

معرفی دو آب شیرین کن تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی خورشیدی و تحلیل اکسرژی آنها توسط روش‌های «جریان نگر» و «چشمه و چاه»

حمید عبدالله زوگر (کارشناسی ارشد)

حسین احمدی دانش آشتیانی* (استادیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۸)
دوری ۳، شماره ۲، ص. ۲۱-۱۱

در این مقاله روش جدیدی برای تحلیل اکسرژی سیستم‌ها ارائه شده که به «تحلیل چشمه و چاه» موسوم است. در روش متداول تحلیل اکسرژی، معمولاً بازده سیستم‌ها بیش از آنچه که هست نشان داده می‌شود. به طور مثال بازده اکسرژی محاسبه شده از روش متداول برای سیستم ظرفیت بالا حدود ۹۱/۸۴٪ بوده در حالی که در روش جدید، این مقدار معادل ۷/۴۳٪ به دست می‌آید. در ادامه، یک مزرعه‌ی خورشیدی جهت تأمین سیال کمکی ارائه می‌شود. در حال حاضر با توجه به عملی نبودن اجرای یک مزرعه‌ی خورشیدی در ایران و همچنین پایین بودن بازده اکسرژی آب شیرین‌کن، با ایجاد تغییراتی در این سیستم، آب شیرین‌کن ظرفیت پایینی پیشنهاد شده است که بازده اکسرژی آن بالا رفته و با کمک کالکتورهای خورشیدی غیرمتمرکزکننده قابلیت کارکرد دارد. همچنین در این مقاله ناکارآمدی روش جریان‌نگر در تحلیل یک نوع آب شیرین‌کن ظرفیت پایین نیز نشان داده می‌شود.

واژگان کلیدی: تحلیل اکسرژی، انرژی خورشیدی، سیستم آب شیرین‌کن تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی، جریان‌نگر، چشمه و چاه.

۱. مقدمه

مقایسه‌ی سیستم‌های آب شیرین‌کن با دیگر سیستم‌های مرتبط با آب نشان می‌دهد که مصرف انرژی آب شیرین‌کن‌ها بسیار بیشتر است.^[۱] منابع سنتی انرژی (تجدیدناپذیر) نیز آلودگی زیست محیطی زیادی ایجاد کرده‌اند و در حال پایان یافتن هستند. با توجه به وجود نگرانی‌هایی که در مورد مسئله‌ی آب و همچنین خشک‌سالی‌های اخیر به وجود آمده، حرکت به سوی استفاده از سیستم‌های آب شیرین‌کن اجتناب‌ناپذیر است.^[۲] از طرف دیگر انرژی‌های تجدیدپذیری همچون انرژی خورشید پایان‌ناپذیر بوده و در اکثر نقاط دنیا به ویژه مناطق کم‌آب‌تر، فراوان یافت می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده‌ی توانمند از سیستم‌های آب شیرین‌کن و سیستم‌های مولد انرژی از خورشید، ضروری است.^[۳] فرایند نمک زدایی از آب دریا را، هم براساس محصول به دست آمده از فرایند و هم براساس خود فرایند نمک زدایی می‌توان دسته‌بندی کرد. فرایندهای نمک زدایی به دو دسته تقسیم بندی می‌شوند: فرایندهایی که ماده در آنها تغییر فاز می‌دهد و فرایندهایی که فاز ماده در آنها تغییر نمی‌کند. فرایندهایی همچون اسموتیک معکوس^۱، اسموتیک پیشرو^۲، الکترودیالیز^۳ فرایندهایی هستند که در آنها فاز ماده تغییر نمی‌کند، بلکه با عبور آب نمک از یک صافی، نمک از آب جدا شده و آب شیرین به دست می‌آید. فرایندهایی همچون تبخیر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۸/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱/۱۴، پذیرش ۱۳۹۷/۳/۷

DOI:10.24200/J40.2018.10794.1430

official.zargar@gmail.com
h_a_danesh@azad.ac.ir

ناگهانی چندمرحله‌یی آب^۴، تقطیر چندنازده‌ی آب^۵، رطوبت‌زنی - رطوبت زدایی^۶، نمک زدایی خودبه‌خودی در خلاء^۷، از جمله فرایندهایی هستند که ماده در آنها تغییر فاز می‌دهد و آب شیرین تولید می‌شود. از میان فرایندهای اشاره شده در بالا، تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی، تقطیر چندنازده، اسموتیک معکوس و اسموتیک پیشرو حدود ۹۵٪ از کل ظرفیت سیستم‌های نمک زدایی جهان را تشکیل می‌دهند. در تحقیقات و مقالات مختلف، امکان‌پذیری و مقرون به صرفه بودن ترکیب سیستم‌های آب شیرین‌کن و سیستم‌های مولد انرژی از خورشید بسیار مورد بررسی قرار گرفته است. به نظر می‌رسد که استفاده از انرژی‌های کیفیت پایین به دست آمده از خورشید، هم بازده آب شیرین‌کن را افزایش می‌دهد و هم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است.^[۸-۴]

در دیگر پژوهش‌های انجام شده روی سیستم آب شیرین‌کن چندنازده و تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی خورشیدی، نشان داده شد که بازیابی حرارت از آب نمک زدایی شده^[۹]، استفاده از بخار آب برای تبخیر آب نمک^[۱۰]، استفاده از حرارت تلف شده‌ی فرایندهای دیگر برای تبخیر آب^[۱۱]، افزایش تعداد مراحل نمک زدایی، کاهش اختلاف دمای موجود در پیش‌گرمایش‌کننده‌ها و افزایش دمای بخار ورودی به اواپراتورها^[۱۲]، از جمله تدابیری هستند که می‌توان برای کاهش اتلاف اکسرژی، افزایش بازده اکسرژی و کاهش هزینه‌های اقتصادی به کار بست.

اینجا یک روش کلی براساس مفهوم اکسرژی برای فرموله کردن معیار عملکرد انواع واحدهای صنعتی ارائه می‌شود. فرض می‌شود که یک سیستم وارد یک فرایند حالت پایا یا نیمه پایا شده است. اگر عامل تلف کننده‌ی اکسرژی در فرایند حضور نداشته باشد، انتقال اکسرژی را می‌توان برحسب خروجی مطلوب فرایند و ورودی ضروری معرفی کرد. با انجام کار، انتقال حرارت، جریان یافتن ماده به داخل یا خارج از حجم کنترل، اکسرژی به حجم کنترل وارد یا خارج می‌شود. اگر اکسرژی‌های ورودی یا خروجی از حجم کنترل به درستی تعریف شوند، می‌توان معادله‌ی موازنه‌ی اکسرژی برای آن حجم کنترل را چنین نوشت:

$$\sum \dot{E}_{IN} = \sum \dot{E}_{OUT} + I_{sw} \quad (8)$$

در حالی که $\sum \Delta \dot{E}_{IN}$ مجموع تمام جریان‌های اکسرژی ورودی و $\sum \Delta \dot{E}_{OUT}$ مجموع تمام جریان‌های اکسرژی خروجی هستند. به همین علت با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک خواهیم داشت:

$$I_{sw} \geq 0 \quad (9)$$

و بدین ترتیب:

$$\frac{\sum \dot{E}_{OUT}}{\sum \dot{E}_{IN}} \leq 1 \quad (10)$$

این نسبت برای فرایندهای بازگشت ناپذیر کمتر از ۱ و برای فرایندهای برگشت پذیر معادل ۱ می‌شود. بدین ترتیب این نسبت به عنوان معیاری برای سنجش میزان کامل بودن تعادل ترمودینامیکی فرایند، مناسب است. نام این نسبت را بازده اکسرتیک گذاشته‌اند و در قالب دو معادله‌ی ۱۱ و ۱۲ بیان می‌شود: [۱۳، ۱۴]

$$\eta_{Exsw} = \frac{\sum \dot{E}_{OUT}}{\sum \dot{E}_{IN}} \quad (11)$$

$$\eta_{Exsw} = 1 - \frac{I_{sw}}{\sum \dot{E}_{IN}} \quad (12)$$

۲.۲ بازگشت ناپذیری

بازگشت ناپذیری با تولید آنتروپی در سیستم به وجود می‌آید. هرچه اختلاف پتانسیل بیشتر باشد، میزان تولید آنتروپی نیز بیشتر خواهد بود. البته به کمک روش‌هایی می‌توان جلوی تولید بیش از اندازه‌ی آنتروپی را گرفت. به طور مثال دو سیستم را که اختلاف دمایی زیادی دارند در نظر بگیرید. اگر این دو سیستم در معرض همدیگر قرار بگیرند، مایل‌اند با سرعت بالا با هم تبادل حرارت داشته باشند.

