

مدل‌سازی فرآیند تبخیر آب در حوضچه‌های تبخیر خورشیدی و محاسبه سطح بهینه حوضچه تغلیظ

پژوهش‌نفت

سال بیست و دوم

شماره ۷۱

صفحه ۱۲۶-۱۱۷، ۱۳۹۱

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۲/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله ۹۱/۲/۱۴

مریم سعدی^{۱*}، کبری رهبر شمس کار^۲ و ابراهیم علایی^۲

۱- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده مهندسی توسعه، واحد مدل‌سازی و کنترل

۲- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، واحد کودهای شیمیایی و مواد معدنی

sadim@ripi.ir

چکیده

در این تحقیق یک مدل جامع ریاضی برای مدل‌سازی فرآیند تبخیر آب و تغلیظ تلخابه از حوضچه‌های تبخیر خورشیدی که به منظور تغلیظ تلخابه و استحصال نمک‌های معدنی با ارزش در پتروشیمی بندر امام مورد استفاده قرار می‌گیرد، توسعه داده شده است. در این مدل، تابش خورشیدی تنها منبع تامین انرژی حرارتی می‌باشد. علاوه بر انرژی رسیده به حوضچه تبخیر، همه راه‌های انتقال و اتلاف انرژی تابشی مانند انتقال حرارت از طریق هدایت به کف و دیواره استخر، انتقال حرارت تشعشی به فضای اطراف، انتقال حرارت جا به جایی با محیط اطراف و اتلاف حرارتی ناشی از تبخیر نیز در مدل جامع ریاضی لحاظ شده است. به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی انجام گرفته، پیش‌بینی‌های مدل در خصوص تغییر غلظت تلخابه با زمان با داده‌های اندازه‌گیری شده از واحد صنعتی مقایسه گردید که نتایج این مقایسه نشان‌دهنده دقت بالای مدل ریاضی ارائه شده در پیش‌بینی تغییرات خواص تلخابه در زمان‌های مختلف می‌باشد. پس از مدل‌سازی فرآیند

تبخیر با در نظر گرفتن همه پارامترهای موثر، سطح بهینه حوضچه تبخیر با توجه به شرایط عملیاتی مانند حجم اولیه تلخابه و غلظت‌های ورودی و نهایی و همچنین محدودیت زمانی کارکرد حوضچه‌های تبخیر واحد کلر آلکالی پتروشیمی بندر امام محاسبه گردید.

واژه‌های کلیدی: حوضچه تبخیر خورشیدی، مدل‌سازی، انرژی خورشیدی، سطح بهینه، تلخابه

مقدمه

مواد معدنی با ارزش را می‌توان با استفاده از حوضچه‌های تبخیر خورشیدی از محلول تلخابه بازیابی نمود. پروسه تجاری تهیه نمک‌های معدنی با استفاده از حوضچه‌های تبخیر، امروزه در نقاط مختلفی از دنیا مانند: اردن، آمریکا، مکزیک، شیلی، چین، استرالیا، آفریقا و کشورهای جنوب اروپا رواج دارد.

در حوضچه‌های تبخیر خورشیدی، تبخیر آب به روش طبیعی به خصوصیات هوای محیط از قبیل: دمای هوا، سرعت وزش باد، رطوبت و میزان تابش خورشیدی و مشخصات تلخابه مورد استفاده شامل دما، دانسیته و غلظت نمک بستگی دارد [۲]. تا کنون تحقیقات و مطالعات فراوانی بر روی کاربرد حوضچه‌های تبخیر خورشیدی به منظور استفاده از انرژی تابشی خورشید در مناطق مختلف جهان انجام شده و فرآیند تغلیظ تلخابه در حوضچه‌های تبخیر از دیدگاه ریاضی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. این مطالعات شامل مدل‌سازی و بهینه‌سازی حوضچه‌های تبخیر خورشیدی [۳-۷] و ارائه روابط ریاضی برای محاسبه شدت تبخیر آب از حوضچه‌های خورشیدی می‌باشد [۸-۱۱].

با وجود مزیت‌های فراوان کاربرد حوضچه تبخیر خورشیدی، تا کنون مطالعه جامع و کاملی برای استفاده از حوضچه‌های تبخیر خورشیدی به منظور تغلیظ تلخابه‌ها و دورریزهای واحدهای پتروشیمی در ایران گزارش نشده است. در صورت داشتن یک مدل ریاضی جامع و کامل، می‌توان با پیش‌بینی رفتار و عملکرد فرآیند تغلیظ تلخابه در حوضچه‌های تبخیر خورشیدی، سطح بهینه حوضچه تغلیظ را به منظور رسیدن به غلظت دلخواه در محدوده زمان بارگیری مجاز، محاسبه نمود. بدین ترتیب با اشغال حداقل سطح مورد نیاز، می‌توان در محدوده زمانی مجاز به غلظت دلخواه رسید.

بر این اساس، در این پژوهش با هدف مطالعه و بررسی فرآیند تبخیر آب در حوضچه‌های تبخیر خورشیدی در واحد کلر آلکالی پتروشیمی بندر امام، یک مدل جامع ریاضی برای مدل‌سازی فرآیند تبخیر به منظور پیش‌بینی تغییرات غلظت و حجم تلخابه بر حسب زمان، میزان آب تبخیر شده و نمک رسوب یافته توسعه داده شد. سپس با استفاده از این مدل، حجم بهینه حوضچه تعیین گردید، تا بتوان در کمترین سطح ممکن و در بازه زمانی مجاز، به غلظت دلخواهی از تلخابه دست یافت.

