



بررسی تجربی و نظری انتقال گرما و رفتار گرادیانی نمک در یک استخر خورشیدی آزمایشگاهی

مرضیه دشتی مفرد^{۱*}، علیرضا کیهانی^۲، حسین موسی زاده^۳، محمدرضا جعفرزاده^۴

*دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران

پست الکترونیکی: m.dashtimofrad@ut.ac.ir

^۲استاد و عضو هیئت علمی گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران

پست الکترونیکی: akeyhani@ut.ac.ir

^۳استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران

پست الکترونیکی: hmousazade@ut.ac.ir

^۴استاد و عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد

پست الکترونیکی: jafarzag@um.ac.ir

چکیده

فناوری استخرهای خورشیدی یکی از روش‌های نسبتاً ساده‌ی استفاده از انرژی خورشیدی است که برای ذخیره و استفاده از انرژی‌های گرمایی خورشید ابداع شده است. در مقاله‌ی حاضر عملکرد تجربی و نظری یک استخر خورشیدی در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش تجربی یک استخر خورشیدی با سطح مقطع 0.5 m^2 و عمق $1/0 \text{ m}$ در دانشگاه تهران ساخته شد. سه ناحیه‌ی استخر با آب نمک با غلظت‌های متفاوت پر شد. ۱۲ سنسور LM35 برای اندازه‌گیری دمای عمق‌های مختلف درون استخر قرار داده شد. نور خورشید توسط ۴ پروژکتور 500 W شبیه‌سازی گردید. در بررسی عملکرد استخر خورشیدی، پس از ۴ هفته حداکثر دمای به‌دست آمده در ناحیه‌ی ذخیره ساز در حدود 50°C بود. در بخش عددی از یک مدل‌سازی ریاضی برای پیش‌بینی دمای توزیع شده درون استخر استفاده شد. بررسی نتایج عددی و تجربی بیانگر تطابق آزمایش‌ها با یکدیگر بود.

کلمات کلیدی: انرژی - استخر خورشیدی - بازتابش نور



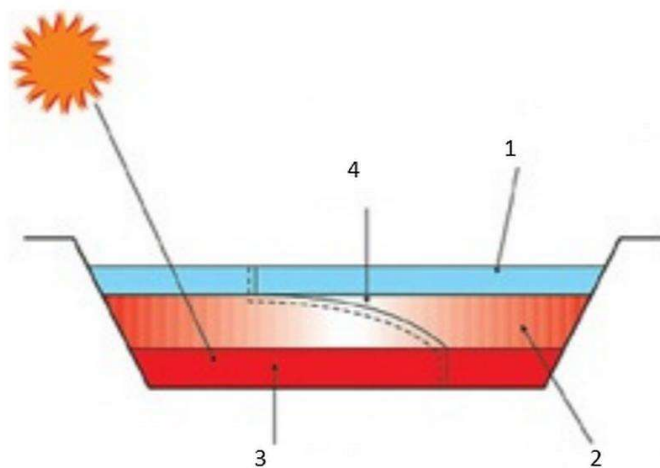
مقدمه

خورشید منبع عظیم انرژی بلکه سرآغاز حیات و منشاء تمام انرژی‌های دیگر است. در هر ثانیه $4/2$ میلیون تن از جرم خورشید به انرژی تبدیل می‌شود. با توجه به وزن خورشید که حدود ۳۳۳ هزار برابر وزن زمین است، این کره نورانی را می‌توان به عنوان منبع عظیم انرژی تا ۵ میلیارد سال آینده به حساب آورد (بهداد، ۱۳۸۸). انرژی خورشیدی وسیع‌ترین منبع انرژی پاک در جهان است و مزیتی که این انرژی را به دیگر انرژی‌ها برتری داده‌است، قابل دسترس بودن آن در اکثر مناطق جهان می‌باشد. انرژی نوری که از خورشید در هر ساعت به زمین می‌تابد بیش از کل انرژی است که ساکنان زمین در طول یک سال مصرف می‌کنند. کارشناسان معتقدند اگر می‌توانستیم فقط یک چهارم از انرژی خورشیدی که به مناطق مسطح جهان می‌تابد را مهار کنیم، به راحتی قادر بودیم نیازهای فعلی انرژی جهان را برآورده سازیم (بهداد، ۱۳۸۸). به منظور کاهش قیمت تاسیسات گرمایی خورشیدی می‌بایست راه‌های اقتصادتر برای جمع‌آوری و ذخیره انرژی اندیشیده شود، برای این منظور استخرهای خورشیدی به ویژه استخرهای خورشیدی با گرادبان نمک به عنوان یک منبع قابل اعتماد و ساده و راه‌حلی که برای سال‌های زیادی پذیرفته شده است معرفی می‌گردد. به عقیده پژوهشگران یکی از راه‌های دستیابی به انرژی خورشیدی در مقیاس بزرگ استفاده از جمع‌کننده‌های خورشیدی است. یک نمونه جمع‌کننده‌های خورشیدی که با حداقل هزینه می‌توان از آن‌ها استفاده کرد، استخرهای خورشیدی بزرگ هستند.

