

## پایداری و بازده گرمایی یک استخر خورشیدی کوچک

علی اکبر بیدختی\* و علیرضا محمدنژاد\*\*

مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند

(دریافت مقاله: ۱۳۷۴/۱۰/۳۰ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۷۵/۸/۱۵)

چکیده - در این پژوهش، یک استخر خورشیدی کوچک با گرادیان نمک به مساحت متوسط  $1/8$  مترمربع که شامل سه ناحیه ذخیره گرمایی، ناحیه گرادیانی و ناحیه سطحی با عمقهای به ترتیب  $0/3$ ،  $0/27$  و  $0/07$  متر، ساخته شده است. شوری در ناحیه ذخیره ساز به طور یکنواخت  $200 \text{ gr/kg}$  است، از میزان شوری ناحیه گرادیانی به تدریج و به طور خطی از پایین به طرف بالا کاسته شده و ناحیه سطحی عمدتاً آب شیرین است. به منظور مطالعه چگونگی تغییرات دمای لایه‌های مختلف، بازدهی گرمایی استخر و فرسایش ناحیه گرادیانی، دما و شوری در عمقهای مختلف در طی  $30$  روز به طور پیوسته اندازه‌گیری شده است. دمای بیشینه ناحیه ذخیره ساز پس از حدود هشت روز به حدود  $65$  درجه سانتیگراد رسیده و بازده گرمایی استخر بین  $20$  تا  $35$  درصد محاسبه شد. فرسایش ضخامت ناحیه گرادیانی حدود  $2/5$  سانتیمتر در ماه است که با میزان محاسبه شده براساس عدد ریچاردسون که از مرتبه  $10^4$  است، همخوانی دارد. تغییرات شبانه روزی دمای ناحیه ذخیره گرمایی به دلیل کوچک بودن حجم، دارای دامنه نسبتاً زیاد حدود  $8$  درجه سانتیگراد است. با وجود بالا بردن دمای ناحیه ذخیره گرمایی و دیواره شیب دار، اثری از پدیده پخش دوجانبه در استخر ملاحظه نشده است.

## The Stability and Thermal Performance of a Small Solar Pond

A. A. Bidokhti and A. R. Mohamadnejad

Institute of Geophysics, Tehran University

**ABSTRACT-** A small salt gradient solar pond with an average surface area of  $1.8 \text{ m}^2$  and depth of  $0.8 \text{ m}$  has been tested. The depths of storage, gradient and surface zones are  $0.3$ ,  $0.27$  and  $0.07 \text{ m}$ , respectively. The temperature of the storage zone for the summer days reaches its maximum of  $65^\circ \text{ C}$  after about 8 days. Daily variation of the storage zone temperature was about  $8^\circ \text{ C}$  which is due to small volume of this zone. The thermal absorption of the pond varies between 35 to 20 percent of the total solar radiation, depending on the

\*\* مربی

\* استادیار

$D_s$	ضریب پخش نمک، معادله (۴) $m^2/s$	$R_s$	عدد پایداری، بی بعد، معادله (۷)	$\alpha$	ضریب انبساط گرمایی، $\frac{1}{C}$ ، معادله (۵)
$c$	مقدار ثابت، بی بعد، معادله (۱۰)	$R_i$	عدد ریچاردسون، بی بعد، معادله (۸)	$\beta$	ضریب تغییر چگالی بر اثر شوری، $\frac{1}{C}$ ، معادله (۱)
$F$	شار نمک، $\frac{gT}{kg}$ (m/s)، معادله (۳)	$S$	شوری، نمک $\frac{gT}{kg}$ محلول، معادله (۱)	$\delta W$	کار انجام شده، J، معادله (۸)
$g$	شتاب ثقل $(m/s^2)$ ، معادله (۸)	$T$	دما، $^{\circ}C$ ، معادله (۱)	$\delta K$	تغییر انرژی جنبشی، J، معادله (۸)
$h$	ضخامت لایه، m، معادله (۹)	$U$	سرعت نمونه همرفتی، معادله (۱۰) m/s	$\rho$	چگالی، $kg/m^3$ ، معادله (۱)
$n$	مقدار ثابت، بی بعد، معادله (۱۰)	$U_e$	سرعت درون آمیختگی، معادله (۱۰) m/s	$w$	سرعت قائم، m/s، معادله (۱۰)

