فصلنامه تحقیقات مکانیک کاربردی
جلد ۸، شماره ۲ ، پاییز ۱۳۹۵

مدل‌سازی، طراحی و مطالعه پارامتری سیکل ترکیبی کالینا، انرژی زمین‌گرمایی و آب‌شیرین‌کن تقطیری چند اثره به‌منظور تولید توان، حرارت و آب شیرین

احمد رهنما، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاداسلامی واحد تاکستان،
مهرانگیز قاضی، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان
محمد نیکیان، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان
E-Mail: rahnama_ahmad@yahoo.com

چکیده: دو دغدغه اساسی که در سال‌های اخیر جامعه جهانی درگیر آن شده است، مسئله کاهش منابع آب شیرین کره زمین به علت افزایش دمای آن و دیگری افزایش استفاده از منابع انرژی فسیلی‌که نتیجه آن افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و غیره است. با توجه به این دو دغدغه، در این مقاله یک سیستم تولید همزمان کار، حرارت و آب شیرین که بر اساس مبنع انرژی زمین‌گرمایی در یک سیکل کالینا و آب‌شیرین‌کن تقطیری چند اثره از نظر جرمی و ترمودینامیکی شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار می‌گیرد. دلیل استفاده از سیکل کالینا به خاطر مزایا فراوان آن ازجمله راندمان حداقل ۱۰٪ بالاتر نسبت به دیگر سیکل‌های مشابه، هزینه‌های تعمیر و نگهداری پایین، اثرات تخریبی کمتر بر روی محیط‌زیست و غیره است. ازجمله مزایای انرژی زمین‌گرمایی می‌توان به بدون آلاینده بودن برای محیط‌زیست، در دسترس بودن بیشتر این انرژی در دماهای پایین و غیره اشاره کرد. انتخاب آب‌شیرین‌کن تقطیری چند اثره برای این سیکل ترکیبی نیز به دلیل مزایای فراوان آن ازجمله: کیفیت بالای آب تصفیه‌شده، استفاده از انرژی گرمایی اضافی و غیره نام برد.

واژه های کلیدی: سیکل کالینا ، انرژی زمین گرمایی ، آب شیرین کن تقطیری چند اثره

۱- مقدمه :

دو بحران اساسی که در سال‌های اخیر گریبان‌گیر جامعه جهانی شده است، بحران افزایش استفاده از منابع فسیلی انرژی که نتیجه آن افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و کاهش این منابع و کاهش منابع آب شیرین است، این دو بحران در سال‌های آینده نیز می‌تواند مشکل برای جهان مشکل ساز باشد.در همین راستا بسیاری از مراکز عملی دنیا در تلاش هستند با استفاده از بهینه‌سازی انرژی و استفاده از منابع انرژی نو و روش‌های نوین تولید آب شیرین این دو بحران را تا حد زیادی حل کنند. با توجه به این روند جهانی، در این مقاله نیز ابتدا سیکل ترکیبی کالینا، زمین‌گرمایی و آب‌شیرین‌کن تقطیری چند اثره ازنقطه‌نظر جرمی‌و ترمودینامیکی مدل‌سازی شده و روابط حاکم بر آن استخراج می‌گردد سپس این مدل‌سازی در محیط EES شبیه‌سازی شده و نتایج آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.به منظور بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای موجود بر این سیستم یک مطالعه پارامتریک با جزییات کافی انجام خواهد گرفت.

ازجمله مزایای انرژی زمین‌گرمایی می‌توان به بدون آلاینده بودن برای محیط‌زیست، در دسترس بودن بیشتر این انرژی در دماهای پایین و غیره اشاره کرد. علت استفاده از سیکل کالینا به خاطر داشتن مزایا بسیاری آن ازجمله راندمان حداقل ۱۰٪ بالاتر نسبت به دیگر سیکل‌های توان، اثرات تخریبی کمتر بر روی محیط‌زیست‌وغیره است. انتخاب آب‌شیرین‌کن تقطیری چند اثره برای این سیکل ترکیبی نیز به دلیل مزایای فراوان آن ازجمله:کیفیت بالای آب تصفیه‌شده، استفاده از انرژی گرمایی اضافی و غیره نامبرد.

۲- پیشینه تحقیق:

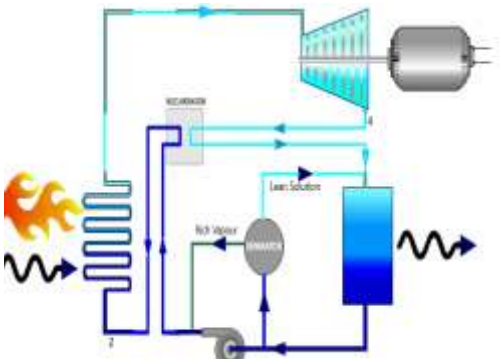
سیکل کالینا برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ توسط یک مهندس روسی به نام دکتر الکساندر کالینا مطرح و منتشر شد و در سال ۱۹۸۸ توسط شرکت اگزرژی که خود آن را ایجاد کرده بود به ثبت رسید.[۱]

برای اولین بار این سیکل جهت تولید برق با سیکل گازی در سال‌های ۱۹۹۲ – ۱۹۹۷ ترکیب و در مجموع خروجی سیکل ترکیبی نیروگاه کانوگا پارک آمریکا ۶/۵ مگاوات بود.[۲] نیروگاه دیگر به نام فوکوکا ژاپن در سال‌های ۱۹۹۹-۱۹۹۸ برای اولین بار برای تأمین انرژی سیکل کالینا از شیوه سوختن زباله‌ها استفاده و توان خروجی ۴/۵ مگاوات بود.[۳] اولین نیروگاه

