

# بهبود عملکرد سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی با بازیابی حرارت بستر احیا شده

محمد حجت

استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه اصفهان

پایان‌نگار: m.hojjat@eng.ui.ac.ir

## چکیده

در این پژوهش روشی برای بازیابی حرارتی گرمای بستر احیا شده یک سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی با دو بستر ارائه شده است. اثر بازیابی حرارتی بسترها بر عملکرد سامانه بررسی شده است. اثر دمای آب گرم‌کننده و آب خنک‌کننده ورودی به بستر و چگالنده بر عملکرد سامانه و بازیابی حرارتی آن بررسی شده است. در دمای آب خنک‌کننده ثابت، افزایش دمای آب گرم‌کننده میزان آب تولیدی را افزایش می‌دهد و بر انرژی مصرفی تأثیر چشمگیری ندارد؛ به‌عنوان مثال در دمای آب خنک‌کننده ۲۰ درجه سلسیوس، با افزایش دمای آب گرم‌کننده از ۵۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس آب تولیدی ۲/۷۵ برابر می‌شود، حال آن‌که انرژی مصرفی ۷/۴ درصد کاهش می‌یابد. بازیابی حرارتی موجب کاهش انرژی مصرفی سامانه می‌شود. با افزایش دمای آب گرم‌کننده اثر بازیابی حرارتی افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای که در نتیجه بازیابی حرارت در آب گرم‌کننده ۵۰ و ۹۰ درجه سلسیوس مصرف انرژی سامانه به‌ترتیب ۱۰/۹ و ۳۷/۶ درصد کاهش پیدا می‌کند. افزایش دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر و چگالنده موجب کاهش آب تولیدی و افزایش انرژی مصرفی سامانه می‌شود. اثر دمای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده بر آب تولیدی و انرژی مصرفی بیشتر از دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر است. با افزایش دمای آب خنک‌کننده صرفه‌جویی انرژی در اثر بازیابی حرارتی کاهش می‌یابد. در دمای آب خنک‌کننده ۱۰ درجه سلسیوس، بازیابی حرارتی مصرف انرژی سامانه را حدود ۴۷ درصد کاهش می‌دهد؛ حال آن‌که این مقدار در ۲۳ درجه سلسیوس حدود ۱۲ درصد است. اثر دمای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده از دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر بیشتر است. با افزایش دمای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده از ۱۵ به ۳۵ درجه سلسیوس، صرفه‌جویی انرژی مصرفی در اثر بازیابی حرارتی از ۵۳/۷ تا ۹/۳ درصد کاهش می‌یابد.

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۱/۰۳

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۱

شماره صفحات: ۶۹ تا ۸۰

**کلیدواژه‌ها:** نمک‌زدایی، جذب

سطحی، بازیابی حرارت،

سیلیکاژل - آب، هم‌دم

## ۱. مقدمه

همچنین رشد اقتصادی هر کشوری منبعی بسیار حیاتی است. آب دریا معمولاً با استفاده از غشاهای اسمز معکوس، که برق زیادی مصرف می‌کنند و مشکل گرفتگی غشایی دارند، نمک‌زدایی می‌شود [۱]. روش‌های نمک‌زدایی حرارتی به انرژی الکتریکی

بحران‌های آب و انرژی، دانشمندان را وادار به تحقیق در مورد منابع آب و انرژی جایگزین کرده است. آب شیرین برای مصرف انسان و

\* اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

کمتری نیاز دارند؛ زیرا به وسیله منابع گرمایی کم کیفیت کار می‌کنند. افزون بر این، نمک‌زدایی حرارتی [۲ و ۳] را می‌توان با غشاهای الکترودیالیز معکوس برای تولید برق از گرمای کم کیفیت [۴ و ۵] مرتبط کرد. دو سامانه متداول نمک‌زدایی حرارتی تجاری [۶]، تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای [۷] و تقطیر چنداثره [۸] هستند که به ترتیب در دمای بالاتر آب نمک ۹۰ درجه سلسیوس و ۷۰ درجه سلسیوس کار می‌کنند [۹]. تقطیر غشایی یکی دیگر از فناوری‌های تجاری مناسب برای کاربردهای کوچکتر است. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و بهره‌برداری فناوری‌های نمک‌زدایی معمولی بسیار بالا است [۱۰ و ۱۱].

روشی که به تازگی توجه محققین را به خود جلب کرده‌است، نمک‌زدایی مبتنی بر جذب سطحی است که گرمای تلف شده با دمای پایین (تا ۵۰ درجه سلسیوس) را به کار می‌برد تا آب شور و آب لب‌شور را برای تولید آب آشامیدنی برای هر دو کاربرد صنعتی و مسکونی نمک‌زدایی کند [۱۲ و ۱۳]. داشتن قطعات متحرک کمتر، که باعث کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود، کاهش رسوب و خوردگی به دلیل دمای پایین کارکرد و محدود کردن آب شور به کسری از کل سامانه، توانایی تولید هم‌زمان آب آشامیدنی و سرمایش، تقطیر مضاعف در فرآیند نمک‌زدایی که امکان به اصطلاح «آلودگی زیستی» را به حداقل می‌رساند و امکان نمک‌زدایی آب شور حاوی ترکیبات آلی مهم‌ترین مزایای نمک‌زدایی جذب سطحی در مقایسه با روش‌های متداول نمک‌زدایی به‌شمار می‌رود [۱۵-۱۳]. بیشتر این سامانه‌ها از سیلیکاژل - آب به‌عنوان زوج کاری<sup>۳</sup> در نمک‌زدایی [۱۷، ۱۶، ۱۲] و همچنین سرمایش [۲۰-۱۸] استفاده می‌کنند.

وجه اصلی تحقیق در مورد سامانه‌های نمک‌زدایی و سرمایش جذب سطحی، ارزیابی عملکرد [۲۲، ۲۱] است، که معمولاً روی شاخص‌های عملکردی که به بررسی کارایی انرژی و تولید روزانه آب می‌پردازند، متمرکز می‌شود [۱۲].

