



شبیه‌سازی عددی استخر خورشیدی گرادیان نمک با استفاده از تابع تخمین شدت تابش خورشیدی به همراه اثر سایه دیوارها

جواد امینی فروشانی^۱، علی اکبر عباسیان آرانی^{۲*}، محمد گندم کار^۲

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
۲. مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۶
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۲
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۱۲

کلمات کلیدی:

استخر خورشیدی
شبیه‌سازی عددی
تخمین شدت تابش
سیستم ذخیره انرژی
انرژی خورشیدی.

خلاصه: در این تحقیق تابع تخمین تابش خورشیدی بر اساس جرم هوا و آمار روزهای آفتابی و ابری جهت استفاده در مدل‌سازی عددی استخرهای خورشیدی معرفی شده است. استخرهای خورشیدی یکی از روش‌های جذب تابش خورشیدی و ذخیره‌سازی آن به صورت حرارت با دوره‌های ذخیره طولانی‌مدت می‌باشند. این تحقیق با کد شبیه‌سازی یک‌بعدی، نسبت به تحلیل عملکرد حرارتی استخرهای خورشیدی گرادیان نمک اقدام می‌نماید. در مدل‌سازی عددی با حذف فرضیات معمول، شرایط محیطی به صورت واقعی‌تر لحاظ شده‌اند. این شرایط دمای محیط متغیر برحسب روز و ساعت، تابعیت خواص محلول آب و نمک از دما و غلظت، متغیر شدت تابش بر حسب زاویه فراز خورشید و تاثیر سایه دیوارها در استخر بوده است. تحلیل گذرا انجام شده و شرایط روز و شب لحاظ شده‌اند. نوآوری روش مورد استفاده، مربوط به تخمین شدت تابش خورشیدی با استفاده از مفهوم جرم هوا و مقدار ابری بودن آسمان بوده است. رابطه‌ای نوین جهت محاسبه فاکتور پوشش ابر ارائه نموده، که از آمار روزهای ابری و نیمه ابری محل وقوع استخر استخراج گردیده و شدت تابش با میزان اندازه‌گیری شده تجربی مقایسه شده است. شدت تابش بدست‌آمده در مدل‌سازی عددی استخر خورشیدی مورد تحقیق با نتایج تجربی موجود تطابق خوبی دارد.

۱- مقدمه

انرژی خورشیدی به دلیل عدم تولید گازهای گلخانه‌ای، فراوانی و ارزانی، نسبت به دیگر انرژی‌ها متمایز می‌شود و جذابیت دارد. در بین روش‌های موجود در جذب و استفاده از انرژی خورشیدی، استخرهای خورشیدی مشخصات ویژه‌ای دارند مانند ترکیب بخش جذب‌کننده و ذخیره‌کننده انرژی گرمایی که باعث سادگی و کاهش هزینه‌های ساخت می‌شود [۱]. همچنین استخرهای خورشیدی می‌توانند به صورت یک سامانه ذخیره گرمایی^۱ با دوره عملکرد سالانه به کار روند. در این کاربرد می‌توان انرژی خورشیدی را به صورت انرژی گرمایی در تابستان ذخیره نمود و در زمستان جهت گرمایش استفاده کرد [۲]. سادگی در عملکرد و هزینه نگهداری پایین آنها باعث شده تا استخرهایی در ابعاد مختلف از چند مترمربع تا چند صد هزار متر مربع در نقاط مختلف دنیا ساخته شوند [۱].

در استخرهای خورشیدی جریان همرفتی حاصل از تفاوت دما در لایه‌ای از استخر مهار و متوقف شده است. در استخرهای معمولی توده‌های سیال گرم تشکیل‌شده ناشی از تابش آفتاب به سطح صعود کرده و حرارت به محیط منتقل می‌شود. با توقف حرکت این جریان‌ها،

سیال گرم در عمق استخر باقی می‌ماند و انتقال حرارت به محیط عمدتاً از طریق رسانش از بدنه آب استخر اتفاق می‌افتد که مقدار آن به دلیل پایین بودن ضریب انتقال حرارت آب کم است. استخرهای خورشیدی مختلفی بر اساس روش توقف جریان همرفت ساخته شده است که فراگیرترین آن استخرهای خورشیدی گرادیان نمک^۲ است که دارای سه لایه مختلف هستند (شکل ۱).

