

بررسی تجربی یک استخر خورشیدی گرادیان نمکی کوچک در شهرکرد

سید احمد مرتضوی باباحیدی^۱، رحیم ابراهیمی^۲ و علی ملکی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۹

۱- دانشجوی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد

۲- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد

*مسئول مکاتبه maleki@agr.sku.ac.ir

چکیده

انرژی خورشیدی وسیع ترین منبع انرژی پاک در جهان است و در اکثر مناطق قابل دسترسی است. انرژی خورشیدی از جمله انرژی های رقیق و متناوب است که برای استفاده نیاز به جمع آوری دارد. یک نمونه از جمع کننده های انرژی خورشیدی، استخرهای خورشیدی اند که انرژی خورشید را توسط آب نمک با دانسیته بالا جمع آوری و ذخیره می کنند. رایج ترین نوع استخرهای خورشیدی، استخرهای گرادیان نمکی هستند که از یک لایه گرادیانی برای جلوگیری از هدر رفت انرژی استفاده می کنند. در این تحقیق، یک استخر گرادیان نمکی کوچک به صورت استوانه ای با قطر ۶۵ سانتی متر و ارتفاع کلی ۸۵ سانتی متر ساخته شد و به مدت ۱۰ هفته مورد بررسی قرار گرفت. استخر به صورت گرادیانی با سه لایه مجزا ساخته و به طور کامل عایق بندی شد. بعد از ساخت استخر، دانسیته لایه ها بر اثر اختلاط مقداری با دانسیته طراحی شده تفاوت پیدا کرد؛ اما پس از یک هفته دانسیته استخر به صورت نسبی به پایداری رسید و ساختار لایه ای خود را تا پایان دوره آزمایش ها حفظ کرد. بیشینه دمای ثبت شده ۴۱/۷ درجه سلسیوس بود. تغییرات افزایش دما برای لایه ذخیره سازی بسیار ناچیز بود که پایین بودن دمای محیط را می توان اصلی ترین علت آن دانست. دانسیته لایه سطحی در طول دوره آزمایش روزانه در حال افزایش بوده است، اما دانسیته لایه گرادیانی کمترین تغییرات را در بین لایه های استخر داشت. همچنین تغییرات دما به طور میانگین روزانه ۰/۳۷ درجه سلسیوس افزایش داشت.

واژه های کلیدی: انرژی خورشیدی، لایه گرادیانی، دانسیته، دما، ذخیره انرژی

۱- مقدمه

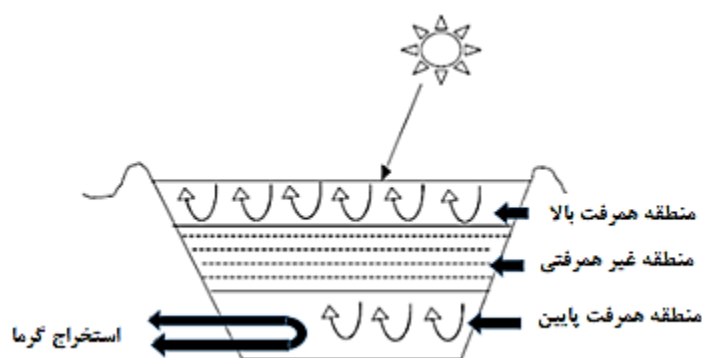
بر اساس آمار ارائه شده میانگین روزهای ابری کامل در شهرکرد، ۳۷ روز است و ساعات آفتابی در طول سال به طور متوسط در این شهر ۳۱۴۴ ساعت گزارش شده است که مقدار قابل توجهی است. همچنین روزهای همراه با گرد و خاک در شهرکرد به طور متوسط ۵ روز اعلام شده که نشان دهنده آسمان صاف و بدون آلودگی در این شهر است. تمام این عوامل موجب شده اند که شهرکرد از نظر تئوری شرایط مناسب را برای استفاده از روش های مختلف استفاده از انرژی خورشیدی دارا باشد (بی نام، ۱۳۹۵).

فناوری استخرهای خورشیدی یکی از فناوری های نسبتاً ساده استفاده از انرژی خورشید است. این استخرها از سه ناحیه آب شور با دانسیته های مختلف تشکیل شده اند. لایه میانی استخر به گونه ای طراحی می شود که از حرکت همرفتی در استخر جلوگیری کند و این امر موجب ذخیره شدن انرژی در لایه زیرین استخر می شود (جعفر زاده، ۱۳۷۹). نور خورشید با عبور از لایه های مختلف استخر به کف آن

با توجه به ذخایر محدود انرژی فسیلی و افزایش سطح مصرف انرژی در جهان، دیگر نمی توان به منابع موجود انرژی جهان متکی بود. انرژی خورشیدی یکی از منابع تأمین انرژی رایگان، پاک و عاری از اثرات مخرب زیست محیطی است که می تواند، به عنوان جایگزین مناسبی برای سوخت های فسیلی در نظر گرفته شود. مزیت دیگر انرژی خورشیدی قابل دسترسی بودن آن در اکثر مناطق زمین است. انرژی نوری که از خورشید در هر ساعت به زمین می تابد بیشتر از کل انرژی است که ساکنین زمین در طول یک سال مصرف می کنند. در هر ثانیه ۴/۲ میلیون تن از جرم خورشید به انرژی تبدیل می شود. با توجه به این که جرم خورشید حدود ۳۳۳ هزار برابر وزن زمین است، این کره نورانی را می توان به عنوان منبع عظیم انرژی تا ۵ میلیارد سال آینده به حساب آورد (دشتی مفرد و همکاران، ۱۳۹۲).