تجاری که با این سیکل ایجاد شد، نیروگاه سومیتومو ژاپن در سال ۱۹۹۹ بود و منبع گرمایی این سیکل از گرمای هدررفته کارخانه آهن تأمین و خروجی آن نیز ۳/۵ مگاوات بود.[۴] اولین نیروگاه ترکیبی انرژی زمین‌گرمایی و سیکل کالینا در سال ۲۰۰۰ به نام هوساویک ایسلند ایجاد و در نهایت این نیروگاه در سال ۲۰۱۲ تعمیر و راه اندازی وخروجی آن ۲ مگاوات شد.[۵] در سال ۲۰۰۲ نیز در کنار پالایشگاه خلیج توکیو نیروگاهی به نام فوجی با این سیکل و با سوخت زباله‌های آن به‌عنوان منبع انرژی با خروجی ۳/۹ مگاوات ایجاد شد.[۶] سیکل‌های مشابه هوساوییک نیز ایجاد شده مانند: در سال ۲۰۰۷ متهاوا هیتاراچچی با خروجی ۳ مگاوات[۷]، در ۲۰۰۹ نیروگاه در شهر بروخزال آلمان با خروجی ۵۰۰ کیلووات[۸]، در سال ۲۰۰۹ در شهر تیبت با خروجی ۵۰ کیلووات[۹]، در سال ۲۰۱۱ نیروگاه به نام کیونگشیو تایوان و با خروجی ۶۰ کیلووات[۹] در سال ۲۰۱۰ نیروگاه ترکیبی در کشور تایوان با خروجی ۵۰ کیلووات[۶]، در سال ۲۰۱۱ نیروگاهی در پاکستان با خروجی ۸/۶ مگاوات[۶]، در سال ۲۰۱۲ نیروگاه دیگر در ژاپن و خروجی آن ۵۰ کیلووات[۱۰]،در سال ۲۰۱۳ در کشور آلمان با خروجی ۴/۵ مگاوات [۱۱]و نیروگاه دیگر به نام اوتاری ژاپن که خروجی آن ۵۰ کیلووات ساخته شد.[۶] در سال ۲۰۱۰ برای اولین بار شرکتی به نام شانگهای اولین نیروگاه سیکل کالینا با منبع گرمایی انرژی خورشیدی در کشور چین احداث کرد.[۹]

۳ –چرایی انتخاب اجزا و بررسی تئوری سیکل ترکیبی:

همان‌طور که مشخص است سیکل کالینا همان سیکل رانکین است با این تفاوت که به این سیکل معمولا دو وسیله اضافه می‌شود. ۱. recuperator ۲ . جداکننده



شکل(۱) : سیکل کالینا

وجود این دو وسیله همراه با تغییر دادن مبرد آن که ترکیب آب و آمونیاک است باعث شده تا این سیکل بازدهی بالاتری نسبت به سیکل‌های مشابه خود داشته باشد.

۳-۱- چرایی انتخاب اجزا:

۱- انرژی زمین گرمایی:

در واقع انرژی ایجاد شده به وسیله حرارت درون زمین می باشد.

مزایا :

۱ - انرژی پاک و بدون آلاینده است .

۲- نیروگاه ها به علت وابسته نبودن به سوخت می‌توانند ۲۴ ساعت در روز و هر روز از سال کار کنند.

۳ - انرژی پایدار و تجدیدپذیر است .

معایب :

۱ - مناطق محدودی در جهان وجود دارد که دارای این خاصیت هستند .

۲ - در حال حاضر هنوز هزینه تولید برق از این سیستم نسبت به سیستم سوخت‌های فسیلی بالاست.

۲- سیکل کالینا :

این سیکل در واقع همان سیکل رانکین با تغییراتی در آن برای بازدهی بالاتر و آلودگی کمتر در محیط زیست است.

حال دلیل وجود دو وسیله فوق را برای این چیدمان سیکل کالینا شرح می‌دهیم.

۱ . جدا کننده: استفاده از تغییر در غلظت مبرد برای بالا بردن دمای تراکم آن که برای خنک کردن کندانسور استفاده می‌شود.

۲ . recuperator: در واقع همان مبدل حرارتی است که کار آن بالا بردن دمای جریان ورودی به بویلر برای مصرف کمتر سوخت در این سیکل است .

دیگر تفاوت سیکل کالینا با سیکل رانکین استفاده از مبردهای مخلوط در سیکل کالینا برای بازدهی بهتر است که معروف ترین مبرد مورد استفاده ترکیب آب و آمونیاک است. که استفاده از این مخلوط دارای مزایا بسیاری است که از جمله : خواص ترمودینامیکی عالی، ضرایب انتقال حرارت عالی،این مخلوط منجمد نمی‌شود و غیره.

امروزه سیکل کالینا پیشرفت‌های بسیاری کرده است و به جای آمونیاک از مخلوط‌های آلی مبردها مانند: R22، R114، و غیره استفاده می‌شود .

مزایا سیکل کالینا عبارتند از : راندمان حداقل ۱۰٪ - ۵۰ ٪ بالاتر نسبت به دیگر سیکل‌های سیکل‌های توان ،مصرف سوخت پایین،اثرات تخریبی کمتر بر روی محیط‌زیست، قیمت کمتر الکتریسیته تولید در هر کیلووات ساعت و غیره.

