

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره هشت، آبان ماه ۹۹

تأثیر اصلاح نشت و افزایش دبی آب خنک کننده کندانسور بر عملکرد سیستم آب شیرین کن خورشیدی بر پایه خلأ طبیعی و مجهز به کلکتور لوله خلأ

محمد جواد عباس پور^۱

محمد بهشاد شفیعی^{۲*}

Behshad@sharif.edu

تاریخ پذیرش: ۹۸/۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۱۵

چکیده

زمینه و هدف: عدم دسترسی به آب شیرین کافی، از مشکلات تهدید کننده مردم سراسر جهان می‌باشد و برای جلوگیری از وقوع این مشکلات، تحقیقات زیادی به منظور یافتن روش‌هایی جدید برای خالص سازی منابع مختلف آب شور با هزینه، انرژی و تاثیرات محیط زیستی کمتر، در حال انجام می‌باشد. این مطالعه با هدف تولید آب شیرین به روش خلأ طبیعی و با استفاده از لوله‌های خلأ و ایجاد خلأ توسط پمپ خلأ صورت گرفته است که به عنوان تلفیقی نوآورانه محسوب می‌شود. مضافاً تاثیر فشارهای مختلف خلأ بر روی میزان آب شیرین تولیدی و سپس تاثیر اصلاح نشت و افزایش دبی آب خنک کننده کندانسور بر عملکرد سیستم به صورت تجربی بررسی شده است. روش بررسی: در این تحقیق، از پمپ خلأ جهت ایجاد خلأ اولیه استفاده شده و با خاموش شدن آن، ستون بارومتریک آب به طور طبیعی نقش حفظ خلأ در روزهای متوالی بعد را دارد. از کلکتورهای لوله خلأ برای بالا بردن نرخ انتقال حرارت به آب شور استفاده شده است. سپس عملکرد سیستم در روزهای متوالی مورد تحقیق قرار گرفته است. پس از اصلاحات انجام یافته در سیستم، میزان آب تولیدی و راندمان سیستم مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته‌اند. از پیرانومتر، فشار سنج خلأ و ترموکوپل نیز به ترتیب جهت اندازه‌گیری شدت تابش، فشار سیستم و دمای نقاط مختلف سیستم استفاده شده است.

یافته‌ها: در این مطالعه با افزایش فشار خلأ میزان آب تولیدی سیستم و راندمان افزایش یافته و با انجام اصلاح نشت و افزایش دبی آب خنک کننده کندانسور، راندمان سیستم تغییر اندکی داشته است به طوری که سیستم می‌تواند در تعداد روزهای متوالی و متعدد بدون ایجاد خلأ مجدد، آب تولید کند.

بحث و نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش خلأ میزان تولید آب شیرین و راندمان سیستم افزایش می‌یابد. همچنین پس از انجام تغییرات در سیستم، به میزان $8/114 \text{ kg/m}^2\text{d}$ آب تولید شده است. مضافاً راندمان به بالای ۵۱ درصد رسیده و نیز تغییر جزئی در روزهای متوالی اولیه داشته که در نتیجه آن سیستم قادر به تولید آب به بیش از سه روز بدون استفاده مجدد از پمپ خلأ شده است.

واژه‌های کلیدی: آب شیرین کن خورشیدی، نمک زدایی با خلأ طبیعی، کلکتور لوله خلأ.

۱- کارشناس ارشد مهندسی انرژی های تجدیدپذیر، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران ایران

۲- استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. * (مسئول مکاتبات)

Effect of Leakage Modification and Cooling Flow Rate Increase of Water-Cooled Condenser on NVD System Performance Equipped with Vacuum Tube Collectors

Mohammadjavad Abbaspour¹

Mohammadbehshad Shafiei^{2*}

Behshad@sharif.edu

Admission Date: May 9, 2018

Date Received: March 13, 2018

Abstract

Background and Objective: Lack of access to sufficient fresh water is a major threat to people around the world, and to prevent this, extensive research is being done to find new ways to purify different sources of brackish water at lower cost, energy and environmental impacts. The purpose of this study is to produce the freshwater through an NVD system using vacuum tube collectors and vacuum creation by a vacuum pump. Hence, this kind of system could be considered as an innovative combination one; in addition, the effect of different vacuum pressures on yield, then the effect of leakage modification and flow rate increase of cooling water on the system performance were experimentally investigated.

Method: In this research, a vacuum pump was utilized to create an initial vacuum, and when it is switched off, a barometric water column maintains the vacuum naturally throughout the consecutive days. The vacuum collectors were used in order to enhance the saline water heat transfer; later the system performance was continually examined. After the improvements were carried to the system, the yield and efficiency were analyzed and compared with the first test. Furthermore, a pressure gauge, a pyranometer and some thermocouples were applied so as to measure the system pressure, solar radiation and temperatures respectively.

Findings: The current study found that the yield and efficiency of the system increased by raising the vacuum pressure; besides, after the leakage modification and cooling water flow rate enhancement, the efficiency has been insignificantly varied in the first consecutive days resulting in a superior capability to produce fresh water for more than three days without reusing the vacuum pump.

Discussion and Conclusion: The results of this study indicated that raising the vacuum pressure increased the yield and efficiency so that they reached to 8.114 kg/m²d and more than 51% respectively. Moreover, the efficiency slightly varied and as a result, the system would be able to produce freshwater for more than three days without reutilizing vacuum pump.

Keywords: Solar Desalination, Natural Vacuum Distillation, Evacuated Tube Collector.

1- M.Sc., Renewable Energy Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Tehran Iran

2- Professor, Faculty of Mechanics, Sharif University of Technology, Tehran, Iran *(Corresponding Author)

مقدمه

پایه روش خلأ طبیعی است، تغییر فاز (تبخیر آب) می‌باشد (۵). مراد و همکاران یک سیستم آب شیرین کن خورشیدی یکپارچه با پمپ خلأ را به طور تجربی مورد مطالعه قرار دادند و نتایج را با یک سیستم بدون پمپ خلأ مقایسه کردند. آب شور مستقیماً گرما را از یک کلکتور تخت خورشیدی دریافت می‌کرد و پمپ خلأ بخار را از کلکتور می‌کشید و آن را به کویل‌های مسی در کندانسور می‌فرستاد. نحوه کار دو سیستم به عنوان عملکرد تغییر در سطح شوری آب و دبی جریان آب تانک مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که تولید آب افزایش یافته و هزینه به دلیل افزایش دبی آب با استفاده از پمپ خلأ، کاهش یافته است و این در حالی است که عکس این مساله در در سیستم بدون پمپ خلأ وجود داشت. حداکثر آب شیرین تولیدی (با پمپ خلأ و بدون آن به ترتیب) به میزان ۱۰/۹۴-۷/۲۷ لیتر در روز متناظر با هزینه ای بالغ بر ۰/۳۱-۰/۳۰ \$/Liter و با میزان دبی آب تانک ۰/۸ Liter/hr و ۰/۴ Liter/hr ثبت گردید (۶). بیلگیل و هیرلاکلو به صورت تجربی تاثیر وجود پمپ خلأ جهت کاهش فشار داخلی سیستم (۶۶۰-۵۸۴ mmHg) و همچنین تاثیر دمای کاری را مورد بررسی قرار دادند. سیستم مورد مطالعه آنها دارای دو محفظه تبخیر و تقطیر بوده که به ترتیب به یک سیستم تولید کننده آب گرم خورشیدی و پمپ خلأ وصل بودند. نتایج نشان داد که کاهش فشار داخلی سیستم و کاهش دماهای کارکرد، تاثیر قابل توجهی بر میزان آب تولیدی نداشته ولی موجب افزایش انرژی ورودی به سیستم می‌گردد. از این رو، سیستم طراحی شده برای کارکرد در دماهای بالا به دلیل مصرف انرژی کمتر، اقتصادی‌تر می‌باشد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که با خاموش شدن پمپ در حین فرآیند، فشار سیستم در طی ۶۰ دقیقه به میزان ۲۰٪ افزایش یافته و پمپ بایستی دوباره روشن گردد (۷). به منظور کاهش انرژی مصرفی ناشی از پمپ خلأ، استفاده از روش خلأ طبیعی توسط ستون‌های بارومتریک آب مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. روش خلأ طبیعی در حالت کلی از دو ستون آب