فناوری استخرهای خورشیدی یکی از تکنیک‌های نسبتاً ساده استفاده از انرژی خورشیدی است. در این استخرها (شکل ۱)، آب در سه ناحیه با افزایش شوری ذخیره می‌شود. حداکثر شوری در ناحیه بالایی استخر خورشیدی در حدود شوری آب دریاست ($3/3$ درصد وزنی). ضخامت این ناحیه هر چه کمتر باشد عملکرد حرارتی استخر بهتر می‌شود. اما به هر حال پیدایش این ناحیه، به دلیل عواملی از قبیل اختلاط سطحی ناشی از وزش باد و یا انتقال نمک از لایه زیرین به سطح استخر خورشیدی، اجتناب ناپذیر است. ضخامت معمول لایه سطحی در حدود ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر است که در شرایط حفاظت نشده به نیم متر و بیشتر هم می‌رسد (Tabor, 1981). در لایه سطحی، به دلیل یکنواختی چگالی، حرکت همرفتی در عمق صورت می‌پذیرد. در ناحیه وسط چگالی آب نمک، به طور شبه خطی، با عمق افزایش پیدا می‌کند تا به حداکثر مقدار خود برسد. به دلیل افزایش چگالی امکان حرکت همرفتی



در این ناحیه وجود ندارد. عمق این لایه در حدود ۱ تا ۱/۵ متر می‌باشد. در لایه زیرین، که سنگین ترین ناحیه استخر خورشیدی است، چگالی آب نمک نسبتا یکنواخت و در حد نزدیک به اشباع می‌باشد بنابراین در ناحیه اخیر، حرکت همرفتی صورت می‌پذیرد. ضخامت این ناحیه متغیر است و بسته به نیاز تا دو متر هم می‌تواند برسد.



شکل ۱. طرحواره‌ی استخر خورشیدی با ساختار لایه بندی. ۱: لایه همرفت بالا، ۲: لایه جابه‌جایی میانی، ۳: لایه همرفت پایینی، ۴: رفتار

گرادیانی در لایه میانی

نور خورشید با عبور از لایه‌های مختلف استخر خورشیدی به کف آن برخورد می‌کند و دما را به تدریج افزایش می‌دهد. آب گرم شده، در ناحیه زیرین، سبک می‌شود و به طرف بالا حرکت می‌کند. به دلیل آن که امکان حرکت جابجایی در ناحیه گرادیانی به دلیل کاهش چگالی وجود ندارد، انتقال گرما به طریق رسانش، که فرایند کندی است، صورت می‌پذیرد. بنابراین گرمای آب در ناحیه زیرین ذخیره می‌شود و در صورتی که اتلاف گرمایی زیادی از بدنه استخر وجود نداشته باشد دمای ناحیه زیرین استخر به تدریج افزایش پیدا می‌کند. در استخرهای با مقیاس بزرگ، دمای کاری استخر به $90 - 80$ °C می‌رسد (Tabor, 1981).

اولین مطالعات در زمینه استخرهای خورشیدی به سال ۱۹۵۸ در فلسطین اشغالی آغاز شد و تا سال ۱۹۶۷ ادامه یافت

(Tabor, 1981). اما به دلیل هزینه گران‌تر انرژی خورشیدی، در مقایسه با انرژی‌های ارزان فسیلی، تحقیقات در این زمینه متوقف



ماند. از سال ۱۹۷۳ به بعد، به دنبال بحران انرژی، در بسیاری از کشورهای دنیا تحقیق در زمینه استخرهای خورشیدی شروع شد.

در سال‌های اخیر در کشورهای امریکا، فلسطین اشغالی، استرالیا، هندوستان و بعضی کشورهای حاشیه خلیج فارس مطالعات دامنه

داری در مورد عملکرد استخرهای خورشیدی انجام شده است (Hull et al., 1989).