حاصل از این پژوهش نشان داد که دمای لایه‌ی ذخیره‌سازی این استخر در تابستان به بیش از ۸۰ درجه سلسیوس می‌رسید (الانزی، ۲۰۱۲). دشتی مفرد و همکاران (۱۳۹۱) استخر کوچکی را با عمق ۱ متر و قطر ۰/۸ متر را در دانشگاه تهران ساختند. این استخر به مدت چهار هفته مورد مطالعه قرار گرفت. بیشینه دمای به‌دست‌آمده از این استخر در حدود ۵۰ درجه سلسیوس بود. در استخرهایی با مقیاس بزرگ، دمای کاری استخر معمولاً به ۸۰-۹۰ درجه سلسیوس می‌رسد (دشتی مفرد و همکاران، ۱۳۹۱، تابور و وینبرگر، ۱۹۸۱ و تابور ۱۹۸۰). شکل ۱ لایه‌های مختلف یک استخر خورشیدی را نمایش می‌دهد.

می‌رسد و دما را به تدریج افزایش می‌دهد. لایه گرادپانی مانع از بالا آمدن مولکول‌های آب گرم به سمت سطح استخر می‌شود. در این شرایط اگر اتلاف گرمایی زیادی از بدنه استخر وجود نداشته باشد دمای لایه زیرین استخر به تدریج افزایش پیدا می‌کند. در پژوهشی رفتار یک استخر خورشیدی کوچک به مساحت ۱/۸ مترمربع و عمق ۰/۶۴ متر، به مدت ۳۵ روز، در موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران مورد بررسی قرار گرفت. بیشینه دمای به‌دست‌آمده از استخر طی دوره آزمایش در حدود ۷۰ درجه سلسیوس بود (بیدختی و محمدنژاد، ۱۳۷۶). در این راستا نیز می‌توان به ساخت استخر کوچکی با مساحت سطح مقطع ۸ مترمربع در کشور کویت اشاره کرد. نتایج



شکل ۱- لایه‌های مختلف استخر گرادپان نمکی

حفظ پایداری و کاربرد استخر خورشیدی در مناطق متعدد و با ابعاد مختلف صورت گرفته است، اما هیچکدام از این بررسی‌ها در مناطق سردسیر نبوده است. از طرفی تحقیقات انجام شده روی استخرهای خورشیدی در ایران بسیار ضعیف و جزئی بوده و فعالیت‌های بسیار محدودی در این مقوله صورت گرفته است. لذا هدف از این تحقیق تلاش برای ساخت یک استخر خورشیدی و بررسی حفظ پایداری لایه‌های مختلف آن به همراه عملکرد استخر طی دوره آزمایش‌ها بود. در این راستا تغییرات دانسیته، دما و اثرات تغییر دما بر استخر گرادپان نمکی بررسی گردید.

۲- مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی انتقال گرما بین لایه‌های مختلف استخر، میزان و نحوه ذخیره‌سازی انرژی، همچنین مطالعه رفتار استخر و بررسی تغییرات دانسیته و دما؛ یک استخر خورشیدی کوچک با سطح مقطع دایره‌ای در شهر شهرکرد ساخته شد. ابعاد استخر با توجه به مطالعات انجام‌شده روی استخرهای کوچک آزمایشگاهی توسط سایر محققین انتخاب گردید. ارتفاع کلی استخر ۹۰، ارتفاع آب استخر ۸۵ و قطر استخر ۶۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به‌منظور جلوگیری از زنگ‌زدگی جداره

لایه همرفتی بالا به‌منظور جبران کمبود ناشی از تبخیر سطحی آب استخر در نظر گرفته می‌شود و باید به‌طور مداوم با آب تازه پر گردد. عمق این لایه معمولاً بین ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود و توسط آب شیرین یا آب نمک با دانسیته پایین (کمتر از ۰/۳) پر می‌شود (شوبر، ۲۰۱۰). عمق لایه میانی که به آن لایه گرادپانی یا لایه غیر همرفتی نیز گفته می‌شود با توجه به عمق لایه ذخیره‌سازی تعیین می‌گردد. معمولاً عمق این لایه در استخرهای کوچک بین ۰/۳ تا ۰/۵ متر و در استخرهای بزرگ بین ۱ تا ۳ متر انتخاب می‌شود (الانزی، ۲۰۱۲). عمق لایه همرفتی پایین بستگی به هدف و نحوه برداشت انرژی از استخر دارد. مثلاً وقتی درجه حرارت بالا مورد نیاز است باید عمق این ناحیه را کم نگه داشت، ولی برای جلوگیری از تغییرات و نوسانات زیاد دمایی در این ناحیه نباید عمق آن خیلی کم باشد. کمترین عمق برای لایه ذخیره‌سازی ۰/۵ متر اعلام‌شده است. افزایش عمق لایه ذخیره‌سازی موجب کاهش دمای این ناحیه و نیز افزایش مقدار انرژی ذخیره‌شده در این منطقه می‌شود. از طرفی افزایش عمق موجب افزایش از دست دادن انرژی از این قسمت می‌شود. اکثر محققین مناسب‌ترین عمق را برای این لایه برابر ۱ متر دانسته‌اند (شوبر، ۲۰۱۰).

نور خورشید، دیواره داخلی و کف استخر بارنگ سیاه رنگ آمیزی شد (شکل ۲).



شکل ۲- رنگ آمیزی و عایق بندی جداره داخلی استخر

داخلی استخر و ممانعت از ورود آلودگی های ناشی از خوردگی و زنگ زدگی در اثر تماس با آب نمک به داخل استخر، سطح داخلی استخر با یک لایه پلاستیک نازک عایق بندی گردید. به منظور جذب حداکثری

گرادیانی، آب نمک لازم برای هر کدام از لایه ها بیرون از استخر تهیه می شد، سپس به آرامی به داخل استخر تزریق می گردید. بعد از اتمام تشکیل قسمت گرادیانی، قسمت سطحی تشکیل شد. برای این کار، آب نمک با دانسیته ۲٪ و به مقدار ۳۳/۲ لیتر در خارج از استخر تهیه شد. سپس همانند اضافه کردن لایه های قسمت گرادیانی این قسمت هم به ارتفاع ۱۰ سانتی متر به استخر اضافه شد؛ شکل ۳ دانسیته های در نظر گرفته برای ارتفاع های مختلف استخر را نشان می دهد.