در این روش برای به دست آوردن آنتروپی تولید شده باید آنتروپی تولید شده در چشمه و چاه را محاسبه کرده و این دو را از هم کم کرد:

$$\Delta S = \dot{m}_{Source} S_{Source} - \dot{m}_{Sink} S_{Sink} \quad (13)$$

بدین ترتیب برای به دست آوردن بازگشت ناپذیری به کمک رابطه‌ی زیر مشکلی وجود نخواهد داشت:

$$I_{G-S} = T_0 \Delta S \quad (14)$$

این رابطه به رابطه‌ی گوی - استدللا معروف است. [۱۴] روش دیگری که می‌توان برای به دست آوردن بازگشت ناپذیری به کار برد، استفاده از رابطه‌ی موازنه‌ی اکسرژی است. در روش چشمه و چاه رابطه‌ی موازنه‌ی اکسرژی چنین تعریف می‌شود:

در نوشتار حاضر با به‌کارگیری روش قدیمی (جریان‌نگر)^۸ تحلیل اکسرژی برای سیستم ظرفیت بالای تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ی (۱ میلیون گالن در روز) خورشیدی، نه فقط عوامل تلف کننده‌ی اکسرژی مورد بررسی قرار گرفت بلکه با ارائه‌ی روش جدید و کم نقص (چشمه و چاه)^۹ تحلیل اکسرژی، پارامترهای عملکردی سیستم بهینه‌سازی شدند. در ادامه‌ی این نوشتار نواقص عملکرد روش جریان‌نگر نشان داده می‌شود. همچنین یک سیستم ظرفیت پایین تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ی خورشیدی نیز ارائه شد که به کمک روش‌های ارائه شده تحلیل اکسرژی شد. برای هریک از سیستم‌های آب شیرین‌کن ارائه شده، یک سیستم کارآمد مولد حرارت از خورشید نیز پیشنهاد شده است. با تحلیل اقتصادی انجام شده، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و تولید، همچنین مدت زمان لازم برای بازگشت سرمایه‌ی اولیه‌ی سیستم‌های آب شیرین‌کن مشخص شد. از دیگر یافته‌های نوشتار حاضر می‌توان به رابطه‌ی فاز سیال کمکی و بازده اکسرژی سیستم نیز اشاره کرد.

۲. مفروضات قبلی

۱.۲ تحلیل اکسرژی به روش جریان‌نگر

رابطه‌ی موازنه‌ی اکسرژی برای حجم کنترلی که وارد فرایند حالت پایا شده است [۱۳، ۱۴]:

$$\dot{E}_i - \dot{E}_Q = \dot{E}_e + \dot{W}_x + I_{sw} \quad (1)$$

$$\dot{E}_i = \sum_{IN} \dot{m}_e \varepsilon \quad (2)$$

$$\dot{E}_e = \sum_{OUT} \dot{m}_e \varepsilon \quad (3)$$

$$\dot{E}_Q = \sum_r [\dot{Q}_r \frac{T_r - T_0}{T_r}] \quad (4)$$

$$\varepsilon = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) + E_{ch} + \frac{C^*}{T} + gz \quad (5)$$

$$E_{ch} = \dot{m} \varepsilon^* \mu \quad (6)$$

$$E_{ph} = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) \quad (7)$$

ε^* را می‌توان برای هر ماده از جداول مربوطه‌ی موجود [۱۱] به دست آورد. در فرایندهایی که بین حجم کنترل و محیط تبادل ماده وجود ندارد، جملات مربوط به اکسرژی شیمیایی و $(h_0 - T_0 s_0)$ از معادله‌ی موازنه‌ی اکسرژی حذف می‌شود. معادله‌ی موازنه‌ی اکسرژی از قانون کاهش سطح کیفیت انرژی تبعیت می‌کند و تعریف قانون کاهش سطح کیفیت انرژی از نقطه نظر اکسرژی برای حجم کنترلی که وارد فرایند حالت پایا شده، به این صورت است:

جریان اکسرژی به داخل حجم کنترل همیشه بزرگ‌تر از جریان اکسرژی به خارج از آن است. [۱۳] اختلاف بین این دو (نرخ اتلاف اکسرژی) را نرخ بازگشت ناپذیری (I) می‌گویند. در شرایط ایده‌آل، مقدار اکسرژی جریان‌های ورودی و خروجی از یک فرایند بازگشت پذیر با هم برابرند و نرخ بازگشت ناپذیری صفر است.

۱.۱.۲ معیار عملکرد

به طور سنتی، بازده اکسرتیک به منظور ارزیابی عملکرد یک واحد صنعتی از دو معیار عملکرد کاربرد داشته است؛ یکی از آنها نسبت تبدیل انرژی است، و دیگری نسبتی است که شامل خروجی‌های ایده‌آل و خروجی‌های واقعی می‌شود.

خواهد بود. از طرف دیگر، روش جریان نگر مقدار بازگشت ناپذیری را از تفاضل اکسرژی جریان‌های ورودی و خروجی به دست می‌آورد و از آنجا که گاهی اکسرژی جریان‌های خروجی بیشتر از اکسرژی جریان‌های ورودی است (مانند آنچه که برای اکسرژی فیزیکی جریان‌های ورودی و خروجی سیستم آب شیرین کن ظرفیت بالای این مقاله رخ می‌دهد)، مقدار بازگشت ناپذیری منفی می‌شود که این مطلب از نظر ترمودینامیکی غیرقابل قبول است.

در روش جریان نگر میزان داده‌های لازم برای انجام تحلیل اکسرژی بالا است. به این دلیل که شرایط سیستم نسبت به محیط سنجیده شده و اطلاعات لازم درباره محیط نیاز است. به طور مثال برای یک فرایند انتقال حرارت، دمای محیط نیز باید معلوم باشد، درحالی که این مشکل در روش چشمه و چاه وجود ندارد و به کمک داده‌های خود سیستم می‌توان تحلیل اکسرژی را انجام داد. به طور مثال با داشتن آنتالپی و آنتروپی مواد -- در صورت لزوم -- برای یک فرایند انتقال حرارت می‌توان به راحتی اکسرژی فیزیکی و حرارتی را به کمک روابط داده شده به دست آورد.

$$I_{s\&s} = |\Delta \dot{E}_{Source}| - |\Delta \dot{E}_{Sink}| \quad (15)$$

۱.۲.۲ بازده اکسرژی روش چشمه و چاه

بازده تعریف شده در قانون دوم ترمودینامیک با همان بازده اکسرتیک، در واقع مقایسه‌ی شرایط واقعی با تغییرات اکسرژی است. به طور مثال بازده اکسرتیک یک توربین چنین تعریف می‌شود:

$$\eta_{ndlow} = \frac{Real\ work}{Lost\ exergy} = \frac{W_a}{\Delta E_x} \quad (16)$$

در روش جدید تعریف شده، بازده اکسرتیک از رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آید:

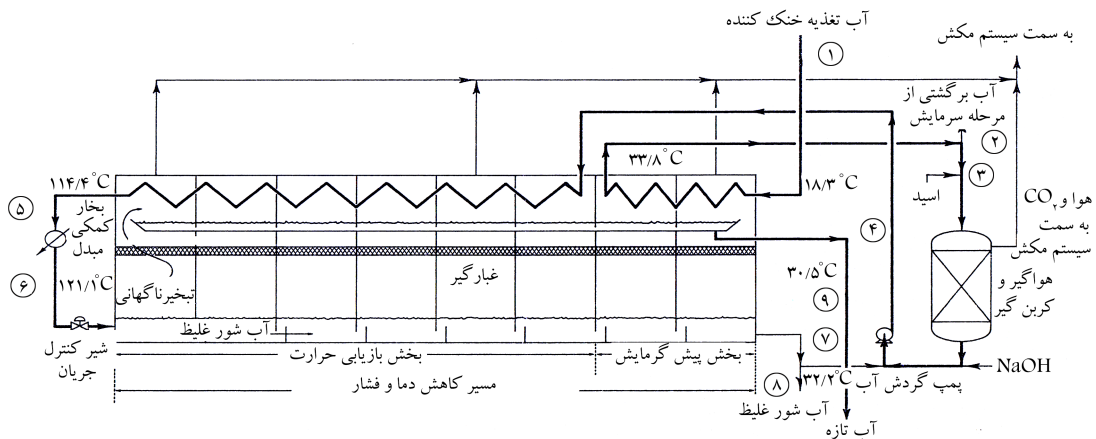
$$\eta_{E_{s\&s}} = \frac{|\Delta \dot{E}_{Sink}|}{|\Delta \dot{E}_{Source}|} \quad (17)$$

۳.۲ مقایسه‌ی روش جریان نگر و چشمه و چاه در تحلیل اکسرژی

روش چشمه و چاه جریان‌های ورودی و خروجی از حجم کنترل را به دو دسته جریان‌های چشمه و جریان‌های چاه دسته‌بندی می‌کند. جریان‌های چشمه به آن دسته از جریان‌هایی گفته می‌شود که پس از ورود و خروج از حجم کنترل، اکسرژی کلی آنها افزایش می‌یابد. جریان‌های چاه در نقطه‌ی مقابل جریان‌های چشمه قرار دارند. روش چشمه و چاه از تفاضل اکسرژی جریان‌های چشمه و چاه به مقدار بازگشت ناپذیری دست می‌یابد و از آنجا که در فرایندهای واقعی همیشه اکسرژی جریان‌های چشمه بیشتر از جریان‌های چاه است، مقدار بازگشت ناپذیری مثبت

۴.۲ سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ی ظرفیت بالا

در شکل ۱ شماتیک یک سیستم آب شیرین سازی چندمرحله‌ی تبخیر ناگهانی نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱ مشخصات نقاط مختلف سیستم آب شیرین کن با ظرفیت ۱ میلیون گالن در روز آورده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، شش مرحله بازیابی حرارت و دو مرحله پیش گرمایش وجود دارد. در شکل ۱، آب در دمای $3^{\circ}C/18^{\circ}$ پس از عبور از صافی (جریان ۱)، به داخل



شکل ۱. سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ی ظرفیت بالا.

