

## طراحی یک سیستم تولید همزمان سرمایش، گرمایش و قدرت برای استفاده در کشتی

امیر سلمانی<sup>۱</sup>، مجید عباسپور<sup>۲</sup>، محمد حسن سعیدی<sup>۳</sup>

[abbpor@sharif.edu](mailto:abbpor@sharif.edu)

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گرایش معماری کشتی  
 ۲- استاد دانشکده کشتی سازی دانشگاه صنعتی شریف  
 ۳- استاد دانشکده کشتی سازی دانشگاه صنعتی شریف

### چکیده

این پژوهش با استفاده از انرژی اتلافی موتور دیزل، به تولید قدرت، سرمایش و گرمایش می پردازد. مدار رانکین برای بازیابی انرژی اتلافی برای تولید الکتروسیته و انرژی اتلافی کندانسور، در راه اندازی سیستم تبرید جذبی استفاده شده است. مدار رانکین با استفاده از مخزن گرمایش آب تغذیه باز در طی دو مرحله بهبود یافته است. تاثیر تغییر پارامترهایی همچون دمای اواپراتور، فشار اواپراتور و فشار مخازن گرمایش با هدف افزایش برق تولیدی بررسی شده است. در شرایطی که قدرت موتور ۵۱,۴۸۰ کیلووات می باشد، حداکثر توان تولیدی از مدار CCHP برابر با ۳۴۷۱ کیلووات و سرمایش تولیدی همزمان برابر با ۱۷۶۰۱ کیلووات می باشد. مقدار افزایش برق تولیدی در مدار اصلاحی اول برابر با ۲۲۴ کیلووات و در مدار اصلاحی دوم برابر با ۲۰۲ کیلووات است که در حدود ۷ درصد نسبت به مدار اولیه افزایش تولید قدرت داشته ایم.

واژگان کلیدی: موتورهای احتراق داخلی (IC)، سیستم های تولید همزمان سرمایش، گرمایش و قدرت، بازیابی انرژی اتلافی، مدار رانکین، سیستم تبرید جذبی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۸/۰۳/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۹/۰۱

## ۱- مقدمه

الکتريسيته در محل مورد استفاده توليد مي‌گردد و تلفات گرمایی ناشی از توليد الكتريسيته، برای گرمایش فضا و گرمایش آب گرم مصرفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به مزایای خاص سیستم‌های توليد همزمان سرمايش، گرمایش و قدرت از جمله توليد قدرت با راندمان بالاتر، به عبارتی دیگر توليد قدرت، سرمايش و گرمایش با قيمت پایین‌تر، کاهش مصرف سوخت، افزایش اطمینان پذیری و قابلیت اعتماد در سیستم تامین قدرت و سازگاری با محیط زیست، استفاده از چنین سیستم‌هایی به صرفه به نظر می‌رسد.

در ارتباط با مسائل و مشکلات مربوط به انرژی و مشکلات محیط زیستی در سطح کشتی‌ها، اکثر تحقیق‌ها به این سمت معطوف شده است که روش‌های بهینه‌ای را برای کاهش مصرف سوخت پیشنهاد کنند. در بیشتر کشتی‌ها، از موتور دیزل به عنوان محرک استفاده می‌شود، مشتری اصلی سوخت‌های فسیلی موتورهای دیزل می‌باشند و آلودگی بالایی از لحاظ انتشار گازهای آلاینده دارند. کپالدو به همراه همکاران به بررسی تاثیر انتشار گازهای آلاینده ناشی از حضور کشتی‌ها بر روی چرخه سولفور و آب و هوا در سطح اقیانوس پرداخته است [۱].

ترانانتوس به بررسی میزان انتشار آلاینده‌های ناشی از فعالیت کشتی در یک مسیر کشتی مسافری بین دو نقطه در اروپا پرداخته است. آلاینده‌های ناشی از فعالیت کشتی و آلودگی‌های ناشی از مسافری در یک دوره دوازده ماهه بین سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۰۹ مورد بررسی قرار گرفته است. آلاینده‌های پیش‌بینی شده بر حسب نوع گاز، میزان آلاینده‌ها در فصل‌های مختلف و میزان و شدت فعالیت کشتی مورد تحلیل قرار گرفته است و با استفاده از فاکتورهای هزینه خارجی آلاینده‌ها، به تخمین محاسبات هزینه خارجی آلاینده‌ها پرداخته است [۲].

از دیگر رویکردها در ارتباط با کاهش مصرف انرژی و مشکلات مرتبط با محیط زیست، استفاده از فناوری‌های مرتبط با استفاده از انرژی اتلافی می‌باشد. بازیابی انرژی اتلافی (WHR<sup>۲</sup>) در حوزه موتورهای دیزل که در اکثر کشتی‌ها از آن استفاده شده است، از جمله مباحثی است که در سال‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. شو به همراه همکاران به بررسی بازیابی انرژی گرمایی اتلافی در موتورهای دیزل در سطح کشتی‌ها پرداخته است [۳].

یک شبکه توليد همزمان برق، سرمايش و گرمایش به همراه واحدهای بازیابی انرژی و یا منابع انرژی تجدیدپذیر یک راه حل مناسب مشکلات مرتبط با انرژی می‌باشد. افزایش درخواست انرژی، افزایش قیمت انرژی و نگرانی‌های مرتبط با محیط زیست از جمله مشکلاتی می‌باشد که اهمیت استفاده از چنین سیستم‌هایی را مشخص می‌سازد. بازده یک شبکه MCCHP<sup>۱</sup> از نقطه‌نظر فنی، اقتصادی و سازگاری با محیط زیست کاملاً به طراحی و مدیریت انرژی این شبکه وابسته است، اولین و مهمترین گام برای رسیدن به این منظور مدل‌سازی دقیق چنین سیستم‌هایی است. این روزها اکثریت محرک‌های اولیه‌ی استفاده شده و ماشین‌آلات کمکی در کشتی‌های اقیانوس پیما، موتورهای دیزل می‌باشد. به طور مثال ۹۶ درصد موتور کشتی‌ها در آلمان از نوع دیزل است. موتورهای احتراقی فشار بالا هنوز هم به عنوان موتور پایه کشتی‌ها مطرح است، از آنجایی که سوخت مصرفی آن ارزان قیمت است و در مقایسه با دیگر موتورها به نسبت دارای بازدهی بالا (گاهی بیش از ۵۰ درصد) می‌باشد. موتورهای دیزل با هر نوع سوخت اعم از سوخت سبک یا سنگین سازگاری دارند، تعمیرات و نگهداری آن‌ها با ساده‌ترین تکنولوژی‌ها قابل انجام است و دارای قیمت پایینی هستند.

با گسترش و توسعه سریع سیستم‌های توليد انرژی به طور پراکنده، سیستم‌های توليد همزمان گرمایش و قدرت (CHP<sup>۲</sup>) و سیستم‌های توليد همزمان سرمايش، گرمایش و قدرت (CCHP<sup>۳</sup>)، به عنوان هسته اصلی راه حل‌های مرتبط با راندمان انرژی و کاهش توليد گازهای گلخانه‌ای مطرح گردید. سیستم‌های CCHP به طور گسترده‌تر از سیستم‌های CHP در ابعاد بزرگ در نیروگاه‌ها و سایر صنایع استفاده شده است.

سیستم‌های توليد همزمان برق و حرارت (CHP)، دو شکل از انرژی را به طور همزمان توليد می‌کنند و بیش از صد سال قدمت دارند. در ابتدا در نیروگاه‌های توليد برق با توربین گاز، با استفاده از حرارت بازیافتی از توربین، آب گرم برای گرمایش ایجاد می‌شد. در این سیستم‌ها،

<sup>۱</sup> micro-combined cooling, heating and power systems

<sup>۲</sup> combined heating and power systems

<sup>۳</sup> combined cooling, heating and power systems

سیستم دو حلقه‌ای سیکل رانکین ارگانیک [۱۰] و مقدار بهینه پارامترهای عملیاتی [۱۱] اشاره نمود. نتایج نشان می‌دهد استفاده از چنین سیستم‌هایی به کاهش مصرف سوخت و بهبود بازده گرمایی منجر می‌شود.

در سطح کشتی‌ها سیستم‌های تبرید کاربردهای متفاوتی همچون نگهداری از مواد خوراکی، تهویه مطبوع و تولید یخ در کشتی‌های ماهی‌گیری دارند. به طور معمول سیستم‌های تبرید مکانیکی در کشتی‌ها استفاده می‌شوند، چنین سیستم‌هایی از سوخت یا انرژی الکتریکی برای ایجاد سرمایش استفاده می‌کنند. از طرفی می‌توان با استفاده از سیستم‌های تبرید جذبی که از انرژی گرمایی برای تولید سرمایش استفاده می‌کنند بهره برد و به بازیابی انرژی گرمایی اتلافی پرداخت.

چنین سیستم‌های تبرید از سوخت استفاده نمی‌کنند در نتیجه مشکل انتشار گازهای آلاینده برطرف می‌شود و همچنین مشکلات مربوط به استفاده از سی‌اف‌سی‌ها و دیگر دسته از سیال‌های خطرناک برای لایه ازون و یا مرتبط با گرمایش زمین حذف می‌گردد [۱۲]. فرناندز سیرا و همکاران یک سیستم تبرید جذبی آب-آمونیاک را با هدف سرمایش محصولات در یک کشتی ماهیگیری طراحی کرده‌اند. استفاده از انرژی اتلافی گاز خروجی و بازیابی آن در این سیستم سبب شده است ما بین ۲ تا ۴ درصد بهبود در مصرف سوخت رخ دهد [۱۳].