بررسی و ثبت داده های در یک دوره ۱۰ هفته ای انجام شد که از اول اسفند سال ۱۳۹۴ شروع و تا دهم اردیبهشت سال ۱۳۹۵ ادامه داشت. اندازه گیری دما روزانه سه بار و در ساعت های ۹ و ۱۵ و ۲۱ صورت می گرفت و اندازه گیری دانسیته روزانه یک بار و در ساعت ۱۵ بعد از ثبت اطلاعات مربوط به دما انجام می شد. برای اندازه گیری دمای سطوح مختلف استخر از ۱۰ حس گر حرارتی با دقت بالا، (۰/۱) درجه سلسیوس) استفاده شد. فاصله حس گرها از کف استخر به ترتیب برابر ۵-۱۵-۲۵-۳۵-۴۵-۵۵-۶۵-۷۰-۷۵ و ۸۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. دمای سطح استخر نیز به صورت دستی و توسط دماسنج میله ای با نام تجاری TA-288 با دقت ۰/۱ درجه اندازه گیری و ثبت گردید.

به منظور اندازه گیری دانسیته نقاط مختلف استخر، ۱۰ عدد شیر لاستیکی ۰/۵ اینچ بر روی بدنه استخر نصب گردید. شیرها بر روی بوش های تعبیه شده در بدنه استخر نصب شدند. برای جلوگیری از نشت آب در محل اتصال از نوار تفلون استفاده شد. فاصله شیرها، دقیقاً برابر با فاصله حس گرها از کف استخر در نظر گرفته شد. شکل ۴ نحوه قرار گرفتن شیرها را بر روی بدنه استخر نشان می دهد. نمونه برداری از سطح

برای جلوگیری از آلودگی آب استخر توسط گرد و خاک و سایر عوامل بیرونی، همچنین به منظور جلوگیری از تبخیر سطحی و کاهش آب استخر و به هم خوردن ثبات آن، از یک حفاظ شیشه ای شفاف به ضخامت ۴ میلی متر بر روی سطح استخر استفاده شد. به منظور جلوگیری از خروج انرژی از طریق کف و جداره ها، استخر از بیرون توسط دو لایه پشم و شیشه به ضخامت مجموع ۵۰ میلی متر به طور کامل عایق بندی گردید.

نمک استفاده شده برای تهیه آب شور کلرید سدیم بود. عمق لایه ی سطحی (UCZ^۱) برابر با ۱۰ سانتی متر و دانسیته نمک آن ثابت و برابر ۲٪ در نظر گرفته شد. عمق لایه گرادیانی (NCZ^۲) برابر با ۳۵ سانتی متر و دانسیته آن متغیر، از ۲٪ تا ۲۰٪ در نظر گرفته شد. به طوری که دانسیته این قسمت به صورت خطی بین لایه های سطحی و ذخیره سازی افزایش پیدا کند و به صورت خطی از ۲٪ تا ۲۰٪ برسد و عمق لایه ذخیره سازی (LCZ^۳) برابر با ۳۵ سانتی متر و دانسیته آن یکنواخت و برابر ۲۰٪ در نظر گرفته شد. پر کردن استخر به روش لایه ای صورت گرفت. به این ترتیب که ابتدا برای ایجاد منطقه ذخیره سازی، مقدار ۱۱۶ لیتر آب نمک، با دانسیته ۲۰٪ در بیرون استخر تهیه گردید. سپس تا ارتفاع ۳۵ سانتی متر توسط آن پر شد. مرحله بعدی ایجاد منطقه گرادیانی بود. به منظور ایجاد یک شیب خطی، منطقه گرادیانی به ۹ قسمت مساوی تقسیم شد. دانسیته هر لایه به مقدار ۲٪ کمتر از لایه قبلی در نظر گرفته شد. برای تشکیل لایه

