

مدلسازی اثر نانوذرات سیلیکا در لایه میانی یک استخر خورشیدی با گرادیان شوری

احسان سوختانلو^۱، حسین بیکی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۲	استخرهای خورشیدی یکی از مناسبترین روشهای جمع‌آوری و ذخیره انرژی خورشیدی در جهان می‌باشند. استخر خورشیدی با گرادیان شوری نوعی از استخرهای خورشیدی هستند که از سه لایه آب نمک با دانسیته‌های متفاوت تشکیل می‌شوند. در این پژوهش، تاثیر استفاده از نانوذرات سیلیکا با نسبتهای حجمی ۱، ۲، ۵، و ۱۰ درصد در لایه میانی استخر خورشیدی با گرادیان شوری بر روی عملکرد آن در چهار منطقه آب و هوایی در کشور ایران بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ذرات نانو سیلیکا در لایه میانی استخر خورشیدی باعث بهبود راندمان استخر خورشیدی شده و هرچه درصد نانوذرات استفاده شده بیشتر باشد، راندمان لایه پایینی نیز بیشتر خواهد شد. بیشینه افزایش در راندمان لایه پایین معادل ۱۷/۸۶٪ می‌باشد. همچنین با توجه به تفاوت بیشتر دمای لایه پایین استخر خورشیدی و محیط در منطقه سردسیر کشور، اضافه نمودن نانوذرات سیلیکا در این مناطق باعث بیشترین افزایش دمای لایه پایینی و راندمان خواهد شد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۲	
واژگان کلیدی: گرادیان شوری، استخر خورشیدی، نانوذرات سیلیکا.	

۱- مقدمه

مورد توجه جدی کلیه مردم جهان قرار گرفته است. در کشور ما نیز با توجه به پتانسیل بالا در جذب انرژی خورشیدی، استفاده از این منبع عظیم انرژی مورد توجه فراوانی قرار گرفته است.

روشهای مختلفی برای دریافت و تبدیل انرژی خورشیدی به انرژیهای دیگر وجود دارد. استخرهای خورشیدی یکی از مناسبترین روشهای جمع آوری و ذخیره انرژی خورشیدی در جهان می باشند که کاربردهای فراوانی در گرمایش منازل

با توجه به رشد مصرف سالانه انرژی در جهان جهت گرمایش در منازل، محیطهای صنعتی، کشاورزی و همچنین کاهش منابع انرژیهای فسیلی و وجود نگرانی های زیست محیطی استفاده از سوخت ها و انرژی های جایگزین و تجدیدپذیر مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است. یکی از منابع انرژی پایان ناپذیر، پاک و ارزان، انرژی خورشیدی می باشد که با توجه به مزایای زیاد، این انرژی

*. پست الکترونیک نویسنده مسئول: hbeiki@quct.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی قوچان

و کارگاه‌ها، خشک کردن محصولات زراعی، نمک زدایی، گرمایش گلخانه‌ای و تولید برق دارند [۱]. تاکنون مطالعات فراوان صنعتی، آزمایشگاهی و عددی متفاوتی بر روی استخر خورشیدی انجام شده است و از گذشته این مقوله، از موضوعات مورد توجه پژوهشگران بوده است. پیشگام پژوهش در زمینه استخر خورشیدی ون کالکسینسکی [۲] در سال ۱۹۰۲ می‌باشد. از آن زمان تاکنون کارهای عددی و آزمایشگاهی فراوانی بر روی استخرهای خورشیدی بویژه افزایش راندمان استخرهای خورشیدی انجام شده است. برای افزایش راندمان یک استخر خورشیدی باید مقدار دریافت و ذخیره انرژی خورشیدی را افزایش و یا میزان اتلاف حرارت از استخر را کاهش داد. از آنجا که بیشترین اتلاف در استخرهای خورشیدی با گرادیان شوری از لایه بالایی انجام می‌گیرد، در نتیجه بهترین راه جلوگیری از اتلاف حرارت، کاهش تلفات حرارت در لایه بالایی می‌باشد. از کارهای انجام گرفته برای کاهش اثرات تبخیر سطحی که مهمترین عامل اتلاف حرارت در استخرهای خورشیدی می‌باشد، می‌توان به کار روسکوویتز و همکارانش [۳] اشاره نمود. آنان در پژوهش خود به بررسی آزمایشگاهی جلوگیری از تبخیر سطحی برای یک مدل استخر خورشیدی با گرادیان شوری پرداختند. به منظور بررسی کاهش اثرات تبخیر بر روی عملکرد استخر خورشیدی، از ۴ روش پوشش سطح استخر با بکارگیری از دیسکهای شناور (با ۸۸ درصد پوشش)، حبابهای شناور (با ۹۷ درصد پوشش) و ورقه پلاستیکی با ۹۹ و ۶۰ درصد پوشش استفاده نمودند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که استفاده از دیسکهای شفاف شناور بر روی سطح استخر باعث کاهش ۴۷ درصدی در نرخ تبخیر و افزایش ۹ درجه‌ای در دمای لایه پایینی می‌شود.

اکبرزاده و همکارانش [۴] به بررسی کاهش اثرات باد و در نتیجه کاهش اختلاط لایه‌های استخر با استفاده از حلقه‌های شناور از جنس پلی اتیلن با قطر ۳۰۰ میلیمتر پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در صورت استفاده از حلقه‌های پلاستیکی، ضخامت لایه بالایی از ۱۲

سانتیمتر به ۳ سانتیمتر کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که هر چه ضخامت لایه بالایی کمتر باشد، جذب انرژی خورشیدی در لایه بالایی کمتر بوده و انرژی بیشتری به لایه پایینی که ذخیره کننده انرژی خورشیدی است، می‌رسد.

در پژوهش انجام گرفته توسط بوسکوئوت و همکارانش [۵]، اثرات دمای لایه میانی در پایداری استخر خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت. آنان نشان دادند که وقتی دمای لایه میانی استخر خورشیدی ثابت و پایین باشد، استخر پایدارتر از زمانی است که دمای آن لایه بالا و متغییر باشد.

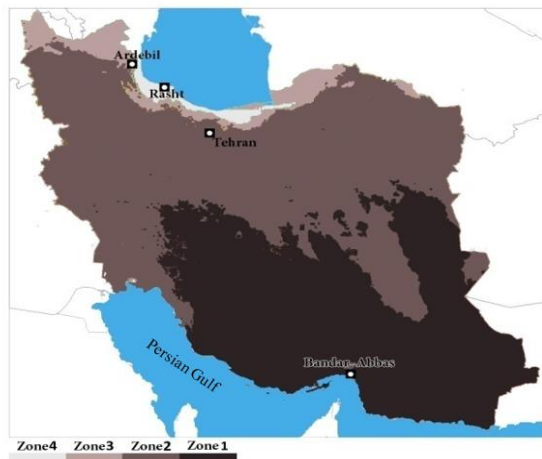
در چند سال اخیر، استفاده از نانو ذرات در افزایش میزان راندمان تجهیزات خورشیدی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از کارهای جدید مورد مطالعه در مورد اثر نانو ذرات بر روی راندمان استخرهای خورشیدی می‌توان به پژوهش کارونامورتی و همکارانش [۶] اشاره نمود. آنان اثرات نانو اکسیدمس بر روی افزایش میزان ضریب انتقال حرارت هدایتی لایه‌ی ژل مانند استخر را مورد بررسی قرار دادند. آنان نشان دادند که با افزودن ۱ درصد از ذرات نانو اکسیدمس به آب، می‌توان تا ۵/۸ درصد ضریب انتقال حرارت هدایتی را افزایش داد.

