

تحقیق آزمایشگاهی جهت بهبود بازدهی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی با استفاده از پارافین / اکسید گرافن

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران، goshayeshi1655@mshdiau.ac.ir
 دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران، sina.toosi18@gmail.com
 کارشناس ارشد، تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، ایران، sinaadibi93@mshdiau.ac.ir
 دانشجوی کارشناسی ارشد، تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، ایران

حمید رضا گشایشی*
 سید سینا ادیبی طوسی
 مهران رستمی
 احسان جعفری

چکیده

مطالعه حاضر با هدف استفاده از اکسید گرافن (GO) با غلظت حجمی با درصد وزنی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ در پارافین، به عنوان مواد تغییر فاز دهنده (PCM)، برای بهبود بهره‌وری آب شیرین کن خورشیدی متمرکز شده‌است. افزودن اکسید گرافن به پارافین، دمای ذوب را کاهش می‌دهد. آب شیرین کن که در آن از پارافین و اکسید گرافن استفاده شده‌است دارای ۲۵٪ فاکتور خنک کاری در مقایسه با آب شیرین کن خورشیدی می‌باشد که تنها با پارافین کار می‌کنند. عدد ناسلت بدست آمده در زمان ذوب بیانگر این است که انتقال گرمای جابجایی آزاد در منطقه ذوب آب شیرین کن با افزودن اکسید گرافن با درصد وزنی مناسب در PCM در مقایسه با حالتی که پارافین به تنهایی PCM استفاده شده‌است، افزایش یافته‌است. همچنین افزایش دمای دیواره بالایی که گرم‌تر است (T_{ih})، موجب افزایش عدد ناسلت می‌شود. در نهایت، یک معادله تجربی برای ارتباط میان عدد ناسلت متوسط به عنوان تابعی از عدد رایلی (Ra)، عدد استفان (Ste)، فاکتور سرمایش (Sb) و عدد فوریه (Fo) ارائه شده‌است. این رابطه نشان می‌دهد که افزایش عدد ناسلت رابطه معکوس با عدد فوریه دارد. واژه‌های کلیدی: آب شیرین کن خورشیدی، مواد تغییر فاز دهنده، مطالعه تجربی، اکسید گرافن

Experimental investigation for improving of stepped solar still efficiency by using paraffin / graphene oxide

H. R. Goshayeshi
 S. S. Adibi Toosi
 M. Rostami
 E. Jafari

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Mashhad, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Mashhad, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Mashhad, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Mashhad, Iran

Abstract

The aim of this study is to use graphene oxide (GO) with a volumetric concentration of 0.2, 0.4 and 0.6 in paraffin as phase change material (PCM) to improve the efficiency of solar desalination for concentrated water desalination programs. The results show that by adding graphene oxide to paraffin, the melting temperature decreases. The solar desalination, which uses paraffin and graphene oxide, has a 25% improvement in sub cooling factor compare to solar desalination, which only works with phase change materials. The Nusselt number obtain during melting also suggests that the free heat transfer in the melting zone of the solar still by adding graphene oxide with a suitable weight percentage in the phase change material compare with that in which paraffin alone is used as a phase change material has been increased. Also, increasing the temperature of the upper hot wall (T_{ih}) increases the Nusselt number. Finally, an empirical equation for the relationship between the average Nusselt number as a function of Rayleigh number (Ra), Stefan number (Ste), cooling factor (Sb) and Fourier number (Fo) is presented. The obtain formula shows that increasing the Nusselt number has an inverse relationship with the Fourier number.

Keywords: Solar still, Phase change material, Experimental study, Graphene oxide.

