



Modeling the Effect of Phase Change Materials on Water Temperature and Vaporization Rate of Evaporation Ponds

H. Peyrovedin^{1*}, A. Razmjooie²

1- Assistant Professor of Chemical Engineering, Natural Gas Engineering Department, School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

2- Ph. D. in Chemical Engineering, South Zagros Oil and Gas Production

Email: hamedpeyro@saadi.shirazu.ac.ir

Abstract

The management of petroleum wastewater with the aim of protecting the environment in the process of oil and gas extraction is one of the most important actions that has received special attention in recent years. The release of petroleum effluents into the environment causes harmful chemicals to enter nature and motive irreparable damage to the environment. One of the most common methods for separating these chemicals from wastewater is using evaporation ponds, which perform the separation process with the help of water evaporation. However, several factors such as rainfall and lack of access to solar energy have negative effects on the efficiencies of these evaporation ponds. Accordingly, considering the importance of petroleum wastewater management, the purpose of this research is to study the effect of using phase change materials on the amount of evaporated water and the water temperature of the evaporation ponds. For this purpose, initially, the temperature changes of wastewater of one of the refineries are modeled by applying the energy balance in the pond. Then, by adding a tank containing a phase change material in the evaporation ponds, the temperature changes of the effluent are re-examined with new equations. By comparing the modeling results in these two cases, it was found that by adding a tank containing C33 paraffin (as a phase change material) into the pond, 735 kg of the fluid will be evaporated during the night compared to the normal state. Additionally, it was found that if a copper fin is used on the tank, the heat transfer can be increased up to 10 times.

Received: 28 May 2023

Accepted: 2 September 2023

Page Number: 17-31

Keywords:

Renewable Energy,
Phase Change Materials,
Evaporation Ponds,
Modeling,
Optimization

Please Cite this Article Using:

Peyrovedin, H., & Razmjooie, A. (2024). Modeling the Effect of Phase Change Materials on Water Temperature and Vaporization Rate of Evaporation Ponds. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(135), 17-31, [In Persian].



مدلسازی تأثیر مواد تغییر فاز دهنده بر دما و میزان تبخیر آب حوضچه‌های تبخیری

حامد پیرو دین^{۱*}، افشین رزمجوئی^۲

۱- استادیار مهندسی شیمی، بخش مهندسی گاز، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- دکتری مهندسی شیمی، شرکت بهره‌برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی

پیام نگار: hamedpeyro@saadi.shirazu.ac.ir

چکیده

مدیریت پساب‌های نفتی با هدف حفاظت از محیط زیست در فرایند استخراج نفت و گاز، یکی از مهم‌ترین اقداماتی است که در سال‌های اخیر، بدان توجه ویژه شده است. رهاسازی پساب‌های نفتی در محیط زیست، باعث ورود مواد شیمیایی مضر به طبیعت می‌شود و ضررهای جبران‌ناپذیری را به محیط زیست وارد می‌کند. یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای جداسازی این مواد شیمیایی از پساب، استفاده از حوضچه‌های تبخیر است که با کمک تبخیر آب، عمل جداسازی را انجام می‌دهد. عوامل متعددی مانند بارش باران و عدم دسترسی به انرژی خورشیدی، بر روی کارایی این حوضچه‌های تبخیر تأثیر منفی می‌گذارد. بر همین اساس و با توجه به اهمیت موضوع مدیریت پساب‌های نفتی، هدف این تحقیق، مطالعه تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بر روی میزان آب تبخیر شده و دمای آب درون حوضچه‌های تبخیر است. برای این منظور، در ابتدا، تغییرات دمایی پساب یکی از پالایشگاه‌ها با اعمال موازنه انرژی در درون حوضچه مدلسازی می‌شود. سپس با اضافه کردن مخزن حاوی ماده تغییر فاز دهنده در حوضچه‌های تبخیر، تغییرات دمایی پساب با کمک معادلات جدید حاکم‌بر مسئله، از نو بررسی می‌شود. با مقایسه نتایج مدلسازی در این دو حالت، مشخص شد که با اضافه کردن یک مخزن حاوی پارافین C33 (به عنوان ماده تغییر فاز دهنده) به درون حوضچه، ۷۳۵ کیلوگرم سیال بیشتری در طول شب نسبت به حالت عادی تبخیر می‌شود. علاوه بر این، مشخص شد که در صورت استفاده از پره با جنس مس بر روی مخزن، انتقال حرارت می‌تواند تا ۱۰ برابر افزایش یابد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۱

شماره صفحات: ۱۷ تا ۳۱

کلیدواژه‌ها:

انرژی تجدیدپذیر،

مواد تغییر فاز دهنده،

حوضچه‌های تبخیر،

مدلسازی،

بهینه‌سازی

* شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، بخش مهندسی گاز

استناد به مقاله:

پیرودین، حامد، و رزمجوئی، افشین. (۱۴۰۳). مدلسازی تأثیر مواد تغییر فاز دهنده بر دما و میزان تبخیر آب حوضچه‌های تبخیری، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۳ (۱۳۵)، ۳۱-۱۷.

در فرایند استخراج نفت و گاز از مخازن زیرزمینی، آب و دیگر ترکیبات (پساب) به همراه نفت و گاز به سطح زمین می‌آید و جداسازی این مواد از ترکیبات هیدروکربنی و تصفیه پساب به عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات صنعتی و زیست‌محیطی به‌شمار می‌آید. این مواد که بیشتر تحت عنوان پساب شناخته می‌شوند از مواد مختلفی هم‌چون آب، انواع نمک، ترکیبات شیمیایی و هیدروکربن‌های همراه تشکیل می‌شود. جداسازی این ترکیبات همواره در اولین مراحل انجام می‌گیرد [۱]. تصفیه نادرست و غیر اصولی پساب و رهاسازی آن در طبیعت می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری به محیط زیست بزند؛ بر همین اساس و باتوجه‌به اهمیت نگهداری و حفاظت از محیط زیست، کنترل و مدیریت پساب‌های نفتی، از مهم‌ترین بحث‌های موجود در صنایع نفت و گاز کشور است [۲].

در سال‌های گذشته، از شیوه‌های گوناگونی از جمله روش‌های مکانیکی مانند استفاده از فیلتر و سانتریفیوژ مواد پساب، استفاده از میدان الکتریکی، اسمز معکوس، الکترودیالیز و تبادل یونی برای جداسازی آب از پساب نفتی استفاده شده است [۷-۱]. یکی از مشکلات این روش‌ها را می‌توان هزینه بالای آن‌ها دانست. هم‌چنین از آنجایی‌که این فرایندها به‌صورت گسترده در صنعت استفاده نشده، نمی‌توان در مورد نتیجه آن در حجم‌های بالای پساب نفت، دقیق نتیجه‌گیری کرد. به‌عنوان مثال، روش‌های برپایه جداسازی غشایی بیشتر برای سامانه‌های محلول آب و نفت که در آن اندازه قطرات نفتی کمتر از ۴۰ میکرون است، استفاده می‌شوند و هم‌چنین، برای مناطق نفتی با حجم تولید بالا، به‌غشا با سطح بسیار زیادی نیاز است که بر پر هزینه بودن این فرایند اشاره دارد [۸]. از دیگر روندهای مربوطه فرایند جداسازی آب از پساب‌ها، می‌توان به تأسیس تصفیه‌خانه پساب‌های نفتی در پالایشگاه‌ها اشاره کرد [۹] که این روش نیز باتوجه‌به ضرورت در تأسیس یک واحد جدید برای تصفیه پساب، می‌تواند هزینه‌بر باشد.