لادجوردی [۷] و همکارانش به بررسی عددی اثر نانو ذرات گرافیت با قطر و درصد حجمی متفاوت، بر روی میزان جذب انرژی خورشیدی بر روی یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت پرداختند. نتایج آنان نشان می‌دهد که با نانو سیال حاوی ذرات گرافیت می‌توان میزان جذب تابش خورشیدی یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت را از ۲۷ درصد به ۵۰ درصد رساند.

پارامترهای مختلفی مانند نسبت تمرکز، درصد حجمی نانو ذره، سرعت نانوسیال و طول صفحه جاذب بر روی راندمان کلکتور خورشیدی سهموی به صورت عددی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۸].

با توجه به موارد عنوان شده، استفاده از نانوذرات یک راه موثر و مهم برای افزایش عملکرد سیستمهای خورشیدی می‌باشد. از این رو با توجه به مفید و مهم بودن استفاده از

محیط در چهار شهر انتخاب شده بندرعباس، تهران، اردبیل و رشت در جدول ۲ نشان داده شده است. مقادیر این جدول بر اساس داده‌های هواشناسی برای ۵۰ سال اخیر بدست آمده است.



شکل ۱: مناطق انتخاب شده تابش خورشیدی در ایران [۱۰]

جدول ۱: اطلاعات شهرهای انتخاب شده [۱۰]

نام شهر	عرض جغرافیایی	تابش خورشیدی (kWh/m^2)
بندرعباس	۲۷/۱	ناحیه ۱ ≤ 2000
تهران	۳۵/۴	ناحیه ۲ $1700 \leq 2000$
اردبیل	۳۸/۵	ناحیه ۳ $1400 \leq 1700$
رشت	۳۷/۱	ناحیه ۴ ≤ 1400

با توجه به متفاوت بودن زاویه خورشیدی، عرض جغرافیایی و ساعات آفتابی روزانه در هر منطقه، مقدار تابش خورشیدی نیز در هر یک از این شهرها متفاوت می‌باشد. با توجه به اینکه راندمان یک استخر خورشیدی به میزان جذب انرژی خورشیدی وابسته می‌باشد، در نتیجه باید میزان تابش خورشیدی ساعتی برای هر یک از شهرهای مورد مطالعه، محاسبه شود. با استفاده از معادلات دافی و بکمن [۱۲] و نوشتن یک برنامه عددی به کمک نرم‌افزار متلب، میزان تابش خورشیدی ساعتی برای هر چهار شهر بدست آمده است. در شکل ۲ میزان تابش خورشیدی برای هر ۴ شهر در طول سال نمایش داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که میزان تابش خورشیدی در طول سال به ترتیب از ناحیه ۱ به ۴ افزایش می‌یابد.

ذرات نانو و عدم وجود نتایجی درباره تاثیر استفاده از ذرات نانوسیلیکا و همچنین گرادیان شوری در لایه میانی استخرهای خورشیدی، در این پژوهش با استفاده از حل معادلات حاکم بر استخرهای خورشیدی با گرادیان شوری به بررسی عددی اثرات استفاده از نانوذرات سیلیکا در بهبود عملکرد استخر خورشیدی پرداخته خواهد شد. به منظور بررسی این اثرات در شرایط اقلیمی مختلف با توجه به داده‌های هواشناسی، ایران به چهار ناحیه تابش خورشیدی تقسیم و نتایج برای این چهار اقلیم نمایش داده شده است.

۲- شرایط آب و هوایی

ایران کشوری است که در آن چهار فصل سال به چشم می‌خورد. بطور نمونه، شمال ایران دارای تابستانهایی گرم و زمستانهایی سرد، جنوب ایران دارای تابستانهایی بسیار گرم و زمستانهایی معتدل و شمال غرب کشور دارای تابستانهایی معتدل و زمستانهایی بسیار سرد می‌باشد. عملکرد یک استخر خورشیدی به میزان جذب و اتلاف انرژی از آن بستگی دارد. در نتیجه میزان تابش خورشید و درجه حرارت هوای محیط [۹] دو عامل تاثیرگذار و مهم در تعیین راندمان یک استخر خورشیدی می‌باشند.

در این پژوهش، کشور ایران با توجه به میزان متوسط مجموع سالانه تابش خورشیدی که بین ۱۲۰۰ تا ۲۳۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع می‌باشد، به چهار منطقه مختلف تابشی تقسیم شده است. در شکل ۱ این مناطق و میزان تابش خورشیدی در آنها مشخص شده است.

به منظور بررسی دقیق‌تر و همچنین ارائه نتایجی مشخص، چهار شهر بندرعباس، تهران، اردبیل و رشت به ترتیب برای مناطق ۱ تا ۴ انتخاب شده و نتایج برای این چهار شهر که نماینده‌ای از آن مناطق تابشی می‌باشند، گزارش می‌شوند. داده‌های مورد نیاز برای شهرهای انتخابی در جدول ۱ ارائه شده است. داده‌های این جدول میزان متوسط مجموع سالانه تابش خورشیدی در صفحه افقی را نشان می‌دهد. از آنجاکه عملکرد استخرهای خورشیدی به دمای محیط وابستگی شدیدی دارند، از این‌رو میزان دمای متوسط ماهانه

جدول ۲: میانگین دمای ماهانه محیط در شهرهای انتخابی

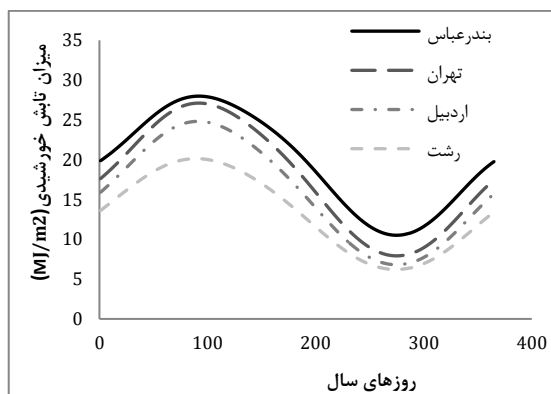
شماره ماه	ماه	بندر عباس	تهران	اردبیل	رشت
۱۰	ژانویه	۱۷/۸	۳/۷	-۲/۵	۶/۸
۱۱	فوریه	۱۹/۳	۵/۸	-۰/۹	۶/۹
۱۲	مارچ	۲۲/۵	۱۰/۴	۳/۵	۹/۲
۱	آوریل	۲۶/۴	۱۶/۷	۹/۸	۱۴/۳
۲	می	۳۰/۷	۲۲/۰	۱۲/۹	۱۹/۲
۳	ژوئن	۳۳/۳	۲۷/۴	۱۶/۱	۲۳/۵
۴	جولای	۳۴/۳	۳۰/۲	۱۸/۳	۲۵/۲
۵	آگوست	۳۳/۹	۲۹/۵	۱۸/۲	۲۵/۱
۶	سپتامبر	۳۲/۳	۲۵/۵	۱۵/۷	۲۲/۱
۷	اکتبر	۲۹/۳	۱۸/۹	۱۱/۱	۱۷/۵
۸	نوامبر	۲۴/۲	۱۱/۵	۵/۸	۱۲/۸
۹	دسامبر	۱۹/۷	۵/۹	۰/۶	۸/۹

۳-۱- لایه سطحی (لایه بالایی یا ناحیه بالایی)

این لایه دارای کمترین هزینه تولید و کمترین درصد شوری (نهایت ۵ درصد) می‌باشد. در این لایه غلظت محلول آب نمک یکسان بوده و در نتیجه دارای یک ناحیه همرفتی می‌باشد. ضخامت این لایه اندک بوده و بسته به شرایط طراحی بین ۱۰ تا ۳۰ سانتیمتر انتخاب می‌شود. دمای ورودی به این ناحیه شامل انرژی جذب شده از خورشید و گرمای منتقل شده از لایه زیرین می‌باشد. همچنین اتلاف حرارت در این لایه توسط انتقال حرارت جابجایی به هوا، تبخیر آب و تابش به آسمان انجام می‌گیرد. در این پژوهش، با توجه به مدل ارائه شده توسط جعفرزاده [۱۳] فرض شده است که دمای لایه بالایی با دمای هوای محیط برابر می‌باشد.

