



بررسی عملکرد سیستم ترکیبی آب شیرین کن انجمادی و سیستم تبرید دی اکسید کربن

مریم سلاجقه^۱، مهران عامری^{۲*}

۱- بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان و پژوهشگاه علوم و فناوری پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
۲- بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۹
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۲۰

کلمات کلیدی:

آب شیرین کن انجماد غیرمستقیم
بلورساز
نرخ بازیابی
نسبت یخ تشکیل شده
مصرف انرژی ویژه

خلاصه: یکی از راه‌های تامین آب در صورت عدم وجود منابع کافی آب، شیرین‌سازی آب‌های شور و لب‌شور است. فرایند انجماد هم یکی از روش‌هایی است که برای تولید آب شیرین استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی نمک‌زدایی انجمادی به همراه سیستم تبرید است. جهت سرمایه‌گذاری مورد نیاز در سیستم نمک‌زدایی انجمادی پژوهش حاضر از سیستم تبرید دی‌اکسید کربن استفاده شده است و تبخیرکننده و چگالنده سیستم تبرید به ترتیب به عنوان بلورساز و ذوب‌کننده سیستم آب شیرین کن انجمادی قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، علاوه بر بررسی ترمودینامیکی سیستم، اثر پارامترهای مهم از جمله غلظت نمک در آب شور ورودی، دمای آب شور ورودی، دما و خلوص آب شیرین تولیدی و نسبت یخ تشکیل شده بر ضریب عملکرد سیستم تبرید و مصرف انرژی سیستم آب شیرین کن انجمادی نیز بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نمک در آب شور تغذیه و دمای آب شور تغذیه، مصرف انرژی سیستم افزایش می‌یابد، همچنین افزایش نسبت یخ تشکیل شده باعث افزایش انرژی مصرفی می‌شود. با توجه به پایین بودن دمای چگالنده و عملکرد سیستم تبرید در شرایط فروبهرانی، سیستم ترکیبی پژوهش حاضر از لحاظ مصرف انرژی مقرون به صرفه است.

۱- مقدمه

فیزیکی بلورهای یخ از محلول و در نهایت ذوب یخ و تبدیل آن به مایع به دست می‌آید [۱].

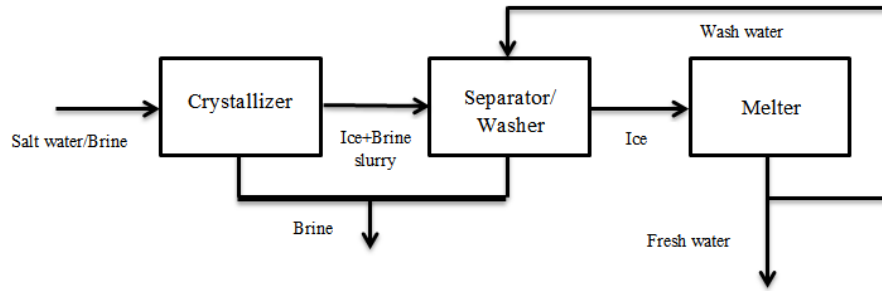
اگر چه فرایند انجماد-ذوب‌سازی به صورت گسترده‌ای استفاده نمی‌شود، اما این فرایند در جای خود دارای مزایا و معایب خاص خود است. شاید بزرگترین مزیت آن، مقدار انرژی مورد نیاز در مقایسه با روش‌هایی مثل تقطیر است، چرا که گرمای نهان ذوب یخ یک هفتم $\frac{1}{7}$ گرمای نهان تبخیر است [۱]. از آنجا که انجماد در دمای پایین انجام می‌شود پس مشکلاتی همچون خوردگی و لایه‌گذاری کمتر دیده می‌شود [۲]. همچنین به دلیل پایین بودن دمای عملیات، جهت ساخت تجهیزات می‌توان از پلاستیک و دیگر مواد ارزان قیمت استفاده نمود [۳]. از معایب انجماد هم می‌توان مواردی همچون بالابودن هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه، ماندن طعم و بوی اولیه‌ی آب را نام برد [۴]. یکی دیگر از مهمترین عوامل محدودکننده نمک‌زدایی انجمادی، عدم وجود داده‌های تجربی مناسب است.

فرایند انجماد-ذوب‌سازی شامل سه دسته اصلی انجماد با تماس

امروزه تعداد زیادی از کشورها دارای مشکل کم‌آبی هستند و اکثر آنها مجبور به استفاده از روش‌های شیرین‌سازی آب برای تهیه آب آشامیدنی هستند. تکنولوژی‌های نمک‌زدایی برای تولید آب آشامیدنی به دو دسته بزرگ تقسیم بندی می‌شوند: فرایند جداسازی با غشاء همانند فرایندهای اسمز معکوس و الکترودیالیز که به ترتیب از نیروی مکانیکی (فشاری) و الکتریکی استفاده می‌کنند و فرایندهای جداسازی با حرارت همانند تقطیر و انجماد که در آنها تغییر فاز رخ می‌دهد.

اگر چه فرایندهای اسمز معکوس و تقطیر چندانتره به صورت تجاری برای نمک‌زدایی استفاده می‌شوند، اما فرایندهای دیگری از جمله انجماد وجود دارد که برای مناطق و زمان‌های خاص مناسب است. فرایند انجماد-ذوب‌سازی شامل فرایند حذف نمک و خالص‌سازی آب از محلول آب شور با استفاده از انجماد و تبلور آب است و در حالت ایده‌آل یخ تولیدشده بایستی عاری از نمک باشد. در این فرایند آب شیرین از انجماد تقریبی آب دریا و سپس جداسازی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ameri_mm@uk.ac.ir



شکل ۱. شماتیک سیستم نمک‌زدایی انجمادی

Fig. 1. Schematic of freezing desalination system

مثل الکترودیالیز و اسمز معکوس می‌شود نیز استفاده می‌شود [۹]. اتیا [۱۰] در سال ۲۰۱۰ یک سیستم جدید برای استفاده بهینه از یک پمپ حرارتی را پیشنهاد داد که فرایند شستشوی یخ و ذوب یخ در همان محل انجماد انجام شود، بنابراین نیازی به سیستم‌های مکانیکی جهت انتقال یخ نیست و تحلیل حرارتی و تحلیل اقتصادی سیستم نیز ارائه شد. حمید و همکاران [۱۱] در یک تحقیق تجربی به بررسی تاثیر دمای مبرد بر کیفیت آب خالص در یک سیستم نمک‌زدایی انجماد غیرمستقیم پرداختند. نتایج نشان داد که دمای مبرد ۱۲- درجه سانتی‌گراد، منجر به کاهش ۴۷ درصدی در میزان شوری آب تولیدی می‌شود و در نهایت انجماد مجدد آب تولیدی، به منظور رسیدن به کیفیت استاندارد برای آب خروجی پیشنهاد داده شد. در سال ۲۰۱۱ رندل و همکاران [۱۲] یک سیستم آب‌شیرین‌کن ترکیبی را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش از سیستم نمک‌زدایی انجمادی برای تصفیه مجدد پساب خروجی از یک آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس استفاده شد. در این سیستم علاوه بر بازیابی ۹۹% آب موجود در پساب، نمک‌های سولفات کلسیم و سولفات سدیم هم بازیابی شد. لو و همکاران [۱۳] یک سیستم هیبریدی نمک‌زدایی انجمادی-غشایی را پیشنهاد دادند که برای نمک‌زدایی با پساب صفر تهیه شده است. در این پژوهش به کمک مدل‌سازی ریاضی، تاثیرات دمای آب ورودی، غلظت نمک در آب ورودی و نسبت بازیابی سیستم نمک‌زدایی انجمادی بر مصرف انرژی سیستم مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، پتانسیل استفاده از انرژی‌های نو برای تأمین انرژی این سیستم ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفت.

هتیرا و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸ به بررسی فرایند تصفیه فاضلاب به وسیله انجماد و ذوب پرداختند و غلظت ناخالصی در یخ را پس از هر چرخه انجماد تجزیه و تحلیل کردند و نشان دادند که غلظت ناخالصی در یخ عمدتاً به غلظت ناخالصی در محلول اولیه و

مستقیم^۱، انجماد با تماس غیر مستقیم^۲ و انجماد خلاء^۳ است. در روش انجماد با تماس مستقیم برای پایین‌آوردن دما و تشکیل بلور از مواد سردکننده مثل بوتان، فرئون و کلروفلئوروکربن‌ها^۴ استفاده می‌شود. در این روش ماده منجمدکننده به صورت مایع و تحت فشار از طریق یک نازل به درون آب شور پخش می‌شود. مبرد در فشار پایین تبخیر می‌شود و انرژی مورد نیاز برای تبخیر را از آب شور می‌گیرد، بنابراین دمای آب شور پایین آمده و منجر به تشکیل بلورهای یخ می‌شود. در روش انجماد با تماس غیرمستقیم انرژی حرارتی برای انجماد از میان دیواره‌های مبدل حرارتی عبور می‌کند و با انتقال حرارت از دیواره‌ها به آب شور، تشکیل بلور انجام می‌شود [۵]. در انجماد خلاء آب خود به عنوان ماده سردکننده عمل می‌کند. در این روش از ایجاد شرایط خلاء جهت تبخیر شدید و ناگهانی آب و در نتیجه سرد شدن توده آب و انجماد آن استفاده می‌شود. بخارهای حاصل به عنوان یک ماده سردکننده برای کاهش دمای محلول و بهتر شدن عمل تشکیل بلور استفاده می‌شود.

همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است تمامی این روش‌ها دارای مراحل تشکیل بلور، جداسازی کریستال‌ها، شستشوی سطحی، ذوب و تولید آب‌شیرین هستند [۶]. جداسازی بلورهای یخ را می‌توان با روش‌های فشاری، زهکشی ثقیلی، سانتریفیوژ، فیلتر و ستون شست‌وشو انجام داد. ستون شست‌وشو خود می‌تواند به دو صورت ثقیلی یا فشاری باشد [۷]. شواهد تجربی نشان داده است که آب ناشی از یخی که یک مرحله منجمد شده است ۳ تا ۶ برابر کمتر از آب ورودی نمک دارد [۸]. امروزه از فرایند انجماد برای پیش‌تصفیه آب‌های شور و لب شور که وارد سیستم‌های حساس‌تر

- 1 ^۱ Direct Freeze
- 2 ^۲ Indirect Freeze
- 3 ^۳ Vacuum Freeze
- 4 ^۴ Chlorofluorocarbons

از پیکربندیهای مختلف آبشاری است به صورتی که سیکل تبرید دی‌اکسیدکربن در سیکل دمای پایین و از سایر مبردها در سیکل با دمای بالا استفاده می‌شود [۱۸].

با توجه به مطالعات صورت گرفته، تحقیق قابل توجهی در زمینه ترکیب سیستم آب‌شیرین‌کن انجمادی با سیستم ایجاد سرمایش صورت نگرفته است. با رویکرد به این مساله در این پژوهش یک سیستم نمک‌زدایی انجمادی مورد بررسی قرار گرفته است که سرمایش مورد نیاز خود را از یک سیستم تبرید تامین می‌کند. در سیستم‌های تبرید متداول چگالنده با آب دریا و یا هوای محیط تبادل حرارت دارد اما در سیستم مورد بررسی، چگالنده سیستم تبرید حرارت خروجی خود را جهت ذوب یخ به ذوب‌کننده‌ی آب‌شیرین‌کن پس می‌دهد. با توجه به اینکه دی‌اکسیدکربن به عنوان یک مبرد غیرسمی است می‌تواند با سیستم آب‌شیرین‌کن ترکیب شود و از آنجا که دمای چگالنده در سیکل تبرید موردنظر در زیر نقطه بحرانی دی‌اکسیدکربن است، سیکل تبرید می‌تواند به صورت فروبهرانی عمل کند. به علت فروبهرانی بودن سیکل تبرید و اختلاف دمای پایین بین چگالنده و تبخیرکننده ضریب عملکرد سیستم تبرید پژوهش حاضر افزایش می‌یابد. سیستم ترکیبی موردنظر به صورت کامل با روابط ترمودینامیکی مدل‌سازی شده است. در ادامه تاثیر پارامترهای حاکم بر مساله مانند دمای آب شور، غلظت آب شور، دمای انجماد و نسبت یخ تشکیل‌شده مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- عملکرد سیستم و معادلات حاکم

در این مطالعه، سیستم آب‌شیرین‌کن انجمادی که انرژی سرمایشی خود را توسط سیستم تبرید دی‌اکسیدکربن تامین می‌کند، شرح داده شده و با در نظر گرفتن شرایط حالت دائم بررسی می‌شود. شکل ۲ شماتیکی از سیستم پیشنهادشده را نشان می‌دهد که در آن واحد بلورساز و ذوب‌کننده سیستم آب‌شیرین‌کن انجمادی به ترتیب جایگزین تبخیرکننده و چگالنده در سیستم تبرید دی‌اکسیدکربن شده است تا سرمایش تولیدی در تبخیرکننده (فرایند ۱-۴) و حرارت اتلافی در چگالنده (فرایند ۳-۲) در سیستم نمک‌زدایی انجمادی^۱ مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است، با توجه به غیرسمی بودن دی‌اکسیدکربن، در صورت نشت مبرد مشکلی برای شیرین‌سازی آب

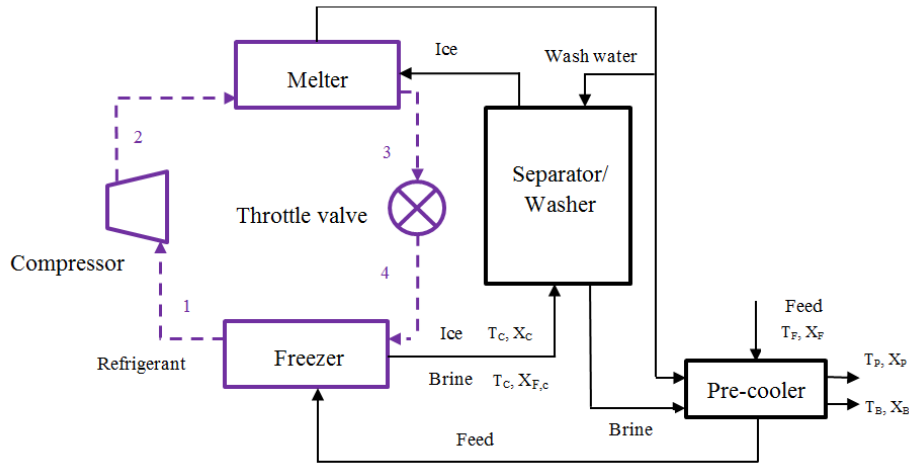
سرعت رشد یخ بستگی دارد. علاوه بر این تاثیر افزودن یک مرحله اضافی ذوب و انجماد را نیز بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که باید تعادلی بین مدت زمان کل فرآیند، بازده و مصرف انرژی آن برقرار شود و با مطالعه نتایج، این تحقیق را ایده خوبی برای تصفیه فاضلاب بیان کردند.

جایاکودی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۹ از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی سیستم نمک‌زدایی انجمادی استفاده کردند. در سیستم مذکور از انرژی برودتی تبخیر نیتروژن مایع استفاده شده است و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی توافق خوبی را نشان داده است. در این پژوهش سه مرحله انجماد به منظور کاهش شوری یخ ۱/۵ درصد به ۰/۱ درصد در نظر گرفتند که به عنوان استاندارد نوشیدن توسط سازمان بهداشت جهانی اعلام شده است. نتایج نشان داده است شوری اولیه آب‌نمک تأثیر قابل توجهی بر حجم یخ تولیدشده و میزان انجماد دارد. علاوه بر این، نتایج فوق پتانسیل استفاده از انرژی سرمایش مایعات برودتی مانند گاز طبیعی مایع را برای کاربردهای نمک‌زدایی یخ نشان داده است زیرا امروزه بیشترین انرژی سرمایش در طی احیای مجدد گاز طبیعی مایع، مورد بهره برداری قرار نمی‌گیرد.

مبرد در سیستم نمک‌زدایی انجمادی دارای الزاماتی است از جمله اینکه این ماده باید غیرسمی باشد، از نظر شیمیایی غیرفعال، غیرقابل نفوذ در آب و در مقابل تشکیل هیدراتها مقاوم باشد. در سال‌های اخیر با رشد نگرانی‌های زیست محیطی از گرم‌شدن جهانی و تخریب لایه ازن، بکارگیری مبردهای زیست‌محیطی توجه روزافزونی را به خود جلب کرده‌اند. دی‌اکسیدکربن به عنوان یک مبرد طبیعی با مزیت‌های بارزی از قبیل غیرسمی بودن، غیرقابل اشتعال بودن، تخریب لایه اوزون صفر، خواص انتقال حرارت مناسب، دسترسی آسان و قیمت پایین در فرایندهای مهندسی گوناگونی کاربرد دارد [۱۶].