^۱Upper Convective Zone

^۲Non-Convective Zone

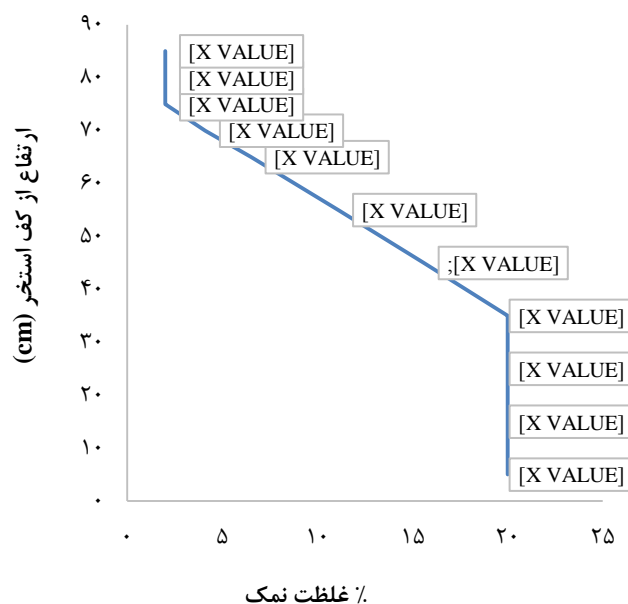
^۳Lower Convective Zone

بعد از تشکیل استخر دانسیته لایه‌ها در هفته‌ی اول با شیب تندتری به هم نزدیک شدند. ولی در اواسط هفته دوم دانسیته در لایه‌های مختلف به ثبات نسبی رسید. شکل ۵ روند کلی تغییرات دانسیته استخر برای ارتفاع‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، اختلاف دانسیته در لایه‌های فوقانی (ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر تا سطح استخر) و تحتانی (ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر تا کف استخر) نسبت به لایه‌های میانی (لایه‌ی گرادیبانی) کمتر است. این شباهت دانسیته در لایه‌های سطحی و لایه‌های پایینی استخر، به دلیل نحوه‌ی طراحی و تشکیل استخر به وجود آمده است. در واقع، عملکرد صحیح استخر و توانایی لایه ذخیره‌سازی در جذب و نگهداری انرژی خورشیدی به این نوع توزیع دانسیته در لایه‌های استخر بستگی دارد. در حالت ایده‌آل دانسیته نمک در تمامی قسمت‌های لایه ذخیره‌سازی باید کاملاً یکنواخت باشد. همین‌طور تمام قسمت‌های لایه سطحی باید از غلظت یکسانی برخوردار باشند. ولی دست یافتن به این مهم بسیار دشوار و تقریباً ناممکن است و در اکثر موارد، هنگام ساخت استخر لایه‌ها مقداری باهم مخلوط شده و دانسیته آن‌ها از مقادیر طراحی شده فاصله می‌گیرد.

استخر نیز به صورت دستی انجام می‌گرفت. برای تعیین میزان دانسیته یا دانسیته نمک از دستگاه رفکٹومتر استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

هرچند در هنگام تشکیل لایه‌های مختلف استخر سعی شد که عملیات تشکیل لایه‌ها با صبر و دقت کافی صورت گیرد، ولی باین حال لایه‌های تشکیل شده، مقداری اختلاف را با دانسیته‌های تعیین شده نشان می‌دادند. بیشترین اختلاط و انحراف از دانسیته تعیین شده در مرز بین لایه‌ها صورت پذیرفت. مخصوصاً در مرز بین لایه گرادیبانی و لایه سطحی استخر، یعنی در ارتفاع ۷۵ سانتی‌متری از کف استخر. در این قسمت، دانسیته نمک به میزان ۲/۷ درصد نسبت به دانسیته طراحی شده، افزایش پیدا کرده بود. همچنین کمترین انحراف در لایه گرادیبانی دیده می‌شد، مخصوصاً در ارتفاع ۵۵ سانتی‌متری از کف استخر که به اندازه ۰/۴ درصد از دانسیته تعیین شده افزایش داشت. میزان انحراف از دانسیته طراحی شده برای لایه‌های مختلف استخر در جدول ۱ نشان داده شده است.



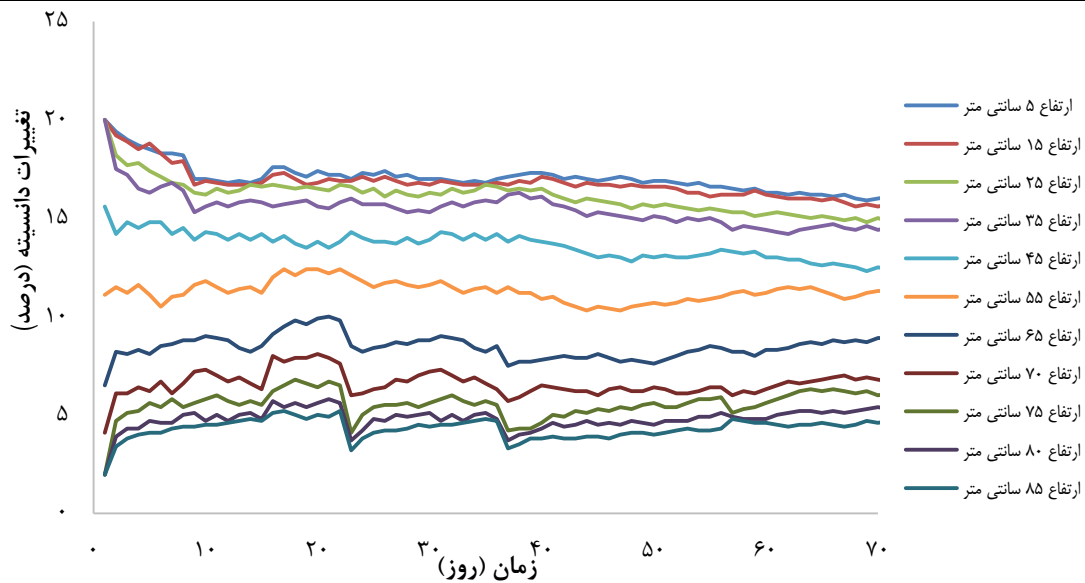
شکل ۳- دانسیته‌های در نظر گرفته شده برای تشکیل استخر



شکل ۴- نحوه قرار گرفتن شیرها را بر روی بدنه استخر

جدول ۱- میزان انحراف از دانسیته طراحی شده بعد از ساخت استخر

ارتفاع	۵	۱۵	۲۵	۳۵	۴۵	۵۵	۶۵	۷۰	۷۵	۸۰	۸۵
دانسیته ایده آل	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۱۵/۶	۱۱/۱	۶/۵	۴/۱	۲	۲	۲
دانسیته روز اول	۱۹/۴	۱۹/۲	۱۸/۲	۱۷/۵	۱۴/۲	۱۱/۵	۸/۲	۶/۱	۴/۷	۳/۹	۳/۴
انحراف	-۰/۶	-۰/۸	-۱/۸	-۲/۵	-۱/۴	۰/۴	۱/۷	۲	۲/۷	۱/۹	۱/۴



شکل ۵- روند کلی تغییرات دانسیته استخر

کرده و در اواسط هفته دوم (روز چهارم از هفته دوم) کاهش دانسیته این لایه کمتر شد و تا انتهای دوره آزمایش با یک شیب بسیار جزئی کاهش پیدا کرد. در جدول ۲ تغییرات دانسیته در روز ابتدا و انتهای دوره آزمایش نشان داده شده است.