جدول ۱. مشخصات نقاط مختلف سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ی ظرفیت بالا.

نقاط و سرویس‌های کمکی	۱	۲	۵	۶	۸	۹	بخار ورودی به قسمت ۵	مایع خروجی از قسمت ۶
دما ($^{\circ}C$)	۱۸٫۳	۳۳٫۸	۱۱۴٫۴	۱۲۱٫۱	۳۲٫۲	۳۰٫۵	۱۵۰	۱۵۰
دبی (kg/s)	۱۶۹٫۵	۱۰۲	۲۲۵٫۵	۲۲۵٫۵	۳۳٫۲۵	۳۴٫۷۵	۴٫۸۹	۴٫۸۹
غلظت (%)	۳٫۵	۳٫۶	۵٫۹	۵٫۹	۶٫۹۱	۰	۰	۰
آنتالپی (kJ/kg)	۷۶٫۸	۱۴۱٫۶۱	۴۸۰٫۴۶	۵۰۸٫۴	۱۳۴٫۹۴	۱۲۷٫۸۵	۲۷۴۶٫۴۴	۶۳۲٫۱۸
آنتروپی (kJ/kgK)	۰٫۲۵	۰٫۴۶	۱٫۴۵	۱٫۵۳	۰٫۴۵	۰٫۴۳	۶٫۸۳	۱٫۸۴
\dot{E}_{ph} (kW)	۸۰۰٫۰۴	۷۰۶٫۸۶	۱۱۴۲۵٫۲۰	۱۲۳۴۸٫۵۲	۱۰۷٫۷۳	۷۳٫۳۲	۳۴۸۲٫۰۷	۴۳۵٫۳۵
\dot{E}_{ch} (kW)	۳۰۲۹۹٫۸۲	۱۸۲۳۲٫۵	۴۱۲۰۶٫۱۴	۴۱۰۶٫۱۴	۶۱۶۸٫۲۰	۶۱۶۸٫۲۰	---	---

بخش قبلی داده شد، با توجه به این که جریان بخار به مایع اکسرژی خود را از دست داده، جریان چشمه نامیده می‌شود. همان‌طور که گفته شد جریان چاه جریانی است که اکسرژی کسب می‌کند و در این سیستم جریانی است که از شروع شده به سه جریان ۸، ۲، ۹ و تقسیم می‌شود. سیستم آب شیرین کن به کمک روابط ۸، ۱۱، ۱۵ و ۱۷ تحلیل می‌شود:

$$\Delta \dot{E}x_{Sink} = \dot{E}_{ph_r} + \dot{E}_{ch_r} + \dot{E}_{ph_A} + \dot{E}_{ch_A} + \dot{E}_{ph_1} + \dot{E}_{ch_1} - \dot{E}_{ph_1} - \dot{E}_{ch_1} \quad (18)$$

$$\Delta \dot{E}x_{Source} = \dot{E}_{ph_{Liquid}} - \dot{E}_{ph_{Steam}} \quad (19)$$

$$\sum \dot{E}_{IN} = \dot{E}_{ph_{Steam}} + \dot{E}_{ph_1} + \dot{E}_{ch_1} \quad (20)$$

$$\sum \dot{E}_{OUT} = \dot{E}_{ph_r} + \dot{E}_{ch_r} + \dot{E}_{ph_A} + \dot{E}_{ch_A} + \dot{E}_{ph_1} + \dot{E}_{ch_1} + \dot{E}_{ph_{Liquid}} \quad (21)$$

۵.۲. بررسی تأثیر بخارهای کمکی دمای بالای سیستم تبخیر ناگهانی

چندمرحله‌ی ظرفیت بالا

به منظور دستیابی به این هدف، باید به وسیله‌ی ایجاد تغییراتی در پارامترهای عملکردی سیستم و پس از آن محاسبه‌ی معیارهای عملکردی، تأثیر مثبت یا منفی تغییرات داده شده بررسی شود. یکی از پارامترهای یاد شده، دمای بخار تولید شده در سیستم خورشیدی است. با آوردن دو جریان بخار با دماهای بالاتر در جدول ۲، اثر این پارامتر بر بازده اکسرجتیک و مقدار اتلاف اکسرژی به دست آمده از دو روش جریان‌نگر و چشمه و چاه بررسی می‌شود:

۶.۲. سیستم مولد حرارت از خورشید برای سیستم تبخیر ناگهانی

ظرفیت بالا

به منظور تأمین انرژی خورشیدی مورد نیاز سیستم ظرفیت بالای تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ی، یک مزرعه‌ی خورشیدی متمرکزکننده مورد نیاز است. برای طراحی این نوع سیستم از حلقه‌ی [۱۷] DISS استفاده شده است. هزینه‌ی هر مجموعه‌ی ۱۰ تایی از این کلکتورها به اضافه‌ی هزینه‌ی حمل و نقل و واردات آن به ایران بر اساس کلکتورهای سهموی خطی مدل ۰۱ J.JR-CSP، شرکت JIJIARE، معادل ۱۰۰۰ دلار آمریکاست. نظر به این که دبی و دمای بخار کمکی، بر تعداد کلکتورهای متمرکزکننده‌ی سهموی خطی مورد نیاز تأثیر می‌گذارد، برای سه حالت بخاری که در این نوشتار به کار برده شده، سه مدل مزرعه طراحی می‌شود. مدت زمان بازگشت سرمایه براساس ۵۰٪ قیمت بطری‌های ۱ لیتری به فروش رفته‌ی آب معدنی (روزانه حدود ۳/۵۰۰/۰۰۰ عدد به قیمت متوسط ۱ دلار آمریکا) موجود در ایران (به عنوان سودخالص) و در نظر گرفتن هزینه‌های تولید محاسبه شده است. مقدار هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه‌ی محاسبه شده، قیمت کلکتورهای خورشیدی را نیز در بر می‌گیرد.

۷.۲. ایجاد تغییراتی در سیستم آب شیرین کن ارائه شده و همگام

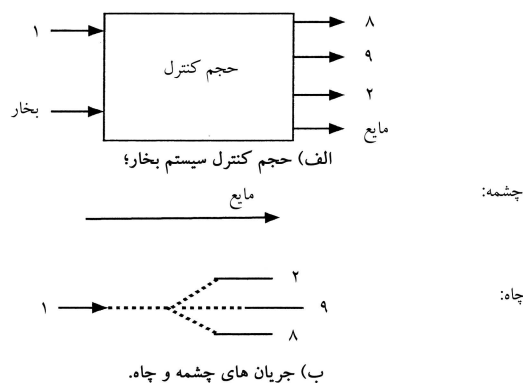
کردن آن با امکانات موجود در ایران

طراحی و ساخت مزرعه‌ی خورشیدی به چند دلیل، از جمله به دلیل نبود فناوری ساخت و هزینه‌ی بالای سرمایه‌گذاری، هنوز در ایران فراهم نیست. از همین روی در

لوله‌های کندانسور مراحل آخر یا مراحل پیش گرمایش سیستم پمپ می‌شود. پس از این که آب دریا در لوله‌های کندانسور گرم شد، حدود ۶۰٪ از آب به دریا بازمی‌گردد (جریان ۲) و مقدار باقیمانده به عنوان آب تغذیه وارد سیستم می‌شود. آب آماده شده با جریان شماره ۷ (که آب نمک غلیظ است) در مرحله‌ی آخر ترکیب شده و سپس مخلوط مورد نظر به داخل سیستم پمپ می‌شود تا فرایند بازیابی حرارت شروع شود. مخلوط آب نمک تقریباً از ۳۰٪ آب تازه و از ۷۰٪ آب نمک جریان شماره ۷، تشکیل شده است. آب تغذیه وارد لوله‌ی کندانسورهای سیستم می‌شود و با عبور از قسمت بازیابی حرارت، توسط آب در حال تقطیر و موجود در خارج لوله، پیش گرمایش می‌شود. زمانی که کندانسورهای پیش گرمایش کننده را ترک می‌کند، وارد مبدل شده و پس از تبادل حرارت با بخار تأمین شده از کلکتورهای متمرکزکننده خورشیدی به دمای ۱۲۱/۱°C می‌رسد.