۳-۲- لایه میانی (لایه گرادیان)

در این لایه غلظت آب نمک ثابت نبوده و از لایه بالایی به لایه پایینی تقریباً بصورت خطی افزایش می‌یابد. با توجه به وجود گرادیان غلظت در این ناحیه، لایه‌های محلول با افزایش عمق گرمتر و غلیظتر می‌باشند. روشهای مختلفی برای پر کردن لایه میانی استخرهای خورشیدی با گرادیان شوری وجود دارد. در رایجترین روش لایه میانی به چند زیر لایه با چگالیهای مختلف تقسیم شده (هر چند سانتیمتر) و به تدریج به لایه میانی اضافه می‌گردد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که پس از پر نمودن لایه میانی ابتدا تغییر چگالی در این لایه به صورت پله‌ای می‌باشد و پس از چند روز تغییر چگالی محلول در لایه میانی به صورت تقریباً خطی می‌شود. با توجه به مکانیزم توضیح داده شده در استخرهای با گرادیان شوری، در این لایه مکانیزم انتقال حرارت هدایتی وجود داشته و این لایه مانند یک عایق عمل می‌کند. ضخامت این لایه بستگی به پارامترهای طراحی دارد و معمولاً عمق آن را بین ۰/۵ تا ۱/۵ متر در نظر می‌گیرند.



شکل ۲: میزان تابش خورشیدی در طول یک سال برای شهرهای انتخاب شده

۳- استخر خورشیدی با گرادیان شوری

استخرهای خورشیدی با گرادیان شوری از سه لایه محلول آب - نمک با میزان شوریه‌های مختلف تشکیل شده‌اند. در این نوع استخرها لایه پایینی بیشترین درصد شوری و لایه بالایی کمترین درصد شوری را دارا می‌باشند. در لایه میانی یک گرادیان غلظت نمک وجود دارد به طوری که غلظت نمک در این لایه از مرز لایه پایینی تا مرز لایه بالایی به تدریج افزایش می‌یابد. با توجه به این موضوع که لایه‌های پایین‌تر سنگین‌تر از لایه‌های بالاتر می‌باشند، حتی با گرم شدن زیر لایه‌های پایین جابجایی رخ نمی‌دهد و در نتیجه انتقال حرارت در این لایه به صورت هدایتی می‌باشد.

۳-۳- لایه زیرین (لایه ذخیره کننده گرما)

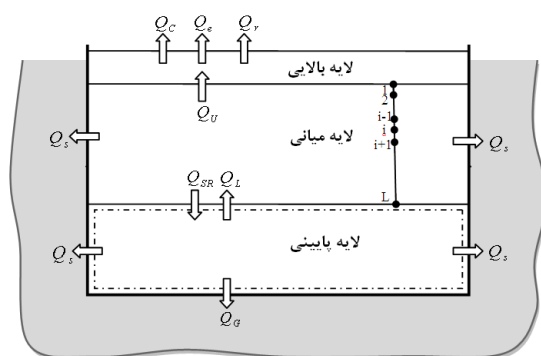
در این لایه چگالی سیال ثابت بوده و دارای بیشترین مقدار خود می‌باشد. با توجه به این نکته حرکت سیال در داخل این لایه بصورت همرفتی می‌باشد. ضخامت این لایه با توجه به میزان گرمای مورد نیاز بین ۱ تا ۲ متر در نظر گرفته می‌شود. این لایه دارای بیشترین میزان شوری (تا ۳۰ درصد) و بیشترین درجه حرارت در استخر می‌باشد. افزایش ضخامت این لایه باعث افزایش گرمای ذخیره شده می‌شود ولی زمان رسیدن به دمای مورد نظر را افزایش می‌دهد. از آنجاکه در مقیاسهای کوچک به علت هزینه‌های اولیه بالا، ساخت استخرهای خورشیدی مقرون به صرفه نیست، لذا استخر خورشیدی با گرادیان شوری مورد مطالعه در این تحقیق، با مساحت سطح 20×20 متر مربع و عمق ۱۲۰ سانتیمتر انتخاب شده است. ضخامت لایه‌های بالایی، میانی و پایینی این استخر، به ترتیب ۲۰، ۵۰ و ۵۰ سانتیمتر انتخاب شده است. دیواره‌های استخر از ۲۰ سانتیمتر سیمان و ۱۰ سانتیمتر عایق پلی یورتان تشکیل شده است. در جدول ۳ مشخصات استخر خورشیدی استفاده شده در این پژوهش نشان داده شده است.

جدول ۳: مشخصات استخر خورشیدی مورد مطالعه

پارامتر	خاصیت	مقدار
مساحت	-----	400 m^2
ضخامت لایه بالایی	-----	۲۰ cm
ضخامت لایه میانی	-----	۵۰ cm
ضخامت لایه پایینی	-----	۵۰ cm
عایق پلی-یورتان	k_i	$0.03 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
-----	ρ_i	36 kg/m^3
ضخامت	-----	۱۰ cm
سیمان	k_e	$0.15 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
-----	ρ_e	1330 kg/m^3
-----	ضخامت	۲۰ cm
زمین	k_g	$3/5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

۴- مدلسازی

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، یک استخر خورشیدی با گرادیان شوری از سه لایه محلول آب - نمک با چگالیهای مختلف تشکیل شده است. برای پیدا نمودن درجه حرارت لایه پایینی استخر و همچنین راندمان یک استخر خورشیدی باید روابط حاکم در هر سه لایه حل شود.



شکل ۳: استخر خورشیدی با گرادیان شوری

عملکرد یک استخر خورشیدی به میزان دریافت انرژی خورشیدی و همچنین اتلاف حرارت از آن بستگی دارد. محققان زیادی مانند علی [۱۴]، رابل و نیلسن [۱۵] و جعفرزاده [۱۳] مدل‌های ریاضی برای محاسبه توزیع دما در هر سه لایه از استخر ارائه دادند. با توجه به ساده و مفید بودن مدل ارائه شده توسط جعفرزاده [۱۳] و همچنین کاربرد آن در مقالات منتشر شده [۹]، در این پژوهش برای محاسبه پارامترهای گرمایی استخر خورشیدی با گرادیان شوری در نظر گرفته شده، از این مدل برای حل معادلات حاکم استفاده می‌شود.

در مدل انتخاب شده انتقال حرارت از استخر بصورت یک بعدی و در جهت عمق استخر در نظر گرفته شده است. پارامتر Z میزان عمق بوده که مبنای آن سطح استخر می‌باشد. انتقال حرارت از لایه میانی استخر خورشیدی را می‌توان توسط رابطه زیر محاسبه نمود [۱۶]:

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(k \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + E(Z, t) \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی سیال، C_P ظرفیت گرمایی ویژه سیال، k ضریب هدایت حرارتی در لایه میانی استخر و $E(Z, t)$

روزانه و از داده‌های اندازه‌گیری هواشناسی در نظر گرفته شده است. برای وارد کردن شرط مرزی دوم باید دمای لایه پایین را بدست آوریم. با نوشتن معادلات انرژی برای این لایه و بقای انرژی می‌توان دمای لایه پایینی را بدست آورد. در نتیجه برای لایه پایینی داریم:

$$Q_{LSr} = A_e I_R + \xi A_{sh} I_R \quad (۶)$$

$$Q_{Lu} = -kA \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=D_U+D_N} \quad (۷)$$

$$Q_{LS} = -k_s A_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{side} \quad (۸)$$

$$Q_{Lg} = -k_g A \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=D_U+D_N+D_L} \quad (۹)$$

که در معادلات (۶) تا (۹)، Q_{LSr} گرمای جذب شده ناشی از تابش خورشیدی در لایه پایین، Q_{Lu} اتلاف حرارت هدایتی از لایه پایینی به بالایی، Q_{LS} اتلاف حرارت از لایه پایینی به دیواره‌های جانبی و Q_{Lg} اتلاف حرارت از لایه پایینی به زمین می‌باشد. همچنین D_U ، D_N و D_L به ترتیب عمق لایه پایینی، میانی و بالایی می‌باشند.

