۲۸	۰/۰۲۵	۳۳۸/۸	۶/۱۲	۳۶۱/۲	۷/۸۲

جدول (۲): مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با داده‌های نیروگاه بخار

خطا	داده‌های نیروگاه	نتایج مدل‌سازی	پارامتر مدل‌سازی
۰/۵۲%	۲۳۵/۴	۲۳۶/۶	$\dot{W}_{ST,net} [MW]$
۰/۳۴%	۶۴۵/۱	۶۴۷/۳	Heat Rate [kJ/kWh]
۰/۱۶%	۳۶/۴۹	۳۶/۵۵	$\eta_{th,net} [\%]$

### ۳- چگونگی بهینه‌سازی سیکل مورد نظر

برای انجام بازتوانی به روش گرمایش آب تغذیه موازی حالت‌های مختلفی قابل ارائه شدن است که با توجه به اولویت‌های موجود می‌تواند شامل افزایش راندمان و کاهش سوخت مصرفی، افزایش توان تولیدی، کاهش آلاینده‌های محیطی و غیره باشد [۱۲]. حالت مدنظر برای انجام بازتوانی به این روش، می‌تواند شامل چند مورد از موارد مطرح شده باشد که به شکل هم‌زمان در یک طرح مورد بحث و بررسی قرار بگیرد. در اینجا معیار اصلی، بهترین مقدار قیمت واحد برق تولیدی و راندمان اگزورژی سیکل جدید بوده است. توربین گاز مورد استفاده در انجام بازتوانی در دو حالت توربین با توان ثابت و توربین گاز وابسته بررسی شده است که به شکل پارامتری و با توجه به خصوصیات مورد نیاز برای تامین حرارت مبدل‌های حرارتی تعیین می‌گردد. علاوه بر نکات فوق موارد زیر در تغییرات اعمال شده مورد توجه قرار گرفته‌اند:

۱. مبدل‌های حرارتی افزوده شده به سیکل و نیز گرمکن‌های آب تغذیه به صورت مبدل‌های حرارتی با جریان متقابل ۷ در نظر گرفته شده‌اند.
۲. اساس طراحی گرمکن‌های آب تغذیه بر اساس تغییرات فشار زیرکشی‌ها و نیز معادلات تعادل حرارت میان بخارات زیرکشی و آب تغذیه عبوری از این گرمکن‌ها بوده است. پاسخ‌های اجرای برنامه، با مقادیر اختلاف دمای نهایی گرمکن‌های سیکل اصلی در بار نامی و بدون تغییرات زیرکشی‌ها منطبق است. مقادیر کاهش زیرکشی‌ها از ۱۰ تا ۹۰ درصد مقدار اولیه در نظر گرفته شده است. دلیل قطع نشدن زیرکشی‌ها، در نظر گرفتن تغییرات مجدد مقادیر آنها در بارهای جزئی است.
۳. مقدار ۵٪ افت فشار در فاصله خروجی بخار از زیرکشی توربینها و ورود به گرمکن‌های آب تغذیه در محاسبات در نظر گرفته شده است.
۴. فشار بخار ورودی به زیرکشی‌ها به صورت غیر کنترلی ۸ و با توجه به تغییرات دبی بخار ورودی توسط قانون

استودلا ۹ محاسبه شده‌اند [۱۳]. در اینجا مقادیر فشار لوله‌های بخار با توجه به افزایش دبی جرمی بخار و فرض عدم تغییرات در اندازه لوله‌ها محاسبه شده‌اند. یکی از محدودیت‌های فرض شده، فشار هوازای سیکل اولیه است. مقدار فشار بخار ورودی به هوزدا با توجه به تغییرات دبی بخارات ورودی به توربین فشار ضعیف LPT1 تعیین شده است.

۵. برای انجام مدل‌سازی توربین‌های بخار در حالت جدید راندمان آیزنتروپیک طبق رابطه (۱) در اثر تغییرات دبی بخارات ورودی شاهد تغییرات است [۱۴]:

$$\frac{\eta_{ise,new}}{\eta_{ise,first}} = -1.0176 \left( \frac{\dot{m}_{st,new}}{\dot{m}_{st,first}} \right)^4 + 2.4443 \left( \frac{\dot{m}_{st,new}}{\dot{m}_{st,first}} \right)^3 - 2.1812 \left( \frac{\dot{m}_{st,new}}{\dot{m}_{st,first}} \right)^2 + 1.0535 \left( \frac{\dot{m}_{st,new}}{\dot{m}_{st,first}} \right) + 0.701 \quad (1)$$

۶. در طرح موجود، ثبات نیروگاه اولیه از نظر بار نامی سیکل اولیه و نیز تغییرات ناچیز فشار بخار ورودی به چگالنده در نظر گرفته شده است تا از هزینه‌های موجود به شکل قابل ملاحظه‌ای کاسته شود. افزایش فشار بخار ورودی به چگالنده کمتر از ۱۰٪ (حدود ۷٪) در نظر گرفته شده است [۱۶ و ۱۵]. بنابراین این طرح با طرح‌های ارائه شده قبلی به این لحاظ دارای تفاوت اساسی خواهد بود [۱۱ و ۴]. چگالنده سیکل بخار توانایی افزایش فشار تا ۲۰٪ مقدار اولیه (۲۴۰/۰ مگاپاسکال) برای عملکرد در شرایط مختلف بار را دارد [۳].

۷. با در نظر گرفتن تعادل حرارتی در گرمکن‌های آب تغذیه به موازات کاهش زیرکشی‌ها، شرایط جریان آب تغذیه عبوری از گرمکن‌های جدید نیز متناسب با تغییرات مقادیر زیرکشی‌ها و نیز مقادیر بخارات خروجی از بویلر شاهد تغییرات خواهد بود. در این شرایط مبدل‌های حرارتی نصب شده برای گرمایش بخش دیگر آب تغذیه به نحوی اثر می‌کنند تا آب تغذیه

۱۲. چنانچه در نتایج حاصل از بهینه‌یابی، توان سیکل بخار در محدوده بیان شده و کمتر از توان نامی نیروگاه اولیه باشد، هزینه سرمایه‌گذاری این مقدار کاهش توان سیکل بخار اولیه به هزینه‌های سرمایه‌گذاری انجام بازتوانی افزوده شده است.

۱۳. همانگونه که قبلاً بیان شد برای تعیین توربین گاز مناسب، می‌توان با توجه به میزان حرارت مورد نیاز در گرمایش آب تغذیه و انواع توربینهای گاز مناسب موجود در بازار به انتخاب بهترین گزینه برای انجام بازتوانی اقدام نمود [۲]. اما در اینجا به تعیین پارامتری توربین گاز نیز پرداخته شده است. با توجه به میزان حرارت مورد نیاز برای گرمایش آب تغذیه مبدل‌های حرارتی فشار بالا و فشار پایین عبارتند از:

$$\dot{Q}_{LPHEX} = \dot{m}_{LPFW} (h_{out,LPFWH1} - h_{in,LPFWH3}) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{HPHEX} = \dot{m}_{HPFW} (h_{out,HPFWH1} - h_{in,HPFWH2}) \quad (3)$$

برای تامین حرارت مورد نیاز برای گرمایش آب تغذیه عبوری از مبدل‌های حرارتی نصب شده، میزان حرارت لازم برابر است با:

$$\dot{Q}_{HPHEX} = \dot{m}_{gt} \cdot C_{p, eg, HP} \cdot (T_{TET} - T_{out, HPHEX}) (1 - hl) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{LPHEX} = \dot{m}_{gt} \cdot C_{p, eg, LP} \cdot (T_{in, LPHEX} - T_{out, LPHEX}) (1 - hl) \quad (5)$$

برای جلوگیری از ایجاد نقطه شبنم در مبدل‌های حرارتی دمای گازهای خروجی در حداقل مقدار برابر با ۳۸۳/۱۵ درجه کلوین در نظر گرفته شده است [۲]. در محاسبات انجام شده ۲۰ درجه تلفات حرارت گاز بین مبدل‌های فشار بالا و فشار پایین در نظر گرفته شده است. حداقل اختلاف دمای گازهای خروجی از مبدل حرارتی فشار بالا و آب تغذیه ورودی ۱۰ درجه کلوین در نظر گرفته شد. برای دستیابی به توربین گاز مناسب، معادله (۵) به معادله ای بر حسب دمای خروجی از توربین گاز تبدیل می‌شود. برای محاسبه ظرفیت گرمایی گازهای خروجی از توربین به سمت مبدل اول [۱۷]:

$$C_{p, eg, HP} = 1.8083 - 2.3127 \cdot 10^{-3} T_{TET} + 4.045 \cdot 10^{-6} T_{TET}^2 - 1.7363 \cdot 10^{-9} T_{TET}^3 \quad (6)$$

برای محاسبه ظرفیت گرمایی گازهای مبدل فشار پایین نیز دمای موردنظر همان دمای ورودی به مبدل فشار پایین خواهد بود. از حل معادلات بالا می‌توان به دمای گازهای خروجی از توربین گاز دست یافت. همچنین با توجه به [۱۵]:

خروجی از آنها نیز با شرایط مشابه با آب تغذیه خروجی از گرمکن‌ها به هوازدا و بویلر تحویل داده شود. بنابراین نرخ حرارتی بویلر موجود با توجه به خصوصیات آب تغذیه ورودی و بخارات خروجی نسبت به حالت ابتدایی سیکل تغییر خواهد نمود. ۵٪ تلفات حرارتی برای این مبدل‌ها در نظر گرفته شده است.