خصوصیات حرارتی فیزیکی دی‌اکسیدکربن نسبت به مبردهای موجود بهتر است. از مشکلات دی‌اکسیدکربن، دمای بحرانی پایین (۳۱ درجه سانتی‌گراد) است که باعث می‌شود سیکل تبرید در اقلیم‌های گرم‌تر به صورت فربهرانی عمل کند که منجر به کاهش عملکرد سیستم می‌شود. با این حال، اتلاف بالای حرارت در خنک‌کننده گاز می‌تواند برای کاربردهای گرمایش استفاده شود [۱۷]. یکی از راه‌های استفاده از سیکل تبرید دی‌اکسیدکربن در زیر نقطه بحرانی، استفاده

1 Freeze desalination



شکل ۲. شماتیکی از چیدمان سیستم ترکیبی آب شیرین کن انجمادی و سیستم تبرید دی‌اکسیدکربن

Fig. 2. Schematic of the arrangement of a combined freezing desalination system and a CO2 refrigeration system

ایجاد نمی‌شود. D_{FC} به ترتیب دبی جرمی آب تغذیه، دبی جرمی یخ تشکیل شده و دبی جرمی آب‌نمک باقیمانده است.

$$D_F = D_{CRY} + D_{F,C} \quad (4)$$

در سیستم آب شیرین کن انجمادی، آب شور از دو جزء آب خالص و نمک تشکیل شده است و بقای نمک در بلورساز به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود که X_{FC} ، X_{CRY} ، X_F به ترتیب غلظت نمک در آب تغذیه، یخ تشکیل شده و آب‌نمک باقیمانده است.

$$X_F D_F = X_{CRY} D_{CRY} + X_{F,C} D_{F,C} \quad (5)$$

بقا انرژی در بلورساز طبق رابطه (۶) بیان می‌شود که Q_C ظرفیت تبرید بلورساز است و برابر با مقدار گرمایی است که در مرحله انجماد از آب شور حذف می‌شود و شامل گرمای محسوس و گرمای نهان برای انجماد است.

$$Q_C = D_F C_{p,F} (T_C - T_{F,P}) + D_{CRY} \Delta H_F \quad (6)$$

$$Q_C = Q_{SENS} + Q_{LAT} \quad (7)$$

مقدار یخ تشکیل شده نسبت به مقدار آب تغذیه توسط پارامتر F_s در رابطه (۸) تعریف می‌شود. بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که نسبت یخ تشکیل شده بالاتر، منجر به کیفیت یخ پایین‌تر می‌شود، در حالی که نسبت یخ پایین‌تر می‌تواند خلوص بیشتری در یخ ایجاد کند [۱۹].

$$D_{CRY} = F_s D_F \quad (8)$$

در مدل ارائه شده، آب ورودی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد توسط پمپ به پیش‌خنک‌کننده‌ی سیستم فرستاده می‌شود و با تبادل گرما با پساب خروجی و آب شیرین تولیدی، پیش‌سرد می‌شود و از آنجا به واحد بلورساز سیستم نمک‌زدایی انجمادی تغذیه می‌شود که پس از تبادل حرارت با مبرد در تبخیرکننده سیستم تبرید، بلورهای یخ تقریباً خالص در آن تولید شده و به سمت ستون شستشو هدایت می‌شوند. در ستون شستشو بلورهای یخ از آب‌نمک غلیظ جدا شده و پس از شستشو به واحد ذوب فرستاده می‌شود. واحد ذوب جایی است که یخ شستشو شده با انتقال حرارت با مبرد بخار در چگالنده سیستم تبرید ذوب شده و آب شیرین تولید می‌شود.

۲-۱- مدل‌سازی سیستم ترکیبی

به منظور تحلیل انرژی سیستم ترکیبی آب شیرین کن انجمادی و سیستم تبرید دی‌اکسیدکربن، هر یک از اجزاء سیستم به عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفته شده است. قوانین بقای جرم، بقای هر جزء از محلول و بقای انرژی برای جریان پایدار به ترتیب برابر است با:

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_o = 0 \quad (1)$$

$$\sum \dot{m}_i x_i - \sum \dot{m}_o x_o = 0 \quad (2)$$

$$\sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_o h_o - \dot{W}_i - \dot{Q}_i = 0 \quad (3)$$

۲-۲- مدل‌سازی سیستم آب شیرین کن انجمادی

معادله بقا جرم در بلورساز طبق رابطه (۴) بیان می‌شود، که D_{CRY} ، D_F

$$D_p = D_{CRY} + D_{IMP} \quad (12)$$

$$X_p D_p = X_{CRY} D_{CRY} + X_{IMB} D_{IMP} \quad (13)$$

$$D_{Wash} = .05 D_p \quad (14)$$

قبل از تخلیه یخ‌های ذوب‌شده از سیستم، مقدار کمی آب شیرین تولیدی به عنوان آب شستشو به واحد جداسازی منتقل می‌شود. مقدار مطلوب آب شستشو از ۰/۵ از کل آب تولیدی بیشتر نمی‌شود. سپس آب تولیدی باقیمانده از واحد ذوب از مبدل حرارتی عبور می‌کند [۲].

بقای انرژی در ذوب‌کننده و مبدل حرارتی پیش‌گرم‌کن طبق رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) بدست می‌آید.

$$Q_{melt} = D_{CRY} \Delta H_F + D_{IMB} C_{IMB} (T_{melt} - T_C) \quad (15)$$

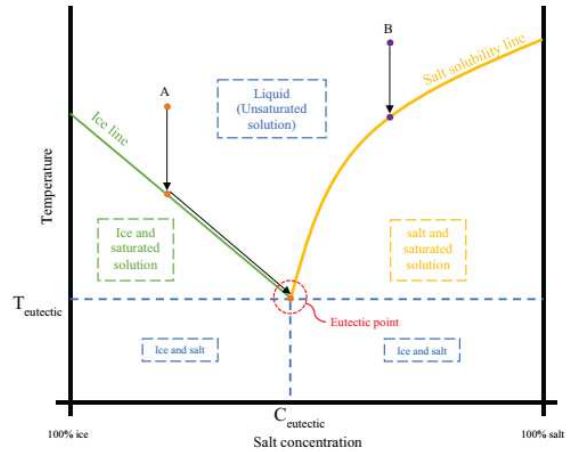
$$D_F C_{p,F} (T_{F,P} - T_F) + D_B C_{p,B} (T_P - T_C) + D_p C_{p,B} (T_P - T_{melt}) = 0 \quad (16)$$

که D_F ، D_p ، D_B و D_{IMB} به ترتیب دبی آب شور ورودی، آب شیرین تولیدی، پساب تولیدی و آب همراه با یخ می‌باشد. یکی از پارامترهایی که برای ارزیابی اثر شیرین‌سازی یک آب شیرین‌کن استفاده می‌شود، ثابت تفکیک موثر^۱ است که می‌توان به صورت نسبت غلظت نمک در آب شیرین تولیدشده به غلظت نمک در پساب تولیدی تعریف کرد [۲۰].

$$K = \frac{X_p}{X_B} \quad (17)$$

۲-۳- مدل‌سازی سیستم تبرید دی‌اکسیدکربن

شکل ۴ نمودار فشار-آنتالپی سیستم تبرید دی‌اکسیدکربن را نشان می‌دهد. سیکل مذکور از چهار قسمت اصلی تبخیرکننده، متراکم‌کننده، چگالنده و شیر انبساط تشکیل شده است. مبرد در حالی که بخار اشباع است وارد متراکم‌کننده می‌گردد (نقطه ۱). پس از عبور مبرد از متراکم‌کننده، در نقطه ۲ وارد چگالنده می‌شود، جاییکه انرژی حرارتی مبرد برای ذوب یخ در آب شیرین‌کن انجام‌دای بکار گرفته می‌شود. سرانجام مبرد پس از عبور از شیر انبساط به حالت



شکل ۳. نمودار ترکیب آب‌نمک بر حسب درصد وزنی [۲۱]
Fig. 3. Salt-solution phase diagram [21]

اصل نمک‌زدایی با روش انجماد را می‌توان با نمودار فاز محلول وتایی که نشان‌دهنده خطوط تعادل بین حالت‌های جامد و مایع مواد است، توصیف کرد. نمودار تغییر فاز آب شور در شکل ۳ نشان داده شده است. محور عمودی، دمای انجماد آب را در مقادیر مختلف غلظت نمک تعریف می‌کند، در حالی که محور افقی نشان‌دهنده غلظت نمک در آب است [۲۰]. آب دریا معمولاً حاوی غلظت نمک ۳۵ گرم بر لیتر است که منجر به دمای انجماد تقریباً ۱/۱- درجه سانتی‌گراد می‌شود. هرچه بلورهای یخ بیشتر در محلول تشکیل شود، غلظت نمک در محلول باقیمانده نیز بیشتر است. این رفتار باعث می‌شود تا دمای انجماد محلول کاهش یابد. با خنک کردن آب شور «A» با غلظت و دمای معین، کاهش دما تا رسیدن به خط یخ ادامه می‌یابد و در آن لحظه بلورهای یخ شروع به شکل‌گیری می‌کند. هر چه غلظت نمک در آب شور بیشتر باشد کاهش دمای انجماد بیشتر است.

کاهش دمای انجماد آب (ΔT_f) به دلیل نمک و ناخالصی‌های درون آب شور است و با رابطه (۹) بیان می‌شود که C_L میزان کلرینه‌بودن آب شور و S غلظت نمک در آب شور است [۲۲].

$$\Delta T_f = -9.66E^{-2} C_L - 5.2E^{-6} C_L \quad (9)$$

$$S = 1.8147 C_L \quad (10)$$

بقای جرم نمک در ستون شستشو و جداکننده طبق رابطه (۱۱) بدست می‌آید که X_B ، X_p ، X_{Wash} به ترتیب غلظت نمک در آب شستشو، آب شیرین تولیدی و پساب خروجی است.

$$X_{CRY} D_{CRY} + X_{F,C} D_{F,C} + X_{Wash} D_{Wash} = X_p D_p + X_B D_B \quad (11)$$

1 effective partition constant

$$Q_{con,c} = \dot{m}_{co_2} (h_2 - h_3) \quad (23)$$

سیال خروجی از چگالنده از شیر انبساط عبور کرده تا فشارش با فشار تبخیرکننده برابر شود. فرایند انجام شده در شیر انبساط آنتالپی ثابت است.