معادله (۱)، یک معادله مشتق جزئی، سهموی و مرتبه دوم بوده و روش کرانک - نیکلسون، یکی از بهترین روشها برای گسسته سازی و حل آن می‌باشد. در نتیجه گسسته‌سازی

معادله (۱) را می‌توان به صورت زیر انجام داد [۱۳]:

$$\begin{aligned} \rho_i C_{pi} \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = & \frac{1}{2\Delta Z^2} \left[k_{i+\frac{1}{2}} (T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}) \right. \\ & \left. + k_{i-\frac{1}{2}} (T_{i-1}^{n+1} - T_i^{n+1}) \right] \\ & + \frac{1}{2\Delta Z^2} \left[k_{i+\frac{1}{2}} (T_{i+1}^n - T_i^n) \right. \\ & \left. + k_{i-\frac{1}{2}} (T_{i-1}^n - T_i^n) \right] + E_i^{n+\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (۱۰)$$

از آنجاکه معادله (۱)، یک معادله دیفرانسیل جزئی مرتبه ۲ و ناپایدار می‌باشد، در نتیجه برای حل آن نیاز به دو شرط مرزی و یک شرط اولیه می‌باشد. در لایه بالایی و لایه پایینی دو شرط مرزی زیر وجود دارد:

برای لایه بالایی:

$$T_1^n = T_{amb}^n \quad (۱۱)$$

برای لایه پایینی:

میزان تابش خورشیدی در عمق مشخص و در هر زمانی می‌باشد و توسط رابطه زیر داده می‌شود [۱۳]:

$$E(Z, t) = \frac{-d}{dZ} \left(\frac{A_e + \xi A_{sh}}{A} I_R(Z, t) \right) \quad (۲)$$

که در آن A_e ، A_{sh} به ترتیب مساحت کل، مساحت آفتاب خورده و مساحت سایه‌دار سطح استخر، ξ درصدی از تابش مستقیم خورشید که به صورت نفوذ به سطح سایه خورده می‌رسد و $I_R(Z, t)$ میزان تابش خورشیدی می‌باشد که از رابطه دافی و بکمن [۱۲] بدست می‌آید (شکل ۲). مقدار پارامتر ξ برای کشور ایران با توجه به تحقیق صمیمی [۱۷]، ۳۰ درصد در نظر گرفته شده است.

از آنجاکه لایه میانی دارای غلظت و همچنین دمای متفاوت می‌باشد، در نتیجه خواص ترموفیزیکی محلول در لایه میانی در عمقهای مختلف یکسان نمی‌باشد. این خواص را می‌توان از روابط زیر بدست آورد [۱۸]:

$$k = 0.5553 - 0.0000813 c \quad (۳)$$

$$+ 0.0008 (T - 20) \quad (۴)$$

$$\rho = 998 + 0.65 c - 0.4(T - 20) \quad (۴)$$

$$C_p = 4180 + 4.396 c + 0.0048 c^2 \quad (۵)$$

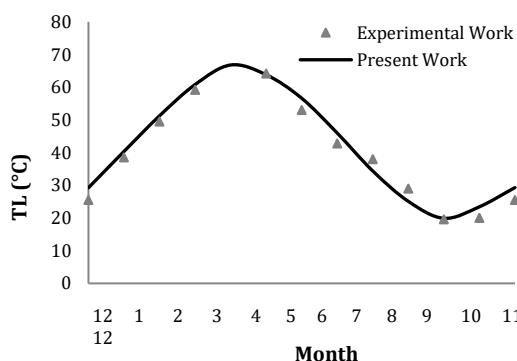
که در آن c میزان غلظت محلول آب - نمک و T دمای محلول در لایه میانی می‌باشد.

دمای لایه بالای استخر خورشیدی به علت وجود تلفات حرارتی مانند تبخیر و انتقال حرارت جابجایی، از دمای محیط کمتر می‌باشد. بیشینه اختلاف دمای محیط و دمای لایه بالایی حدود ۵٪ می‌باشد [۱۹]. جعفرزاده [۱۳] در مدل خود دمای لایه بالای استخر خورشیدی را برابر دمای محیط فرض کرده و معادلات حاکم بر استخرها را حل نمود. نتایج وی نشان می‌دهد که فرض نمودن برابری دمای لایه بالایی استخر با دمای محیط، خطای کمی در نتایج ایجاد می‌کند. با توجه به ساده شدن مدل و شرایط مرزی و همچنین ایجاد خطای کم در شبیه سازی‌ها، در این پژوهش دمای لایه بالایی مقداری ثابت و برابر دمای محیط فرض می‌شود ($T_u = T_{amb}$).

که در آن T_u دمای لایه بالایی و T_{amb} دمای محیط می‌باشد. در برنامه کامپیوتری نوشته شده دمای محیط بصورت

در روابط (۱۳) تا (۱۶) مقادیر پارامترهای فوق توضیح داده شده است. با استفاده از رابطه (۱۹) می توان راندمان حرارتی لایه پایینی استخر را بدست آورد.

جهت بررسی صحت نتایج شبیه سازی، توزیع دما در لایه پایین استخر خورشیدی با گرادیان شوری در طول یک سال برای شهر مشهد با نتایج تجربی اندازه گیری شده توسط پژوهش جعفرزاده [۱۳] در شکل ۴ مقایسه شده است.



شکل ۴: بررسی صحت نتایج شبیه سازی برای شهر مشهد
ماههای شکل ۴ بر اساس جدول (۲) می باشند. با توجه به فرضیات استفاده شده در حل روابط حاکم مانند برابری دمای لایه بالایی با دمای محیط، پایداری لایه ها، ثابت ماندن عمق لایه ها و میزان جذب کامل انرژی خورشیدی در لایه پایینی و همچنین اختلاف بین میزان تابش خورشیدی و دمای محیط در مقادیر محاسبه شده و اندازه گیری شده، بین مقادیر تجربی [۱۳] کار عددی حاضر انحراف متوسطی حدود ۸/۱ درصد وجود دارد.

۵- کاربرد نانوسیال در استخر خورشیدی

استفاده از ذرات نانو در بهبود مواد و فرآیندها چند سالی است که مورد توجه و علاقه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است. به طور معمول نانو ذره به ماده ای گفته می شود که ابعادی کمتر از ۱۰۰ نانومتر داشته باشد. از آنجاکه در استخرهای خورشیدی با گرادیان شوری مهمترین اتلاف حرارت از طریق لایه بالایی صورت می گیرد در نتیجه، اگر مانع رسیدن حرارت به لایه بالایی شویم و یا از انتقال حرارت از لایه بالایی جلوگیری شود، این امر باعث افزایش دمای لایه پایینی و در نتیجه افزایش راندمان استخر

$$\rho C_p A D_L \frac{T_L^{n+1} - T_L^n}{\Delta t} = Q_{LSr} + Q_{Lu} - Q_{LS} - Q_{Lg} \quad (12)$$

$$Q_{LSr}^n = (A_e + \xi A_{sh}) I_R^n \quad (13)$$

$$Q_{Lu}^n = -kA \frac{T_M^n - T_L^n}{\Delta Z} \quad (14)$$

$$Q_{LS}^n = -k_s A_s \frac{T_s^n - T_L^n}{\Delta S} \quad (15)$$

$$Q_{Lg}^n = -k_g A_g \frac{T_g^n - T_L^n}{\Delta G} \quad (16)$$

در معادلات (۱۲) تا (۱۶)، k ، k_s و k_g به ترتیب ضرایب هدایت حرارتی سیال، دیواره های جانبی و کف استخر و A ، A_s و A_g به ترتیب مساحت سطح استخر، مساحت سطح جانبی و مساحت کف استخر می باشد.