امنیت آب و انرژی دو چالش اساسی جهت توسعه پایدار جامعه بشری می‌باشد. طبق گزارش برنامه محیط زیست سازمان ملل، یک سوم جمعیت جهان در کشورهای با تنش آبی زندگی می‌کنند و تا سال ۲۰۲۵، دو سوم جمعیت جهان با کمبود آب مواجه خواهد شد (۱). از طرف دیگر برآورد شده که به ازای یک میلیون متر مکعب آب شیرین در هر روز، ده میلیون تن نفت خام سالانه نیاز است. با توجه به هزینه بالای منابع انرژی رایج و مضرات زیست محیطی آنها، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر (عمدتاً انرژی خورشیدی) جذابیت زیادی در تاسیسات آب شیرین‌کنی دارند (۲). نگرانی‌های بسیاری در مورد اثرات زیستی نمک زدایی فعلی در کل جهان و به ویژه ایران وجود دارد. علی‌رغم این که کشور ایران ۱/۱ درصد از مساحت خشکی‌های جهان را به خود اختصاص داده است، تنها ۰/۳۴ درصد از آب‌های موجود در خشکی جهان را در اختیار دارد. افزایش بی‌رویه مصرف انرژی و عدم موفقیت در استفاده از منابع جایگزین انرژی، می‌تواند منجر به بحران انرژی در آینده‌ای نزدیک در کشور شود. این در حالی است که ایران پتانسیل بسیار زیادی در حدود ۱۵/۳ کیلووات ساعت بر متر مربع روزانه را دارا بوده که می‌تواند به صورت موثری در فرآیندهای نمک زدایی به کار برده شود (۳).

تلاش محققان مختلف جهت یافتن روش‌های جدید نمک‌زدایی با مصرف انرژی کمتر و عملکرد بهتر در حال انجام می‌باشد. روشهای نمک زدایی حرارتی در محیط خلأ در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. این سیستم‌ها با داشتن مزایای برجسته ای از قبیل سادگی، قابلیت کارکرد با انرژی خورشیدی و عدم نیاز به فرآیندهای پیش تصفیه پیچیده نسبت به روش‌های RO^۳، MED^۴، MSF^۵ دارای برتری می‌باشد (۴). عمده فناوری‌های شیرین‌سازی به دو دسته: فرآیندهای حرارتی تغییر فازی و فرآیندهای غشایی طبقه‌بندی می‌شوند. نوع فرآیند دستگاه ساخته شده در این تحقیق که بر

- 1- Multi-Stage Flash
- 2- Multi Effect Distillation
- 3- Reverse Osmosis

شور و آب شیرین تشکیل شده که از پائین به ترتیب داخل مخزن آب شور و آب شیرین بوده و از بالا توسط یک محفظه خلأ به یکدیگر وصل شده اند. در این روش، هد ستونهای بارومتریک آب (تقریباً ۱۰/۳۳ متر) معادل فشار اتمسفریک بوده که با ایجاد تعادل فشار در دو طرف محفظه، موجب ایجاد خلأ طبیعی در محفظه بالای ستون‌ها می‌شود. به دلیل خلأ طبیعی ایجاد شده، فضای بالای ستون‌های آب دارای بخار آب در فشارهای بخار مربوط می‌شود. با توجه به اتصال دو ستون آب توسط محفظه خلأ و پائین‌تر بودن (تقریباً ۱/۸۴٪) فشار بخار آب شور نسبت به آب شیرین در دمای محیط، بخار آب از ستون آب شیرین به ستون آب شور تقطیر می‌شود. از این رو جهت تغییر جهت فرآیند و تقطیر شدن از سمت آب شور به آب شیرین و در نتیجه تولید آب شیرین، باید دمای آب شور ورودی افزایش داده شود (۸). آیهان و میدیلی به صورت نظری و تجربی وجود یک فن (fan) جهت ایجاد انتقال حرارت اجباری در محفظه خلأ سیستم NVD را مورد مطالعه قرار دادند (۹ و ۱۰). نتایج نشان داد که میزان آب تولیدی در حالت اجباری ۱/۴-۱/۶ برابر میزان آب تولیدی در حالت طبیعی (نبود فن) می‌باشد. همچنین بیان شد که وجود وکیوم پمپ جهت جبران افت فشار موجود در سیستم و هیتر الکتریکی جهت جبران اتلافات حرارتی در سیستم نمک زدایی با خلأ طبیعی NVD موجب بهبود عملکرد آن می‌شود. علاوه بر این، مشاهده شد که اتلاف حرارت در هنگام تبخیر موجب کاهش آب تولیدی می‌شود. امباریتا سیستم NVD را با منبع گرمائی یک کویل الکتریکی مورد مطالعه قرار داد. نتایج بدست آمده نشان داد که عملکرد سیستم NVD به طور عمده به بیشترین دمای ایجاد شده در اواپراتور و همچنین کمترین دمای موجود در کندانسور وابسته می‌باشد (۱۱).

همان طور که گفته شد، یکی از مهمترین مزیت های سیستم NVD، قابلیت کارکرد آنها با کلکتور های خورشیدی جهت تامین گرمایش مورد نیاز می‌باشد. محققان مختلف استفاده از کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت در سیستم های NVD را مورد مطالعه قرار دادند. الخرابشه و گوسامی یک سیستم NVD خورشیدی را به صورت نظری و تجربی مورد مطالعه

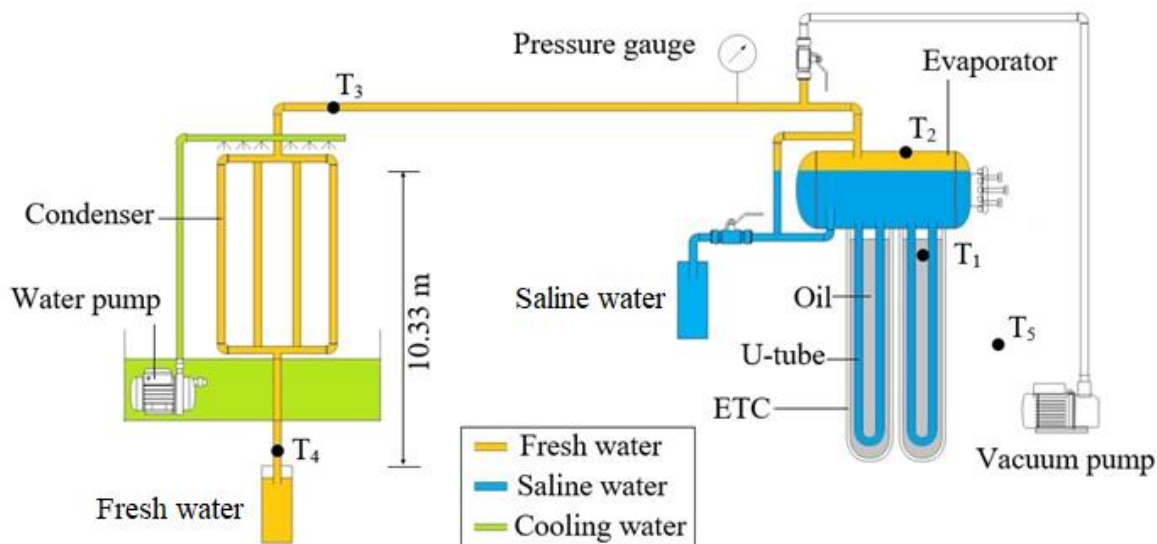
قرار دادند. در این سیستم گرمایش از طریق کلکتور خورشیدی صفحه تخت تامین شده و تقطیر آب شیرین در یک کندانسور هوا خنک مجهز به فین (fin) انجام می‌گیرد. تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل نرخ خروج آب شور برگشتی از اواپراتور، عمق آب در اواپراتور و دمای منبع گرمائی مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که تاثیر نرخ خروج آب شور برگشتی از اواپراتور و عمق آب در اواپراتور در میزان آب تولیدی ناچیز بوده ولی دمای منبع گرمائی تاثیر مهمی در میزان آب تولید دارد (۱۲). چوی به صورت نظری سیستم NVD خورشیدی را به منظور بررسی تاثیر دمای آب شور بر میزان تولید آب شیرین مورد مطالعه قرار داد. در این سیستم، آب شور ابتدا در کندانسور پیش گرم شده و با عبور از یک کلکتور خورشیدی، افزایش دما پیدا میکند. با توجه به این که افزایش هرچه بیشتر دما موجب بهبود عملکرد سیستم می‌شود، از یک هیتر الکتریکی متصل به پنل فوتولتائیک نیز جهت افزایش دمای آب شور خروجی از کلکتور استفاده شده و سپس وارد محفظه تبخیر می‌شود (۱۳). نتایج مطالعات پیشین نشان داد که افزایش دمای آب شور در سیستم NVD موجب بهبود عملکرد سیستم می‌شود. تا جایی که نویسندگان این مقاله اطلاع دارند، تا به حال استفاده از کلکتورهای خورشیدی لوله خلأ در سیستم NVD جهت تامین گرمایش مورد مطالعه قرار نگرفته است، از این رو در این مقاله ضمن مطالعه این روش، میزان آب تولیدی در فشارهای مختلف خلأ و سپس تاثیر اصلاح نشت و افزایش دبی آب خنک کننده کندانسور بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفته است.