وو و همکاران [۲۳] باهدف بررسی عوامل مؤثر بر نرخ تولید آب شیرین و مصرف انرژی سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی یک مدل ترمودینامیکی ارائه کردند. جذب آب بر روی جاذب سیلیکاژل با هم‌دمای لانگمویر مدل‌سازی شده است. عوامل مورد بررسی، ثابت

تعادل جذب سیلیکاژل و دمای آب گرم و خنک‌کننده بودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد برای حداقل مصرف انرژی در واحد تولید آب شیرین، یک دمای آب گرم بهینه وجود دارد که به دمای آب خنک‌کننده و سایر مؤلفه‌های عملیاتی سامانه بستگی دارد. دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر در طی فرایند جذب تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر بهره‌وری آب و مصرف انرژی دارد؛ هرچه این دما پایین‌تر باشد بهتر است. نتایج هم‌چنین نشان می‌دهد ثابت تعادل جذب سیلیکاژل و بهره‌وری آب شیرین رابطه خطی دارند. ثابت تعادل جذب سیلیکاژل تأثیر کمی در مصرف انرژی دارد. استفاده از مدل ترمودینامیکی تعادل امکان محاسبه سریع و در نتیجه بررسی بسیاری از مؤلفه‌های سامانه با اطلاعات تاحدودی اندک را فراهم می‌آورد. این مدل هیچ اطلاعاتی در مورد رفتار پویای سامانه‌های شیرین‌سازی آب مبتنی بر جذب سطحی ارائه نمی‌دهد. چرخه ترمودینامیکی سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی در دماهای مختلف تبخیرکننده ارائه و بحث شده است. مشخص شده است که، دمای تبخیرکننده نسبت به دمای آب خنک‌کننده می‌تواند ماهیت چرخه‌ها و عملکرد سامانه را به میزان قابل ملاحظه‌ای تغییر دهد [۲۴]. پژوهش‌هایی با هدف بهبود عملکرد سامانه‌های نمک‌زدایی جذب سطحی انجام گرفته‌است. امیرفخرایی و همکاران [۲۵] یک سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی با امکان بازیابی جرم و حرارت برای بهبود عملکرد سامانه را مدل‌سازی کردند. در حالت بازیابی، اثر افزایش فشار بر عملکرد بازیابی جرم بررسی شده است. این امر با بازیابی حرارت از فرایندهای چگالش و واجذب و افزایش دمای تبخیر میسر می‌شود؛ هرچه فشار جذب بیشتر باشد، جذب‌شونده بیشتری جذب می‌شود. با بازیابی حرارت از بسترها به چگالنده و تبخیرکننده، توزیع دمای آن‌ها افزایش می‌یابد. بازیابی حرارت بین بسترها، تبخیرکننده و چگالنده موجب بهبود عملکرد سامانه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند بازیابی جرم و حرارت کلید بهبود عملکرد سامانه‌های نمک‌زدایی جذب سطحی هستند. اثر بازیابی حرارتی بین تبخیرکننده و چگالنده بر عملکرد یک سامانه پیشرفته نمک‌زدایی جذب سطحی که با سیلیکاژل - آب کار می‌کند، بررسی شده است [۲۶]. مدل ریاضی چرخه ارائه و با نتایج تجربی مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده بهبود چشمگیر عملکرد سامانه در نتیجه بازیابی حرارتی هستند. عملکرد چرخه نمک‌زدایی جذب سطحی با

1. Multi Stage Flash
2. Multi Effect Distillation
3. Working Pair

بسته و شیر ۲ باز می‌شود و آب گرم در بستر ۱ جریان می‌یابد. آب گرم موجب واجذب آب از روی سیلیکاژل می‌شود. آب واجذب شده در چگالنده میعان یافته و به‌عنوان آب شیرین جمع‌آوری می‌شود. وقتی دمای بستر به بالاترین مقدار رسید تمام آب جذب شده از بستر خارج می‌شود و بستر آماده جذب مجدد است. برای تولید آب به‌صورت پیوسته بسترهای ۱ و ۲ به تناوب عمل می‌کنند.

با بازیابی حرارتی می‌توان عملکرد سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی را بهبود بخشید. همان‌گونه که ذکر شد وقتی یک بستر اشباع می‌شود باید از حالت جذب خارج و احیا شود. در همین زمان بستر دوم احیا شده و آماده جذب مجدد است. به‌جای این‌که هریک از بسترها را با جریان‌های مجزای آب خنک‌کننده و گرم‌کننده سرد و گرم کرد می‌توان از گرمای بستر احیا شده برای گرم کردن بستر اشباع شده، استفاده و در مصرف انرژی مقداری صرفه‌جویی کرد. سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی با امکان بازیابی حرارتی در شکل (۲) نشان داده شده‌است.

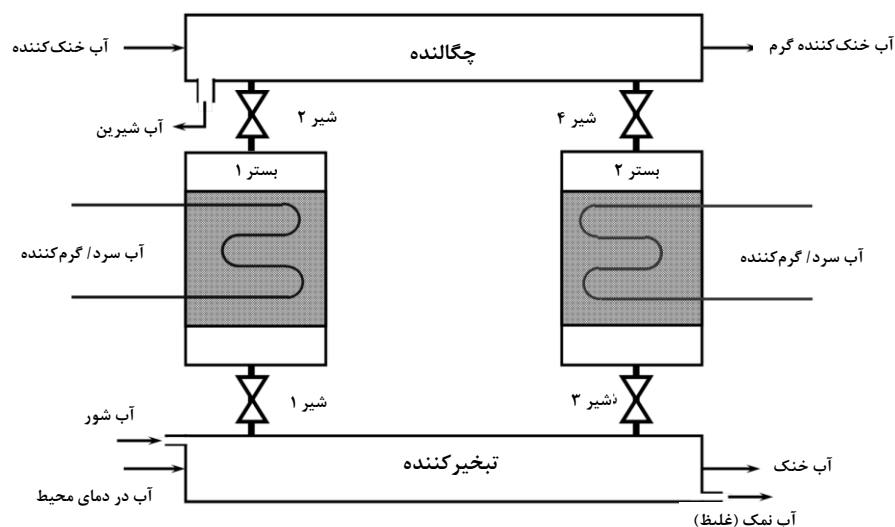
هنگام بازیابی حرارتی شیرهای ۷ و ۱۰ باز هستند و بقیه شیرها بسته می‌شوند. پمپ، آب را در دو بستر به گردش در می‌آورد، آب در بستر احیا شده، گرم می‌شود و بستر را خنک می‌کند؛ سپس وارد بستر اشباع شده می‌شود و آن را گرم می‌کند. وقتی حرارت بستر احیاشده بازیابی شد، برای ادامه کار از جریان‌های مجزای آب سرد و گرم استفاده می‌شود.

چهار بستر با بازیابی حرارتی داخلی بین چگالنده و تبخیرکننده بررسی شده است [۲۷]. بازیابی گرما به وسیله یک مدار گردش آب حاصل شده‌است. یک مدل عددی بهبود یافته برای در نظر گرفتن پدیده‌های جریان معکوس در بسترهای جاذب، چگالنده و تبخیرکننده ارائه شده است.