نهان قابل توجهی که دارا می باشد، به عنوان یکی از PCM های مهم آینده شناخته شده است [۳]. همچنین توسط [۴] در سال ۲۰۱۸ کارهای آزمایشگاهی بر روی مواد تغییر فاز دهنده صورت گرفته است. یک شبیه سازی عددی برای فرآیند ذوب مواد تغییر فاز دهنده در داخل لوله های افقی توسط [۵] صورت گرفته است و در یک مدل ریاضی گچکاران و همکاران [۶] به شبیه سازی یک آب شیرین کن تک حوضچه‌ای همراه با PCM در زیر آن با استفاده از مدل ژنتیک پرداختند. آنها از واکس پارافین به عنوان PCM استفاده کردند و نتیجه گرفتند هرچه PCM رسانایی گرمایی بالاتری داشته باشد، میزان تولید آب بیشتر خواهد بود و تولید آب شیرین کن را با استفاده از این روش بهبود بخشیدند. خسروجردی و همکاران [۷] نیز استفاده از نانوسیال

۱- مقدمه

در طول دهه‌های اخیر، مواد تغییر فاز دهنده (PCM) ها در سیستم‌های انتقال گرما از قبیل آب شیرین کن های خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱]. یک کار آزمایشگاهی ترکیبی به وسیله فایق و شافعی بر روی آب شیرین کن‌های خورشیدی و لوله‌های گرمایی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده صورت گرفته شده‌است [۲]. در تحقیقاتی که صورت گرفته است نشان داده شده است که مواد تغییر فاز دهنده به صورت انوتکتیک، ارگانیک و غیر ارگانیک طبقه بندی می‌شوند. در میان انواع PCM های پیشنهادی، پارافین که یک ماده تغییر فاز دهنده ارگانیک است به علت مشخصات مورد نظر خود مانند گرمایی

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: goshayeshi1655@mshdiau.ac.ir

اکسید گرافن در گردآوره‌های خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند که دریافتند با استفاده از این نانوسیال بر پایه آب دی‌نیزه راندمان گردآور ۷۵/۰۷ درصد خواهد بود در حالی که راندمان دستگاه برای سیال پایه تنها ۵۸/۲۵ بوده است. همچنین، کومار و همکاران [۸] میزان تولید یک آب شیرین کن خورشیدی سنتی را با استفاده از پارافین و اتصال تعدادی پره افزایش دادند. نتایج آنها نشان داد که بازده انرژی روزانه و شبانه آب شیرین کن خورشیدی اصلاح شده به ترتیب ۰/۲۰٪ و ۰/۷۴٪ افزایش یافته است.

گرچه بعضی از تحقیقات بر افزایش انتقال گرما در نانوسیالات با افزودن نانومواد بیشتر به مایع پایه متمرکز شده‌اند، مطالعه حاضر با هدف استفاده از "پارافین / اکسید گرافن" با غلظت حجمی به میزان پراکندگی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ درصد برای بهبود بازده آب شیرین کن خورشیدی متمرکز شده است. نتیجه این تحقیقات می‌تواند برنامه‌های کاربردی را برای ایجاد صفحات خورشیدی بسیار کارآمد برای تامین آب آشامیدنی بیشتر در زمین‌های گرم و خشک پیدا کند.

۲- طراحی تجربی

۲-۱- خواص ترموفیزیکی

موم پارافین (کاربرد صنعتی) خریداری شده از شرکت مرک آلمان، با دمای ذوب ۴۴ درجه سلسیوس به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است. همچنین نانو ذره اکسید گرافن برای اطمینان از US Research Nanomaterials Inc. خریداری شده است تا به عنوان یک افزودنی برای ماده تغییر فاز دهنده برای بهبود عملکرد حرارتی آن مورد استفاده قرار گیرد. خواص حرارتی ماده تغییر فاز دهنده و اکسید گرافن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- خواص حرارتی PCM و اکسید گرافن [۱۵]

خواص ترمودینامیکی	پارافین	اکسید گرافن
چگالی (kg/m ³)	802	3600
گرما ویژه (J/kg K)	2320 (مایع)	765
رسانایی گرمایی (W/m K)	23/0 (مایع)	3000
لزجت دینامیکی (kg/m s)	۰/0013	-
ضریب انبساط گرمایی (1/K)	00091/0	000125/0
گرمای نهان (kJ/kg)	226	-
دمای ذوب (°C)	44	-