بررسی شکل ۵ نشان می‌دهد که دانسیته لایه سطحی در طول دوره آزمایش در حال افزایش بوده است. دانسیته لایه گرادپانی کمترین تغییرات را در بین لایه‌های استخر دارا بود و در محدوده وسط استخر (ارتفاع ۵۵ سانتی‌متری)، تغییرات دانسیته کاهش پیدا می‌کرد. دانسیته لایه ذخیره‌سازی در روزهای اولیه آزمایش با شیب تندتری کاهش پیدا

جدول ۲- تغییرات دانسیته در ابتدا انتهای دوره آزمایش

ارتفاع (cm)	دانسیته روز اول	دانسیته روز آخر	اختلاف
۵	۱۹/۴	۱۶/۱	-۳/۳
۱۵	۱۹/۲	۱۵/۷	-۳/۵
۲۵	۱۸/۲	۱۴/۸	-۳/۴
۳۵	۱۷/۵	۱۴/۵	-۳
۴۵	۱۴/۲	۱۲/۴	-۱/۸
۵۵	۱۱/۵	۱۱/۳	-۰/۲
۶۵	۸/۲	۸/۹	۰/۷
۷۰	۶/۱	۶/۷	۰/۶
۷۵	۴/۷	۶/۱	۱/۴
۸۰	۳/۹	۵/۳	۱/۴
۸۵	۳/۴	۴/۷	۱/۳
	۱۸/۹	۱۵/۵	-۳/۴
	۱۰	۹/۸	-۰/۱۷
	۴	۵/۳۶	۱/۳۶

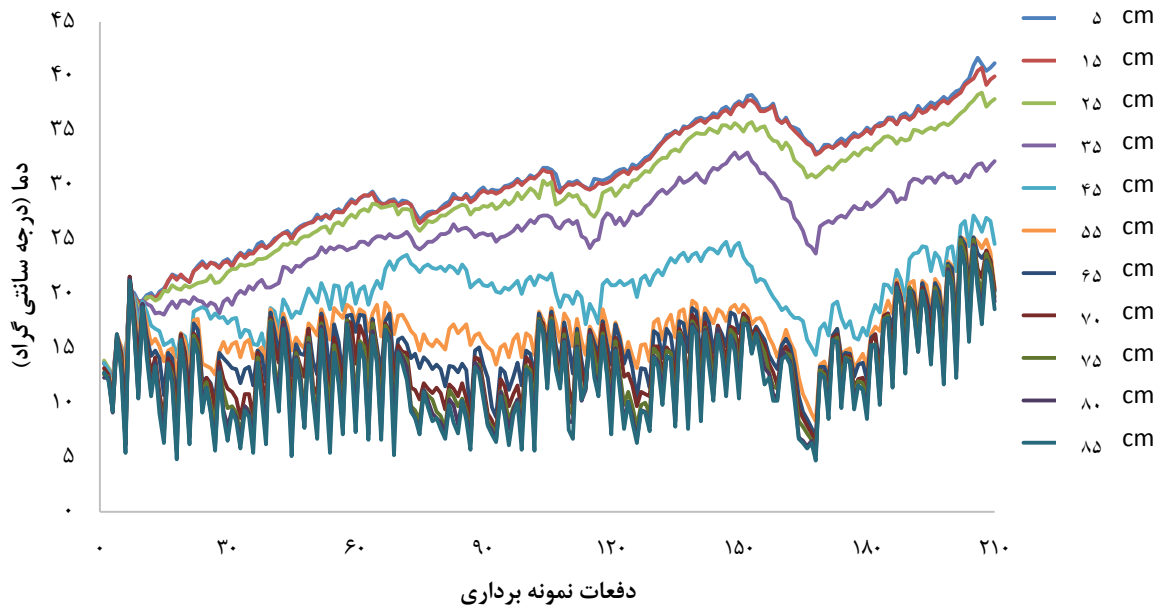
مجاور وجود ندارد. دلیل تغییر دانسیته در دیگر قسمت‌های استخر رسیدن به حالت تعادل و پایدار است. در قسمت میانی استخر به دلیل وجود حالت تعادل، دیگر نیازی به تغییر دانسیته برای رسیدن به پایداری نیست. از طرفی تغییرات دانسیته در لایه‌های گرادپانی و سطحی تا حد زیادی متقارن هستند. زیاد شدن دانسیته لایه سطحی هم‌زمان با کم شدن دانسیته لایه ذخیره‌سازی رخ می‌دهد. به همین دلیل میانگین دانسیته استخر، همواره در ارتفاع خاصی از استخر قرار می‌گیرد و جایگاه آن تغییر زیادی نمی‌کند.

شکل ۶ روند کلی تغییرات دمای استخر برای ارتفاع‌های مختلف، در طول در طول ۷۰ روز دوره‌ی آزمایش (۳ نمونه برای هر روز) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، لایه‌های فوقانی استخر دارای دمای تقریباً برابر هستند. از ارتفاع ۵۵ سانتیمتری تا سطح استخر؛ با تغییر ارتفاع؛ دما چندان تغییری نمی‌کند. با کاهش عمق و مشاهده رفتار دمایی لایه‌های تحتانی استخر، مشخص می‌شود که از ارتفاع ۴۵ سانتی‌متری به بعد با تغییر ارتفاع، دمای لایه‌ها نیز تغییر محسوسی می‌کند. این تغییرات تحت تأثیر ماهیت گرادپانی لایه میانی استخر رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، با افزایش عمق استخر، لایه گرادپانی گرمای حاصل از تابش خورشید را در استخر نگه‌داشته و اجازه خروج به آن نمی‌دهد. در نتیجه دمای آن لایه افزایش پیدا می‌کند. این روند افزایش دما در اثر کاهش ارتفاع تا لایه ذخیره‌سازی ادامه دارد. در لایه ذخیره‌سازی به علت یکسان بودن دانسیته نمک و همگن بودن این ناحیه، دما به صورت تقریباً یکسان در کل لایه ذخیره‌سازی منتشر و