از متداول‌ترین روش‌های جداسازی که در واحدهای عملیاتی استفاده می‌شود، استفاده حوضچه‌های تبخیری است. این فرایند که یکی از ارزان‌ترین شیوه‌ها برای جداسازی آب است، با استفاده از تبخیر آب، عمل جداسازی را انجام می‌دهد [۲] اما عواملی چون

بارندگی شدید، افزایش آبدهی چاه‌ها، کاهش سرعت تبخیر به دلایل جوی و آب‌وهوایی، وقوع زمین‌لرزه شدید و یا سیل و ابعاد کوچک حوضچه می‌توانند باعث سرریز شدن پساب‌های نفتی و ایجاد بحران در حوضچه‌های تبخیر گردند [۱۰-۱۲]. علاوه‌بر این، محدود بودن زمین‌های در دسترس پالایشگاه‌ها، مانع احداث حوضچه‌های جدید است و تمام این امور، باعث می‌شوند که بخش مربوطه مدیریت پساب‌های نفتی، به چالشی برای شرکت‌ها تبدیل شود. بر همین اساس، اصلاح فرایندهای متداول و ارائه راه‌کاری نوین و عملیاتی، برای حل این موضوع، حیاتی است؛ به‌عنوان مثال، قبادی و همکارانش، روش‌هایی را برای به‌سازی حوضچه تبخیر پالایشگاه سرخون ارائه کردند. در شیوه‌های اصلاحی آن‌ها برای تبخیر بهتر آب، می‌توان به بالا بردن سطح انتقال حرارت و انتقال جرم با استفاده از اسپری کردن آب در هوا اشاره کرد. در این روش، از سامانه مه‌پاش استفاده و مشخص شد که با این اقدام، سرعت تبخیر آب بالا می‌رود [۴]. لازم به ذکر است که احتمال پراکنده شدن و نفوذ قطرات آب و نفت آزاد شده در جو، به محیط اطراف و آلوده کردن محیط زیست با این فرایند، بررسی نشده است و هم‌چنین گرفتگی نازل‌های مورد استفاده در مه‌پاش‌ها می‌تواند در مرور زمان باعث ایجاد مشکلاتی در فرایند جداسازی شود.

به‌طور کلی، به‌منظور بالا بردن سرعت تبخیر آب از حوضچه‌های تبخیر می‌توان دمای پساب را بالا برد. دلیل این امر نیز بالاتر رفتن فشار بخار آب در دماهای بالاتر است [۱۳، ۱۴]. در نتیجه با بالاتر رفتن دمای پساب و سریع‌تر شدن فرایند تبخیر آب، ریسک سرریز شدن آن و نفوذ مواد سمی به محیط زیست کاهش می‌یابد [۴]. مشکل موجود در این روش، محدود بودن منابع انرژی برای بالا بردن دمای پساب است. یکی از راه‌کارها، استفاده از منابع انرژی تجدیدناپذیر برای تأمین انرژی مورد نیاز تبخیر آب است؛ اما این روش باتوجه‌به مصرف مواد هیدروکربنی، از نقطه‌نظر محیط زیستی، با مشکل روبه‌روست. خوش‌بختانه علاوه‌بر منابع انرژی تجدیدناپذیر، در کشور ایران و به‌خصوص در مناطق جنوبی و جنوب غرب کشور، منبع تجدیدپذیر انرژی خورشیدی در دسترس است. بر اساس تحقیقی در سال ۱۳۹۴، به‌صورت کیفی، استفاده از انرژی خورشیدی در حوضچه‌های تبخیری، بررسی و این نکته بیان شد که باتوجه‌به جغرافیای کشور، به‌صورت میانگین، ۳۰۰ روز از سال،

ساختار این مواد، پارافین‌ها دارای دمای ذوب بین ۶ الی ۱۱۰ درجهٔ سلیسیوس، گرمای نهان ذوب بین ۸۰ تا ۲۶۰ کیلوژول بر کیلوگرم و چگالی بین ۷۵۰ تا ۹۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب دارند [۲۴]. از برتری‌های موم‌های پارافین، می‌توان به ارزان بودن، در دسترس بودن، پایداری شیمیایی، تغییر حجم معقول در زمان تغییر فاز از جامد به مایع (۱۰-۲۰٪)، فشار بخار کم، ایمنی و دامنهٔ مناسب دمای ذوب آن‌ها اشاره کرد. بر همین اساس و با در نظر گرفتن این برتری‌ها، بیشتر پارافین‌ها را می‌توان به‌عنوان PCM برای ذخیره‌سازی انرژی به‌صورت گرمای نهان، استفاده کرد. هم‌چنین مواد تغییر فاز دهندهٔ مبتنی بر مواد پارافینی معمولاً برای چرخه‌های ذوب تبلور بسیار طولانی پایداری بالایی دارند [۲۴، ۲۵].

بر اساس اهمیت موضوع و پتانسیل موجود در مواد تغییر فاز دهنده، در این تحقیق در قدم اول، با استفاده از داده‌های مربوط به پساب تولیدی و آنالیز مواد موجود در حوضچه‌های تبخیر شرکت بهره‌برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی، تأثیرات جوی در فصول مختلف و در طول شب و روز بر میزان تبخیر بررسی شد. در مرحلهٔ دوم و با توجه به این‌که مناطق عملیاتی این شرکت در جنوب و جنوب غرب کشور واقع هستند، تأثیر استفاده از انرژی خورشیدی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در فرایند جداسازی آب از پساب‌های نفتی، بررسی شد. برای این منظور و رسیدن به اهداف مورد نظر تحقیق، با آنالیز انرژی و با کمک برنامه‌نویسی متلب^۲ و متمتیکا^۳، میزان تأثیر شرایط جوی در فصول مختلف بر میزان تبخیر با حضور مواد تغییر فاز دهنده در حوضچه‌های تبخیر بررسی شد و بدین ترتیب امکان استفاده از انرژی خورشیدی و مواد تغییر فاز دهنده، در حوضچه‌های تبخیری بررسی شد. در نهایت با استفاده از نتایج، به‌منظور بهبود عملکرد حوضچه‌ها، امکان اضافه کردن پره‌ها به محفظهٔ حاوی مادهٔ تغییر فاز دهنده بررسی شد.

۲. مشخصات مادهٔ تغییر فاز دهنده و اطلاعات سیال درون حوضچه

برای بهینه‌سازی فرایند تبخیر سیال موجود در حوضچه و امکان‌سنجی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در این راه، در ابتدا بر اساس داده‌های میدانی، اطلاعات مربوط به سیال موجود در

آفتابی است [۱۵]. با این حال، این انرژی رایگان تنها در ساعات مشخصی از شبانه‌روز، در دسترس است. بر همین اساس، برای حل این مشکل، باید با ذخیره‌کردن انرژی خورشیدی در طول روز، در طول ساعاتی از شبانه‌روز که این انرژی در دسترس نیست هم، فرایند تبخیر را با سرعت بالاتری، ادامه داد. یکی از نامزدهای ذخیرهٔ انرژی، مواد تغییر فاز دهنده است. مواد تغییر فاز دهنده^۱ که به‌اختصار با PCM نمایش داده می‌شوند، گروه‌های جدیدی از مواد با طبیعت متفاوت (آلی و / یا غیر آلی) هستند که می‌توانند انرژی را به‌صورت گرمای محسوس و نهان ذخیره و آزاد کنند [۱۶، ۱۷].

امروزه، با توجه به مشکلاتی که در پی مصرف زیاد برق ایجاد شده است، مواد تغییر فاز دهنده، محققان را به مطالعهٔ نقش PCM ها در مدیریت مصرف انرژی و صرفه‌جویی در انرژی، ترغیب می‌کند [۱۶، ۱۷]. در سال‌های اخیر، به‌دلیل طیف وسیعی از مواد موجود به‌عنوان PCM، کاربرد این مواد در بخش‌های مختلف مانند استفاده از PCM برای ذخیرهٔ انرژی گرمایی در ساختمان‌ها [۱۸]، ذخیرهٔ انرژی خورشیدی [۱۷، ۱۹]، فرایندهای تهویهٔ مطبوع ساختمان‌ها [۱۷، ۲۰]، حفاظت حرارتی تجهیزات الکترونیکی [۱۷]، سامانه‌های حرارتی فضاپیماها [۱۷، ۲۱]، اعمال مدیریت گرمایی و کنترل انتقال گرما [۲۲، ۲۳]، مصارف پزشکی و برای کنترل دمای واکنش شیمیایی [۱۷]، بررسی شده است. در تمامی مقالات ارائه شده، مشخص شد که مواد تغییر فاز دهنده، از قابلیت بالایی در بخش‌های مدیریت مصرف انرژی و ذخیره‌سازی انرژی برخوردار هستند و با ارائهٔ فرایندهای مناسب، می‌توان از ظرفیت‌های موجود در این دسته از مواد استفاده کرد.