۸. در طرح مورد بررسی اختلاف دمای نهایی گرمکن‌های فشار ضعیف برابر با ۲/۸ درجه و در گرمکن فشار بالای اول برابر با ۱- درجه و برای گرمکن فشار بالای دوم ۲- درجه در نظر گرفته شده است. همچنین اختلاف دمای اولیه در کل گرمکن‌های سیکل برابر با ۵/۶ درجه با توجه به داده‌های موجود در مدل‌سازی سیکل مورد استفاده قرار گرفته است.

۹. توربین‌های گاز به دو شکل در نظر گرفته شده‌اند: اول: توربین گاز به عنوان یک متغیر وابسته که بهترین مقادیر توابع هدف را در سیکل با در نظر گرفتن قیود موجود ایجاد نماید.

دوم: استفاده از توربین گازی با توان مشخص برای تعیین خصوصیات سیکل بازتوانی با توربین گازی در بازه توانی مجاز (با توجه به موارد انجام شده قبلی) و نیز امکان تولید داخلی آن. با توجه به این موارد توربین گاز ۲۵ مگاواتی برای اعمال این طرح مدنظر قرار گرفته است.

۱۰. با در نظر گرفتن قانون هدفمندسازی یارانه‌ها و بهای واقعی انرژی در بازار آزاد و همچنین با توجه به بهای قانونی تعیین شده برای برق توسط وزارت نیرو و تقسیم این قیمت میان بخش‌های مختلف تولید، توزیع و انتقال، حداکثر بهای مجاز برق تولیدی ۴۷۰ ریال به ازای هر کیلووات‌ساعت برق تولیدی در نظر گرفته شده است [۵]. این مقدار نیز به عنوان قیدی در بهینه‌سازی توابع هدف مد نظر قرار گرفته است.

۱۱. قیود در نظر گرفته شده برای انجام بهینه‌سازی عبارتند از:

$$245MW \leq W_{ST} \leq 250MW$$

$$P_{Deamator} \leq 0.736MPa$$

$$T_{Stack, LPHEX} \geq 383.15^\circ K$$

$$P_{in, Cond} \leq 0.0215MPa$$

$$25MW \leq \dot{W}_{gt} \leq 50MW$$

$$Z_{elec} \leq 470 \frac{Rial}{kWh}$$

$$\Delta T_{gt, Out, HPHEX} = \Delta T_{Pinch, HEX} \geq 10^\circ K$$

$$\xi = \frac{ex_f}{LHV_f} \quad (13)$$

و نیز رابطه‌ای که بیانگر مقدار تجربی این ضریب برای سوخت-های با فرمول کلی  $C_x H_y$  است [۲۰]:

$$\xi = 1.033 + 0.0169(y/x) - 0.0698/x \quad (14)$$

با توجه به اینکه بیش از ۹۸/۵٪ از حجم گاز طبیعی را گاز متان تشکیل می‌دهد برای تعیین مقدار این ضریب، گاز متان در نظر گرفته شد [۱۸]. بنابراین مقدار  $ex_{f,b}$  بدست خواهد آمد. اما برای تعیین مقدار  $\dot{m}_{f,g}$  باید این مقدار به تغییرات سیکل تبدیل یافته مرتبط شود:

$$\dot{Q}_{gt} = \dot{m}_{f,g} \cdot \frac{ex_{f,gt}}{\xi} \quad (15)$$

با توجه به داده‌های مرجع [۱۵]:

$$\dot{Q}_{gt} = 2.68\dot{W}_{gt} + 6.93 \quad (16)$$

بنابراین:

$$ex_{f,g} \cdot \dot{m}_{f,g} = \xi \cdot (2.68\dot{W}_{gt} + 6.93) \quad (17)$$

بنابراین به تابع هدفی برای اگزرژی خواهیم رسید که در ارتباط مستقیم با تغییرات پارامترهای عملکردی سیکل مدل‌سازی شده خواهد بود.

### ۳-۲- تابع هزینه واحد الکتریسیته تولیدی

برای تعیین هزینه واحد جریان الکتریسیته تولیدی در انجام بازتوانی سه عامل، سرمایه‌گذاری اولیه، تعمیر و نگهداری و سوخت مصرفی دخالت دارند. تجهیزات لازم عبارتند از مجموعه توربین گاز، مبدل‌های حرارتی و گرمکن‌های آب تغذیه جدید. پس از تعیین تجهیزات لازم برای انجام بازتوانی، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بوسیله روابط زیر محاسبه شده است [۱۵ و ۲۱]:

هزینه خرید مجموعه توربین گاز:

برای توربین‌های با توان کمتر از ۵۰ مگاوات:

$$CC_{gt} = 4.786 \cdot (\dot{W}_{gt} \cdot 1000)^{0.7338} \cdot 1000 \cdot f_{E,Rial} \quad (18)$$

برای توربین‌های با توان بیشتر از ۵۰ مگاوات:

$$\dot{m}_{gt} = \overline{T}_{TET} - 1227.26 \quad (7)$$

با جاگذاری معادلات (۶) و (۷) در معادله (۵) و حل آنها، دمای خروجی از توربین گاز بدست خواهد آمد. اکنون برای بدست آوردن توان توربین گاز با توجه به دمای خروجی از آن داریم:

$$T_{TET} = 0.44\dot{W}_{gt} + 780.45 \quad (8)$$

### ۳-۱- تابع راندمان اگزرژی

یکی از توابع هدف بکار رفته در بهینه‌سازی سیکل موجود به روش گرمایش آب تغذیه موازی، تابع راندمان اگزرژی است. رابطه کلی در محاسبه راندمان اگزرژی عبارت است از:

$$\eta_{ex,cc} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{W}_i}{\sum_{i=1}^n \dot{E}_{f_i}} \quad (9)$$

که در آن:

$$\sum_{i=1}^n \dot{W}_i = \dot{W}_{gt} + \dot{W}_{st} + \dot{W}_{HN} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \dot{E}_{f_i} = \dot{E}_{f,b} + \dot{E}_{f,g} = e_f \cdot \dot{m}_{f,b} + e_f \cdot \dot{m}_{f,g} \quad (11)$$

$\sum_{i=1}^n \dot{W}_i$  مجموع توان تولیدی نیروگاه و  $\sum_{i=1}^n \dot{E}_{f_i}$  مجموع اگزرژی سوخت ورودی به نیروگاه است. در مرحله بعد با توجه به نبود اطلاعات در مورد میزان سوخت مصرفی نیروگاه بر حسب سوخت گاز طبیعی، محاسبات برای دستیابی به دبی جرمی جریان سوخت ورودی به بویلر موجود از ترکیب دو رابطه زیر انجام شده است:

$$\dot{Q}_{boiler} = \dot{m}_{f,b} \cdot LHV_f \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{boiler} = \frac{\dot{m}_{fw,in}(h_{out,boiler} - h_{in,boiler}) + \dot{m}_{reh}(h_{out,reh} - h_{in,reh})}{\%94}$$

در رابطه (۱۳) ضریبی به نام ضریب تلفات اگزرژی ویژه تعریف می‌شود که رابطه میان اگزرژی شیمیایی و ارزش حرارتی پایین سوخت است [۱۸ و ۱۹]:

$$HR_{PP} = \frac{\dot{m}_f \cdot LHV_f}{\dot{W}} \cdot 3600 [kJ / kWh] \quad (26)$$

بنابراین:

$$Z_f = C_f \cdot HR_{PP} [\$ / kWh] \quad (27)$$

بهای سوخت مصرفی برابر با ۰/۰۳ ریال به ازای هر کیلوژول در نظر گرفته شد [۲۴]. در مرحله بعد با توجه به فرمول‌های فوق به محاسبه میزان هزینه هر کیلووات ساعت برق مصرفی روش گرمایش آب تغذیه موازی خواهیم پرداخت. از جمع‌بندی و ترکیب و روابط فوق برای تخمین هزینه هر کیلووات ساعت برق تولیدی داریم [۶]:

$$Z_E = \left( \frac{TCL \cdot CRF \cdot \phi}{\dot{W} \cdot H} \right) + C_f \cdot HR_{PP} [\$ / kWh] \quad (28)$$

بعد از بیان روابط مورد نیاز در تعیین مقادیر توابع هدف، به بیان چگونگی اعمال تغییرات بر روی سیکل نیروگاه مدنظر برای دستیابی به بهترین ویژگی‌های فنی-اقتصادی پرداخته شده است.