در ایران مطالعات نظری اندکی، در سال ۱۹۸۰ در دانشگاه شیراز انجام شد (Akbarzadeh and Ahmadi, 1980) اما ادامه

پیدا نکرد. در سال ۱۳۷۵، در دانشگاه فردوسی مشهد یک استخر خورشیدی کوچک، به مساحت ۴ متر مربع ساخته شد که رفتار آن،

به مدت چهار سال مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت (جعفرزاده، ۱۳۷۹). در موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران نیز رفتار یک

استخر خورشیدی کوچک، به مساحت ۱/۸ متر مربع به مدت کوتاهی بررسی شد (بیدختی و محمد نژاد، ۱۳۷۶).

نظر به ویژگی خاص استخرهای خورشیدی، از گرمای ذخیره شده در آنها می‌توان استفاده‌های گوناگونی کرد. استخرهای

خورشیدی کاربردهایی در زمینه‌ی کشاورزی و زراعت نیز دارند. در مناطق معتدله، جو، گندم و سایر دانه‌ها، در پاییز، در شرایط

رطوبتی بالا برداشت می‌شوند و سپس، برای ذخیره بلند مدت، تا میزان رطوبت پایینی، خشک می‌شوند. اغلب اوقات در فرآیند

خشک کردن، لازم است که هوای مورد استفاده به دمای ۵ درجه‌ی سلسیوس بالاتر از دمای محیط برسد. با گرمای ناشی از

سوخت‌های فسیلی به دماهای بسیار بالاتر می‌توان دست یافت، که به سرعت دانه را خشک کند، اما پروتئین موجود در ذرات

کاهش پیدا می‌کند. استخرهای خورشیدی برای این منظور ایده آل هستند. زیرا دمای آن‌ها در اواخر تابستان به حداکثر خود

می‌رسد و بنابراین در فصل درو می‌توانند هنوز مقدار زیادی گرما را در خود ذخیره داشته باشند (Hull et al., 1989).

جهت افزایش دوره بهره‌وری گیاهان، از گلخانه استفاده می‌شود. در این صورت به گرمای خارجی در زمستان نیاز است.

استخرهای خورشیدی به دلیل ظرفیت ذخیره بلند مدت گرما می‌توانند حرارت مورد نیاز را فراهم کنند در این صورت عمق استخر باید

به حد کافی زیاد باشد تا گرمای لازم در سرتاسر فصل سرما حاصل شود. برای انتقال گرما از مبدل‌های گرمایی مدفون در خاک

گلخانه نیز می‌توان استفاده کرد و یا آب گرم را قطره قطره در خاک وارد کرد. از استخرهای خورشیدی در گرمایش اصطبل‌ها،

مناطق نگهداری حیوانات و مرغداری‌ها، نیز به‌خوبی می‌توان استفاده کرد (Hull et al., 1989).



مواد و روش‌ها

به منظور بررسی انتقال گرما در بین لایه‌های مختلف، یک استخر آزمایشگاهی کوچک در دانشگاه تهران ساخته شد. این استخر، استوانه‌ای پلاستیکی به عمق ۱/۰ متر و قطر ۰/۸ متر بود که در شکل ۲ نمایش داده شده است. بدنه‌ی تانک پلاستیکی با پشم شیشه به قطر ۴۰ mm عایق گردید و به منظور بالا رفتن جذب حرارتی بیشتر، بدنه و کف استخر با رنگ مشکی پوشانده شد. نمک مورد استفاده نیز همان نمک طعام (NaCl) بود. برای اندازه‌گیری دمای آب، ۱۲ سنسور LM35 طراحی گردید که در عمق‌های مختلفی در درون استخر قرار گرفتند. فاصله بین هر دو سنسور متوالی ۱۰ cm و ثابت نگه‌داشته شد. از یک رایانه جهت خواندن داده‌ها استفاده گردید. سنسورها به ترتیب از شماره ۱ تا ۱۲، دمای آب در عمق‌های ۴ تا ۹۲ سانتی متری را نمایش می‌دهند. برای اندازه‌گیری و سنجش پروفیل نمک در استخر، ۱۲ شیر که اولین آن‌ها به فاصله‌ی ۴ cm از پایین استخر کار گذاشته شد، استفاده گردید. شیرها به طور متوالی با فاصله‌ی ۸ cm از یکدیگر بر روی بدنه‌ی استخر نصب گردیدند.