لایه اول، لایه جابجایی سطحی^۳ است که غلظت نمک در آن یک دست و پایین و در حد شوری آب دریاست. لایه میانی یا لایه عدم همرفتی^۴ است که غلظت نمک با عمق افزایش یافته تا در پایین‌ترین عمق، به غلظت ۳۰۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم در مترمکعب می‌رسد. لایه سوم لایه جابجایی زیرین^۵ است و نقش ذخیره‌کننده گرما را دارد. غلظت نمک در لایه جابجایی زیرین تقریباً یکسان است. وجود گرادیان نمک در آب استخر باعث بوجود آمدن گرادیان چگالی می‌شود که با عمق افزایش می‌یابد. گرادیان چگالی موجود امکان جریان همرفت سیال گرم را از بین برده و باعث ذخیره حرارت در لایه زیرین و تا حدودی در لایه میانی می‌شود [۳].

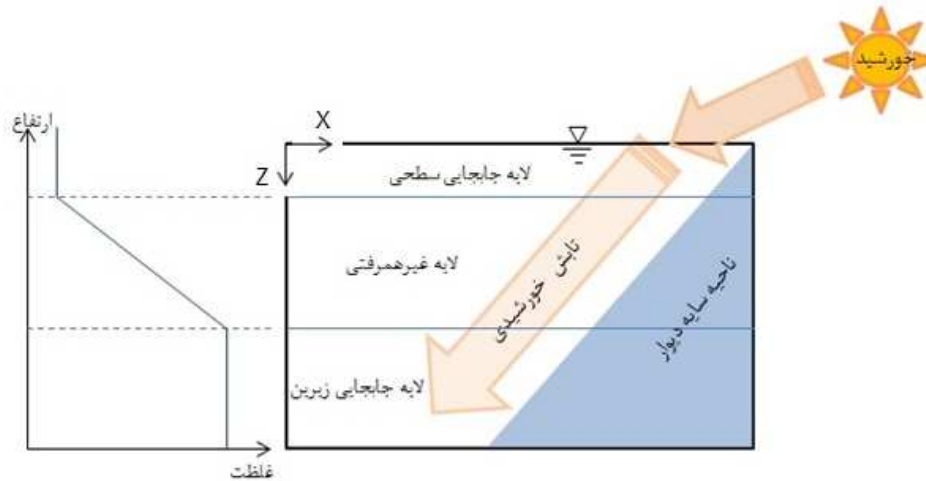
- 2 -Salt gradient solar ponds
- 3 -Upper convective zone
- 4 - Non-convective zone
- 5 -Lowe convective zone

1-Heat storage system

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: abbasian@kashanu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.





شکل ۱. نمای شماتیک از یک استخر خورشیدی گرادیان نمک و لایه بندی درون آن
Fig. 1. Schematic view of a salt pond solar pool and layering inside

استخر نسبت به استخرهای مربع و مستطیل با شرایط مشابه، عملکرد حرارتی بهتری دارند. همچنین در استخرهای مستطیل و مربع شکل در صورتی که امتداد استخر شمالی- جنوبی باشد عملکرد بهتری نسبت به دیگر جهات خواهد داشت [۱۷، ۱۸].

کاربردهای مختلفی از استخرهای خورشیدی گزارش شده است. برخی پژوهش‌ها بر روی کاربرد استخر خورشیدی در گرمایش محیط مطالعه کرده‌اند [۱۹]. از استخرهای خورشیدی جهت گرمایش ساختمان‌های اداری و دولتی ایالت بنگلور^۱ هندوستان استفاده می‌شود [۱]. همچنین مقالات مختلفی وجود دارد که بر روی استفاده از استخرهای خورشیدی در نمک زدایی از آب متمرکز شده‌اند [۴]. از استخرهای خورشیدی می‌توان در کلیه صنایعی که به آب گرم با درجه حرارت ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس نیاز باشد، استفاده کرد [۱]. از آب گرم شده در استخر خورشیدی گرادیان نمک جهت پاستوریزه کردن شیر در هندوستان استفاده می‌شود. همچنین از آنها برای تولید الکتروسیسته نیز استفاده شده است. به عنوان مثال از یک استخر خورشیدی به وسعت ۲۵۰۰۰۰ مترمربع برای راه‌اندازی نیروگاه ۵ مگاواتی در فلسطین اشغالی استفاده شد [۱]. استخرهای خورشیدی به دلیل کاربردهای فراوان و امکان استفاده آنها در ابعاد صنعتی برای مهندسی جذب هستند.