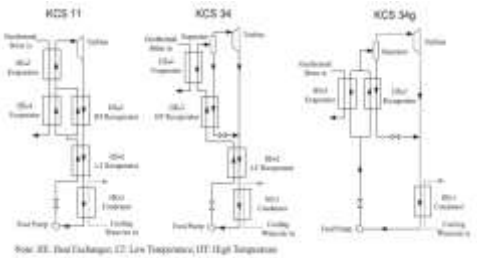
انواع سیکل کالینا :

سیکل کالینا با توجه به ورودی‌هایی که می‌تواند دریافت کند و خروجی‌های آن می‌توان چیدمان های متفاوتی برای آن در نظر گرفت که مهترین آن‌ها عبارتند از :

KCS11 : برای استفاده از انرژی زمین گرمایی با دما بین ۱۲۱ تا ۲۰۴ درجه سانتیگراد

KCS 34 : برای نیروگاه‌های زمین گرمایی با دمای پایین‌تر از ۱۲۱ درجه سانتیگراد

KCS 34g : مشابه KCS 34 با این تفاوت که برای نیروگاه‌های کوچک‌تر استفاده می‌شود.

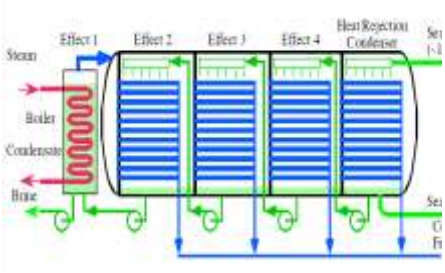


شکل(۲) : انواع سیکل کالینا

۲- آب‌شیرین‌کن تقطیری چند اثره (MED) :

روند شیرین‌سازی آب در این دستگاه به صورت زیر است:

در مرحله اول بخشی از آب شور تبخیر شده و بقیه آن وارد مرحله دوم شده. این آب در مرحله دوم با بخار تولیدی در مرحله اول که به این مرحله انتقال می‌یابد تبادل حرارت داده می‌شود تا گرمای بخار کاهش یابد و به مایع تبدیل شود و این چرخه چندین مرحله ادامه می‌یابد.



شکل(۳) : اب شیرین‌کن MED

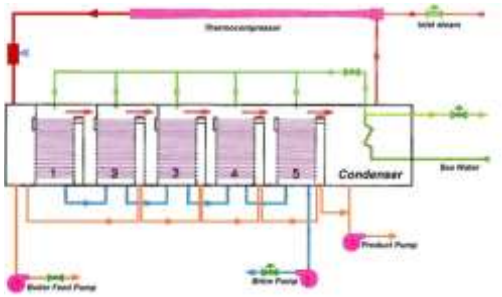
مزایا این آب شیرین‌کن عبارتند از: کیفیت بالای آب تصفیه‌شده، استفاده از انرژی گرمایی اضافی،هزینه نگهداری پایین و غیره

معایب آن عبارتند از : انعطاف‌پذیری پایین، عملکرد و طراحی پیچیده و غیره

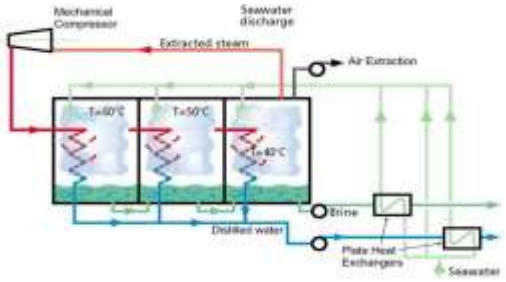
انواع آب شیرین‌کن تقطیری چند اثره:

این آب شیرین‌کن سه نوع تقسیم می‌شود :

۱. MED: که توضیح در مورد آن داده شده است.
۲. MED-TVC: همان MED است با این تفاوت که برای کارایی بهتر بخار اولیه ورودی به سیستم فشرده می‌شود.در نتیجه هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی، مقدار مصرف سوخت برای تولید گرما و خطر خوردگی و فرسودگی کاهش پیدا می‌کند و کارایی آن افزایش پیدا می کند.
۳. MED-MVC: مشابه MED-TVC با این تفاوت که بخار به روش مکانیکی فشرده می‌شود.در نتیجه نیاز به انرژی گرمایی اضافه نیست و خطر خوردگی و فرسودگی به کمترین مقدار می‌رسد



شکل(۴) : آب شیرین کن MED-TVC

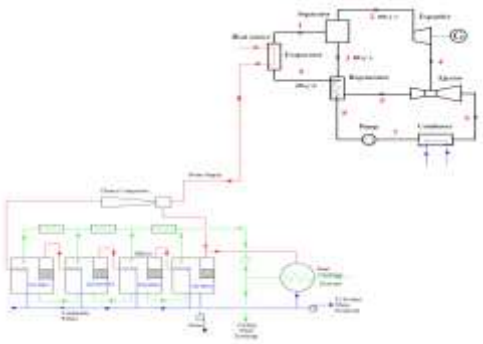


شکل(۵) : آب شیرین کن MED-MVC

۲-۳ بررسی تئوری سیکل ترکیبی :

همان طور که در شکل زیر مشخص است هدف استفاده از انرژی زمین گرمایی ابتدا تامین انرژی لازم برای سیکل کالینا

که در واقع انرژی مورد نیاز برای برای گرم کردن مبرد این سیکل یعنی آب آمونیاک است و در مرحله بعد هدف آن تامین انرژی مورد نیاز سیستم آب شیرین کن تقطیری چند اثره است.