با توجه به آن‌که تغییر حجم مربوط به تغییر فاز جامد به مایع، به‌مراتب کمتر از تغییر حجم مربوط به تغییر فاز مایع به بخار است، در صنایع مختلف، PCM ها با تغییر فاز جامد به مایع و بالعکس، انرژی را ذخیره و آزاد می‌کنند. با توجه به تغییر حجم نسبتاً پایین این فرایند، مخازن نگهدارندهٔ این مواد، نیازمند فناوری ساخت بالایی است [۱۷]. در بین موادی که می‌توان از آن‌ها به‌عنوان PCM استفاده کرد، پارافین‌ها با دسترسی بالای و هم‌چنین قیمت مناسبی که دارند، بسیار به‌کار می‌روند. از آن‌رو که پارافین‌ها دارای ساختار متفاوتی هستند؛ در نتیجه، این مواد، خواص ترموفیزیکی متفاوتی دارند. به‌عنوان مثال، به‌سبب تعداد کربن‌های موجود در

1. Phase Change Materials

2. MATLAB
3. Mathematica

تغییرات دمایی سیال درون حوضچه نسبت به عمق آن در زمان‌های مختلف، به شکل زیر مشخص شد. باتوجه به تقارن موجود در حوضچه، معادله ریاضی این موازنه انرژی به کمک معادله (۱) به دست می‌آید [۲۹]. لازم به ذکر است که شکل حوضچه تبخیر به صورت استوانه است که از تغییرات دمایی شعاعی سیال درون، صرف نظر شده و دمای سیال درون حوضچه (متغیر وابسته)، به صورت تابعی از زمان و عمق آن (متغیرهای مستقل) در نظر گرفته شده است.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - Q(solar) = 0 \quad (1)$$

در این معادله، T بیانگر دمای سیال درون حوضچه، t بیانگر زمان، x بیانگر مکان، ρ چگالی، C_p ظرفیت گرمایی، k هدایت حرارتی و $Q(solar)$ بیانگر انرژی وارد شده از سمت خورشید به حوضچه است. در حل معادله (۱)، فرض بر این است که دمای سیال درون حوضچه فقط تابع فاصله از سطح سیال و زمان است و در جهت شعاعی، دما همگن است. به منظور حل این معادله، به دو شرط مرزی و یک شرط اولیه نیاز است که در معادلات (۲) الی (۴)، به آن‌ها اشاره شده است.

شرایط مرزی:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ at the bottom of the pool} \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_{air}) \text{ at fluid surface} \quad (3)$$

شرط اولیه:

$$T = T_{initial} \text{ at } t=0 \text{ and any depth} \quad (4)$$

پوشش کف حوضچه‌های تبخیری عایق است؛ بنابراین در معادله (۲) فرض شده است که گرما از کف استخر به زمین منتقل نمی‌شود. به منظور حل معادله ارائه شده، به دمای هوا در زمان‌های مختلف شبانه‌روز، نیاز است. بر همین اساس، با استفاده از داده‌های موجود هواشناسی، میانگین دمایی در طول روز و شب (T_{air})، برای شهر کنگان، استخراج و مدل‌سازی برای حوضچه‌های موجود در این شهر انجام شد. همچنین، میزان انرژی خورشیدی وارد شده بر سطح زمین در شهر کنگان، باتوجه به برنامه PVsyst مشخص شد.

حوضچه، از شرکت بهره‌برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی دریافت شد که این داده‌ها در جدول (۱)، ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که داده‌های زیر از یکی از حوضچه‌های تبخیر موجود در شهر کنگان در طول تابستان و به صورت تجربی استخراج شده است.

جدول ۱. خصوصیات سیال درون حوضچه.

Table 1. Characteristics of the fluid inside the pond.

Parameter	Unit	Value
Density at 15.6 °C	kg/m ³	1051
Electrical conductivity	μs/cm	43400
Salinity	ppm	26300

باتوجه به گستردگی پارافین‌های موجود، دو پارافین که بیشترین استفاده را به عنوان مواد تغییر فاز دهنده داشته‌اند، به عنوان نامزد مواد تغییر فاز دهنده، انتخاب و اطلاعات آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. خصوصیات پارافین‌های انتخاب شده [۲۷].

Table 2. Characteristics of selected paraffins [27].

Parameter	Praffin	Unit	Value
Average Density at 20 °C	C ₃₃	kg/m ³	900
	Wax 106		900
Melting point	C ₃₃	°C	71
	Wax 106		108
Enthalpy of fusion	C ₃₃	kJ/kg	268
	Wax 106		80

بر اساس داده‌های موجود، کلیه خواص مربوط به مواد موجود در حوضچه تبخیر، بر اساس معادلات تجربی تخمین زده شدند [۲۶-۲۸].

۳. مدل‌سازی ریاضی مسئله

۳-۱ مدل‌سازی دمای سیال درون حوضچه بدون ماده تغییر فاز دهنده

در این تحقیق، ابتدا معادله موازنه انرژی حاکم بر مسئله، مشخص و

در این معادله، m_v جرم آب تبخیر شده در حوضچه تبخیر در طول شب است و Δh_v گرمای نهان تبخیر سیال درون حوضچه است و بر اساس داده‌های موجود در مراجع علمی [۲۶-۲۸] قابل محاسبه است.

۲-۲-۳ بررسی تغییرات دمایی سیال درون حوضچه باوجود مخزن پارافین

به‌منظور بررسی عملکرد مواد تغییر فاز دهنده در درون حوضچه‌های تبخیر، مسئله به دو بخش روز و شب تقسیم می‌شود. باتوجه‌به این‌که در طول روز، تبخیر باکمک انرژی خورشیدی انجام می‌شود و مخزن حاوی پارافین، هیچ تأثیری بر روی دمای درون حوضچه ندارد، تغییری در رفتار دمایی درون حوضچه نسبت‌به قبل از استفاده از مخزن پارافین وجود ندارد و تا زمانی‌که انرژی خورشیدی در دسترس است، معادلات (۱) الی (۴) معتبر هستند؛ اما در طول شب، به‌دلیل نبود انرژی خورشیدی، تنها منبع انرژی در دسترس برای سیال درون حوضچه، انرژی موجود در مخزن پارافین است. به‌دلیل انتخاب پارافین برای استفاده در حوضچه‌های تبخیر و شکل‌های موجود برای حوضچه‌ها (شکل‌های استوانه‌ای)، مدل‌سازی برای پیش‌بینی تأثیر قرار دادن مخزن استوانه‌ای پارافین در استخر بر دمای سیال درون استخر، در طول شب به شکل معادله (۷) است (تصویر کلی مسئله، این‌گونه است که مخزن پارافین به‌عنوان منبع حرارتی با شکل استوانه با شعاع R_i در مرکز یک حوضچه تبخیر با شکل استوانه و شعاع R قرار دارد که تصویر آن، در شکل (۱)، ارائه شده است.

در اصل به‌دلیل حضور مخزن پارافینی در درون سیال، برخلاف فرضیات موجود در معادلات (۱) الی (۴)، دمای سیال علاوه‌بر تابعیت زمان و عمق سیال، به‌صورت شعاعی نیز تغییر می‌یابد و در نتیجه اضافه‌شدن مخزن پارافین به سیال درون حوضچه، باعث می‌شود که برای به‌دست آوردن پروفایل دما، از دستگاه مختصات استوانه‌ای استفاده شود و این موضوع در مدل‌سازی پیش‌بینی تغییرات دمایی سیال باحضور مواد تغییر فاز دهنده، دیده شده است. بر این اساس و باکمک حل معادله (۷)، می‌توان در طول شب، تغییرات دما (متغیر وابسته) را نسبت‌به زمان و مکان (متغیرهای مستقل) به‌دست آورد.

علاوه‌بر این، برای دمای اولیه سیال ($T_{initial}$) موجود در حوضچه، در ابتدای یک روز، فرض شده است که دمای اولیه، برابر با دمای هوا در طول شب و برای شب نیز، دمای اولیه به‌کمک مدل‌سازی انجام‌شده، تخمین زده‌شد.

باتوجه‌به اطلاعات آب‌وهوایی شهر کنگان و جداول موجود در منابع معتبر مقدار عددی مربوط‌به ضریب انتقال حرارت همرفت هوا که در معادله (۳) با عبارت h به‌نمایش درآمده است برابر با ۱۰ وات بر مترمربع درجه کلونین تخمین زده شده است [۲۹].