شبیه‌سازی عددی استخرهای خورشیدی با اهداف مختلفی صورت می‌گیرد. تحلیل رفتار حرارتی و عملکرد گرمایی استخر از اولین انگیزه‌های شبیه‌سازی عددی بوده است [۷]. با استفاده از ابزار عددی که در ابتدا با استفاده از نتایج تجربی صحت‌سنجی^۲ شده، می‌توان برای بهینه‌سازی ابعاد و ضخامت لایه‌ها و کلیه متغیرهای دخیل در استخر استفاده نمود. همچنین برای تحلیل انرژی و اکسرژی لازم است تا مقدار تبادل حرارت بین لایه‌ها و اتلاف به محیط از

تأثیر عوامل متعددی در کارایی گرمایی استخر مشهود است، مانند دمای محیط، میزان تابش خورشیدی در محل استخر، عایق بندی دیوارها و کف، میزان درصد سایه دیوارها در استخر، ضخامت لایه‌ها و غیره. معمولاً برای تحلیل تئوری یا عددی یک استخر خورشیدی برای عوامل تأثیرگذار از فرض‌های ساده کننده‌ای استفاده می‌شود مانند متوسط تابش ماهانه در محل و استفاده از متوسط دمای محیط و غیره. فرضیات بیشتر منجر به تقریب‌های بیشتر و در نهایت فاصله گرفتن تحلیل‌ها از واقعیت تجربی است. بنابراین در این تحقیق سعی شده تا حد امکان از تقریب‌های ساده کننده استفاده نشود یا مقدارشان به حداقل برسد.

استخرهای خورشیدی به صورت طبیعی وجود دارند. در اواخر قرن نوزدهم مشاهده شد که دمای آب در عمق ۱٫۳ متری دریاچه‌ای واقع در استان ترانسیلوانیا کشور رومانی در اواخر تابستان به حدود بیش از ۷۰ درجه سانتی گراد می‌رسد که علت آن گرادیان غلظت نمک در آب است. با ساخت استخرهای خورشیدی به صورت مصنوعی تحولی در ساخت و راه‌اندازی آنها بوجود آمد و در دهه‌های شصت و هفتاد میلادی تحقیقات متعددی بر روی آنها انجام شد [۴-۱۰]. همچنین مدل‌سازی عددی استخر همراه با بررسی تأثیر ضخامت لایه‌ها و ابعاد استخر نیز بررسی شدند [۷، ۱۱، ۱۲]. استخرهای تحقیقاتی معمولاً دارای ابعاد کوچکی هستند بنابراین تأثیر سایه ناشی از دیوارهای استخر بر عملکرد آنها اهمیت بیشتری دارد. در این راستا تحقیقات و مقالات زیادی با رویکرد بررسی تأثیر سایه‌ها در استخر انجام شده است [۱۳-۱۸]. همچنین تأثیر شکل استخر نیز بر روی عملکرد حرارتی آن بررسی شد و بویژه در مورد استخرهای با مقاطع مربع و مستطیل شکل، جهت‌گیری استخر نسبت به جهات جغرافیایی مورد تحقیق و بررسی تجربی و عددی قرار گرفت. نتیجه مشترک بررسی‌ها نشان داد استخرهای دایره شکل به دلیل سطح جانبی کمتر و پیرو آن اتلاف حرارتی پایین‌تر و همچنین سطح سایه کمتر بوجود آمده در

1 -Banglore
 2 -Validation

و ابعادی در تحلیل عددی، ضروری است که اطلاعات لازم از آزمون تجربی معلوم گردد. با بررسی‌های صورت گرفته نتایج تجربی مرجع [۱۸] به همراه ابعاد لایه‌بندی و شرایط محیطی شهر ارومیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق تجربی دو استخر خورشیدی با مقاطع مربع و دایره با مساحت سطح ۴ متر مربع که هر دو دارای عمق ۱٫۱ متر هستند در یک بازه یک‌ساله مورد آزمایش قرار گرفتند. ضخامت لایه سطحی، میانی و زیرین به ترتیب ۰٫۲، ۰٫۵ و ۰٫۴ متر در نظر گرفته شدند. هر دو استخر از ورق گالوانیزه ساخته شده و طبق اطلاعات موجود در مرجع [۱۸] با عایق پشم شیشه با ضخامت ۳ سانتی‌متر پوشانده شدند. عملکرد حرارتی استخر در این مدت بررسی و افزایش تدریجی دما در لایه‌های زیرین و میانی استخر گزارش شدند. همچنین مشخصات شهر ارومیه با عرض جغرافیایی ۳۷٫۵۴۹۸ درجه و ارتفاع از سطح دریا برابر ۱۱۳۳ متر مورد استفاده قرار گرفته است. اطلاعات جامع‌تر در مورد آزمون تجربی در مرجع [۱۷] ارائه شده است.