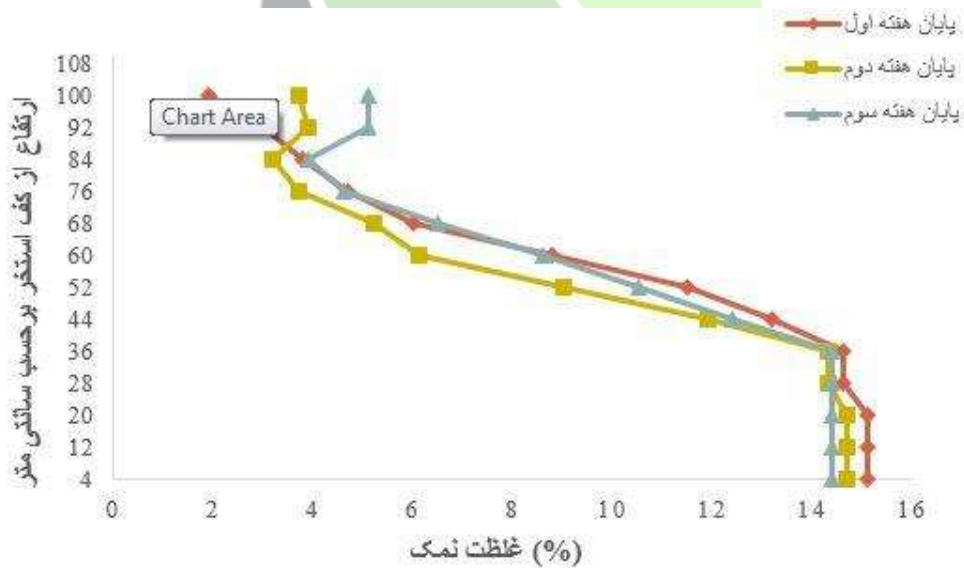
شکل ۲. استخر خورشیدی ساخته شده در دانشگاه تهران



استخر با لایه‌هایی از آب نمک با غلظت‌های متفاوت که از کف استخر به سمت سطح آن به تدریج از غلظت نمک در هر لایه کاسته شد، پر گردید. سپس منبع تابش نور در ارتفاع ۱۰ cm بالاتر از لبه‌ی استخر قرار داده شد. میزان انرژی رسیده به سطح استخر از این ارتفاع 317 W/m^2 اندازه‌گیری گردید. همچنین استفاده از مدل ریاضی انتقال گرما برای این استخر خورشیدی با مدل ریاضی جعفرزاده (Jafarzadeh, 2004) همخوانی داشت.

بحث بر روی نتایج

کل دوره آزمایش‌ها به مدت ۴ هفته به طول انجامید. غلظت اولیه نمک در ناحیه‌ی همرفت بالایی ۱/۹٪، در لایه‌ی همرفت پایینی در حدود ۱۵/۱٪ و در ناحیه‌ی غیرهمرفت میانی از طرف سطح به سمت لایه‌ی همرفت پایینی، با افزایش عمق افزایش یافت. شکل ۳ روند تغییرات غلظت نمک در لایه‌ها و میزان گرادیان شوری در منطقه‌ی غیرهمرفتی را نشان می‌دهد.



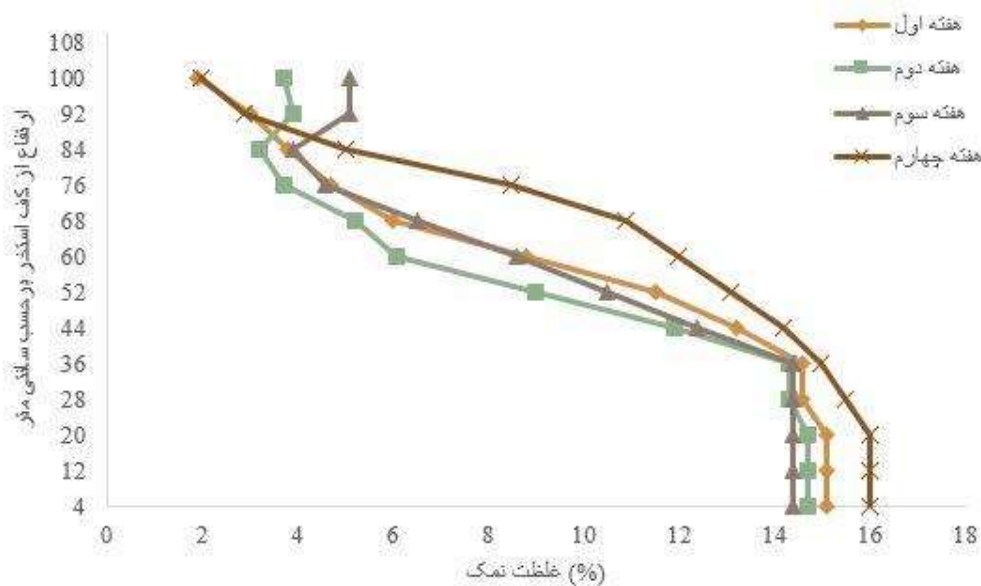
شکل ۳. توزیع مولکولی نمک در استخر خورشیدی آزمایشگاهی