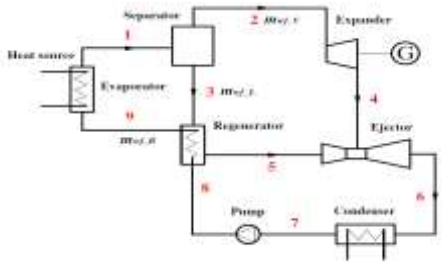
شکل (۶) : دیاگرام کلی سیکل ترکیبی

۱ . سیکل کالینا همراه با اجکتور :

همان‌طور که در بخش اول این فصل توضیح داده شده سیکل کالینا با توجه به نوع چیدمان و اجزا تشکیل دهنده آن به دسته‌های مختلف تقسیم می‌شود.برای این سیکل ترکیبی، سیکل کالینا همراه با اجکتور به نام Ekalina در نظر گرفته شده که مزیت این سیکل در همین بخش توضیح داده خواهد شد .

در واقع این سیکل کالینا همان سیکل کالینا KCS11 است با این تفاوت که در آن به جای شیر فشارشکن از اجکتور استفاده شده است که این اجکتور سبب کاهش فشار جریان خروجی توربین می شود که نتیجه آن افزایش کار توربین و بازده سیکل است. در ضمن تلفات انرژی ناشی از شیرفشارشکن هم نیز از بین می‌رود و هم زمان دو جریان مختلف را با هم ترکیب می‌کند. در واقع اجکتور ترکیب شیر مخلوط و شیر فشارشکن است.

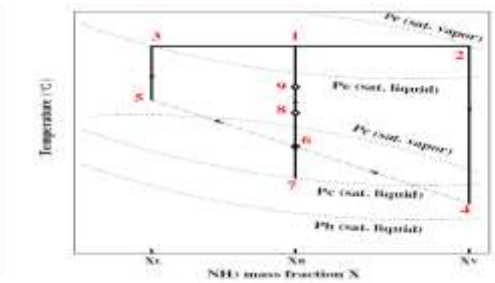
شکل کلی این سیکل به صورت زیر است که به روند و مشخصات جریان‌های آن نیز توضیح داده خواهد شد.



شکل(۷) : دیاگرام سیکل کالینا همراه با اجکتور[۱۲]

مبرد ترکیبی آب و آمونیاک به عنوان مبرد پایه در سیکل موجود است و با فشار و دمای بالا این مبرد در حالت دو فاز وارد جداکننده می‌شود (شماره ۱) بعد از آن مبرد توسط جداکننده به دو فاز مایع اشباع (شماره۳) و بخار اشباع (شماره ۲) تقسیم می‌شوند. بخار اشباع تولیدی وارد توربین و سبب تولید کار می شود و با فشار پایین‌تر نسبت به حالت ورودی از توربین خارج می‌شود و وارد اجکتور می‌شود که کیفیت این جریان نزدیک به یک است(شماره۴) مایع اشباع خروجی از جداکننده وارد یک مبدل حرارتی برای استفاده به عنوان پیش‌گرمکن برای کاهش مصرف انرژی وارد می شود و در حالت دو فازی از آن خارج می‌شود و وارد اجکتور می‌شود.(شماره ۵) حال دو جریان ورودی به اجکتور با هم ترکیب می شوند و با فشاری کمتر نسبت به قبل از مخلوط شده از آن خارج می‌شوند و وارد کندانسور می‌شود.(شماره۶) سپس این جریان به وسیله کندانسور در همان فشار، خنک می شود و دمای آن پایین می‌آید تا حالت جریان به مایع اشباع برسد و کیفیت آن صفر شود و وارد پمپ شود.(شماره ۷) جریان خروجی پمپ توسط پمپ نسبت به جریان ورودی به آن فشار بالاتری پیدا می کند و البته کمی دمای آن نیز تغییر می‌کند اما حالت این جریان نیز مایع اشباع است و کیفیت آن نیز صفر است و وارد مبدل پیش‌گرمکن می‌شود(شماره ۸)خروجی از مبدل پیش‌گرمکن که در حالت دو فازی است وارد مبدل اصلی می شود که توسط منبع گرمایی که در این سیکل انرژی زمین گرمایست می‌شود .(شماره ۹)

در شکل زیر حالت‌های جریان‌های سیکل را در نموداری بر اساس نسبت جرمی آمونیاک موجود در مبرد به دما می‌توانید مشاهده کنید.



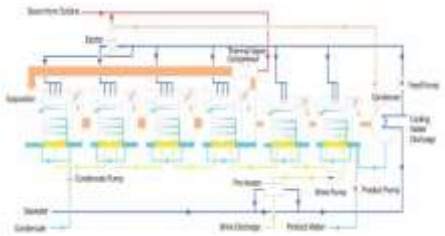
شکل(۸) :نمودار نسبت جرمی آمونیاک موجود در مبرد به دما برای سیکل[۱۲]

آب شیرین‌کن تقطیری چند اثره :

در این آب شیرین‌کن اساس کار چگالش بخارها در خلا آب دریا است.