#### ۴- تعیین مقدار و موقعیت کاهش زیرکشی‌ها در حالت تک هدفه

برای دستیابی به حالت مطلوب به صورت یک هدفه، مقدار بهینه توابع هدف موجود توسط الگوریتم ژنتیک محاسبه شده است. گزینه‌های موجود برای انجام بهینه‌سازی با توجه به تعداد زیرکشی‌های موردنظر برای کاهش بخارات عبوری و همچنین دبی بخار خروجی از بویلر مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله بعد با در نظر گرفتن این شرایط به تعیین خصوصیات سیکل در هر یک از حالت‌های مورد بحث پرداخته شده است. در هر سناریو دو طرح (با توجه به وابسته و مستقل بودن توربین گاز الحاقی) برای انتخاب حالت مناسب بیان شده است. نتایج حاصل از انجام بهینه‌سازی که شامل مقادیر بهینه دو تابع هدف مد نظر و برخی خصوصیات سیکل بازتوانی است، در جدول (۳) برای سناریوهای مورد بحث بیان شده است. برای انجام بهینه‌سازی تک هدفه و دستیابی به راندمان آگزرژی بیشینه محدودیت قیمت بیان شده مدنظر قرار گرفته تا به این شکل بهای برق تولیدی به شکل متعارف و متناسب با بهای برق نهایی قابل قبول محاسبه شود و اثر نامطلوب بهینه‌سازی فنی بر معیارهای اقتصادی (با توجه به افزایش سرمایه‌گذاری اولیه با افزایش مشخصه‌های مطلوب فنی) مرتفع شود.

انواع سناریوهای ارائه شده در انجام بهینه‌سازی عبارتند از:

$$CC_{gt} = 2.977 \cdot (\dot{W}_{gt} \cdot 1000)^{0.7791} \cdot 1000 \cdot f_{E, Rial} \quad (19)$$

هزینه خرید مبدل‌های حرارتی:

تابع تعیین هزینه مبدل حرارتی برای تعیین هزینه گرمکن-های آب تغذیه، مبدل‌های حرارتی و شبکه حرارتی بکار گرفته خواهد شد. این هزینه توسط رابطه (۲۰) تعیین می‌شود:

$$CC_{HEX} = 3650 \cdot \left( \frac{\dot{Q}_{HEX}}{\Delta T_{lm}} \right) \cdot f_{M \& S} \cdot f_{E, Rial} \quad (20)$$

شاخص هزینه تجهیزات با در نظر گرفتن تغییرات سالیانه برابر با ۱۳۰۰ در نظر گرفته شد [۲۲]. در تعیین شاخص تغییر واحد پول، هر یورو ۱۳۰۰۰ ریال در محاسبات وارد شده است. پس از انجام مراحل فوق، به بررسی سایر هزینه‌های موثر در تعیین قیمت هر کیلووات ساعت برق تولیدی می‌پردازیم: این هزینه‌ها همانگونه که قبلاً عنوان شد شامل هزینه‌های تعمیر و نگهداری و هزینه سوخت مصرفی نیروگاه هستند. هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری (اعم از ثابت و متغیر) در حالت کلی و با فرض کارکرد نیروگاه در شرایط بار نامی را می‌توان بصورت رابطه‌ای بر حسب هزینه کل سرمایه‌گذاری اولیه نوشت [۶]:

$$Z_{OM} = (\phi - 1) \cdot Z_C [\$ / kWh] \quad (21)$$

$$Z_C = \frac{TCL \cdot CRF}{\dot{W} \cdot H} [\$ / kWh] \quad (22)$$

$$Z_C + Z_{OM} = \frac{TCL \cdot CRF \cdot \phi}{\dot{W} \cdot H} [\$ / kWh] \quad (23)$$

$\phi$  فاکتور تعمیر و نگهداری بوده و مقدار آن با توجه به نوع نیروگاه مشخص می‌شود. در صورت نداشتن اطلاعات جامع می‌توان از مقدار ۱/۰۶ استفاده نمود [۲۳]. برای برآورد فاکتور برگشت سرمایه داریم:

$$CRF = \frac{i(i+1)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (24)$$

مقدار ۰/۱۸۲ برای این کمیت معرفی می‌شود [۲۳].

برای هزینه سوخت به ازای هر کیلووات ساعت از رابطه (۲۵) استفاده شده است:

$$Z_f = \frac{C_f \cdot \dot{m}_f \cdot LHV_f}{\dot{W} \cdot H} \cdot t_s [\$ / kWh] \quad (25)$$

از طرف دیگر برای نرخ حرارتی:

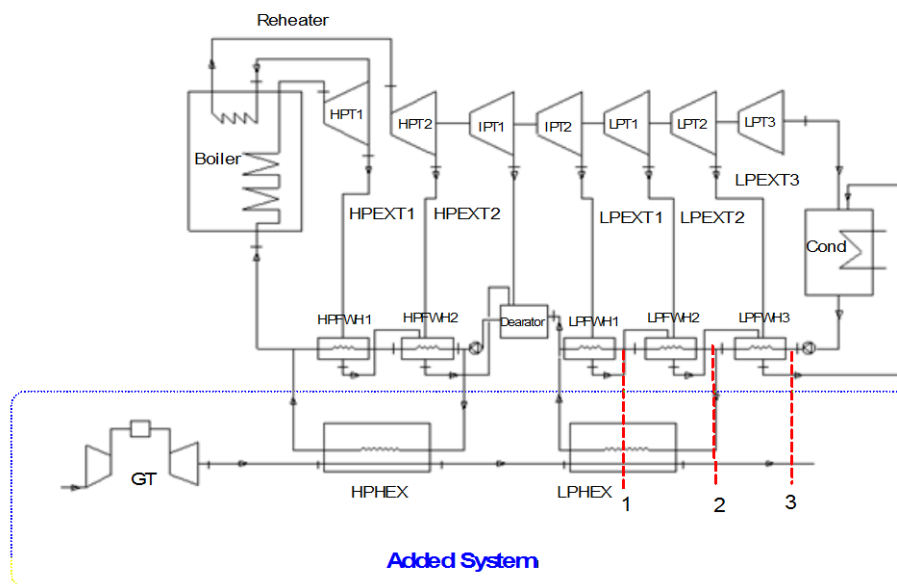


دیگری که در جدول (۳) قابل توجه است تفاوت بهای برق تولیدی در حالت پنج زیرکش است. با وجود انعطاف‌پذیری قابل ملاحظه این طرح به دلیل بالا رفتن هزینه برق تولیدی در اثر جایگزینی آخرین گرمکن آب تغذیه فشار پایین این طرح دربردارنده هزینه برق تولیدی بالایی خواهد بود. دلیل این امر ناشی از کم بودن اختلاف دمایی میانگین لگاریتمی این گرمکن در تابع هزینه است. از موارد مهمی که از جدول (۳) قابل بحث خواهد بود در رابطه با مقادیر هزینه بهینه در دو حالت با تعداد زیرکش مساوی و در دو دسته متفاوت وابسته و مستقل از توان توربین گاز خواهد بود. با توجه به مقدار دمای ثابت خروجی از مبدل‌های فشار پایین و اختلاف نقطه پینچ ثابت در نظر گرفته شده، در حالت مستقل از توان توربین گاز، و نیز عدم وجود قید دمایی حداکثر برای حالت وابسته به توان توربین گاز، قیمت تمام شده برق تولیدی در این دو حالت روند مشخصی نداشته است. مقادیر جدول (۱) با در نظر گرفتن مشخصات عملکردی زیر در برنامه بهینه‌سازی حاصل شده است:

۱. تعداد افراد ۵۶
۲. تعداد جمعیت و نسل ۱۲۸
۳. حداکثر نرخ جهش ۰/۳۵

۱. تغییرات در سه زیرکش: در این سناریو دو زیرکش فشار بالا و یک زیرکش فشار پایین برای انجام تغییرات مد نظر خواهند بود (خط چین ۱ شکل (۲)).
۲. تغییرات در چهار زیرکش: در این سناریو چهار زیرکش سیکل موجود شاهد تغییرات دبی بخارات خروجی خواهند بود. خط چین شماره ۲ در شکل (۲) نشان‌دهنده نقطه مدنظر در جدا نمودن مسیر آب تغذیه برای گرمایش توسط توربین گاز در بخش کم فشار است.
۳. تغییرات در پنج زیرکش: محل تقسیم شدن آب تغذیه برای گرمایش توسط توربین گاز در بخش فشار پایین بعد از پمپ آب چگالیده است (خط چین ۳ شکل (۲)).