مدل‌سازی ریاضی

در بررسی ریاضی عملکرد حوضچه‌های تبخیر خورشیدی، لازم است میزان انرژی‌های دریافتی و اتلاف حرارتی

در واقع تهیه نمک‌های معدنی از تلخابه از طریق تبخیر محلول و کریستالیزاسیون اجزاء تلخابه از روش کاهش حجم انجام می‌گیرد که با استفاده از این روش می‌توان ترکیبات معدنی شامل یداین، بروماین، پتاسیم سولفات و منیزیم کلرید را بازیابی نمود [۱]. به عنوان نمونه با استفاده از یک حوضچه تبخیر خورشیدی به مساحت 130 km^2 ، مواد معدنی با ارزش را از محلول نمکی بحر المیت استخراج می‌نمایند [۱]. شرکت‌های زیادی به فکر استفاده از انرژی خورشیدی و حوضچه‌های تبخیر خورشیدی برای استحصال مواد با ارزش از محلول تلخابه هستند که می‌توان از این بین به واحد تولید پتاس Qinghai در چین، واحد تولید پتاس در منطقه Karlyuk در شوروی سابق و واحدهای تولید پتاس در شیلی در منطقه Atacama اشاره کرد. دلایل زیادی برای کاربرد روز افزون حوضچه‌های تبخیر خورشیدی وجود دارد که برخی از آنها عبارتند از: استفاده از انرژی رایگان خورشیدی، هزینه پایین تجهیزات مورد نیاز برای ساخت و راه‌اندازی سیستم‌های موجود در حوضچه‌های تبخیر خورشیدی و امکان جداسازی اولیه اجزای شورابه و کریستالیزاسیون ثانوی نمک‌های معدنی [۱].

با توجه به دلایل بالا، استفاده از حوضچه‌های تبخیر خورشیدی در نواحی که تابش خورشیدی زیادی دارند از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد. البته در برخی نواحی به دلیل محدودیت‌های زمین شناسی، توسعه حوضچه‌های تبخیر از نظر ساخت تا اندازه‌های مورد نظر امکان‌پذیر نبوده و در این موارد، بررسی ریاضی سیستم به منظور تعیین مساحت بهینه ضروری می‌باشد.

در پتروشیمی بندر امام، تلخابه خروجی از واحد کلر آلکالی علی‌رغم دارا بودن مقادیر قابل توجهی از املاح معدنی بسیار با ارزش و قابل استحصال مانند پتاسیم سولفید و منیزیم کلرید، یک دور ریز صنعتی محسوب می‌شود. با توجه به موقعیت جغرافیایی پتروشیمی بندر امام، استفاده از حوضچه‌های تبخیر خورشیدی برای تغلیظ تلخابه، یک راهکار بسیار مناسب و ارزان می‌باشد و بدین ترتیب می‌توان از انرژی خورشیدی که یک انرژی در دسترس و رایگان محسوب می‌شود، به عنوان منبع تامین انرژی مورد نیاز برای تغلیظ تلخابه استفاده نمود.

ارائه شده است که روابط مورد استفاده در این پژوهش در ادامه معرفی می‌شود [۱۲-۱۵].

میزان تابش مستقیم خورشیدی به عواملی نظیر ثابت خورشیدی، ضریب تصحیح گریز از مرکز زمین و زاویه برخورد بستگی دارد که بر اساس رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$G_0 = I_{SC} \varepsilon_0 \cos \theta \quad (2)$$

پارامترهای به کار رفته در رابطه بالا در ادامه به اختصار معرفی می‌گردند.

I_{SC} : ثابت خورشیدی نام دارد و نشان دهنده میزان تابش خورشیدی بر واحد سطح در جو زمین است و مقدار آن 1367 W/m^2 می‌باشد [۱۴].

ε_0 : ضریب تصحیح گریز از مرکز زمین است که به منظور اصلاح میزان تابش خورشیدی به سطح خارجی جو زمین در طول سال به دلیل بیضوی بودن مدار خورشید- زمین در رابطه ۲ وارد می‌گردد. ضریب تصحیح گریز از مرکز از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$\varepsilon_0 = 1 + 0.0342 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \quad (3)$$

θ : زاویه برخورد نامیده می‌شود و بیان‌گر زاویه بین راستای تابش مستقیم بر روی یک صفحه و راستای عمود بر آن صفحه می‌باشد. زاویه برخورد تابعی از عرض جغرافیایی (ϕ)، زاویه انحراف خورشیدی (δ)، ساعت خورشیدی (ω)، زاویه شیب (β) و زاویه سمت صفحه (γ) می‌باشد که توسط رابطه زیر بر اساس این پارامترها قابل محاسبه است:

$$\cos \theta = \sin \delta (\sin \phi \cos \beta + \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) + \quad (4)$$

$$\cos \delta \cos \omega (\cos \phi \cos \beta - \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) - \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega$$

برای صفحات افقی ($\beta=0$)، معادله مربوط به محاسبه زاویه برخورد به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \omega \cos \phi \quad (5)$$

پارامترهای مؤثر در زاویه برخورد با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۳ و ۱۴]:

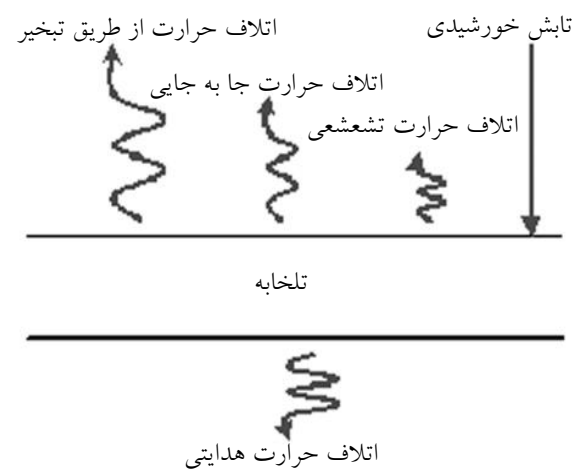
$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (6)$$

$$\omega = (n_n - 12) * 15 \quad (7)$$

باتوجه به توضیحات ارائه شده، رابطه ۲ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

حوضچه به دقت معرفی و محاسبه شوند. در حوضچه‌های تبخیر، منبع انرژی برای تامین حرارت مورد نیاز برای تغلیظ تلخابه، تابش خورشیدی می‌باشد و اتلاف‌های حرارتی نیز از طریق تبادل حرارت با محیط اطراف صورت می‌گیرد.