مانزلا و همکاران نیز به بررسی یک سیستم تبرید جذبی برای بازیابی انرژی اتلافی گازهای خروجی پرداخته‌اند که در آن پس از شروع به کار کردن، سیستم پس از سه ساعت به یک دمای پایا مابین ۴ تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، تاثیر انتشار گازهای خروجی در این مطالعه بررسی شده است [۱۴].

در تحقیقات صورت گرفته نشان داده شده است که در مقایسه با یک سیستم معمولی و سنتی، راندمان کلی با استفاده از یک سیستم CCHP تا مقدار ۵۹ تا ۸۸ درصد افزایش می‌یابد. این میزان افزایش به استفاده بهینه از انرژی برای ایجاد سرماش و گرمایش مرتبط می‌گردد. به عنوان منبع اصلی انرژی الکتریسته، واحد تولید قدرت دارای راندمانی در حدود ۳۰ درصد در تولید برق است، با استفاده از سیستم‌های بازیابی انرژی گرمایی، انرژی گرمایی تولیدی به عنوان منبع اصلی برای ایجاد سرمایش در یخچال‌های جذبی و همچنین گرمای مورد نیاز برای یک واحد گرمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به بازیابی انرژی اتلافی در کشتی‌ها شده است. از جمله می‌توان به کارهای صورت گرفته در زمینه گرمایش فضای مسافری [۴]، گرمایش محفظه سوخت جهت احتراق بهتر سوخت‌های سنگین [۵] و گرمایش مخزن آب بالاست با هدف کاهش خطر انتقال ارگانیک‌های خطرناک در جابجایی کشتی‌ها مابین دو نقطه [۶] و دیگر نیازهای گرمایشی اشاره کرد. منتها می‌بایست توجه داشت که نیازهای گرمایشی که در چنین مقالاتی برطرف شده است، پربازده نمی‌باشند و از مقدار کمی از انرژی اتلافی استفاده می‌شود، به عبارت دیگر، انرژی اتلافی کشتی‌ها دارای ظرفیت بالاتری برای بهره برداری اعم از ایجاد سرمایش، گرمایش و تولید قدرت می‌باشد.

روش‌های گوناگون بازیابی انرژی اتلافی از موتورهای دیزل شامل استفاده از توربین، سیستم‌های تبرید، ترموالکتریک، سیکل رانکین و سیستم‌های نمک زدایی در تحقیقی که توسط شو و همکاران صورت گرفته است بیان شده است [۳]. چنانچه بتوان از چند سیستم در کنار هم بهره برد، استفاده‌ای بهتر از انرژی اتلافی صورت گرفته است و می‌توان بازده کلی را افزایش داد.

همانطور که پیشتر اشاره شد، در اکثر کشتی‌ها از موتورهای دیزل استفاده شده است، در ارتباط با چنین موتورهایی مطالعات و تحقیقات متنوعی در زمینه بازیابی انرژی گرمایی صورت گرفته است. تنگ به پیشنهاد یک سیکل رانکین ارگانیک فوق بحرانی پرداخته است که در آن بازیابی انرژی گرمایی اتلافی از موتورهای دیزل با بار بالا را مطرح می‌کند و در آن از انرژی اتلافی ناشی از خنک کننده هوا و خنک کننده آب در پیش گرمایش و انرژی اتلافی گازهای خروجی در اواپراتور استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم می‌تواند به بازیابی ۲۰ درصد انرژی اتلافی موتور بپردازد و راندمان سیستم ترکیبی را به حدود ۵۰ درصد برساند [۷]. سرینوسن و همکاران به معرفی یک سیکل رانکین ارگانیک به موازات یک سیستم بازگرداننده گاز خروجی پرداخته‌اند، در چنین سیستمی ۷ درصد بهبود در زمینه راندمان سوخت و ۱۸ درصد کاهش در تولید و انتشار گازهای  $\text{NO}_x$  و  $\text{CO}_2$  به طور متوسط رخ داده است [۸].

کارهای گوناگون دیگری در زمینه بهینه‌سازی سیکل‌های رانکین صورت گرفته است، از جمله می‌توان به کارایی و بازده طرح‌های مختلف [۹]، انتخاب سیال کاری در یک

### ۱-۱- نوآوری صورت گرفته در این زمینه

در این پژوهش، مدار پیشنهادی توسط لیانگ و همکاران در طی دو مرحله و از طریق افزایش تعداد توربین و نیز اضافه کردن مخازن گرمایش آب گرم، بهبود یافته است. باید تاکید کرد که در پژوهش حاضر مدار اولیه و مدارهای اصلاحی به ازای دمای کندانسور ۷۰ درجه سلسیوس جداگانه مدلسازی شده اند. مقدار افزایش برق تولیدی در مدار اصلاحی اول برابر با ۲۲۴ کیلووات و در مدار اصلاحی دوم برابر با ۲۰۲ کیلووات است. همچنین نقش پارامترهای مختلف همچون دمای فوق گرمایش، دمای کندانسور، فشار مخزن گرمایش آب تغذیه، راندمان توربین و پمپ در نمودارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با تغییر دو پارامتر، در نمودارهای سه بعدی، رفتار سیستم بررسی شده است.

### ۲- معرفی مدار

پنج قسمت اساسی در مدار رانکین وجود دارد، شامل توربین بخار، کندانسور، پمپ، پیش گرمایش و اواپراتور. آب در حالت مایع اشباع ابتدا به فشار بالا پمپ شده، برای جذب انرژی گرمایی آب خنک کننده موتور وارد پیش گرمایش می شود و سپس در اواپراتور با استفاده از گاز خروجی موتور به حالت بخار خشک تبدیل شود، سپس با چرخاندن توربین، افت فشار و دما پیدا می کند و سبب چرخاندن توربین و ژنراتور می شود. در انتها گاز خروجی از توربین با از دست دادن گرما در کندانسور به مایع اشباع تبدیل می شود، کندانسور سیکل رانکین به عنوان اواپراتور (ژنراتور) در سیکل تبرید جذبی کار می کند، گرمای بخار خروجی از توربین برای جداسازی بخار آمونیاک از محلول غلیظ آب-آمونیاک استفاده می شود.

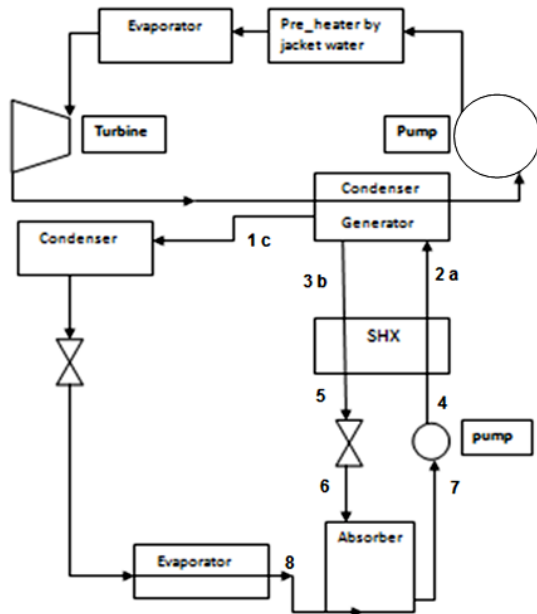
بخار آمونیاک یکسو شده از کندانسور عبور داده می شود تا اینکه به مایع تبدیل شود و سپس وارد شیر انبساط می شود تا دما و فشار آن افت پیدا کند و مقدار جریان جرمی سیکل کنترل شود، مایع آمونیاک در اواپراتور وارد شده و گرما را از محیط اطراف خود جذب می کند. گاز آمونیاک خروجی از اواپراتور، در محلول رقیق جذب می گردد، به وسیله شیر انبساط فشار محلول رقیق تا فشار اواپراتور کاهش می یابد.

در این فرآیند برای افزایش بازده، جاذب با آب دریا خنک

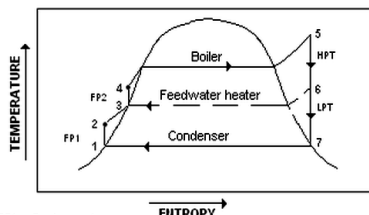
مزیت دیگر یک سیستم CCHP، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. به عبارت دیگر تولید همزمان گرمایش، سرمایش و قدرت، باعث چنین کاهش می‌شود. در حالت کلی از انرژی اتلافی واحد تولید قدرت برای ایجاد سرمایش و گرمایش استفاده می‌گردد، استفاده بهینه از انرژی سبب کاهش مصرف سوخت می‌گردد و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی سبب کاهش انتشار گازهای آلاینده می‌شود و از طرف دیگر برخی از محرک‌های اولیه سیستم‌های CCHP منابعی همچون انرژی باد و انرژی خورشیدی می‌باشند و خود به انتشار کمتر گازهای آلاینده کمک می‌کند. از طرف دیگر استفاده از فناوری‌های جدید در زمینه محرک اولیه سبب تولید کمتر گازهای گلخانه‌ای می‌شود که می‌توان به پیل‌های سوختی اشاره کرد که از جمله مباحث قابل توجه در سال‌های اخیر شمرده می‌شود، نشان داده شده است که استفاده از پیل‌های سوختی در سیستم‌های CCHP باعث افزایش راندمان سیستم تا مقدار ۸۵ تا ۹۰ درصد می‌گردد. در مقایسه با محرک اولیه‌های سنتی مانند موتورهای احتراق داخلی، محرک اولیه‌های جدیدتر می‌توانند با استفاده از انرژی اولیه پایین‌تر، برق بیشتری تولید کنند و با راندمان بالاتر میزان انتشار گازهای آلاینده کاهش می‌یابد.