در این آب شیرین‌کن بخار خروجی از منبع گرما که می‌تواند مبدل حرارتی یا بویلر و ... باشد (بخار محرک) و بخشی از بخار ورودی به کنداسور، توسط ترموکمپرسور مکش می‌شوند و ترموکپرسور فشار بخار کنداسور را به فشار بخار مرحله اول می‌رساند که این عمل به کمک بخاری با فشار بالاتر انجام می‌گیرد. مخلوط این دو بخار به عنوان منبع حرارتی برای تبادل گرما وارد اولین لوله می‌شود البته این بخار ورودی بالاترین دما را در بین تمامی مراحل داراست. خوراک ورودی توسط نازل بر روی لوله پاشیده می‌شود که در اثر تبادل گرما با آن به بخار تبدیل می شود و بخار درون لوله‌های کندانس می شود، قسمتی از این کندانس به عنوان محصول مرحله اول و قسمتی دیگر به منبع حرارتی اولیه برمی گردد. پساب (جریان آب شور) را نیز می توان به مرحله بعد ارسال کرد تا از دمای بالای آن استفاده کرد.

در هر یک از مراحل دوم تا آخر بخار تولیدی از مرحله قبل وارد دسته لوله‌های مرحله بعد شده تا ضمن کندانس شدن، سبب تبخیر ناگهانی خوراک ورودی به آن مرحله می‌شود. مایع کندانس شده در هر مرحله به عنوان محصول آن مرحله به حساب می‌آید.



شکل (۹) : آب شیرین‌کن MED

۴- تحلیل محاسباتی سیکل ترکیبی :

۴-۱-۱ تحلیل ترمودینامیکی مبرد مخلوط :

با توجه به اینکه مبرد به کار رفته در این سیکل مخلوط است در نتیجه دارای ویژگی‌های خاصی است و نمی‌توان از مشخصات محلول‌های خالص برای این مبرد به صورت مستقیم و بدون تغییر استفاده کرد.

برای دانستن خواص ترمودینامیکی سیالات خالص به مقدار دو خاصیت ترمودینامیکی مستقل از خواص زیر نیاز داریم:

فشار (P)، دما (T)، کیفیت (X)، آنتالپی(h)، آنتروپی (S) می‌توان سایر خواص را از جداول ترمودینامیکی بدست آورد. اما برای خواص سیالات مخلوط نیاز به یک خاصیت ترمودینامکی مستقل به نام غلظت (x) داریم. و با توجه به روابط تجربی می‌توان سایر خاصیت‌ها را نیز بدست آورد.

از فرمول‌ها که از انرژی آزاد گیبس نتیجه‌گیری شده برای بدست آوردن خاصیت های ترمودینامکی و از معادلات تجربی برای بدست آوردن نقطه شبنم و حباب استفاده می‌شود. که فرمول‌هایی به صورت زیر هستند.

در حالت مخلوط گازی مقادیر آنتالپی و آنتروپی و حجم مخصوص مخلوط از روابط زیر بدست می آید:

$$h_m^g = yh_a^g + (1-y)h_w^g \quad (۱)$$
$$v_m^g = yv_a^g + (1-y)v_w^g \quad (۲)$$
$$S_m^g = yS_a^g + (1-y)S_w^g + S^{max} \quad (۳)$$
$$S^{max} = -R\{yln(y) + (1-y)\ln(1-y)\} \quad (۴)$$

در حالت مخلوط مایع مقادیر آنتالپی و آنتروپی و حجم مخصوص مخلوط از روابط زیر بدست می آید:

$$h_m^l = xh_a^l + (1-x)h_w^l + h^E \quad (۵)$$
$$v_m^l = xv_a^l + (1-x)v_w^l + v^E \quad (۶)$$
$$S_m^l = xS_a^l + (1-x)S_w^l + S^E + S^{max} \quad (۷)$$
$$S^{max} = -R\{xln(x) + (1-x)\ln(1-x)\} \quad (۸)$$

۴-۱-۲ تحلیل ترمودینامیکی اجزا سیکل :

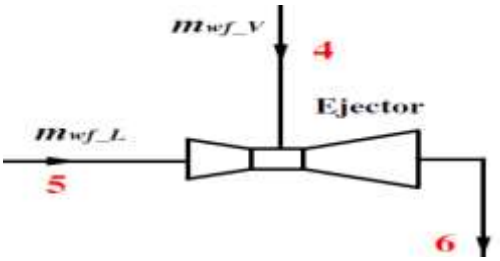
این بخش خود به سه قسمت تقسیم می‌شود :۱ . طراحی اجکتور ۲ . شرایط اولیه و مقادیر ورودی ۳ . تحلیل ترمودینامیکی سیکل

۴-۱-۲-۱ طراحی اجکتور :

در واقع در اجکتور باید تعادلی بین مشخصات جریان‌های ورودی خروجی آب باشد.

که این تعادل با توجه به روابطزیر تعریف می‌شود.

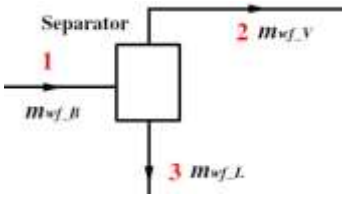
$$u = m_{wf-v} / m_{wf-l} \quad (۹)$$
$$h_6 = (h_4u + h_5)/(1+u) \quad (۱۰)$$
$$s_6 = (s_4u + s_5)/(1+u) \quad (۱۱)$$



شکل (۱۰) : اجکتور در سیکل کالینا

تعادل جرمی این سیکل بر اساس شکل ، خروجی و ورودی به جداکننده به صورت زیر است:

$$m_{wf-B} = m_{wf-V} + m_{wf-L} \quad (۱۲)$$



شکل (۱۱) : جداکننده در سیکل کالینا

۴-۱-۲-۲ شرایط اولیه و مقادیر ورودی:

۱) فرایند ترمودینامیکی در این سیکل ایده آل در نظر گرفته می شود و فرض بر این است هیچ افت فشار و گرمای از دست رفته‌ای وجود ندارد و فرآیند پمپ و توربین آیزنتروپیک است.