روش بررسی

در شکل ۱، شماتیکی از سیستم تجربی نشان داده شده است. سیستم NVD ساخته شده شامل دو کلکتور لوله خلأ، پمپ خلأ، محفظه تبخیر (مخزن خلأ)، کندانسور، مخزن آب شور، مخزن آب شیرین، پمپ آب و اتصالات می‌باشد. مخازن آب شور و شیرین توسط لوله های مسی به ترتیب به ورودی محفظه تبخیر و خروجی کندانسور وصل شده اند. در ابتدای تست، آب شور از طریق شیر تعبیه شده وارد محفظه تبخیر

صورت طبیعی می باشد. به منظور توضیح بیشتر، پمپ خلأ نقش ایجاد خلأ در ابتدای روز را داشته و ستون آب شیرین نقش حفظ خلأ در طول روز را دارد. در این بررسی، از ترموکوپل‌های نوع K برای سنجش نقاط دمایی مختلف استفاده شده است. در شکل ۱ محل نصب ترموکوپل‌ها نشان داده شده‌اند. T1 دمای آب شور داخل مخزن، T2 دمای بخار داخل مخزن، T3 دمای ورودی بخار به کندانسور، T4 دمای آب شیرین تولیدی و T5 دمای محیط می‌باشند. برای اندازه‌گیری فشار نیز از گیج فشار خلأ با مدل INDUMART-P11T2 با خطای ۱/۶ درصد استفاده شده است.

شده و از یک لوله شفاف مدرج جهت مشخص شدن میزان آب موجود در محفظه تبخیر استفاده شده است. با پر شدن سیستم از میزان مورد نظر آب شور، شیر ورودی آن بسته می‌شود. از یک پمپ و کیوم جهت راه اندازی سیستم و ایجاد شرایط خلأ در محفظه تبخیر و همچنین کشیدن آب از مخزن آب شیرین به سمت بالا استفاده شده است. با رسیدن ارتفاع ستون آب به ۱۰/۳۳ متر و ایجاد خلأ مورد نظر در محفظه تبخیر، پمپ و کیوم خاموش شده و در طول روز مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. علت عدم نیاز به روشن بودن پمپ خلأ در طول روز، به وجود ارتفاع بارومتریک ستون آب و در نتیجه حفظ خلأ سیستم به



شکل ۱- طرحی از سیستم مورد آزمایش

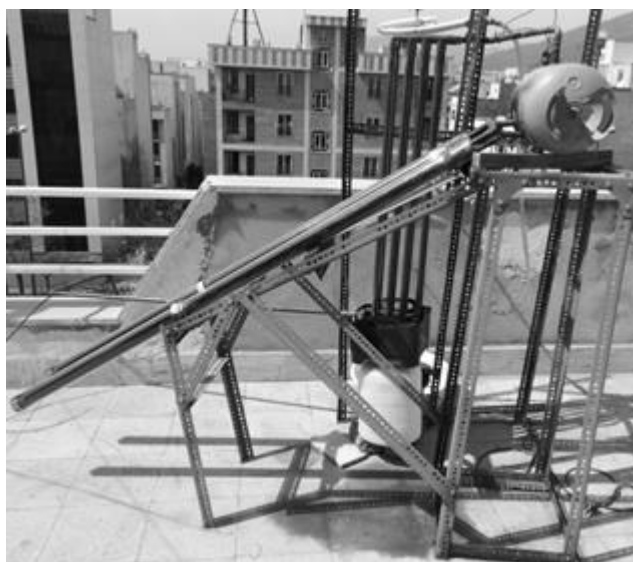
Figure 1. Schematic view of the system

شکل مسی متصل به محفظه تبخیر می باشد. قراردادن روغن داخل کلکتور موجب افزایش انتقال حرارت به آب درون لوله U شکل می شود (۱۵). از این رو در سیستم حاضر نیز، درون کلکتورهای لوله خلأ (در تماس با جداره خارجی لوله U شکل مسی) روغن (روغن موتور اتومبیل با دامنه دمایی 10°C تا 50°C و دانسیته 885 kg/m^3) ریخته شده و حرارت جذب شده توسط سطح کلکتور ابتدا به روغن درون آن انتقال می‌یابد. در ادامه، با انتقال حرارت از روغن به آب موجود در لوله U شکل، دمای آب درون لوله U شکل افزایش می‌یابد. بدین

از دو کلکتور لوله خلأ جهت افزایش دمای آب شور و تبخیر آن استفاده شده است. در کلکتورهای لوله خلأ، به علت استوانه‌ای شکل بودن، در اکثر ساعات روز اشعه خورشیدی عمود بر سطح کلکتور می‌باشد. لوله‌های خلأ به میزان قابل توجهی از اتلافات حرارتی را به دلیل وجود خلأ می‌کاهند (۱۴). در شکل ۲ نمای واقعی سیستم و نحوه قرارگیری اجزای سیستم و انتقال تشعشع خورشیدی به آب داخل مخزن نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در درون هر کلکتور خلأ، یک لوله U شکل مسی قرار داده شده و آب شور در داخل لوله U

پوشانده شده است. کندانسور به کار رفته در این مطالعه به صورت آب خنک بوده و آب سرد از طریق یک سری اسپری روی لوله های حاوی آب شیرین پاشیده می شود. همچنین از یک پمپ آب جهت گردش آب خنک کاری در کندانسور استفاده شده است. بدین ترتیب، سیستم NVD ساخته شده توانائی تولید آب شیرین با کلکتورهای راندمان بالای لوله خلأ را دارا می باشد. مشخصات مربوط به اجزای اصلی سیستم در جدول ۱ به طور کلی ارائه شده است. همچنین از یک پیرانومتر برای سنجش تشعشع خورشیدی (بر حسب وات بر متر مربع) و از یک استوانه مدرج شیشه ای که از مقدار ۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی لیتر درجه بندی شده برای اندازه گیری میزان آب تولیدی استفاده شده است.