خواص ترموفیزیکی Nano-PCM می‌تواند با استفاده از معادلات زیر محاسبه شود: [۹]

$$\rho_{np\text{cm}} = \phi \rho_{np} + (1 - \phi) \rho_{pcm} \quad (1)$$

$$c_{p,np\text{cm}} = \frac{\phi(\rho c_p)_{np} + (1-\phi)(\rho c_p)_{pcm}}{\rho_{np\text{cm}}} \quad (2)$$

$$h_{f,g,np\text{cm}} = \frac{(1-\phi)(\rho h_{f,g})_{pcm}}{\rho_{np\text{cm}}} \quad (3)$$

لزجت دینامیکی Nano-PCM را می‌توان با رابطه زیر به دست آورد [۱۰، ۱۱]

$$\mu_{np\text{cm}} = 0.983e^{12.959\phi} \mu_{pcm} \quad (4)$$

رسانایی گرمایی Nano-PCM، با توجه به حرکت براونی، به صورت زیر تعریف شده است [۱۲]:

$$k_{np\text{cm}} = \frac{k_{np} + 2k_{pcm} - 2(k_{pcm} - k_{np})\phi}{k_{np} + 2k_{pcm} + 2(k_{pcm} - k_{np})\phi} k_{pcm} + 5 \times 10^4 \beta_k \zeta \phi \rho_{pcm} c_{p,np\text{cm}} \sqrt{\frac{BT}{\rho_{np} d_{np}}} f(T, \phi) \quad (5)$$

در این جا β ثابت بولتزمن است، 1.381×10^{-23} J/K و $\beta_k = 8.4407(100\phi)^{-1.07304}$

$$\beta = 0 \quad \text{if } T < T_{solidus} \quad (6)$$

$$\beta = 1 \quad \text{if } T < T_{liquidus}$$

ζ فاکتور تصحیح می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود: [۱۹]

$$\zeta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \quad \text{اگر } T_{solidus} < T_{liquidus} \quad (7)$$

یک تابع می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود: [۱۳]

$$f(T, \phi) = (2.8217 \times 10^{-2} \phi + 3.917 \times 10^{-3}) \frac{T}{T_{ref}} + (-3.0669 \times 10^{-2} \phi - 3.91123 \times 10^{-3}) \quad (8)$$

۲-۲- آماده سازی نانوکامپوزیت

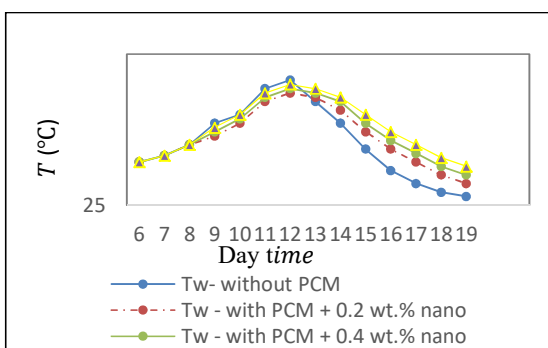
صفحه سیاه به وسیله تابش در طول روز حرارت دریافت می‌کند. در نتیجه، این گرما به پارافین / اکسید گرافن منتقل خواهد شد. مطالعه حاضر با تمرکز بر استفاده از اکسید گرافن (GO) با پراکندگی درصد وزنی به میزان ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ به پارافین ذوب شده در دمای ۴۵ درجه سلسیوس، به عنوان مواد تغییر فاز (PCM)، به منظور بهبود بهره وری یک آب شیرین کن خورشیدی انجام شده است. مخلوط کردن پارافین با نانو ذره برای ۲ ساعت با استفاده از برق ۰/۹۵٪ به طور متناوب برای جلوگیری از گرمای بیش از حد نانوسیال انجام می‌شود. در طول روز، به خصوص پس از ۲ صبح، پارافین شروع به ذوب شدن می‌کند و دمای آن تا زمانی که ذوب شدن کامل باشد ثابت باقی می‌ماند. پس از ساعت ۷ صبح، پارافین شروع به خنک شدن می‌کند، اما دمای آن تا زمانی که تمام پارافین جامد شود، ثابت باقی می‌ماند. سپس تا دمای محیط خنک می‌شود. در طول روز، زمانی که از پارافین در سیستم استفاده نمی‌گردد، دمای آب بالا است، اما بعد از ۷ صبح، T_w PCM بالاتر است. یک لایه نازک از پارافین / گرافن اکسید در زیر آب شیرین کن تشکیل شده است تا بهره وری آب شیرین کن خورشیدی را در طول شب افزایش دهد.