کل کار مورد نیاز سیستم به صورت حاصل جمع کار متراکم‌کننده‌ها و یک مقدار کار اضافی بیان می‌شود که کار اضافی برای اطمینان از تولید سرمایش کافی در سیستم انجمادی، در نظر گرفته شده است. [۲۲]

$$W_{total} = W_{comp} + W_{ADD} \quad (24)$$

$$W_{ADD} = 0.15W_{comp} \quad (25)$$

ضریب عملکرد^۱ سیکل تبرید تراکمی عبارت است از نسبت گرمای گرفته شده از محیط سردشونده به انرژی اولیه ورودی به سیکل که همان توان داده شده به متراکم‌کننده است.

$$COP = \frac{Q_{evaporator}}{W_{compressor}} \quad (26)$$

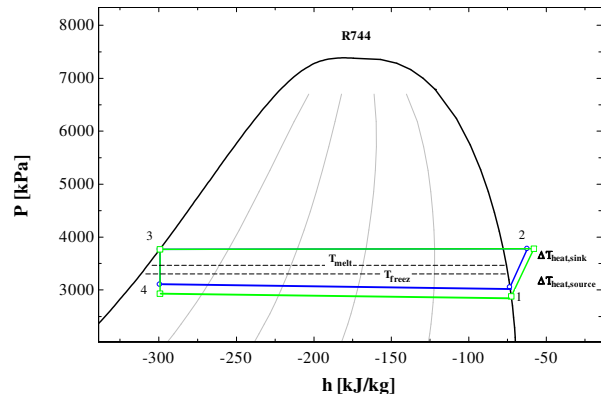
در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد سیستم آب‌شیرین‌کن انجمادی از پارامتر مصرف انرژی ویژه^۲ استفاده شده است. SEC را می‌توان نسبت انرژی مصرف شده به آب‌شیرین تولید شده تعریف نمود.

$$SEC = \frac{W}{m_{product,water}} \quad (27)$$

۲-۴- فرضیات

فرضیات در نظر گرفته شده برای سیستم ترکیبی آب‌شیرین‌کن انجمادی و سیستم تبرید دی‌اکسیدکربن به شرح ذیل می‌باشد.

- شبیه‌سازی کلیه اجزای سیکل در حالت پایدار می‌باشد.
- فرایند تراکم در متراکم‌کننده آدیاباتیک و غیر ایزنتروپیک فرض شده است.
- از افت فشار و افت حرارت در لوله‌های متصل‌کننده اجزاء به هم صرف نظر شده است.
- اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل ناچیز فرض شده است.
- دمای مبرد خروجی از چگالنده سیستم تبرید دی‌اکسیدکربن، ۳ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای ذوب یخ در نظر گرفته شده



شکل ۴. نمودار فشار-انتالپی سیستم تبرید دی‌اکسیدکربن

Fig. 4. Pressure-enthalpy diagram of carbon dioxide refrigeration system

اشباع تغییر حالت داده است.

رابطه (۱۸) مقدار انرژی جذب شده توسط تبخیرکننده را بیان می‌کند.

$$Q_{eva,c} = \dot{m}_{co_2} (h_1 - h_4) \quad (18)$$

مبرد بعد از تبخیرکننده وارد متراکم‌کننده می‌شود، توان ایده‌آل ورودی به متراکم‌کننده با رابطه (۱۹) تعریف می‌شود:

$$W_{com,ID} = \dot{m}_{co_2} (h_{ID,2} - h_1) \quad (19)$$

که $h_{ID,2}$ آنتالپی نقطه ۲ (خروجی متراکم‌کننده)، در حالتی است که متراکم‌کننده ایده‌آل بوده و فرایند ۱ تا ۲ آدیاباتیک و برگشت‌پذیر باشد. اما در واقع طی فرایند ۱ تا ۲ انتروپی افزایش می‌یابد. نوع متراکم‌کننده بکاررفته در سیستم تبرید، رفت و برگشتی است و بازده هم‌انتروپی متراکم‌کننده در این سیستم طبق رابطه (۲۰) تعریف می‌شود [۲۳] که PR نسبت فشار در متراکم‌کننده را نشان می‌دهد و طبق رابطه (۲۱) بیان می‌شود.

$$\eta_{com} = 0.85 - 0.467PR \quad (20)$$

$$PR = \frac{P_2}{P_1} \quad (21)$$

که P_1 و P_2 فشار نقاط ۱ و ۲ هستند. به این ترتیب توان واقعی مورد نیاز متراکم‌کننده از رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود.

$$W_{com} = \frac{W_{com,ID}}{\eta_{com}} \quad (22)$$

گرمای دفع شده در چگالنده طبق رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود.

1 Coefficient of performance

2 Specific Energy Constant

جدول ۱. کمیت‌های ورودی برای شبیه‌سازی

Table1. Input quantities for simulation

مقدار	پارامتر
۲۵	دمای آب شور ورودی (°C)
۳۵۰۰۰	غلظت آب شور ورودی (ppm)
۲۰۰۰	تولید آب شرب روزانه (m ³)
۲۲۰	غلظت نمک در آب خروجی از سیستم نمک‌زدایی انجمادی (ppm)
۲۰	دمای آب خروجی از سیستم نمک‌زدایی انجمادی (°C)
۳۵	نسبت یخ تشکیل شده (%) [۱۷]
۰	غلظت نمک در یخ تولیدشده در بلورساز (ppm)

کار اضافی برای سیستم صرفنظر شده است. شکل ۵ تأثیر خلوص آب‌شیرین تولید شده را بر انرژی مصرفی برای تولید آب‌شیرین نشان می‌دهد. اختلاف جزئی که در این مقایسه دیده می‌شود ناشی از تفاوت تعدادی از فرضیات پژوهش حاضر و پژوهش پایادا و همکاران [۱۹] از جمله دما، غلظت نمک و درصد یخ تشکیل شده است.

است.

- دمای مبرد خروجی از تبخیرکننده سیستم تبرید دی‌اکسیدکربن، ۳ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای انجماد آب شور تغذیه در نظر گرفته شده است.

۲-۵- اعتبارسنجی

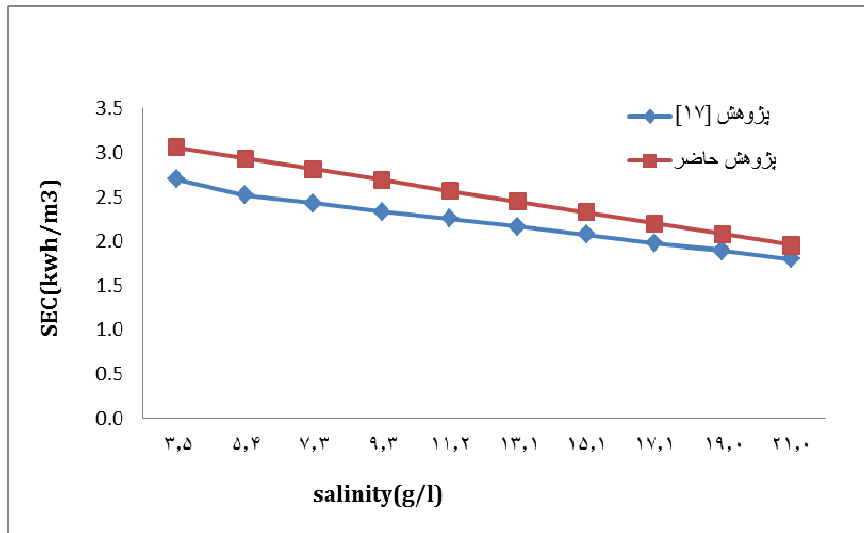
سیستم تحت مطالعه در نرم افزار EES مدل‌سازی شده است. کمیت‌های ورودی جهت آغاز شبیه‌سازی در جدول ۱ لیست شده است. برای پیش‌بینی تاثیر کمیت‌های ذکرشده در طی شبیه‌سازی، فقط یکی از کمیت‌های مورد نظر واقع در جدول ۱ تغییر می‌کند در حالیکه دیگر کمیت‌های مربوطه ثابت نگه داشته می‌شوند.