مزیت دیگر سیستم‌های CCHP، قابلیت اطمینان پذیری چنین سیستم‌هایی می‌باشد که می‌تواند به عنوان توانایی ضمانت انرژی با قیمت مناسب، تعبیر گردد. استفاده از نیروگاه‌های مرکزی برای تولید برق معایب مخصوص به خود را دارد که از جمله آن می‌توان به آلودگی هوا، تغییرات آب و هوایی، افزایش قیمت انرژی و تولید انرژی با قیمت بالاتر اشاره کرد که سبب تشکیل بازار خاص انرژی و نیازها و درخواست‌های مشتریان شده است. استفاده از سیستم‌های CCHP که انرژی را به صورت غیرمتمرکز تولید می‌کند، با مشکلات و ریسک‌های خارجی در ارتباط با انتقال نیرو مقابله می‌کنند و مشکلات قطعی الکتریسیته ناشی از مشکلات خطوط انتقال را ندارند و به طبع دارای اعتماد پذیری بالاتری هستند [۱۵].

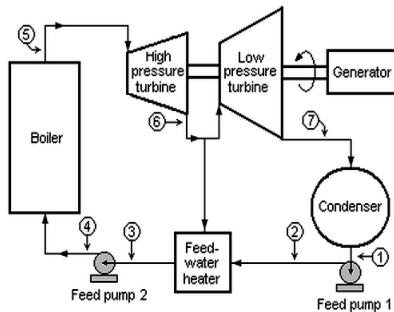
لیانگ و همکاران در طی پژوهشی به معرفی یک مدار ترکیبی در قالب تولید همزمان سرمایش و گرمایش و قدرت پرداخته اند، در این پژوهش از یک سیکل ترکیبی رانکین و سیستم تبرید جذبی جهت بازیابی گرمای اتلافی موتور استفاده شده است، شکل شماتیک آن در شکل (۱) آورده شده است [۱۶].



شکل (۱) سیکل ترکیبی رانکین و سیستم تبرید جذبی بازبای گرمای اتلافی موتور پیشنهادی لیانگ و همکاران [۱۶].



FP1 = Feed pump 1  
FP2 = Feed pump 2  
HPT = High pressure turbine  
LPT = Low pressure turbine



شکل (۲) شکل شماتیک سیکل رانکین با استفاده از گرمایش آب تغذیه و دیاگرام دما-آنترپی مرتبط با آن

در سیستم تبرید جذبی، مبرد خروجی از کندانسور و اواپراتور به ترتیب به صورت مایع اشباع و بخار اشباع و محلول رقیق خروجی از ژنراتور به صورت اشباع در نظر گرفته می‌شود. همچنین اتلافات انرژی گرمایی ناچیز در نظر گرفته می‌شود.

معادلات حاکم در این حالت با توجه به شکل (۲) عبارت‌اند از:

پمپ ۱:  $v$  نشان دهنده چگالی حجمی،  $n_p$  راندمان پمپ،  $P$

می‌گردد و دما و فشار آن را کاهش می‌دهد، در نتیجه آمونیاک راحتتر در محلول رقیق جذب می‌شود. محلول غلیظ با استفاده از پمپ به سمت مبدل گرمایی و سپس ژنراتور حرکت می‌کند.

### ۲-۱- مشخصات موتور کشتی مورد استفاده در مدلسازی

مشخصات مورد نظر در جدول (۱) آورده شده است. گرمای ویژه بخار خروجی با توجه به ترکیب گازهای خروجی ۱,۱۱۷  $\text{kJ/kg.K}$  می‌باشد، مشخصات موتور در جدول (۱) نیز آورده شده است.

### ۳- معادلات حاکم بر مدار با استفاده از یک مخزن گرمایش آب تغذیه و سیستم تبرید جذبی

نمودار سیکل رانکین با استفاده از گرمایش آب تغذیه، نمودار سیکل رانکین با استفاده از گرمایش آب تغذیه، در زیر آمده است، نمودار دما-آنترپی آن نیز رسم شده است. میزان جریان استخراجی در نقطه ۶، با استفاده از تعیین میزان افزایش دمای مورد نیاز آب پمپ شده از پمپ اول و با تعیین فشار میانی محاسبه می‌گردد. افت فشار ۵ درصد برای بویلر و کندانسور در نظر گرفته شده است، همچنین راندمان توربین، ژنراتور و پمپ به ترتیب برابر با ۰,۷ و ۰,۸ و ۰,۸ در نظر گرفته شده است.

جدول (۱) مشخصات موتور کشتی

قدرت موتور	۵۱,۴۸۰ کیلووات
دمای گاز خروجی	۳۱۴ درجه سانتی‌گراد
جریان جرم خروجی	۳۷۹۸۱۹ کیلوگرم بر ساعت
نسبت هوا به سوخت	۱۸,۵

$$\dot{m}_8 c + \dot{m}_6 b = \dot{m}_7 a \quad (13)$$

مبدل گرمایی مابین محلول رقیق و غلیظ (SHX<sup>۲</sup>):  
معادلات به صورت زیر می‌باشد، باید توجه داشت که  $\varepsilon$   
راندمان SHX می‌باشد.

$$\dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_5 h_5 \quad (14)$$

$$T_5 = \varepsilon T_4 + (1 - \varepsilon) T_3 \quad (15)$$

#### ۴- روش مدل‌سازی مسئله

برای مدل‌سازی از نرم افزار EES استفاده شده است، فرضیات مربوط به راندمان‌ها، افت فشار‌ها، فشارهای استفاده شده، دماهای استفاده شده از مقالات و کتب مربوطه استخراج شده است و نزدیک به واقعیت در نظر گرفته شده است. در هر دو مدار، نحوه رفتار سیستم با تغییر پارامترها در نظر گرفته شده است. همچنین با تغییر دو متغییر، نمودارهای سه بعدی از رفتار سیستم مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

#### ۵- نتایج مدل‌سازی مدار ابتدایی

در مدار توضیح داده شده، دمای کندانسور برابر با ۷۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است و حداکثر فشار اواپراتور برای حالتی است که خروجی توربین دارای کیفیت بخار بالاتر از ۰,۹ باشد. میزان برق تولیدی، گرمایش اتلافی کندانسور و سرمایش تولیدی در سیستم تبرید جذبی به ازای دماهای متفاوت اواپراتور آمده است.

#### ۵-۱- نتایج مدل‌سازی در دمای فوق گرمایش ۱۴۰

##### درجه سانتی‌گراد

حداکثر برق تولیدی برابر با ۲۳۳۴ کیلووات در فشار ۳۶۱ کیلوپاسگال می‌باشد، گرمایش اتلافی از کندانسور و سرمایش ایجاد ناشی از سیکل تبرید جذبی و نیز برق تولیدی در جدول (۲) آورده شده است.

#### ۵-۲- نتایج مدل‌سازی در دمای فوق گرمایش ۱۶۰

##### درجه سانتی‌گراد

حداکثر برق تولیدی برابر با ۲۸۲۵ کیلووات در فشار ۶۱۶,۵ کیلوپاسگال می‌باشد، گرمایش اتلافی از کندانسور و

نشان دهنده فشار و  $W_p$  نشان دهنده کار پمپ به ازای واحد جریان جرمی است.

$$W_p = \frac{v[1](P[2] - P[1])}{\eta_p} \quad (1)$$

$$h[2] = h[1] + W_p \quad (2)$$

روابط پمپ دو مشابه با پمپ یک می‌باشد.

مخزن گرمایش آب تغذیه: نقاط ۲، ۳ و ۶ در یک فشارند،  $X$  میزان درصد جرمی استخراج شده در فشار میانی و  $h$  نشان دهنده انتالپی<sup>۱</sup> است، از بالانس انرژی داریم:

$$xh(6) + (1 - x)h(2) = h(3) \quad (3)$$

توربین فشار بالا:  $i$  نشان دهنده حالت ایزنتروپیک،  $\eta_T$  راندمان توربین،  $\eta_G$  راندمان ژنراتور و  $W_T$  نشان دهنده برق تولیدی از توربین به ازای واحد جریان جرمی است.

$$W_T = (h(5) - h_i(6))\eta_T\eta_G \quad (4)$$

$$h(6) = h(5) - W_T \quad (5)$$

روابط توربین فشار پایین مانند روابط توربین فشار بالا می‌باشد.