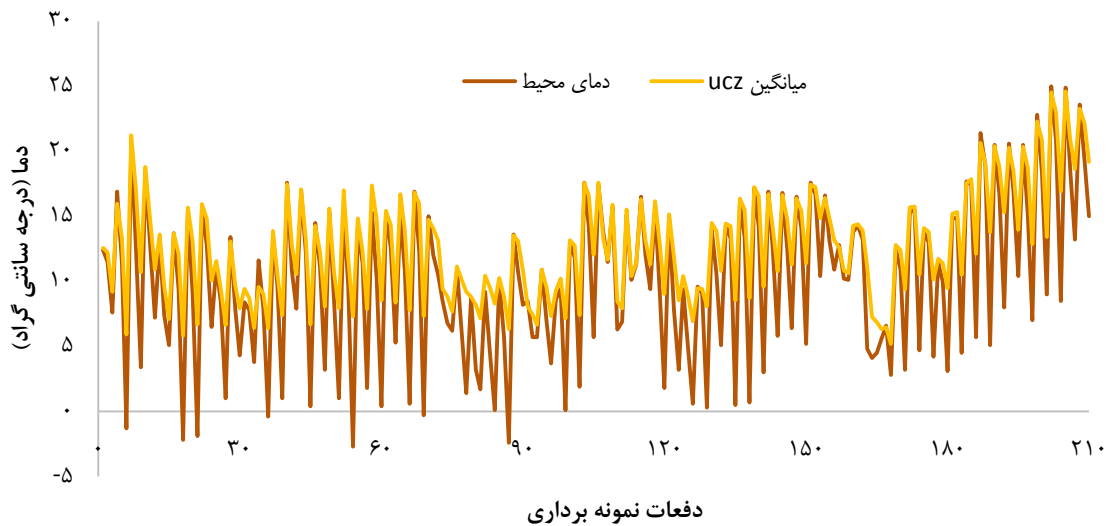
بیشترین دانسیته نمک در لایه زیرین استخر، یعنی ارتفاع ۵ سانتی‌متری، دیده می‌شود. بالا بودن دانسیته نمک را می‌توان با بالاتر بودن دمای این قسمت از استخر نسبت به سایر قسمت‌ها توجیه کرد. همان‌طور که در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود، دانسیته در ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری با سایر قسمت‌های لایه گرادپانی تفاوت زیادی دارد. دلیل آنرا می‌توان به وجود آمدن یک لایه به عنوان مرز بین لایه ذخیره‌سازی و لایه گرادپانی در ارتفاع ذکر شده، بیان کرد. در واقع لایه مرزی به وجود آمده لایه‌ای مجزا محسوب می‌شود و روند تغییرات آن هرچند شبیه به لایه ذخیره‌سازی است ولی با آن تفاوت دارد و رفتار لایه مرزی به صورت مستقل از لایه ذخیره‌سازی است.

تغییر دانسیته نمک در لایه گرادپانی نسبت به سایر قسمت‌های استخر کمتر بود. همچنین، با نزدیک شدن به سمت لایه میانه استخر، از میزان این تغییرات کاسته و دانسیته دارای ثبات بیشتری می‌گردد. به طوری که دانسیته نمک در قسمت میانی استخر، در ابتدا و انتهای آزمایش‌ها، تغییر زیادی نداشته و تقریباً ثابت بوده است. برای مثال تفاوت دانسیته در ارتفاع ۵۵ سانتی‌متری از کف استخر، در طول دوره آزمایش برابر ۰/۲ درصد بوده است که مطابق با تحقیقات افتاری (۱۳۹۱) بود. این مقدار برای ارتفاع‌های ۶۵ و ۷۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۰/۶ درصد بوده است. تغییرات کم و ثبات دانسیته در این قسمت از استخر را می‌توان به این صورت بیان نمود که چون دانسیته نمک در قسمت میانی استخر، با میانگین دانسیته نمک در کل استخر برابر است، در این ناحیه تمایلی برای نزدیک شدن به دانسیته لایه‌های

ذخیره می‌گردد. شکل ۷ تأثیر دمای محیط بر میانگین دمایی لایه‌های بالایی استخر مشاهده می‌شود.



شکل ۶- روند کلی تغییرات دمایی استخر در طول ۷۰ روز (۳ نمونه برای هر روز)