برای طرح‌های ارائه شده در بار جزئی به دلیل کاهش حجم آب تغذیه عبوری از گرمکن فشار بالا مقادیر جذب حرارت توسط این بخش کاهش یافته و جذب گرمای توربین گاز از طرف بخش فشار پایین افزایش می‌یابد. بنابراین انعطاف‌پذیری طرح‌ها در جذب بهینه حرارت خروجی از توربین گاز بوسیله آب تغذیه فشار پایین یکی از پارامترهای مهم به شمار خواهد آمد که نیازمند تحلیل سیکل بازتوانی در بار جزئی خواهد بود. بنابراین طرح بازتوانی با تغییرات سه زیرکش نسبت به حالت چهار زیرکش و این حالت نیز نسبت به پنج زیرکش دارای انعطاف‌پذیری کمتری در بارهای جزئی خواهد بود. از مسایل مهم



شکل (۲): واحد بخار بازتوانی شده نیروگاه شهید رجایی به روش گرمایش آب تغذیه موازی

## ۵- بهینه‌سازی دو هدفه سیکل بازتوانی

از روش‌های توابع کورولایشن رگرسیون خطی و تشکیل شبکه عصبی می‌توان استفاده نمود. در اینجا با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب دو برنامه به یکدیگر وصل شده و امکان

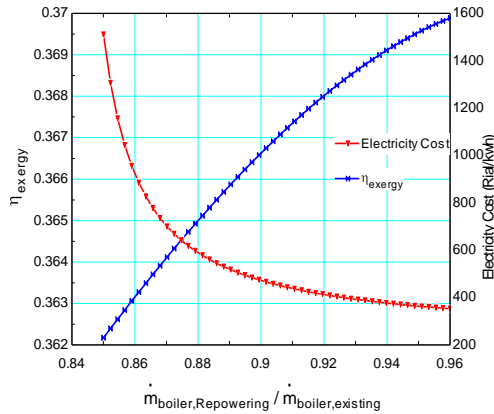
با توجه به آنکه برنامه در نظر گرفته شده برای انجام بهینه‌سازی دو هدفه، متفاوت از برنامه مدل‌سازی بوده است، برای انجام بهینه‌سازی دو هدفه، از چند روش متداول شامل استفاده

(۳) است. بنابراین کلیه مقادیر بازه بدست آمده در منحنی پارتو مقادیر بهینه محسوب شده و با در نظر گرفتن وزن مساوی برای هر یک از متغیرهای وابسته (توابع هدف) نزدیکترین نقطه به جبهه پارتو می‌تواند به عنوان نقطه بهینه نهایی در نظر گرفته شود. در اینجا دو حالت مستقل و وابسته تغییرات ۴ زیرکش برای انجام بهینه‌سازی دو هدفه سیکل بازتوانی مد نظر قرار گرفته‌اند. این امر با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری پایین طرح سه زیرکش در بارهای جزئی، و نیز هزینه تمام شده بالای طرح کاهش پنج زیرکش انجام پذیرفته است. همانگونه که از

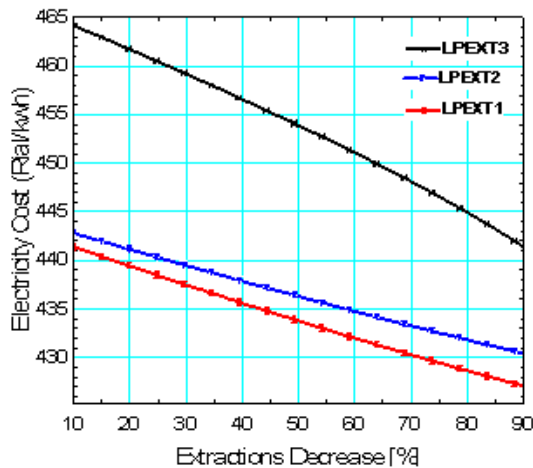
استفاده از اطلاعات برنامه نوشته شده در نرم افزار "ای ای اس"<sup>۱۲</sup> در محیط بهینه‌سازی برنامه ایجاد شده است. هر چند که این عمل از نظر زمانی نسبت به روش‌های کورولایشن یا تشکیل شبکه، زمانبرتر بوده است اما به دلیل دستیابی مستقیم به اطلاعات از طرف برنامه بهینه‌سازی، دقت انجام عملیات و پاسخ-های بدست آمده دقیق بوده و خطاهای معمول کورولایشن در این میان حذف شده است. در اینجا با توجه به بازه‌های محدود بین متغیرهای مستقل، نتایج بدون خطا از ملزومات بهینه‌سازی است. حدود حداقل و حداکثر برای انجام بهینه‌سازی دو هدفه (برای اعمال بر متغیرهای مستقل) بازه بدست آمده در جدول