کل کار خروجی به صورت زیر محاسبه می‌شود،  $m$  جریان جرمی در واحد زمان است.

$$W_{net} = (W_{T2} - W_{P2})\dot{m} + (1 - x)(W_{T1} - W_{P1})\dot{m} \quad (6)$$

گرمای اتلافی کندانسور عبارت است از:

$$Q_{cond} = \dot{m}(1 - x)(h[7] - h[1]) \quad (7)$$

معادلات حاکم بر سیستم تبرید جذبی با توجه به شکل (۱) به صورت زیر می‌باشد:

شیرهای انبساط به صورت فرآیند آدیاباتیک در نظر گرفته می‌شود و در آن:

$$h_{in} = h_{out} \quad (8)$$

ژنراتور: محلول غلیظ آمونیاک-آب، انرژی اتلافی در کندانسور سیکل رانکین را جذب می‌کند.  $\dot{m}$  جریان جرمی در سیکل رانکین است و  $a, b, c$  نشان دهنده غلظت آمونیاک می‌باشد.

$$Q_{cond, Rankine\ cycle} = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2 \quad (9)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_1 \quad (10)$$

$$\dot{m}_2 a = \dot{m}_3 b + \dot{m}_1 c \quad (11)$$

جاذب: بخار آمونیاک وارد جاذب می‌شود و در محلول رقیق جذب می‌شود، جاذب به وسیله آب دریا خنک می‌شود.

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_8 = \dot{m}_7 \quad (12)$$

<sup>۱</sup> انتالپی (enthalpy): اشاره به اندازه گیری کل حرارت یک سیستم

تحت فشار ثابت دارد.

<sup>۲</sup> solution heat exchanger

۲۷۵	۲۳۹۴۹	۱۸۸۷۷	۲۰۹۱
۳۰۰	۲۳۸۵۰	۱۸۷۹۹	۲۱۷۱
۳۲۵	۲۳۷۵۹	۱۸۷۲۷	۲۲۴۴
۳۵۰	۲۳۶۷۶	۱۸۶۶۲	۲۳۱۲
۳۷۵	۲۳۵۹۸	۱۸۶۰۰	۲۳۷۵
۴۰۰	۲۳۵۲۵	۱۸۵۴۳	۲۴۳۳
۴۵۰	۲۳۳۹۳	۱۸۴۳۹	۲۵۴۱
۵۰۰	۲۳۲۷۶	۱۸۳۴۷	۲۶۴۶
۵۵۰	۲۳۱۷۰	۱۸۲۶۳	۲۷۲۲
۶۰۰	۲۳۰۷۴	۱۸۱۸۷	۲۸۰۱
۶۱۶.۵	۲۳۰۴۴	۱۸۱۶۴	۲۸۲۵

جدول (۴) میزان گرمایش اتلافی مدار رانکین، سرمایش و الکتریسته تولیدی در دمای فوق گرمایش ۱۸۰ درجه سانتی گراد

فشار بخار اشباع (Kpa)	گرمای کندانسور (kW)	سرمای تولیدی (kW)	برق تولیدی (kW)
۱۰۰	۲۵۰۵۲	۱۹۶۶۳	۱۱۸۶
۱۵۰	۲۴۵۸۸	۱۹۲۹۹	۱۵۵۸
۲۰۰	۲۴۲۶۲	۱۹۰۴۳	۱۸۲۰
۲۵۰	۲۴۰۱۰	۱۸۸۴۶	۲۰۲۳
۳۰۰	۲۳۸۰۶	۱۸۶۸۵	۲۱۸۷
۳۵۰	۲۳۶۴۳	۱۸۵۵۰	۲۳۲۶
۴۰۰	۲۳۴۸۵	۱۸۴۳۴	۲۴۴۶
۴۵۰	۲۳۳۵۵	۱۸۳۳۱	۲۵۵۲
۵۰۰	۲۳۲۲۹	۱۸۲۴۰	۲۶۴۶
۵۵۰	۲۳۱۲۴	۱۸۱۵۸	۲۷۳۰
۶۰۰	۲۳۰۳۹	۱۸۰۸۳	۲۸۰۸
۶۵۰	۲۲۹۵۳	۱۸۰۱۶	۲۸۷۸
۷۰۰	۲۲۸۷۳	۱۷۹۵۳	۲۹۴۴
۷۵۰	۲۲۷۹۸	۱۷۸۹۴	۳۰۰۴
۸۰۰	۲۲۷۲۹	۱۷۸۴۰	۳۰۶۱
۸۵۰	۲۲۶۶۵	۱۷۷۹۰	۳۱۱۴
۹۰۰	۲۲۶۰۴	۱۷۷۴۲	۳۱۶۴
۹۵۰	۲۲۵۴۷	۱۷۶۹۷	۳۲۱۱
۹۹۰.۵	۲۲۵۰۳	۱۷۶۶۳	۳۲۴۷

سرمایش ایجاد ناشی از سیکل تبرید جذبی و نیز برق تولیدی در جدول (۳) آورده شده است.

### ۳-۵- نتایج مدل سازی در دمای فوق گرمایش ۱۸۰ درجه سانتی گراد

حداکثر برق تولیدی برابر با ۳۲۴۷ کیلووات در فشار ۹۹۰.۵ کیلوپاسگال می باشد، گرمایش اتلافی از کندانسور و سرمایش ایجاد ناشی از سیکل تبرید جذبی و نیز برق تولیدی در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۲) میزان گرمایش اتلافی مدار رانکین، سرمایش و الکتریسته تولیدی در دمای فوق گرمایش ۱۴۰ درجه سانتی گراد

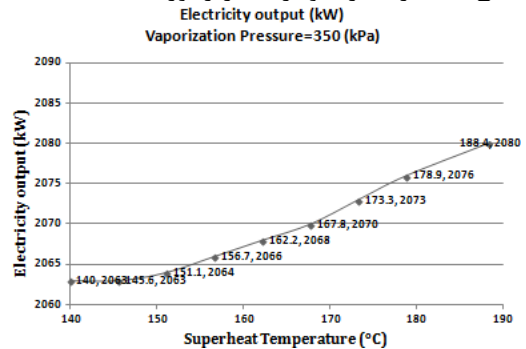
فشار بخار اشباع (Kpa)	گرمای کندانسور (kW)	سرمای تولیدی (kW)	برق تولیدی (kW)
۱۰۰	۲۵۱۶۷	۱۹۸۳۷	۱۱۳۰
۱۲۵	۲۴۹۰۴	۱۹۶۳۰	۱۳۴۱
۱۵۰	۲۴۶۹۱	۱۹۴۶۲	۱۵۱۲
۱۷۵	۲۴۵۱۱	۱۹۳۲۰	۱۶۵۷
۲۰۰	۲۴۳۵۵	۱۹۱۹۷	۱۷۸۳
۲۲۵	۲۴۲۱۸	۱۹۰۸۹	۱۸۹۳
۲۵۰	۲۴۰۹۶	۱۸۹۹۳	۱۹۹۲
۲۷۵	۲۳۹۸۶	۱۸۹۰۶	۲۰۸۱
۳۰۰	۲۳۸۸۵	۱۸۸۲۷	۲۱۶۲
۳۲۵	۲۳۷۹۳	۱۸۷۵۴	۲۲۳۷
۳۵۰	۲۳۷۰۸	۱۸۶۸۷	۲۳۰۶
۳۶۱	۲۳۶۷۳	۱۸۶۶۰	۲۳۳۴

جدول (۳) میزان گرمایش اتلافی مدار رانکین، سرمایش و الکتریسته تولیدی در دمای فوق گرمایش ۱۶۰ درجه سانتی گراد

فشار بخار اشباع (Kpa)	گرمای کندانسور (kW)	سرمای تولیدی (kW)	برق تولیدی (kW)
۱۰۰	۲۵۱۱۳	۱۹۷۹۵	۱۱۵۵
۱۲۵	۲۴۸۵۵	۱۹۵۹۱	۱۳۶۲
۱۵۰	۲۴۶۴۴	۱۹۴۲۵	۱۵۳۱
۱۷۵	۲۴۴۶۶	۱۹۲۸۵	۱۶۷۴
۲۰۰	۲۴۳۱۳	۱۹۱۶۴	۱۷۹۷
۲۲۵	۲۴۱۷۸	۱۹۰۵۸	۱۹۰۶
۲۵۰	۲۴۰۵۸	۱۸۹۶۳	۲۰۰۳

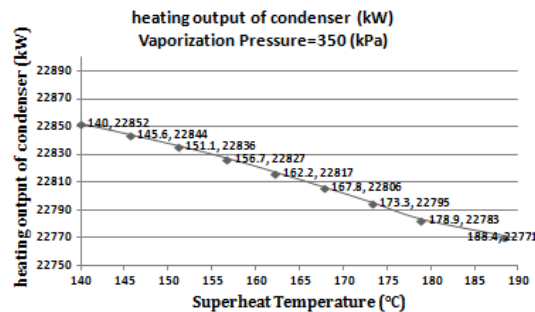
## ۶- بررسی اثر تغییرات دما بر روی الکتریسیته و سرمایش ایجادی

نتایج مدلسازی در نمودارهای زیر آورده شده است.