۲-۳ مدل‌سازی حوضچه تبخیر با حضور مواد تغییر فاز دهنده

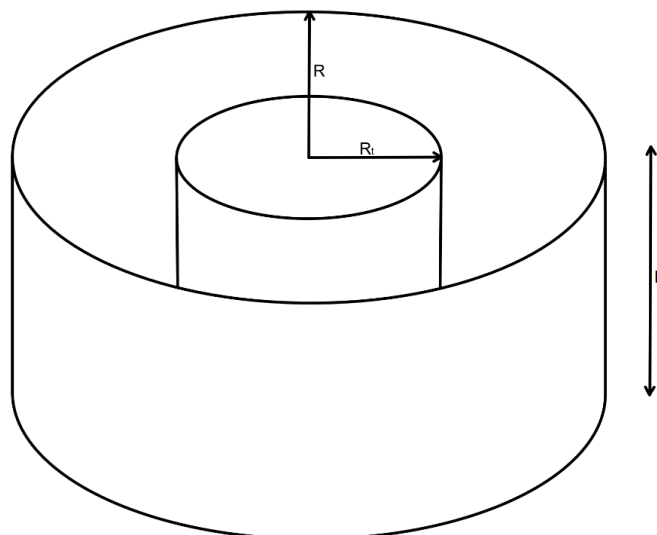
۱-۲-۳ محاسبه جرم مورد نیاز پارافین و توانایی تبخیر

به‌منظور بررسی عملکرد مواد تغییر فاز دهنده، پارافین‌ها در مخزنی با قطر ۱ متر و ارتفاع ۲ متر قرار می‌گیرند. این مخزن در طول روز، انرژی خورشید را دریافت می‌کند و پارافین موجود، ذوب می‌شود، سپس در طول شب و هنگامی‌که انرژی خورشیدی در دسترس نیست، با انرژی ذخیره‌شده در مخزن، می‌توان با تغییر فاز پارافین از مایع به جامد، گرما را به سیال درون حوضچه وارد کرد. در این شرایط، باتوجه‌به چگالی پارافین‌ها، حجم مخزن، گرمای نهان انجماد پارافین‌ها و گرمای نهان تبخیر سیال درون حوضچه، می‌توان کارایی هر یک از پارافین‌ها را در فرایند ذکر شده، مشخص کرد. بدین ترتیب، جرم مورد نیاز هر پارافین، انرژی در دسترس به‌دلیل تغییر فاز و همچنین توانایی تبخیر سیال درون حوضچه (m_v) حساب شدند. لازم به ذکر است که انرژی در دسترس برای هر پارافین، به‌کمک معادله (۵) مشخص شد.

$$Q = m_p \Delta h_{fusp} = V_{TANK} \rho_p \Delta h_{fusp} \quad (5)$$

در معادله (۵)، m_p ، Δh_{fusp} ، ρ_p و V_{TANK} به‌ترتیب جرم پارافین، گرمای نهان انجماد پارافین، چگالی پارافین و حجم مخزن هستند. در نتیجه، توانایی تبخیر ماده تغییر فاز دهنده در طول شب، باکمک معادله (۶) به‌دست آمد.

$$m_v = V_{TANK} \rho_p \frac{\Delta h_{fusp}}{\Delta h_v} \quad (6)$$



شکل ۱. تصویر کلی از حضور مخزن حاوی پارافین در درون حوضچه تبخیر.

Figure 1. Schematic diagram of the presence of a tank containing paraffin inside the evaporation pond.

همان‌گونه که در ابتدای بخش ۳-۲-۲ نیز اشاره شد، معادلات (۷) تا (۱۲)، برای مدل‌سازی دمای سیال درون حوضچه در طول شب استفاده می‌شود و بر همین اساس، مشخصه مربوطه انرژی خوشیدی در آن دیده نمی‌شود. علاوه بر این، در طول روز، تغییرات دمایی شعاعی وجود ندارد ($\frac{\partial T}{\partial r} = 0$)؛ اما مشخصه مربوطه انرژی خوشیدی باید به آن اضافه شود. بر همین اساس، در طول روز، می‌توان از معادلات (۱) الی (۴) استفاده کرد.

به‌منظور حل معادلات (۴) و (۷) با توجه به شرایط مرزی و شرایط اولیه ارائه‌شده، فرض شد که سطح سیال درون حوضچه و خواص سیالات درون حوضچه ثابت هستند.

۴. نتایج و بحث

۴-۱ تغییرات دمایی سیال درون حوضچه تبخیر در زمان‌های مختلف بدون حضور PCM

بر اساس معادلات (۱) الی (۴) برای سیال درون حوضچه، می‌توان در عمق‌ها و زمان‌های مختلف، دمای سیال درون حوضچه را پیش‌بینی کرد. برای به‌دست‌آوردن تابع دما از زمان و مکان، از برنامه‌نویسی ممتیکا استفاده شد.

در شکل (۲)، تابعیت دما از مکان و زمان‌های مختلف، به‌صورت ۳ بعدی و در شکل‌های (۳) الی (۶)، نمونه‌ای از نتایج مربوطه حل معادلات (۱) الی (۴)، به‌صورت دو بعدی ارائه شده‌اند. در تمامی این

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

به‌منظور تحلیل این معادله، به دو شرط مرزی در جهت z و دو شرط مرزی در جهت r و یک شرط اولیه نیاز است که در معادلات (۸) تا (۱۲) به آن‌ها اشاره شده‌است:

شرط اولیه:

$$T(r, z, 0) = T_{initial} \quad (8)$$

شرایط مرزی:

$$T(R_i, z, t) = T_{pcm} \quad (9)$$

$$\frac{\partial T(R, z, t)}{\partial r} = 0 \quad (10)$$

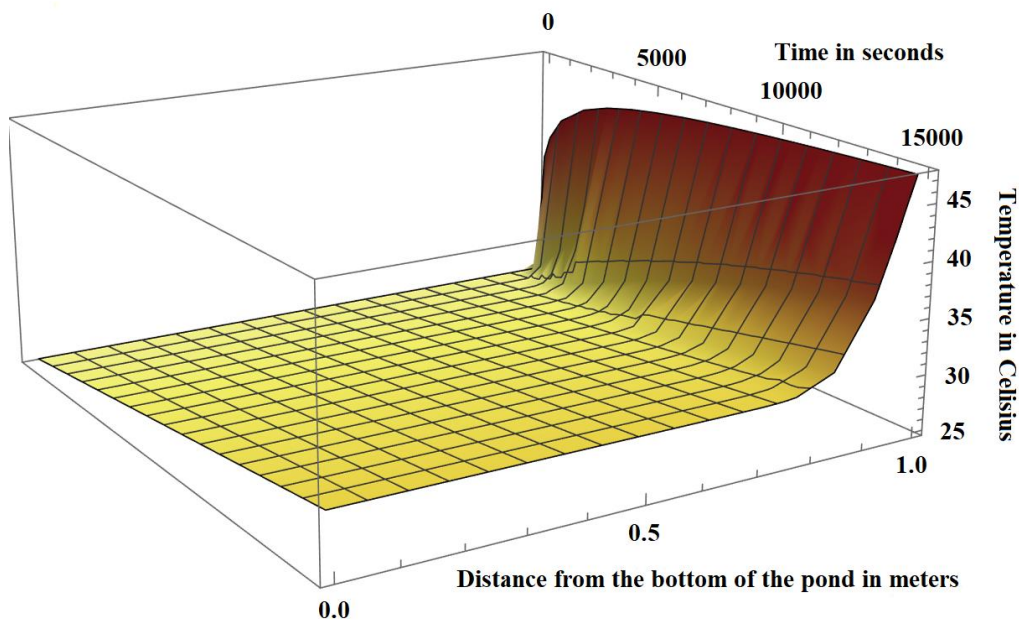
$$-k \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} = h(T - T_{air}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial T(r, L, t)}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

در این معادلات، T_{pcm} بیانگر دمای ذوب پارافین، R_i شعاع مخزن نگه‌دارنده پارافین، R شعاع استخر و L عمق سیال است. با توجه به پیچیدگی موجود در معادله (۷)، این معادله بر اساس شرایط موجود در معادلات (۸) الی (۱۲)، در محیط برنامه‌نویسی ممتیکا و به‌کمک روش عددی NDSolveValue حل شد.