جهت حصول اطمینان کافی از صحت برنامه نوشته‌شده، مقایسه‌ای با نتایج تحقیق پایادا و همکاران [۱۹] انجام شده است. در مطالعه حاضر، از سیستم تبرید دی‌اکسیدکربن استفاده شده است و تبخیرکننده و چگالنده جایگزین بلورساز و ذوب‌کننده شده‌اند. در پژوهش پایادا و همکاران [۱۹] از سیستم نمک‌زدایی انجمادی استفاده شده است که فرض شده است که سیستم تبرید در شرایط سیکل کارنو کار می‌کند و مبرد مشخصی را در نظر نگرفته است. جهت مقایسه، سیستم تبرید پژوهش حاضر را در شرایط سیکل کارنو در نظر گرفته و از ۱۵%

۲-۶- نتایج و بحث بر روی نتایج

از آنجائیکه پارامترهایی از قبیل دمای آب شور ورودی، غلظت آب شور ورودی، غلظت آب‌شیرین تولیدی و نسبت یخ تشکیل‌شده، بیشترین تاثیر را بر عملکرد سیستم ترکیبی دارند، بنابراین در یک مطالعه پارامتری، میزان تاثیر هر کدام از این عوامل بر عملکرد سیستم، مورد مطالعه قرار گرفته است. خواص ترمودینامیکی سیال‌های عامل در دو سیستم تبرید و آب‌شیرین‌کن انجمادی بایستی مشخص شود تا تحلیل انرژی سیستم ترکیبی انجام شود و میزان مصرف انرژی ویژه و ضریب عملکرد سیستم ترکیبی مورد بررسی و محاسبه قرار گیرند. بررسی درجه آزادی برای سیستم ترکیبی مورد نظر نشان می‌دهد که برای حل معادلات بقای جرم و انرژی، پارامترهای جدول ۱ باید ثابت در نظر گرفته شوند.

نتایج حاصل از حل معادلات بقای جرم و انرژی قسمت‌های مختلف



شکل ۵. مقایسه مصرف انرژی با درصد شوری آب شیرین تولیدی در پژوهش بایادا و همکاران [۱۹] و پژوهش حاضر

Fig. 5. Comparison of energy consumption depending on water salinity of fresh water produced in Bayada et al. [19] and the present study

جدول ۲. نتایج شبیه‌سازی

Table2. Simulation results

ثابت تفکیک موثر	مصرف انرژی ویژه (kWh/m ³)	ضریب عملکرد	انرژی مورد نیاز برای ذوب (kJ/s)	انرژی مورد نیاز برای انجماد (kJ/s)	شوری پساب (ppm)	دبی آب شور ورودی (m ³ /day)
۰/۰۰۴	۷/۶	۱۶/۸	۷۶۷۲	۹۲۸۳	۵۳۸۴۶	۵۶۹۱

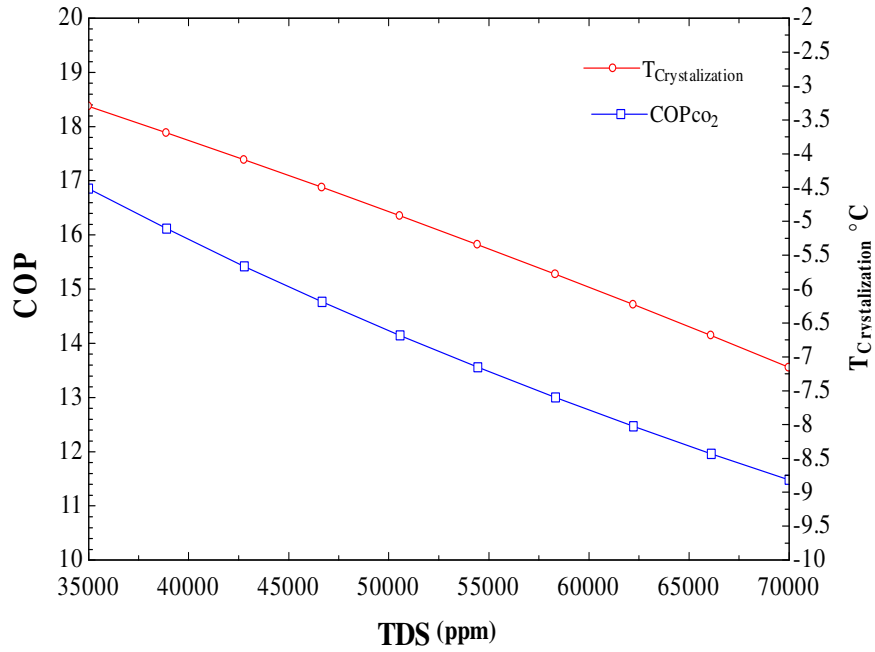
تبرید کاهش می‌یابد.

اثر دمای آب شور تغذیه بر مصرف انرژی ویژه سیستم در غلظت‌های متفاوت در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای آب شور ورودی، مصرف انرژی ویژه سیستم افزایش می‌یابد که ناشی از اختلاف دمای انجماد با دمای تغذیه است. در نتیجه افزایش حرارت محسوس در بلورساز باعث می‌شود انرژی مورد نیاز در تبخیرکننده افزایش یابد که در نهایت منجر به افزایش کار مصرفی متراکم‌کننده می‌شود.

شکل ۸ تاثیر غلظت نمک در آب تغذیه را بر روی متغیر مصرف انرژی ویژه سیستم در دماهای متفاوت نشان می‌دهد. با افزایش غلظت نمک در آب شور ورودی، نقطه انجماد آب شور کاهش می‌یابد که باعث کاهش دمای تبخیرکننده می‌شود. در نهایت انرژی مورد نیاز

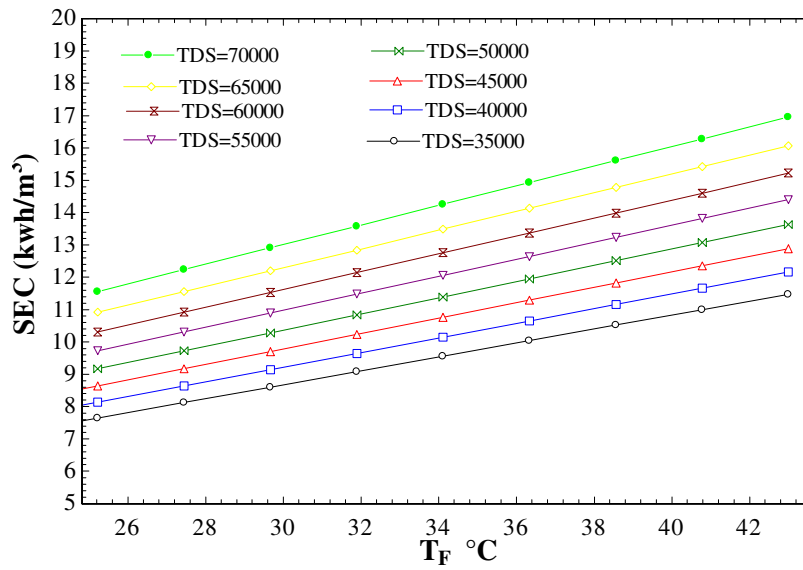
سیستم نمک‌زدایی انجمادی در جدول ۲ ارائه می‌شود. این جدول دبی جریان، غلظت نمک، دما و میزان گرمایی را که برای انجماد و ذوب یخ باید حذف یا فراهم شود نشان می‌دهد.

در شکل ۶ تأثیر غلظت نمک آب شور بر ضریب عملکرد و دمای انجماد ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نمک در آب شور تغذیه، ضریب عملکرد و دمای انجماد آب شور کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت نمک در آب شور ورودی و با توجه به رابطه (۱۱)، نقطه انجماد آب شور کاهش می‌یابد و در نتیجه با افزایش شوری از ۳۵ گرم بر لیتر به ۷۰ گرم بر لیتر روند کاهشی در دمای تبخیرکننده از ۳/۵- درجه سانتی‌گراد به ۷- درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد و به دلیل کاهش دمای بلورساز (تبخیرکننده سیستم تبرید)، مقدار انرژی مورد نیاز متراکم‌کننده افزایش و ضریب عملکرد سیستم



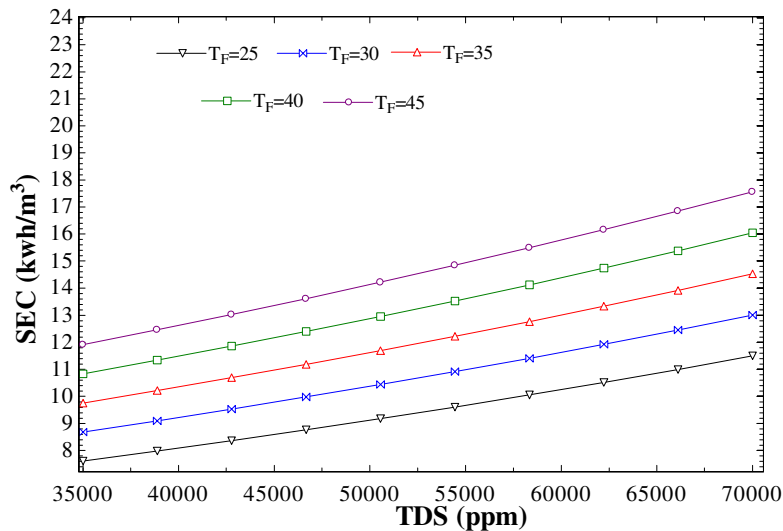
شکل ۶. تغییرات ضریب عملکرد و دمای انجماد با غلظت نمک در آب شور تغذیه

Fig. 6. Variation of COP and freezing temperature with salt concentration in supply salty water



شکل ۷. تغییرات مصرف انرژی ویژه با دمای آب شور تغذیه

Fig. 7. Variation of SEC with supply salty water temperature



شکل ۸. تغییرات مصرف انرژی ویژه با غلظت آب شور تغذیه

Fig. 8. Variation of SEC with supply salty water concentration

تولیدی و ثابت تفکیک موثر نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش غلظت نمک آب تغذیه، غلظت نمک در پساب هم افزایش می‌یابد و به دلیل ثابت فرض کردن خلوص آب شیرین تولیدشده، با افزایش غلظت نمک پساب، ثابت تفکیک موثر کاهش می‌یابد. غیرخطی بودن این کاهش با توجه به افزایش مخرج کسر و ثابت بودن صورت کسر در محاسبه مقدار ثابت تفکیک موثر در رابطه (۲۱) قابل مشاهده است.