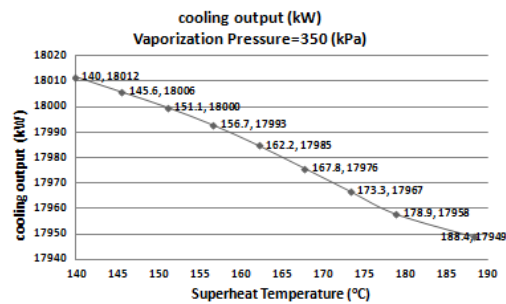
شکل (۳) نتایج برق تولیدی در مدلسازی در فشار تولید بخار

۳۵۰ کیلوپاسگال



شکل (۴) نتایج گرمایش اتلافی کندانسور مدار رانکین در

مدلسازی در فشار تولید بخار ۳۵۰ کیلوپاسگال



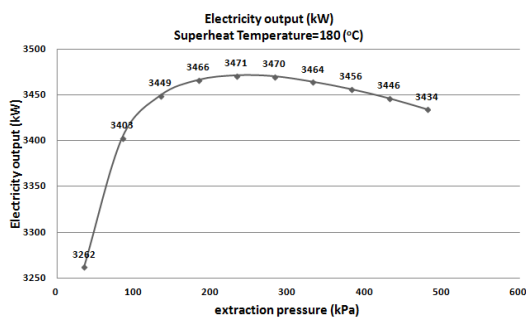
شکل (۵) نتایج سرمایش تولیدی در مدلسازی در فشار تولید

بخار ۳۵۰ کیلوپاسگال

## ۷- نتایج مدلسازی مدار با استفاده از یک مخزن گرمایش آب تغذیه

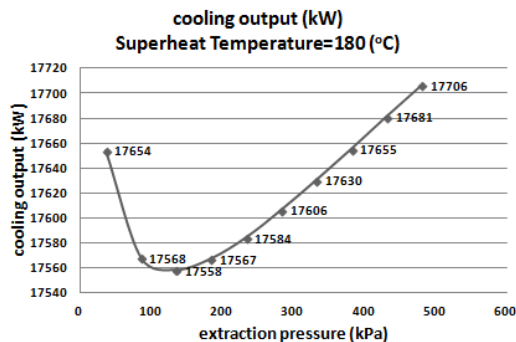
نمودار برق خروجی بر اساس فشار مخزن گرمایش آب تغذیه، به صورت زیر می باشد.

در تحلیل مربوطه، فشار اواپراتور برابر با ۹۸۵ کیلوپاسگال و دمای فوق گرمایش برابر با ۱۸۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است، نمودار برق تولیدی در فشار استخراج مابین ۲۳۰ تا ۲۷۰ کیلوپاسگال، به صورت خط مستقیم است و برق تولیدی در این حالت برابر با ۳۴۷۱ کیلووات می باشد.



شکل (۶) میزان الکتریسته تولیدی (kW) بر حسب تغییرات

فشار مخزن گرمایش آب تغذیه (kPa)



شکل (۷) میزان سرمایش تولیدی (kW) بر حسب تغییرات

فشار مخزن گرمایش آب تغذیه (kPa)

توضیح نمودار: با توجه به نمودار رسم شده برای سرمایش تولیدی، بین فشار ۲۳۰ تا ۲۷۰ کیلوپاسگال، با افزایش فشار، میزان سرمایش تولیدی افزایش می یابد، پس فشار

بهبود برابر با ۲۷۰ کیلوپاسگال در نظر گرفته می شود. استفاده از گرمایش آب تغذیه سبب افزایش تولید الکتریسیته به اندازه ۲۲۴ کیلووات و کاهش سرمایش

تولیدی به اندازه ۱۰۰ کیلووات شده است.

از آنجایی که سرمایش تولیدی در حدود ۱۸۰۰۰ کیلووات

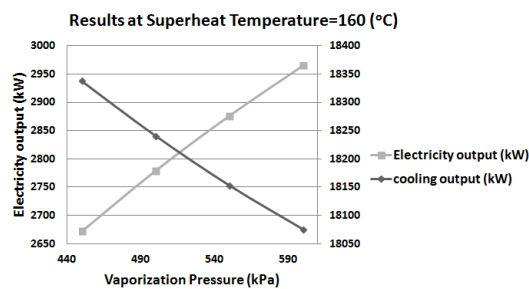
توضیح نمودارها: همانطور که مشاهده می گردد با افزایش دمای فوق اشباع میزان تولید الکتریسیته افزایش می یابد، که کاملاً منطقی است زیرا انتالپی ورودی به توربین افزایش می یابد. باید توجه داشت تاثیر افزایش فشار اواپراتور بر تولید الکتریسیته بالاتر از افزایش دمای فوق اشباع می باشد. قابل توجه است که با افزایش دمای فوق اشباع میزات تولید سرمایش، کاهش می یابد، زیرا با بهبود شرایط مدار رانکین، انرژی اتلافی کندانسور کاهش می یابد.



جدول (۶) نتایج به دست آمده از مدل‌سازی مدار اصلاحی دردمای فوق گرمایش ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد با هدف تولید برق

حداکثر

Vaporization Pressure (kPa)	Optimum Extraction Pressure (kPa)	Electricity output (kW)	cooling output (kW)
۶۰۰	۱۹۰	۲۹۶۵	۱۸۰۷۵
۵۵۰	۱۷۷	۲۸۷۶	۱۸۱۵۳
۵۰۰	۱۶۵٫۶	۲۷۷۹	۱۸۲۴۱
۴۵۰	۱۵۴	۲۶۷۲	۱۸۳۳۸



شکل (۹) برق و سرمایش تولیدی در مدار اصلاحی بر حسب فشار اواپراتور با هدف تولید برق حداکثر در دمای فوق گرمایش ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد

۷-۲- نتایج مدل‌سازی به ازای دمای فوق گرمایش ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد

در جدول (۶) به ازای فشارهای متفاوت اواپراتور، فشار بهینه برای گرمایش آب تغذیه به دست آمده است و سپس میزان برق و سرمایش تولیدی در آن محاسبه شده است، دمای کندانسور برابر با ۷۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

جدول (۷) نتایج به دست آمده از مدل‌سازی مدار اصلاحی دردمای فوق گرمایش ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد با هدف تولید برق

حداکثر

Vaporization Pressure (kPa)	Optimum Extraction Pressure (kPa)	Electricity output (kW)	cooling output (kW)
۳۵۰	۱۳۰	۲۴۱۳	۱۸۵۹۸
۳۰۰	۱۲۰	۲۲۵۵	۱۸۷۴۴
۲۵۰	۹۷	۲۰۶۹	۱۸۹۰۷

و برق تولیدی در حدود ۳۵۰۰ کیلووات است، به نظر می‌رسد استفاده از گرمایش آب تغذیه به صرفه باشد زیرا مقدار برق تولیدی کمتر از سرمایش تولیدی است و به عبارت دیگر به برق احتیاج بیشتری است.

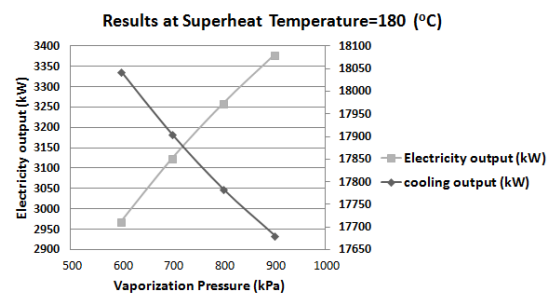
۷-۱- نتایج مدل‌سازی به ازای دمای فوق گرمایش ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد

در جدول زیر به ازای فشارهای متفاوت اواپراتور، فشار بهینه برای گرمایش آب تغذیه به دست آمده است و سپس میزان برق و سرمایش تولیدی در آن محاسبه شده است، دمای کندانسور برابر با ۷۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

جدول (۵) نتایج به دست آمده از مدل‌سازی مدار اصلاحی دردمای فوق گرمایش ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد با هدف تولید برق

حداکثر

Vaporization Pressure (kPa)	Optimum Extraction Pressure (kPa)	Electricity output (kW)	cooling output (kW)
۹۸۵	۲۷۰	۳۴۷۱	۱۷۶۰۱
۹۰۰	۲۵۵٫۶	۳۳۷۹	۱۷۶۸۲
۸۰۰	۲۳۰	۳۲۶۰	۱۷۷۸۴
۷۰۰	۲۱۱٫۱	۳۱۲۵	۱۷۹۰۵
۶۰۰	۱۸۹٫۵	۲۹۷۰	۱۸۰۴۴

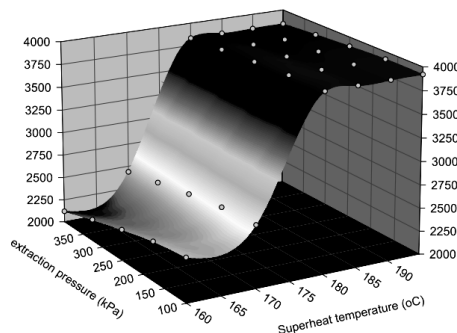


شکل (۸) برق و سرمایش تولیدی در مدار اصلاحی بر حسب فشار اواپراتور با هدف تولید برق حداکثر در دمای فوق گرمایش ۱۸۰ درجه

سانتی‌گراد و فشار اواپراتور برابر با ۹۸۵ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است، تغییرات برق تولیدی بر اساس تغییر دمای کندانسور و فشار مخزن گرمایش آب تغذیه به دست آمده و در نمودار زیر رسم گردیده است.

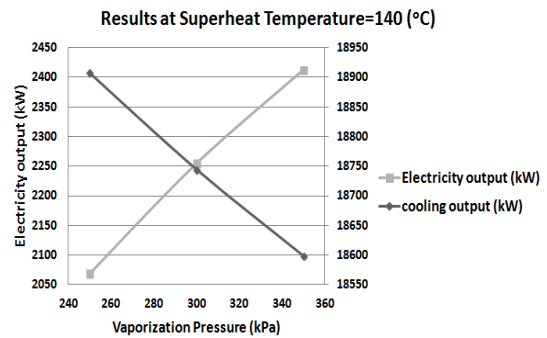
توضیح شکل (۱۱): همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد، هر چه میزان دمای کندانسور کاهش یابد، برق تولیدی با شیب زیادی افزایش می‌یابد، زیرا تغییرات انتالپی در توربین افزایش می‌یابد، برق تولیدی با تغییر فشار بهینه مخزن گرمایش آب تغذیه به ازای دماهای متفاوت کندانسور مقدار کمی تغییر می‌کند، میزان فشار بهینه در دمای ۵۰ درجه کندانسور برابر با ۱۴۹,۷ کیلوپاسکال و در دمای ۶۰ درجه برابر با ۱۸۰,۱ کیلوپاسکال خواهد بود.