برای آشنایی بیشتر با انرژی‌های مؤثر در این فرآیند، ابتدا لازم است موازنه انرژی در اطراف حوضچه تبخیر نوشته شود. در شکل ۱ انرژی‌های مؤثر به طور شماتیک نشان داده شده که از روی آن می‌توان موازنه انرژی را به دست آورد.



شکل ۱- نمایش انرژی‌های مؤثر در حوضچه تبخیر خورشیدی

تجمع حرارتی = اتلاف حرارتی - حرارت رسیده

$$q_{in} - q_{out} = q^0 \quad (1)$$

در حوضچه‌های تبخیر خورشیدی، انرژی رسیده همان انرژی تابشی خورشید می‌باشد و راه‌های اتلاف حرارت عبارتند از: اتلاف حرارت از طریق جا به جایی، تشعشع و تبخیر بین تلخابه و هوای اطراف و همچنین اتلاف حرارت از طریق هدایت بین تلخابه و کف استخر. روابط ریاضی مورد استفاده جهت محاسبه پارامترهای مؤثر در موازنه حرارتی در ادامه ارائه می‌گردد.

محاسبه انرژی تابش خورشیدی

در فرآیند تبخیر آب از سطح حوضچه‌های تغلیظ، انرژی تابشی خورشید به عنوان تنها عامل تامین انرژی مورد نیاز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و باید مقدار آن به دقت محاسبه گردد. میزان انرژی دریافتی به پارامترهای مختلفی بستگی دارد و روابط متعددی برای محاسبه آن

یکی دیگر از راه‌های اتلاف حرارت، انتقال حرارت از طریق کف استخر می‌باشد. در این حالت اختلاف دمای محتویات استخر و پوشش کف، عامل انتقال حرارت می‌باشد. رابطه ریاضی مورد استفاده به صورت زیر است [۲۰]:

$$q_{\text{Cond.}} = U_{\text{Gr.}} (T_{\text{brine}} - T_{\text{Gr.}}) \quad (13)$$

$$U_{\text{Gr.}} = 0.999 \left(\frac{k_{\text{Gr.}}}{d_{\text{Gr.}} - d} \right) + 1.37 \left(\frac{k_{\text{Gr.}} \cdot \text{Perpond}}{A} \right) \quad (14)$$

تشعشع گرمایی از محتویات سطح استخر یکی دیگر از راه‌های اتلاف حرارت می‌باشد. برای محاسبه اتلاف حرارت تشعشعی نیز معادلات متعددی در مقالات انتشار یافته که رابطه مورد استفاده در این تحقیق در زیر ارائه شده است [۱۶ و ۱۷]:

$$q_{\text{Rad.}} = \sigma \varepsilon (T_{\text{brine}}^4 - T_{\text{sky}}^4) \quad (15)$$

$$T_{\text{sky}} = T_{\text{air}} + (0.55 + 0.061 \sqrt{P_{\text{air}}})^{1/4} \quad (16)$$

یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های انتقال حرارت در یک استخر خورشیدی، اتلاف حرارت از طریق تبخیر می‌باشد. اتلاف حرارت از طریق تبخیر به عوامل متعددی از جمله: رطوبت نسبی، فشار هوا، دمای هوا، دمای سطح تلخابه، فشار اتمسفری و ظرفیت حرارتی تلخابه بستگی دارد. رابطه مورد استفاده در این مقاله برای محاسبه اتلاف حرارتی از طریق تبخیر به شرح زیر است [۱۷ و ۱۹]:

$$q_{\text{Evap.}} = \frac{h_c \lambda (P_{\text{brine}} - P_{\text{air}})}{1.6 * C_{p\text{air}} P_{\text{atm}}} \quad (17)$$

$$\lambda = 2499 - 2.386 * (T_{\text{brine}} - 273) \quad (18)$$

$$P_{\text{brine}} = \exp \left(18.403 - \frac{3885}{(T_{\text{brine}} - 273) + 230} \right) \quad (19)$$

$$P_{\text{air}} = R_h * \exp \left(18.403 - \frac{3885}{(T_{\text{air}} - 273) + 230} \right) \quad (20)$$

تعیین جرم آب تبخیر شده

اگر حرارتی مانند $q_{\text{Evap.}}$ صرف تبخیر آب (شیرین) گردد، رابطه مورد استفاده برای تعیین جرم آب تبخیر شده به صورت زیر خواهد بود [۲]:

$$q_{\text{Evap.}} * \Delta t = m_{\text{Evap.}} * \lambda \quad (21)$$

$$m_{\text{Evap.}} = \frac{q_{\text{Evap.}} * \Delta t}{\lambda} \quad (22)$$

در فرآیند تغلیظ تلخابه، آب موجود در حوضچه دارای مقدار زیادی نمک‌های معدنی است که با تبخیر آب، غلظت نمک‌های محلول هم بیشتر می‌شود. با افزایش غلظت نمک‌های محلول در تلخابه در اثر تبخیر آب، فشار

$$G_0 = I_{sc} \varepsilon_0 \cos \theta = I_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \cos \theta \quad (8)$$

رابطه (۸) نشان‌دهنده میزان انرژی تابشی خورشید است. اما با توجه به این نکته که تنها بخشی از انرژی تابیده شده به هر سطح جذب می‌شود، برای محاسبه میزان انرژی جذب شده در واحد سطح لازم است میزان انرژی تابشی دریافتی با استفاده از ضریب جذب تصحیح گردد. ضریب جذب (α) جزیبی از میزان انرژی تابیده شده به یک سطح است که توسط آن جذب می‌شود. با توجه به توضیحات بالا، می‌توان میزان انرژی خورشیدی جذب شده در واحد سطح را با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$q_{\text{Solar}} = G_0 \alpha = (I_{sc} \varepsilon_0 \cos \theta) \alpha \quad (9)$$