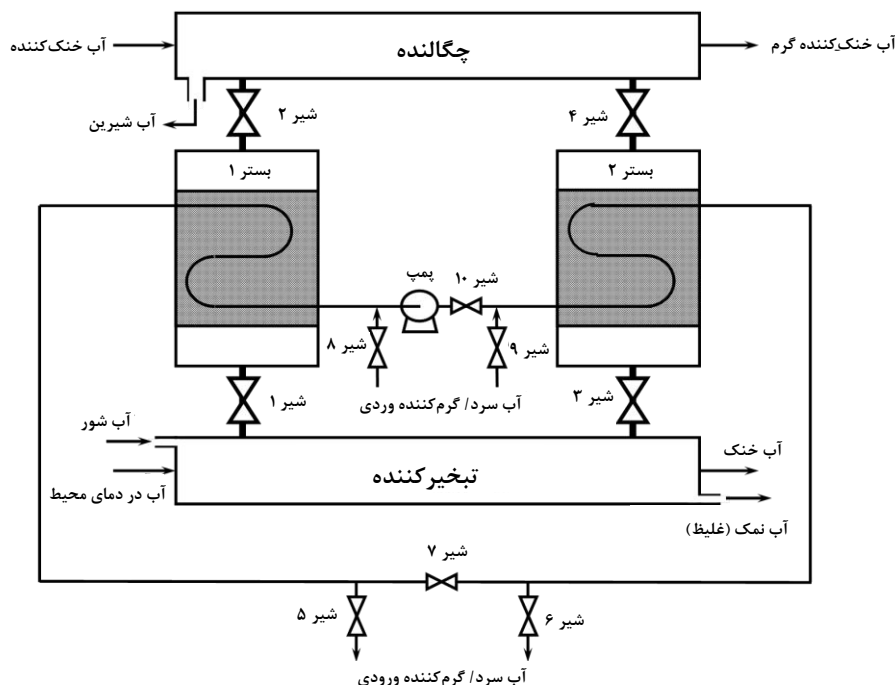
پژوهش‌های پیشین بیشتر بر روی بازیابی حرارتی در چگالنده و تبخیرکننده تمرکز داشتند. در این پژوهش روشی برای بازیابی حرارتی گرمای بستر احیا شده یک سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی با دو بستر ارائه شده است. اثر بازیابی حرارتی بسترها بر عملکرد سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی بررسی شده است. اثر دمای آب گرم‌کننده و آب خنک‌کننده ورودی به بستر و چگالنده بر عملکرد سامانه و بازیابی حرارتی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. اصول کاری

سامانه متداول نمک‌زدایی جذب سطحی با دو بستر در شکل (۱) نمایش داده شده‌است [۲۳]. اجزای اصلی سامانه بسترهای جذب، تبخیرکننده و چگالنده هستند. در هر لحظه یکی از بسترها (بستر ۱) در حال جذب و دیگری در حال احیا (واجذب) است. پس از ایجاد خلا در سامانه، آب شور وارد تبخیرکننده و شیر ۱ باز می‌شود. آب شور تبخیر و وارد بستر ۱ شده و به‌وسیله جاذب (سیلیکاژل) جذب می‌شود. گرمای جذب آزاد شده به‌وسیله آب خنک‌کننده که در بستر ۱ جریان دارد، خارج می‌شود. وقتی بستر ۱ اشباع شد، شیر ۱



شکل ۱. سامانه متداول شیرین‌سازی آب مبتنی بر جذب سطحی.



شکل ۲. سامانه شیرین سازی آب مبتنی بر جذب سطحی با امکان بازیابی حرارت.

### ۳. مدل جذب سطحی

گرمای آزاد شده در فرایند جذب سطحی که با گرمای ایزوستریک جذب<sup>۲</sup> ( $Q_{st}$ ) برابر است با معادله وانت هوف<sup>۳</sup> به همدمای جذب مربوط می شود [۳۰]:

$$-\frac{Q_{st}}{RT^2} = \frac{d \ln K}{dT} \quad (۳)$$

انتگرال گیری از معادله (۳) نتیجه می دهد:

$$K = K_0 \exp\left(\frac{Q_{st}}{RT}\right) \quad (۴)$$

که  $K_0$  یک ثابت است. با جاگذاری در معادله (۲) یک رابطه کاربردی تر  $P$ - $T$ - $q$  به دست خواهد آمد:

$$\theta = \frac{q}{q_0} = K_0 \exp\left(\frac{Q_{st}}{RT}\right)$$

یا

$$q = K'_0 \exp\left(\frac{Q_{st}}{RT}\right) P \quad (۵)$$

در سامانه های نمک زدایی جذب سطحی اغلب از سیلیکاژل به عنوان جاذب استفاده می شود. این جاذب می تواند معادل ۳۵ تا ۴۰ درصد وزن خشک خود، آب جذب کند و در دماهای پایین در محدوده ۵۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس احیا شود [۲۸]. برای نشان دادن جذب آب به وسیله سیلیکاژل معمولاً از همدمای لانگمویر استفاده می شود. شکل رایج آن به صورت زیر است [۲۹]:

$$\theta = \frac{KP}{1+KP} \quad (۱)$$

که  $\theta (=q/q_0)$  کسر پوشش سطح<sup>۱</sup>،  $q$  غلظت فاز جذب شده در تعادل،  $q_0$  ظرفیت جذب جاذب،  $P$  فشار جزئی جذب شونده و  $K$  ثابت تعادل جذب سطحی است.

در غلظت پایین جذب شونده که  $q \ll q_0$  است، معادله (۱) به صورت قانون هنری درمی آید:

$$\theta = \frac{q}{q_0} = KP \quad (۲)$$

2. Isosteric Heat of Adsorption  
3. Van't Hoff

1. Surface Coverage

فرایند از حالت ۱ که جاذب در بالاترین دما قرار دارد و کمترین میزان جذب شونده  $q_1$  را جذب کرده، آغاز می‌شود. در این حالت ارتباط بستر با چگالنده و تبخیرکننده قطع شده، آب سرد در بستر جریان می‌یابد. دمای جاذب در غلظت ثابت  $(q_1)$ ، تا حالت ۲ که فشار بستر  $(P_2)$  یعنی فشاربخار آب در دمای تبخیرکننده است، کاهش می‌یابد. در این حالت شیر بین بستر و تبخیرکننده باز می‌شود؛ درحالی‌که جریان آب در بستر ادامه می‌یابد. آب شور شروع به تبخیر کرده، وارد بستر شده، به وسیله جاذب (سیلیکاژل) جذب می‌شود. در طول این فرایند فشار بستر و تبخیرکننده، ثابت می‌ماند (یعنی  $P_2=P_3$ ). دمای بستر تا  $T_3$  که به وسیله آب خنک‌کننده تعیین می‌شود، کاهش می‌یابد. در این حالت غلظت آب در سیلیکاژل به بیشینه مقدار خود  $(q_{max}=q_3)$  می‌رسد. در این نقطه شیر بین بستر و تبخیرکننده بسته شده، جریان آب خنک‌کننده قطع می‌شود. آب گرم در بستر جریان می‌یابد تا دما و فشار آن در طول خط غلظت ثابت  $(q_3=q_4)$  افزایش یابد. این فرایند تا رسیدن به حالت ۴ که فشار آن  $P_4$  فشار بخار آب در دمای چگالنده است، ادامه می‌یابد. در حالت ۴ شیر بین بستر و چگالنده باز می‌شود. جریان آب گرم ادامه می‌یابد. آب جذب شده از جاذب دفع و وارد چگالنده می‌شود و میعان می‌یابد. فشار بستر و چگالنده ثابت می‌ماند تا بستر به بیشینه دمای خود و آب جذب شده به کمینه مقدار خود  $(q_1)$  برسد.