جدول (۳). خصوصیات سیکل بعد از انجام بهینه سازی تک هدفه

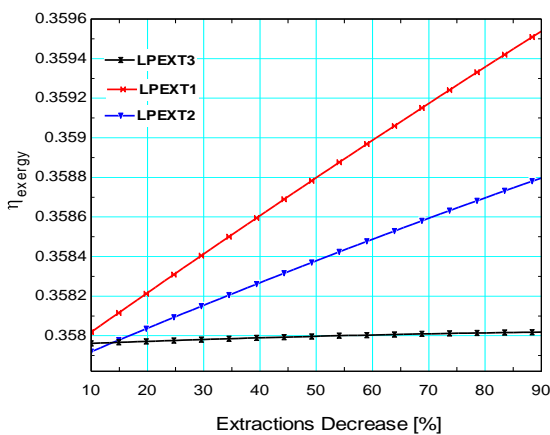
مشخصه‌های مهم سیکل بازتوانی (بهینه‌یابی تک هدفه)	توربین گاز وابسته						توربین گاز ۲۵ مگاواتی					
	کاهش ۳ زیرکش		کاهش ۴ زیرکش		کاهش ۵ زیرکش		کاهش ۳ زیرکش		کاهش ۴ زیرکش		کاهش ۵ زیرکش	
	هدف ۱	هدف ۲	هدف ۱	هدف ۲	هدف ۱	هدف ۲	هدف ۱	هدف ۲	هدف ۱	هدف ۲	هدف ۱	هدف ۲
دبی بخار (درصد)	۹۰/۱۶	۹۳/۴۲	۸۹/۹۹	۹۴/۶	۹۰	۹۳/۷۵	۹۲/۰۲	۹۴/۷۶	۹۲/۰۶	۹۴/۵	۹۲/۱	۹۵/۱۸
زیرکش فشار بالای اول (درصد)	۹۰	۹۰	۹۰	۸۱/۷۹	۹۰	۹۰	۹۰	۷۴/۳۷	۹۰	۸۱/۱۶	۹۰	۷۱/۸۶
زیرکش فشار بالای دوم (درصد)	۶۵/۶۲	۱۰	۷۰/۵	۱۰	۶۸/۸۹	۱۰	۳۷/۴۳	۱۰	۳۷/۴۳	۱۰	۳۷/۴۲	۱۰
کاهش کلی زیرکش‌های فشار بالا (درصد)	۸۰/۱۲	۵۷/۵۶	۸۲/۱	۵۲/۶۸	۸۱/۴۴	۵۷/۵۶	۶۸/۶۸	۴۸/۲۷	۶۸/۶۸	۵۲/۳۱	۶۸/۶۸	۴۶/۷۸
زیرکش فشار پایین اول (درصد)	۹۰	۹۰	۶۱/۹۶	۲۲/۵۸	۸۱/۱۷	۹۰	۳۹/۸۶	۹۰	۲۸/۹۷	۱۰	۱۹/۷۱	۱۰
زیرکش فشار پایین دوم	۰	۰	۵۶/۵۴	۹۰	۳۶/۳۹	۱۸/۳۲	۰	۰	۱۰	۹۰	۱۰	۱۸/۳۲
زیرکش فشار پایین سوم (درصد)	۰	۰	۰	۰	۱۰	۹۰	۰	۰	۰	۰	۱۰/۱۲	۹۰
کاهش کلی زیرکش‌های فشار پایین (درصد)	۲۳/۳۷	۲۸/۳۷	۳۹/۸۹	۳۹/۵۳	۴۱/۹۴	۳۸/۹۷	۱۲/۵۷	۲۸/۳۷	۱۲/۷۳	۳۵/۵۶	۱۳/۱	۳۸/۹۷
توان بخش بخار (مگاوات)	۲۴۵	۲۴۸/۹۳	۲۴۵	۲۵۰	۲۴۵	۲۴۸/۸۶	۲۴۶/۸۷	۲۵۰	۲۴۶/۹۲	۲۵۰	۲۴۶/۹	۲۴۹/۷۸
توان بخش گاز (مگاوات)	۳۶/۰۳	۲۵/۳۱	۴۰/۵۹	۲۶/۵۳	۴۰/۹۹	۲۷/۸۸	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
اختلاف دمای گاز و بخار در خروجی محل خروج گاز مبدل فشار بالا (کلوین)	۴۶/۵۷	۷۰/۵۵	۶۷/۹۶	۱۰۲/۱۷	۷۲/۶۶	۸۹/۵۹	۱۰	۱۱۲/۳۱	۱۰	۹۳/۰۸	۱۰	۱۱۹/۵
هزینه (میلیون دلار)	۱۸/۷۸	۱۲/۹۲	۲۱/۸۸	۱۴/۱۸	۲۶/۰۸	۱۶/۵۵	۱۴/۲۸	۱۲/۴۹	۱۵/۳۹	۱۳/۵۸	۱۸/۹۹	۱۴/۹۸
راندمان انرژی (درصد)	۳۷/۱۲	۳۶/۷	۳۷/۱۶	۳۶/۵۵	۳۷/۱۵	۳۶/۵۹	۳۶/۸۴	۳۶/۴۴	۳۶/۸۴	۳۶/۵۲	۳۶/۶۸	۳۶/۲۹
راندمان حرارتی (درصد)	۳۸/۲۶	۳۷/۸۳	۳۸/۳	۳۷/۶۶	۳۸/۲۹	۳۷/۷۱	۳۷/۹۷	۳۷/۵۵	۳۷/۹۷	۳۷/۶۴	۳۷/۹۳	۳۷/۴
نرخ حرارتی (کیلوژول بر کیلووات ساعت)	۹۴۰/۹۳	۹۵۱۶	۹۳۹۷/۲	۹۵۵۷	۹۴۰۰/۷	۹۵۴۶/۵۴	۹۴۷۹/۸	۹۵۸۵/۸۴	۹۴۷۹/۸	۹۵۶۳/۸۵	۹۴۹۰/۱	۹۶۲۵/۴۶
نرخ حرارت مبدل فشار بالا (مگاوات)	۵۷/۲۱	۴۰/۰۶	۵۸/۷۲	۳۶/۶۹	۵۸/۲۲	۴۰/۰۶	۴۸/۴۹	۳۳/۶۴	۴۸/۴۹	۲۶/۴۳	۴۸/۴۸	۳۲/۶
نرخ حرارت مبدل فشار پایین (مگاوات)	۱۴/۲۶	۱۴/۲	۱۹/۵۸	۱۹/۰۵	۲۰/۶۲	۱۷/۹۱	۶/۳	۱۴/۲	۶/۳	۱۷/۰۷	۶/۳۲	۱۷/۹۱
فشار بخار ورودی کندانسور (مگاپاسکال)	۰/۰۲۱۱	۰/۰۲۱۱	۰/۰۲۱۴	۰/۰۲۱۵	۰/۰۲۱۵	۰/۰۲۱۵	۰/۰۲۰۸	۰/۰۲۱۱	۰/۰۲۰۸	۰/۰۲۱۴	۰/۰۲۰۸	۰/۰۲۱۴
دمای گاز خروجی مبدل فشار پایین (کلوین)	۳۸۳/۱۵	۳۸۳/۱۵	۳۸۳/۱۵	۳۸۳/۱۵	۳۸۳/۱۵	۳۸۳/۱۵	۳۸۳/۱۵	۴۲۵/۵	۳۸۳/۱۵	۳۸۳/۱۵	۳۸۳/۱۵	۳۸۳/۱۵
هزینه برق تولیدی (ریال بر کیلو واتساعت)	۳۹۹/۹۳	۳۸۹/۱۶	۴۰۱/۴۷	۳۹۰/۶۱	۴۲۲/۹۴	۴۰۶/۶۹	۴۱۱/۳۲	۳۸۴/۶۴	۴۲۰/۹۸	۳۹۲/۵۵	۴۵۲/۱۶	۴۰۶/۲۶



شکل (۳): اثر افزایش دبی بخارات خروجی از بویلر بر توابع هدف در حالت توربین گاز ۲۵ مگاواتی در حالت ۴ زیرکش



شکل (۴): اثر کاهش زیرکش‌های مختلف بر بهای برق تولیدی در حالت درگیری ۵ زیرکش



شکل (۵): اثر کاهش زیرکش‌های مختلف بر راندمان آگزرژی در حالت درگیری ۵ زیرکش

از جدول (۵) نیز مشاهده می‌شود حالت ۵ زیرکش با وجود هزینه برق تولیدی بیشتر (در حالت توربین گاز ۲۵ مگاواتی) راندمان آگزرژی پایین‌تری نسبت به دیگر حالت‌ها داشته و در حالت توربین گاز وابسته تفاوت ناچیزی میان راندمان آگزرژی بدست آمده با سایر موارد مورد بررسی بوده است. همین دلایل را می‌توان توجیه استفاده از طرح ۴ زیرکش در موارد تجربه شده قبلی عنوان نمود [۲۰ و ۱۳ و ۱۴]. نمودارهای بدست آمده در دو حالت مستقل و وابسته در طرح‌های موردنظر در جدول ۴ نمایش داده شده است. در این نمودارها محور افقی نشان‌دهنده تابع راندمان آگزرژی و محور عمودی هزینه برق تولیدی است. در جدول (۵) نتایج حاصل از بهینه‌سازی دوهدفه هر یک از طرح‌ها، با توجه به نزدیکترین نقطه به جبهه پارتو، نشان داده شده است.