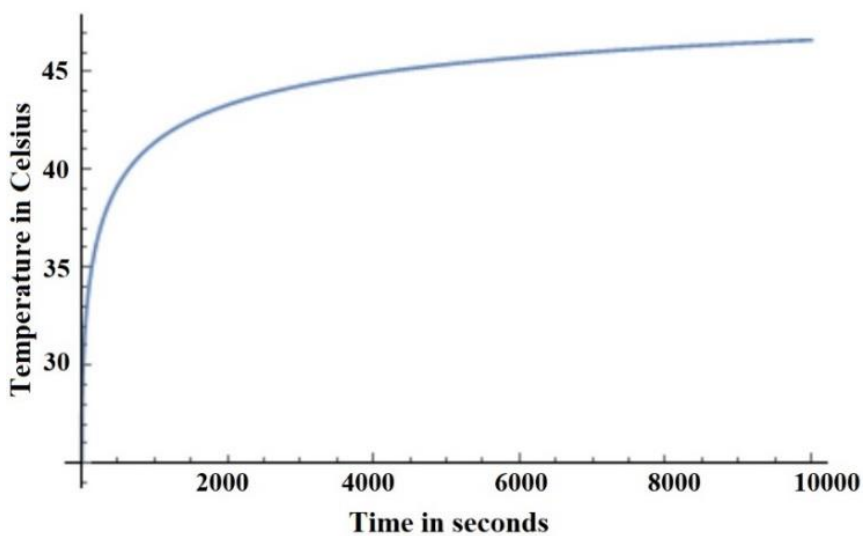
هوای شب قبل از شروع فرایند است، برابر با ۲۵ درجهٔ سلیسیوس در نظر گرفته شده است.

اشکال، زمان صفر بیانگر ساعت ۸ صبح است. لازم به ذکر است که به منظور ترسیم اشکال اشاره شده، دمای اولیهٔ سیال که همان دمای



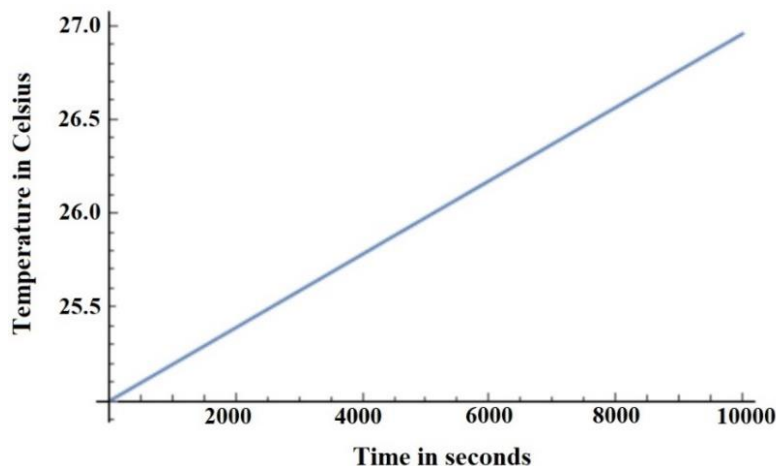
شکل ۲. دمای سیال درون حوضچه در زمانها و مکانهای مختلف در طول روز با دمای هوای برابر با ۳۵ درجهٔ سلیسیوس.

Figure 2. Temperature of the fluid inside the pond at different times and places during the day with an air temperature equal to 35 Celsius.



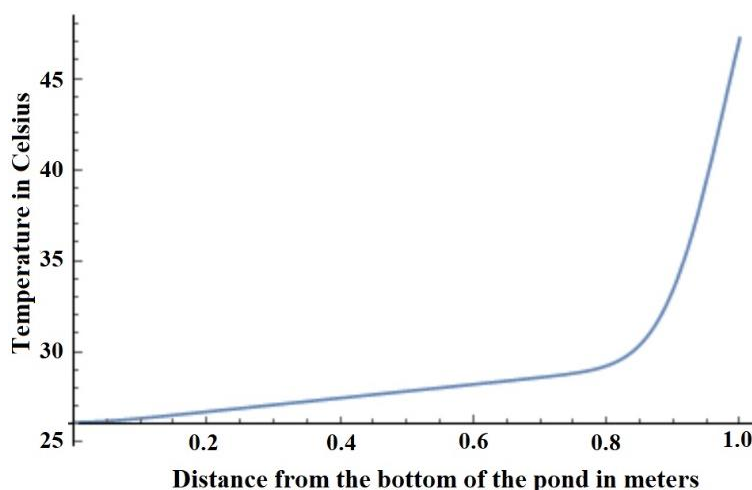
شکل ۳. دمای سطح سیال درون حوضچه در زمانهای مختلف روز با دمای هوای برابر با ۳۵ درجهٔ سلیسیوس.

Figure 3. Temperature of the fluid surface inside the pond at different times of the day with an air temperature equal to 35 Celsius.



شکل ۴. دمای سیال درون حوضچه در عمق ۵۰ سانتی‌متری، در زمان‌های مختلف روز با دمای هوای برابر با ۳۵ درجهٔ سلیسیوس.

Figure 4. Temperature of the fluid inside the pond at a depth of 50 cm, at different times of the day with an air temperature equal to 35 Celsius.



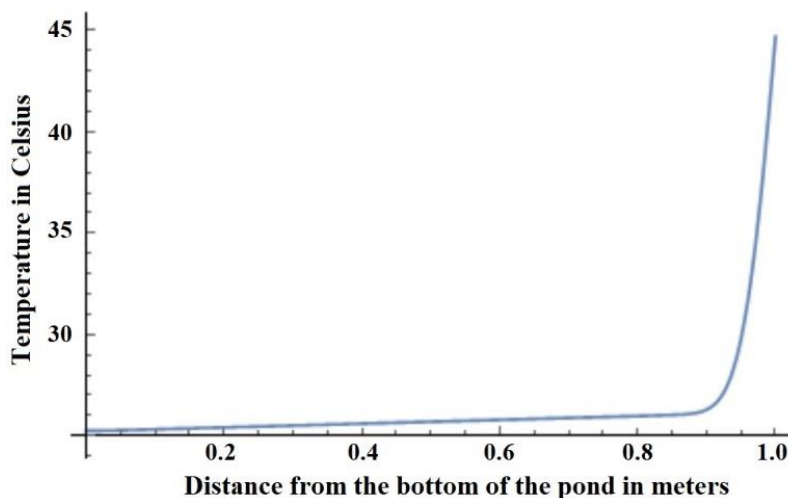
شکل ۵. دمای سیال درون حوضچه در فواصل مختلف از کف حوضچه، در ساعت ۱۲ ظهر با دمای هوای برابر با ۳۵ درجهٔ سلیسیوس.

Figure 5. Temperature of the fluid inside the pond at different distances from the bottom of the pond at 12 O'clock with an air temperature of 35 Celsius.

افزایش دما، کاهش می‌یابد.

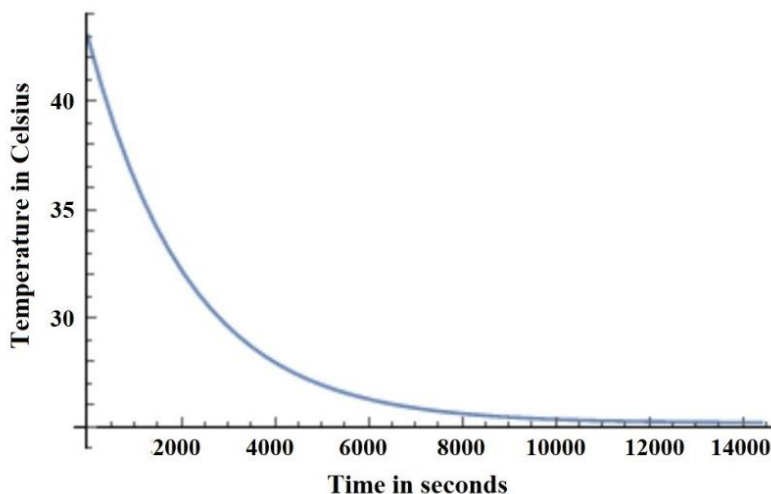
به‌منظور بررسی تأثیرات تغییر فصل بر روی دمای سیال و همچنین مقایسهٔ دمای سیال حوضچه در طول روز و شب، با استفاده از اطلاعات آب و هوایی، میانگین دمایی در فصول مختلف استخراج شد و همچنین انرژی خورشیدی ورودی به درون حوضچه در طول شب برابر با صفر در نظر گرفته شد. بر این اساس و با استفاده از معادلات (۱) الی (۴)، تغییرات دمایی سیال درون حوضچه در فصول مختلف و همچنین در طول شب، مشخص شد. در شکل (۷)، کردار دمای سطح سیال درون حوضچه در زمان‌های مختلف در طول شب، ارائه شده‌است.