ترتیب به دلیل وجود پدیده ترموسیفون، آب درون لوله U شکل و در نتیجه آب شور موجود در محفظه تبخیر گرم می شود. از این رو در طول روز، با گرم شدن آب شور درون محفظه تبخیر توسط انرژی خورشیدی و وجود خلأ در درون آن، آب شور شروع به تبخیر شدن می کند. با توجه به وجود اختلاف فشار ناشی از ارتفاع ستون آب شیرین و همچنین بیشتر بودن دمای آب شور نسبت به آب شیرین، بخار حاصل از آب شور به سمت کندانسور (متصل به مخزن آب شیرین) حرکت می کند. با تقطیر آب درون کندانسور، آب شیرین تولید شده و توسط ستون آب شیرین به مخزن آب شیرین انتقال پیدا می کند. لازم به ذکر است که جهت جلوگیری از اتلاف حرارت، جداره خارجی محفظه تبخیر از عایق پشم شیشه به ضخامت ۳ cm



شکل ۲- نمای واقعی سیستم

Figure 2. Real view of the system

جدول ۱- مشخصات و ابعاد اجزای سیستم

Table 1. Details of the dimensions and sizes of the equipment used.

مشخصات		اجزا
۵/۸ - ۴/۷ cm	قطر داخلی - قطر خارجی	کلکتور لوله خلأ
۳۵/۵ - ۱۸۰ cm	طول - زاویه شیب	
۳۵۰ cm - $\frac{۳}{۴}$ inch	قطر - طول هر لوله U شکل	

۴۵-۲۵ cm	قطر- ارتفاع	مخزن تبخیر
$\frac{3}{4}$ inch	قطر هر لوله	کندانسور
۱۰۰ cm - ۸	تعداد - طول هر لوله	
VE225N (VALUE)	مدل	پمپ خلأ
$\frac{1}{3}$ HP	توان	
SH205 (MOTOGEN)	مدل	پمپ آب
$\frac{1}{6}$ HP	توان	

شده است. به منظور مطالعه دقیق تر اثر وجود شرایط خلأ و دبی آب خنک کاری بر آب تولیدی، میزان آب تولیدی سیستم در فشارهای ۲۳ inHg، ۲۲/۵ inHg، ۲۰/۷ inHg - و ۱۸/۲ inHg - که به ترتیب با فشارهای ۲۳/۴kPa، ۲۵/۱kPa، ۳۱/۲kPa، ۳۹/۷kPa معادل در سیستم هستند، هر یک به مدت سه روز مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع پس از این که خلأ ایجاد شد به بررسی عملکرد در روزهای متوالی و طی نه ساعت کاری پرداخته شده است. به عبارت دیگر، مانند آزمایش اول در هر فشار، پمپ خلأ در آغاز روز اول روشن می شود و تا رسیدن سیستم به فشار مورد نظر کار می کند و سپس خاموش می گردد و در روزهای دوم و سوم پمپ روشن نمی شود و آب شور نیز به مخزن اضافه نمی گردد. در ادامه به تحلیل نمودار ساعتی و تجمعی پرداخته شده است. ذکر این نکته لازم است که به دلیل این که کارایی پمپ خلأ نسبت به زمان انجام آزمایش اول دچار افت اندکی شده، رسیدن به فشار خلأ ۲۴ inHg - میسر نشده است. مساحت مورد استفاده جهت جذب تابش خورشیدی، نقش مهمی در میزان آب تولیدی ایفا می کند. از این رو جهت بررسی بهتر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم حاضر، راندمان سیستم با رابطه ۱ تعریف شده است (۶):

$$\eta = \frac{\sum_t \dot{m} h_{fg}}{\sum_t IA + W_{vacuum pump} + W_{water pump}}$$

که در این رابطه \dot{m} میزان آب تولیدی بر حسب کیلوگرم بر ساعت است، h_{fg} آنتالپی بخار دو فازی (کیلو ژول بر کیلوگرم)

قابلیت ایجاد خلأ و حفظ آن، از مهمترین پارامترهای اثرگذار بر عملکرد سیستم های NVD می باشد. بدین منظور دو آزمایش و هر یک با فشارهای خلأ متفاوت مورد بررسی قرار گرفته اند. در هر دو آزمایش، ایجاد مقادیر متفاوتی از خلأ توسط پمپ و کیوم میسر می گردد، به طوری که پمپ و کیوم صرفاً در ابتدای تست روشن شده و بعد از بالاتر آمدن آب به اندازه ارتفاع بارومتریک از سمت آب شیرین، در طول روز خاموش می باشد. به عبارت دیگر، به علت وجود ستون بارومتریک آب در سمت آب شیرین، خلأ ایجاد شده در محفظه تبخیر به صورت طبیعی باقی مانده و نیازی به کارکرد پمپ خلأ در حین آزمایش نمی باشد. در آزمایش اول دبی آب خنک کاری کندانسور تقریباً ۲/۵ lit/min می باشد. در وضعیت اول این آزمایش، در حالت اول فشار پایین (LV)، سیستم دارای فشار خلأ ۲۰ inHg - (فشار سیستم معادل ۳۳/۶kPa) و در حالت دوم سیستم دارای فشار خلأ بالا (HV) به میزان ۲۴ inHg - (فشار سیستم معادل ۲۰/۱kPa) است. پمپ خلأ به ترتیب حدود ۱۱ و ۱۸ دقیقه برای رسیدن سیستم به این مقدار فشارها کار می کند و پس از آن خاموش می گردد. این آزمایش تا ساعت ۱۷ که آب تولید شده، صورت گرفته است و با توجه به اینکه این حالات در دو روز متوالی انجام گرفته اند، میزان تشعشع خورشیدی تقریباً یکسان می باشد. در وضعیت دوم آزمایش اول، عملکرد سیستم در فشار HV به مدت چهار روز متوالی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

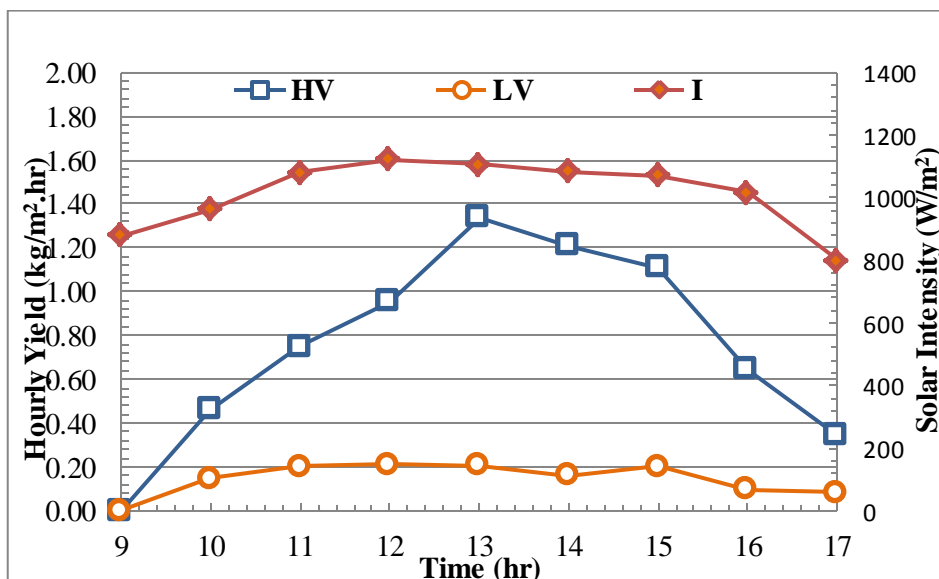
در آزمایش دوم دبی آب خنک کاری کندانسور به ۱۰ lit/min افزایش یافته و اثر نشت در سیستم مجدداً بررسی و اصلاح

مشاهده می‌شود، میزان آب تولیدی در حالت HV به مراتب بیشتر از حالت LV می‌باشد. افزایش خلأ موجب شروع فرآیند تبخیر در دماهای پایین‌تر شده که موجب افزایش نرخ تبخیر و تبعاً افزایش نرخ تقطیر و تولید آب شیرین می‌گردد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که در طول روز، با افزایش تابش خورشیدی، میزان آب تولیدی برای هر دو حالت ابتدا روند صعودی داشته و در ادامه روز با کاهش تابش خورشیدی، میزان تولید آب نیز کاهش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌گردد که بیشترین میزان آب تولیدی در حالت‌های HV و LV به ترتیب برابر $۱/۳۴ \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ و $۰/۲۲ \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ می‌باشد.