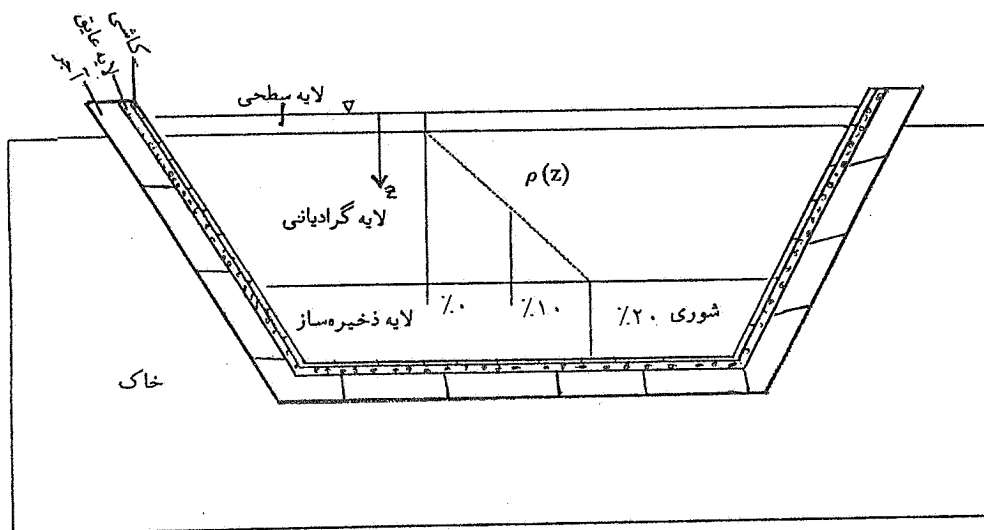
temperature of the storage zone. Salinity of the storage zone is about 200 gr/kg and the density gradient of the gradient zone is about  $5 \times 10^{-3} \text{ gr/cm}^4$  which with typical fluid velocity of the convective zone gives a Richardson number,  $R_i$ , of order of  $10^4$ . Erosion of the gradient zone based on this  $R_i$  is about 2.5 cm/month which is in agreement with the observations. Although the temperature of the storage zone reaches high values, with sloped wall, no sign of double diffusive convection was observed.

## ۱- مقدمه

با توجه به نیاز روز افزون بشر به انرژی و اینکه سوختهای فسیلی رو به اتمام است و سوختن آنها تولید آلودگیهای زیست - محیطی و خاصیت گلخانه‌ای در جو می‌کند، ضرورت استفاده از انرژیهای دیگر از جمله انرژی خورشیدی بیش از پیش احساس می‌شود. در طی چند دهه گذشته روشهای بسیار متنوعی برای این منظور ارائه شده که بعضاً به لحاظ اقتصادی و سادگی کاربرد، مقرون به صرفه است. استخر خورشیدی<sup>۱</sup> یکی از این روشهاست که در مقیاس بزرگ با هزینه کمتر نسبت به پروژه‌های مشابه قابل اجراست [۱]. از استخر خورشیدی می‌توان برای تولید انرژی برای مصارف گرم کردن فضاها، مسکونی و صنعتی و یا تولید برق و یا مصارف کارگاهی استفاده کرد.

ایران از لحاظ داشتن مقدار تابش خورشیدی سالیانه بالا و معادن نمک فراوان و برکه‌ها و دریاچه‌های نمک طبیعی، پتانسیل

بالایی در اجرای پروژه‌های استخر خورشیدی و کاربرد آنها دارد. طی چند دهه گذشته تحقیقات متعددی در کشورهای مختلف روی استخرهای خورشیدی صورت گرفته است، مثلاً در مرجع [۲] مروری بر اغلب آنها آمده است، اما در ایران کارهای انجام شده، به خصوص تجربی بسیار محدود بوده است. تحقیقات انجام شده اغلب روی نگهداری، دمای ناحیه ذخیره ساز<sup>۲</sup>، بازده گرمایی<sup>۳</sup>، برداشت گرما و جذب انرژی خورشیدی استخرهای خورشیدی بوده است. در یک استخر خورشیدی دمای ناحیه (لایه) ذخیره ساز به عوامل زیادی از جمله وسعت استخر، عمق لایه‌های مختلف و میزان تابش خورشید بستگی دارد. با تحقیقاتی که توسط سرنیوسان [۳] انجام گرفته نشان داده شده که دمای بیشینه ناحیه ذخیره ساز به طور مستقیم به وسعت استخر بستگی دارد. با زیاد شدن وسعت استخر، به دلیل اینکه نسبت سطوح جانبی به حجم کل ناحیه ذخیره ساز کم می‌شود، دمای ناحیه ذخیره ساز با وسعت آن به طور نمایی



شکل ۱- ساختار یک استخر خورشیدی و نمایی از ساختار سازه ای استخر

گرما به سطح استخر است و مشابه یک عایق شفاف عمل می کند. انتقال گرما از این لایه فقط با پخش (دیفیوژن) مولکولی میسر است که میزان آن بسیار کم است. نقش لایه سطحی، محافظت فیزیکی از لایه گرادیانی است. برای اینکه حرکت های تلاطمی و همرفتی ناشی از ناپایداری به وجود آمده در ناحیه ذخیره ساز نتواند به طرف سطح استخر نفوذ کند، ناحیه گرادیانی را با یک گرادیان چگالی پایدار برپا می کنند. یعنی شوری از بالا به طرف لایه ذخیره ساز به تدریج و به طور خطی زیاد می شود. این لایه مثل عایق شفاف جامد، جلوی حرکت های همرفتی را می گیرد، اما هدایت مولکولی گرما در آن باعث به وجود آمدن گرادیان دما می شود.

بنابراین در لایه گرادیانی، شوری و دما،  $S$  و  $T$  تابع  $z$  بوده و در نتیجه چگالی،  $\rho$  نیز تابعی از  $z$  است. معادله حالت برای آب عبارت است از [۵]:

$$\rho = \rho_r (1 - \alpha(T - T_r) + \beta(S - S_r)) \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب ضریب انبساط گرمایی و ضریب تغییر چگالی توام با تغییر غلظت نمک و  $T_r$  و  $S_r$  چگالی، شوری و دما در نقطه مرجع هستند. معادله (۱) را می توان، با در نظر گرفتن محور  $z$  به طرف پایین، به شکل زیر نوشت:

$$\frac{1}{\rho_r} \frac{d\rho}{dz} = -\alpha \frac{dT}{dz} + \beta \frac{dS}{dz} \quad (2)$$

افزایش می یابد. اکبرزاده نیز تحقیقاتی راجع به اثر تخریبی دیواره های مایل روی ناحیه گرادیانی<sup>۴</sup> کرده و نشان داده که دیواره های مایل ایجاد سلول های همرفتی در ناحیه گرادیانی می کنند [۴].