از آنجا که قبل از راه اندازی استخر خورشیدی دمای هر سه لایه با دمای محیط برابر می باشد، مقدار شرایط اولیه زمان و شرط مرزی اولیه برای شروع حل معادلات حاکم بر لایه میانی استخر خورشیدی دمای محیط هر شهر در ماه آغاز به کار استخر در نظر گرفته شده است.

پس از اینکه تابش خورشیدی به سطح استخر برخورد می کند، قسمتی از آن از طریق عبور از لایه های بالایی و میانی به ناحیه پایینی رسیده و در آن لایه جذب شده و دمای لایه پایینی افزایش می یابد. میزان راندمان حرارتی در لایه پایینی استخر خورشیدی، نسبت گرمای ذخیره شده به گرمای وارد شده به این لایه تعریف می شود [۲۰]:

$$\eta_{LCZ} = \frac{Q_{Lst}}{Q_{LSr}} \quad (17)$$

که در آن Q_{Lst} میزان انرژی ذخیره شده در لایه پایینی و Q_{LSr} میزان تابش خورشیدی است که لایه پایینی دریافت می کند. مقدار انرژی ذخیره شده در لایه پایینی را می توان از تفاضل انرژی جذب شده و تلفات انرژی بدست آورد:

$$\eta_{LCZ} = \frac{Q_{LSr} - (Q_{Lu} + Q_{LS} + Q_{Lg})}{Q_{LSr}} \quad (18)$$

در نتیجه می توان رابطه فوق را به صورت زیر نشان داد:

$$\eta_{LCZ} = 1 - \frac{(Q_{Lu} + Q_{LS} + Q_{Lg})}{Q_{LSr}} \quad (19)$$

شده توسط مکسول [۲۲]، لو و لین [۲۳] و داویس [۲۴] اشاره نمود. با توجه به کاربرد فراوان رابطه مکسول، در این تحقیق از رابطه مکسول برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی معادل در حضور نانوذرات استفاده شده است. رابطه مکسول به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{k_e}{k_f} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)\varphi}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)\varphi} \quad (20)$$

که در آن k_e ضریب هدایت حرارتی معادل برای نانوسیال، k_f ضریب هدایت حرارتی سیال، α نسبت ضرایب هدایت حرارتی نانوذرات به سیال و φ نسبت حجمی نانوذرات به سیال می‌باشد.

از آنجاکه اضافه نمودن ذرات نانو سیلیکا به سیال باعث تغییر در ضریب گرمایی ویژه سیال نیز می‌شود در نتیجه برای پیدا نمودن ضریب گرمایی ویژه معادل نانو سیال از معادله (۲۱) استفاده شده است [۲۲]:

$$C_{p,eff} = \frac{(1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi_p(\rho C_p)_p}{(1 - \varphi_p)\rho_b + \varphi_p\rho_p} \quad (21)$$

۶- پایداری استخر خورشیدی

اساسی‌ترین عامل در پایداری استخر خورشیدی حفظ گرادیان نمک در ناحیه میانی استخر می‌باشد. پایداری یک استخر خورشیدی امکانپذیر نیست مگر اینکه گرادیان غلظت نمک بدرستی تشکیل شده و پخش نمک در داخل لایه میانی استخر بدرستی کنترل شود. لایه میانی می‌تواند از دو لایه بالایی و پایینی تاثیر بگیرد و باعث تخریب مرزهای بین لایه‌ها شود. این تخریب باعث کاهش ضخامت لایه میانی و درنهایت از بین رفتن استخر می‌شود. عوامل مختلفی باعث بهم خوردن گرادیان غلظت در استخر خورشیدی با گرادیان شوری می‌شود که می‌توان به نفوذ طبیعی نمک از لایه پایینی به سمت بالا، باد، تبخیر و ریختن گرد و خاک در لایه سطحی اشاره نمود. غلظت و دمای استخر هر دو باید با افزایش عمق افزایش یابند، اگرچه با افزایش دما چگالی کاهش می‌یابد. اضافه نمودن نانوذرات سیلیکا به داخل لایه میانی باعث برهم خوردن غلظت و درنهایت نا پایداری استخر خورشیدی شود.

خورشیدی می‌شود. در استخرهای خورشیدی با گرادیان شوری با توجه به وجود گرادیان نمک در لایه میانی و از بین بردن انتقال حرارت جابجایی در این لایه، می‌توان با افزایش نانوذراتی که ضریب انتقال حرارت هدایتی کمتری نسبت به محلول آب - نمک دارند، از انتقال حرارت از لایه پایینی به لایه بالایی جلوگیری نمود. دارا بودن خواصی مانند استحکام، ضد حریق بودن (عایق بودن) و داشتن پایداری بیشتر در سیال باعث شده است که نانو ذرات سیلیکا از پر اهمیت‌ترین نانوذرات در صنایع باشند. سیلیکا (اکسید سیلیسیوم) به علت پایین بودن مشخصه‌های انتقال حرارتی آن، جزء اصلی در عایق‌های معدنی مانند پشم سنگ و پشم شیشه می‌باشد. نانوذرات سیلیکا می‌توانند با مواد دیگر حل شده و ماده‌ای با ضریب انتقال حرارت کلی کمتری تشکیل دهند. با توجه به ضریب انتقال حرارت پایین و همچنین پایداری بالای محلول سیلیکا در آب، در این پژوهش به بررسی عددی استفاده از نانو ذرات سیلیکا در افزایش مشخصه‌های گرمایی استخر خورشیدی پرداخته شده است.

مقدار ضریب انتقال حرارت هدایتی نانو سیلیکا به اندازه ذره بستگی دارد. چاری و همکارانش در تحقیق خود [۲۱] به بررسی اندازه ذرات سیلیکا در مقدار ضریب انتقال حرارت هدایتی آن پرداختند. نتایج آنان نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذرات از ۱۰۰ به ۵۰۰ نانومتر، میزان ضریب انتقال حرارت هدایتی سیلیسیوم، کاهش بسیار کمی یافته و پس از آن افزایش می‌یابد. همچنین مقدار هدایت حرارتی برای ذره سیلیکا به اندازه ۵۰ نانومتر، در حدود ۰/۰۸۱ W/m.K می‌باشد [۲۱] که در این پژوهش از نتایج مرجع [۲۱] برای ضریب هدایت حرارتی استفاده شده است.

با توجه به اینکه اضافه نمودن ذرات نانو در سیال باعث تغییر در خواص سیال پایه می‌شود، باید با استفاده از روابط مشخصی، پارامترهای معادل را برای نانو سیال ایجاد شده تخمین زد. تاکنون روابط تجربی متعددی برای تخمین ضریب هدایت حرارتی برای محلول نانو سیالهای ارائه شده است. از روابط معروف در این زمینه می‌توان به روابطه ارائه

شرط داشتن پایداری استاتیکی این است که عبارت نسبت پایداری چگالی بزرگتر از ۱ باشد.