مبدل حرارتی کل حرارت مورد نیاز برای تبخیر آب موجود در سیستم را تأمین می‌کند. آب تغذیه پس از عبور از مبدل و شیر خودکار، وارد اولین و داغ‌ترین مرحله‌ی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ی می‌شود. به دلیل این که فشار موجود در سیستم کمتر از فشار مبدل حرارتی است، قسمتی از آب موجود در آب شور به طور ناگهانی تبخیر می‌شود. بخار بالا می‌رود و پس از عبور از جدا کننده‌ی غبار، وقتی با لوله‌ی کندانسور پیش گرمایش‌گر برخورد می‌کند، تقطیر می‌شود. آب نمک باقیمانده در ته سیستم توسط بخار خنک شده و از میان اوریفیس هر مرحله عبور کرده و به مرحله‌ی بعدی که فشارش از مرحله‌ی قبل کم‌تر است، وارد می‌شود. فرایند ادامه می‌یابد تا این که آب نمک از آخرین و سردترین مرحله‌ی سیستم در دمایی حدود ۳۲/۲°C خارج می‌شود؛ مقدار باقیمانده‌ی جریان ۷ دوباره به سیستم بازمی‌گردد. آب تقطیر شده روی ظرف تعبیه شده در پایین لوله می‌ریزد و در داخل یک سیستم کنترلی از مرحله‌ی به مرحله‌ی دیگر جریان می‌یابد و مقدار آن پس از عبور از مراحل مختلف، به تدریج بیشتر می‌شود. پس از خروج از مرحله‌ی آخر (جریان ۹)، به داخل مخازن ذخیره یا توزیع پمپ می‌شود. [۱۶] با توجه به این موضوع که مبدل‌ها به خوبی عایق شده‌اند، بین این مبدل‌ها و محیط تبادل حرارت صورت نمی‌گیرد. بدین ترتیب در تحلیل اکسرژی انجام شده روی این مبدل‌ها، اکسرژی حرارتی وارد نشده است. در شکل ۲ همان‌طور که ملاحظه می‌شود سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ی، ساده‌سازی شده است.

در شکل ۲ الف جریان‌های ورودی و خروجی به حجم کنترل سیستم نشان داده شده است. این حجم کنترل متعلق به روش جریان‌نگر است. در شکل ۲ ب جریان‌های چشمه و چاه حجم کنترل سیستم نشان داده شده است. براساس توضیحاتی که در



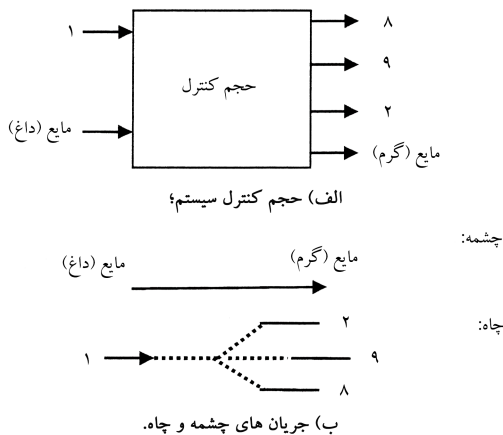
شکل ۲. ساده‌سازی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ی ظرفیت بالا برای تحلیل اکسرژی.

جدول ۲. مشخصات سرویس‌های کمکی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی ظرفیت بالا.

حالت اول		حالت دوم		سرویس‌های کمکی
بخار ورودی به	مایع خروجی از	بخار ورودی به	مایع خروجی از	
قسمت ۵	قسمت ۶	قسمت ۵	قسمت ۶	دما ($^{\circ}C$)
۲۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۲۵۰	دبی (kg/s)
۰	۰	۰	۰	غلظت (%)
۲۷۹۳,۱۸	۸۵۲,۴۳	۲۸۰۱,۵۲	۱۰۸۵,۳۴	آنتالپی (kJ/kg)
۶,۴۳	۲,۳۳	۶,۰۷	۲,۷۹	آنتروپی (kJ/kgK)
۴۶۸۰,۱۱	۸۶۹,۸۰	۵۹۹۲,۳	۱۵۶۱,۴۶	$\dot{E}_{ph} (kW)$
---	---	---	---	$\dot{E}_{ch} (kW)$

جدول ۳. مشخصات نقاط مختلف و سیال کمکی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی ظرفیت پایین.

نقاط و سرویس‌های کمکی	دما ($^{\circ}C$)	دبی (kg/s)	غلظت (%)	آنتالپی (kJ/kg)	آنتروپی (kJ/kgK)	$\dot{E}_{ph} (kW)$	$\dot{E}_{ch} (kW)$
۱	۲۱,۳	۱	۳,۵	۸۹,۳۷	۰,۳	۲,۳۸	۱۷۸,۷۵
۲	۳۰,۸	۰,۶۱	۳,۶	۱۲۹,۱	۰,۴۳	۱,۹۸	۱۰۹,۱۳
۵	۱۱۱,۴	۱,۳۳	۵,۹	۴۶۷,۱۹	۱,۴۲	۶۱,۵۶	۲۴۲,۷۶
۶	۱۱۸,۱	۱,۳۳	۵,۹	۴۹۵,۶	۱,۵	۶۷,۶۱	۲۴۲,۷۶
۸	۲۹,۲	۰,۱۹	۶,۹۱	۱۲۲,۰۹	۰,۴	۱	۳۴,۹۸
۹	۲۷,۵	۰,۲۰	۰	۱۱۵,۳۲	۰,۳۸	۰,۸۹	۳۴,۶۴
ورودی حالت اول (مایع)	۱۵۰	۰,۱	۰	۶۳۲,۱۸	۱,۸۴	۸,۹	---
خروجی حالت اول (مایع)	۶۵,۸۶	۰,۱	۰	۲۷۵,۷۹	۰,۸۹	۱,۲۹	---
ورودی حالت دوم (مایع)	۲۰۰	۰,۱	۰	۸۵۲,۴۳	۲,۳۳	۱۶,۳۱	---
خروجی حالت دوم (مایع)	۱۱۸,۲۰	۰,۱	۰	۴۹۶,۴	۱,۵	۵,۱۶	---
ورودی حالت سوم (مایع)	۲۵۰	۰,۱	۰	۱۰۸۵,۳۴	۲,۷۹	۲۵,۸۹	---
خروجی حالت سوم (مایع)	۱۶۵,۵۳	۰,۱	۰	۶۹۹	۱,۹۹	۱۰,۸۱	---



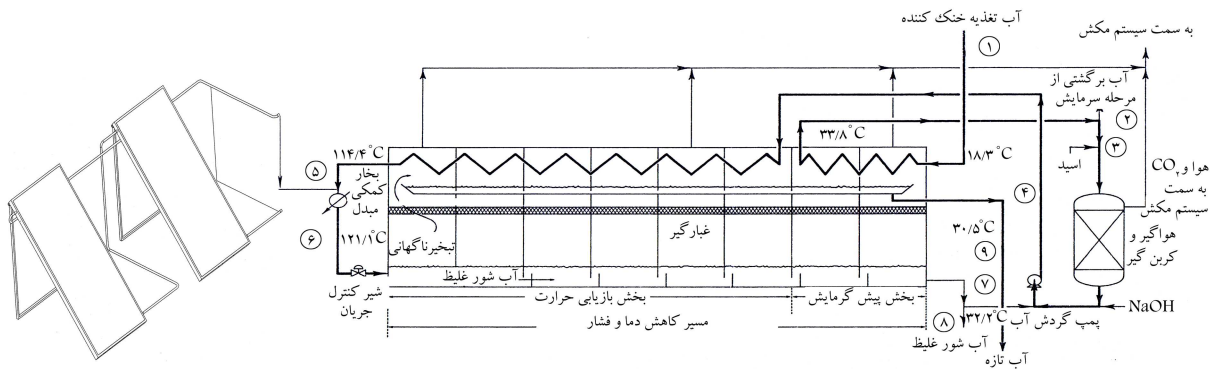
شکل ۳. ساده‌سازی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی ظرفیت پایین جهت تحلیل اکسرژی.