که  $K'_0 (= q_0 K_0)$  ثابت جذب سطحی است. معادله (۵) را می‌توان به صورت مناسب‌تر زیر نوشت:

$$\ln P = \frac{Q_{st}}{R} \left( \frac{-1}{T} \right) + \ln \left( \frac{q}{K'_0} \right) \quad (6)$$

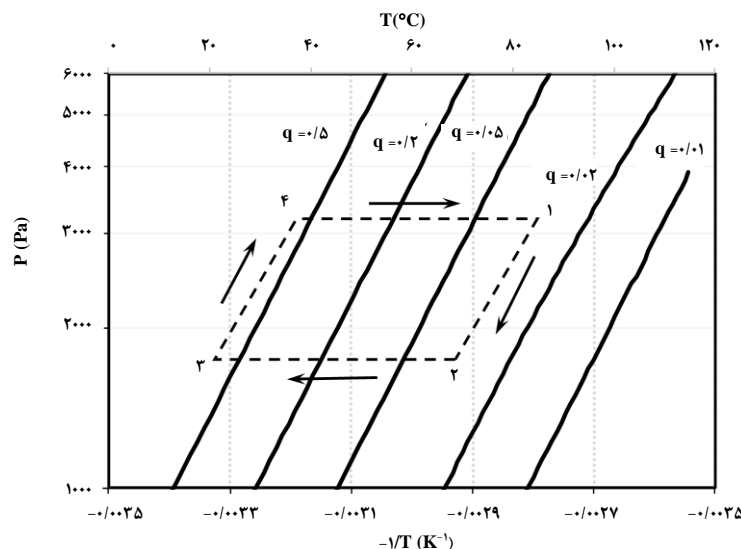
وقتی  $Q_{st}$  و  $K'_0$  برای زوج جاذب-جذب‌شونده در دست باشند، رابطه P-T-q معلوم است و تحلیل چرخه نمک‌زدایی جذب سطحی ممکن خواهد بود.

در این پژوهش از سیلیکاژل (Type RD Fuji Davison) به عنوان جاذب استفاده شده است. مشخصات سیلیکاژل در جدول (۱) داده شده است [۲۸].

جدول ۱. مشخصات سیلیکاژل [۲۸].

مقدار	مشخصه
$5/5 \times 10^{-1}$	$K'_0$ ( $\text{Pa}^{-1}$ )
۲۳۷۰	$Q_{st}$ (kJ/kg)
۰/۹۲۱	$C_p$ (kJ/kgK)

نمودار P-T-q که به صورت  $\ln P$  بر حسب  $1/T$  در شکل (۳) ترسیم شده، ابزار مناسبی برای بیان و مدل‌سازی چرخه ترمودینامیکی سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی است. همان‌گونه که در شکل (۳) نمایش داده شده، چرخه به صورت تئوری از دو ایزوستر و دو هم‌فشار (ایزوبار) تشکیل شده است.



شکل ۳. نمودار P-T-q فرایند پایای چرخه نمک‌زدایی جذب سطحی.

## ۴. مدل سازی

مدل سازی بر اساس روش وو و همکاران [۲۳] به وسیله نرم افزار متلب (MATLAB 2015) انجام می شود. با توجه به چرخه شکل (۳) آب تولیدشده در یک چرخه برای یک بستر از رابطه زیر به دست می آید:

$$m_w = m_4 - m_1 = q_4 m_{SG} - q_1 m_{SG} \quad (7)$$

که  $m_{SG}$  جرم سیلیکاژل در یک بستر و  $q_1$  و  $q_2$  غلظت های جذبشونده تعادلی در حالت ۱ و ۴ هستند و با معادله (۵) حساب می شوند.

کل انرژی گرمایش مورد نیاز در یک چرخه  $Q_h$  برای یک بستر جمع گرمای فرایندهای ۳→۴ و ۴→۱ است.

$$Q_h = Q_{3 \rightarrow 4} + Q_{4 \rightarrow 1} \quad (8)$$

که

$$Q_{3 \rightarrow 4} = (q_3 m_{SG} C_{P,w} + m_{SG} C_{P,SG})(T_4 - T_3) \quad (9)$$

و

$$Q_{4 \rightarrow 1} = \left[ m_{SG} C_{P,SG} \left( \frac{q_1 + q_4}{2} \right) m_{SG} C_{P,w} \right] (T_1 - T_4) + (q_4 - q_1) m_{SG} Q_{des} \quad (10)$$

$Q_{des}$  گرمای مورد نیاز برای واجذب یک کیلوگرم جذبشونده (آب) است. معادله (۱۰) گرمای مورد نیاز فرایند ۴ به ۱ را نتیجه می دهد که شامل گرمای محسوس برای بالا بردن دمای سیلیکاژل و آب جذب شده و گرمای نهان واجذب آب از سیلیکاژل است. سرمایش مورد نیاز در یک چرخه  $Q_c$  برای یک بستر جمع سرمایش مورد نیاز در فرایندهای ۱→۲ و ۲→۳ است.

$$Q_c = Q_{1 \rightarrow 2} + Q_{2 \rightarrow 3} \quad (11)$$

که

$$Q_{1 \rightarrow 2} = (q_1 m_{SG} C_{P,w} + m_{SG} C_{P,SG})(T_1 - T_2) \quad (12)$$

و

$$Q_{2 \rightarrow 3} = \left[ m_{SG} C_{P,SG} \left( \frac{q_2 + q_3}{2} \right) m_{SG} C_{P,w} \right] (T_2 - T_3) + (q_3 - q_2) m_{SG} Q_{ads} \quad (13)$$

$Q_{ads}$  گرمایی است که در نتیجه جذب یک کیلوگرم جذبشونده (آب) آزاد می شود. معادله (۱۳) بیان می کند که سرمایش مورد نیاز فرایند ۲ به ۳ مجموع گرمای محسوس برای کاهش دمای جاذب و آب جذب شده و گرمای نهان جذب آب به وسیله سیلیکاژل است. برای درک روشن تر از مصرف انرژی سامانه، انرژی مصرفی (انرژی مورد نیاز به ازای کیلوگرم آب تولید شده)، EC، به صورت زیر حساب می شود:

$$EC = \frac{Q_h}{m_w} \quad (14)$$

این محاسبات بدون بازیابی حرارتی انجام شده اند و سرمایش ایجادشده در تبخیرکننده لحاظ نشده است.