هدف از اجرای این پروژه، مطالعه تجربی روی یک نمونه استخر خورشیدی در مقیاس کوچک، برای مطالعه پایداری، بازدهی گرمایی و نحوه نگهداری در یک ناحیه در ایران است. نتایج آن می تواند در طرح های صنعتی و به ویژه برای تامین انرژی گرمایی در واحدهای مسکونی در روستاهای دورافتاده و یا در مقیاس بزرگتر برای تولید برق به کار رود.

## ۲- ساختار و پایداری یک استخر خورشیدی

مطابق شکل (۱)، یک استخر خورشیدی از سه ناحیه ذخیره ساز گرما، ناحیه گرادیانی نمک و ناحیه سطحی تشکیل شده است. شوری در ناحیه ذخیره ساز یکنواخت است و در ناحیه گرادیانی با کاهش عمق به طور خطی کم می شود. لایه سطحی<sup>۵</sup> عمده تاً آب شیرین است. در این بررسی، میزان شوری ناحیه ذخیره ساز  $gT/kg$  ۲۰۰ و در ناحیه گرادیانی این شوری به تدریج کم می شود و در لایه سطحی به صفر می رسد. انرژی خورشیدی موجب گرم شدن کف استخر شده و حرکت های همرفتی، انرژی جذب شده را در تمام لایه ذخیره ساز پخش می کند و باعث یکنواختی دما در این ناحیه می شود. نقش لایه (ناحیه) گرادیانی جلوگیری از همرفت و انتقال

توزیعهای T و S به گونه‌ای است که هر دو از بالای ناحیه گرادپانی به طرف کف استخر زیاد می‌شوند. شار گرما و نمک هر دو تابع z هستند، به طوری که مثلاً معادله انتقال نمک در جهت قائم عبارت است از [۵]:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial F}{\partial z} \quad (۳)$$

که

$$F = -D_s \frac{\partial S}{\partial z} \quad (۴)$$

که D<sub>s</sub> و F به ترتیب ضریب پخش مولکولی نمک و شار پخش نمک است. معادله (۳) را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + w \frac{\partial S}{\partial z} = - \frac{\partial}{\partial z} \left( D_s(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (۵)$$

با ناچیز بودن مولفه قائم حرکت، w، در لایه گرادپانی (بدون همرفت طبیعی در این لایه) جمله دوم سمت چپ معادله (۵) حذف می‌شود و تغییر S با زمان در هر نقطه فقط توسط پخش مولکولی ایجاد می‌شود. مشابه معادله بالا را برای دما نیز می‌توان نوشت.

برای اینکه عمل استخر در جلوگیری از همرفت موثر باشد، باید لایه گرادپانی همواره پایدار باشد و آن در صورتی است که:

$$\frac{d\rho}{dz} \geq 0 \quad \text{یا} \quad \beta \frac{dT}{dz} \geq \alpha \frac{dS}{dz} \quad (۶)$$

بنابراین در استخر طوری انتخاب می‌شود که همیشه این شرط، برقرار باشد. برای یک لایه گرادپانی به ضخامت Δz می‌توان رابطه (۶) را به صورت زیر نوشت:

$$\beta \frac{\Delta S}{\Delta z} \geq \alpha \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad \text{یا} \quad R_\rho = \frac{\beta \Delta S}{\alpha \Delta T} \geq 1 \quad (۷)$$

شرط بالا شرط پایداری استاتیکی است، ولی اگر چشمه‌های ناپایداری غیر از گرانش وجود داشته باشند شرط استاتیکی<sup>۶</sup> برای پایداری کافی نیست. در این صورت شرط پایداری هیدرودینامیکی<sup>۷</sup> را باید به کار برد [۵].

در هنگام ادغام دو بسته سیال، اگر قسمتی از انرژی جنبشی به

انرژی پتانسیل تبدیل نشود، دو بسته از سیال مخلوط نخواهند شد. یعنی قسمتی از انرژی جنبشی باید کار لازم برای مخلوط شدن (تبدیل به انرژی پتانسیل) دو بسته را فراهم کند. بدون در نظر گرفتن اصطکاک، و با فرض اینکه صد در صد انرژی جنبشی می‌تواند به انرژی پتانسیل تبدیل شود، شرایط پایداری می‌تواند با عدد ریچاردسون بیان شود. عدد ریچاردسون<sup>۸</sup> عبارت است از نسبت کار لازم برای اختلاط دو بسته سیال ΔW به تغییر انرژی جنبشی آنها، ΔK [۵]. بنابراین شرط پایداری هیدرودینامیکی عبارت است از:

$$Ri = \frac{\delta W}{\delta K} = \frac{g \frac{d\rho}{dz}}{\rho \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} \geq 1 \quad (۸)$$