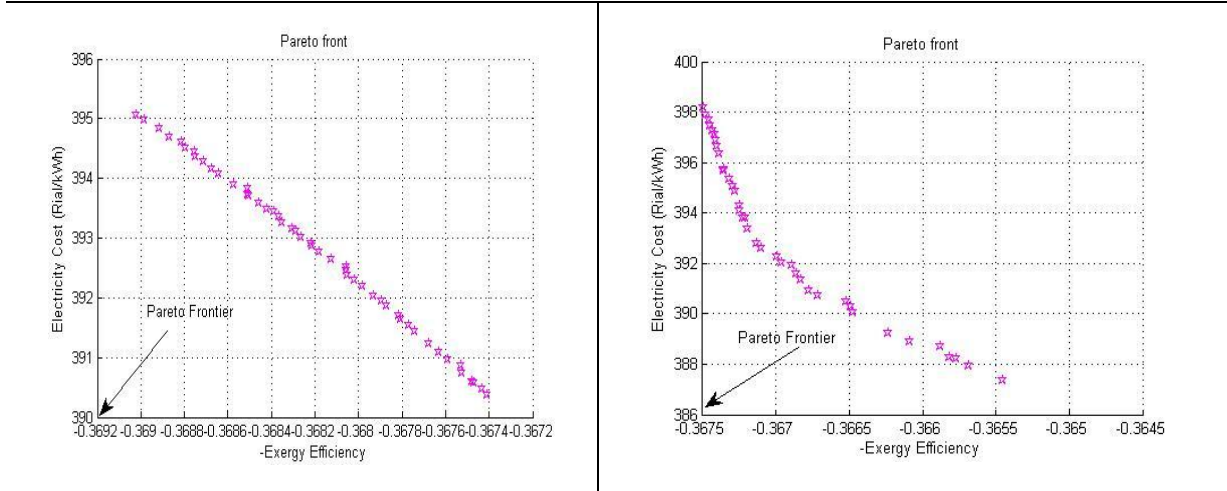
## ۶- آنالیز حساسیت

در ادامه اثر برخی از متغیرها مهم بر خصوصیات سیکل مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرهای مهم که اثر آنها در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است شامل کاهش مقادیر زیرکش‌های فشار بالا و فشار پایین و دبی بخارات عبوری از خط اصلی و نیز توان توربین گاز الحاقی است. نمودار شکل (۳) نشان‌دهنده تغییرات توابع هدف با توجه به تغییرات دبی بخارات خروجی از بویلر نیروگاه در حالت بازتوانی و در حالت بهینه فنی - اقتصادی است. افزایش دبی این بخارات برای کاهش هزینه برق تولیدی و افزایش راندمان آگزرژی سیکل است. یکی از محدودیت‌های ادامه روند افزایش بخارات خروجی از بویلر، محدودیت در نظر گرفته شده برای چگالنده و هوازادای سیکل بخار است. یکی از مسائلی که در رابطه با تعیین حالت بهینه انتخابی نقش مهمی داشته است، قیمت تمام شده برق تولیدی با در نظر گرفتن مبدل‌های جایگزین شده در حالت‌های مورد بحث بوده است. در نمودار شکل (۴) اثر تغییرات بهای برق تولیدی با تغییرات مقادیر زیرکش‌ها نشان داده شده است. تفاوت بسیار زیاد بهای ناشی از بکارگیری مبدل حرارتی فشار پایین سوم در مقایسه با سایر زیرکش‌ها، توجیه افزایش برق تولیدی در حالت درگیری ۵ زیرکش در انجام بازتوانی است. در این نمودار همان‌گونه که دیده می‌شود، تفاوت حداقل هزینه برق تولیدی به ازای بکارگیری این بخش بیشتر از ۱۰ ریال به ازای هر کیلووات‌ساعت است که این مقدار با افزایش دبی جرمی بخارات زیرکش تا ۲۰ ریال نیز افزایش یافته است. این در حالی است که با توجه به نمودار شکل (۵) اثر این کاهش بر راندمان آگزرژی سیکل بازتوانی نسبت به دو زیرکش دیگر بسیار ناچیز بوده است.

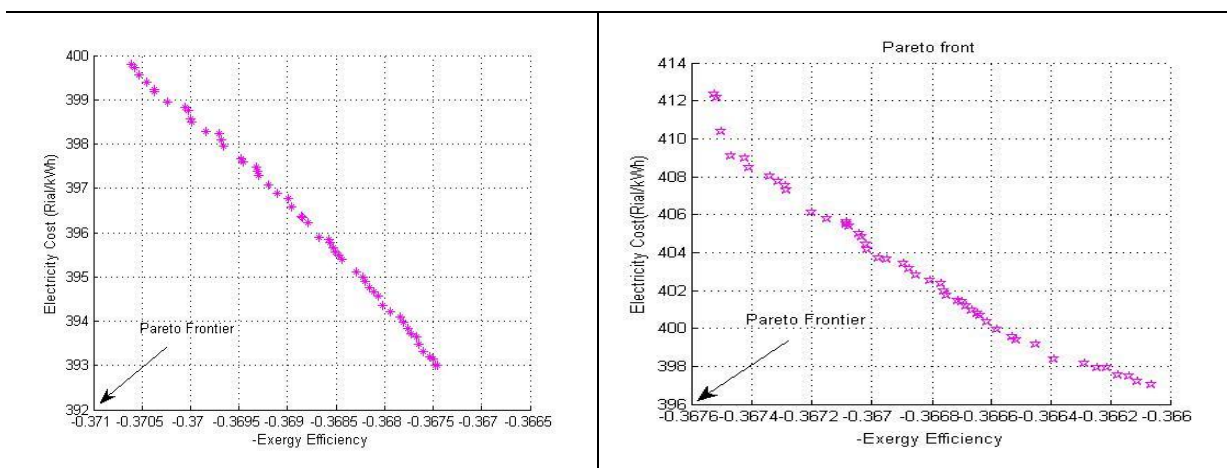
جدول (۴): نمودارهای ناشی از انجام بهینه سازی دو هدفه

توربین گاز وابسته	توربین گاز ۲۵ مگاواتی
-------------------	-----------------------