باتوجه به شکل‌های (۲) الی (۶)، می‌توان دریافت که هرچقدر از سطح آب به سمت کف حوضچه حرکت کنیم، دمای سیال کاهش می‌یابد. علاوه بر این، باتوجه به شکل‌های (۲) و (۳)، مشخص است که در ساعات ابتدایی روز که دمای سیال از دمای هوا کمتر است، به دلیل جذب انرژی خورشیدی و همچنین جذب انرژی از هوای گرم اطراف، دمای سیال به سرعت بالا می‌آید؛ اما زمانی که دمای سیال از دمای هوا گرم‌تر شود، انتقال حرارت همرفت بین هوا و سیال در مقابل انتقال حرارت از خورشید قرار می‌گیرد. به عبارتی دیگر، هوای اطراف، گرما را از سیال جذب می‌کند و خورشید همچنان به سیال گرما می‌دهد؛ بنابراین افزایش دمای سیال کنترل می‌شود و شیب



شکل ۶. دمای سیال درون حوضچه در فواصل مختلف از کف حوضچه، در ساعت ۹ صبح با دمای هوای برابر با ۳۵ درجه سلسیوس.

Figure 6. Temperature of the fluid inside the pond at different distances from the bottom of the pond at 9 A.M. with an air temperature of 35 Celsius.

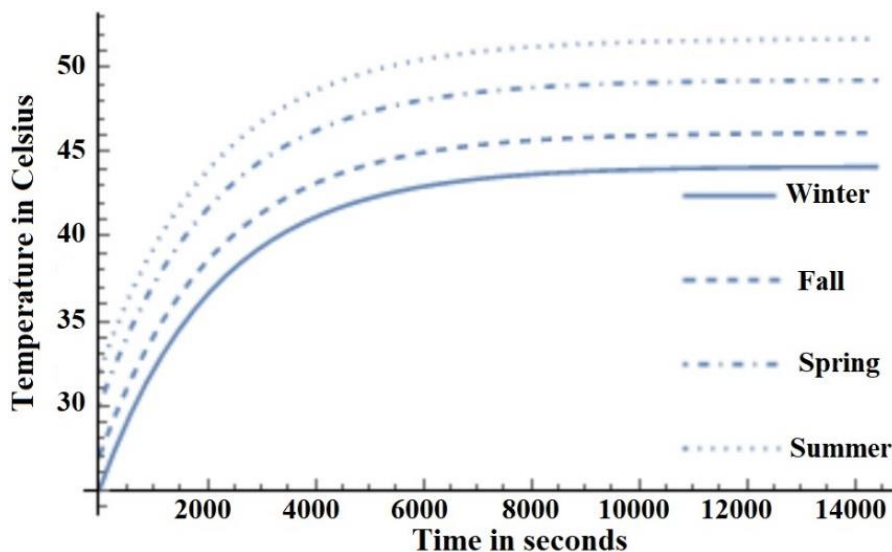


شکل ۷. دمای سطح سیال درون حوضچه در طول شب با دمای هوای برابر با ۲۵ درجه سلسیوس در طول شب.

Figure 7. Temperature of the fluid surface inside the pond during the night with an air temperature equal to 25 Celsius during the night.

اطراف حوضچه در فصل‌های سرد نیز، بر دمای سیال درون حوضچه و در نتیجه سرعت تبخیر، اثر منفی می‌گذارد؛ در نتیجه لازم است که با اصلاح عملکرد حوضچه تبخیر، فرایند تبخیر سیال درون حوضچه را در طول شب و روز و همچنین در طول روزهای مختلف سال، بهبود بخشیده شود. باتوجه به مشکلات اشاره شده و با در نظر گرفتن ظرفیت موجود در مواد تغییر فاز دهنده در ذخیره انرژی خوشیدی در روز و آزاد کردن انرژی ذخیره شده در طول شب، عملکرد آن‌ها برای بهبود جداسازی آب در حوضچه‌های تبخیر بررسی شد.

زمان صفر در شکل (۷)، بیانگر ساعت ۸ شب است. بر اساس نتایج، مشخص است که در طول شب، دمای سیال درون حوضچه، کاهش و در نتیجه، سرعت تبخیر به شدت کاهش می‌یابد. همچنین در شکل (۸)، دمای سطح سیال درون حوضچه در طول روز، برای فصول مختلف سال ارائه شده است. بر اساس نتایج این بخش، می‌توان دریافت که یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در استفاده از حوضچه‌های تبخیر، دسترسی نداشتن به انرژی خورشیدی در طول شب است. همچنین، کاهش دماهای



شکل ۸. دمای سطح سیال درون حوضچه در طول روز در فصول مختلف سال.

Figure 8. Temperature of the fluid surface inside the pond during the day in different seasons of the year.

نسبت به C33، توانایی بیشتری برای بالاتر نگه‌داشتن دمای سیال دارد. با این حال، هدف از استفاده از پارافین در حوضچه‌های تبخیر، بالاتر بردن میزان تبخیر سیال درون حوضچه در طول شب است. لذا به‌منظور تکمیل مطالعات، در ادامه تحقیق، از پارافین C33 استفاده شد.

۲-۲-۴ تغییرات دمایی سیال موجود در حوضچه با حضور مواد تغییر فاز دهنده

پس از حل معادله (۷) با کمک برنامه متمتیکا که شرایط مرزی و اولیه آن در معادلات (۸) الی (۱۱) ارائه شده‌اند، تأثیر حضور مخزن حاوی ماده تغییر فاز دهنده بر روی دمای سیال درون حوضچه، مشخص و نتایج آن در شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه شد. بر اساس نتایج به‌نمایش درآمده در اشکال بالا، تأثیر حضور مخزن حاوی پارافین به‌طور کامل مشخص است.

چنان‌که قبلاً اشاره شد، در طول شب و بعد از نرسیدن انرژی خورشیدی به سیال درون حوضچه، دمای سیال به‌طور پیوسته کاهش می‌یافت تا دمای سیال به دمای محیط برسد (دمای سیال در محدوده آبی‌رنگ شکل‌های (۹) و (۱۰) باقی می‌ماندند)؛ با این حال، در حالتی که از مخزن پارافین در حوضچه استفاده شود، دمای سیال نه‌تنها کاهش نمی‌یابد، بلکه تا فاصله ۲۰ سانتی‌متری از مخزن،

۲-۴ تأثیر حضور مواد تغییر فاز دهنده

۱-۲-۴ میزان تبخیر سیالات درون حوضچه در طول شب

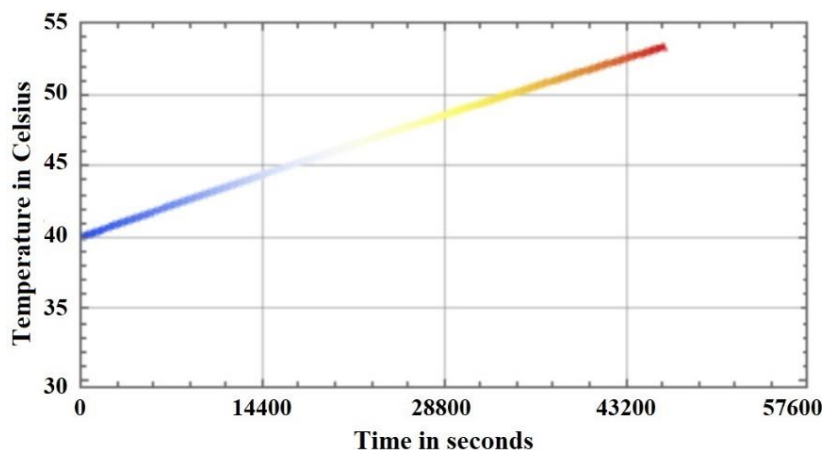
تأثیر حضور مواد تغییر فاز دهنده بر روی میزان تبخیر سیال درون حوضچه با کمک معادلات (۷) و (۸) مشخص شد و نتایج در جدول (۳) به نمایش درآمده است.

جدول ۳. نتایج توانایی تبخیر سیال به کمک دو ماده تغییر فاز دهنده.

Table 3. The results obtained for the fluid evaporation ability with the help of two phase change materials.