با توجه به مقادیر ضریب انبساط حرارتی ($\alpha=0/00021$) و ضریب انبساط شوری ($\beta=0/00075$) و مقادیر نمک و حداکثر دما در لایه‌های بالا و پایین، مقدار R_p برای حالت بدون نانوذرات سیلیکا معادل $12/14$ می‌باشد. در نتیجه با توجه به شرایط انتخاب شده در مسئله مقدار پارامتر R_p بزرگتر از یک می‌باشد.

در این بخش با افزودن نانوذرات سیلیکا به لایه میانی استخر خورشیدی پایداری آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. با اضافه نمودن ذرات نانو سیلیکا در سیال خواص آن تغییر می‌کند. با توجه به اینکه پایداری لایه میانی استخر خورشیدی وابستگی زیادی به تغییرات چگالی و دمای سیال دارد، باید لایه میانی استخر خورشیدی با اضافه نمودن نانوذرات نیز شرایط پایداری را حفظ نماید. از آنجاکه با اضافه نمودن نانو ذرات سیلیکا در لایه میانی گرادیان دمای سیال تغییر کمی می‌کند، در نتیجه از تاثیرات این ترم در پایداری استخر صرفنظر شده است. از این رو برای پایداری لایه میانی باید تغییرات چگالی این لایه طوری باشد که مقدار پارامتر R_p بزرگتر از ۱ باشد. زمانیکه ذرات نانو در لایه میانی اضافه می‌شود به علت اینکه چگالی نانوذرات سیلیکا بیشتر از آب می‌باشد (حدود $2/2$ برابر)، چگالی معادل نانوسیال افزایش پیدا کرده و با افزایش درصد حجمی نانو ذرات این افزایش نیز بیشتر می‌شود. در نتیجه باید برای برقراری پایداری لایه میانی بسته به درصد حجمی نانوذرات اضافه شده کمی از غلظت نمک کاسته شود تا چگالی معادل نانوسیال روابط پایداری را حفظ نماید. با توجه به مقدار بزرگ R_p و از آنجاکه هدف اصلی اساس این پژوهش تحلیل اقتصادی اثر استفاده از نانو سیلیکا در لایه میانی استخر خورشیدی با گرادیان شوری می‌باشد، در نتیجه در این پژوهش فرض شده است که با اضافه نمودن ذرات نانو سیلیکا در لایه میانی و انتخاب مناسب غلظت نمک در هر لایه، استخر خورشیدی پایدار بماند.

پایداری داخلی یک استخر خورشیدی بر پایه پخش نمک از ناحیه ذخیره کننده گرما به سمت ناحیه بالایی استخر می‌باشد. چگالی محلول آب - نمک تابع شوری (یا غلظت) و درجه حرارت است و می‌توان معادله آن را به شکل زیر نوشت:

$$\rho = \rho_0[1 - \alpha(T - T_0) + \beta(S - S_0)] \quad (22)$$

که در آن ρ_0 ، T_0 و S_0 به ترتیب چگالی، شوری و درجه حرارت مرجع و α ضریب انبساط حرارتی و β ضریب انبساط شوری می‌باشند و توسط رابطه‌های زیر داده شده‌اند:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial S} \quad (23)$$

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (24)$$

این روابط نشان می‌دهند که با افزایش درجه حرارت، چگالی محلول کاهش اما شوری آن افزایش می‌یابد، اگر محور مختصات قائم بر روی سطح استخر و جهت مثبت آن به سمت بالا در نظر گرفته شود. برای اینکه یک استخر خورشیدی به لحاظ استاتیکی پایدار بماند لازم است که تغییرات چگالی در عمق منفی باشد. یعنی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial Z} < 0 \quad (25)$$

می‌توان رابطه (۲۵) را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial \rho}{\partial Z} = \frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial Z} + \frac{\partial \rho}{\partial S} \cdot \frac{\partial S}{\partial Z} \quad (26)$$

با فرض یکنواختی شیب منحنی تغییرات شوری و درجه حرارت و با جایگزینی روابط (۲۳) و (۲۴) در رابطه (۲۵) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$(\beta \Delta S - \alpha \Delta T) < 0 \quad (27)$$

عبارت نسبت پایداری چگالی به صورت رابطه تعریف می‌شود:

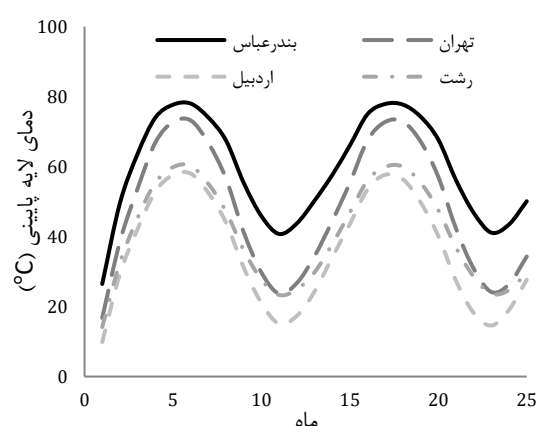
$$R_p = \frac{\beta(\partial S / \partial Z)}{\alpha(\partial T / \partial Z)} = \frac{\beta \Delta S}{\alpha \Delta T} \quad (28)$$

حال با ترکیب دو رابطه (۲۷) و (۲۸) نتیجه می‌شود که $R_p > 1$ که شرط پایداری ایستا نامیده می‌شود. در نتیجه

مشاهدات انجام گرفته نشان می‌دهد که ذرات نانو سیلیکا در برابر ذرات دیگری مانند آلومینا دارای پایداری بیشتری در آب می‌باشد و جداسدن این ذرات از محلول و ته نشین شدن آن به کندی انجام می‌شود. در این پژوهش مدت پایداری ذرات سیلیکا در محلول آب - نمک یک سال در نظر گرفته شده است. در نتیجه در تحلیل اقتصادی انجام گرفته فرض شده است ذرات نانو سیلیکا یک سال پایداری دارند.

۷- نتایج و بحث

در این تحقیق به بررسی اثر استفاده از نانو ذرات سیلیکا بر روی عملکرد استخرهای خورشیدی با گرادیان شوری در مناطق مختلف ایران پرداخته شد. به منظور مطالعه اثر میزان شدت تابش خورشیدی در نتایج بدست آمده، چهار ناحیه مختلف با شدت تابشهای متفاوت در کشور انتخاب گردید. شکل ۵ توزیع دما در لایه پایینی استخر خورشیدی برای چهار شهر بندرعباس، تهران، اردبیل و رشت و در مدت دو سال را نشان می‌دهد. نتایج این شکل بر اساس داده‌های جدول ۳ ارائه شده است. همچنین مقدار دمای محیط و تابش خورشیدی در هر شهر به ترتیب بصورت روزانه و هر سه دقیقه در برنامه وارد شده است. شماره ماه در این نمودار و نمودارهای بعدی بر اساس جدول ۲ نام گذاری شده است.