در حالتی که از بازیابی حرارت استفاده می شود، بخشی از گرمای مورد نیاز برای گرمایش بستری که باید احیا شود از بستر گرم احیا شده بازیافت می شود. موازنه انرژی بسترها به صورت زیر در می آید:

$$Q_{1 \rightarrow 2} + \left[ m_{SG} C_{P,SG} \left( \frac{q_2 + q'_3}{2} \right) m_{SG} C_{P,w} \right] (T_2 - T'_3) + (q'_3 - q_2) m_{SG} Q_{ads} = Q_{3 \rightarrow 4} + \left[ m_{SG} C_{P,SG} \left( \frac{q'_1 + q_4}{2} \right) m_{SG} C_{P,w} \right] (T'_1 - T_4) + (q_4 - q'_1) m_{SG} Q_{des} \quad (15)$$

دما و غلظت های میانی به گونه ای حساب می شوند تا گرمای گرفته شده از بستر گرم با گرمای داده شده به بستر سرد مساوی شود.

گرمایش مورد نیاز از معادله (۸) و انرژی مورد نیاز به ازای کیلوگرم آب تولید شده از معادله (۱۴) به دست می آیند. اما گرمایش مورد نیاز در فرایند ۴ به ۱ با معادله (۱۶) حساب می شود.

$$Q_{4 \rightarrow 1} = \left[ m_{SG} C_{P,SG} \left( \frac{q'_1 + q_4}{2} \right) m_{SG} C_{P,w} \right] (T_1 - T'_1) + (q_4 - q'_1) m_{SG} Q_{des} \quad (16)$$

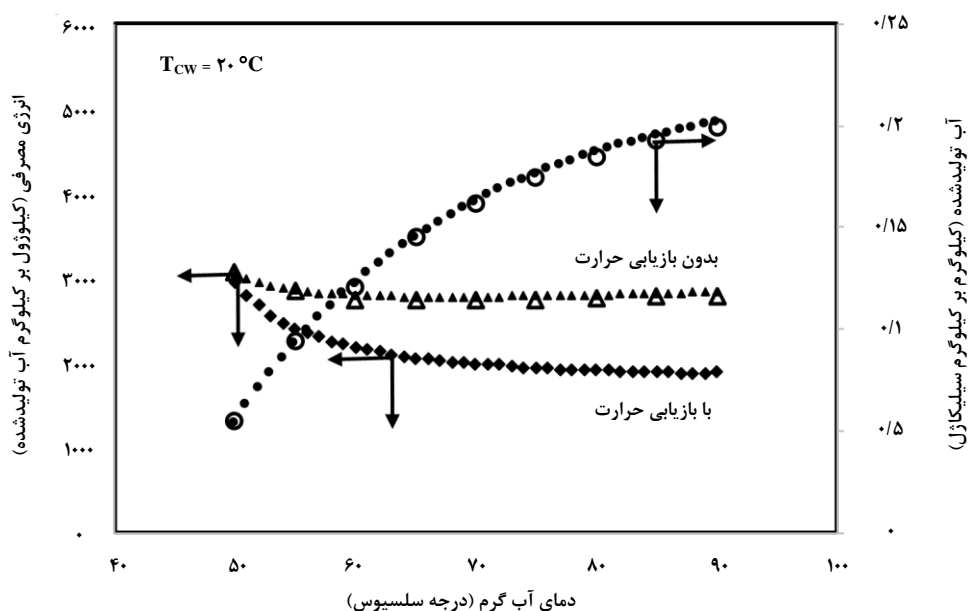
که نمایانگر درستی محاسبات است. با افزایش دمای آب گرم‌کننده، آب تولیدی افزایش می‌یابد؛ اما انرژی مصرفی اندکی کاهش و سپس کمی افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در نتیجه بازیابی حرارتی انرژی مصرفی کاهش می‌یابد و بازده حرارتی سامانه افزایش می‌یابد. هرچه دمای آب گرم‌کننده بیشتر باشد، اثر بازیابی حرارتی محسوس‌تر است؛ چرا که دمای بستر احیا شده بالاتر و انرژی بیشتری قابل بازیابی است. بازیابی حرارتی انرژی مصرفی سامانه را از ۳۷/۷ درصد در دمای آب گرم‌کننده ۵۰ درجه سلسیوس تا ۳۴/۴ درصد در دمای آب گرم‌کننده ۹۰ درجه سلسیوس کاهش می‌دهد. میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی در دماهای مختلف آب گرم‌کننده در جدول (۲) نشان داده شده است.

محاسبات براساس فرضیات زیر انجام می‌شوند:

- اختلاف دما برای انتقال حرارت ۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.
- از جرم بدنه بستر صرف نظر شده است.
- برای تمام غلظت‌های جذب‌شونده  $Q_{ads}=Q_{des}=Q_{st}$

## ۵. نتایج

در شکل (۴) تأثیر دمای آب گرم‌کننده بر میزان آب تولید شده و انرژی مصرفی سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی بدون بازیابی حرارتی و با بازیابی حرارتی نمایش داده شده‌اند. دمای آب سردکننده ۲۰ درجه سلسیوس است. نتایج وو و همکاران [۲۳] هم آورده شده،



شکل ۴. آب تولید شده و انرژی مصرفی برحسب دمای آب گرم‌کننده؛ علائم توپر نتایج این پژوهش و علائم توخالی نتایج وو و همکاران [۲۳].

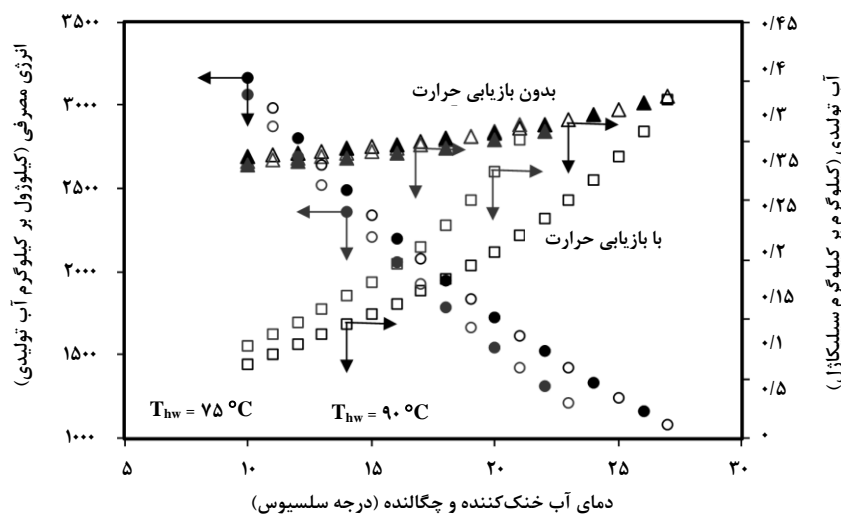
جدول ۲. اثر دمای آب گرم‌کننده بر میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی با دمای آب خنک‌کننده ۲۰ درجه سلسیوس.