اما عدد ریچاردسون کلی در یک لایه به ضخامت h برای حالت مورد نظر به شکل زیر است [۵]:

$$Ri = \frac{g \Delta \rho h}{\rho U^2} \quad (۹)$$

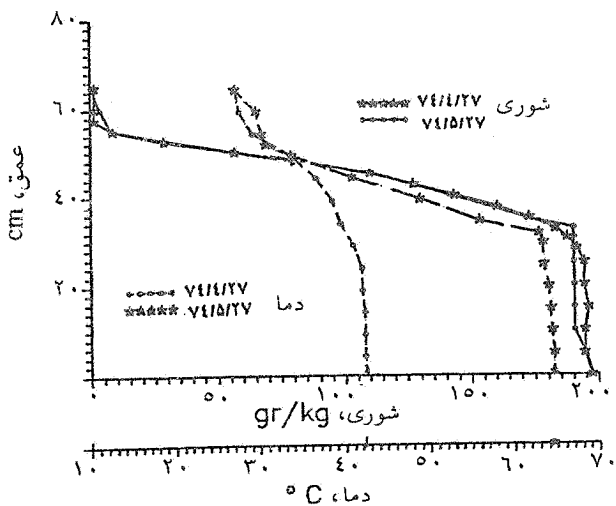
که U سرعت همرفتی در مرز لایه گرادپانی و ذخیره ساز، Δρ اختلاف چگالی بین پایین و بالای لایه، ρ چگالی متوسط و g شتاب ثقل است.

حرکت‌های همرفتی تلاطمی در مرز مشترک لایه گرادپانی و لایه ذخیره ساز و همین‌طور لایه سطحی باعث خوردگی لایه گرادپانی و کاهش ضخامت آن با زمان می‌شود. این فرسایش را اگر به صورت تغییرات ضخامت لایه با زمان،  $\frac{dh}{dt}$  نشان دهیم، تابعی از عدد ریچاردسون به شکل زیر است [۵]:

$$\frac{dh}{dt} = U_e \equiv c Ri^{-n} U \quad (۱۰)$$

که U<sub>e</sub> سرعت درون آمیختگی<sup>۹</sup> و U سرعت نمونه همرفتی در مرز مشترک است. ضرایب c و n ثابت‌های تجربی هستند که مقدار آنها برای شرایط پیشگفته به ترتیب ۰/۳۵ و ۱/۱۷ است [۵]. اگر فرسایش لایه گرادپانی در مدت طولانی ترمیم نشود، عملکرد طولانی استخر خورشیدی می‌تواند مسئله ساز شود. برای ترمیم و نگهداری آن از روش‌های تجربی استفاده می‌شود [۵].

اتلاف گرمایی در استخر خورشیدی، از طریق پخش مولکولی

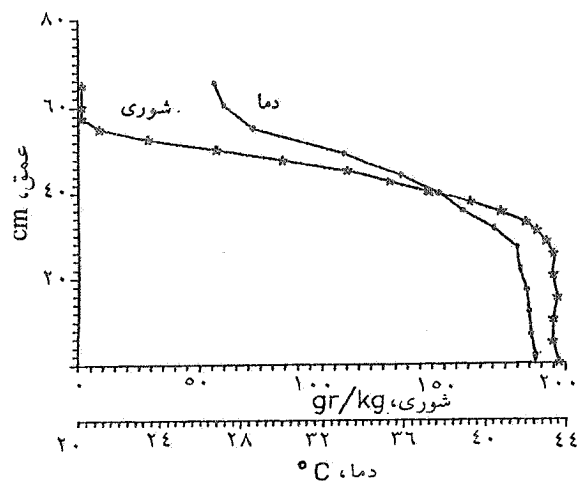


شکل ۳- نیمرخ قائم شوری و دمای استخر در

روزهای ۷۴/۵/۲۷ و ۷۴/۴/۲۷

شکل (۲) نیمرخ شوری و دما را در روز ۷۴/۴/۲۷ (پایان دومین روزی که استخر پر شد) نشان می‌دهد. در این شکل، ناحیه ذخیره ساز و لایه سطحی با دما و شوری تقریباً یکنواخت دیده می‌شوند. ناحیه گرادسانی، با توزیع تقریباً خطی شوری و دما با عمق مشخص است. شکل (۳) نیمرخ قائم شوری و دما را در تاریخ ۷۴/۴/۲۷ و ۷۴/۵/۲۷ نشان می‌دهد. با مقایسه نیمرخهای به خصوص شوری، کاسته شدن ضخامت لایه گرادسانی در طی ۳۰ روز به میزان ۲/۵cm مشاهده می‌شود. از این میزان، ۱/۵ سانتیمتر مربوط به فرسایش پایین ناحیه و حدود ۱cm مربوط به بالای ناحیه است. علت این کاهش، خورده شدن تدریجی لایه گرادسانی در اثر تلاطم و همرفت در مرز مشترک آن با لایه ذخیره ساز و لایه سطحی است. بنابراین ضخامت لایه گرادسانی استخر خورشیدی باید به گونه‌ای انتخاب شود تا این فرسایش، در مدت زمان کار استخر لطمه شدیدی به عملکرد لایه گرادسانی آن وارد نکند. البته راههایی برای ترمیم لایه گرادسانی وجود دارد که در مرجع [۵] آورده شده است، و به بعضی از آنها بعداً اشاره خواهد شد.