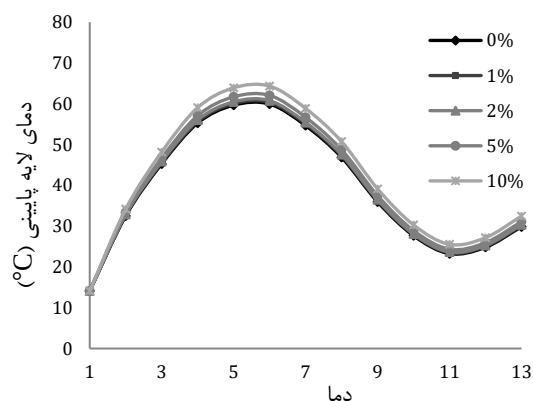
شکل ۵: میزان درجه حرارت لایه پایینی برای چهار شهر انتخاب شده برای مدت دو سال

نتایج این نمودار نشان می‌دهد که دمای لایه ذخیره‌ساز گرما، وابستگی زیادی به تابش خورشیدی و دمای محیط

دارد. با توجه به تابش خورشیدی و دمای محیط در چهار شهر انتخاب شده، بیشترین دمای لایه پایینی استخر به ترتیب در شهرهای بندرعباس، تهران، رشت و اردبیل مشاهده می‌شود. هر چند که میزان تابش خورشیدی شهر اردبیل از شهر رشت بیشتر می‌باشد ولی به علت پایین بودن دمای محیط در شهر اردبیل از شهر رشت، میزان ذخیره-سازی گرما در لایه پایینی به علت اتلاف بیشتر حرارت کمتر می‌باشد. با مقایسه نمودار توزیع دمای لایه پایینی در سال اول و دوم مشاهده می‌شود که بجزء در ماههای اول راه‌اندازی استخر خورشیدی که دمای شروع هر سه لایه استخر با دمای محیط برابر است، دمای لایه پایینی برای دو سال تقریباً مشابه می‌باشد. البته در عمل به علت اثر عوامل محیطی و تخریبی بر روی استخر، معمولاً دمای سالهای مختلف یکسان نمی‌باشد. شکل ۵ نشان می‌دهد که برای شهر بندرعباس به علت بالا بودن میزان دمای محیط و تابش خورشیدی، حتی در روزهای زمستان نیز می‌توان گرما را از لایه پایینی استخر استخراج کرد.

در شکل ۶ تاثیر استفاده از نانو ذرات سیلیکا در مقدار دمای لایه پایینی استخر خورشیدی برای مدت یک سال در شهر بندرعباس نشان داده شده است. برای نمایش تاثیر میزان استفاده از ذرات نانوسیلیکا بر روی مشخصه‌های گرمایی استخر خورشیدی از ذرات نانوسیلیکا با درصد حجمی ۱، ۲، ۵ و ۱۰ درصد استفاده شده است.

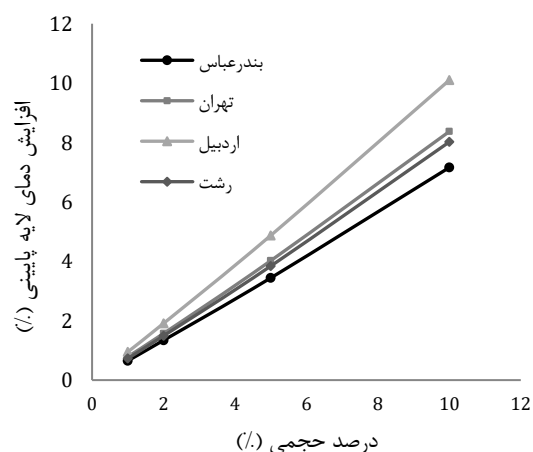
نتایج این نمودار نشان می‌دهد که استفاده از ذرات نانوسیلیکا در لایه میانی استخر خورشیدی باعث کاهش اتلاف حرارت از لایه پایینی شده و دمای این لایه را افزایش می‌دهد. با افزایش میزان درصد حجمی نانوذرات سیلیکا در لایه میانی استخر خورشیدی، دمای لایه پایینی افزایش می‌یابد. با افزایش درصد حجمی نانو سیلیکا در محلول آب - نمک از صفر درصد به ۱، ۲، ۵ و ۱۰ درصد، دمای متوسط لایه پایینی به ترتیب ۰/۶، ۱/۳، ۳/۴ و ۷/۲ درصد افزایش می‌یابد.



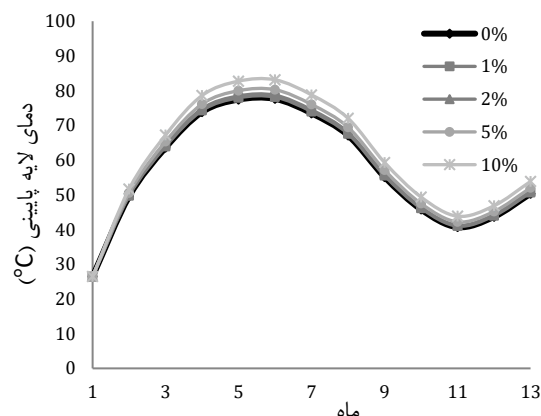
شکل ۹: تاثیر استفاده از نانو ذرات سیلیکا بر دمای لایه پایینی برای شهر رشت

با اضافه نمودن ذرات نانو سیلیکا در لایه میانی تا میزان ۱۰ درصد حجمی محلول آب - نمک در شهرهای تهران، اردبیل و رشت، به ترتیب ۸/۴، ۱۰/۱ و ۸ درصدی در مقدار میانگین دمای لایه پایینی استخر افزایش رخ می‌دهد.

شکل ۱۰ تاثیر میزان درصد حجمی نانو سیلیکا در مقدار میانگین دمای لایه پایینی را در شهرهای بندرعباس، تهران، اردبیل و رشت ارائه می‌دهد. نتایج این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش درصد حجمی نانو سیلیکا در هر چهار شهر، دمای لایه پایین افزایش می‌یابد. همچنین در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با توجه به دمای پایین‌تر استخر خورشیدی در شهر اردبیل و همچنین دمای پایین محیط در این شهر، افزایش نانو ذرات سیلیکا تاثیر بیشتری در دمای لایه پایینی در استخر خورشیدی در این شهر دارد.

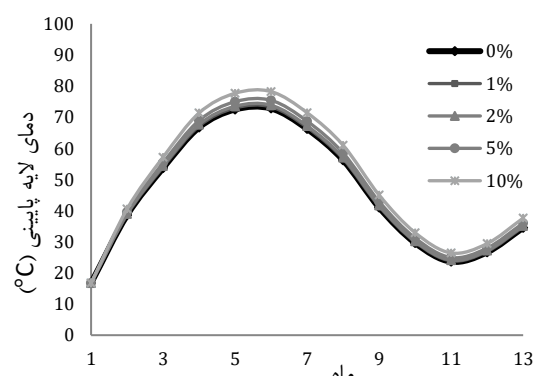


شکل ۱۰: تاثیر کاربرد نانوسیلیکا بر روی دمای لایه پایینی در شهرهای مختلف

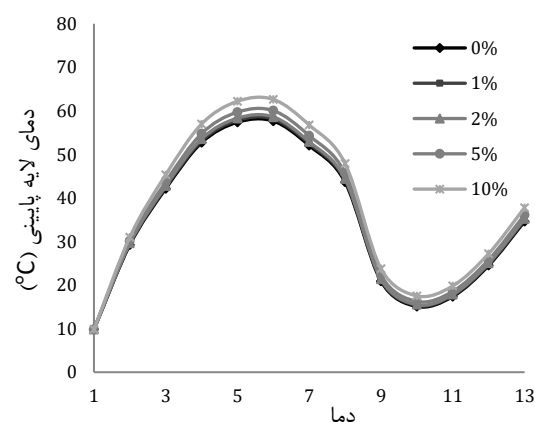


شکل ۶: تاثیر استفاده از نانو ذرات سیلیکا در مقدار درجه حرارت لایه پایینی برای شهر بندرعباس

شکل‌های ۷، ۸، و ۹ به ترتیب توزیع دمای لایه پایینی را برای شهرهای تهران، اردبیل و رشت نمایش می‌دهد. نتایج شکل‌های ۷ تا ۹ نیز نشان می‌دهد که استفاده از نانو ذرات سیلیکا باعث افزایش دمای لایه ذخیره‌ساز گرما در استخر خورشیدی می‌شود.