که بر اساس فشار سیستم به دست می‌آید و I شدت تابش با واحد وات بر مترمربع و A مساحت سطح کلکتور (متر مربع) می‌باشد. مضافاً $W_{\text{vacuum pump}}$ و $W_{\text{water pump}}$ به ترتیب توان مصرفی پمپ خلأ و پمپ آب خنک‌کننده کندانسور بر حسب وات می‌باشد.

یافته‌ها

نمودار ۱ تاثیر فشار خلأ بر آب تولیدی و همچنین میزان تشعشع خورشیدی را در آزمایش اول نشان می‌دهد. میزان آب تولیدی (نقاط تو خالی) و تشعشع خورشیدی (نقاط تو پر) در این نمودار نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از این نمودار

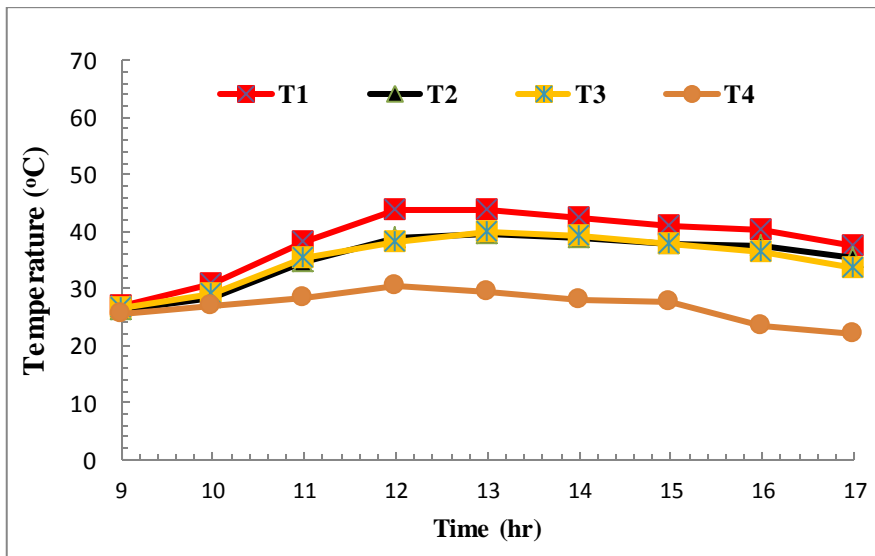


نمودار ۱- اثر تابش خورشید و فشار خلأ بر میزان آب تولیدی

Diagram 1. Effect of vacuum pressure and solar intensity on hourly yield

یافته و با کاهش تابش، دماهای نقاط مختلف تقلیل داشته‌اند. در واقع هر مقدار که بخار مسیر بیشتری را در سیستم طی کرده، به دلیل تلفات حرارتی از دمای آن کاسته شده و در نهایت در کندانسور تقطیر شده است.

تغییرات دما در فشار HV و در نقاط مختلف سیستم در نمودار ۲ نمایش داده شده است که در آن دمای آب شور داخل مخزن، T2 دمای بخار داخل مخزن، T3 دمای ورودی بخار به کندانسور، T4 دمای آب شیرین تولیدی می‌باشند. تقریباً با افزایش تابش، دماها در نقاط مختلف با روند صعودی افزایش

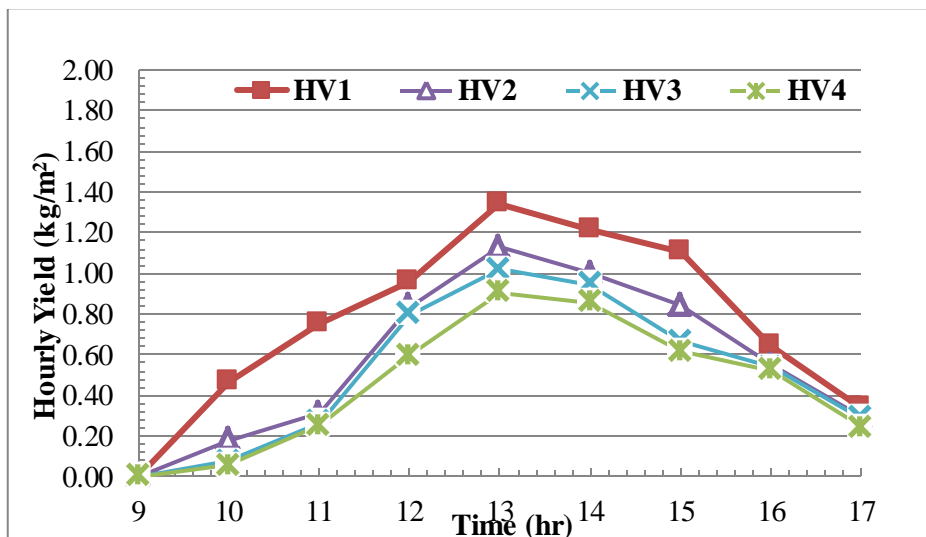


نمودار ۲- تغییرات دما در نقاط مختلف دستگاه

Diagram 2. Variation of temperatures in different parts of system

در متعدد در بالای محفظه تبخیر و یا نشت در سیستم باشد. در واقع جمع شدن گازهای غیرقابل چگالش موجب از بین رفتن خلأ و در نتیجه ضعیف تر شدن عملکرد سیستم می شود. از طرفی با تبخیر آب در طول روز، میزان شوری آب موجود در محفظه تبخیر افزایش می یابد. افزایش شوری آب می تواند موجب کاهش نرخ تبخیر آن شده و در نتیجه موجب کاهش میزان آب تولیدی گردد (۱۶).

در ادامه، سیستم در حالت HV به مدت چهار روز متوالی مورد آزمایش قرار گرفته و میزان آب تولیدی در طی این چهار روز در نمودار ۳ نشان داده شده و همان طور که مشاهده می شود، بیشترین میزان آب تولیدی در روز اول بوده و در روزهای آتی به ترتیب میزان آب کمتری تولید شده است. همان گونه که ملاحظه می گردد طی روزهای متوالی میزان آب تولیدی کاهش نسبتاً چشمگیری یافته است که علت آن می تواند جمع شدن و افزایش میزان گازهای غیرقابل چگالش در حین روزهای متوالی



نمودار ۳- تغییرات میزان آب تولیدی در فشار HV در چهار روز متوالی

Diagram 3. Hourly yield variation for high vacuum case in 4 consecutive days

می‌رود زمانی که سیستم در فشار بالا خلأ شده و به مدت چهار روز کار کند، تغییرات راندمان ناچیز باشد، اما نتایج راندمان طی روزهای متوالی عکس این قضیه را نشان داده و در این جا کاهش نسبتاً چشمگیری داشته است. از این رو، به نظر می‌رسد که سیستم دچار نقص باشد، یکی کندانسور به علت کمبود میزان خنک کاری و دیگری احتمال وجود نشت در سیستم، از این رو آزمایش دوم با هدف عملکرد بهتر سیستم، مورد بررسی قرار گرفته است.