حالات، دبی برابر در نظر گرفته شده است تا تنها متغیر دما باشد (جدول ۳) جریان‌های ورودی، خروجی، چشمه و چاه براساس تعریف موجود، انتخاب شده است (شکل ۳). با استفاده از فرمول‌های ۲۵-۲۲ به تحلیل اکسرژی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی ظرفیت پایین می‌پردازیم:

این بخش از مقاله آب شیرین کن ظرفیت پایینی ارائه می‌شود که هم بازده بالاتری دارد و هم در ایران قابل اجراست. به دلیل کاهش آلاینده‌های فسیلی و جلوگیری از تخریب محیط زیست، انرژی حرارتی مورد نیاز این سیستم توسط آبگرمکن خورشیدی تأمین می‌شود. با تحلیل اقتصادی انجام شده روی این سیستم، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و مدت بازگشت سرمایه‌ی آن مشخص می‌شود. با کوچک شدن سیستم، هزینه‌های مرتبط با تجهیزات، انرژی حرارتی و انتقال آب شور کاهش می‌یابد و بازده اکسرژی بالا می‌رود. با توجه به محدود بودن امکانات بودجه‌یی، تأسیساتی و سیاسی، با ایجاد تغییراتی کوچک در سیستم آب شیرین کن ظرفیت بالای ارائه شده در بخش قبل، سیستم جدیدی ارائه شده که توانایی کار با کلکتورهای صفحه تخت را دارد. بدین ترتیب با هزینه‌ی اندک می‌توان سیستم آب شیرین کن ظرفیت پایین پر بازدهی در اختیار داشت.

۸.۲. سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی ظرفیت پایین

فاز سیالات کمکی ورودی و خروجی از این سیستم مایع است تا امکان استفاده از کلکتورهای صفحه تخت و رسیدن به دمای مورد نظر به وجود آید. سه حالت مختلف برای ورود سیال کمکی به قسمت ۵ و خروج آن از قسمت ۶ در نظر گرفته شده است. دمای خروجی جریان‌ها از رابطه‌ی موازنه‌ی انرژی به دست آمده است و در تمامی



شکل ۴. ساده‌سازی سیستم آبگرمکن خورشیدی.

جدول ۴. نتایج تحلیل اکسرژی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای ظرفیت بالا.

بخار $150^{\circ}C$	سرویس‌های کمکی	
۲۲۶/۵	$\Delta \dot{E}X_{Sink} (kW)$	
-۳۰۴۳/۷۲	$\Delta \dot{E}X_{Source} (kW)$	روش چشمه و چاه
۲۸۲۰/۲۲	$I_{s\&s} (kW)$	
۷/۴۳	$\eta_{EX_{sw}} (\%)$	
۳۴۵۸۰/۲۳	$\sum \dot{E}IN (kW)$	
۳۱۷۶۰/۰۱	$\sum \dot{E}OUT (kW)$	روش جریان‌نگر
۲۸۲۰/۲۲	$I_{sw} (kW)$	
۹۱/۸۴	$\eta_{EX_{sw}} (\%)$	

زمان بازگشت سرمایه این سیستم نیز محاسبه می‌شود (به ازای فروش روزانه 14000 عدد به قیمت متوسط ۱ دلار).

۳. نتایج و بحث

۳.۱. نتایج تحلیل اکسرژی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای ظرفیت بالا

همان‌طور که گفته شده بود سیستم‌های آب شیرین کن انرژی بالایی مصرف می‌کنند؛ این موضوع را به خوبی می‌توان از مقادیر اکسرژی ورودی و خروجی سیستم برداشت کرد. یکی از مهم‌ترین دلایل بازگشت ناپذیری بسیار بزرگ به دست آمده نیز می‌تواند اختلاف زیاد جرم و دمای جریان‌های ورودی و خروجی از سیستم آب شیرین کن باشد.

همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است، با این که بازگشت ناپذیری‌های محاسبه شده از هردو روش مذکور تحلیل اکسرژی برابر است، با این حال بازده اکسرژی محاسبه شده از روش چشمه و چاه کمتر از مقدار به دست آمده از روش جریان‌نگر است.

متفاوت بودن تکنیک روش‌های جریان‌نگر و چشمه و چاه در محاسبه بازده اکسرژی، سبب این موضوع می‌شود. روش معمول تحلیل اکسرژی، از اکسرژی جریان‌های ورودی و خروجی برای محاسبه‌ی بازگشت ناپذیری و بازده اکسرژی سیستم استفاده می‌کند و اکسرژی جریان‌های ورودی را همیشه بیشتر از اکسرژی جریان‌های خروجی در نظر می‌گیرد؛ در حالی که این موضوع همیشه برقرار نیست (گاهی اکسرژی جریان‌های خروجی بیشتر از اکسرژی جریان‌های ورودی است،

$$\Delta \dot{E}x_{Sink} = \dot{E}_{ph_2} + \dot{E}_{ch_2} + \dot{E}_{ph_4} + \dot{E}_{ch_4} + \dot{E}_{ph_1} + \dot{E}_{ch_1} - \dot{E}_{ph_1} - \dot{E}_{ch_1} \quad (22)$$

$$\Delta \dot{E}x_{Source} = \dot{E}_{ph_{Liquid(warm)}} - \dot{E}_{ph_{Steam(Hot)}} \quad (23)$$

$$\sum \dot{E}IN = \dot{E}_{ph_{Liquid(Hot)}} + \dot{E}_{ph_1} + \dot{E}_{ch_1} \quad (24)$$

$$\sum \dot{E}OUT = \dot{E}_{ph_2} + \dot{E}_{ch_2} + \dot{E}_{ph_4} + \dot{E}_{ch_4} + \dot{E}_{ph_1} + \dot{E}_{ch_1} + \dot{E}_{ph_{Liquid(warm)}} \quad (25)$$

۳.۱.۸.۲. آبگرمکن خورشیدی برای استفاده در سیستم تبخیر ناگهانی چند

مرحله‌ی ظرفیت پایین

یک آبگرمکن خورشیدی برای تأمین انرژی خورشیدی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ی ظرفیت پایین، نیاز است. با استفاده از مشخصات فنی کلکتور صفحه تخت مدل Optimal شرکت سولار پلار، می‌توان به این هدف دست یافت. به طور مثال برای رسیدن به دمای $150^{\circ}C$ ، با موازی بستن ۲ عدد از این کلکتورها، می‌توان به دما و دبی مورد نیاز برای این سیستم آب شیرین کن دست پیدا کرد (شکل ۴). پارامتر مهم دیگری که روی عملکرد این کلکتورها تأثیر می‌گذارد، زاویه‌ی آنها نسبت به افق است. مقدار این زاویه در فصل زمستان معمولاً حدود 45° و در فصل تابستان حدود 15° است. [۱۵]

به طور معمول کلیه‌ی کلکتورهای موجود در جهان قابلیت تولید مایعی با دمای $200^{\circ}C$ یا $205^{\circ}C$ را ندارند. علت تحلیل اکسرژی سیستم آب شیرین کن ظرفیت پایین در حالتی که دمای سیال کمکی $200^{\circ}C$ و $205^{\circ}C$ است، در بخش ۳.۳ ارائه شده است.

۳.۱.۸.۲. تحلیل اقتصادی آبگرمکن خورشیدی سیستم ظرفیت پایین

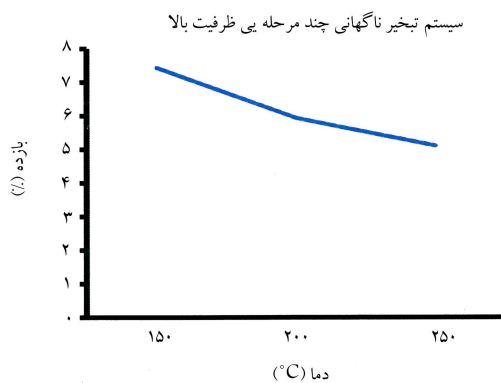
با توجه به این که قیمت هر کدام از کلکتورهای صفحه تخت در سال ۱۳۹۶ شمسی (۲۰۱۵ میلادی) این شرکت ۴۵۰ دلار بوده و قیمت تجهیزات جانبی دیگر از جمله پمپ و لوله‌های رابط برای ساخت یک آبگرمکن پمپی ۸۵۰ دلار است، هزینه‌ی اولیه‌ی ساخت این سیستم در دماهای مختلف داده می‌شود. هزینه‌های محاسبه شده‌ی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ی، در خارج و داخل ایران تابعی از دبی سیستم در نظر گرفته شده است. چون ارزش ریال ایران در برابر دلار متغیر است، هزینه‌ی راه‌اندازی و تولید سیستم‌های داخل ایران نیز برحسب دلار آمریکا محاسبه شده است. قیمت سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ی در داخل ایران با در نظر گرفتن هزینه‌های واردات محاسبه شده است. با روش بیان شده در بخش ۶.۲ مدت

جدول ۵. نتایج تحلیل اکسرژی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای ظرفیت بالا.