شکل ۱۲ اثر نسبت یخ تشکیل شده را بر روی مصرف انرژی ویژه سیستم نمک‌زدایی نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل دیده می‌شود، تا درصد شوری مشخصی، با افزایش نسبت یخ تشکیل شده، مصرف انرژی ویژه تدریجی کاهش می‌یابد ولی این کاهش، یک مقدار بهینه دارد. بدین معنی که در یک نسبت یخ مشخص، مقدار مصرف انرژی ویژه به کمترین مقدار خود دست پیدا می‌کند. هرچه غلظت نمک آب تغذیه کمتر باشد نسبت یخ تشکیل شده کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت یخ تشکیل شده، غلظت نمک در محلول آب نمک باقیمانده افزایش و به دنبال آن دمای نقطه انجماد آب نمک کاهش می‌یابد، سرمایه‌های تولیدی علاوه بر تولید بیشتر یخ، جهت کاهش دمای انجماد آب شور نیز استفاده می‌شود که باعث افزایش غیرخطی مصرف انرژی ویژه می‌شود.

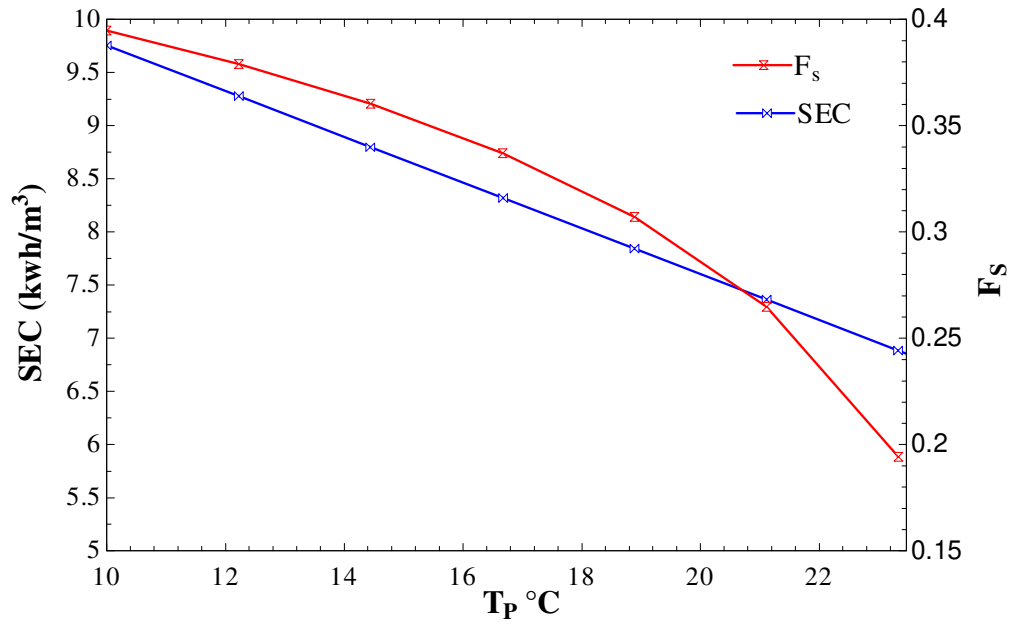
شکل ۱۳ تغییرات مصرف انرژی ویژه و نسبت تولید پساب به آب

متراکم‌کننده افزایش می‌یابد که افزایش مصرف انرژی ویژه سیستم را به همراه دارد. همانگونه که از نمودار مشخص است در آب نمک با شوری ۳۵ گرم بر لیتر، مصرف انرژی ویژه بسته به دمای ورودی، در محدوده ۱۲-۷ کیلو وات ساعت بر متر مکعب قرار می‌گیرد و در شوری‌های بالاتر، دمای آب تغذیه نقش پررنگتری دارد.

شکل ۹ تأثیر دمای آب شیرین تولیدشده را بر مصرف انرژی سیستم نمک‌زدایی انجمادی و نسبت یخ تشکیل شده بهینه نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد با کاهش دمای آب شیرین تولیدی، مصرف انرژی ویژه افزایش می‌یابد که به دلیل کاهش تبادل حرارت در مبدل حرارتی پیش‌سردکن می‌باشد. افزایش دمای آب تولیدی، افزایش دمای آب تغذیه خروجی از مبدل حرارتی را به همراه دارد و آب تغذیه ورودی با دمای بالاتری به بلورساز وارد می‌شود. با یک مقدار سرمایه‌های ثابت، انرژی بیشتری صرف انتقال حرارت محسوس آب شور می‌شود و انرژی کمتری صرف تولید یخ می‌شود در نتیجه نسبت یخ تشکیل شده کاهش می‌یابد.

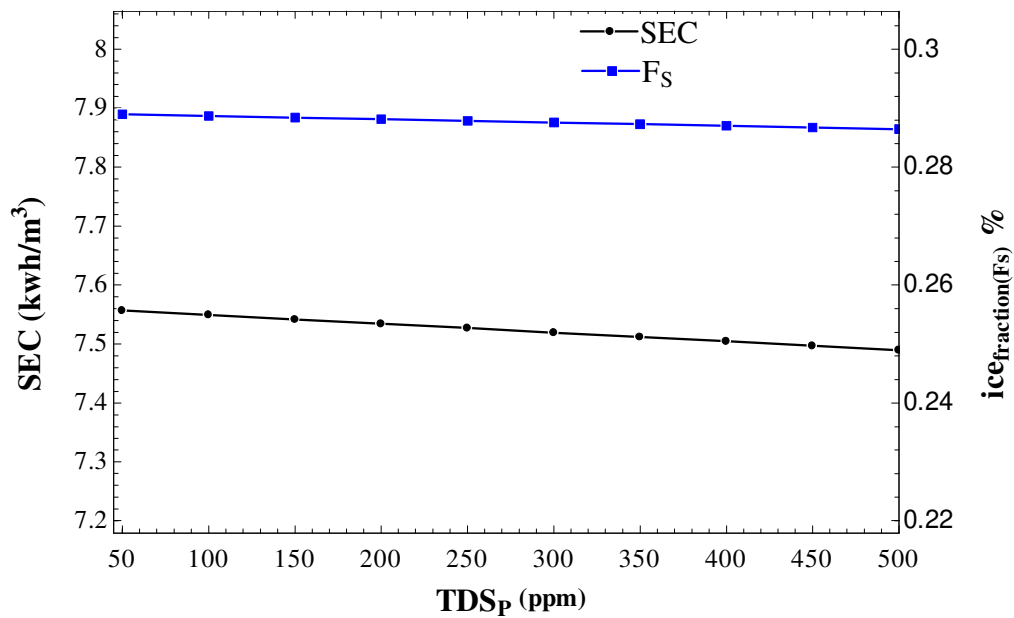
تأثیر خلوص آب شیرین تولیدشده بر مصرف انرژی سیستم و نسبت یخ تشکیل شده، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نمودار نشان می‌دهد تأثیر خلوص آب تولیدی بر مصرف انرژی ویژه و نسبت یخ تشکیل شده ناچیز است.