راندمان سیستم برای حالات مختلف HV یک و چند روزه و در جدول ۲ ارائه شده است. بالاتر بودن راندمان سیستم در حالت HV به خوبی اثر خلأ را در بهبود عملکرد سیستم نسبت به فشار پایین تر خلأ (LV) مشخص می‌کند. نتایج راندمان نکات مهمی را آشکار می‌سازد. این آزمایش در بالاترین فشاری کاری ممکن (-24 inHg) انجام گرفته و تبعا میزان بخار زیادی در این فشار به وجود آمده و این که آب شور نیز به حد کافی در روزهای اولیه در سیستم موجود بوده است. طی روزهای اولیه کاری و تقریباً مشابه از نظر میزان تابش، انتظار

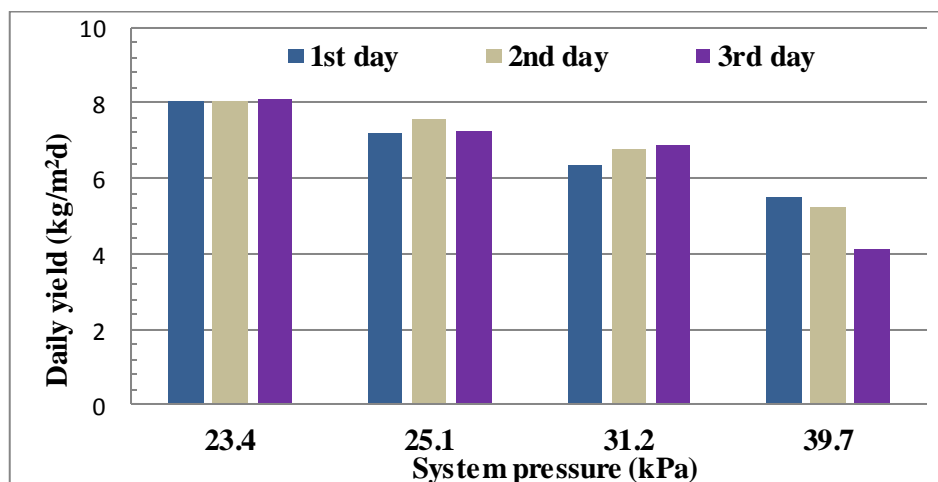
جدول ۲- تغییرات راندمان در آزمایش اول

Table 2. Efficiency variation in the first test

راندمان (%)	روز کاری	فشار
۵۰/۷	روز اول	HV (-24 inHg)
۴۶	دو روزه	
۴۳/۲	سه روزه	
۴۰/۵	چهار روزه	
۱۰/۲	یک روزه	LV (-20 inHg)

۲۳ inHg - ۲۲/۵ inHg - ۲۰/۷ inHg و - ۱۸/۲ inHg که به ترتیب با فشارهای ۲۳/۴ kPa، ۲۵/۱ kPa، ۳۱/۲ kPa، ۳۹/۷ kPa معادل در سیستم هستند، ارائه شده است.

تحلیل عملکرد سیستم در چهار فشار کاری مختلف بیانگر آن است که ایجاد شرایط خلأ بیشتر که معادل با کاهش فشار داخلی سیستم می‌باشد به بهبود عملکرد سیستم می‌انجامد. در آزمایش دوم، میزان آب تولیدی، در نمودار ۴ در فشارهای



نمودار ۴- اثر فشارهای مختلف سیستم بر میزان آب تولیدی در سه روز متوالی (آزمایش دوم)

Diagram 4. Effect of system pressure on daily yield in 3 consecutive days (2nd test)

عبارت دیگر، تغییر کم در میزان آب تولیدی در این نمودار در فشارهای خلأ بالا عمدتاً در اثر تغییرات کم تابش طی روزهای متوالی بوده است.

سیستم مورد آزمایش در روزهایی که پمپ خلأ خاموش است نیز می‌تواند در روزهای متوالی آب تولید کند. در هر صورت، به دلیل تجمع و افزایش گازهای تراکم ناپذیر در بالای مخزن تبخیر طی روزهای متعدد، عملکرد سیستم کاهش خواهد یافت و لازم است که پمپ خلأ مجدداً روشن شود. افت فشار سیستم در جدول ۳ ارائه شده و برای سه روز متوالی حداکثر حدود ۴/۲ درصد است که پایداری سیستم را نشان می‌دهد.

همان گونه که ملاحظه می‌شود، تولید روزانه در بهترین حالت در فشار خلأ ۲۳ inHg - ۲۳/۴ kPa) در سیستم) رخ داده و در روزهای اول، دوم و سوم آن به ترتیب به میزان $8/065$ ، $8/052$ و $8/114$ kg/m².day تولید شده است. بر خلاف آزمایش اول که میزان آب تولیدی در فشار خلأ بالا دچار افت زیادی طی روزهای اولیه بوده، در این نمودار در فشارهای خلأ بالا، لزوماً آب تولیدی طی روزهای مشابه و متوالی کاهش نیافته و این به نوبه خود می‌تواند نشان دهنده نتیجه بهبود تغییرات انجام شده در آزمایش دوم باشد. به

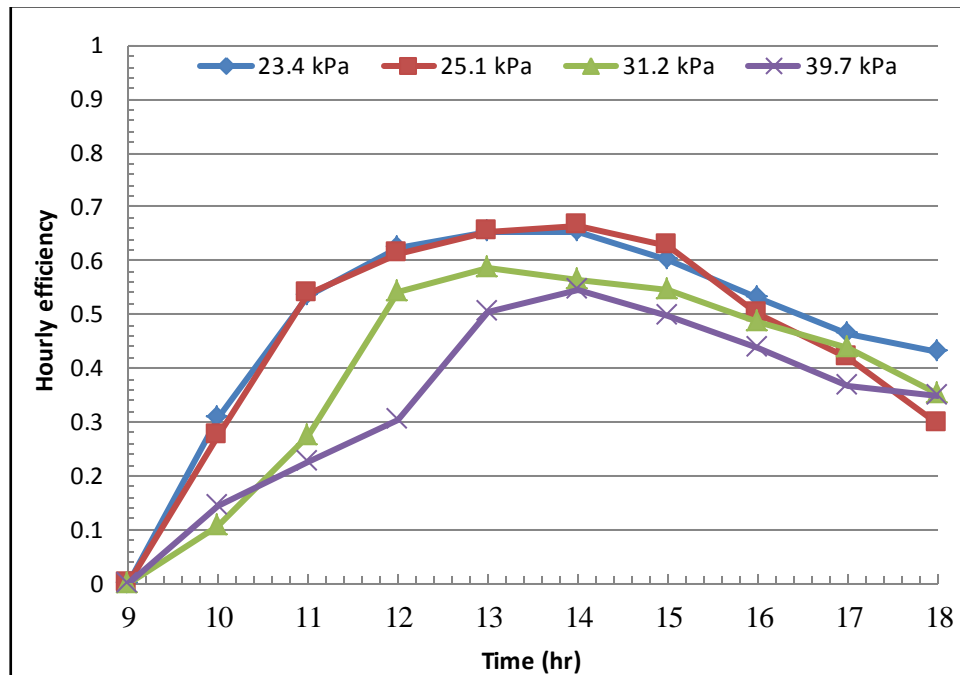
جدول ۳- فشار سیستم در فشارهای مختلف خلأ

Table 3. System pressure for different vacuum pressures

فشار سیستم (kPa)			فشار خلأ (inHg)
روز سوم	روز دوم	روز اول	
۲۴/۴	۲۳/۷	۲۳/۴	-۲۳
۲۶/۱	۲۵/۵	۲۵/۱	-۲۲/۵
۳۱/۹	۳۱/۷	۳۱/۲	-۲۰/۷
۴۱/۲	۴۰/۲	۳۹/۷	-۱۸/۲

تبخیر و متعاقباً به آب تولیدی بیشتر منجر گردد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که شدت تابش بیشتر، افزایش آب تولیدی و در نتیجه زیاد شدن راندمان را به دنبال دارد و با کاهش شدت تابش در ساعات بعدی، مقادیر آب تولیدی و راندمان ساعتی نیز کاهش می‌یابند.