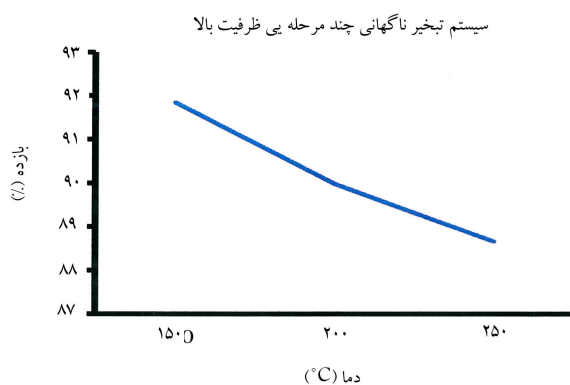
حالت دوم	حالت اول	سرویس‌های کمکی
۲۲۶٫۵	۲۲۶٫۵	$\Delta \dot{E}X_{Sink}(kW)$
-۴۴۳۱٫۸۴	-۳۸۱۰٫۳۰	$\Delta \dot{E}X_{Source}(kW)$
۴۲۰۵٫۳۴	۳۵۸۳٫۸	$I_{s\&s}(kW)$
۵٫۱۱	۵٫۴۹	$\eta_{EX_{sw}}(\%)$
۳۷۰۹۱٫۴۶	۳۵۷۷۸٫۲۴	$\sum \dot{E}_{IN}(kW)$
۳۲۸۸۶٫۱۳	۳۲۱۹۴٫۴۷	$\sum \dot{E}_{OUT}(kW)$
۴۲۰۵٫۳۴	۳۵۸۳٫۸	$I_{sw}(kW)$
۸۸٫۶۶	۸۹٫۹۸	$\eta_{EX_{sw}}(\%)$

روش چشمه و چاه

روش جریان‌نگر



شکل ۵. نتایج به دست آمده از تحلیل اکسرژی روش چشمه و چاه برای سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای ظرفیت بالا.



شکل ۶. نتایج به دست آمده از تحلیل اکسرژی روش جریان‌نگر برای سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای ظرفیت بالا.

کشیده شده است. بیش از حد بزرگ حساب شدن بازده ایرادی است که نمی‌توان به راحتی از آن عبور کرد، به ویژه در فرایندهایی همچون پروسه‌های صنعتی که بسیاری از ارزیابی‌ها بر اساس این معیار انجام می‌گیرد. از طرف دیگر با افزایش دمای سیال کمکی نه فقط بازده اکسرتیک کاهش می‌یابد بلکه تعداد کانکتورهای متمرکزکننده مورد نیاز افزایش می‌یابد؛ بدین ترتیب از آن‌جا که افزایش دمای سیال کمکی هزینه‌ی اولیه‌ی سرمایه‌گذاری را بالا می‌برد، از نظر اقتصادی بالا رفتن دمای سیال کمکی مقرون به صرفه نیست.

مانند اکسرژی فیزیکی ورودی ۱ و اکسرژی فیزیکی خروجی‌های ۲، ۸ و ۹، به همین دلیل همیشه محاسبه‌ی بازده اکسرتیک از روش قدیمی گاهی اوقات دقیق نیست.

اما در روش جدید ارائه شده (چشمه و چاه)، جریان‌هایی را که اکسرژی از دست داده‌اند «چشمه» و جریان‌هایی که اکسرژی کسب کرده‌اند «چاه» می‌نامند. بدین ترتیب با توجه به این که اکسرژی از دست رفته همیشه بزرگ‌تر از اکسرژی کسب شده است (در فرایندهای واقعی)، محاسبه‌ی بازگشت ناپذیری و بازده اکسرتیک سیستم به وسیله‌ی روش جدید صحیح‌تر است.

روش جریان‌نگر بازده اکسرژی جریانهایی که چند هزار کیلووات اکسرژی دارند را ۱۰٪ نشان می‌دهد. اگر به جریان بخار - مایع سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای ارائه شده نیز چند هزار کیلووات اکسرژی اضافه شود، بازده به دست آمده از روش جریان‌نگر ۱۰٪ می‌شود. روش چشمه و چاه را می‌توان در تحلیل اکسرژی سیستم‌های دیگر نیز به کار برد. به طور مثال یک توربین بخار را در نظر بگیرید. بخاری که اکسرژی خود را به محور توربین داده «چشمه» و محور توربین که اکسرژی کسب کرده «چاه» نامیده می‌شود.

۲.۳. نتایج بررسی تأثیر بخارهای کمکی دما بالا بر سیستم تبخیر

ناگهانی چندمرحله‌ای ظرفیت بالا

همان‌طور که در جدول ۵ مشخص است، بازگشت ناپذیری حساب شده توسط روش‌های چشمه و چاه و جریان‌نگر، با افزایش دمای بخار تولید شده در سیستم خورشیدی بیشتر شده و بازده اکسرژی کاهش یافته است. مقدار بازگشت ناپذیری به دست آمده از هر دو روش یکسان است اما مقدار بازده اکسرژی محاسبه شده از روش جریان‌نگر بزرگ‌تر از روش چشمه و چاه است.

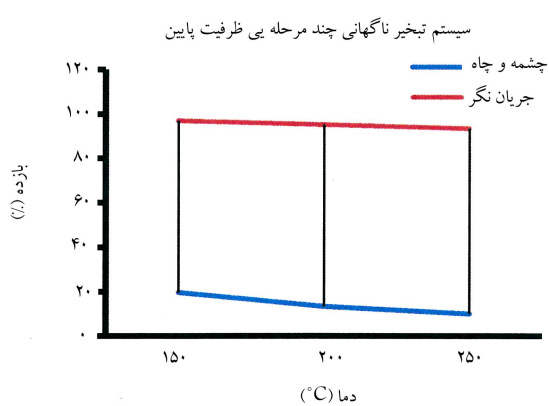
در پژوهش‌هایی که پیش از این انجام گرفته، معکوس بودن رابطه‌ی بازده اکسرتیک و دمای سیالات سرویس دهنده در سیستم آب شیرین کن PVD به اثبات رسیده است.^[۶] در این بخش از مقاله، بازده اکسرتیک سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای، به ازای دو دمای متفاوت از سیال کمکی، در روش‌های جریان‌نگر و چشمه و چاه به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان داد: ۱. رابطه‌ی بازده اکسرژی و دمای سیال کمکی در سیستم MSF نیز معکوس است؛ ۲. روش چشمه و چاه نیز نظریه‌ی معکوس بودن رابطه‌ی بازده اکسرتیک و دمای سیال کمکی را تأیید می‌کند. نتایج به دست آمده در شکل‌های ۵ و ۶ به طور واضح به تصویر

جدول ۶. نتایج تحلیل اکسرژی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای ظرفیت بالا.

حالت سوم	حالت دوم	حالت اول	سرویس‌های کمکی
۱,۴۹	۱,۴۹	۱,۴۹	$\Delta \dot{E}X_{Sink}(kW)$
-۱۵,۰۸	-۱۱,۱۵	-۷,۶۱	$\Delta \dot{E}X_{Source}(kW)$
۱۳,۵۹	۹,۶۶	۶,۱۲	$I_{s\&s}(kW)$
۹,۹۰	۱۳,۳۶	۱۹,۵۷	$\eta_{EX_{sw}}(\%)$
۲۰۷,۰۲	۱۹۷,۴۴	۱۹,۰۳	$\sum \dot{E}_{IN}(kW)$
۱۹۳,۴۳	۱۸۷,۷۸	۱۸۳,۹۱	$\sum \dot{E}_{OUT}(kW)$
۱۳,۵۹	۹,۶۶	۶,۱۲	$I_{sw}(kW)$
۹۳,۴۳	۹۵,۱۰	۹۶,۷۷	$\eta_{EX_{sw}}(\%)$

روش چشمه و چاه

روش جریان‌نگر



شکل ۷. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از تحلیل اکسرژی روش‌های چشمه و چاه و جریان‌نگر.

حالت، نشان دادن این مطلب است که با بالا رفتن دمای سیال کمکی، بازده اکسرژی کاهش می‌یابد.

۴. تحلیل اقتصادی

مشخصات یک مزرعه‌ی خورشیدی و مشخصات یک آبگرمکن خورشیدی در جداول ۷ و ۸ ارائه شده و از نظر اقتصادی مورد تحلیل قرار گرفته است. دبی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای ثابت در نظر گرفته شد تا تنها متغیر موجود دمای این سیستم باشد. همانطور که پیداست، با تغییر فاز و سیال کمکی تا حد زیادی هزینه‌های سرمایه‌گذاری کلی و نگهداری سیستم پایین آمده است. درست است که دبی و حجم آب شیرین تولیدی سیستم آب شیرین کن ظرفیت پایین کم است، اما با توجه به این که بازده اکسرتیک محاسبه شده از روش چشمه و چاه برای سیستم ظرفیت پایین بیشتر از مقدار محاسبه شده برای سیستم ظرفیت بالاست، و نیز با توجه به این که تلفات اکسرژی و هزینه‌های نگهداری آن نسبت به سیستم ظرفیت بالا کمتر است، در یک فرایند بلندمدت، استفاده از چند سیستم ظرفیت پایین به جای یک سیستم ظرفیت بالا مقرون به صرفه‌تر است. از طرف دیگر مدت بازگشت سرمایه‌ی سیستم‌های ظرفیت پایین نسبت به حجم تولیدشان نیز کمتر از سیستم‌های ظرفیت

تعداد بیشتر کلکتور، فضای بیشتری را نیز طلب می‌کند و بر همین اساس هزینه‌های بیشتری ایجاد می‌شود. در نهایت با بررسی‌های انجام شده این نتیجه به دست می‌آید که با افزایش دمای بخار تولیدی در سیستم خورشیدی، کارایی سیستم کاهش می‌یابد.