شکل (۴) تغییرات دمای بیشینه لایه ذخیره ساز را با زمان نشان می‌دهد. دما پس از هشت روز به حدود  $65^{\circ}\text{C}$  درجه می‌رسد. این مقدار در شرایطی به دست آمده که روی استخر در شبها با روکش نایلونی پوشیده می‌شد تا از ورود گرد و خاک (به دلیل عبور کامیونها فقط در شب) به درون آن جلوگیری شود. بدون این روکش دمای



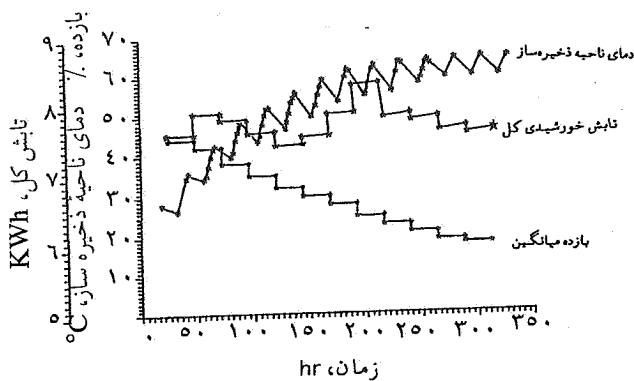
شکل ۲- نیمرخ قائم شوری و دمای استخر در روز ۷۴/۴/۲۷

به طرف بالا، تشعشع با طول موج بلند و هدایت گرما از جداره‌های استخر صورت می‌گیرد. برای کم کردن این اتلاف از طریق پخش مولکولی، ضخامت لایه گرادسانی را باید تا حد ممکن بزرگ انتخاب کرد. هر چند این مسئله می‌تواند میزان اشعه خورشیدی را که به لایه ذخیره ساز می‌رسد، تضعیف کند.

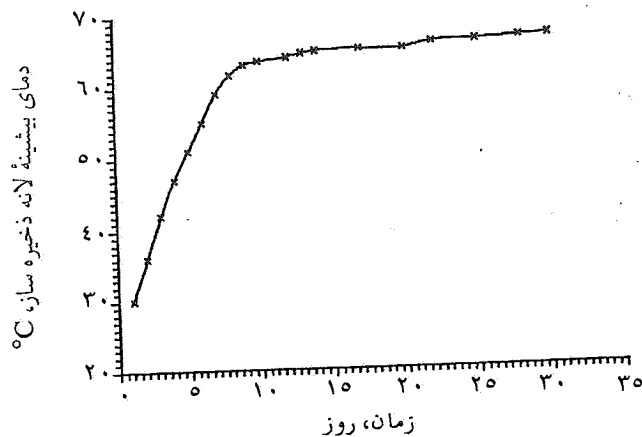
### ۳- ساخت و بررسی استخر خورشیدی

استخر خورشیدی مربع شکلی با سطح ۲/۵ مترمربع در بالا و ۱ مترمربع در کف و به عمق ۰/۸ متر ساخته شده که دیواره‌ها و کف آن از نظر گرمایی برای خنثی کردن اثر کوچک بودن استخر روی دمای لایه ذخیره ساز، عایق‌بندی مناسب شده است (برای جزئیات به [۶] مراجعه شود). در شکل (۱) ساختار سازه‌ای استخر نشان داده شده است. عمق لایه ذخیره ساز ۰/۳ متر و عمق لایه گرادسانی ۰/۲۷ متر و عمق لایه سطحی ۰/۰۷ متر انتخاب شده است. لایه گرادسانی با روش پر کردن تدریجی استخر با محلول نمکی که غلظت آن به تدریج کاهش می‌یافت، ایجاد شد. لایه سطحی نیز دارای آب شیرین بوده و با توجه به تبخیر سطحی، هر سه روز یکبار آب شیرین به آن اضافه می‌شد.

یک دستگاه دماسنج ۶کاناله و یک دستگاه شوری سنج  $1^{\circ}$  دقیق، دما و شوری را با دقت‌های به ترتیب  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  و  $\pm 1\text{gr/kg}$  در عمق‌های مختلف استخر در طی ۳۰ روز از تاریخ ۷۴/۴/۲۷ الی ۷۴/۵/۲۷ به طور مداوم اندازه‌گیری کرده و داده‌ها پس از ثبت توسط کامپیوتر، مورد بررسی قرار می‌گرفت.



شکل ۵- تغییرات انرژی خورشیدی کل روزانه، دمای لایه ذخیره ساز و بازده میانگین با زمان