۲) درجه حرارت آب انتخاب شده برای سیکل بین ۱۰۵-۱۵۰ درجه سانتیگراد است و دبی آن نیز یک کیلوگرم بر ثانیه است.

۳) دمای خروجی از کندانسور (دمای نقطه ۷) ۳۵ درجه سانتیگراد فرض می‌شود.

۴) اختلاف دما بین نقطه ۵ و نقطه ۸ ، ۱۰ درجه سانتیگراد فرض شده است.

۵) حداکثر دمای تبخیر ۵ درجه کمتر از درجه حرارت آب منبع حرارتی است.

۶) کسر جرمی مبرد مخلوط در حالت ۱ ، X_B و برابر۰/۶۰۶ و در حالت ۲ ، X_V و در حالت ۳ ، X_L نام‌گذاری می‌شود.

۴-۱-۲-۳ تحلیل ترمودینامیکی سیکل :

با توجه به شکل زیر و شرایط و مقادیر ورودی فلوچارتی جهت تحلیل ترمودینامکی سیکل کالینا انتخاب شده است.

در این تحلیل حداکثر خروجی سیکل با $W_{net-max}$ توان خروجی با W_{out} قدرت پمپ با W_{pump} قدرت خروجی با W_{net} و راندمان با η نشان داده می شود. که با استفاده از قانون بقای جرم و انرژی بدست می آیند برای مثال : کار ورودی به پمپ از با توجه به شکل سیکل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$W_{pump} = m_{wf-B}(h_8 - h_7) \quad (۱۳)$$

حال هر یک از اجزا سیکل کالینا را با توجه با دو قانون بقای جرم و انرژی و رابطه با غلظت‌ها تحلیل و تجزیه می کنیم.برای نمونه در جداکننده روابط زیر از این قانون‌ها بدست می آیند:

$$m_1 = m_2 + m_3 \quad (۱۴)$$
$$m_1 X_1 = m_2 X_2 + m_3 X_3 \quad (۱۵)$$

۲-۴ تحلیل ترمودینامیکی آب شیرین‌کن :

برای تحلیل ترمودینامیکی و مدل‌سازی این آب شیرین‌کن از قانون پایستگی جرم و انرژی در مراحل و کنداسور استفاده می کنیم و برای سادگی این کار باید فرضیات زیر را در نظر بگیریم:[۱۳]

۱) عملیات به صورت پایا انجام می‌گیرد.
۲) از انتقال و افت حرارت در مراحل صرفه نظر می‌شود.
۳) بخار تولید هر مرحله بدن نمک در نظر گرفته می‌شود.
۴) تفاوت دماها در ورودی هر طبقه با مرحله قبل آن یکسان و برابر با ΔT در نظر گرفته می شود.کهΔT عبارت است از اختلاف دمای بخار ورودی به اولین مرحله با دمای خوراک ورودی به هر مرحله تقسیم بر تعداد مرحله به علاوه یک و یا از اختلاف دما مرحله اول و آخر شیرین‌سازی آب تقسیم بر تعداد مرحله منهای یک بدست می آید:

$$\Delta T = \frac{(T_S - T_F)}{N+1} \quad (۱۶)$$
$$\Delta T = \frac{(T_1 - T_n)}{N-1} \quad (۱۷)$$

در نظر گرفته شده است.

۵) دمای مرحله یک را نیز می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$T_1 = T_S - \Delta T \quad (۱۸)$$

۱) دمای آب شور در هر طبقه به اندازه ΔT از طبقه قبل کمتر است یعنی :

$$T_{i+1} = T_i + \Delta T \quad i = 1,2,\dots n \quad (۱۹)$$

در رابطه بالا T_i دمای آب شور طبقه و T_{i+1} دمای شور آب طبقه بعد بر حسب درجه سانتیگراد هستند.

حال با توجه به شکل زیر برای هر مرحله آب شرین کن موازنه جرم و انرژی را می نویسیم:

موازنه های جرم و انرژی و غلظت مرحله اول :

$$B_1 = F_1 - D_1 \quad (۲۰)$$
$$X_b * B_1 = X_{F1} * F \quad (۲۱)$$
$$D_0 = S + Dr \quad (۲۲)$$
$$D_0 * L_s = F_1 * C_P(T_F, X_F) * (T_1 - T_F) + D_1 * L_1 \quad (۲۳)$$

موازنه جرم و انرژی و غلظت مرحله n ام:

$$B_n = \sum_{i=1}^{N}(F_i - D_i) \quad (۲۴)$$
$$(X_b - X_{Fn}) * F_n = D_n * X_b \quad (۲۵)$$
$$D_{n-1} * L_{n-1} + (\sum_{i=1}^{N-1}(F_i - D_i)) * C_{p_b} * (T_{n-1} - T_n) = F_n * C_{p_f} * (T_n - T_F) + (D_n * L_n) \quad (۲۶)$$

از رابطه ۴-۵۱ می توان مقدار جرم پساب مرحله آخر یا پساب کلی که در واقع مجموع اختلاف‌های جرم آب خوراک و آب تصفیه شده است را بدست آورد.روابط ۴-۵۲ و ۴-۵۳ هم به ترتیب نشان دهنده موازنه غلظت و انرژی در مرحله آخر هستند.