۳.۳. نتایج تحلیل اکسرژی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای ظرفیت پایین

از دیگر اهداف نویسندگان این مقاله ارائه‌ی یک سیستم تولیدکننده‌ی حرارت از خورشید بود که هم قابلیت اجرا در ایران را داشته باشد و هم مؤثر عمل کند. بدین ترتیب موضوعات مقاله فقط در حد نظری باقی نمی‌ماند و سیستمی ارائه می‌شود که قابلیت ساخت و بهره‌برداری صنعتی از آن وجود دارد. مزرعه‌ی خورشیدی پیشنهادی برای تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای ظرفیت بالا و آبگرمکن خورشیدی معرفی شده برای تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای ظرفیت پایین و تحلیل اقتصادی آنها در بخش بعد ارائه شده است. همان‌طور که از جدول ۶ پیداست با تغییر فاز و همچنین دبی سیال کمکی، هم بازده اکسرتیک سیستم بالاتر رفته و هم بازگشت ناپذیری‌های آن کاهش یافته است. بنابراین علاوه بر موضوع معکوس بودن رابطه‌ی بازده اکسرژی و دمای سیال کمکی، موضوع دیگری نیز مطرح می‌شود: با تغییر فاز سیال کمکی از بخار به مایع، بازده اکسرتیک نیز می‌تواند افزایش یابد.

چنان که مشاهده می‌شود، در حالت اول بازده روش چشمه و چاه برای سیستم ظرفیت بالا برابر ۷/۴۳٪، و برای سیستم ظرفیت پایین برابر با ۱۹/۵۷٪ (با تغییر فاز) است؛ این مقدار جهش بزرگ و قابل توجهی است. همچنین با افزایش دما، بازده کاهش و بازگشت ناپذیری افزایش پیدا کرده است (شکل ۷). این موضوع نشان می‌دهد که تغییر فاز و دبی سیال کمکی، تأثیری در رابطه‌ی معکوس بازده و دما ندارند. اشتباه بودن فرمول ریاضی روش جریان‌نگر در سیستم ظرفیت پایین نمود بیشتری پیدا می‌کند. در سیستم ظرفیت بالا فقط اکسرژی فیزیکی جریان‌های خروجی از جریان‌های ورودی بیشتر بود؛ اما در سیستم ظرفیت پایین، هم اکسرژی شیمیایی و هم اکسرژی فیزیکی جریان‌های خروجی از جریان‌های ورودی بیشتر است.

تحلیل اکسرژی آب شیرین کن برای حالتی که دمای سیال کمکی به $250^{\circ}C$ و $250^{\circ}C$ می‌رسد، فقط در حد نظری بوده است. دلیل تحلیل اکسرژی آن دو

جدول ۷. تحلیل اقتصادی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی ظرفیت بالا خورشیدی.

حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱	
۲۵۰	۲۰۰	۱۵۰	دمای بخار تامین شده از سیستم خورشیدی ($^{\circ}C$)
۶/۰۳	۵/۳۳	۴/۸۹	دبی خروجی از مزرعه خورشیدی (kg/s)
۱۶۹/۵	۱۶۹/۵	۱۶۹/۵	دبی ورودی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی (kg/s)
۶۰/۶	۵۰/۵	۵۰/۵	تعداد حلقه‌ها/تعداد کلکتورها (DISS)
۱۸/۰۰۰	۱۵/۰۰۰	۱۵/۰۰۰	مساحت کل مزرعه‌ی خورشیدی (m^2)
۶/۰۰۰	۵/۰۰۰	۵/۰۰۰	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری مزرعه‌ی خورشیدی (دلار آمریکا)
۸/۵۰۸/۰۰۰	۸/۵۰۸/۰۰۰	۸/۵۰۸/۰۰۰	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی (دلار آمریکا)
۱/۹۵۹/۰۰۰	۱/۹۵۹/۰۰۰	۱/۹۵۹/۰۰۰	هزینه‌ی نگهداری کل سیستم (سال/دلار آمریکا)
۸/۵۱۴/۰۰۰	۸/۵۱۴/۰۰۰	۸/۵۱۴/۰۰۰	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری کلی (دلار آمریکا)
حدود ۱۶ سال	حدود ۱۶ سال	حدود ۱۶ سال	مدت بازگشت سرمایه

جدول ۸. تحلیل اقتصادی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی ظرفیت پایین خورشیدی.

حالت اول	
۱۵۰	دمای بخار تامین شده از سیستم خورشیدی ($^{\circ}C$)
۰/۱	دبی خروجی از آبگرمکن خورشیدی (kg/s)
۱	دبی ورودی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی (kg/s)
۲	تعداد کلکتورها (DISS)
۴	مساحت کل آبگرمکن خورشیدی (m^2)
۱/۵۵۰	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری آبگرمکن خورشیدی (دلار آمریکا)
۵۰/۱۹۴	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی (دلار آمریکا)
۳۰۰	هزینه‌ی نگهداری کل سیستم (سال/دلار آمریکا)
۵۱/۷۷۴	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری کلی (دلار آمریکا)
حدود ۱۶ سال	مدت بازگشت سرمایه

بازگشت ناپذیرهای به دست آمده برای سیستم‌های آب شیرین کن ظرفیت بالا و پایین از دو روش تحلیل اکسرژی ارائه شده در این مقاله برابری اما بازده محاسبه شده از روش چشمه و چاه کمتر از روش جریان نگر است. اگر به جریان بخار - مایع در سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی ارائه شده نیز چند هزار کیلووات اکسرژی اضافه کنیم، بازده به دست آمده از روش جریان نگر، برحسب درصد برابر با ۱۰۰ می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که اگر میزان اکسرژی تبادل بزرگ باشد، روش جریان نگر در محاسبه‌ی آن دچار اشتباه می‌شود. براساس نتایج به دست آمده نشان داده شد که روش جریان نگر بازده اکسرتیک را بیش از حد بزرگ حساب می‌کند که بسیار گمراه کننده است؛ به ویژه در واحدهای صنعتی که بسیاری از ارزیابی‌ها براساس این معیار صورت می‌گیرد. حال فرض کنید یک گروه از مهندسين یک شرکت طراحی و اجرای پروژه‌های نفت و گاز و پتروشیمی در حال امکان‌سنجی یک پروژه بزرگ در این حوزه باشند. آنها اگر با استفاده از روش جریان نگر سیستم را تحلیل اکسرژی کنند، دچار انحراف بزرگی در تحلیل‌های خود می‌شوند و در عمل وقتی پروژه به مرحله‌ی اجرا می‌رسد، انتظارهایی که از آنها می‌رفته، برآورده نمی‌شود و پروژه شکست می‌خورد. از این مثال نتیجه می‌شود که اهمیت استفاده از یک روش مؤثر در تحلیل اکسرژی یک سیستم بسیار بالاست. با توجه به این که اکسرژی جریان‌های ورودی همیشه از جریان‌های خروجی بیشتر نیست، محاسبه‌ی بازده اکسرتیک از روش قدیمی گاهی دقیق نیست. اما در روش ارائه شده، بازده اکسرتیک و بازگشت ناپذیری به وسیله‌ی چشمه و چاه تعیین می‌شود که ایراد روش قبل را ندارد. با توجه به مثالی که در رابطه

بالاست. این فاکتور یک مزیت بزرگ برای سیستم‌های ظرفیت پایین به حساب می‌آید که سرمایه‌گذاران را بیش از پیش به سرمایه‌گذاری روی آنها ترغیب می‌کند. هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری از مرجع [۱۶] و نحوه‌ی محاسبه‌ی مدت بازگشت سرمایه در بخش‌های ۶.۲ و ۲.۸.۲ آورده شده است.

۵. نتیجه‌گیری

به منظور تحلیل صحیح اکسرژی باید روش مناسب و کارآمدی انتخاب شود تا نتایج به دست آمده هم کارایی داشته باشند و هم انحراف دهنده نباشد. محاسبه‌ی بازده و تلفات اکسرژی سیستم، یکی از روش‌های مورد استفاده برای طراحی، تحلیل و ارزیابی سیستم‌های ترمودینامیکی است. یکی از راه‌های متداول محاسبه‌ی این مقادیر، استفاده از روش تحلیل اکسرژی جریان نگر بوده است. در نوشتار حاضر سعی شد با نقد این روش، ایرادات احتمالی نتایج حاصل از تحلیل اکسرژی، نشان داده شود. علاوه بر نشان دادن ایرادات این روش، روش جایگزینی ارائه شد (چشمه و چاه) که نه فقط ایرادات روش قدیمی را نداشت، بلکه کارآمدی خود را در شرایط مختلف نشان می‌دهد.