برای محاسبه انرژی جذب شده در یک سطح معین مانند استخر کافی است رابطه بالا را در مساحت استخر ضرب نماییم.

$$Q_{\text{Solar}} = q_{\text{solar}} * A \quad (10)$$

محاسبه اتلاف‌های حرارتی

همه انرژی رسیده به حوضچه صرف افزایش دمای تلخابه نشده و بخشی از انرژی دریافتی از راه‌های مختلف مانند جا به جایی با محیط اطراف، انتقال حرارت به طریق هدایت از کف و دیواره‌های حوضچه به زمین و تشعشع به محیط اطراف به هدر می‌رود. بنابراین در ادامه مدل‌سازی، روابط ریاضی مربوط به محاسبه اتلاف‌های حرارتی ارائه شده و با استفاده از این روابط، همه اتلاف‌های انرژی محاسبه می‌گردد. معادلات متفاوتی توسط محققین مختلف برای محاسبه اتلاف‌های حرارتی پیشنهاد شده [۲ و ۱۶-۲۰] که معادلات مورد استفاده در این پژوهش در ادامه معرفی شده است.

بخشی از انرژی جذب شده توسط سطح استخر از طریق جا به جایی با هوای محیط به هدر می‌رود. گرمای تلف شده از طریق جا به جایی با هوای محیط به عواملی همچون: دمای محیط، دمای تلخابه و ضریب انتقال حرارت بین محیط و تلخابه بستگی دارد که بر اساس رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۶]:

$$q_{\text{Conv.}} = h_c (T_{\text{brine}} - T_{\text{air}}) \quad (11)$$

$$h_c = 5.7 + 3.8 * u \quad (12)$$

استخر تعیین شد. در نهایت با توجه به دبی و غلظت تلخابه ورودی به حوضچه تغلیظ، غلظت نهایی تلخابه و همچنین محدودیت زمانی تخلیه حوضچه با توجه به زمان‌های بارگیری حوضچه واحد کلر آلکالی که به طور متوسط هر دو ماه یکبار صورت می‌گیرد، سطح بهینه حوضچه تغلیظ محاسبه گردید که نتایج آن در ادامه ارائه شده است.

بحث و نتایج

یکی از مهم‌ترین اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی فرآیند تبخیر از حوضچه خورشیدی، اطلاعات مربوط به مختصات جغرافیایی مانند عرض جغرافیایی منطقه و اطلاعات آب و هوایی نظیر متوسط دمای هوا، میزان رطوبت و سرعت وزش باد می‌باشد. این داده‌ها از اطلاعات آب و هوایی فرستاده شده از بندر ماهشهر و متوسط گیری از اطلاعات چندین سال استخراج گردید و در مدل مورد استفاده قرار گرفت.

برای تعیین ضریب λ_p به منظور محاسبه چگالی تلخابه، محلول‌های مختلفی از تلخابه با درجه شوری متفاوت در آزمایشگاه تهیه و چگالی آن اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. سپس با استفاده از تکنیک‌های ریاضی مانند روش می‌نیم مربعات خطا، مقدار عددی ضریب λ_p از طریق می‌نیم کردن مجموع مربعات خطا بین داده‌های تجربی و محاسباتی، تعیین گردید. برای این منظور جعبه ابزار برازش منحنی^۳ نرم‌افزار MATLAB مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱- چگالی تلخابه در درجه‌های شوری مختلف

| درجه شوری | چگالی (kg/m ³) |
|-----------|----------------------------|
| ۰/۳۰۳۴ | ۱۲۶۱ |
| ۰/۳۸۰۱ | ۱۳۳۲ |
| ۰/۴۰۷۶ | ۱۳۵۷ |

نتایج مربوط به تعیین ضریب λ_p بر اساس داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از جعبه ابزار برازش منحنی در شکل ۲ رسم شده است. همان‌گونه که در شکل نیز مشهود است، رابطه ارائه شده از دقت بالایی برخوردار است.

بخار تلخابه کاهش یافته و در نتیجه از شدت تبخیر آب کاسته می‌شود. بنابراین لازم است که معادله ۲۲ با استفاده از ضریب تصحیح (C_{Evap})، برای محاسبه جرم آب تبخیر شده در یک محلول نمکی به صورت زیر اصلاح شود [۲]:

$$m_{Evap} = \frac{q_{Evap} * \Delta t}{\lambda} C_{Evap} \quad (23)$$

موازنه انرژی

پس از محاسبه انرژی‌های موثر در اطراف حوضچه مورد بررسی و شناسایی رابطه مربوط به محاسبه میزان جرم آب تبخیر شده و با توجه به پارامترهای موثر بر موازنه حرارتی، می‌توان بر اساس شکل ۱، موازنه حرارتی حوضچه را به صورت زیر ارائه نمود:

$$q_{Solar} - (q_{Conv} + q_{Cond} + q_{Rad} + q_{Evap}) = d * \rho_{brine} * C_p * \frac{dT_{brine}}{dt} \quad (24)$$

رابطه بالا بر اساس واحد سطح است که با ضرب طرفین در سطح می‌توان معادله کلی را به صورت زیر ارائه کرد:

$$Q_{Solar} - (Q_{Conv} + Q_{Cond} + Q_{Rad} + Q_{Evap}) = V \rho_{brine} * C_p * \frac{dT_{brine}}{dt} \quad (25)$$

همان‌گونه که در موازنه انرژی هم آمده، برای تعیین دمای استخر، چگالی و ظرفیت حرارتی تلخابه در غلظت‌های مختلف مورد نیاز است. روابط ریاضی مورد استفاده برای محاسبه دانسیته و ظرفیت حرارتی تلخابه به صورت زیر می‌باشد [۱۵]:

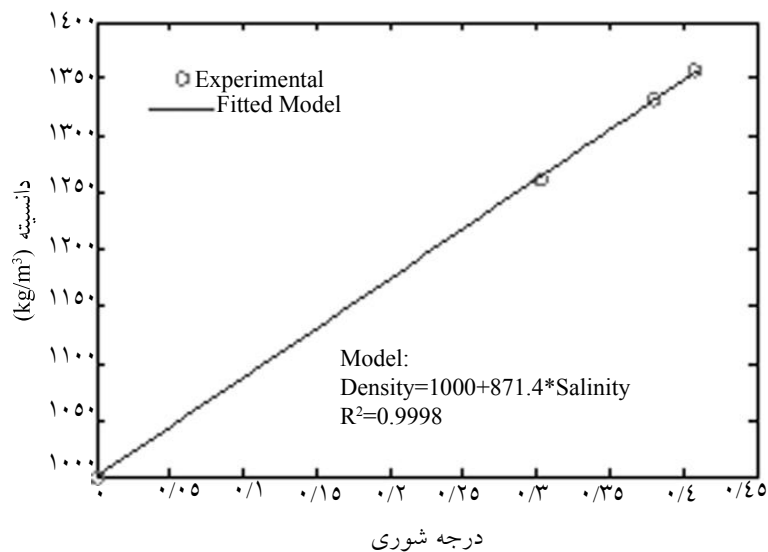
$$\rho_{brine} = \rho_w + \lambda_p C \quad (26)$$

$$C_p_{brine} = 4180 + 4.396C + 0.0048C^2 \quad (27)$$

در روابط بالا پارامتر C معرف درجه شوری تلخابه^۱ است که به صورت نسبت جرم نمک تلخابه در واحد حجم به جرم تلخابه در واحد حجم تعریف می‌شود. λ_p نیز یک ضریب تجربی است که برای محاسبه دانسیته تلخابه در غلظت‌های نمکی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و مقدار آن بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی محاسبه می‌شود.

در این تحقیق، ابتدا میزان انرژی‌های دریافتی و اتلاف‌های حرارتی از سطح و کف استخر بر اساس روابط ارائه شده، محاسبه گردید. سپس بر اساس موازنه انرژی، تغییرات پارامترهایی مانند غلظت تلخابه، دمای تلخابه و همچنین میزان آب تبخیر شده و به دنبال آن تغییرات حجم آب درون

1. Salinity
2. Least Square
3. Curve Fitting Toolbox



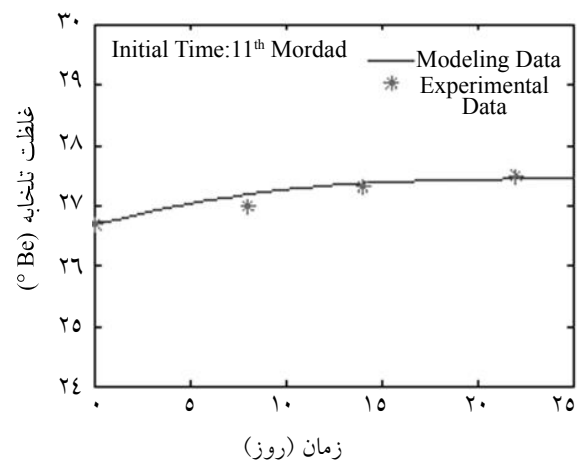
شکل ۲- تغییرات چگالی تلخابه بر حسب درجه شوری

غلظت تلخابه افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل نیز کاملاً مشهود است، اختلاف بین نتایج مدل‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده از واحد صنعتی بسیار اندک است. بنابراین مدل ارائه شده در این تحقیق قادر است با دقت بالایی تغییرات غلظت تلخابه بر حسب زمان را پیش‌بینی نماید که این مسأله موید این مطلب است که مدل‌سازی انجام شده در این تحقیق با اتفاقاتی که در واقعیت روی می‌دهد، مطابقت دارد و مدل توسعه داده شده در این تحقیق می‌تواند تغییرات روی داده در حوضچه استخر خورشیدی را با دقت بالایی پیش‌بینی نماید.

پس از اطمینان از دقت مدل‌سازی و قابلیت بالای مدل در پیش‌بینی عملکرد حوضچه تبخیر، سطح بهینه حوضچه‌های تبخیر بر اساس داده‌های صنعتی و با استفاده از مدل توسعه داده شده محاسبه می‌گردد. به همین منظور داده‌های مربوط به واحد صنعتی شامل غلظت‌های ورودی و خروجی مربوط به دو حوضچه تبخیر اولیه و ثانویه در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به محدودیت زمانی کارکرد حوضچه‌های تبخیر بر اساس زمان بارگیری و همچنین حجم تلخابه ورودی و غلظت‌های ورودی و خروجی هر حوضچه، سطح بهینه حوضچه‌های تبخیر در بازه‌های زمانی مختلف محاسبه گردید. نتایج نهایی مربوط به سطح بهینه دو حوضچه تبخیر اولیه و ثانویه در جدول ۳ ارائه شده است.

پس از تعیین ضریب ρ_p با توجه به مشخصات جغرافیایی منطقه، اطلاعات آب و هوایی و داده‌ها و محدودیت‌های عملیاتی، فرآیند تبخیر از حوضچه تبخیر خورشیدی واحد کلر آلکالی پتروشیمی بندر امام بر اساس مدل جامع ریاضی، مدل‌سازی گردید. لازم است که به منظور اطمینان از صحت مدل، نتایج مدل‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده از حوضچه تبخیر واحد کلر آلکالی مقایسه گردد. به همین منظور پیش‌بینی‌های مدل در خصوص تغییرات غلظت تلخابه بر حسب زمان با نمونه‌برداری‌های انجام گرفته از واحد کلر آلکالی در شکل ۳ رسم شده است.