شکل ۱۱ تأثیر غلظت آب شور تغذیه را بر غلظت نمک در پساب



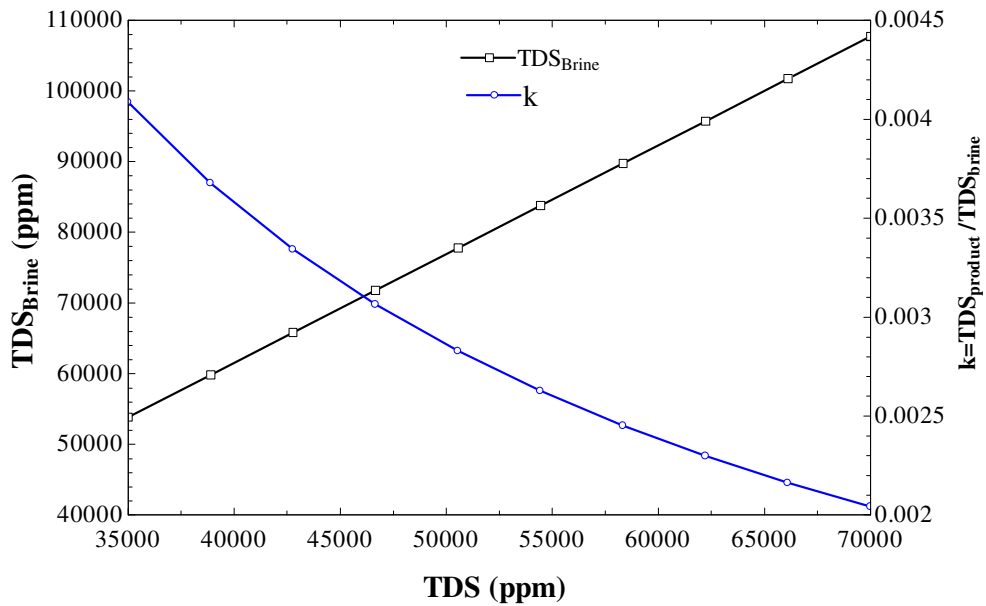
شکل ۹. تغییرات مصرف انرژی ویژه و نسبت یخ تشکیل شده با دمای آب شیرین تولیدی

Fig. 9. Variation of SEC and F_s with freshwater temperature produced



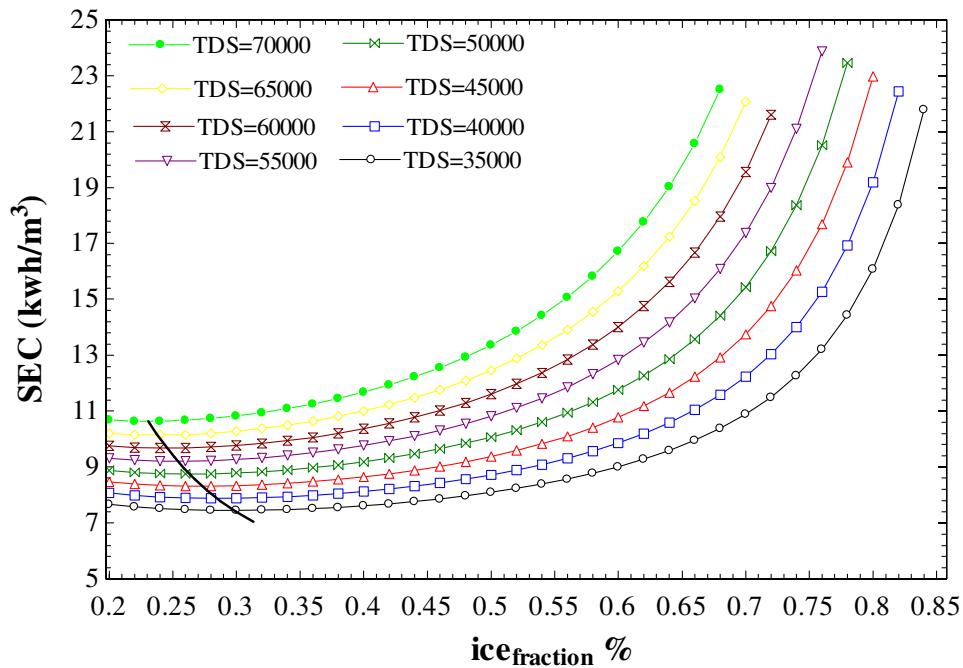
شکل ۱۰. تغییرات مصرف انرژی ویژه و نسبت یخ تشکیل شده با خلوص آب شیرین تولیدی

Fig. 10. Variation of SEC with freshwater purity produced



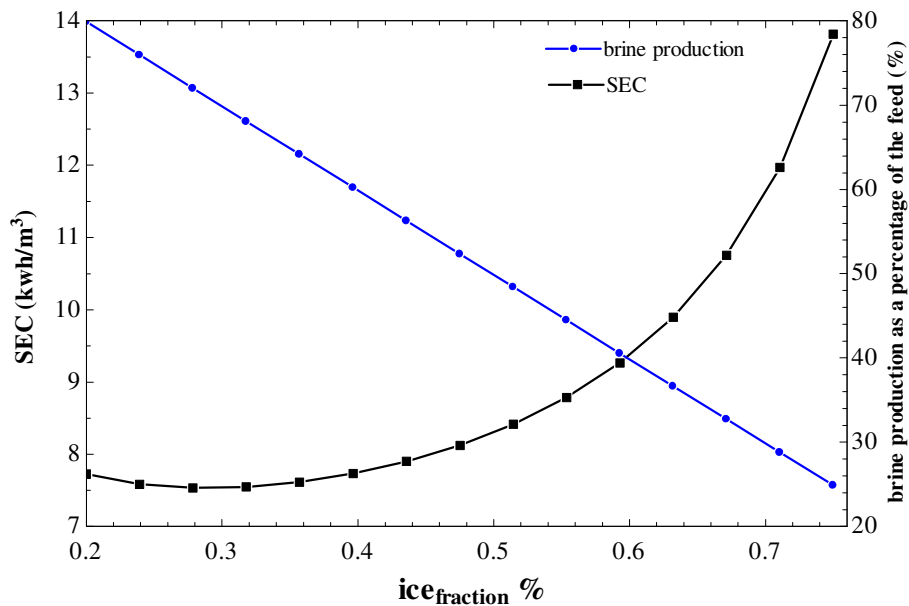
شکل ۱۱. تغییرات شوری پساب و نسبت تفکیک با غلظت آب شور ورودی

Fig.11. Variation of SEC of the system with the ice fraction at different salt concentrations



شکل ۱۲. تغییرات مصرف انرژی ویژه سیستم با نسبت یخ تشکیل شده در غلظت‌های نمک متفاوت

Fig.12. Variation of SEC of the system with the ice fraction at different salt concentrations



شکل ۱۳. تغییرات مصرف انرژی ویژه و نسبت پساب به آب تغذیه با نسبت یخ تشکیل شده
 Fig. 13. Variation of SEC and brine to feed water ratio to ice fraction

جدول ۳. مقایسه میزان مصرف انرژی با سیستم‌های نمک‌زدایی متداول

Table 3. Comparison of energy consumption with conventional desalination systems

مقدار انرژی مورد نیاز (kWh/m ³)	نوع انرژی مورد نیاز	نوع آب شیرین کن
۲/۳-۱۷	الکتریکی	اسمز معکوس [۲۴]
۶/۶-۷۷	گرمايش	چند اثره [۲۴]
۷/۶	الکتریکی	نمک‌زدایی انجمادی تحقیق حاضر

غیرخطی دیده می‌شود.

جدول ۳ مقایسه میزان مصرف انرژی سیستم تحقیق حاضر را با سیستم‌های نمک‌زدایی متداول نشان می‌دهد. مقادیر مصرف انرژی، تغییرات نسبتاً گسترده‌ای را نشان می‌دهد. این تغییر از عوامل مختلفی ناشی می‌شود که شامل تفاوت در اندازه سیستم‌ها، پیشرفت‌های تکنولوژیکی و کیفیت آب تغذیه است. مصرف انرژی سیستم نمک‌زدایی پژوهش حاضر حدود ۷ کیلو وات ساعت به ازای هر مترمکعب است. دلیل پایین بودن مصرف انرژی ویژه در سیستم‌های نمک‌زدایی انجمادی، نسبت به سیستم‌های حرارتی،

تغذیه را با تغییرات نسبت یخ تشکیل شده نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد پساب تولیدی با افزایش نسبت یخ تشکیل شده کاهش می‌یابد و از آنجا که فرایند انجماد یک فرایند تدریجی است، با افزایش درصد یخ تشکیل شده، غلظت نمک در آب شور باقیمانده افزایش می‌یابد. افزایش غلظت نمک کاهش نقطه انجماد آب را به همراه دارد. در نتیجه با افزایش نسبت یخ تشکیل شده، انرژی بیشتری مورد نیاز هست که همزمان علاوه بر تولید بیشتر یخ، صرف کاهش دمای انجماد نیز شود. بنابراین ارتباط بین نسبت یخ تشکیل شده و انرژی مورد نیاز برای واحد متر مکعب آب شیرین تولیدی یک ارتباط