دمای آب گرم‌کننده (درجه سلسیوس)	۵۰	۵۵	۶۰	۶۵	۷۰	۷۵	۸۰	۸۵	۹۰
صرفه‌جویی در انرژی مصرفی (%)	۱۰/۹	۲۲/۱	۲۷/۷	۳۱/۱	۳۳/۲	۳۴/۹	۳۶/۲	۳۶/۹	۳۷/۶

است. میزان کاهش مصرف انرژی در دماهای مختلف آب خنک کننده در جدول (۳) ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود اثر تغییر دمای آب خنک کننده در دمای پایین‌تر آب گرم کننده محسوس‌تر است. به عنوان مثال در دمای آب گرم کننده ۹۰ درجه سلسیوس، با افزایش دمای آب خنک کننده از ۱۰ تا ۲۳ درجه سلسیوس صرفه‌جویی انرژی مصرفی از ۴۷/۱ درصد به ۲۳/۴ درصد کاهش می‌یابد. حال آن‌که این در دمای آب گرم کننده ۷۵ درجه سلسیوس از ۴۶/۶ به ۱۲ درصد کاهش پیدا می‌کند.

شکل (۶) نشان‌دهنده تأثیر دمای آب خنک کننده ورودی به بستر بر میزان آب تولید شده و انرژی مصرفی سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی بدون بازیابی حرارتی است. دماهای آب گرم کننده و آب خنک کننده ورودی به چگالنده ثابت و به ترتیب برابر ۸۵ و ۲۰ درجه سلسیوس هستند. با افزایش دمای آب خنک کننده ورودی به بستر آب تولیدی کاهش و انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. بازیابی حرارتی موجب کاهش انرژی مصرفی سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی می‌شود. اثر بازیابی حرارتی با افزایش دمای آب خنک کننده ورودی به بستر کم می‌شود. بازیابی حرارتی، انرژی مصرفی سامانه در دماهای آب خنک کننده ورودی به بستر ۵ و ۳۸ درجه سلسیوس را به ترتیب ۲۸/۷ و ۱/۹ درصد کاهش می‌دهد. صرفه‌جویی انرژی در دماهای متفاوت آب خنک کننده ورودی به بستر در جدول (۴) داده شده‌است.

آب تولید شده و انرژی مصرفی سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی بدون بازیابی حرارتی و با بازیابی حرارتی به صورت تابعی از دمای آب خنک کننده ورودی به بستر و چگالنده در دو دمای آب گرم کننده در شکل (۵) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دمای آب خنک کننده مقدار آب تولیدی کاهش و انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. دمای آب گرم کننده تأثیر چشمگیری بر انرژی مصرفی سامانه ندارد. به گونه‌ای که انرژی مصرفی سامانه در دمای آب گرم کننده ۹۰ درجه سلسیوس به طور میانگین حدود ۲ درصد بیش از دمای آب گرم کننده ۷۵ درجه سلسیوس است. با افزایش دمای آب گرم کننده میزان آب تولیدی افزایش می‌یابد. اثر دمای آب گرم کننده بر مقدار آب تولیدی در دمای بالاتر آب خنک کننده بیشتر است. آب تولیدی در دمای آب گرم کننده ۹۰ درجه سلسیوس و دمای آب خنک کننده ۱۰ درجه سلسیوس حدود ۳/۵ درصد بیش از مقدار مربوط به دمای آب گرم کننده ۷۵ درجه سلسیوس است، حال آن‌که این مقدار برای آب خنک کننده با دمای ۲۳ درجه سلسیوس حدود ۲۳/۵ درصد است. باز هم مشاهده می‌شود بازیابی حرارتی موجب کاهش انرژی مصرفی سامانه می‌شود. همان گونه که پیشتر ذکر شد صرفه‌جویی در مصرف انرژی با افزایش دمای آب گرم کننده افزایش می‌یابد. صرفه‌جویی در میزان انرژی مصرفی با افزایش دمای آب خنک کننده کاهش پیدا می‌کند که نتیجه نزدیک شدن دمای بسترهای اشباع و احیاشده به یکدیگر



شکل ۵. اثر دمای آب خنک کننده ورودی به بستر و چگالنده بر مصرف انرژی و آب تولیدی سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی؛

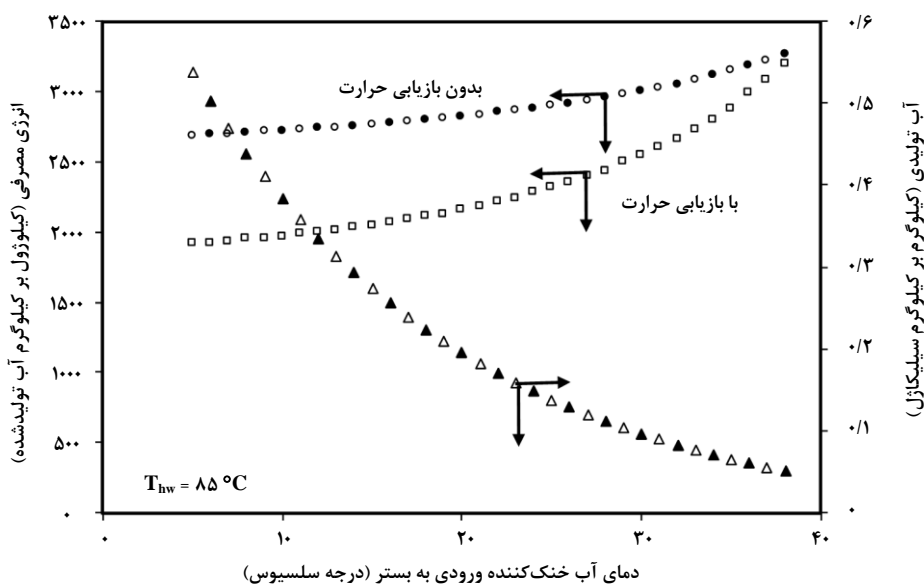
علائم سیاه مربوط به دمای آب گرم کننده ۹۰ درجه سلسیوس و علائم قرمز مربوط به دمای آب گرم کننده ۷۵ درجه

سلسیوس؛ علائم توپر نتایج وو و همکاران [۲۳].



جدول ۳. اثر دمای آب خنک‌کننده بر صرفه‌جویی انرژی مصرفی.