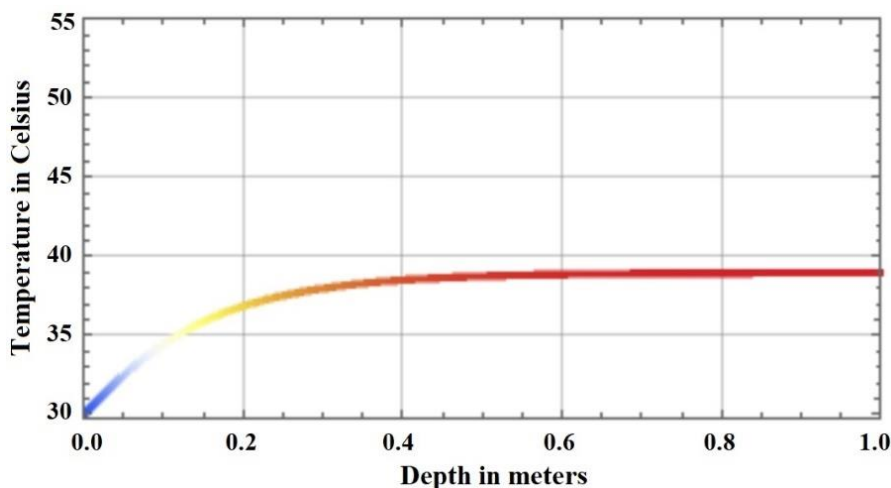
Parameter	Praffin	Unit	Value
Required mass	C ₃₃	kg	5652
	Wax 106		5652
Available energy due to fusion	C ₃₃	kJ	1514736
	Wax 106		452160
Ability to evaporate fluid	C ₃₃	kg	735.48
	Wax 106		219.66

بر اساس محاسبات و نتایج جدول (۳)، مشخص است که پارافین C33، با وجود جرم یکسان با پارافین wax 106، دارای توانایی بیشتری برای تبخیر سیال درون حوضچه است. این نتایج، بر اساس بالاتر بودن گرمای نهان انجماد C33 در مقایسه با wax 106 است. از طرفی، باتوجه‌به بالاتر بودن دمای ذوب wax 106، این پارافین



شکل ۹. دمای سیال درون حوضچه در فاصله ۲۰ سانتی متری از مخزن حاوی پارافین در طول شب و در عمق ۰/۵ متری.

Figure 9. Temperature of the fluid inside the pond at a distance of 20 cm from the tank containing paraffin during the night and at a depth of 0.5 meters.



شکل ۱۰. دمای سیال درون حوضچه در فاصله ۲۰ سانتی متری از مخزن حاوی پارافین در ساعت ۶ صبح.

Figure 10. Temperature of the fluid inside the pond at a distance of 20 cm from the tank containing paraffin at 6 O'clock in the morning.

۳-۲-۴ مطالعه تأثیر استفاده از پره‌ها بر روی فرایند تبخیر در این تحقیق، از پره‌ها با مواد مختلف و اشکال متفاوت استفاده شد تا بهترین نوع پره به منظور افزایش اثرگذاری مخزن پارافین مشخص شود. بر همین اساس، پره به صورت یک حلقه به دور دیواره بیرونی مخزن پارافین (در درون سیال حوضچه) در نظر گرفته شد که دمای پایه آن برابر با دمای مخزن است و گرما را از مخزن حاوی پارافین، دریافت و به سیال درون حوضچه منتقل می‌کند. برای این منظور، گرمای مبادله شده از راه پره (q) و کارایی پره (eff) در حالت‌های مختلف حساب شدند که معادلات حاکم بر مسئله، در معادلات (۱۳) تا (۱۵) ارائه شده‌اند [۲۹].

به صورت معنا داری، افزایش می‌یابد (وارد بخش قرمز رنگ کردارها می‌شود). این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که تمام پارافین، جامد شود. در فاصله بیشتر از ۲۰ سانتی متر تا فاصله ۱ متری نیز، تا زمانی که پارافین به طور کامل جامد نشده باشد، دمای سیال ثابت می‌ماند. باتوجه به این که فاصله ۲۰ سانتی متری، فاصله کمی برای تأثیر مستقیم و معنادار است، باید با روشی مطمئن، فاصله تأثیر حضور ماده تغییر فاز دهنده بر روی دمای سیال را بیشتر کرد. بر همین اساس، در بخش بعدی، تأثیر استفاده از پره‌ها بر روی مخزن حاوی پارافین، بررسی شده است.

ارائه شده است. نیز، عرض پره برابر با محیط مخزن حاوی پارافین است.

جدول ۵. تأثیر ضخامت پره بر روی کارایی پره.

Table 5. Effect of fin thickness on fin effectiveness.

Thickness (m)	Fin effectiveness
0.0015	110.4
0.0150	34.3
0.0500	16.4
0.1000	9.8
0.2000	5.6
0.5000	2.6

همان‌طور که در جدول (۵) پیداست، با افزایش ضخامت، کارایی پره کم می‌شود؛ دلیل این رفتار این است که با افزایش ضخامت، مساحت در دسترس برای انجام فرایند انتقال حرارت بیشتر می‌شود، با این حال، ضخامت هرچه بیشتر شود، به طول مخزن دو متری مورد استفاده نزدیک‌تر می‌شود و سرانجام، کل پره به قسمتی از دیواره مخزن تبدیل می‌شود و بنابراین، در این شرایط حدی، ضخامت پره با ارتفاع مخزن برابر می‌شود که نتیجه‌ای بجز سنگین‌تر شدن مخزن و افزایش قیمت ساخت نخواهد داشت. بنابراین، با عنایت به نتایج می‌توان ضخامت بهینه را ۰/۱ متر در نظر گرفت که در آن حالت و با معادله (۱۵)، انتقال حرارت به‌همراه پره حدود ۱۰ برابر حالتی است که پره استفاده نشده باشد.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، دمای سیال درون حوضچه‌های تبخیر که به‌منظور جداسازی آب از پساب‌های نفتی از انرژی خورشیدی استفاده می‌کند، مدل‌سازی شد و باتوجه به نتایج، مشخص شد که به‌دلیل عدم دسترسی ۲۴ ساعته به انرژی خورشیدی و همچنین تغییرات موجود در شرایط آب و هوایی در فصول مختلف، طراحی این حوضچه‌ها باید اصلاح شود. بر همین اساس، برای اولین بار، طرح استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان ذخیره‌کننده انرژی در حوضچه‌های تبخیر شرکت زاگرس جنوبی ارائه شد. پس از انجام مدل‌سازی این سامانه‌ها مشخص شد که پارافین C33، یکی از بهترین نمونه‌ها به‌منظور استفاده در این طرح است. باتوجه به

$$q = \sqrt{h_f P k A} (T_{TANK} - T) \tanh(ML_{fin}) \quad (13)$$

$$eff = \frac{q}{h_f A (T_{TANK} - T)} \quad (14)$$

$$M = \sqrt{\frac{hP}{kA}} \quad (15)$$

در این معادلات، T_{TANK} دمای مخزن حاوی پارافین و برابر با دمای ذوب پارافین، h_f ضریب انتقال حرارت همرفت سیال، A مساحت سطح مقطع پره، L_{fin} طول پره و P محیط پره هستند. پس از مشخص کردن خواص سیال، با استفاده از داده‌های موجود در مراجع [۲۸-۲۶]، با استفاده از برنامه‌نویسی ممتیکا، کارایی پره‌ها با سطح مقطع مستطیلی و با جنس‌های مختلف، بررسی و در جدول (۴)، نتایج ارائه شد.

جدول ۴. کارایی پره‌های مورد استفاده در حوضچه‌های تبخیر.

Table 4. Fin effectiveness of fins used in evaporation ponds.

Fin material	Fin length (cm)	Fin effectiveness
Stainless steel	60	6.0
Carbon steel		12.6
Iron		14.5
Rice		16.9
Aluminum		24.8
Copper		32.3

بر اساس نتایج مطالعه بر روی پره‌ها با جنس‌های مختلف، مشخص شد که بیشترین کارایی پره، متعلق به حالتی است که از پره مسی استفاده شده باشد. دلیل این امر نیز بالابودن ضریب انتقال حرارت پره مسی در مقایسه با دیگر پره‌هاست.