۲-۳- دستگاه تجربی

شکل ۱ طرح کلی آب شیرین کن خورشیدی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نصب آزمایشی شامل دو بخش، یک آب شیرین کن خورشیدی و یک مخزن رسوب زدایی است. آب شیرین کن خورشیدی بخش اصلی آزمایش است و مخزن رسوب زدایی برای از بین بردن هر گونه باکتری ممکن استفاده می‌شود. این مخزن رسوب زدایی از ورق‌های گالوانیزه با قطر ۵۰ سانتی متر و ارتفاع ۶۰ سانتی متر ساخته شده است. برای افزایش سطح تماس، سه پره مستطیلی ($1 \times 80 \times 40$ میلی متر) در پایین حوضچه مخزن جوش داده می‌شوند. قسمت انجام تست شامل یک صفحه جاذب پله‌ای که بر روی یک پایه فلزی نصب شده است، می‌باشد. صفحه جاذب از ورق گالوانیزه ضخامت ۱ میلی‌متر و

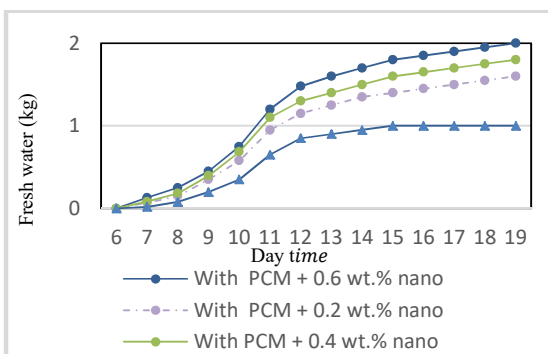
۳- نتایج و بحث

تحقیقات تجربی برای بررسی عملکرد حرارتی "PCM/ اکسید گرافن" در آب شیرین کن خورشیدی انجام شده است. در طول روز، انرژی خورشیدی بین آبی، که ما می‌خواهیم تقطیر کنیم، و "PCM/ اکسید گرافن" تقسیم می‌شود. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، دمای آب بدون PCM از ۹ صبح تا ۱۲ صبح میزان بیشتری می‌باشد، زیرا در این زمان، بخشی از انرژی خورشیدی در PCM ذخیره می‌شود. پس از آن و برای مورد بدون PCM، دما به شدت کاهش یافت اما درجه حرارت برای آب شیرین کن خورشیدی با پارافین به تدریج کاهش یافته است. این بدان دلیل است که انرژی ذخیره شده در PCM زمانی که خورشید غروب می‌کند آزاد می‌شود. اضافه کردن نانو مواد بیشتر به PCM پایه موجب افزایش دما برای مدت زمانی از ۲ صبح تا ۷ صبح می‌گردد.