دمای آب خنک‌کننده (درجه سلسیوس)				دمای آب گرم‌کننده (درجه سلسیوس)	صرفه‌جویی در انرژی مصرفی (%)
۲۳	۲۰	۱۵	۱۰		
۱۲/۰	۲۴/۱	۳۶/۶	۴۶/۶	۷۵	
۲۳/۴	۳۰/۳	۳۹/۰	۴۷/۱	۹۰	



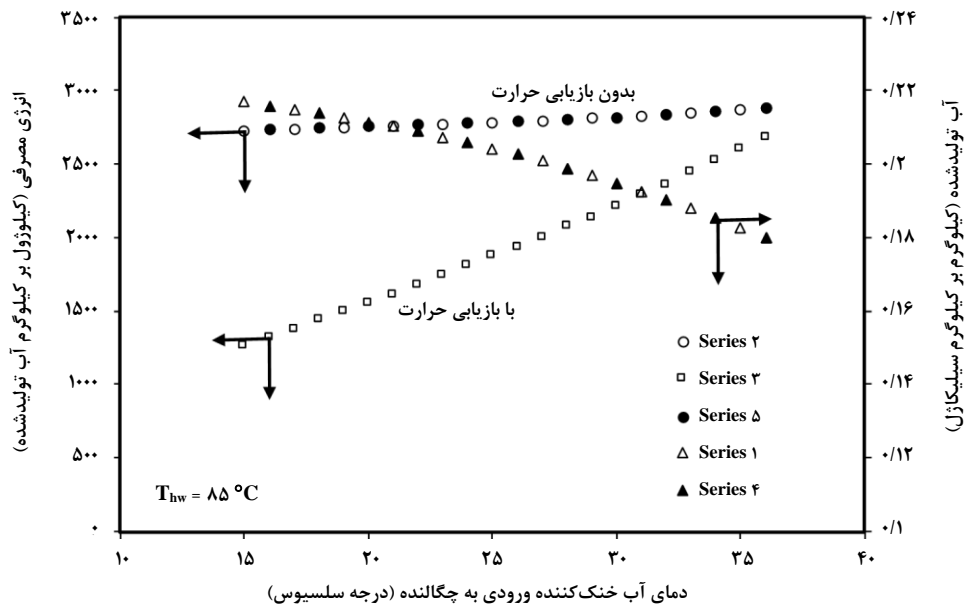
شکل ۶. آب تولید شده و انرژی مصرفی بر حسب دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر؛ دمای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده ثابت و ۲۰ درجه سلسیوس؛ علائم توپر نتایج وو و همکاران [۲۳].

جدول ۴. اثر دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر بر صرفه‌جویی انرژی مصرفی با دمای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده ۲۰ درجه سلسیوس.

دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر (درجه سلسیوس)								صرفه‌جویی در انرژی مصرفی (%)
۳۸	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵	
۱/۹	۸/۴	۱۵/۳	۲۰/۱	۲۳/۴	۲۵/۹	۲۷/۸	۲۸/۷	

اثر بازیابی حرارتی با افزایش دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر کاهش پیدا می‌کند؛ در نتیجه بازیابی حرارتی، انرژی مصرفی سامانه در دماهای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده ۱۵ و ۳۶ درجه سلسیوس به ترتیب ۵۳/۷ و ۶/۷ درصد کاهش می‌یابد. صرفه‌جویی انرژی در دماهای متفاوت آب خنک‌کننده ورودی به بستر در جدول (۵) داده شده است.

در شکل (۷) میزان آب تولید شده و انرژی مصرفی سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی بدون بازیابی حرارتی و با بازیابی حرارتی بر حسب دمای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده ترسیم شده است. دمای آب گرم‌کننده در ۸۵ درجه سلسیوس ثابت در نظر گرفته شده است. با افزایش دمای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده آب تولیدی کاهش و انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. بازیابی حرارتی موجب کاهش انرژی مصرفی سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی می‌شود.



شکل ۷. آب تولید شده و انرژی مصرفی بر حسب دمای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده؛ دمای آب خنک‌کننده ورودی بستر به ثابت و ۲۰ درجه سلسیوس؛ علائم توپر نتایج وو و همکاران [۲۳].

جدول ۵. اثر دمای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده بر صرفه‌جویی انرژی مصرفی با دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر ۲۰ درجه سلسیوس.

دمای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده (درجه سلسیوس)	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵
صرفه‌جویی در انرژی مصرفی (%)	۵۳/۷	۴۳/۵	۳۲/۷	۲۱/۴	۹/۳

چگالنده موجب کاهش آب تولیدی و افزایش انرژی مصرفی سامانه می‌شود. علت این است که با افزایش دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر، ظرفیت جاذب کم می‌شود و با افزایش دمای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده فشار بخار آب در چگالنده افزایش و آب کمتری میعان می‌یابد. اثر دمای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده بر آب تولیدی و انرژی مصرفی، بیشتر از اثر دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر است. با افزایش دمای آب خنک‌کننده به بستر صرفه‌جویی انرژی در اثر بازیابی حرارتی کاهش می‌یابد؛ زیرا افزایش دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر اختلاف دمای بسترهای اشباع و احیا شده را کاهش می‌دهد. باز هم اثر دمای آب خنک‌کننده ورودی به چگالنده از دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر بیشتر است.

## ۶. نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش اثر بازیابی حرارتی بسترها بر عملکرد سامانه نمک‌زدایی جذب سطحی بررسی شده است. اثر دمای آب گرم‌کننده و دماهای آب خنک‌کننده ورودی به بستر و چگالنده بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند افزایش دمای آب گرم‌کننده میزان آب تولیدی را افزایش می‌دهد و بر انرژی مصرفی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای ندارد. بازیابی حرارتی موجب کاهش انرژی مصرفی سامانه می‌شود. با افزایش دمای آب گرم‌کننده اثر بازیابی حرارتی افزایش می‌یابد؛ چراکه با افزایش دمای آب گرم‌کننده اختلاف دمای بسترهای احیا و اشباع شده افزایش پیدا می‌کند. اثر دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر و چگالنده در دماهای آب گرم‌کننده ثابت هم بر میزان آب تولیدی و انرژی مصرفی سامانه بررسی شده‌است. نتایج نشان می‌دهند افزایش دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر و

- [5] Bevacqua, M., Tamburini, A., Papapetrou, M., Cipollina, A., Micale, G., Piacentino, A., "Reverse electrodialysis with  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ -water systems for heat-to-power conversion", *Energy*, Vol. 137, pp. 1293-1307, (2017).
- [6] Zheng, X., Chen, D., Wang, Q., Zhang, Z., "Seawater desalination in China: Retrospect and prospect", *Chem Eng J*, Vol. 242, pp. 404-413, (2014).
- [7] El-Dessouky, H. T., Ettouney, H. M., Al-Roumi, Y., "Multi-stage flash desalination: present and future outlook", *Chem Eng J*, Vol. 73, (2), pp. 173-190, (1999).
- [8] Palenzuela, P., Hassan, A. S., Zaragoza, G., Alarcón-Padilla, D. -C., "Steady state model for multi-effect distillation case study: Plataforma Solar de Almería MED pilot plant", *Desalination*, Vol. 337, pp. 31-42, (2014).
- [9] Al-Karaghoul, A., Kazmerski, L. L., "Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes", *Renewable Sustainable Energy Rev*, Vol. 24, pp. 343-356, (2013)
- [10] Ng, K. C., Shahzad, M. W., Son, H. S., Hamed, O. A., "An exergy approach to efficiency evaluation of desalination", *Appl Phys Lett*, Vol. 110, (18), p. 184101, (2017).
- [11] Shahzad, M. W., Burhan, M., Ang, L., Ng, K. C., "Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability", *Desalination*, Vol. 413, pp. 52-64, (2017).
- [12] Ng, K. C., Thu, K., Kim, Y., Chakraborty, A., Amy, G., "Adsorption desalination: An emerging low-cost thermal desalination method", *Desalination*, Vol. 308, pp. 161-179, (2013).
- [13] Wang, X., Ng, K. C., "Experimental investigation of an adsorption desalination plant using low-temperature waste heat", *Appl Therm Eng*, Vol. 25, (17), pp. 2780-2789, (2005)
- [14] El-Sharkawy, I. I., Thu, K., Ng, K. C., Saha, B. B., Chakraborty, A., Koyama, S., "Performance improvement of adsorption desalination plant: experimental investigation", *International Review of Chemical Engineering*, Vol. 6, (3), pp. 127-132, (2014).
- [15] Wang, X., Ng, K. C., Chakraborty, A., Saha, B. B., "How Heat and Mass Recovery Strategies Impact the Performance of Adsorption Desalination Plant: Theory and Experiments", *Heat Transfer Eng*, Vol. 28, (2), pp. 147-153, (2007).
- [16] Mitra, S., Kumar, P., Srinivasan, K., Dutta, P., "Performance evaluation of a two-stage silica gel + water adsorption based cooling-cum-desalination system", *Int J Refrig*, Vol. 58, pp. 186-198, (2015).