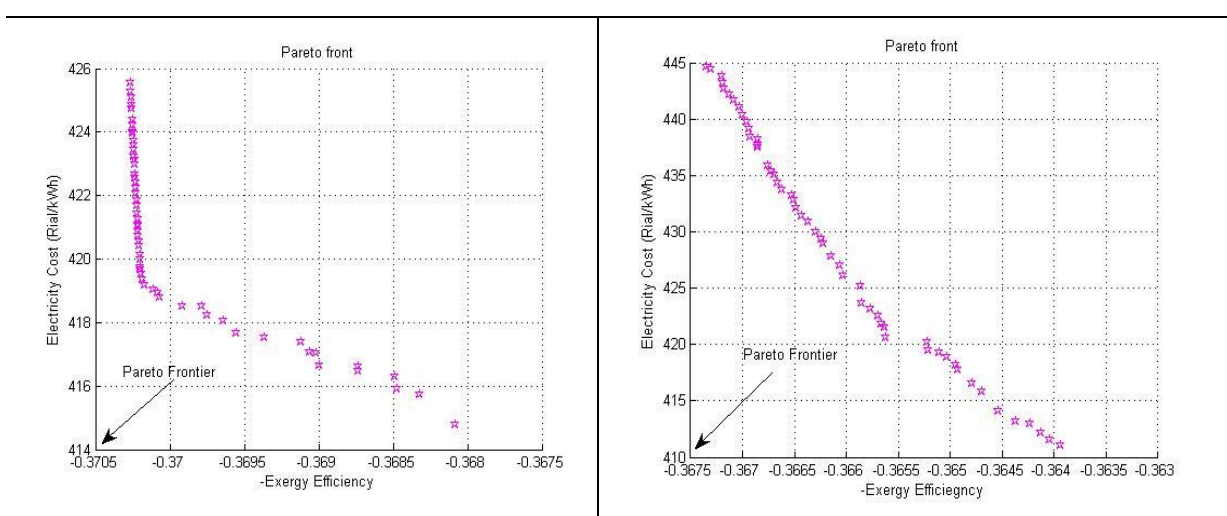
کاهش سه زیرکش



کاهش چهار زیرکش

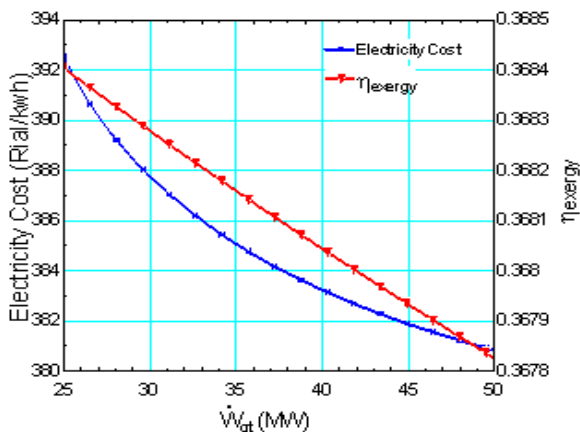


کاهش پنج زیرکش



جدول (۵): خصوصیات سیکل بعد از انجام بهینه سازی دو هدفه

مشخصه‌های مهم سیکل بازتوانی (بهینه‌یابی دو هدفه)	توربین گاز وابسته			توربین گاز ۲۵ مگاواتی		
	کاهش ۳ زیرکشی	کاهش ۴ زیرکشی	کاهش ۵ زیرکشی	کاهش ۳ زیرکشی	کاهش ۴ زیرکشی	کاهش ۵ زیرکشی
دبی بخار (درصد)	۹۲/۵۵	۹۲/۱۷	۹۱/۰۷	۹۳/۶۲	۹۳/۲۶	۹۳/۶۷
زیرکشی فشار بالای اول (درصد)	۹۰	۸۹/۲۸	۹۰	۸۴/۶۷	۸۹/۰۵	۸۵/۲۴
زیرکشی فشار بالای دوم (درصد)	۲۴/۸	۳۶/۲	۵۳/۴۱	۱۴/۴۸	۱۸/۵۹	۱۷/۶۶
کاهش کلی زیرکشی‌های فشار بالا (درصد)	۶۲/۵۶	۶۷/۷۶	۷۵/۱۷	۵۶/۲۱	۶۰/۴۹	۵۷/۸۴
زیرکشی فشار پایین اول (درصد)	۹۰	۳۶/۲۲	۴۲/۴۵	۸۶/۵۲	۲۲/۹۱	۱۶/۴۷
زیرکشی فشار پایین دوم	۰	۷۹/۲۶	۲۶/۸۸	۰	۴۶/۶۶	۱۶/۱۲
زیرکشی فشار پایین سوم (درصد)	۰	۰	۵۳/۰۱	۰	۰	۴۸/۹۱
کاهش کلی زیرکشی‌های فشار پایین (درصد)	۲۸/۳۷	۳۹/۹۷	۴۰/۲۸	۲۷/۲۷	۲۴/۰۳	۲۶/۸۸
توان بخش بخار (مگاوات)	۲۴۷/۸۸	۲۴۷/۵۸	۲۴۵/۹۳	۲۴۸/۹۷	۲۴۸/۵۷	۲۴۸/۶۴
توان بخش گاز (مگاوات)	۲۸/۱۹	۳۳/۷۶	۳۷/۰۵	۲۵	۲۵	۲۵
اختلاف دمای گاز و بخار در خروجی محل خروج گاز مبدل فشار بالا (کلوین)	۶۲/۸۹	۸۲/۴۵	۷۲/۹۹	۷۳/۶۶	۵۲/۵۷	۶۵/۳۵
هزینه (میلیون دلار)	۱۴/۵	۱۸/۰۶	۲۲/۸۷	۱۲/۸۳	۱۴/۳۸	۱۶/۸۷
راندمان آگرژی (درصد)	۳۶/۸۲	۳۶/۸۸	۳۶/۹۸	۳۶/۶۵	۳۶/۷	۳۶/۵۹
راندمان حرارتی (درصد)	۳۷/۹۵	۳۸/۰۱	۳۸/۱۱	۳۷/۷۸	۳۷/۸۳	۳۷/۷۱
نرخ حرارتی (کیلوژول بر کیلووات ساعت)	۹۴۸۶/۱۶	۹۴۷۱/۱۹	۹۴۴۶/۳۴	۹۵۲۸/۸۵	۹۵۱۶/۲۵	۹۵۴۶/۵۴
نرخ حرارت مبدل فشار بالا (مگاوات)	۴۴/۶۱	۴۷/۸۲	۵۳/۴۲	۳۹/۲۵	۴۲/۳۱	۴۰/۴۵
نرخ حرارت مبدل فشار پایین (مگاوات)	۱۴/۲۲	۱۹/۳۹	۱۹/۱۳	۱۳/۶۶	۱۱/۶۵	۱۲/۵۴
فشار بخار ورودی کندانسور (مگاپاسکال)	۰/۰۲۱۱	۰/۰۲۱۵	۰/۰۲۱۵	۰/۰۲۱۳	۰/۰۲۱۱	۰/۰۲۱۲
دمای گاز خروجی مبدل فشار پایین (کلوین)	۳۸۳/۱۵	۳۸۳/۱۵	۳۸۳/۱۵	۳۸۹/۷	۳۸۲/۹	۳۸۹/۹
هزینه برق تولیدی (ریال بر کیلو واتساعت)	۳۹۲/۷۶	۳۹۶/۲۲	۴۱۸/۲۲	۳۹۰/۰۸	۴۰۴/۱۵	۴۲۵/۱۷



شکل (۶): اثر تغییرات توان توربین گاز بر توابع هدف در مقایسه با توربین ۲۵ مگاواتی انتخابی

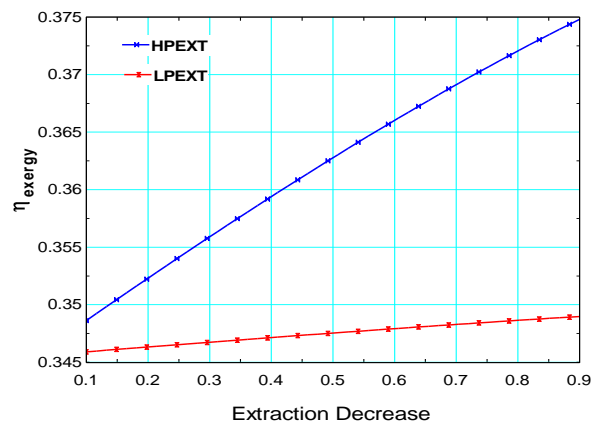
در نمودارهای (۷) و (۸) اثر قابل ملاحظه و مطلوب کاهش زیرکشی‌های فشار بالا نسبت به زیرکشی‌های فشار پایین نشان داده شده است. در کاهش زیرکشی‌های فشار بالا هوازا، عامل

بنابراین ایجاد تغییرات در این زیرکشی به دلیل هزینه‌های ناشی از جایگزینی این بخش مدنظر قرار نگرفته است. یکی دیگر از نمودارهای قابل بحث، مربوط به اثر توان توربین گاز بر توابع هدف در حالت توربین گاز با توان ثابت است که در نمودار شکل (۶) نشان داده شده است. در این نمودار با افزایش توان توربین گاز خصوصیات سیکل بازتوانی برای بهبود حالت اقتصادی طرح در حالت بهینه اقتصادی و بالعکس کاهش راندمان آگرژی سیکل بازتوانی در حالت بهینه فنی در حالت ۴ زیرکشی بوده است. همانگونه که قبلاً بیان شد، دلیل اصلی انتخاب توربین ۲۵ مگاواتی برای بحث موردنظر، توان تولید داخلی این نوع از توربین‌های گاز است. در بخش بعدی به مقایسه کاهش زیرکشی‌های فشار بالا و فشار پایین در مقادیر توابع هدف پرداخته شده است.

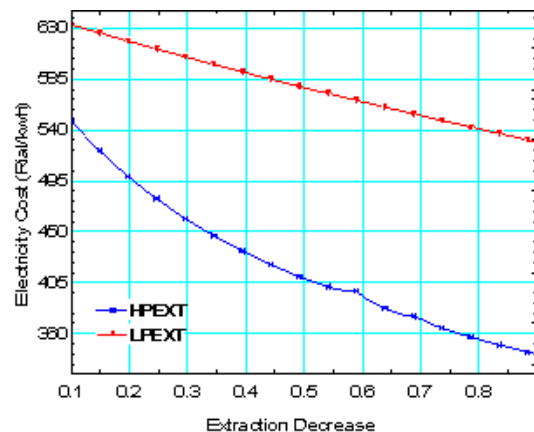
## ۷- نتیجه گیری

با توجه به نیازهای بوجود آمده در کشور از نظر هزینه‌های انرژی، بالابردن راندمان سیستم‌های انرژی از ملزومات چنین رویه‌ای خواهد بود. با توجه به کمبود محسوس توان مورد نیاز در تامین برق مصرف‌کنندگان، یکی از راه‌های قابل قبول برای ایجاد این توان با حفظ بهره‌وری منابع انرژی، بازتوانی نیروگاه‌های بخار است. روش گرمایش آب تغذیه موازی، یکی از راه حل‌ها با هزینه سرمایه‌گذاری اولیه نسبتاً پایین است که دارای قابلیت انعطاف‌پذیری بالایی است. طرح‌های انتخابی در صورت امکان اجراء، قادر خواهند بود که علاوه بر بالا بردن توان تولیدی باعث افزایش کارایی سیستم شوند. از مزیت‌های دیگر این روش عدم نیاز به تغییرات اساسی در نیروگاه موجود و سادگی انجام عملیات است. روش گرمایش آب تغذیه موازی قادر به ایجاد خصوصیات مفید روش‌های جعبه هوای داغ و بویلر کمکی است اما بر خلاف این روش‌ها به سادگی و با کم‌ترین هزینه ناشی از تغییرات سیستم، قابل اجرا است. خصوصیت طرح‌های بیان شده آن است که با حداقل تغییرات در سیکل اصلی، در بردارنده حداقل هزینه ممکن برای ارتقاء خصوصیات سیکل بخار مورد بحث است. در این بین حالت اول از نظر انعطاف‌پذیری نسبتاً پایین در کارکرد نیروگاه در تغییرات بار و طرح سوم نیز به دلیل افزایش قابل ملاحظه هزینه نسبت به طرح دوم دارای اولویت نیستند. با در نظر گرفتن بهای برق در نظر گرفته شده طرح دوم در حالت ۴ زیرکش با توجه به بهینه‌سازی‌های انجام شده در حالت‌های تک هدفه و دو هدفه علاوه بر تامین موارد مطلوب از نظر کارکرد سیکل در بارهای مختلف هزینه عملکردی قابل قبولی را نیز ارائه داده است.