در مدلسازی دوم، هدف مدار تعیین رفتار مدار رانکین است و در آن دمای کندانسور برابر با ۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار اواپراتور برابر با ۸۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. با تغییر دمای اواپراتور و فشار مخزن گرمایش آب تغذیه میزان برق تولیدی مورد بررسی قرار گرفته و در نمودار زیر رسم گردیده است. در این مدلسازی میزان گرمایش پیش گرمایش برابر با ۱۵۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است.



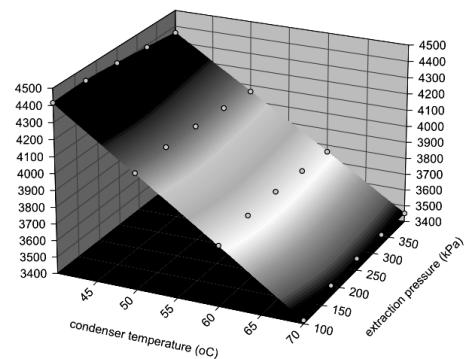
شکل (۱۲) برق تولیدی در مدار اصلاحی بر حسب تغییر دمای اواپراتور و فشار مخزن گرمایش آب تغذیه

توضیح شکل (۱۲): همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزایش دمای اواپراتور میزان برق تولیدی افزایش می‌یابد، شیب بالایی در نمودار در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. با افزایش دمای اواپراتور، به طور کلی میزان برق تولیدی افزایش می‌یابد ولی شیب تغییرات بر اساس فشار تبخیر، متفاوت است.



شکل (۱۰) برق و سرمایش تولیدی در مدار اصلاحی بر حسب فشار اواپراتور با هدف تولید برق حداکثر در دمای فوق گرمایش ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد

توضیح شکل های (۸)، (۹) و (۱۰): در هر سه شکل به ازای دماهای مختلف فوق گرمایش، مشاهده می‌شود با افزایش فشار تولید بخار، میزان برق تولیدی افزایش می‌یابد، زیرا انتالپی ورودی به توربین افزایش می‌یابد در حالی که شرایط کندانسور یکسان در نظر گرفته شده است، هم چنین گرمای اتلافی کندانسور کاهش می‌یابد در نتیجه سرمایش تولیدی کاهش یافته است.



شکل (۱۱) برق تولیدی در مدار اصلاحی بر حسب تغییر دمای کندانسور و فشار مخزن گرمایش آب تغذیه

### ۷-۳- نتایج مدلسازی به ازای دمای فوق گرمایش ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد

در جدول (۷) به ازای فشارهای متفاوت اواپراتور، فشار بهینه برای گرمایش آب تغذیه، میزان برق و سرمایش تولیدی آمده است، دمای کندانسور برابر با ۷۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

### ۷-۴- تعیین رفتار مدار با تغییر دو پارامتر به طور همزمان با هدف حداکثر کردن برق تولیدی در مدلسازی اول، دمای اواپراتور برابر با ۱۸۰ درجه

### ۸-۱- معادلات حاکم بر مدار با استفاده از دو مخزن گرمایش آب تغذیه

عبارتند از:

برای هر پمپ:

$$h[in] = \text{ENTHALPY}(\text{STEAM}, P = P[in], x = 0) \quad (16)$$

$$v = \text{volume}(\text{STEAM}, P = P[in], x = 0) \quad (17)$$

$$W_{\text{Pump}} = W_p = v(P_{\text{out}} - P_{\text{in}})/\eta_p \quad (18)$$

$$h_{\text{out}} = h_{\text{in}} + W_{\text{Pump}} \quad (19)$$

برای هر توربین:

$$s[in] = \text{entropy}(\text{STEAM}, h = h[in], P = P[in]) \quad (20)$$

$$h[out]_{is} = \text{enthalpy}(\text{STEAM}, s = s[in], P = P[out]) \quad (21)$$

$$W_{\text{Turbine}} = W_T = (h_{\text{in}} - h_{\text{out},is})\eta_T \quad (22)$$

$$h_{\text{out}} = h_{\text{in}} - W_{\text{Turbine}} \quad (23)$$

معادلات حاکم بر پیش گرمایش و اواپراتور مانند قبل است، میزان دبی جرمی با توجه به گرمای داده شده به اواپراتور تعیین می‌گردد.

مخازن گرمایش آب تغذیه:  $f[i]$  نشان‌دهنده درصد جرمی جدا شده از مسیر به سمت مخزن گرمایش آب تغذیه شماره مربوطه است، شماره گذاری مربوط به پمپ و توربین و مخازن گرمایش آب تغذیه در شکل نشان داده شده است.

$$f_1 h[8] + (1 - f_1)h[4] = h[5] \quad (24)$$

$$f_2 h[9] + (1 - f_2)h[2] = h[3] \quad (25)$$

گرمای اتلافی از کندانسور عبارت است از:

$$Q_{\text{cond.}} = \dot{m}(h[10] - h[1])(1 - f_1)(1 - f_2) \quad (26)$$

افت فشار پنج درصد برای کندانسور، اواپراتور و پیش‌گرمایش در نظر گرفته می‌شود به این صورت که فشار خروجی برابر با ۰٫۹۵ فشار ورودی در نظر گرفته می‌شود.

کار تولیدی با توجه به بازده ژنراتور به ازای واحد جریان جرمی:

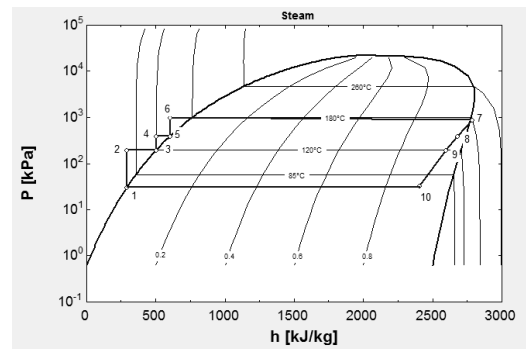
$$W_t = [W_{t1} + (1 - f_1)W_{t2} + (1 - f_1)(1 - f_2)W_{t3}]\eta_{\text{Generator}} \quad (27)$$

کار مصرفی پمپ‌ها به ازای واحد جریان جرمی:

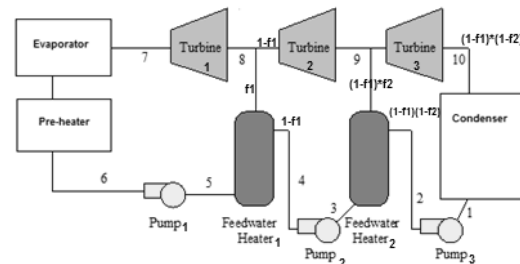
$$W_p = [W_{p1} + (1 - f_1)W_{p2} + (1 - f_1)(1 - f_2)W_{p3}] \quad (28)$$

### ۸- بهبود مدار ابتدایی با استفاده از دو سیستم گرمایش آب تغذیه

در این حالت دو محفظه گرمایش آب تغذیه باز در نظر گرفته می‌شود، یکی دارای فشار بالا و دیگری فشار پایین‌تری دارد، فشار مخزن فشار پایین، ثابت در نظر گرفته می‌شود و فشار مخزن دوم متغیر فرض می‌شود. تاثیر تغییرات فشار محفظه گرمایش آب تغذیه با فشار بالاتر بر روی برق و سرمایه‌های تولیدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. دمای کندانسور برابر با ۷۰ درجه سانتی‌گراد، راندمان توربین و ژنراتور و پمپ، به ترتیب برابر با ۰٫۷، ۰٫۸ و ۰٫۸ در نظر گرفته شده است، افت فشار در کندانسور و اواپراتور و پیش‌گرمایش برابر با ۵ درصد فشار ورودی می‌باشد.



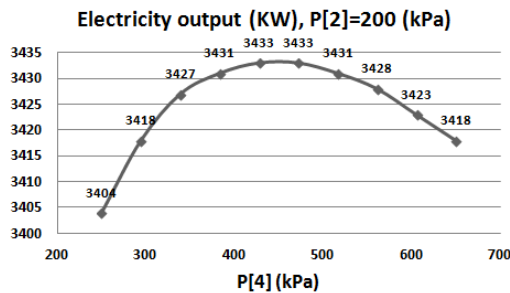
شکل (۱۳) نمودار فشار بر حسب آنتالپی، مدار رانکین اصلاحی



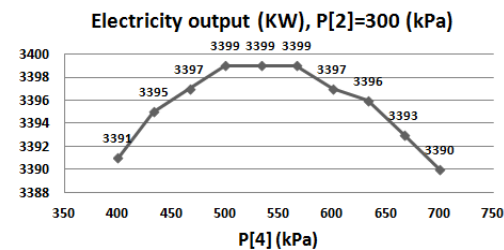
شکل (۱۴) شماتیک نمودار رانکین با استفاده از دو منبع گرمایش آب تغذیه

شکل شماتیک در شکل (۱۴) آمده است. دمای فوق گرمایش برابر با ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار خروجی از اواپراتور برابر با ۹۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته می‌شود، به ازای فشارهای میانی ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال، میزان برق تولیدی برابر با ۳۴۷۶ کیلووات می‌باشد، این مقدار به ازای وجود یک مخزن گرمایش آب تغذیه با بیهنه سازی فشار استخراجی، برابر با ۳۳۷۹ کیلووات می‌باشد. دیاگرام فشار بر حسب انتالپی در این حالت مطابق با شکل بالا می‌باشد.