همان طور که مشاهده می‌شود به دلیل توزیع مولکولی نمک در میان لایه‌های مختلف استخر خورشیدی، مقدار شوری در لایه همرفت پایینی (LCZ)، در هفته‌ی سوم آزمایش نسبت به روزهای قبلی کمتر شده‌است و از ۱۵/۱٪ در روزهای اولیه به ۱۴/۴٪



٪ کاهش یافته است. همچنین درصد غلظت نمک در لایه‌ی سطحی (UCZ) از ۱/۹٪ به ۵/۱٪ افزایش یافته است. چون این افزایش شوری نامطلوب می‌باشد، آب نمک روی سطح استخر برداشته شده و به جای آن آب تازه با شوری کم قرار داده می‌شود تا نفوذ پرتوها به درون استخر خورشیدی بهتر صورت گیرد.

در پایان هفته سوم مقداری محلول با غلظت بالای نمک به منطقه همرفت پایینی تزریق می‌گردد. شکل ۴ نشان می‌دهد که گرادیان شوری زیادی چند روز پس از تزریق نمک ایجاد می‌شود (هفته چهارم) و غلظت نمک ناحیه‌ی ذخیره ساز گرما (LCZ) دوباره افزایش می‌یابد تا جذب انرژی و ذخیره‌سازی گرما به نحو مطلوبی انجام شود. شکل همچنین کاهش شوری در ناحیه همرفت بالایی (UCZ) را به دلیل جایگزین نمودن آب نمک تشکیل شده بر روی سطح با آب تازه را به خوبی نمایش می‌دهد.



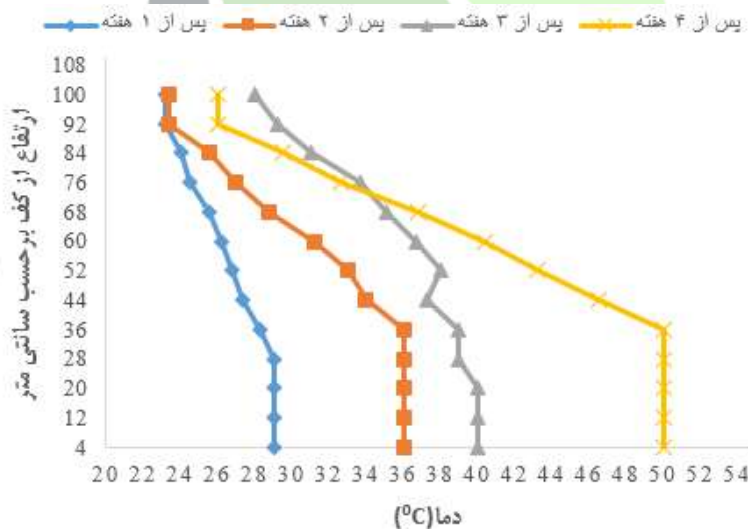
شکل ۴. توزیع مولکولی نمک در استخر خورشیدی پس از تزریق نمک

افزایش قابل توجه غلظت نمک در ناحیه‌ی UCZ و همچنین کاهش زیاد آن در ناحیه‌ی LCZ نکته‌ی حائز اهمیتی در طول مدت کارکرد این استخر خورشیدی می‌باشد. همان‌طور که گفته شد علت این امر پخش و توزیع مولکولی نمک در بین لایه‌ها



می‌باشد که اگر به طور مرتب سطح استخر از نمک پاک‌سازی نشود و همچنین لایه‌ی LCZ با آب نمک تغذیه نگردد، احتمال همگن شدن کل استخر و به هم خوردن ساختار لایه‌ها، بسیار زیاد است.