لازم به ذکر است که دلیل انتخاب طول ۶۰ سانتی‌متری برای پره‌ها این است که باتوجه به معادلات (۱۴) الی (۱۶) و برنامه نوشته شده، مشخص شد که فین با طول ۶۰ سانتی‌متر، دارای انتهای پره قابل قبولی است و دمای آن در حالتی که از پره مسی با سطح مقطع مستطیلی استفاده شود، به ۳۳۶ کلوین می‌رسد که از دمای انجماد پارافین، تنها ۸ درجه سلیسیوس کمتر است.

در مورد ضخامت پره نیز می‌توان مقادیر مختلفی را انتخاب کرد. در جدول (۵)، نتایج مربوط به اثر تغییر اندازه ضخامت پره از جنس مس با طول ۶۰ سانتی‌متر و سطح مقطع مستطیلی بر روی کارایی پره

- [4] Ghobadi, A., Torkzadeh, E., Zadeh, R. N., & Bazargani, S. (2012). Investigating the management and treatment methods of industrial wastewater in Sarkhoon Gas Refinery. Paper presented at the The 3rd Conference on Wastewater and Residue Management in Oil and Energy Industries, Tehran, Iran.
- [5] Velayi, E., & Norouzbeigi, R. (2020). A mesh membrane coated with dual-scale superhydrophobic nano zinc oxide: Efficient oil-water separation. *Surface and Coatings Technology*, 385, 125394.
- [6] Peng, J., Liu, Q., Xu, Z., & Masliyah, J. (2012). Novel Magnetic Demulsifier for Water Removal from Diluted Bitumen Emulsion. *Energy & Fuels*, 26(5), 2705-2710.
- [7] Long, Y., Shen, Y., Tian, H., Yang, Y., Feng, H., & Li, J. (2018). Superwetable Coprinus comatus coated membranes used toward the controllable separation of emulsified oil/water mixtures. *Journal of Membrane Science*, 565, 85-94.
- [8] Mousavi, S., & Rokhi, M. G. (2013). Investigating the effectiveness of the API system in Parsian Refinery wastewater treatment. Paper presented at the The 2nd national conference on environmental protection and planning, Hamedan, Iran.
- [9] Kim, E., Yulisa, A., Kim, S., & Hwang, S. (2020). Monitoring microbial community structure and variations in a full-scale petroleum refinery wastewater treatment plant. *Bioresource Technology*, 306, 123178.
- [10] Shadbakhti, G., & Heidarian, A. (2004). Destructive effects of fungi on improper covering system. Paper presented at the The 9th National Corrosion Congress of Iran, Isfahan, Iran.
- [11] Khadempir, M., & Sanei, M. (2016). Investigating and identifying the factors causing or aggravating environmental crises of industrial effluents of evaporation ponds in Sarkhoon and Qeshm gas refinery using Delphi method. Paper presented at the 7th International Conference on Integrated Natural Disaster Management with Focus on 4 Priorities for Action of SFDRR, Tehran, Iran.
- [12] Vazdani, S., Sabzghabaei, G., Dashti, S., & Cheraghi, M. (2017). Investigating and identifying the risks in the evaporation ponds of Parsian Gas Refinery using the Delphi method. Paper presented at the The 6th National Congress of Iran's New Technologies with the aim of achieving sustainable development.
- [13] Borgnakke, C., & Sonntag, R. E. (2013). *Fundamentals of Thermodynamics* (8th ed.). Hoboken, New Jersey: Wiley.
- [14] Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2005). *Introduction to chemical engineering thermodynamics* (7th ed.). Boston, Massachusetts: McGraw-Hill.

محاسبات، مشخص شد که استفاده از یک مخزن حاوی پارافین، با قطر ۱ متر و ارتفاع ۲ متر، توانایی اثرگذاری مستقیم بر روی دمای سیالاتی را دارد که تا فاصله ۲۰ سانتی‌متری آن قرار گرفته‌اند. در ادامه و به منظور بهینه‌کردن فرایند و افزایش سرعت انتقال حرارت، استفاده از پره‌ها بررسی و مشخص شد که بهترین پره، از جنس مس است و با سطح مقطعی مستطیلی، باید به صورت یک حلقه به دور مخزن حاوی پارافین، به بدنه آن بچسبد. نیز، مشخص شد که در صورت استفاده از پره با طول ۶۰ سانتی‌متر از جنس مس که دارای ضخامتی برابر با ۱۰ سانتی‌متر باشد، می‌توان انتقال حرارت مساحتی را که از مخزن با پره پوشیده شده است تا ۱۰ برابر افزایش داد. نتایج این تحقیق مشخص کرد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، می‌تواند یک روش مناسب به منظور افزایش سرعت تبخیر آب در حوضچه‌های تبخیر به خصوص در طول شب باشد.

۶. تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، از دانشگاه شیراز و شرکت بهره‌برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی بابت ارائه داده‌ها، امکانات رایانه‌ای و راهنمایی‌های انجام شده نهایت تشکر و قدردانی را دارند. همچنین از جناب آقای دکتر افشین رزمجوئی، رئیس سابق پژوهش شرکت بهره‌برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی بابت تمام راهنمایی‌های ایشان، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Mazarei, S. R., Esmaili, H., & Jafari, D. (2016). Types of methods for separating water emulsion from oil. Paper presented at the 3rd International Conference on New Research Achievements in Chemistry & Chemical Engineering, Tehran, Iran.
- [2] Ranjbaran, A., Shafiei, S., & Abbaspourehdam, F. (2013). Modeling the emission of volatile organic compounds from the equalizing ponds of Tabriz petrochemical wastewater treatment. Paper presented at the The 1st Conference and Exhibition on Environment, Energy & Clean Industry, Tehran, Iran.
- [3] Wang, X., Li, M., Shen, Y., Yang, Y., Feng, H., & Li, J. (2019). Facile preparation of loess-coated membranes for multifunctional surfactant-stabilized oil-in-water emulsion separation. *Green Chemistry*, 21(11), 3190-3199.

- [15] Rahebi, F. (2015). Simultaneous extraction of fresh water and clean energy in Abdaria solar refinery: green ideas for sustainable development. Paper presented at the National conference on optimization of water consumption in industry, challenges and solutions, Isfahan, Iran..
- [16] Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, 65, 67-123.
- [17] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251-283.
- [18] Cui, Y., Xie, J., Liu, J., Wang, J., & Chen, S. (2017). A review on phase change material application in building. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(6).
- [19] Koca, A., Oztop, H. F., Koyun, T., & Varol, Y. (2008). Energy and exergy analysis of a latent heat storage system with phase change material for a solar collector. *Renewable Energy*, 33(4), 567-574.
- [20] Vakilaltojjar, S. M., & Saman, W. (2001). Analysis and modelling of a phase change storage system for air conditioning applications. *Applied Thermal Engineering*, 21(3), 249-263.
- [21] Mulligan, J. C., Colvin, D. P., & Bryant, Y. G. (1996). Microencapsulated phase-change material suspensions for heat transfer in spacecraft thermal systems. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 33(2), 278-284.
- [22] Zarezade, Z., Basharat, A., Atighi, M., Zohri, S., & Alizadeh, Z. (2023). On the heat transfer control methods in temperature regulating textiles. *Journal of Iranian Chemical Engineering*.
- [23] Babapoor, A., AhmadiMezjin, M., Hoseinasadi, A., Jokar, S. M., Paar, M., & Golestaneh, S. I. (2020). Simulation and optimization of thermal management in L-shaped tubes coated with phase change material nanofibers. *Journal of Iranian Chemical Engineering*, 18(107), 15-27.
- [24] Amir Reza, V. (2019). Paraffin as Phase Change Material. In S. Fathi Samir, *Paraffin* (Ch. 5). Rijeka: IntechOpen.
- [25] Fang, G., Sun, P., Zhao, M., & Zhang, W. (2022). Experimental and numerical simulation of paraffin-based ternary composite phase change material used in solar energy system. *Applied Thermal Engineering*, 214, 118618.
- [26] Fresh Water and Seawater Properties (2011). Retrieved from <https://itc.info/media/4048/75-02-01-03.pdf>.
- [27] Bruce, E. P., John, M. P., & John, P. O. C. (2001). *Properties of Gases and Liquids* (Fifth Edition ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- [28] Seawater Property Tables. (2017). Retrieved from <https://www.scribd.com/document/427001206/2017-MIT-Seawater-Property-Tables-r2a-pdf#>.
- [29] Holman, J. (2009). *Heat Transfer* (10 ed.). Singapore: McGraw-hill.