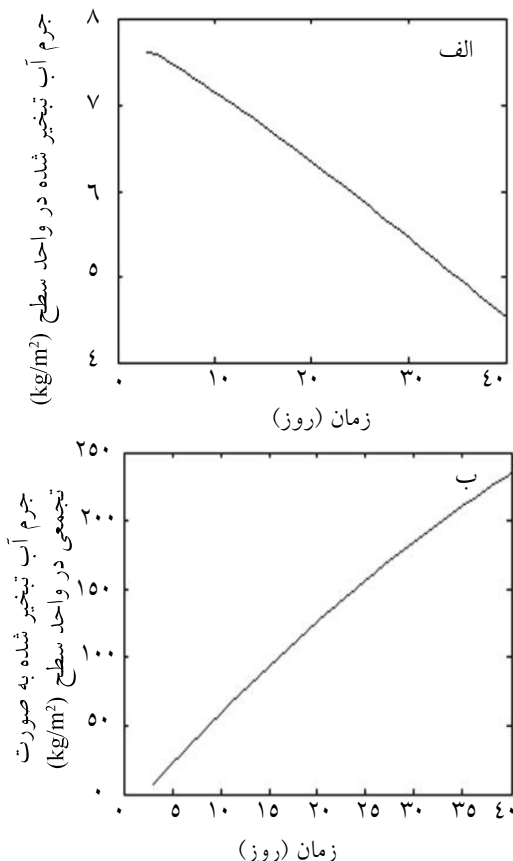


شکل ۳- تغییرات غلظت تلخابه (Be) بر حسب زمان (مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با نتایج مدل‌سازی)

مطابق انتظار با گذشت زمان و بر اثر تبخیر آب حوضچه،

کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش به تغییر شرایط جوی و تأثیر روزهای سال در انرژی تابشی خورشید مربوط می‌گردد. همان‌گونه که انتظار می‌رود و اطلاعات آب و هوایی منطقه نیز تایید می‌نماید، متوسط دمای هوا در این منطقه در ماه‌های خرداد و تیر از دو ماه اردیبهشت و خرداد بیشتر است. لذا زمان لازم برای تغلیظ تلخابه تا یک غلظت معین در این بازه زمانی کمتر خواهد بود.

تغییرات مربوط به میزان آب تبخیر شده بر حسب زمان در شکل‌های (۵. الف) و (۵. ب) رسم شده است. شکل (۵. الف) به میزان آب تبخیر شده از واحد سطح حوضچه در هر روز اختصاص دارد. با دقت در شکل درمی‌یابیم که با گذشت زمان، به دلیل تغلیظ تلخابه، شدت تبخیر آب و به دنبال آن جرم آب تبخیر شده در هر روز کاهش می‌یابد. میزان آب تبخیر شده به صورت تجمعی در کل زمان تغلیظ در شکل (۵. ب) مشاهده می‌شود. مطابق انتظار، با افزایش زمان، حجم کل آب تبخیر شده افزایش می‌یابد. پیوسته بودن فرآیند تبخیر در این شکل‌ها به روشنی قابل ملاحظه است.



شکل ۵- میزان آب تبخیر شده به ازای واحد سطح تلخابه الف) در هر روز و ب) به صورت تجمعی

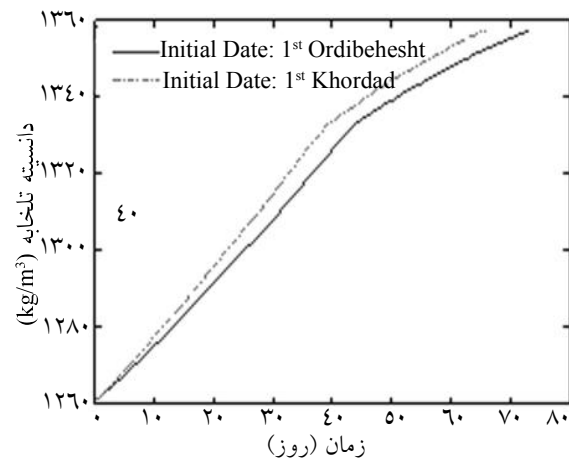
جدول ۲- اطلاعات واحد صنعتی

| | |
|--|--------------------------|
| چگالی تلخابه ورودی به حوضچه اول | ۱/۲۶۱ gr/cm ³ |
| چگالی تلخابه خروجی از حوضچه اول و ورودی به حوضچه دوم | ۱/۳۳۲ gr/cm ³ |
| چگالی تلخابه خروجی از حوضچه دوم | ۱/۳۵۷ gr/cm ³ |

جدول ۳- سطوح بهینه حوضچه‌های تبخیر

| | |
|-------------|------------------------------|
| شماره حوضچه | سطح حوضچه (km ²) |
| حوضچه اول | ۰/۰۲۸۵۷ |
| حوضچه دوم | ۰/۰۱۶۵۳ |

بر اساس سطح بهینه محاسباتی برای حوضچه‌های تبخیر، مدل ریاضی توسعه داده شده در بازه‌های زمانی مختلف به منظور تعیین تغییرات غلظت تلخابه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج اجرای برنامه برای دو بازه زمانی مختلف در شکل ۴ رسم شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با گذشت زمان، چگالی محتویات حوضچه تبخیر افزایش می‌یابد. نقطه شکستی که در این منحنی‌ها دیده می‌شود، مربوط به تغییر حوضچه تبخیر و هدایت تلخابه به حوضچه تبخیر ثانویه است. کاملاً بدیهی است که با گذشت زمان و غلیظ‌تر شدن تلخابه، افزایش چگالی تلخابه با شدت کمتری روی می‌دهد.