شکل ۷- تأثیر دمای محیط بر لایه سطحی

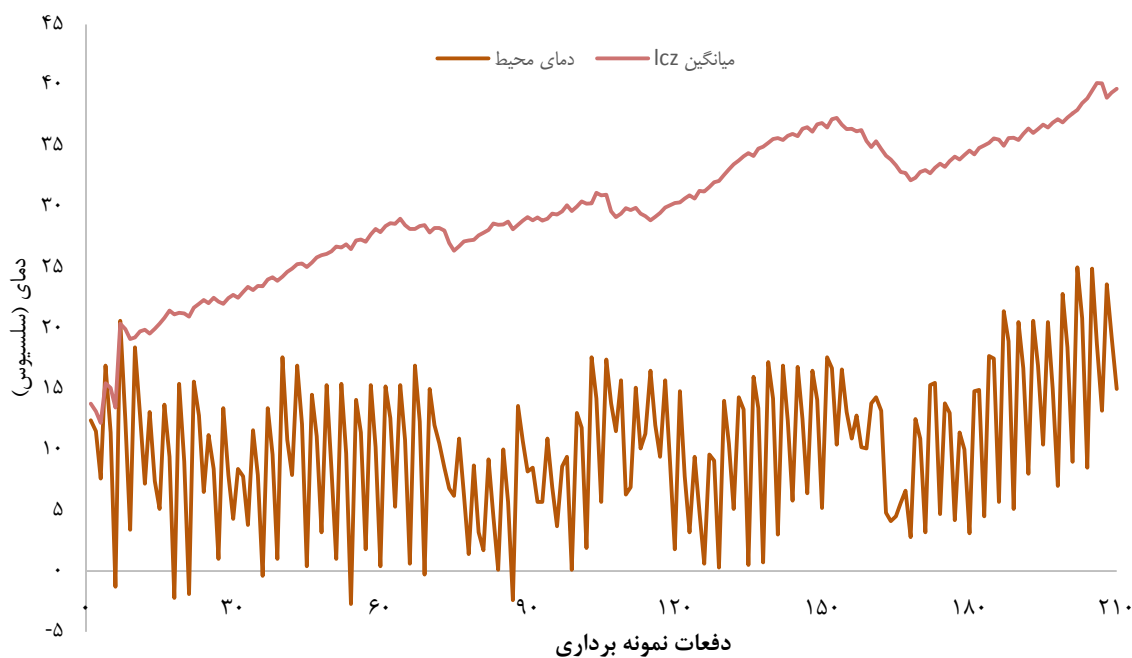
و ساعت به ثبت رسید که برابر $40/1$ درجه سلسیوس بود. در آخرین روز اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها، برای لایه ذخیره‌سازی میانگین دمایی $39/3$ درجه سلسیوس، ثبت شده است. با توجه به این که میانگین دمای لایه ذخیره‌سازی در اولین روز آزمایش‌ها برابر 13 درجه سلسیوس بود، لذا می‌توان دریافت که دمای لایه ذخیره‌سازی $26/3$ درجه سلسیوس و

در طول دوره آزمایش، بیش‌ترین دمای ثبت‌شده برای لایه ذخیره‌سازی و به‌طور کلی بیش‌ترین دمای ثبت‌شده توسط کلیه حس-گرهای دما، مقدار $41/7$ درجه سلسیوس بود که در ارتفاع 5 سانتی‌متری از کف استخر، در روز 69 آزمایش‌ها در ساعت 15 ، ثبت شد. بیش‌ترین میانگین دمایی برای لایه ذخیره‌سازی نیز در همین روز

گرادیانی به صورت شبه خطی تغییر می کند و با توجه به این که دمای آب نمک در ارتفاع های مختلف استخر ارتباط مستقیم با افزایش دانسیته نمک و کاهش ارتفاع دارد، شبه خطی بودن دما در لایه گرادیانی امری طبیعی و قابل پیش بینی است. اختلاف دمایی قسمت های مختلف لایه سطحی بسیار ناچیز است و با تغییر ارتفاع، تغییرات دمایی زیادی رخ نمی دهد. این امر به دلیل دانسیته پایین نمک در این بخش از استخر صورت می پذیرد. همچنین نزدیک بودن دانسیته نمک در ارتفاع های مختلف نیز، مزید بر علت است. در هنگام ساخت استخر لایه سطحی به صورت همگن و یکنواخت تشکیل شد. اگر لایه سطحی به صورت یکنواخت باقی می ماند، این اختلاف جزئی بین ارتفاع های مختلف نیز تا حد زیادی کاهش می یافت.

به طور میانگین روزانه 0.37 درجه سلسیوس افزایش داشته است. این افزایش دما در مقایسه با افزایش دمای ثبت شده توسط سایر محققین که بر روی استخرهای کوچک آزمایشگاهی تحقیقاتی را انجام داده اند مقدار کمتری است (بیدختی و محمدنژاد، ۱۳۷۶، الانزی، ۲۰۱۲). علت این موضوع را می توان تفاوت در ابعاد استخر ساخته شده و منطقه مورد مطالعه دانست.

شکل ۸ تأثیر دمای محیط بر دمای لایه ذخیره سازی را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، روند تغییرات میانگین دمای لایه گرادیانی بیشترین هم خوانی را با تغییرات دمایی ثبت شده برای ارتفاع ۵۵ سانتی متر نشان می دهد. با توجه به این که این ارتفاع در میانه لایه گرادیانی قرار دارد، می توان نتیجه گرفت که؛ دما در لایه گرادیانی به صورت شبه خطی توزیع شده است. از آنجایی که دانسیته نمک در لایه



شکل ۸- تأثیر دمای محیط بر دمای لایه ذخیره سازی

طول دوره آزمایش حفظ نمود. لایه گرادیانی نیز در طول زمان آزمایشات شیب خود را حفظ کرد و از بین نرفت. البته مقدار شیب این لایه در هفته های مختلف اندکی تفاوت داشت. این تفاوت بر اثر مقادیر مختلف دانسیته در لایه های ذخیره سازی و سطحی به وجود می آمد. با توجه به شرایط استخر و پایداری آن در هفته های مختلف، می توان نتیجه گرفت که ساخت و نگهداری استخر گرادیان نمکی در شهر شهر کرد و مناطق مشابه با آن امکان پذیر است. با توجه به این که ساخت و نگهداری از پایداری استخر خورشیدی در موقعیت های متفاوت امکان پذیر است، همچنین با توجه به پتانسیل بالای ایران برای استفاده

۴- نتیجه گیری

یکی از اهداف این پژوهش بررسی اطمینان به پایداری استخر در مناطق سردسیر بود. با توجه به این که چگونگی کارکرد و شرایط پایداری استخرهای خورشیدی تا حد بسیار زیادی به دما وابسته هست و امکان دارد در دماهای پایین پایداری استخر تحقق پیدا نکند، روند کلی تغییرات دانسیته نشان داد که در شرایط محیطی شهر شهر کرد و دیگر مناطق سردسیر، پایداری استخر خورشیدی حفظ شده و لایه های مختلف استخر، پس از تشکیل، به طور کامل باهم مخلوط نشدند. دانسیته نمک در لایه ذخیره سازی حالت همگن و یکنواخت خود را در