همان طور که عنوان شد، مقادیر اکسرژی ورودی و خروجی از سیستم‌های آب شیرین کن نشان می‌دهد که مصرف انرژی در این سیستم‌ها بالاست. با این که

با توربین بخار زده شد، نشان داده شد که کاربرد روش جدید بسیار وسیع است. افزایش دمای سیال کمکی موجب کاهش بازده اکسروژیک می‌شود؛ از طرف دیگر به منظور افزایش این دما باید از کلکتورهای بیش تری استفاده کرد؛ همین موضوع از دیگر ضررهایی است که افزایش دمای سیال کمکی به سیستم می‌رساند. با ارائه‌ی سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌یی ظرفیت پایین سعی شد تا جنبه‌ی کاربردی بودن پژوهش انجام شده حفظ شود و کار انجام شده فقط در حد نظریه نماند. از دیگر یافته‌های مهم پژوهش، تأثیر فاز سیال کمکی بر بازده اکسروژیک و بازگشت‌ناپذیری سیستم است. این موضوع بدان معناست که فاز سیال انتقال دهنده‌ی حرارت به سیستم تأثیر بسیاری در عملکرد آن از دیدگاه اکسروژیک خواهد داشت. افزایش بازده اکسروژیک از ۷/۴۳٪ (سیستم ظرفیت بالا با سیال کمکی بخار) به ۱۹/۵۷٪ (سیستم ظرفیت پایین با سیال کمکی آب) بیان‌گر همین موضوع است. اکسروژیک جریان‌های ورودی همیشه از جریان‌های خروجی بیشتر نیست؛ گاهی اوقات ممکن است اکسروژیک جریان‌های خروجی بیشتر از جریان‌های ورودی باشد. این مطلب برای اکسروژیک فیزیکی جریان‌های ورودی و خروجی سیستم ظرفیت بالا و برای اکسروژیک شیمیایی جریان‌های ورودی و خروجی سیستم ظرفیت پایین صادق است. ایراد روش جریان‌نگر این است که این نکته را نادیده می‌گیرد.

بر اساس طراحی انجام شده روی کلکتورهای متمرکزکننده و تعیین تعداد مورد نیاز آنها مشخص می‌شود که سرمایه‌ی زیادی در جهت راه‌اندازی و تولید این سیستم مورد نیاز است. این موضوع بدان معناست که به احتمال زیاد در حال حاضر به دلیل کمبود امکانات فنی و اقتصادی در ایران امکان اجرای چنین سیستمی وجود ندارد. با توجه به این که بازده اکسروژیک محاسبه شده از روش چشمه و چاه سیستم ظرفیت پایین بیشتر از سیستم ظرفیت بالاست، و همچنین با توجه به این که تلفات اکسروژیک، هزینه‌های نگهداری و مدت بازگشت سرمایه‌ی آن کمتر از سیستم ظرفیت بالاست، استفاده از چند سیستم ظرفیت پایین به جای یک سیستم ظرفیت بالا در بلند مدت مقرون به صرفه‌تر است.

نوآوری‌های نوشتار حاضر عبارت‌اند از:

۱. ارائه‌ی روشی جدید و کم‌نقص برای تحلیل اکسروژیک سیستم‌ها؛
 ۲. تأیید معکوس بودن رابطه‌ی دمای سیال کمکی و بازده اکسروژیک به کمک روش چشمه و چاه در سیستم‌های آب شیرین‌کن مورد اشاره؛
 ۳. نشان دادن ایرادات روش جریان‌نگر در تحلیل اکسروژیک؛
 ۴. ارائه‌ی سیستم آب شیرین‌کن کم‌ظرفیتی که قابلیت ساخت در ایران را دارد؛
 ۵. ارائه‌ی سیستمی مرکب از کلکتورهای صفحه تخت خورشیدی و سیستم آب شیرین‌کن ظرفیت پایین؛
 ۶. یافتن رابطه‌ی فاز سیال کمکی و بازده اکسروژیک سیستم روش جدید.
- تحلیل اکسروژیک ارائه شده در این مقاله فقط برای چند سیستم آب شیرین‌کن خاص به کار برده شد.
- سیستم‌های ترمودینامیکی بسیاری وجود دارند که توسط این روش جدید هنوز مورد

ارزیابی قرار نگرفته‌اند. از این رو، استفاده از روش جدید برای تحلیل اکسروژیک سیستم‌های ترمودینامیکی، از دیگر زمینه‌هایی است که قابلیت بررسی را دارند.

فهرست علائم

- C : سرعت جریان نسبت به مرجع (m/s)؛
 \dot{E} : اکسروژیک جریان (kW)؛
 g : ثابت گرانش ($m^2/kg/m$)؛
 h : آنتالپی جریان (kJ/kg)؛
 I : بازگشت‌ناپذیری (kW)؛
 \dot{m} : دبی جرمی (kg/s)؛
 \dot{Q} : انرژی حرارتی (kJ)؛
 s : آنتروپی جریان (kJ/kgK)؛
 T : دما ($^{\circ}C$)؛
 \dot{W} : کار محوری (kW)؛
 z : ارتفاع ماده از مرجع (m).

علائم یونانی

- ε : اکسروژیک ویژه (kJ/kg)؛
 μ : غلظت ($\%$)؛
 η : بازده ($\%$).
بالانویس‌ها
 o : اکسروژیک استاندارد شیمیایی.

زیرنویس‌ها

- Ch : شیمیایی؛
 e, Out : خروجی؛
 i, IN : ورودی؛
 Ph : فیزیکی؛
 Q : انرژی حرارتی؛
 r : منبع؛
 $Sink$: چاه؛
 $Source$: چشمه؛
 $S\&S$: روش چشمه و چاه؛
 SW : روش جریان‌نگر؛
 o : محیط.

پانویس‌ها

1. reverse osmosis

2. forward osmosis
3. electro dialysis
4. multistage flash desalination

5. multiple effect desalination
6. humidification dehumidification desalination
7. passive vacuum desalination
8. stream wise
9. sink&source

منابع (References)

1. Li, C., Goswami, Y. and Stefanakos, E. "Solar assisted sea water desalination: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **19**, pp. 136-163 (2013).
2. Seima, R. "Energy issues in desalination processes", *Environmental Science & Technology*, **42**(22) (2008).
3. Kaushik, S., and Energy, C. "Exergy and thermo-economic Ranjan, K.R., and analysis of solar distillation systems: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **27**, pp. 709-723 (2013).
4. Yang, L., Shen, T., Zhang, B., and et al. "Exergy analysis of a solar-assisted MED desalination experimental unit", *Desalination and Water Treatment*, **51**(4-6) (2013).
5. Nematollahi, F., Rahimi, A., Tavakoli Gheinani, T. "Experimental and theoretical energy and exergy analysis for a solar desalination system", *Desalination*, Vol. **317**, pp. 23-31 (2013).
6. Pavelka, M., Kilika, V., Vágner, P, and et al. "Generalization of exergy analysis", *Applied Energy*, **137**, pp. 158-172 (2015).
7. Mortazavi, A., and Ameri, M. "Conventional and advanced exergy analysis of solar flat plate air collectors", *Energy*, **142**, pp. 277-288 (2018).
8. Fitzsimons, L., Corcoran, B., and Young, Y., and et al. "Exergy analysis of water purification and desalination: a study of exergy model approaches", *Desalination*, **359**, pp. 212-224 (2015).
9. Gnanaswar Gude, V., Nirmalakhandan, N., Deng, S., and et al. "Desalination at low temperatures: an exergy analysis", *Desalination and Water Treatment*, **40**, pp. 272-281 (2012).
10. Alzahrani, A., Orfi, J., and Alsuhaibani, Z. "Performance analysis of a gas turbine unit combined with MED-TVC and RO desalination systems", *Desalination and Water Treatment*, **15**(12), (2015).
11. Sharaf, M. A., Nafey, A. S., and Rodriguez, L. G. "Exergy and thrtmo-economic analyses of a combined solar organic cycle with multi effect distillation (MED) desalination process", *Desalination*, **272**1-3, pp. 135-147 (2011).
12. Ansari, K., Sayyaadi, H., and Amidpour, M. "Thermo economic optimization of a hybrid pressurized water reactor (PWR) power plant coupled to a multi effect distillation desalination system with thermo-vapor compressor (MED-TVC)", *Energy*, **35**5, pp. 1981-1996 (2010).
13. Kotas, T. J. *The Exergy Method Of Thermal Plant Analysis, Second Edittion* Krieger Publishing Company (1995).
14. Bejan, A., Tsatsaronis, G. and Moran, M., *Thermal Design & Optimization*, John Wiley & Sons, Inc (1996).
15. Duffie, J. A., and Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 25-27 (2013.)
16. Russell, G. E., *Desalination*, SRI International 133, October (1980).
17. Linear Focusing Facilities, Accessed on 23 March 2016; <http://www.psa.es/en/instalaciones/parabolicos.php>.