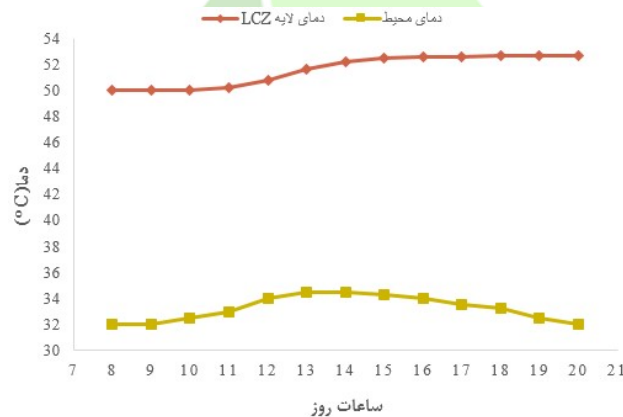
شکل ۵ تغییرات دمایی استخر خورشیدی را پس از گذشت ۴ هفته نمایش می‌دهد. مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که با گذشت یک هفته، رفتار تغییرات دمایی در ناحیه‌ی NCZ به حالت گرادیانی نزدیک گشته است. با گذشت دو هفته دما کاملاً به صورت خطی تغییر نموده، همچنین دما در ناحیه‌ی LCZ در این دو هفته با نسبت یکنواختی افزایش یافته است (دما روزانه حدود 1°C افزایش یافته است). در هفته سوم به دلیل کاهش میزان غلظت نمک در ناحیه‌ی LCZ، انتقال نمک به سطح و افزایش میزان غلظت نمک در ناحیه‌ی UCZ، دما در ناحیه‌ی LCZ با سرعت کمتری افزایش یافته و در ناحیه‌ی UCZ نیز افزایش دمای بیشتری مشاهده می‌شود. تغییرات در ناحیه‌ی NCZ نیز کمی از حالت خطی خارج شده است.



شکل ۵. تغییرات دما در لایه‌های مختلف استخر خورشیدی پس از ۴ هفته



بررسی‌ها نشان داد که دمای محیط پیرامون استخر خورشیدی بر روی تغییرات دمایی در ناحیه همرفت پایینی تأثیرگذار است. نحوه قرارگیری بدنه‌ی استخر در درون آزمایشگاه به گونه‌ای بود که تحت تأثیر مستقیم آفتاب نبود. اما افزایش و کاهش دمایی محیط با آهنگ تغییرات دما در لایه‌ی LCZ ارتباط مستقیمی داشت. شکل ۶ تأثیر دمایی محیط در یک روز از آزمایش را به عنوان نمونه در ساعات مختلف روز نشان می‌دهد. هرچند که در ساعات مختلف در طول روز به دلیل مصنوعی بودن نور و ثابت بودن منبع تابش و عدم تغییر در زاویه تابش پرتوها به سطح استخر، میزان انرژی که به سطح و درون استخر می‌رسید ثابت و یکنواخت بوده، اما دمای محیط پیرامون تحت تأثیر شرایط آب و هوایی تغییر کرده و بر عملکرد استخر خورشیدی آزمایشگاهی نیز تأثیر گذار بوده است.



شکل ۶ ارتباط بین تغییرات دمایی محیط و تغییر دما در لایه‌ی LCZ

پیش بینی تغییرات دما در استخر خورشیدی

مدل ریاضی بیان شده برای انتقال گرما، بر پایه‌ی تعادل انرژی در بالای لایه‌ی افقی می‌باشد. انرژی ورودی به لایه و انرژی تابشی جذب شده توسط لایه، با میزان انرژی از دست رفته و میزان انرژی ذخیره شده در لایه با گذشت مدت زمانی معین برابر می‌باشد. با نوشتن قوانین ریاضی حاکم، تعادل انرژی به صورت معادله‌ی (۱) نوشته می‌شود و معادله‌ی انتقال گرما نامیده می‌شود

(Kurt and Binark, 1997; Kurt, 1997).



$$-(k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x} + \rho C_p \omega T + \dot{q} = -(k + k_t) \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \partial x \right) + \rho C_p \omega \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} \partial x \right) + \rho C_p \frac{\partial T}{\partial x} \partial x \quad (1)$$

که در آن، K_t ضرب پخش جریان (W/m^2C) و \dot{q} ضابطه‌ی توزیع و گسترش گرما، که نشان‌دهنده‌ی میزان جذب تابش

خورشید در هر واحد حجم در عمق x از سطح استخر (W/m^3) می‌باشد.

حل معادله‌ی ریاضی به‌دست آمده بسیار پیچیده و مشکل می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن یک سری فرضیات که اصول

کلی سامانه استخر خورشیدی را برهم نمی‌زنند، معادله‌ی فوق به صورت ساده‌تری درمی‌آید. در نتیجه با توجه به این واقعیت که

ضریب پخش جریان و همچنین جریان همرفتی در راستای y بسیار کوچک هستند، می‌توان از آن‌ها صرفه نظر نمود. تغییرات

ضروری اعمال گشته و معادله به شکل ساده شده‌ی زیر نوشته می‌شود:

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) - \frac{1}{\rho C_p} \left(\frac{\partial I(\lambda, x)}{\partial x} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (3)$$

α : ضریب پخش گرما (m^2/s)

بعد از مشخص شدن انرژی نگهداری شده در هر لایه، معادله‌ی تعادل انرژی برای هر لایه از معادلات زیر محاسبه می‌گردد.