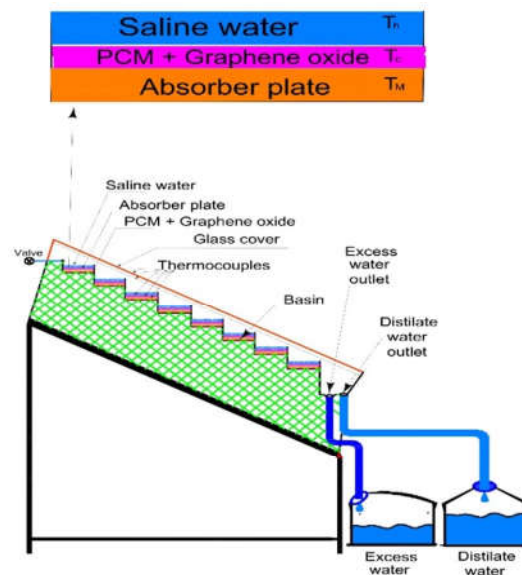
شکل ۲- مقادیر دما در حضور و عدم وجود PCM و "PCM/اکسید گرافن"

شکل ۳، آب تازه تولید شده در روز را نشان می‌دهد. این رقم نشان می‌دهد که اضافه کردن GO به پارافین سبب تولید بیشتر آب شیرین می‌شود که نشان دهنده افزایش کارایی آب شیرین کن خورشیدی است. دلیل این پدیده مربوط به توانایی "PCM/اکسید گرافن" برای ایجاد گرمایش حوضچه گرمایش آب است که به این معنی است که آب بیشتری می‌تواند تقطیر شود. همچنین با استفاده از انرژی که توسط نانو PCM در خلال غروب خورشید آزاد می‌شود، تولید آب مقطر ادامه می‌یابد. تمام این دلایل موجب تولید حداکثری در پایان روز شده‌اند که باعث افزایش ۱۰٪ در تولید آب شیرین می‌شود.

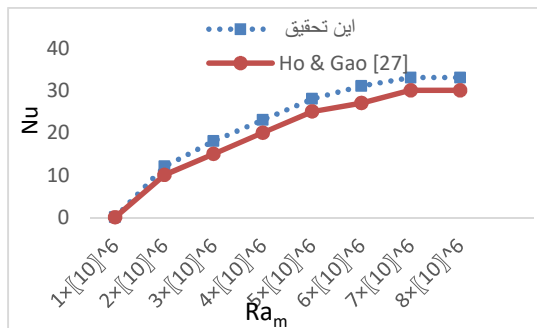


شکل ۳- میزان تولید آب شیرین در حضور و عدم وجود PCM و "PCM/اکسید گرافن"

طول ۱۳۰۰ میلی‌متر و عرض ۱۰۰۰ میلی‌متر ساخته شده است که با رنگ سیاه رنگ شده است. شکاف بین پانل جاذب پله‌ای و جعبه با استفاده از فوم پلی اورتان (PUF) برای جلوگیری از اتلاف حرارت از اطراف و زیر دستگاه پوشانده شده است. پوشش شیشه‌ای دارای ضخامت ۴ میلی‌متر است. بخار روی سطح شیشه داخلی قرار گرفت و قطرات در امتداد شیشه سر می‌خورند. آب جمع‌آوری شده به مخزن آب مقطر که در پایین دستگاه قرار دارد ریخته می‌شود و در یک ظرف جمع‌آوری می‌شود. این عمل توسط یک لوله که در کنار دستگاه نصب شده است، انجام می‌شود. آب تصفیه شده، با باز کردن یک شیر میزان آب جمع شده به صورت ثابت نگه داشته می‌شود هر ۳۰ دقیقه دوباره پر شده است. آب تصفیه نشده مازاد که از طریق صفحات جاذب تبخیر نشده است به سمت مخزن اولیه جریان می‌یابد. قابل توجه است که یکی از عواملی که بر میزان تولید تأثیر می‌گذارد، زاویه انحراف است که تابعی از عرض جغرافیایی، زاویه تابش خورشید و فصول سال است [۱۴]. به عنوان یک قاعده کلی، زاویه برابر با عرض جغرافیایی در نظر گرفته می‌شود [۱۵]. شهر مورد مطالعه مشهد، دارای طول جغرافیایی ۵۹/۶۱ درجه و عرض جغرافیایی ۳۶/۲۶ درجه می‌باشد [۱۶]. مناسب‌ترین جهت نصب پانل‌های خورشیدی که به صورت ثابت مستقر هستند، در نیمکره شمالی، دستگاه باید به سمت جنوب نصب شود؛ تا انرژی خورشیدی بتواند بهترین بهره برداری را داشته باشد. آزمایش‌ها از ساعت ۸ صبح تا ۶ صبح انجام می‌شود، در طول جولای ۲۰۱۸ تا اوت ۲۰۱۸. برای اندازه‌گیری دمای صفحه جاذب (T_p)، دمای سطح داخلی شیشه (T_{gi}) و دمای واحد آب شیرین (T_w)، سه ترموکوپل متفاوت نصب شد. برای نظارت بر دمای تبخیرکننده و دمای قسمت تقطیر، مجموعه‌ای از ترموکوپل های K-type استفاده شد که به یک دستگاه ثبت اطلاعات قابل حمل متصل می‌باشد. دمای محیط، دمای حوضچه، دمای محلول و دمای شیشه و همچنین میزان تابش خورشید و میزان تولید آب مقطر هر ۱ ساعت اندازه‌گیری می‌گردد.