محدودیت برای کاهش زیرکش‌های فشار بالا و چگالنده نیز یک محدودیت کلی در برابر افزایش دبی جرمی بخارات عبوری از توربین‌ها بوده است.



شکل (۷): اثر تغییرات مقادیر زیرکش‌های فشار بالا و فشار پایین بر هزینه برق تولیدی در حالت ۵ زیرکش با توربین توان ثابت



شکل (۸): اثر تغییرات مقادیر زیرکش‌های فشار بالا و فشار پایین بر تابع راندمان انرژی در حالت ۵ زیرکش با توربین توان ثابت

## ۸- مراجع

- [۱] آمار تفصیلی صنعت برق ایران، ویژه مدیریت راهبردی، ۱۳۸۷.
- [۲] سراپچی، کاظم؛ نباتی، حمید؛ "بررسی ترمودینامیکی تبدیل یک نیروگاه بخار موجود به نیروگاه ترکیبی"، هشتمین کنفرانس سالانه انجمن مهندسان مکانیک ایران، ۶۴۹-۶۵۹، ۱۳۷۹.
- [۳] متقیان، رضا، توچایی، محمدتقی، طاهری، محمدجواد. "پروژه طراحی تحقیقاتی نیروگاه بخار SPRD"، شرکت متن، بخش نیروگاه، ۱۳۷۹.
- [۴] اسدیان قهفرخی، محمد؛ صمدی، رامین؛ "مقایسه انواع روش‌های بازتوانی در بهبود عملکرد نیروگاه لوشان"، شانزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک، ۱۳۸۷.
- [۵] مهرپناهی، عبدالله؛ حسینعلی پور، سید مصطفی؛ رضاپور، کامییز؛ "تحلیل وضعیت نیروگاه‌های گازی در فرآیند هدفمندسازی یارانه‌ها"، بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۹.
- [۶] صنایع، سپهر؛ حمزه‌ای، یونس؛ "مدلسازی و بهینه‌سازی فنی، اقتصادی بازسازی نیروگاه‌های بخار با استفاده از توربین‌های گاز"، بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۵.

- Joyce, J., S.; "Parallel Repowering of Existing Steam Turbine Plants With Gas Turbines to Improve Their Operating Efficiency and Environmental Compatibility", Siemens AG, Germany, p.p.31-45, 1996.
- Ameri, M.; Ahmadi, P.; Hamidi, A.; "Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a steam power plant", A case study", Int. J. Energy Res , Vol. 33, No. 5, p.p. 499-512, 2009.
- Kotas, T., J.; "The Exergy Method in Thermal Plant Analysis", Reprint, Krieger, Malabar, 1995.
- Moran, M., J.; "Availability Analysis: A Guide to Efficient Energy Use", ASME Press: New York, U.S.A, 1995.
- Yadav, J., P.; Singh, O.; "Thermodynamic Analysis of Air Cooled Gas/Steam Combined Cycle Plant" , J. of Ins. of Eng. (India) – Mech. Eng., Vol. 86, pp .217-222, 2006.
- Escosa, J., M.; Romeo, L., M.; "Optimization of intercooling compression in co2 capture systems", Appl. Thermal Eng., Vol. 29, No. 8-9, p.p.1744-1751, 2009.
- Maroulis, Z., B.; Saravacos, G., D.; "Food Plants Economics" , Taylor & Francis Group, LLC, 2008.
- Massardo, A., F.; Scialo, M.; "Thermoeconomic Analysis of Gas Turbine Based . Cycle", J. of Eng. for Gas Turbines and Power, ASME, Vol. 122, No. 4, p.p. 664-671, 2000.
- Sanaye., S.; Ziabasharhagh, M.; Ghazinejad, M.; "Optimal Design of Gas Turbine CHP Plant With Preheater and HRSG", Int. J. Energy Res. Vol.33., pp.766-777, 2009.
- [۱۶] Kudlu, N.; "Major Options and Considerations for Repowering With Gas Turbines" BETCHEL Project Report, 1989.
- [۱۷] Moore, T.; "Repowering as Competitive Strategy", Epri Journal, 1995.
- [۱۸] Walters, A., B.; "Power Plant Topping Cycle Repowering", Energy Engineering Journal, p.p. 49-71, 1995.
- [۱۹] Mehrpanahi, A.; Hosseinalipour, S., M.; Mobini, K.; "Investigation of the effects of repowering options on electricity generation cost on Iran steam power plants", International Journal of Sustainable Energy, In Press 2011.
- [۲۰] Shahnazari, M., R.; Foroughi, D.; Fakhrian, H.; "Repowering of Lowshan Power Plant", IGTC Conf, Tokyo , 2003.
- [۲۱] Escosa, J., M.; Romeo, L., M.; "REPOWERING CON TURBINA DE GAS DE UNA CENTRAL TERMOELECTICA DE CARBON DE 335 MW", Energia J., Vol. 31, pp. 50-56, 2005.
- [۲۲] Cooke, D., H.; "Modeling off-design Multistage Turbine Pressures By Stodola's Ellipse", BECHTEL POWER CORPORATION, 1983.
- [۲۳] J'udes, M.; Vigerske, S.; Tsatsaronis, G.; "Optimization of the Design and Partial-Load Operation of Power Plants Using Mixed-Integer Nonlinear programming", Chapter 9 in "Optimization in the Energy Industry", Springer, Berlin, 2008.
- [۲۴] Escosa, J., M.; Romeo, L., M.; "Optimization CO2 Avoided Cost By Means of Repowering", A ppl. Energy J., Vol. 86, No.1, pp. 2351-2358, 2009.

۹- پی نوشت

- <sup>۱</sup> Partial Repowering  
<sup>۲</sup> Full Repowering  
<sup>۳</sup> Parallel Feed Water Heating Repowering  
<sup>۴</sup> Genetic Algorithm  
<sup>۵</sup> Steam Turbine Extraction  
<sup>۶</sup> Main Steam  
<sup>۷</sup> Counter Flow Heat Exchanger  
<sup>۸</sup> Uncontrolled  
<sup>۹</sup> Stodola Law  
<sup>۱۰</sup> Terminal Temperature Difference (TTD)  
<sup>۱۱</sup> Initial Temperature Difference (ITD)  
<sup>۱۲</sup> Engineering Equation Solver (EES)

		علائیم و اختصارات:	
$LHV$	ارزش حرارتی پایین سوخت		
$LPFW$	آب تغذیه کم فشار	CC	سیکل ترکیبی
$LPFWH$	گرمکن آب تغذیه کم فشار	$C_f$	هزینه سوخت مصرفی، [\$/kJ]
$M$	هزینه سالیانه سوخت مصرفی، [\$]	$C_{Peg}$	ظرفیت گرمایی ویژه گازهای خروجی
$\dot{m}_{fb}, \dot{m}_{fg}$	دبی سوخت توربین گاز و بویلر	CRF	فاکتور برگشت سرمایه
$O \& M$ یا $OM$	هزینه سالیانه تعمیر و نگهداری، [\$]	$e$	اگرژی مخصوص، [kJ/kg]
$t_s$	زمان کارکرد سالانه نیروگاه، [s]	$f_{M \& S}$	شاخص هزینه تجهیزات
$\Delta T_{lm}$	اختلاف متوسط لگاریتمی، [°K]	$f_{E, Rial}$	شاخص تغییر واحد پول
$TET$	دمای گاز خروجی از توربین، [°K]	$f$	سوخت
$TCI$	هزینه نهایی خرید تجهیزات، [\$]	GT و gt	سیکل توربین گاز
$\dot{W}_{st, net}, \dot{W}_{gt, net}$	توان توربین بخار و گاز، [MW]	HEX	مبدل حرارتی
$Z_C$	سرمایه گذاری اولیه، [\$/kWh]	HPFW	آب تغذیه فشار بالا
$Z_{OM}$	هزینه تعمیر و نگهداری، [\$/kWh]	HPFWH	گرمکن آب تغذیه فشار بالا
$Z_f$	هزینه سوخت مصرفی، [\$/kWh]	$HR_{pp}$	نرخ حرارتی نیروگاه [kJ/kWh]
$Z_E$	کل هزینه برق تولیدی، [\$/kWh]	$i$	نرخ بهره، [%]