برای UCZ:

$$\alpha \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_1} + \frac{1}{\rho C_p} \left(I|_{x=0} - I|_{x=x_1} - Q_t \right) = \frac{\partial T}{\partial t} x_u \quad (4)$$

برای NCZ:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial I}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

برای LCZ:

$$\alpha \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_2} + \frac{1}{\rho C_p} \left(I|_{x=x_2} - I|_{x=L} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} x_A \quad (6)$$



که در آن، Q_1 گرمای کلی از دست رفته از سطح استخر (W/m^2) ، x_{ii} ضخامت لایه ی UCZ (m) ، x_A ضخامت لایه ی

LCZ (m) و L عمق کل استخر (m) می باشد.

معادلات به دست آمده، معادلات مشتق جزئی در زمان سهموی هستند. این معادلات به صورت تحلیلی و عددی حل می گردند.

با فرض اینکه UCZ و LCZ کاملاً مخلوط گشته اند، بنابراین دارای دمای یکنواختی می باشند. همچنین UCZ و LCZ به عنوان

شرایط مرزی برای یک راه حل تحلیلی معادله ی تعادل انرژی روی NCZ در نظر گرفته می شوند. برای حل این معادلات از روش

تغییر متغیرها استفاده می شود. راه حل به صورت زیر بیان می شود (Kurt and Binark, 1997; Kurt, 1997).

$$T(x, t) = T_{\infty} + \frac{qL^2}{2k} \left[1 - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] - 2 \left(\frac{qL^2}{k} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(\lambda_n L)^3} e^{-\alpha \lambda_n^2 t} \cos(\lambda_n x) \quad (7)$$

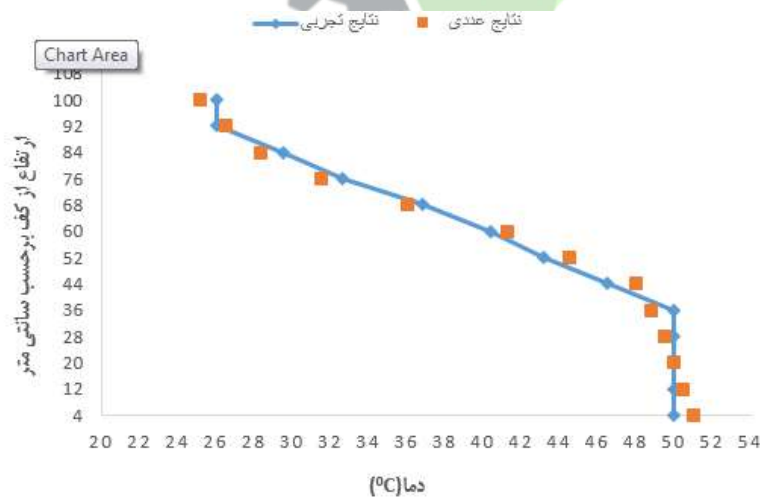
$$\lambda_n = \frac{(2n-1)\pi}{2L} \quad (8)$$

که در آن، $T(x,t)$ توزیع دمای استخر $(^{\circ}C)$ و T_{∞} دمای محیط $(^{\circ}C)$ می باشد.

به منظور اطمینان از درستی نتایج به دست آمده و عملکرد صحیح استخر خورشیدی، روابط تجربی موجود با توجه به داده های

در دسترس حل گشته، سپس نتایج حاصل از انجام آزمایش با داده های محاسبه شده بررسی گشت. شکل ۷ مقایسه ی بین دمای

محاسبه شده ی تئوری با دمای اندازه گیری شده از استخر در طی چهار هفته را نمایش می دهد.



شکل ۷. مقایسه بین داده های اندازه گیری شده و داده های محاسبه شده



لایه‌ی همرفت پایینی (LCZ) دارای بالاترین دما می‌باشد. دمای ناحیه‌ی میانی (NCZ) با افزایش عمق و همچنین افزایش غلظت نمک افزایش می‌یابد. دمای لایه‌ی همرفت بالایی (UCZ) از دو لایه‌ی دیگر کم‌تر و نزدیک به دمای اتمسفر موجود در بالای سطح استخر است.