۴- فهرست علائم و نشانه ها

D_F	دبی آب شور ورودی
D_{IS}	دبی مخلوط آب و یخ خروجی از بلورساز
D_{Cr}	دبی یخ خروجی از بلورساز
$D_{F,c}$	دبی آب شور منجمد نشده (m^3/d)
D_B	دبی پساب شور خروجی از FD
D_P	دبی آب شیرین تولیدی
D_{wash}	دبی آب مورد نیاز برای شستشوی یخ
D_{IMP}	دبی آب همراه با یخ
T_F	دمای آب شور ورودی ($^{\circ}C$)
$T_{F,P}$	دمای آب شور خروجی از پیش گرم کن ($^{\circ}C$)
T_C	دمای بلورساز ($^{\circ}C$)
T_P	دمای آب شیرین و پساب خروجی از FD ($^{\circ}C$)
T_{melt}	دمای ذوب یخ ($^{\circ}C$)
T_{EVAP}	دمای تبخیر کننده ($^{\circ}C$)
T_{COND}	دمای چگالنده سیستم تبرید ($^{\circ}C$)
ΔT_F	کاهش دمای انجماد آب شور بر حسب غلظت نمک
x_F	غلظت نمک در آب ورودی به FD
$x_{F,c}$	غلظت نمک در آب شور منجمد نشده
x_P	غلظت نمک در آب خروجی از FD
x_{Cr}	غلظت نمک در یخ خروجی از بلورساز
x_B	غلظت نمک در پساب خروجی از FD
x_{IMB}	غلظت نمک در آب همراه با یخ
S	شوری آب نمک (g/l)
F_s	نسبت یخ تشکیل شده
k	ثابت تفکیک موثر
Q_C	انرژی مورد نیاز برای انجماد آب شور
Q_{EVAP}	گرمای جذب شده توسط تبخیر کننده
Q_{melt}	گرمای مورد نیاز برای ذوب یخ
W_{comp}	انرژی مورد نیاز متراکم کننده
W_{ADD}	انرژی اضافی مورد نیاز
SEC	مقدار انرژی ویژه (kWh/m^3)
COP	ضریب عملکرد سیستم تبرید

پایین بودن انتالپی نهان انجماد نسبت به انتالپی نهان ذوب است. علاوه بر این در سیستم تحقیق حاضر اختلاف دمای بین تبخیر کننده (بلورساز) و چگالنده (ذوب کننده) در سیستم دی اکسید کربن کم است که کار مورد نیاز متراکم کننده را کاهش می دهد و افزایش ضریب عملکرد را به همراه دارد. در نتیجه انرژی مورد نیاز برای سرمایه گذاری در سیستم آب شیرین کن انجمادی در تحقیق حاضر قابل مقایسه با سیستم نمک زدایی اسمز معکوس است. عمده انرژی مصرفی سیستم اسمز معکوس از مرجع [۲۴] استخراج شده است مربوط به پمپ است و در سیستم ترکیبی پژوهش حاضر، تنها مصرف کننده انرژی، متراکم کننده سیکل تبرید است و سرمایه گذاری بلورساز و گرمای مورد نیاز در ذوب کننده توسط سیستم تبرید تامین می گردد.

۳- جمع بندی

نمک زدایی آب دریا به عنوان منبع آب آشامیدنی احتمالاً در آینده افزایش خواهد یافت، زیرا منابع آب خالص موجود در حال کاهش است. اگرچه روش نمک زدایی یخ به طور گسترده ای بصورت تجاری مورد استفاده قرار نمی گیرد، اما این سیستم دارای چندین مزیت است. در این پژوهش از سیستم تبرید دی اکسید کربن جهت تولید سرمایه گذاری مورد نیاز برای آب شیرین کن انجمادی استفاده شده است. تبخیر کننده و چگالنده سیستم تبرید به ترتیب به عنوان بلورساز و ذوب کننده سیستم آب شیرین کن انجمادی قرار گرفته اند. نزدیک بودن دمای چگالنده و تبخیر کننده در سیستم تبرید مورد مطالعه یکی از نقاط قوت این سیستم در کاهش مصرف انرژی است. تحلیل ترمودینامیکی تعدادی از پارامترهای موثر کمک کرد تا درک بهتری از تاثیر این پارامترها بر روی مصرف انرژی سیستم بدست آید. همانطور که انتظار می رفت، مصرف انرژی فرایند نمک زدایی با افزایش دمای آب شور تغذیه افزایش یافته است، علاوه بر این افزایش غلظت نمک در آب شور ورودی باعث کاهش ضریب عملکرد و افزایش مصرف انرژی ویژه شده است و افزایش غلظت نمک در پساب را به دنبال دارد. همچنین نتایج نشان می دهد افزایش نسبت یخ تشکیل شده به عنوان یک پارامتر تاثیرگذار افزایش مصرف انرژی ویژه را به همراه دارد. تحلیل انرژی سیستم نشان می دهد که سیستم ترکیبی تبرید دی اکسید کربن و آب شیرین کن انجمادی به عنوان یک سیستم با مصرف انرژی پایین می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

- Design of zero liquid discharge desalination (ZLDD) systems consisting of freeze desalination, membrane distillation, and crystallization powered by green energies, *Desalination*, 458 (2019) 66-75.
- [14] T. Htira, C. Cogné, E. Gagniere, D. Mangin, Experimental study of industrial wastewater treatment by freezing, *Journal of Water Process Engineering*, 23 (2018) 292-298.
- [15] H. Jayakody, R. Al-Dadah, S. Mahmoud, Cryogenic Energy for Indirect Freeze Desalination—Numerical and Experimental Investigation, *Processes*, 8(1) (2020) 19.
- [16] G. Lorentzen, Revival of carbon dioxide as a refrigerant, *International journal of refrigeration*, 17(5) (1994) 292-301.
- [17] A. Padalkar, A. Kadam, Carbon Dioxide as Natural Refrigerant, *International Journal of Applied Engineering Research*, 1(2) (2010) 261-272.
- [18] E. Bellos, C. Tzivanidis, A theoretical comparative study of CO₂ cascade refrigeration systems, *Applied Sciences*, 9(4) (2019) 790.
- [19] I. Baayyad, N. Semlali Aouragh Hassani, T. Bounahmidi, Evaluation of the energy consumption of industrial hybrid seawater desalination process combining freezing system and reverse osmosis, *Desalination and Water Treatment*, 56(10) (2015) 2593-2601.
- [20] K. El Kadi, I. Janajreh, Desalination by freeze crystallization: an overview, *Int. J. Therm. Environ. Eng*, 15(2) (2017) 103-110.
- [21] B. Kalista, H. Shin, J. Cho, A. Jang, Current development and future prospect review of freeze desalination, *Desalination*, 447 (2018) 167-181.
- [22] A. Madani, S. Aly, A combined RO/freezing system to reduce inland rejected brine, *Desalination*, 75 (1989) 241-258.
- [23] K. Srinivasan, P. Sheahen, C. Sarathy, Optimum thermodynamic conditions for upper pressure limits of transcritical carbon dioxide refrigeration cycle, *international journal of refrigeration*, 33(7) (2010) 1395-1401.
- [24] J.E. Miller, Review of water resources and desalination technologies, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 49 (2003) 2003-0800.
- [1] J.A. Heist, Freeze-Crystallization, *Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal*. McGraw-Hill Book Company, New York. 1989. 6. 133-6. 143, 4 fig., (1989).
- [2] W.E. Johnson, State-of-the-art of freezing processes, their potential and future, *Desalination*, 19(1-3) (1976) 349-358.
- [3] J. Muller, Freeze concentration of food liquids: theory, practice, and economics, *Food Technol.*, 21 (1967) 49-61.
- [4] C. WHO—Geneva, Desalination for Safe Water Supply: Guidance for the Health and Environmental Aspects Applicable to Desalination. Available online, World Health Organization (WHO), Geneva, Switzerland, (2007).
- [5] A.w.w.a.W.d. committee, Water Desalting Planning Guide for Water Utilities, NJ, 2004.
- [6] J. Rosen, Freeze concentration beats the heat, *Mechanical Engineering*, 112(12) (1990) 46.
- [7] M. Shafiur Rahman, M. Ahmed, X.D. Chen, Freezingmelting process and desalination: review of present status and future prospects, *International journal of nuclear desalination*, 2(3) (2007) 253-264.
- [8] A. House, Desalination for water supply FR/RO, *Foundation for Water Research*, (2006) 1-22.
- [9] M.S. Rahman, M. Ahmed, X.D. Chen, Freezing-melting process and desalination: I. Review of the state-of-the-art, *Separation & Purification Reviews*, 35(02) (2006) 59-96.
- [10] A.A. Attia, New proposed system for freeze water desalination using auto reversed R-22 vapor compression heat pump, *Desalination*, 254(1-3) (2010) 179-184.
- [11] F. Hanim, A. Hamid, A.R. Norfatiha, N. Ngadi, Z.Y. Zakaria, J. Mazura, Effect of coolant temperature on desalination process via progressive freeze concentration, in: *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, 2015, pp. 443-446.
- [12] D. Randall, J. Nathoo, A. Lewis, A case study for treating a reverse osmosis brine using Eutectic Freeze Crystallization—Approaching a zero waste process, *Desalination*, 266(1-3) (2011) 256-262.
- [13] K.J. Lu, Z.L. Cheng, J. Chang, L. Luo, T.-S. Chung,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Salajeghe, M. Ameri. Performance investigation of freezing desalination coupled with carbon dioxide refrigeration system, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(Special Issue 5)(2021) 3351-3366.

DOI: [10.22060/mej.2020.18120.6746](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18120.6746)