موازنه کلی جرم :

$$D_T = \sum_{i=1}^{N} D_i \quad (۲۷)$$

موازنه جرم کندانسور :

$$D_f = D_N - D_r \quad (۲۸)$$

و در نهایت برای محاسبه PR از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$PR = D_T/F \quad (۲۹)$$

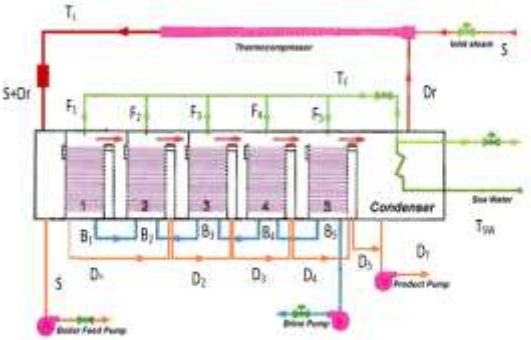
البته برای این تحلیل نیاز به مشخصات آب دریا داریم که به شرح زیر است :

$$C_p = (A + BT_{SW} + CT_{SW}{}^2 + DT_{SW}{}^3) \quad (۳۰)$$

مقادیر A، B، C و D ثابتی هستند که از روابط تجربی بدست می آیند.

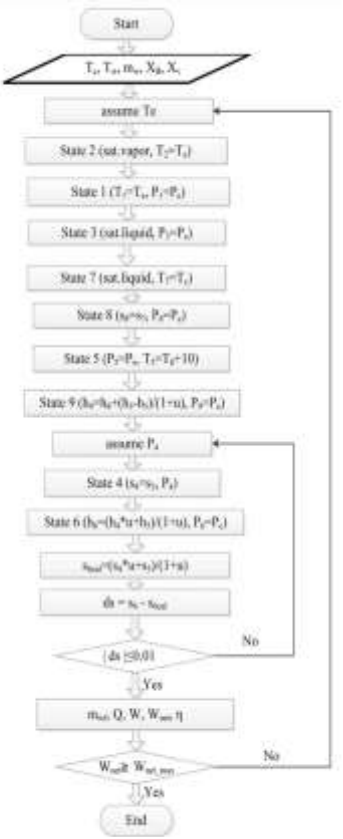
برای تحلیل این آب شیرین‌کن ورودی به صورت زیر است :

ΔT در این تحلیل ۳/۸، N تعداد مراحل ۴ ، X_F و X_b به ترتیب ۳۶ و ۷۰ ، Dr، ۱ Kg/S هستند.



شکل (۱۲) : نمودار جریانی یک سیستم MED

برای تحلیل سیکل کالینا و آب شیرین‌کن با نرم‌افزار EES از دو فلوچارت زیر استفاده می شود:



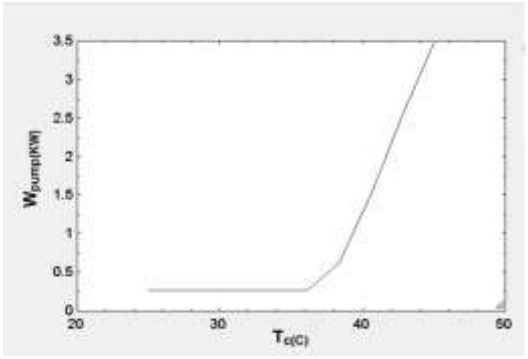
شکل (۱۳) : فلوچارت تحلیل سیکل کالینا[۱۲]

شکل (۱۴) : فلوچارت تحلیل آب شیرین کن

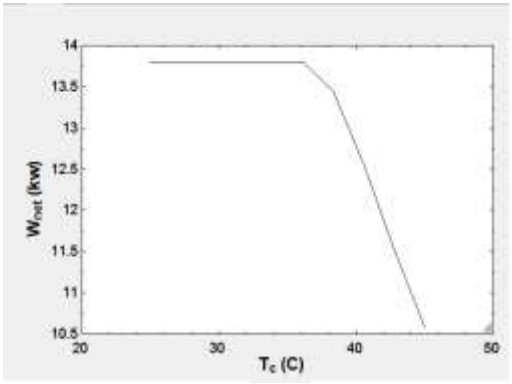
۵- بحث و نتیجه :

در این قسمت تاثیر تغییر دما کندانسور سیکل کالینا بر خروجی های سیکل ترکیبی شامل کار ورودی به پمپ، کار کلی گرمای ورودی به اواپراتور و راندمان سیکل بررسی می کنیم . تا مشخص شود دمای انتخابی برای کندانسور سیکل مناسب است یا خیر.

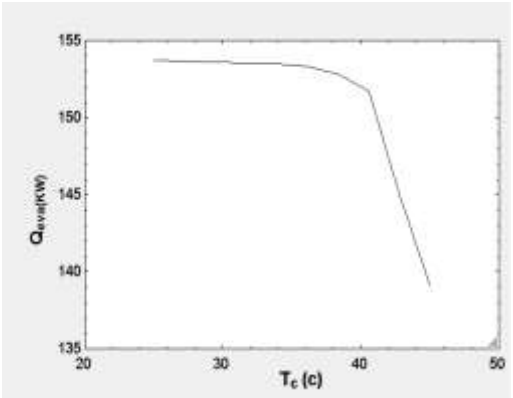
در این تحایل بازه دمای کندانسور [25,45] در نظر گرفته شده است. در نمودارهای زیر تاثیر این تغییر دما را مشاهده می کنید.