شکل ۴- تغییرات دمای بیشینه لایه ذخیره ساز با زمان

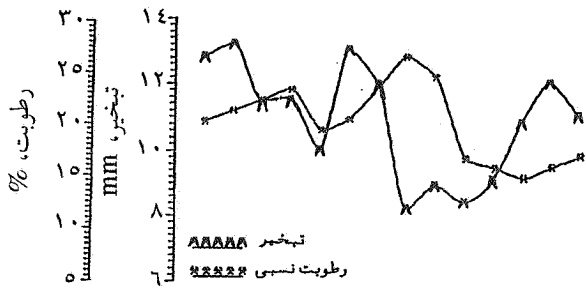
می دهد. افت شبانه دمای لایه ذخیره ساز در روز بعد تامین می شود. تغییرات شبانه روزی نسبتاً زیاد لایه ذخیره ساز به دلیل عمق کم آن است. چون هر چه حجم این لایه کم می شود ظرفیت گرمایی آن کمتر شده و زمان ذخیره سازی آن نیز کم می شود. در این حالت دمای آن نیز سریعتر افزایش می یابد، و به دمای بیشتری می تواند برسد. دمای لایه سطحی در میزان اتلاف گرما از سطح موثر است. عواملی که در دمای لایه سطحی تاثیر مستقیم می گذارند عبارتند از سرعت باد، تبخیر سطحی و میزان رطوبت هوا. در شکلهای (۷الف) و (۷ب) برای نشان دادن تاثیر این عوامل، نمودارهای تغییرات دمای لایه سطحی، سرعت میانگین باد، تبخیر سطحی و رطوبت نسبی هوا با زمان آورده شده است. از مقایسه نمودارها دیده می شود که در روزهایی که سرعت باد بالاست تبخیر نیز بالا و دمای کمینه لایه سطحی پایین است. در نتیجه اتلاف گرما از سطح استخر زیاد است. در روزهایی که رطوبت بالاست تبخیر کم و دمای کمینه لایه سطحی بالاست. برای پیشگیری از تبخیر شدید سطحی، معمولاً این استخرها را در نقاط دور از باد می سازند. یا با درختکاری در اطراف استخر بادشکن می سازند تا تبخیر سطحی کم شود.

با محاسبه عدد ریچاردسون که میزان پایداری هیدرودینامیکی را نشان می دهد می توان به میزان فرسایش لایه گرادینانی پی برد. با توجه به معادله (۹) و در نظر گرفتن سرعت حرکت همرفتی در فصل مشترک لایه ذخیره ساز و لایه گرادینانی،  $U = 0.3 \text{ mm/s}$ ، و مقدار  $\rho = 1/14 \text{ gr/cm}^3$  و  $\Delta\rho = 0/14 \text{ gr/cm}^3$ ، عدد ریچاردسون در حدود  $4 \times 10^4$  است. براساس معادله (۱۰) می توان سرعت

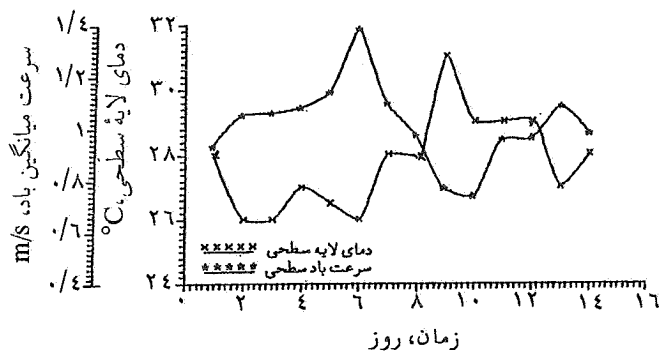
تعادلی حدود ۵ درجه سانتیگراد کمتر است. هنگامی که استخر به دمای بیشینه تعادلی خود می رسد میزان تابش خورشیدی ورودی با کل اتلاف انرژی گرمایی برابر شده است. برای دستیابی به دمای بالاتر باید عمق لایه گرادینانی بیشتر و وسعت استخر بزرگ انتخاب شود [۳]. با آنکه دیواره های استخر شیبدار است و دمای لایه ذخیره ساز نسبتاً بالاست، ولی علائمی از همرفت پخش دو جانبه [۷] در لایه گرادینانی دیده نمی شود. پخش دو جانبه در اثر اختلاف ضریب پخش مولکولی گرما و نمک به وجود می آید. ضریب پخش گرما حدود صد برابر مقدار آن برای نمک است.

در شکل (۵) تغییرات، دمای ناحیه ذخیره ساز، تابش کل روزانه و بازده میانگین با زمان دیده می شود. بازده میانگین کل (نسبت انرژی که صرف گرم شدن لایه ذخیره ساز می شود به کل انرژی دریافتی از روز اول برپایی استخر) از میزان حدود ۴۰٪ در روز اول شروع و به تدریج کم می شود. علت آن افزایش اختلاف دمای استخر با محیط اطراف و در نتیجه افزایش اتلاف انرژی گرمایی استخر است. برای بازده بالا باید قبل از نزدیک شدن دمای استخر به دمای تعادلی بیشینه، در دماهای پایتتر از آن بهره برداری گرمایی کرد. بازده میانگین در نمودار حدود ۲۵ درصد است و با احتساب میانگین  $7/5 \text{ kWh}$  برای کل انرژی خورشیدی دریافتی روزانه بر متر مربع در تابستان، انرژی ذخیره شده روزانه حدود  $1/9 \text{ kWh}$  به ازای یک متر مربع است.