شکل ۷: تاثیر استفاده از نانو ذرات سیلیکا بر دمای لایه پایینی برای شهر تهران



شکل ۸: تاثیر استفاده از نانو ذرات سیلیکا بر دمای لایه پایینی برای شهر اردبیل

جدول ۴: تاثیر استفاده از نانو سیلیکا بر روی راندمان حرارتی لایه پایین استخر خورشیدی برای شهرهای مختلف

درصد حجمی	تهران	بندرعباس	اردبیل	رشت
یک	۰/۸۸	۱/۱۸	۱/۳۵	۱/۶۶
دو	۱/۷۷	۲/۳۸	۲/۷۳	۳/۳۶
پنج	۴/۵۴	۶/۱	۶/۹۸	۸/۶۸
ده	۹/۴۵	۱۲/۷	۱۴/۵۳	۱۷/۸۶

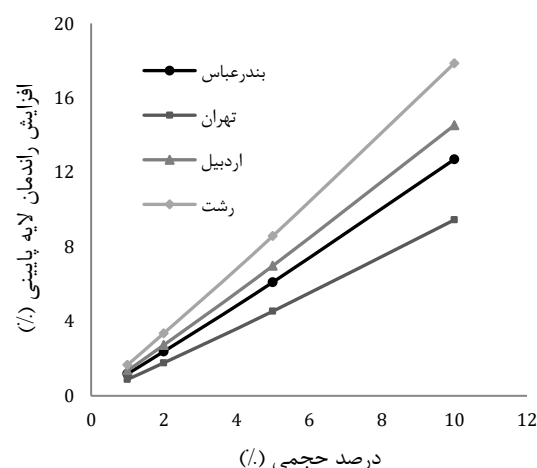
۸- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر استفاده از نانو ذرات سیلیکا بر روی عملکرد یک استخر خورشیدی با گرا دیان شوری به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور بررسی اثر شرایط آب و هوایی و بویژه تابش خورشیدی، ایران به چهار منطقه تابشی تقسیم و چهار شهر بندرعباس، تهران، اردبیل و رشت برای این مناطق در نظر گرفته شد. همچنین برای بررسی اثرات میزان درصد حجمی نانوذرات سیلیکا در محلول آب - نمک، از ذرات نانو سیلیکا با چهار نسبت حجمی ۱، ۲، ۵ و ۱۰ درصد استفاده شد. نانوذرات سیلیکا ضریب هدایت حرارتی کمی داشته و هنگامیکه به سیال لایه میانی در استخر خورشیدی اضافه شود، ضریب انتقال حرارت کلی را کاهش داده و از اتلاف حرارت می کاهد. نتایج این پژوهش نشان که افزایش نانوذرات سیلیکا به لایه میانی استخر خورشیدی باعث افزایش دمای لایه پایینی استخر می شود و هر چه درصد حجمی ذرات سیلیکا در لایه میانی بیشتر باشد دمای لایه پایینی افزایش بیشتری می یابد. استفاده از نانو ذرات سیلیکا تا ۱۰ درصد دمای لایه پایینی و تا ۱۸ درصد راندمان استخر خورشیدی در مناطق مختلف را افزایش می دهد.

۹- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از دانشگاه صنعتی قوچان به واسطه حمایت مالی، طرح شماره ۱۰۲۳، تشکر می نمایند.

با توجه به میزان راندمان حرارتی لایه پایینی یک استخر خورشیدی که نسبت گرمای ذخیره شده به گرمای جذب شده می باشد؛ تاثیر استفاده از نانو ذرات سیلیکا بر روی راندمان استخر خورشیدی برای چهار شهر بندرعباس، تهران، اردبیل و رشت در شکل ۱۱ نشان داده شده است. اضافه نمودن نانوذرات سیلیکا در لایه میانی استخر خورشیدی باعث افزایش بازده گرمایی استخر خورشیدی در شهرهای مختلف می شود. با توجه به پایین بودن میزان تابش خورشیدی در شهر رشت نسبت به سه شهر دیگر، استفاده از نانو ذرات سیلیکا بر روی راندمان لایه پایینی استخر خورشیدی در این شهر تاثیر بیشتری را نشان می دهد. نتایج این نمودار نشان می دهد که با افزایش ۱۰ درصد حجمی از نانوذرات سیلیکا در محلول آب - نمک افزایش ۹ تا ۱۸ درصد در راندمان حرارتی لایه پایینی استخر در شهرهای مختلف بوجود می آید.



شکل ۱۱: تاثیر استفاده از نانوسیلیکا بر روی راندمان لایه پایینی استخر خورشیدی در شهرهای مختلف

همچنین در جدول ۴ مقادیر افزایش دمای راندمان حرارتی لایه پایین در صورت استفاده از نانو ذرات سیلیکا با درصدهای حجمی متفاوت در لایه میانی و برای شهرهای مختلف نشان داده شده است.

۱۰- مراجع

- [۱] جعفرزاده، م. (۱۳۸۲). "استخرهای خورشیدی، کاربردهای آن و روش مطالعات مکان‌یابی در ایران" هیجدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ایران.
- [2] Kaleczinsky, A., (1902). *Annalen der Physik*, 7, 408.
- [3] J. A. Ruskowitz, F. S. Suarez, W. Tyler, and A. E. Chidress, *Solar Energy*, 99, 2014, 36.
- [4] A. R. Akbarzadeh, W. G. Macdonald, Y. F. Wang, *Solar Energy*, 31, 1983, 377.
- [5] E. Busquets, V. Kumar, J. Motta, R. Chacon, H. Lu, *Solar Energy*, 86, 2012, 1366.
- [6] K. Karunamurthy, K. Murugumohankumar, S. Suresh, *Digest Journal of Nanomaterials Biostructures*, 7, 2012, 1833.
- [7] S. M. Ladjevardi, A. Asnaghi, P. S. Izadkhash, A. H. Kashani, *Solar Energy*, 94, 2013, 327.
- [۸] قاسمی، ا.، رنجبر، ع.، رامیار، ع.، (۱۳۹۲) "بررسی عددی اثر نانو سیال آلومینیوم - آب بر عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی" نشریه نانو مواد، شماره ۱۴، ۱۰۰-۱۰۷.
- [9] A. Sakhrieh, A. Al-salaymeh, *Energy Conversion Management*, 65, 2013, 725.
- [10] <http://www.solargis.info/Dec>. 2015
- [11] <http://www.chaharmahalmet.ir/Dec>. 2015
- [12] J. A. Duffie, W. A. Beckman, "Solar engineering of thermal process", Wiley, New York, 1991.
- [13] M. R. Jaefarzadeh, *Solar Energy*, 77, 2004, 281.
- [14] H. M. Ali, *Energy Research*, 10, 1986, 377.
- [15] A. Rabl, C. E. Nielsen, *Solar Energy*, 17, 1975, 1.
- [16] R. Joel, "Basic engineering thermodynamics", Longman, 1996.
- [17] J. Samimi, *J. of Physics*, 3, 1986, 79.
- [18] H. Weinberger, *Solar Energy*, 8, 1964, 45.
- [19] M. Sodha, N. D. Kausik, S. K. Rao, *Applied Energy*, 10, 1981, 47.
- [20] M. Karakilcik, I. Dincer, M. A. Rosen, Performance investigation of a solar pond, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, pp. 727-735, 2006.
- [21] V. D. Chary, D. Sharma, P. Prasad, S. Murthy, *Bulletin Materials Science*, 36, 2013, 517.
- [22] J. C. Maxwell, "Electricity, Magnetism", Oxford, 1904.
- [23] S. Lu, H. Lin, *Journal of Applied Physics*, 79, 1996, 6761.
- [24] R. H. Davis, *International Journal of Thermophysics*, 7, 1986, 609.