۳- مدل‌سازی استخر خورشیدی گرادیان نمک

اندازه‌گیری‌های تجربی نشان داده که گرادیان دمایی در راستای عمق نسبت به گرادیان دمایی در راستای افقی غالب است [۱۵]، بنابراین می‌توان تغییرات دما در استخر خورشیدی را فقط تابع عمق استخر در نظر گرفت. برای مدل‌سازی استخر لازم است شرایط هر لایه به صورت مجزا بررسی شود. لایه سطحی به لحاظ حرارتی مستقیماً با محیط تبادل حرارت دارد و به شدت تحت تاثیر دمای محیط است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که دمای این لایه با دقت بسیار خوبی با دمای محیط برابر است [۲۰]. جریان‌ها همرفتی در لایه زیرین به دلیل یک‌دست بودن غلظت نمک در آن اتفاق می‌افتد که توسط لایه میانی مهار شده در ناحیه لایه زیرین محدود می‌شوند. وجود جریان‌های همرفتی در این لایه توزیع دما را تعدیل کرده و اختلاف دمای نقاط مختلف این لایه ناچیز است، بنابراین تحلیل انرژی بر روی کل این لایه به صورت یک واحد مجزا صورت می‌گیرد.

۱- تحلیل انرژی لایه جابجایی زیرین

با فرض مشخصات سیال به صورت تابعی از دما و غلظت نمک و با فرض دمای یکسان برای لایه جابجایی زیرین، معادله بقای انرژی پس از ساده‌سازی برای این لایه به صورت زیر بدست می‌آید [۱۵، ۱۷]:

$$Al_{LCZ} \frac{\partial(\rho c_p T_{LCZ})}{\partial t} = \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{Side} - \dot{Q}_{Bottom} - \dot{Q}_{LCZtoNCZ} - \dot{Q}_{ext} \quad (1)$$

در این رابطه دیده می‌شود که میزان نرخ انباشت یا برداشت انرژی ذخیره‌شده در لایه زیرین به چه عواملی مرتبط است. انرژی

طریق دیوارها، کف و بدنه آب ساکن معین باشد. بدست آوردن این مشخصات در آزمایش تجربی مشکل است بنابراین با استفاده از نتایج صحت‌سنجی شده شبیه‌سازی عددی نسبت به تحلیل انرژی و اکسرژی لایه‌های مختلف و کل استخر خورشیدی اقدام می‌کنند [۲۰-۲۳].

در عمده تحقیقات صورت گرفته در زمینه شبیه‌سازی عددی استخر خورشیدی، از اطلاعات مراکز ثبت میزان تابش خورشیدی و متوسط ماهانه تابش دریافتی در محل استفاده می‌شود. همچنین متوسط دمای ماهانه ثبت شده در مراکز هواشناسی به عنوان دمای محیط فرض شده است [۱۳، ۱۸-۲۲، ۲۴]. در برخی از مقالات نیز توابع تخمین تابش در مورد مناطق مشخص جغرافیایی ارائه شده و بکار رفته است [۲۴-۲۸]. شماری از مقالات نیز با احتساب درصد ابری بودن آسمان، تاثیرات آن را بر میزان تابش دریافتی در سطح زمین بررسی کرده‌اند [۲، ۲۹-۳۷]. از آنجا که اکثر ایستگاه‌های هواشناسی فاقد تجهیزات تابش‌سنج هستند؛ میزان تابش متوسط ماهانه برای کاربرد در کد شبیه‌سازی ممکن است موجود نباشد، از این رو وجود یک تابع تخمین تابش که علاوه بر سادگی، دقت مناسبی را جهت استفاده در شبیه‌سازی عددی استخرهای خورشیدی داشته باشد ضروری به نظر می‌رسد.