شکل ۴- تغییرات چگالی تلخابه در دو بازه زمانی مختلف با دقت در شکل بالا درمی‌یابیم که مدت زمان لازم برای تغلیظ تلخابه تا رسیدن به یک غلظت دلخواه، در بازه‌های زمانی مختلف با یکدیگر متفاوت می‌باشد. به عنوان مثال اگر عملیات تغلیظ از اول اردیبهشت ماه شروع شود، زمان لازم برای رسیدن به تلخابه‌ای با چگالی ۱۳۵۷ (kg/m³) حدود ۷۲ روز خواهد بود. در حالی که اگر شروع عملیات تغلیظ ابتدای خرداد ماه باشد، این زمان به حدود ۶۵ روز

تغلیظ تلخابه و استحصال نمک‌های معدنی در پتروشیمی بندر امام مورد استفاده قرار می‌گیرد، در محیط نرم افزار MATLAB مدل‌سازی گردید. همان‌گونه که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، با استفاده از مدل توسعه داده شده می‌توان تغییرات غلظت تلخابه در بازه‌های زمانی مختلف را با دقت بالایی پیش‌بینی نمود. سپس بر اساس مدل ریاضی توسعه داده شده، سطح بهینه حوضچه‌های تبخیر بر اساس اطلاعات واحد صنعتی به منظور دستیابی به تلخابه‌ای با غلظت مورد نیاز در بازه زمانی دلخواه، محاسبه گردید. بدین ترتیب با کاربرد مدل‌سازی انجام گرفته در این تحقیق، علاوه بر اطلاع دقیق از نحوه تغییرات غلظت تلخابه در بازه‌های زمانی مختلف در حوضچه‌های تبخیر، می‌توان سطح بهینه حوضچه‌های تبخیر را بر اساس حجم تلخابه، غلظت‌های ورودی و خروجی به هر حوضچه و محدودیت زمانی کارکرد حوضچه‌ها محاسبه نمود.

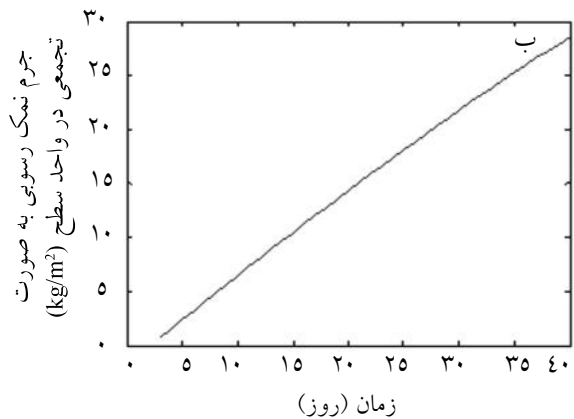
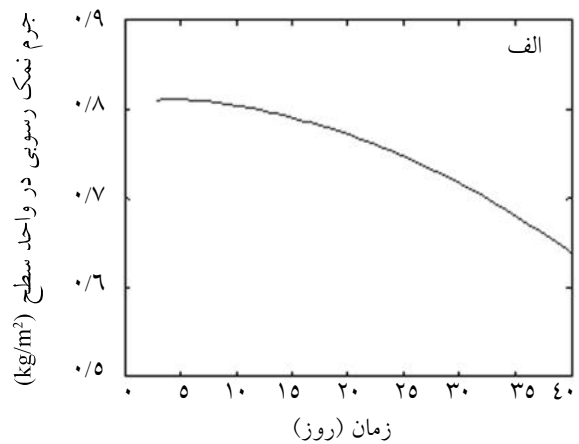
تقدیر و تشکر

اعتبارات مورد نیاز جهت انجام این تحقیق از طریق مدیریت محترم پژوهش و فناوری شرکت ملی پتروشیمی تامین گردیده است که در همین جا از حمایت‌های مالی ایشان قدردانی می‌گردد.

علائم اختصاری

- A : سطح حوضچه
 Be : عدد بومه (Baume)، $(\text{Specific Density}=145/(145-Be))$
 C : غلظت نمکی تلخابه
 C_e : عدد دالتون $(10^{-3} \times 15)$
 C_{Evap} : ضریب تصحیح (ارتباط بین جرم آب تبخیر شده در محلول نمکی و آب خالص)
 Cp_{air} : ظرفیت حرارتی هوا
 Cp_{brine} : ظرفیت حرارتی محلول تلخابه
 Cp_{salt} : ظرفیت حرارتی نمک
 d : ارتفاع آب
 d_{Gr} : عمق خاک
 E : شدت جریان تبخیری
 h_c : ضریب انتقال حرارت جا به جایی

تغییرات مربوط به میزان رسوب نمک بر حسب زمان در شکل‌های (۶. الف) و (۶. ب) رسم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این تغییرات مشابه تغییرات میزان آب تبخیر شده از استخر می‌باشد. در این حالت نیز با گذشت زمان و افزایش غلظت تلخابه، به دلیل کاهش آب تبخیر شده در هر روز، میزان نمک رسوبی در هر روز (شکل ۶. الف) کاهش می‌یابد. تغییرات میزان کل نمک رسوب یافته که در شکل (۶. ب) مشاهده می‌شود، مشابه شکل (۵. ب) می‌باشد. در این حالت نیز، مطابق انتظار میزان نمک رسوب یافته (به صورت تجمعی) از ابتدای زمان تغلیظ تلخابه به صورت پیوسته افزایش می‌یابد.



شکل ۶- میزان نمک رسوب یافته به ازای واحد سطح تلخابه (الف) در هر روز و (ب) به صورت تجمعی