شکل ۱- طرحواره آب شیرین کن خورشیدی



شکل ۵- میزان تولید آب شیرین در حضور و عدم وجود PCM و "PCM/اکسید گرافن"

مقایسه کار توسط Ho و Gao [۲۰] برای نانو اکسید آلومینیوم مخلوط شده با پارافین (Al₂O₃/paraffin Nano) که فرمول شماره ۱۵ را ارائه کرده اند با کار این تحقیق که با نانو اکسید گرافن مخلوط شده با پارافین (Al₂O₃/paraffin Nano) با توجه به فرمول ۱۵ را نشان می-دهد. شکل ۵ نشان می-دهد که ترکیب نانو اکسید گرافن مخلوط شده با پارافین در مقایسه با نانو اکسید آلومینیوم مخلوط شده با پارافین دارای بازدهی بیشتری می باشد و این افزایش بازدهی در ساعات ۱۳ تا ۱۷ به بالاترین مقدار خود می رسد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، نانو ماده اکسید گرافن با ۰.۲ wt.%، ۰.۴ wt.% و ۰.۶ wt.% در "پارافین/اکسید گرافن" پراکنده شده‌اند و در آب شیرین کن خورشیدی به کار می‌روند. بر اساس نتایج، نکات زیر به صورت خلاصه مطرح می‌گردد:

۱. بازده آب شیرین کن خورشیدی با "پارافین/اکسید گرافن" به طور متوسط ۲۵٪ در مقایسه با آب شیرین کن خورشیدی که تنها با PCM عمل می‌کند بهره وری بیشتری را دارا می‌باشد.
۲. بازده روزانه آب شیرین کن خورشیدی با مواد تغییر فاز دهنده میزان ۲ kg / 0.4 m² بود در حالی که آب شیرین کن خورشیدی با wt Φ = 0.6 "پارافین/اکسید گرافن" 2.5 kg / 0.4m² بود.
۳. اضافه کردن اکسید گرافن بیشتر به مواد تغییر فاز دهنده موجب افزایش عدد ناسلت و بالتبع افزایش ضریب انتقال گرما گردید، که به معنی پتانسیل بالای آن برای کاهش قابل توجه در زمان گرمادهی می-باشد. همانطور که مشخص است، نمونه‌هایی که حاوی ۲/۰ wt % نانو مواد بودند، حداقل میزان ذخیره انرژی را در طول تغییر فاز از خود نشان دادند.
۴. در کاربردهای خورشیدی استفاده از پارافین با وجود نانو ذره اکسید گرافن با میزان پراکندگی مناسب، در مقایسه با مواد تغییر فاز دهنده پایه دارای بهره وری و بازده بیشتری می باشد.
۵. همچنین یک معادله تجربی بدست آمد به طوری که عدد ناسلت متوسط را به صورت تابعی از عدد رایلی، عدد استفان، عدد فوریه و فاکتور خنک کاری نشان داده‌است.

شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت متوسط را در دیواره گرم، زمانی که سطح سرد زیرین ۲۳ درجه سلسیوس است نشان می‌دهد. همان‌طور که واضح است، عدد ناسلت به همان روند تحقیقات قبلی تمایل دارد [۱۷]. اضافه کردن بیشتر اکسید گرافن به پارافین پایه باعث افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود. که دلیل آن افزایش هدایت حرارتی توسط مواد تغییر فاز دهنده، با پراکنده شدن نانو مواد در آنها است. همچنین، افزایش عدد فوریه، عدد ناسلت متوسط را کاهش می‌دهد. عدد ناسلت متوسط بر اساس روابط اخیر [۱۸، ۱۹] می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\overline{Nu} = 0.18 \left(\frac{Pr}{0.2+Pr} Ra \right)^{0.29} \quad (9)$$

همچنین ضریب انتقال گرما از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu} km}{H} \quad (10)$$

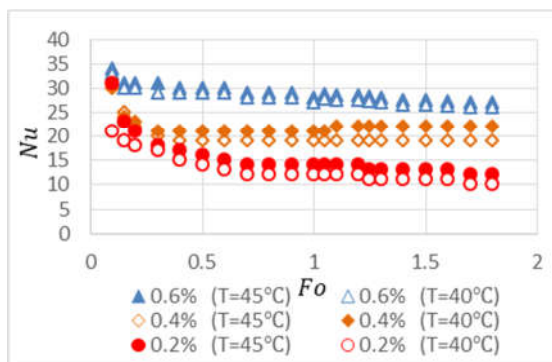
عدد رایلی و عدد استفان را می‌توان بر اساس تفاوت دما در منطقه ذوب و مشخصات طولی از آب شیرین کن خورشیدی تعریف کرد [۲۰]:

$$Ra_f = \frac{g \rho_f^2 c_{p,f} \beta_f (T_h - T_c) H^3}{k_f \mu_f} \quad (11)$$

$$Ra_m = \frac{g \rho_f^2 c_{p,f} \beta_f (T_h - T_c) H^3}{k_m \mu_m} \quad (12)$$

$$Ste_f = \frac{c_{p,f} (T_h - T_c)}{h_{ls,f}} \quad (13)$$

$$Ste_m = \frac{c_{p,m} (T_h - T_c)}{h_{ls,m}} \quad (14)$$



شکل ۶- تاثیر دما دیواره گرم بر عدد ناسلت متوسط

در مرحله نهایی، یک رابطه تجربی با توجه به نتایج تجربی کسب شده برای ارتباط میان عدد ناسلت متوسط با عدد رایلی (Ra)، عدد استفان (Ste)، فاکتور خنک کاری (Sb) و عدد فوریه (Fo) با استفاده از فرمول زیر بدست آمده‌است:

$$\overline{Nu} = a Ra_m^b \left[\frac{Ste_m Fo_m}{(1+Sb)} \right]^c \quad (15)$$

این فرمول مشابه به رابطه‌ای است که توسط Ho و Gao [۲۷] برای Al₂O₃/paraffin Nano-PCM گزارش نمودند. برای به دست آوردن متغیرهای ثابت معادله، یک مجموعه داده برای محاسبه متغیرها با استفاده از Microsoft Excel استفاده شده‌است. روش رگرسیون حداقل مربع برای به دست آوردن مقادیر همبستگی بر اساس نقاط داده‌ها به کار گرفته شد.