نتیجه‌گیری

در طی انجام آزمایش‌ها بر روی استخر خورشیدی آزمایشگاهی، نفوذ رو به بالای نمک از منطقه ذخیره‌ساز انرژی به سمت سطح استخر دیده می‌شود. به‌طور کلی نفوذ رو به بالای نمک مربوط به جابه‌جایی مولکول‌ها می‌باشد. نتایج نشان داد که مقدار شوری در لایه همرفت پایینی (LCZ)، در هفته‌ی سوم آزمایش نسبت به روزهای قبلی کمتر شده‌است و از ۱۵/۱٪ در روزهای اولیه به ۱۴/۴٪ کاهش یافته‌است. همچنین درصد غلظت نمک در لایه‌ی سطحی (UCZ) از ۱/۹٪ به ۵/۱٪ افزایش یافته‌است. اندازه‌گیری‌ها در پایان دوره انجام آزمایش نشان دادند که ناحیه‌ی همرفت پایینی (LCZ) و ناحیه‌ی همرفت بالایی (UCZ) دارای غلظت نمک یکنواخت و ثابتی می‌باشد. همچنین ناحیه‌ی NCZ رفتاری کاملاً خطی از خود نشان داد.

در روزهای اولیه‌ی انجام آزمایش دمای لایه‌های مختلف استخر تغییر زیادی نکرد و دمای آن با دمای محیط تقریباً برابر بود. پس از گذشت ۵ شبانه روز و با نزدیک شدن رفتار تغییرات غلظت نمک به حالت گرادیانی، تغییرات دمایی استخر رفتار منظم‌تری را از خود نشان داد و به پایداری نزدیک‌تر شد. در هفته چهارم مشاهده شد که دما در ناحیه‌ی LCZ با سرعت بیشتری افزایش یافته و دمای ناحیه‌ی UCZ مجدداً کاهش یافته و با دمای محیط برابر گردید. همچنین دما در ناحیه‌ی NCZ نیز دوباره به حالت گرادیانی خود رسید. حداکثر دمای به‌دست آمده از لایه‌ی همرفت پایینی حدود 50°C بود. نتایج به‌دست آمده از روش تئوری همخوانی نزدیکی با نتایج تجربی به‌دست آمده دارند.

منابع

بهداد ح. ۱۳۸۸. خورشید را از نو بشناسیم. انتشارات اقلیما (ترجمه).

بیدختی ع. ا و محمد نژاد، ع.ر. ۱۳۷۶. پایداری و بازده گرمایی یک استخر خورشیدی کوچک، دانشگاه صنعتی

اصفهان، شماره ۱۶.

جعفرزاده م.ر. ۱۳۷۹. طراحی، ساخت و تحلیل عملکرد یک استخر خورشیدی تحقیقاتی کوچک. گزارش نهایی طرح

پژوهشی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

Akbarzadeh A., Ahmadi G. 1980. Computer Simulation of the Performance of a Solar Pond in the Southern Part of Iran. Sol Energ. 24: 143-151.

Hull J.R., Nielsen C.E., Golding P. 1989. Salinity-Gradient Solar Ponds, CRC Press, Boca Raton, FL.

Jaefarzadeh M.R. 2004. Thermal behavior of a small salinity-gradient solar pond with wall shading effect. Solar Energy; 77:281-90.

Tabor H. 1981. Solar ponds. Solar Energy, 27(3):181-194.

Kurt H, Binark AK. 1997. Gunes Havuzu Sicaklik ve Derisiklik Profillerinin Deneyisel ve Teorik Olarak incelenmesi. In: Mamkon '97 ö.T.U.È .1. Makina MuÈ h. Kongresi. p. 129-36.

Kurt H. 1997. Tuz Tabakali Gunes Havuzlarninin Matematik Modellemesi. Yuksek Lisans Tezi, Sakarya Universitesi, Mu h. Faku ltesi, Sakarya.



Experimental and numerical study of heat transfer and salinity gradient in a laboratory solar pond

ABSTRACT

Solar ponds are large scale energy collectors with integral heat storage for supplying thermal energy. In the present work, both experimental and numerical parts of solar pond performance have been investigated. In the experimental part, an insulated solar pond with a surface area of 0.5 m^2 and a depth of 1.0 m was built at the University of Tehran to investigate the performance of solar pond under laboratory conditions. The three salty water zones (upper convective, non-convective and lower convective) were formed by filling the pond with salty water of various densities. 12 sensors (type LM35) were used to measure the temperature profile within the pond. Solar radiation was simulated by four 500W light projectors that present a spectrum similar to the solar one. In the theoretical part, a one dimensional transient mathematical model was developed to predict the temperature distribution along the solar pond. A maximum temperature of 50°C was recorded in the heat storage zone in four weeks. The results obtained from the numerical simulation are compared with the experimental results and it has been found that they are in a good agreement.

Key words: solar pond, solar energy, salinity