نتیجه‌گیری

با استفاده از حوضچه‌های تبخیر می‌توان در مناطقی که از تابش بالای خورشیدی برخوردارند، از انرژی رایگان خورشیدی به منظور تغلیظ تلخابه و استحصال نمک‌های معدنی با ارزش استفاده نمود. در این تحقیق، فرآیند تبخیر آب از حوضچه‌های تبخیر خورشیدی که به منظور

| | |
|---|--|
| T_{soil} : دمای کف حوضچه بر حسب درجه کلوین | h_r : ضریب انتقال حرارت تشعشی |
| t : زمان | I_{sc} : ثابت خورشیدی |
| U_{Gr} : ضریب کلی انتقال حرارت هدایتی | k_{Gr} : ضریب انتقال حرارت هدایتی |
| u : سرعت باد | m_{Evap} : جرم آب تبخیر شده |
| V : حجم | n : شماره روز در یک سال (شماره‌گذاری بر اساس سال میلادی انجام می‌گیرد) |
| علائم یونانی | P_{air} : فشار بخار آب در هوا |
| α : ضریب جذب سطح تلخابه | P_{atm} : فشار اتمسفری |
| β : زاویه شیب | P_{brine} : فشار بخار اشباع آب در سطح تلخابه |
| Δt : بازه زمانی | P_v : فشار جزئی بخار آب در هوا |
| δ : زاویه انحراف خورشیدی | P_{vsat} : فشار بخار اشباع آب در سطح محلول |
| ε : ضریب پخش سطح تلخابه | Q : انرژی کلی |
| ε_0 : ضریب تصحیح گریز از مرکز زمین | q : انرژی در واحد سطح |
| ε_p : نسبت جرم مولکولی آب به جرم مولکولی هوای خشک | q_{Cond} : اتلاف حرارت از طریق هدایت |
| Φ : عرض جغرافیایی | q_{Conv} : اتلاف حرارت از طریق جا به جایی |
| γ : زاویه سمت صفحه | q_{Evap} : اتلاف حرارت از طریق تبخیر |
| λ : حرارت نهان تبخیر آب | q_{Rad} : اتلاف حرارت از طریق تشعشع |
| θ : زاویه برخورد | q_{Solar} : انرژی تابشی |
| ρ_{brine} : دانسیته محلول تلخابه | R : ثابت گازها |
| ρ_{water} : دانسیته آب | R_h : رطوبت نسبی |
| σ : ضریب استفان بولتزمن | T_{air} : دمای هوا |
| ω : زاویه ساعت خورشیدی | T_{brine} : دمای تلخابه |
| | T_{sky} : دمای آسمان |

مراجع

- [1]. Stanley W.N., and Arnarin A.M., *Start up of a large solar evaporation system for the production of carnallite from the dead sea brine*, Kali 91, Second International Potash Conference, Hamburg, Germany, May, 1991.
- [2]. Pereira M.C., Mendes J. F., and Horta P., *Advanced solar dryer for salt recovery from brine effluent of desalination med plant*, ISES Solar World Congress, Gutenberg, Sweden, June, 14-19, 2003.
- [3]. Al-Shayji K.A., *Modeling, simulation and optimization of large-scale commercial desalination plants*, PhD. Dissertation, Blacksburg, Virginia, 1998.
- [4]. Husain M., Patil P.S., Patil S.R., Samdarshi S.K., *Optimum size of non-convective zone for improved thermal performance of salt gradient solar pond*, Solar Energy, 74, 429-436, 2003.
- [5]. Garman M.A. , Muntasser M.A. , "Sizing and thermal study of salinity gradient solar ponds connecting with the MED desalination unit", Desalination 222, pp. 689-695, 2008.
- [6]. Zhang Y.Z., Ge X.S., Li Y.F. and Li C.D., "Mathematical simulation of evaporating brine by solar radiation for the production of salt", Journal of Thermal Science, 2, pp. 143-151, 1993.

- [7]. Agha K.R., Abughres S.M., and Ramadan A.M., "Design methodology for a salt gradient solar pond coupled with an evaporation pond", *Solar Energy*, 72, pp. 447-454, 2002.
- [8]. Martinez J.M.M., Alvarez V.M, Gonzalez-Real M.M. and Baille A., "A simulation model for predicting hourly pan evaporation from meteorological data", *Journal of Hydrology*, 318, pp. 250-261, 2006.
- [9]. Tan S.B.K., Shuy E.B., and Chua L.H.C., "Modeling hourly and daily open-water evaporation rates in areas with an equatorial climate", *Hydrological Processes*, 21, pp. 486-499, 2006.
- [10]. Kokya B.A., and Kokya T.A., "Proposing a formula for the evaporation measurement from salt water resources", *Hydrological Processes*, 22, pp. 2005-2012, 2008.
- [11]. Akridge D.G., "Methods of calculating brine evaporation rates during salt production", *Journal of Archaeological Science*, 35, pp. 1453-1462, 2008.
- [12]. Duffie J. A., and Beckman W.A., *Solar Energy Thermal Processes*, John Wiley & Sons, 1974.
- [13]. Cooper P.I., "The absorption of radiation in solar stills", *Solar Energy*, 12, pp. 333-346, 1969.
- [14]. Akpabio L.E. and S.E. Etuk, "Relationship between global solar radiation and sunshine duration for Onne, Nigeria", *Turkish Journal of Physics*, 27, pp. 161-167, 2003.
- [15]. Jafarzadeh M.R., "Thermal behavior of a large salinity-gradient solar pond in the city of Mashhad", *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering*, 29, pp. 219-229, 2005.
- [16]. El Rafee M.M., and Al Marfie A.M., "Numerical simulation of the performance of the experimental salt-gradient solar pond (KESGSP)", *Energy Sources*, 15, pp. 145-158, 1993.
- [17]. Kurt H., Halici F., and Binark A.K., "Solar pond conception-experimental and theoretical studies", *Energy Conversion & Management*, 41, pp. 939-951, 2000.
- [18]. Sweeney D.G., Nixon J.B., Cromar N.J., and Fallowfield H.J., "Profiling and modeling of thermal changes in a large waste stabilization pond", *Water Science & Technology*, 51, pp. 163-172, 2005.
- [19]. Robitu M., Inard C., Mussy M., and Groleau D., "Energy balance study of water ponds and its influence on building energy consumption", 8th International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, Aug., pp. 11-14, 2003.
- [20]. Chiasson A.D., Spittler J.D., Rees S.J., and Smith M.D., "A model for simulating the performance of a shallow pond as a supplemental heat reject with closed loop ground source heat pump systems", *ASHRAE Transactions*, pp. 106, 107-121, 2000.