- [18] Ho C.J. and Gao J.Y., An experimental study on melting heat transfer of paraffin dispersed with Al_2O_3 nanoparticles in a vertical enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 62, pp. 2-8, 2013.
- [19] Bergman T.L., Incropera F.P., DeWitt D.P. and Lavine A.S., *Fundamentals of heat and mass transfer*; John Wiley & Sons: 2011.
- [20] Ho C.J. and Gao J.Y., An experimental study on melting heat transfer of paraffin dispersed with Al_2O_3 nanoparticles in a vertical enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 62, pp. 2-8, 2013.
- [1] Asbik M., Ansari O., Bah A., Zari N., Mimet A. and El-Ghetany H., Exergy analysis of solar desalination still combined with heat storage system using phase change material (PCM). *Desalination*, Vol. 381, pp. 26-37, 2016.
- [2] Faegh M. and Shafii M.B., Experimental investigation of a solar still equipped with an external heat storage system using phase change materials and heat pipes. *Desalination*, Vol. 409, pp. 128-135, 2017.
- [3] Safari A., Saidur R., Sulaiman F., Xu Y. and Dong J., A review on supercooling of Phase Change Materials in thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, pp. 905-919, 2017.
- [4] Zhou Q., Liu P.-F., Tzeng C.-T. and Lai C.-M., Thermal Performance of Microencapsulated Phase Change Material (mPCM) in Roof Modules during Daily Operation. *Energies*, Vol. 11, pp. 679, 2018.
- [5] Li S., Chen Y. and Sun Z., Numerical simulation and optimization of the melting process of phase change material inside horizontal annulus. *Energies*, Vol. 10, pp. 1249, 2017.
- [۶] گچکاران آ. و جدا ف.، "طراحی و بهینه‌سازی آب‌شیرین کن خورشیدی با ذخیره‌سازی انرژی گرمایی به کمک مواد تغییر فاز دهنده"، *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۹، ش. ۱، ص. ۲۳۵-۲۴۴، ۱۳۹۸.
- [۷] خسروچردی س.، میر عب آب دیونیزه بر عملکرد یک گردآورنده جذب مستقیم خورشیدی"، *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۸، ش. ۱، ص. ۱۶۹-۱۷۷، ۱۳۹۷.
- [8] Kumar T.S., Jegadheeswaran S. and Chandramohan P., Performance investigation on fin type solar still with paraffin wax as energy storage media. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 136, pp. 101-112, 2019.
- [9] Li M., A nano-graphite/paraffin phase change material with high thermal conductivity. *Applied Energy*, Vol. 106, pp. 25-30, 2013.
- [10] Sheikholeslami M., Numerical modeling of nano enhanced PCM solidification in an enclosure with metallic fin. *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 259, pp. 424-438, 2018.
- [11] Vajjha R.S., Das D.K. and Namburu P.K., Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al_2O_3 and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator. *International Journal of Heat and fluid flow*, Vol. 31, pp. 613-621, 2010.
- [12] Mahdi J.M. and Nsofor E.C., Solidification of a PCM with nanoparticles in triplex-tube thermal energy storage system. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 108, pp. 596-604, 2016.
- [13] Arasu A.V. and Mujumdar A.S., Numerical study on melting of paraffin wax with Al_2O_3 in a square enclosure. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 8-16, 2012.
- [14] Shukla A.K., Sudhakar K. and Baredar P., Design, simulation and economic analysis of standalone roof top solar PV system in India. *Solar Energy*, Vol. 136, pp. 437-449, 2016.
- [15] Sint N.K.C., Choudhury I., Masjuki H.H. and Aoyama H., Theoretical analysis to determine the efficiency of a CuO-water nanofluid based-flat plate solar collector for domestic solar water heating system in Myanmar. *Solar Energy*, Vol. 155, pp. 608-619, 2017.
- [16] Kermani M., Goudarzi G., Shahsavani A., Dowlati M., Asl F.B., Karimzadeh S., Jokandan S.F., Aghaei M., Kakavandi B. and Rastegarimehr B., Estimation of short-term mortality and morbidity attributed to fine particulate matter in the ambient air of eight Iranian cities. *Annals of Global Health*, Vol. 84, 2018.
- [17] Sampathkumar K. and Senthilkumar P., Utilization of solar water heater in a single basin solar still—An experimental study. *Desalination*, Vol. 297, pp. 8-19, 2012.