در ادامه، راندمان ساعتی سیستم در نمودار ۵ در فشارهای یاد شده، مورد بررسی قرار گرفته است. با کاهش فشار سیستم (افزایش فشار خلأ)، راندمان سیستم در طول روز بالا می‌رود. افزایش فشار خلأ سبب می‌شود که فرآیند تبخیر در دمای پایین‌تر صورت گیرد و این به نوبه خود منجر به بالا رفتن نرخ



نمودار ۵- اثر فشارهای مختلف سیستم بر راندمان

Diagram 5. Effect of system pressure on hourly efficiency

روزه به ترتیب ۵۱/۳۵٪، ۵۲/۳۶٪ و ۵۲/۸۳٪ به دست آمده است و در حالت سه روزه در مقایسه با روز اول به میزان ۱/۴۷٪ افزایش داشته است.

راندمان سیستم در فشارهای متفاوت خلأ برای روزهای متوالی کاری در جدول ۴ ارائه شده است که در آن، راندمان در بیشترین فشار خلأ (۲۳ inHg-) در بازه‌های یک، دو و سه

جدول ۴- تغییرات راندمان در فشارهای مختلف در سه روز متوالی (آزمایش دوم)

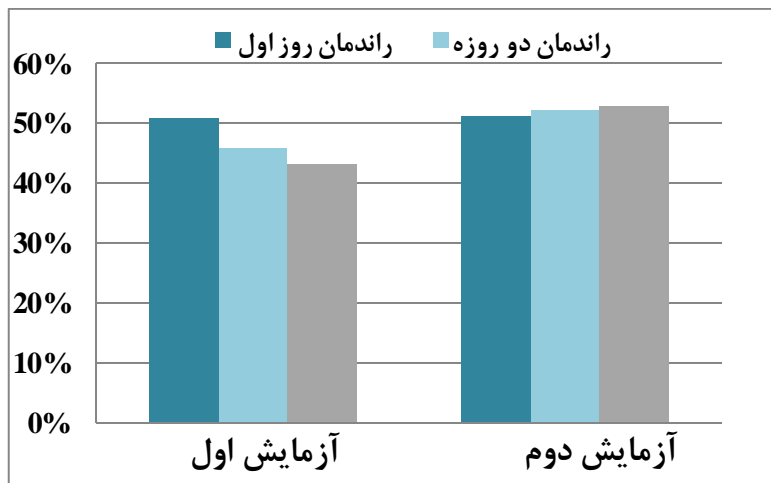
Table 4. Efficiency variation in different pressures in 3 consecutive days (2nd test)

راندمان (%)			فشار خلأ (فشار سیستم)
سه روزه	دو روزه	روز اول	
۵۲/۸۳	۵۲/۳۶	۵۱/۳۵	-۲۳ inHg (۲۳/۴ kPa)
۵۰/۹۲	۵۰/۸۵	۴۸/۵۷	-۲۲/۵ inHg (۲۵/۱ kPa)
۴۳/۷۹	۴۲/۷۷	۴۰/۶۲	-۲۰/۷ inHg (۳۱/۲ kPa)
۳۵/۴۳۷	۳۴/۹۳۳	۳۴/۹۲۸	-۱۸/۲ inHg (۳۹/۷ kPa)

کردن سیستم می‌توان در تعداد روزهای بیشتر از سه روز آب تولید کرد. نمودار ۶ نحوه تغییرات راندمان تجمعی در فشارهای بالا یعنی ۲۴ inHg- و ۲۳ inHg- به ترتیب در آزمایش اول و دوم را بیان می‌کند. علی‌رغم این که بیشترین فشار خلأ در آزمایش اول از آزمایش دوم بیشتر می‌باشد، راندمان سیستم در

محاسبه راندمان در این آزمایش نتایج قابل توجهی را ارائه می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بر خلاف آزمایش اول، در هر یک از فشارهای مورد آزمایش راندمان دو و سه روزه تغییرات اندکی داشته است که این موضوع نیز اثر بهبود اعمال شده در آزمایش دوم را نشان می‌دهد. به عبارتی، با یک بار خلأ

روز اول با نسبت ۱/۲٪ در آزمایش دوم افزایش یافته است که این موضوع نیز به نوبه خود نتیجه بهبود حاصل از تغییرات اعمال یافته در سیستم و در نهایت بهبود عملکرد سیستم را نشان می‌دهد.



نمودار ۶- مقایسه میزان تغییر راندمان در آزمایش اول و دوم

Diagram 6. A comparison of efficiency variation rate between 1st and 2nd tests

کلکتور لوله خلأ یافت. در مقایسه با کلکتورهای صفحه تخت در مطالعات پیشین، استفاده از این کلکتورهای لوله خلأ و پر کردن آنها از روغن سبب انتقال حرارت بهتر به آب شور و بیشتر شدن نرخ تبخیر شده است.

به منظور مقایسه سیستم مورد بررسی با سیستم‌های دیگر با روش خلأ طبیعی، بیشترین میزان آب تولیدی روزانه برای سیستم‌های مختلف NVD در جدول ۵ ارائه شده است. سیستم حاضر عملکرد بهتری در مقایسه با اکثر سیستم‌های NVD داشته است و علت این برتری را می‌توان در استفاده از

جدول ۵- مقایسه بیشترین میزان آب تولیدی روزانه در سیستم‌های مختلف NVD

Table 5. Comparison of maximum hourly and daily production for different NVD systems

میزان تولید آب (kg/m ² .day)	نوع بررسی	توصیف سیستم
۶/۶۷	نظری و تجربی	کلکتور صفحه تخت خورشیدی (۱۶)
۴	نظری و تجربی	کلکتور گرمایی فوتوولتائیک (۱۶)
۶/۳۵	نظری و تجربی	کلکتور صفحه تخت خورشیدی (۱۷)
۸/۱	تجربی	کلکتور صفحه تخت خورشیدی (۶)
۵/۵۶	نظری	کلکتورهای صفحه تخت خورشیدی و منبع ذخیره گرمایی (۱۸)
۱/۵	تجربی	تقطیر خورشیدی با استفاده مبدل حرارتی نوع خلأ (۱۹)
۱۵	نظری	خشک کننده پاششی خلأ با انرژی خورشیدی (۲۰)
۸/۱۱۴	تجربی	کلکتورهای خورشیدی لوله خلأ (سیستم حاضر)

بوده و هزینه آب تولیدی برای ۱۰ سال عملکرد سیستم در جدول ۶ ارائه شده است. با توجه به این که بخشی از انرژی مصرفی سیستم به صورت توان الکتریکی برای پمپ‌ها می‌باشد،

تحلیل اقتصادی سیستم نمک زدائی مذکور بر اساس پارامترهای مختلف انجام شده است (۲۱). هزینه سرمایه سیستم در آزمایش اول و دوم به ترتیب برابر \$ ۳۱۰ و \$ ۳۳۷

هزینه جاری بر اساس قیمت برق $0.03 \$/kWh$ برآورد شده است.