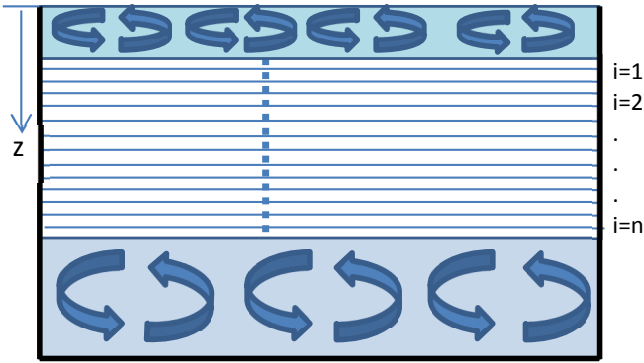
در این مطالعه با استفاده از کد توسعه‌یافته به زبان فورترن^۱، استخر خورشیدی گرایان نمک به صورت یک بعدی شبیه‌سازی شده است. در این راستا خواص سیال به صورت تابعی از دما و غلظت نمک در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از روابط موجود در مورد ساعت طلوع و طول مدت روز، شبیه‌سازی به صورت حل گذرا انجام و ساعات روز و شب نیز در شبیه‌سازی اعمال می‌شود. تاثیر سایه دیوارها برای دو استخر دایره و مربع شکل در نظر گرفته شده و همچنین دمای محیط و شدت تابش نیز با استفاده از توابع ریاضیاتی در کد اعمال می‌شوند. هدف این مقاله ارائه تابع تخمین تابش مناسب و قابل استفاده در مناطقی است که تابش‌سنج و داده‌های آماری شدت تابش در اختیار نیست. با استفاده از مفهوم جرم هوا^۲، تاثیرات جو در تابش دریافتی استخر تخمین زده شده و همزمان با ترکیب این موضوع با میزان پوشیدگی ابر، نسبت به کاربردی نمودن تابع برای استفاده در شبیه‌سازی استخر اقدام می‌شود. در نهایت با مقایسه نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی موجود در مراجع نسبت به صحت‌سنجی تحلیل عددی اقدام می‌شود.

۲- آزمون تجربی مورد استفاده برای راستی‌آزمایی حل عددی

برای آزمون صحت نتایج عددی نیاز است که نتایج در شرایط یکسان با آزمایش تجربی مقایسه شود. برای کاربرد شرایط محیطی

1 -Fortran

2 -Air mass



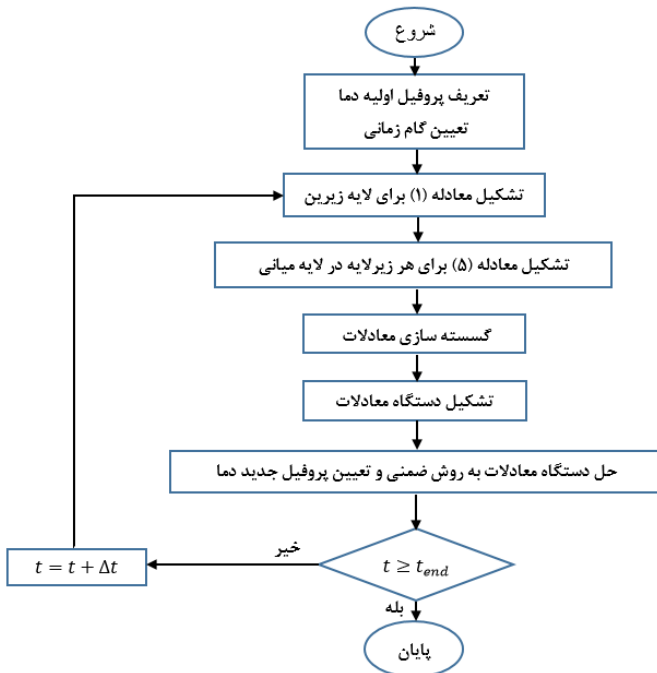
شکل ۲. لایه‌های جابجایی سطحی و زیرین به همراه تقسیم‌بندی لایه غیرهمرفتی میانی

Fig. 2. Surface and bottom convective layers with intermediate non-convective layer segmentation

طریق هدایت از بدنه آب این لایه انجام می‌شود، بنابراین گرادیان دما در جهت عمق در این لایه وجود دارد. برای معین و دیده‌شدن گرادیان دما ضخامت این لایه در جهت عمق به تعداد محدودی زیرلایه تقسیم‌بندی شده و معادله بقای انرژی برای هر زیرلایه بدست می‌آید. شکل ۲ نمای شماتیک استخر و تقسیم‌بندی لایه‌ها برای تحلیل عددی را نشان می‌دهد. معادله بقای انرژی در حالت گذرا برای هر زیرلایه در صورتی که مشخصات سیال متغیر و تابع دما و غلظت باشد به فرم دیفرانسیلی زیر است [۱۵، ۱۷]:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{dI}{dz} \quad (5)$$