## علائم اختصاری و نمادها

ظرفیت گرمایی (kJ/kgK)	$C_p$
انرژی مصرفی (kJ/kg <sub>w</sub> )	EC
ثابت تعادل جذب سطحی (بی بعد)	K
ثابت جذب سطحی (kg/kg dry adsorbent)	$K'_0 (=q_0 K_0)$
جرم (kg)	m
فشار جزئی جذب شونده (Pa)	P
غلظت جذب شونده در تعادل	q
(kg/kg dry adsorbent)	
ظرفیت جذب جاذب (kg/kg dry adsorbent)	$q_0$
حرارت (kJ)	Q
گرمای ایزوستریک جذب (kJ/kg)	$Q_{st}$
ثابت جهانی گازها (J/molK)	R
دما (K)	T
<b>حروف یونانی</b>	
کسر پوشش سطح (بی بعد)	$\theta$
<b>زیرنویس</b>	
جذب	ads
واجذب	des
سرمایش	c
گرمایش	h
سیلیکازل	SG
آب	w

## مراجع

- [1] Betts, K., "Technology Solutions: Desalination, desalination everywhere", *Environ Sci Technol*, Vol. 38, (13), pp. 246A-7A, (2004).
- [2] Tamburini, A., Tedesco, M., Cipollina, A., Micale, G., Ciofalo, M., Papapetrou, M., Van Baak, W., Piacentino, A., "Reverse electrodialysis heat engine for sustainable power production", *Appl Energy*, Vol. 206, pp. 1334-1353, (2017).
- [3] Olkis, C., Santori, G., Brandani, S., "An Adsorption Reverse Electrodialysis system for the generation of electricity from low-grade heat", *Appl Energy*, Vol. 231, pp. 222-234, (2018).
- [4] Giacalone, F., Olkis, C., Santori, G., Cipollina, A., Brandani, S., Micale, G., "Novel solutions for closed-loop reverse electrodialysis: Thermodynamic characterisation and perspective analysis", *Energy*, Vol. 166, pp. 674-689, (2019).

- [17] Alsaman, A. S., Askalany, A. A., Harby, K., Ahmed, M. S., "Performance evaluation of a solar-driven adsorption desalination-cooling system", *Energy*, Vol. 128, pp. 196-207, (2017).
- [18] Vodianitskaia, P. J., Soares, J. J., Melo, H., Gurgel, J. M., "Experimental chiller with silica gel: Adsorption kinetics analysis and performance evaluation", *Energ Convers Manage*, Vol. 132, pp. 172-179, (2017).
- [19] Sapienza, A., Gullì, G., Calabrese, L., Palomba, V., Frazzica, A., Brancato, V., La Rosa, D., Vasta, S., Freni, A., Bonaccorsi, L., Cacciola, G., "An innovative adsorptive chiller prototype based on 3 hybrid coated/granular adsorbers", *Appl Energy*, Vol. 179, pp. 929-938, (2016).
- [20] Chorowski, M., Pyrka, P., "Modelling and experimental investigation of an adsorption chiller using low-temperature heat from cogeneration", *Energy*, Vol. 92, pp. 221-229, (2015).
- [21] Sharonov, V. E., Aristov, Y. I., "Chemical and adsorption heat pumps: Comments on the second law efficiency", *Chem Eng J*, Vol. 136, (2), pp. 419-424, (2008).
- [22] Al-Ghouti, M. A., Yousef, I., Ahmad, R., Ghrair, A. M., Al-Maaitah, A. A., "Characterization of diethyl ether adsorption on activated carbon using a novel adsorption refrigerator", *Chem Eng J*, Vol. 162, (1), pp. 234-241, (2010).
- [23] Wu, J. W., Biggs, M. J., Hu, E. J., "Thermodynamic analysis of an adsorption-based desalination cycle", *Chem Eng Res Des*, Vol. 88, (12), pp. 1541-1547, (2010).
- [24] Wu, J. W., Hu, E. J., Biggs, M. J., "Thermodynamic analysis of an adsorption-based desalination cycle (part II): Effect of evaporator temperature on performance", *Chem Eng Res Des*, Vol. 89, (10), pp. 2168-2175, (2011).
- [25] Amirfakhraei, A., Zarei, T., Khorshidi, J., "Performance Improvement of Adsorption Desalination System by Applying Mass and Heat Recovery Processes", *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol., p. 100516, (2020).
- [26] Thu, K., Saha, B. B., Chakraborty, A., Chun, W. G., Ng, K. C., "Study on an advanced adsorption desalination cycle with evaporator-condenser heat recovery circuit", *Int J Heat Mass Transfer*, Vol. 54, (1), pp. 43-51, (2011).
- [27] Thu, K., Yanagi, H., Saha, B. B., Ng, K. C., "Performance investigation on a 4-bed adsorption desalination cycle with internal heat recovery scheme", *Desalination*, Vol. 402, pp. 88-96, (2017).
- [28] Ng, K. C., Chua, H. T., Chung, C. Y., Loke, C. H., Kashiwagi, T., Akisawa, A., Saha, B. B., "Experimental investigation of the silica gel-water adsorption isotherm characteristics", *Appl Therm Eng*, Vol. 21, (16), pp. 1631-1642, (2001).
- [29] Liu, Y., "Some consideration on the Langmuir isotherm equation", *Colloids Surf, A*, Vol. 274, (1), pp. 34-36, (2006).
- [30] Atkins, P., Paula, J. D., Keeler, J., "Atkins' Physical chemistry". 11th ed., Oxford, Oxford University Press, (2018).