جدول ۶- تحلیل اقتصادی سیستم آب شیرین کن NVD مورد بررسی

Table 6. Economic analysis of the system

مقدار	واحد	پارامترها
۳۳۷	\$	هزینه‌های اصلی (P)
۶۷/۴	\$	ارزش بازیافتی ^۱ ($S=0.2 \times P$)
۱۰	سال	طول عمر سیستم (n)
۱۵	%	نرخ بهره ^۲ (i)
۰/۱۹۹۳	-	ضریب بازگشت سرمایه ^۳ (CRF)
۰/۰۴۹۳	-	ضریب وجوه استهلاکی ^۴ (SFF)
۶۷/۱۴۸	\$	هزینه اولیه سالیانه ^۵ ($FAC=CRF \times P$)
۳/۳۲۰	\$	ارزش استهلاک سالیانه ^۶ ($ASV=SFF \times S$)
۱۰/۰۷۲	\$	هزینه تعمیر و نگهداری سالانه ^۷ ($AMC=0.15 \times FAC$)
۱/۳۴۵	\$	هزینه جاری سالانه ($ACC=CC \times Power$)
۷۵/۲۴۶	\$	هزینه سالانه ($AC=FAC+AMC+ACC-ASV$)
۴۴۷/۱۸۳	L	میانگین تولید سالانه (۳۶۵ × میانگین تولید روزانه M)
۰/۱۶۸	\$/L	هزینه به ازای هر لیتر آب تولیدی شده ^۸ ($CPL=AC/M$)
۵۸۹۰	Rial/L	

- 1- Salvage Value
- 2- interest
- 3- Capital Recovery Factor
- 4- Sink Fund Factor
- 5- First Annual Cost
- 6- Annual Salvage Value
- 7- Annual Maintenance Cost
- 8- Cost per Liter

۲۳/۴ و ۳۹/۷kPa به ترتیب $8/114 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{day}$ و $4/14 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{day}$ به دست آمد.

پس از اصلاح سیستم، راندمان در بیشترین فشار خلأ به بیش از ۵۱٪ رسیده و راندمان دو و سه روزه در هر یک از فشارهای مورد آزمایش تغییر اندکی داشته است که این موضوع نشان داد که با یک بار خلأ کردن سیستم می‌توان در تعداد روزهای بیشتر از سه روز آب تولید کرد.

هزینه آب تولیدی بر حسب سطح واحد کلکتور خورشیدی در آزمایش دوم برابر $0/168 \text{ \$/lit}$ به دست آمده و در مقایسه با آزمایش اول با هزینه سرمایه $310 \text{ \$}$ که هزینه آب تولیدی آن $0/183 \text{ \$/lit}$ حاصل شده، کاهش یافته است. لازم به ذکر است که با توجه به این که هزینه اجزا، نرخ بهره و هزینه حامل انرژی در کشورهای گوناگون با یکدیگر تفاوت چشمگیری دارند، مقایسه هزینه آب تولیدی را در سیستم‌های مشابه دشوار می‌سازد.

Reference

1. Water for a sustainable world, 2015. The United Nations World Water Development Report
2. Shatat, M., Worall, M., Riffat, S., 2013. Opportunities for solar water desalination worldwide: Review. Sustainable Cities and Society Journal, Vol. 9, pp. 67-80
3. Gorjian, S., Ghabadian, B., 2015. Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 48, pp. 571-584
4. Li, Chennan., Goswami, Y., Stefanakos, E., 2013. Solar assisted sea water desalination: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews Journal, Vol. 19, pp. 136-163
5. Kalogirou, A., 2009. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Elsevier Academic Press.
6. Morad, M., El-Maghawry, H., Wasfy, K., 2017. A developed solar-powered desalination system for enhancing fresh water productivity. Sol. Energy Journal, Vol. 146, pp. 20-29
7. Bilgil, A., Hırlakoğlu, B., 2017. An experimental study on desalination at vacuum environment under low pressure and low condensation

بحث و نتیجه گیری

یک سیستم نمک زدائی خورشیدی با بهره بردن از پدیده خلأ طبیعی ستون آب به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. از کلکتورهای لوله خلأ به دلیل داشتن اتلافات کمتر نسبت به کلکتورهای صفحه تخت، عملکرد مناسب در شرایط بد آب و هوایی و همچنین افزایش هر چه بیشتر دمای آب استفاده شده است و درون آنها به منظور انتقال حرارت بیشتر با آب درون لوله‌های U شکل حاوی آب شور، از روغن استفاده شد. همچنین از یک پمپ و کیوم جهت ایجاد شرایط خلأ در ابتدای شروع به کار سیستم استفاده شده ولی در طول روز صرفاً از انرژی حرارتی خورشید جهت ادامه کار سیستم استفاده می‌شود. به علت ویژگی ترموسیفون، آب درون لوله U شکل و در نتیجه آب شور موجود در محفظه تبخیر گرم می‌شود. از این رو در طول روز، با گرم شدن آب شور درون محفظه تبخیر توسط انرژی خورشیدی و وجود خلأ در درون آن، آب شور شروع به تبخیر شدن می‌کند. افزایش فشار خلأ توسط پمپ خلأ نیز سبب می‌شود که فرآیند تبخیر در دمای پایین‌تر صورت گیرد و این به نوبه خود منجر به بالا رفتن نرخ تبخیر و متعاقباً به آب تولیدی بیشتر و بهبود عملکرد سیستم گردد. عملکرد سیستم در شرایط برای چهار فشار کاری و برای هر یک به مدت سه روز متوالی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده به صورت زیر می‌باشد:

افزایش میزان خلأ منجر به بهبود عملکرد سیستم گردید و بیشترین میزان آب تولیدی روزانه برای فشارهای داخلی kPa

- still equipped with an external heat storage system using phase change materials and heat pipes. *Desalination Journal*, vol. 409
16. Gude, V., Nirmalakhandan, N. 2008. Desalination Using Low-Grade Heat Sources. *Energy Engineering Journal*, Vol. 134, pp. 95-101.
 17. Eames, I.W., Maidment, G., Lazard, A., 2007. A theoretical and experimental investigation of a small-scale solar-powered barometric desalination system. *Applied Thermal Engineering Journal*. Vol. 27, pp. 1951–1959
 18. Gude, V. G., Nirmalakhandan, N., Deng, S., Maganti, A., 2012. Low temperature desalination using solar collectors augmented by thermal energy storage. *Applied Energy Journal*, Vol. 91, pp. 466-467
 19. Hosseini, A., Banakar, A., Gorjian, S. 2017. Development and performance evaluation of an active solar distillation system integrated with a vacuum-type heat exchanger. *Desalination Journal*, Vol 435, pp. 45-59
 20. Hamawand, I., Lewis, L., Ghaffour, N., Bundschuh, J., 2017. Desalination of salty water using vacuum spray dryer driven by solar energy. *Desalination Journal*, Vol. 404, pp. 182-191
 21. H. E. S. Fath, M. El-Samanoudy, K. Fahmy., A. Hassabou. 2003. Thermal-economic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations. *Desalination Journal*, 159, pp. 69–79.
 - temperatures. *Desalination Journal*, Vol 411, pp. 9-18
 8. Bemporad, G., 1995. Basic hydrodynamic aspects of a solar energy based desalination process. *Solar Energy Journal*, Vol. 54 ,pp. 125–134
 9. Midilli, A., Ayhan, T., 2004. Natural vacuum distillation technique—part I: theory and basics. *International Journal of Energy Research*, Vol. 28, no. 4, pp. 355–371
 10. Midilli, A., Ayhan, T. , 2004. Natural vacuum distillation technique—part II: theory and basics. *International Journal of Energy Research*, Vol. 28, no. 5, pp. 373–389
 11. Ambarita, H., 2016. Study on the performance of natural vacuum desalination system using low grade heat source. *Case Studies in Thermal Engineering Journal*, Vol. 8, pp. 346–358
 12. Al-Kharabsheh, S., Goswami, D., 2004. Theoretical analysis of a water desalination system using low grade solar heat. *Solar Energy Journal*. Vol. 126, no. 2, pp. 774–780
 13. Choi, S., 2017. Thermal type seawater desalination with barometric vacuum and solar energy. *Energy Journal*, Vol. 141, pp. 1332–1349
 14. Shafii, M. B., Shahmohamadi, M., Faegh, H. Sadrhosseini., 2016. Examination of a novel solar still equipped with evacuated tube collectors and thermoelectric modules. *Desalination*, vol. 382
 15. M Faegh., Shafii, M. B., 2017. Experimental investigation of a solar