انرژی نیست. البته توجه به این نکته هم ضروری است که استان چهارمحال و بختیاری استانی کوهستانی و سردسیر است، به همین سبب اکثر ماه‌های سال در شهر شهرکرد سرد هستند. از آنجایی که استخر خورشیدی به منظور جذب و ذخیره انرژی خورشیدی در تمام فصول سال طراحی و ساخته می‌شود، عدم امکان جذب انرژی و بالا رفتن دمای لایه گرادیانی در نیمی از سال، موجب کاهش بهره‌وری و راندمان استخر خورشیدی تا حد زیادی می‌شود. از این رو علیرغم امکان ساخت این استخرها در منطقه شهرکرد، احداث استخر خورشیدی در این مناطق توجیه اقتصادی و بازده مناسبی ندارد. از طرفی برای استفاده از انرژی ذخیره‌شده در لایه گرادیانی؛ دمای لایه ذخیره‌سازی باید بین ۷۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس باشد، که این دما به هیچ وجه در ماه‌های سرد سال در این مناطق قابل حصول نیست. لذا با افزایش سطح مقطع استخر نیز نمی‌توان این مشکل را حل نمود.

از این نوع انرژی، در مناطق کویری و میانی ایران شرایط احداث استخر به خوبی فراهم است.

به دلیل پایین بودن دمای محیط در زمان آزمایش، دمای لایه گرادیانی نسبت به سایر استخرهای مشابه افزایش خیلی کمتری داشت. بیشینه دمای ثبت شده طی ۱۰ هفته آزمایش بر روی استخر خورشیدی ۴۱/۷ درجه سلسیوس بود. اختلاف دما برای لایه ذخیره‌سازی طی شبانه روز به مراتب کمتر از لایه سطحی بوده است. این امر نشان‌دهنده تاثیر لایه گرادیانی بر حفظ حرارت ذخیره شده در استخر است.

به دلیل وجود آسمان صاف و بدون آلودگی، ساعت آفتابی متوسط و قرار داشتن در عرض و طول جغرافیایی مناسب، از سایر فناوری‌های خورشیدی در شهر شهرکرد به خوبی می‌توان بهره برد. همچنین با توجه به میزان افزایش دما و ذخیره انرژی در استخر خورشیدی می‌توان گفت در فصل‌های سرد سال استخر خورشیدی به هیچ عنوان جوابگوی تأمین

منابع

- افتاری م. ۱۳۹۱. تأمین انرژی فرایند نمک‌زدایی از نفت خام با بهره‌گیری از استخر خورشیدی. ماهنامه اکتشاف و تولید. شماره ۹۲. بی نام. ۱۳۹۵، آمارنامه اطلاعات هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری. سایت اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری. موجود در سایت www.chaharmahalmet.ir
- بیدختی ع. الف. و محمدنژاد، ع. ر. ۱۳۷۶. پایداری و بازده گرمایی یک استخر خورشیدی کوچک. استقلال. دانشگاه صنعتی اصفهان. شماره ۱۶.
- جعفرزاده م. ر. ۱۳۸۷. استخرهای خورشیدی، کاربردهای آن و روش مطالعات مکان‌یابی در ایران. کنفرانس بین‌المللی برق. دانشگاه فردوسی مشهد.
- دشتی مفرد م.، کیهانی ع. ر.، موسی‌زاده ح. و جعفرزاده م. ر. ۱۳۹۱. بررسی تجربی و نظری انتقال گرما و رفتار گرادیانی نمک در یک استخر خورشیدی آزمایشگاهی. گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران.
- دشتی مفرد م.، کیهانی ع. ر.، موسی‌زاده ح. و جعفرزاده م. ر. ۱۳۹۲. بررسی کاربردی استخر خورشیدی در کشاورزی و امکان‌سنجی استفاده از آن در ایران. هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون. دانشگاه فردوسی مشهد.
- Al-Enezi I. 2012. **Salinity Gradient Solar Ponds: Theatrical Modelling and Integration with Desalination**. Ph.D. Thesis. Chemical Engineering Faculty of Engineering and Physical Sciences. University of Surrey.
- Schober B. 2010. **Membrane stratified solar ponds master programmer of energy systems**. Department of Technology and Built Environment University of Gävle. 2-18.
- Tabor H. and Weinberger Z. 1981. **Non-convecting solar ponds**. **Solar Energy Handbook**. Krielder & Kreith, McGraw-Hill Book Company. Chapter 10.
- Tabor H. 1980. **Non-convecting solar ponds**. Phil Trans R Soc Lond. A295:423–33. Reprinted in the book solar energy. Royal Society of London.

Experimental Study of a Small Salt Gradient Solar Pond in Shahrekord (Iran)

S. A. Mortazavi babahedi¹, R. Ebrahimi and A. Maleki^{2*}

Received: 2 March 2017

Accepted: 9 January 2018

¹Student of Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Iran

²Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Iran

*Corresponding author: maleki@agr.sku.ac.ir

Abstract

Solar energy is the largest resource of clean energy in the world and it is available in most areas. This energy is a durable energy that needs to be collected for use. An example for solar collectors is the solar pond that collect and store solar energy by high concentrated brine. The most common type of solar ponds are salt gradient ponds, which use a gradient layer to prevent the loss of energy. In this research, a small salt gradient pond was constructed with a cylinder diameter of 65 centimeters and a total height of 85 centimeters and examined for 10 weeks. The pond was constructed in a gradient form with three distinct layers and insulated completely. After construction of the pond, concentration of the layers differed slightly from designed concentration due to mixing. However, after a week, the density of the pool reached relative stability and retained its layered structure by the end of the experiment period. The maximum-recorded temperature was 41.7 °C. This little change in temperature of the storage layer could be in result of the low environmental temperature in the region. The surface layer density was increasing during the daily test period. However, the density of the gradient layer had the slightest variation among the pond layers. The temperature increased by an average rate of 0.37 ° C per day.

Keywords: Solar energy, Gradient layer, Density, Temperature, Energy storage