<sup>۱</sup> تعریف انتروپی: اشاره به سطح بی‌نظمی در یک سیستم ترمودینامیکی دارد.



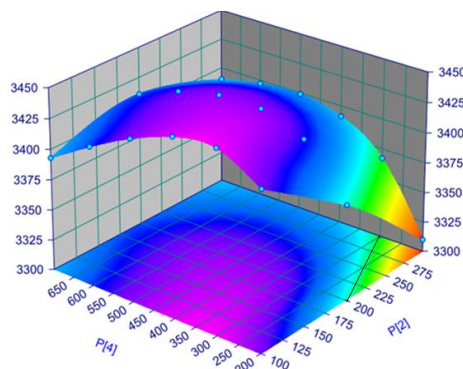
شکل (۱۶) نمودار مقادیر برق تولیدی بر حسب فشار مخزن گرمایش آب تغذیه فشار بالا (P[2]=200)



شکل (۱۷) نمودار مقادیر برق تولیدی بر حسب فشار مخزن گرمایش آب تغذیه فشار بالا (P[2]=300)

### ۳-۸- تعیین میزان برق تولیدی بر اساس تغییر فشار های مخزن گرمایش آب تغذیه

در مدل سازی زیر، با تغییر فشار های مخزن گرمایش آب تغذیه، میزان برق تولیدی در نمودار سه بعدی رسم شده است، محدوده های همانند در میزان برق تولیدی، در رنگ های یکسان در صفحه افقی نشان داده شده است. نمودار فوق به ازای دمای کندانسور ۷۰ درجه سانتی گراد، دمای اواپراتور ۱۸۰ درجه سانتی گراد و فشار اواپراتور برابر با ۹۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۸) برق تولیدی در مدار اصلاحی دوم بر حسب تغییر فشار های مخزن گرمایش آب تغذیه

توضیح شکل (۱۸): در این حالت در یک محدوده خاصی میزان برق تولیدی یکسان است، میزان برق تولیدی به ازای فشار های ۱۱۴،۵ و ۳۴۵،۵ کیلو پاسکال به صورت بهینه

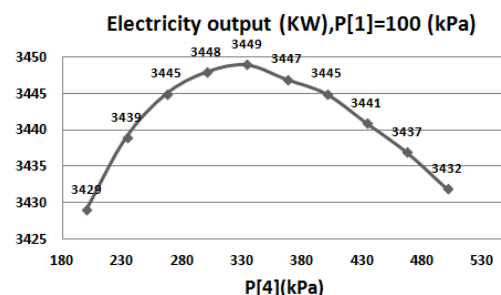
میزان برق تولیدی عبارت است از:

$$W_{net} = (W_t - W_p)m \quad (29)$$

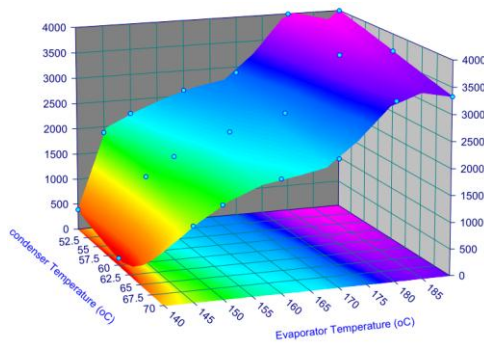
از آنجایی که در حال حاضر برق تولیدی تابعی دومتغیره از فشارهای مخزن گرمایش آب تغذیه می باشد، بهینه سازی در این حالت به صورت دقیق به دست نمی آید، در این حالت ابتدا فشار مخزن فشار پایین ثابت در نظر گرفته می شود، سپس میزان برق تولیدی به ازای فشارهای متفاوت مخزن فشار بالا محاسبه می گردد، بهترین فشار برای مخزن فشار بالا در نظر گرفته می شود و سپس در این فشار، با تغییرات فشار مخزن فشار پایین، تغییرات برق تولیدی محاسبه می گردد، به ازای حداکثر برق تولیدی، فشار مناسب برای مخزن فشار پایین نیز انتخاب می گردد. در این مدل سازی مدار اصلاحی دوم، میزان گرمایش اتلافی بازیابی شده از آب خنک کننده موتور برابر با ۱۵۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است.

### ۲-۸- نتایج مدل سازی در مدار دوم

مقادیر برق تولیدی به ازای فشارهای مخزن گرمایش آب تغذیه برابر با ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال و فشار های متفاوت مخزن دوم رسم شده است. توضیح شکل های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷): با افزایش فشار نقطه دو، مقدار بهینه فشار نقطه چهار افزایش می یابد، در نمودار اول فشار بهینه در حدود ۳۴۰ کیلو پاسکال و در نقطه دوم فشار بهینه در حدود ۴۴۰ کیلو پاسکال می باشد، با توجه به نمودارهای رسم شده، حداکثر برق تولیدی برابر با ۳۴۴۹ کیلووات، فشار مخزن اول برابر با ۱۰۰ (kPa) و فشار مخزن دوم برابر با ۳۴۰ (kPa) می باشد.



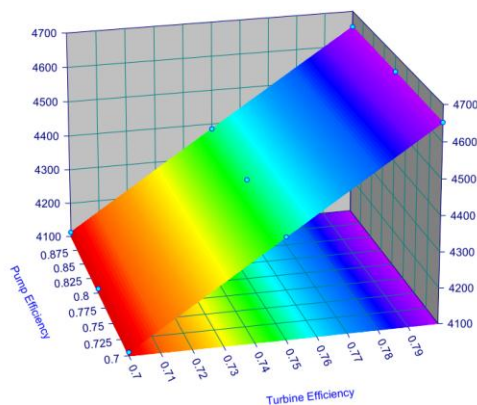
شکل (۱۵) نمودار مقادیر برق تولیدی بر حسب فشار مخزن گرمایش آب تغذیه فشار بالا (P[2]=100)



شکل (۲۰) برق تولیدی در مدار اصلاحی دوم بر حسب دمای کندانسور و دمای اواپراتور

در چنین شرایطی به ازای دمای کندانسور ۵۰ درجه سانتی‌گراد، میزان فشار بهینه برابر با ۳۴۶٫۲ کیلو پاسگال و برق تولیدی ۴۱۱۲ کیلووات می‌باشد، در دمای کندانسور ۷۰ سانتی‌گراد نیز، فشار بهینه برابر با ۳۴۶٫۲ کیلو پاسگال است و برق تولیدی برابر با ۳۴۴۹ کیلووات می‌باشد، به این معنی است که تغییرات دمای کندانسور و فشار مخزن گرمایش آب تغذیه بر فشار، تقریباً مستقل از هم بر روی میزان برق تولیدی اثر می‌گذارند.

توضیح شکل (۲۰): فشار مخازن گرمایش آب تغذیه برابر با ۱۱۴٫۵ و ۳۴۵ کیلوپاسگال در نظر گرفته شده است، با افزایش دمای اواپراتور و کاهش دمای کندانسور، میزان برق تولیدی افزایش می‌یابد. همانطور که از تصویر افقی نمودار مشاهده می‌گردد، تاثیر تغییرات دمای اواپراتور در برق تولیدی، بالاتر از تاثیر تغییرات دمای کندانسور می‌باشد. چنانچه در یک دمای ثابت کندانسور، پیش روییم، تغییرات رنگ در تصویر صفحه افقی بالا است ولی به ازای یک دمای ثابت اواپراتور، تغییرات رنگ در راستای تغییرات دمای کندانسور کم است.



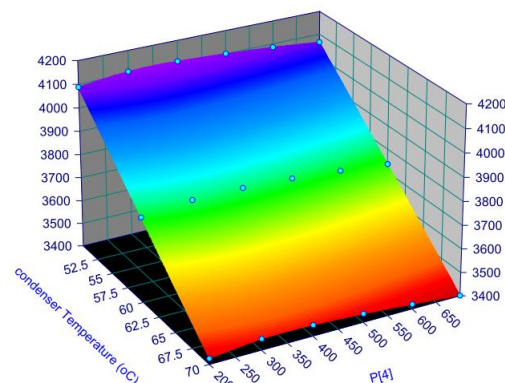
شکل (۲۱) برق تولیدی در مدار اصلاحی دوم بر حسب تغییر راندمان پمپ و توربین

می‌باشد و میزان برق تولیدی در این حالت برابر با ۳۴۴۹ کیلووات می‌باشد، باید در نظر گرفت به ازای فشارهای دیگر نیز این مقدار قابل دست یابی است زیرا محدوده‌هایی دارای برق تولیدی یکسانی می‌باشند، در نمودار فوق باید در نظر داشت که فشار مخزن کم فشار، همواره کمتر از فشار مخزن پر فشار است، این محدوده با خط مشکی در نمودار مشخص شده است.