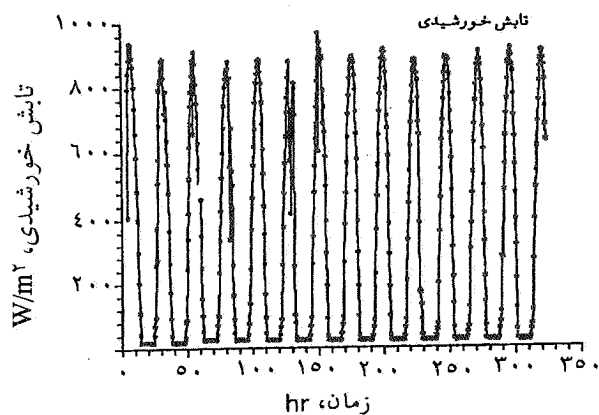
شکل (۶الف) تغییرات شبانه روزی انرژی تابشی خورشید و شکل (۶ب) تغییرات دمای لایه سطحی و لایه ذخیره ساز را نشان



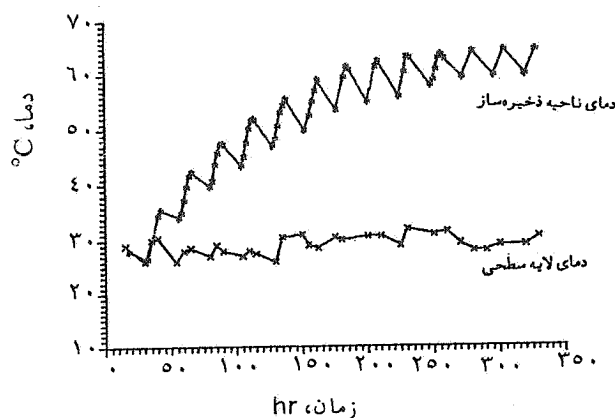
شکل ۷-الف - تغییرات تبخیر سطحی و رطوبت نسبی هوا با زمان



شکل ۷-ب - تغییرات دمای لایه سطحی و سرعت باد میانگین



شکل ۶-الف - تغییرات شبانه روزی انرژی خورشیدی



شکل ۶-ب - تغییرات دمای لایه سطحی و لایه ذخیره ساز با زمان

شدن سرعت فرسایش لایه گرادینانی می‌شود. برای ترمیم لایه گرادینانی و ایجاد پایداری بیشتر، معمولاً آب لایه سطحی را که به مرور زمان در اثر پخش شوری از لایه گرادینانی شور می‌شود، از سطح استخر تخلیه و غلیظ و سپس در غلظت مناسب آن را به داخل ناحیه ذخیره ساز تزریق می‌کنند. در اثر پخش نمک به لایه‌های بالاتر، از شوری لایه ذخیره ساز به مرور زمان کاسته می‌شود و با تزریق محلول غلیظ نمک این کمبود شوری جبران می‌شود. به جای آب برداشته شده از لایه سطحی مجدداً آب شیرین اضافه می‌شود [۳].

در یک روش دیگر توسط لوله پلی اتیلن به کف استخر نمک وارد می‌کنند تا کمبود شوری در این ناحیه جبران شود. این عمل موجب پدید آمدن یک گرادینان ضعیف در ناحیه ذخیره گرمایی می‌شود [۳].

آب استخر بعد از مدتی، به دلیل اضافه نکردن مواد جلوگیری کننده از رشد باکتریها، رو به کدر شدن می‌رفت. کدر شدن آب سطحی استخر باعث کاهش بازده گرمایی آن می‌شود. برای جلوگیری از آن به داخل محلول استخر کلر اضافه می‌شود. برای این

فرسایش لایه گرادینانی را در فصل مشترک آن با لایه ذخیره ساز به دست آورد. سرعت حرکت همرفتی در مرز مشترک دو لایه که با مشاهده مستقیم حرکت نشانه انجام شده،  $0.3$  میلی‌متر بر ثانیه اندازه گیری شده است.  $U_e$  محاسبه شده مربوط به قسمت تحتانی لایه گرادینانی،  $1/12$  سانتیمتر در ماه است که با میزان فرسایش لایه گرادینانی اندازه گیری شده، طبق نمودارهای شکل (۳) همخوانی خوبی دارد.

#### ۴- نحوه نگهداری استخر خورشیدی

فرسایش لایه گرادینانی که نقش عایق گرمایی شفاف را در استخر خورشیدی ایفا می‌کند، یکی از مشکلات استخر خورشیدی بوده و مسئله مورد توجه مهمی است. برای کاهش این فرسایش باید قبل از رسیدن استخر به دمای تعادل بیشینه، از آن بهره برداری گرمایی کرد. این عمل باعث کاهش حرکت‌های تلاطمی و همرفتی و در نتیجه کم

کار pH استخر باید بین ۵ تا ۶ باشد [۸]. برای جلوگیری از نفوذ گرد و خاک به درون استخر معمولاً اطراف آن را با فاصله مناسب درختکاری می‌کنند تا از شدت باد و گرد و خاک هوا بکاهد. کدر شدن استخر در اثر گرد و خاک معلق در هوا در نواحی کویری مشکل مهمی در استخر خورشیدی ایجاد می‌کند. این مشکل می‌تواند در بازده گرمایی استخر اثر منفی داشته باشد [۹]. گاه ذرات سبک سطح آب استخر را می‌پوشانند. با افزایش مقدار بسیار کم پاک کننده می‌توان این ذرات را برداشت.