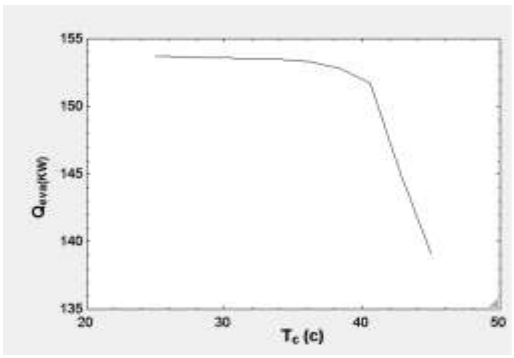
شکل (۱۵) : نمودار کار ورودی به پمپ بر حسب تغییرات دمای کندانسور در سیکل کالینا



شکل (۱۶) : نمودار کار کل بر حسب تغییرات دمای کندانسور در سیکل کالینا



شکل (۱۷) : نمودار گرمای ورودی به اواپراتور بر حسب تغییرات دمای کندانسور



شکل (۱۸) : نمودار راندمان سیکل بر حسب تغییرات دمای کندانسور

همان‌طور که در نمودارها مشخص است دمای ۳۵ درجه انتخابی برای کندانسور در سیکل کالینا از نظر راندمان نقطه مناسبی است.

در ضمن دمای آب زمین گرمایی به سیکل کالینا ۱۱۰ و خروجی و ورودی به آب شرین کن نزدیک به ۸۰ درجه سانتیگراد است. که دمای مناسبی برای بخار محرک آب شیرین کن به حساب می آید.

با توجه به ورودی های در نظر گرفته شده برای سیکل کالینا و آب شیرین‌کن خروجی‌های توربین و مقدار آب شیرین کل آن‌ها به ترتیب ۱۴/۰۶ کیلو وات و ۲/۹۴۳ Kg/S هستند.

۶- فهرست علایم :

h	آنتالپی(kj/kg)
v	حجم مخصوص(m^3/kg)
s	آنتروپی (kj/kgk)
M	جرم (kg/s)
X	غلظت آمونیاک (بدون واحد)
T	دما (درجه سانتیگراد)
N	تعداد مراحل آب شیرین کن (بدون واحد)
B	جرم پساب (Kg/S)
F	جرم آب خوراک (Kg/S)
L	گرمای نهان (kj/kgk)
C_P	گرمای ویژه آب (kj/kgk)
PR	بازده کل آب شیرین‌کن (بدون واحد)
D	جرم آب تصفیه شده (Kg/S)
ΔT	اختلاف دما (بدون واحد)

Dr	بخار محرک(Kg/S)

زیرنویس :

w	آب
a	آمونیاک
m	مخلوط
S	بخار محرک
F	آب خوراک
n	مرحله
T	مجموع
b	پساب
SW	آب دریا
f	جرم آب تصفیه شده در کندانسور
N	بخار ورودی به ترموکمپرسور

بالا نویس :

g	حالت گازی
l	حالت مایع

۷– مراجع :

1. Ventosai,V, "Analysis of possibilities for 1MW electricity generation from waste heat in the port of Rotterdam ", ***PFC Victoria Ventosa***, 18,DOI: 2099.1/13459, 2011.

2. M D Mirolli, LLC & T B Gibbons, "Kalina cycle power systems in waste heat recovery applications ".***Global Cement Magazine***, 2012

3. "Ebara and exergy team to build first kalina cycle power plant; the largest Japanese environmental engineering company and California energy technology company begin construction on first kalina cycle power plant in Japan", ***Business Wire***,2008.

4. Cideos Nuñez, Oscar F," Power production using low-temperature heat sources in El Salvador", ***Geothermal Traninig Programme***,17,2012.

5. Mlcak, Henry & Mirolli, Mark& Hjartarson, Hreinn& Ralph, Marshall, " Notes from the North: a Report on the debut year of the 2 MW kalina cycle geothermal power plant in Húsavík, Iceland",2002.

6. " The kalina cycle®: The new advantage in thermal conversion", ***Global Geothermal Ltd***,2011.

7. Madhawa, H.D.& Golubovic, M.& Worek, W& and Ikegami, Y, "The performance of the Kalina cycle system (KSC-11) with low-temperature heat sources", ***Energy Resources Technology (ASME)***.129, 243-247,2007.

8.Herzberger,P&Münch,W&Kölbel,T&Bruchmann,U&Schlagermann,P&Hötzl,H&Wolf,L&Rettenmaier,D& Steger, H &Zorn, R& Seibt,P& Möllmann, G.& Sauter, M& Ghergut,J& Ptak,T, " The geothermal power plant Bruchsal in world geothermal congress", ***Proceedings World Geothermal Congress***,2010.

9.Elson,Amelia&Tidball,Rick&Hampson,Anne, " Waste Heat to Power Market Assessment",21,2015

10. Wasabi energy Limited,2011.

11. Nath,Kaushal, " Use of multicomponent fluid for waste heat recovery using Kalina cycle ",2013

12. Li, Xinguo & Zhang,Qilin & Li, Xiajie, " A Kalina cycle with ejector",***Energy*** 54 212-219,2013

13. Bin Amer, Anwar, " New Trend in the Development of ME-TVC Desalination System" , Desalination, ***Trends and Technologies***,2011