#### ۴-۸- مدل‌سازی با تغییر دیگر پارامترها

مدلسازی‌های دیگر با تغییر دو پارامتر نیز صورت گرفته است، در مدل‌سازی اول، تغییرات دمای کندانسور و فشار مخزن پر فشار بر روی برق تولیدی مطرح شده است، در مدل‌سازی بعدی تاثیر تغییرات دمای کندانسور و اواپراتور بر روی برق تولیدی بررسی شده است. نمودارهای حاصله به صورت زیر می‌باشد.

توضیح شکل (۱۹): مطابق نمودار، با افزایش دمای کندانسور، برق تولیدی کاهش می‌یابد و به ازای دماهای مختلف کندانسور، فشار بهینه برای مخزن گرمایش پر فشار به دست می‌آید. در ارتباط با دمای کندانسور، مشهود است که از آنجایی که دمای فوق گرمایش ثابت است، با کاهش دمای کندانسور، تغییرات انتالپی دو طرف توربین زیاد شده و برق تولیدی افزایش می‌یابد. با تغییر فشار مخزن گرمایش آب تغذیه پر فشار، تغییر چندان در برق خروجی نشان داده نمی‌شود، به گونه‌ای می‌توان گفت رفتار سیستم مدار رانکین به این شکل است. در این مدل‌سازی فشار مخزن گرمایش کم فشار برابر با ۱۱۴٫۵ کیلوپاسگال، دمای اواپراتور برابر با ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار اواپراتور برابر با ۹۰۰ کیلوپاسگال در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۹) برق تولیدی در مدار اصلاحی دوم بر حسب تغییرات دمای کندانسور و فشار مخزن گرمایش آب تغذیه پر فشار

**۱۰- جمع بندی**

برای قدرت خروجی موتور برابر با ۵۱۴۸۰ کیلووات، تولید قدرت ۳۲۴۷، گرمایش ۲۲۵۰۳ و سرمایش ۱۷۶۶۳ کیلووات در مدار اولیه به ازای دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد خروجی از اواپراتور و دیگر شرایط مفروض برای دمای کندانسور و در نظر گرفتن افت فشار در کندانسورها و اواپراتورها و پیش گرمایش برابر با ۵ درصد فشار ورودی، به دست آمد، در مدار اصلاحی اول حداکثر تولید قدرت ۳۴۷۱ کیلووات و سرمایش ۱۷۶۰۱ کیلووات است. در این حالت برق تولیدی در حدود ۷ درصد با استفاده از مخزن گرمایش آب تغذیه افزایش پیدا کرده است. در مدار اصلاحی دوم حداکثر برق تولیدی برابر با ۳۴۴۹ کیلووات است. اگر فرض شود که کشتی در ماه ۲۵ روز کاری داشته باشد، با توجه به صرفه جویی صورت گرفته در تولید قدرت و سرمایش، میزان کاهش آلاینده های مصرفی به طور ماهیانه ناشی از تولید سرمایش و قدرت از انرژی اتلافی در جدول زیر آمده است. برای به دست آوردن مقادیر جدول، مقایسه ای با حالت آلاینده های تولیدی در صورت تولید برق با استفاده از سیکل ترکیبی صورت گرفته است.

جدول (۸) میزان کاهش انتشار گازهای آلاینده و گلخانه ای با تولید برق و سرمایش از انرژی اتلافی موتور بر حسب کیلوگرم

در ماه، در مدار دوم

C	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
۷۱۹۵۳۴	۵,۶۰۲۸	۶۱,۶۳	۲۶۳۸۲۹۱
CO	SO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	No <sub>x</sub>
۴۹۳,۰۴	۳۹,۲۲	۱۵۶۸,۸	۱۵۰۲۶,۷

**منابع**

- [1] Capaldo K, Corbett JJ, Kasibhatla P, Fischbeck PS, Pandis SN. (1999). Effect of ship emissions on sulphur cycling and radiative climate forcing over the ocean. *Nature*, 400:743-6.
- [2] Tzannatos, E. (2010). Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus – Greece. *Atmospheric Environment*, 44(3), 400-407.
- [3] Shu G, Liang Y, Wei H, Tian H, Zhao J, Liu L. (2013). A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 19, 385-401.
- [4] Bidini G, Maria F, Generosi M. (2005). Micro-generation system for a small passenger vessel operating in a nature reserve. *Applied Thermal Engineering*, 25, 851-65.

در مدلسازی دیگر در این قسمت، تاثیر راندمان ایزنتروپیک توربین و پمپ بر روی برق تولیدی مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار حاصله مطابق با شکل (۲۱) به دست می آید. توضیح شکل ۲۱: در مدار فوق از سه توربین و سه پمپ با راندمان های مشابه استفاده شده است که در فشارها و دماهای مختلف کار می کنند، در این تحلیل نشان داده شده است که استفاده از پمپ با کیفیت های مختلف، تاثیر چندانی بر روی برق تولیدی ندارد و از طرف دیگر با افزایش راندمان توربین از ۰,۷ تا ۰,۸، تا ۱۵ درصد به برق تولیدی افزوده می شود. دلیل این موضوع این است که تغییرات انتالپی در دو طرف پمپ خیلی کمتر از تغییرات انتالپی در دو طرف توربین می باشد و در نتیجه می بایست به دنبال استفاده از توربین با راندمان بالاتر باشیم.

**۹- صحت سنجی نتایج**

آنچه که در متن مقاله آورده شده است، مدارهای بهبود یافته و یا به عبارتی دیگر نوآوری های صورت گرفته در این زمینه است، اولین مداری که در تحقیق اصلی مورد بررسی قرار گرفته است، در پژوهش آقای لیانگ و همکاران، پیشنهاد شده است، مدار اولیه که در متن مقاله فقط به کلیات آن در شکل (۱)، اشاره شده است و فرمول بندی آن نیامده است، در پژوهش آقای لیانگ و همکاران، صحت سنجی نتایج برای مدار اولیه صورت گرفته است، که در مرجع شماره [۱۶] بیان شده است و ضرورتی برای تکرار وجود ندارد و می توان به همان مقاله رجوع کرد.

برای صحت سنجی نتایج به دست آمده در مدارهای اصلاحی باید تاکید کرد که چنین سیستمی یعنی سیستم کوپل مدار رانکین و مدار تبرید جذبی، تا به حال در عمل ساخته نشده است، صحت سنجی نتایج محاسبات کامپیوتری و آنچه در عمل رخ می دهد، نشدنی است ولی می توان به طور جداگانه مدار رانکین و مدار تبرید جذبی را صحت سنجی نمود. با توجه به اینکه مدلسازی بر پایه علم ترمودینامیک است و از طرف دیگر مدار اولیه مورد صحت سنجی نتایج قرار گرفته است، مدارهای اصلاحی ادامه مدار اولیه می باشد و از آن جهت که مدار اولیه صحت سنجی شده است، مدارهای مطرح شده در مقاله نیز با توجه به اعتبار مدلسازی مدار اولیه، اعتبار می گیرند و به نوعی همانکه صحت سنجی مدار اولیه صورت گرفته است، به نظر کافی می آید.

- [10] Shu G, Liu L, Tian H, Wei H, Xu X. (2013). Performance comparison and working fluid analysis of subcritical and transcritical dual-loop organic Rankine cycle (DORC) used in engine waste heat recovery. *Energy Convers Manage*, 74, 35–43.
- [11] Yu G, Shu G, Tian H, Wei H, Liu L. (2013). Simulation and thermodynamic analysis of a bottoming Organic Rankine Cycle (ORC) of diesel engine (DE). *Energy*, 51, 281-90.
- [12] Srihirin P, Aphornratana S, Chungpaibulpatana S. (2001). A review of absorption refrigeration technologies. *Renew Sustain Energy Rev*, 5, 343–72.
- [13] Fernandez-Seara J, Vales A, Vazquez M. (1998). Heat recovery system to power an onboard NH<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>O absorption refrigeration plant in trawler chiller fishing vessels. *Applied Thermal Engineering*, 18, 1189–205.
- [14] Manzela AA, Hanriot SM, Cabezas-Gomez L. (2010). Using engine exhaust gas as energy source for an absorption refrigeration system. *Applied Energy*, 87, 1141–8.
- [15] Wu DW, W. R. (2006). Combined cooling, heating and power: a review. *Progr Energy Combust Sci* ;32(5–6), 459–95.
- [16] Youcai Liang, G. S. (2013). Analysis of an electricity–cooling cogeneration system based on RC–ARS combined cycle aboard ship. *Energy Conversion and Management* 76, 1053–1060.
- [5] Tien WK, Yeh RH, Hong JM. (2007). Theoretical analysis of cogeneration system for ships. *Energy Conversion and Management*, 48, 1965–74.
- [6] Rigby GR, Hallegraef GM, Sutton C. (1999). Novel ballast water heating technique offers cost-effective treatment to reduce the risk of global transport of harmful marine organisms. *Mar Ecol Prog Ser*, 191, 289–93.
- [7] Teng H, Regner G, Cowland C. (2006). Achieving high engine efficiency for heavy-duty diesel engines by waste heat recovery using supercritical organic-fluid Rankine cycle. *SAE paper*, 2006-01-3522.
- [8] Srinivasan KK, Mago PJ, Krishnan SR. (2010). Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an Organic Rankine Cycle. *Energy*, 35, 2387–99.
- [9] Shu G, Zhao J, Tian H, Liang X, Wei H. (2012). Parametric and exergetic analysis of waste heat recovery system based on thermoelectric generator and organic Rankine cycle utilizing R123. *Energy*, 45, 806–16.