#### ۵ - نتیجه گیری

استخر کوچک خورشیدی با عایق‌بندی مناسب و سطح متوسط ۱/۵ مترمربع و عمق ۰/۸ متر ساخته شد و با لایه‌های ذخیره ساز، گرادینانی و سطحی به ترتیب به ضخامت‌های ۰/۳، ۰/۲۷ و ۰/۰۷ متر در روزهای اواسط تابستان با موفقیت آزمایش شد. دمای بیشینه لایه ذخیره ساز برای شرایط آزمایش بعد از حدود ده روز به ۶۵ درجه سانتیگراد رسید. تغییرات شبانه‌روزی نسبتاً زیاد دمای لایه ذخیره ساز (تقریباً ۸ درجه) بیشتر به دلیل کوچک بودن عمق این لایه و سطح استخر است. این نیز عامل اصلی کوتاهی مدت زمان رسیدن دمای استخر به مقدار بیشینه خود است. دمای بیشینه لایه ذخیره ساز، در مقایسه با استخرهای بزرگتر نسبتاً بالاست. مثلاً دمای استخر خورشیدی که فین و شورت [۸] با سطح ۱۵۵ متر مربع و عمق ۳ متر و با عمق لایه ذخیره ساز ۱/۸ متر به کار برده‌اند، بعد از ۵ ماه در تابستان به مقدار بیشینه ۶۳ درجه سانتیگراد رسیده است. با توجه به شیب‌دار بودن دیواره استخر، هیچگونه علامتی که نشانه همرفت پخش دوجانبه باشد، دیده نشد [۴]. بازده گرمایی استخر به دمای لایه ذخیره ساز وابسته است، و

واژه نامه:

1. solar pond
2. storage zone
3. thermal efficiency
4. gradient zone

5. surface layer
6. static stability
7. hydrodynamic stability
8. Richardson number

9. entrainment speed
10. salinymeter
11. double diffusive convection

مراجع

1. Flochitto, S., "Seawater as Salt Water Source for Solar Pond," *Solar Energy*, Vol. 46, No. 6, pp. 343-351, 1991.

2. Garg, H. P., "Solar Ponds," in *Advances in Solar Energy Technology*, ch.3, D. Reidel, 1987.
3. Srinivasan, J., "Performance of a Small Solar Pond

براساس مشاهدات از ۲۰٪ تا ۳۵٪ متغیر است. برای دماهای کمتر بازده می‌تواند بیشتر باشد. لایه گرادینانی دارای گرادینان چگالی حدود  $4 \times 10^4 \text{ gr/cm}^3$  است که عدد ریچاردسونی حدود  $4 \times 10^4$  را می‌دهد. محاسبه فرسایش لایه گرادینانی که عمدتاً به دلیل برهمکنش حرکات همرفتی لایه ذخیره ساز با آن رخ می‌دهد، در طول مدت آزمایش استخر، براساس این عدد ریچاردسون حدود ۲/۵ سانتیمتر در ماه است که با مشاهدات (شکل ۳) همخوانی دارد. این آزمایش در شرایط روزهای تابستان انجام شده است. برای روزهای نمونه زمستانی بدون پوشش ابر، میزان انرژی خورشیدی واحد سطح (یک متر مربع) حدود ۴ تا ۵ kWh در روز است. بنابراین دمای بیشینه استخر کمتر خواهد بود. استخر برای شرایط زمستانی تحت آزمایش است.

باتوجه به وسعت کم استخر بازده آن نیز کم است. در صورت بزرگ بودن آن از نظر مساحت و عمق، دمای لایه ذخیره ساز و بازده آن می‌تواند بیشتر باشد [۳].

براساس نتایج این تحقیق یک استخر بزرگ خورشیدی به وسعت حدود یک کیلومتر مربع در جنوب ایران می‌تواند روزانه حدود  $1/5 \times 10^6 \text{ kWh}$  انرژی ذخیره کند. اگر تنها ۲ درصد آن با استفاده از توربینهای خاص، مثلاً کاتابور و دورون [۱۰]، به برق تبدیل شود، تقریباً ۳۰ MWh برق تولید می‌شود.

#### قدردانی

از شورای پژوهشی دانشگاه تهران برای تصویب و تامین اعتبار این تحقیق قدردانی می‌شود.



- in the Tropics," *Solar Energy*, Vol. 4, pp. 221-230, 1990.
4. Akbarzadeh, A., "Convective Layers Generated by Walls in Solar Ponds: Observation," *Solar Energy*, Vol. 43, No. 1, pp. 17-23, 1989.
  5. Zangrando, F., "On the Hydrodynamics of Salt Gradient Solar Ponds," *Solar Energy*, Vol. 46, No. 6, pp. 323-341, 1991.
  6. بیدختی، ع.، محمدنژاد، ع.، و معینی، م. "بررسی پایداری و رفتار گرمایی یک استخر خورشیدی تحقیقاتی کوچک"، گزارش طرح پژوهشی موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، شماره ۱/۲۲۲/۶۵۱، سال ۱۳۷۴.
  7. Turner, J. S., *Buoyancy Effects in Fluids*, Cambridge University Press, 1976.
  8. Fynn, R. and Short, T., "The Salt Stabilized Solar Ponds for Space Heating," *The Ohio State University, Circular 106*, 1983.
  9. Hassb, M. A. and Kamal, A., "Problems Encountered in Operating Solar Ponds in the Arabian Gulf Region," *Solar Energy*, Vol. 43, No. 3, pp. 169-181, 1989.
  10. Tabor, H. Z. and Doron, B., "The Beith Ha'arava 5 MW(e) Solar Pond Power Plant (SPPP)-Progress Report," *Solar Energy*, Vol. 45, No. 4, pp. 247-253, 1990.