متغیر z مختصات در راستای عمق است و مبدأ آن در سطح آب



شکل ۳. فلوچارت مراحل تحلیل عددی

Fig. 3. Flowchart of numerical analysis steps

به واسطه تابش به لایه زیرین می‌رسد (\dot{Q}_{rad}) و به چهار صورت کلی اتلاف و یا برداشت می‌شود. مقداری توسط دیوارهای استخر تلف می‌شود (\dot{Q}_{Side}). همچنین حرارت از کف استخر نیز به محیط منتقل می‌گردد (\dot{Q}_{Bottom}). استخرهای کوچک معمولاً به صورت مخزن مستقر بر روی سطح زمین ساخته می‌شوند، دارای پایه هستند و دیوارها و کف آنها عایق پوش می‌شوند بنابراین فرض می‌شود که هوای محیط تمام جوانب استخر را احاطه کرده باشد. اتلاف از طریق رسانش در عرض عایق حرارتی به هوای با دمای محیط منتقل می‌شود. به دلیل اینکه استخر از جمیع جهات با هوای محیط احاطه شده و حتی در بخش کف نیز تنها با لایه عایق پوشیده شده بنابراین محاسبه اتلاف از دیوارها و کف با استفاده از قانون فوریه^۱ محاسبه می‌شوند. اتلاف از طریق رسانش از حجم آب موجود در لایه میانی نیز می‌تواند صورت گیرد ($\dot{Q}_{LCZtoNCZ}$) و در نهایت می‌توان به طور مستقیم با استفاده از یک مبدل حرارتی داخل استخر یا در خارج آن حرارت را از استخر برداشت نمود (\dot{Q}_{ext}). انتقال حرارت از دیوارها و کف به محیط و از لایه زیرین به لایه میانی و برداشت حرارت از لایه مذکور، همگی باعث کاهش انرژی ذخیره‌شده در لایه زیرین می‌شوند. مقدار انتقال حرارت به دیوارها و کف با استفاده از قانون فوریه برای انتقال حرارت هدایت و فرض شبه-پایابودن وضعیت استخر محاسبه می‌شوند. روابط انتقال حرارت از دیوارها و کف به صورت زیر است.

$$\dot{Q}_{Side} = -k_{insul} \cdot A_{LCZ-walls} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{side\ walls} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{Bottom} = -k_{insul} \cdot A \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{bottom} \quad (3)$$

همچنین با محاسبه گرادیان دما در مرز بین لایه زیرین و میانی و ضریب هدایت حرارتی آب، مقدار انتقال حرارت به لایه میانی محاسبه می‌شود.

$$\left. \dot{Q}_{LCZtoNCZ} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{LCZ-NCZ\ boundary} \quad (4)$$

در مطالعه حاضر، برداشت حرارت از استخر صفر در نظر گرفته شده است. این عمل جهت تشابه با آزمون تجربی صورت گرفته است. مقدار تابش خورشیدی و نحوه محاسبه آن در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

۳-۲- تحلیل انرژی لایه غیر همرفتی میانی

در لایه غیرهمرفتی میانی، بواسطه وجود گرادیان چگالی، سیال عملاً ساکن است. انتقال حرارت از لایه زیرین به لایه سطحی از

1 -Fourier's law

مقدار و شدت ابری بودن آسمان در روزهای سال از عوامل تاثیرگذار بر کارایی استخر هستند. همچنین تغییرات دمای محیط بر اساس ساعات شبانه روز و تغییرات فصلی نیز در اتلافات حرارتی استخر موثر هستند. دیگر عوامل مانند شدت وزش باد و یا مقدار نزولات جوی در محل استخر هر چند بر کارکرد استخر بی تاثیر نیستند ولی اثرات آنها ناچیز در نظر گرفته شده و در محاسبات وارد نشده‌اند.

۴-۱- تابش رسیده به سطح استخر

شدت تابش خورشید در خارج از جو زمین و به دلیل فاصله تقریباً ثابت بین خورشید و زمین مقداری ثابت دارد که به آن ثابت خورشیدی^۱ گفته می‌شود. ثابت خورشیدی عبارت است از شدت تابش بر سطح عمود بر تابش در فاصله یک واحد نجومی از خورشید [۳۰]. مقدار ثابت خورشیدی در این مقاله برابر ۱۳۵۳ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است [۳۸-۴۰].

جو زمین با جذب برخی طول موج‌ها از شدت تابش می‌کاهد و با افزایش زاویه فراز^۲ خورشید مقدار مسافتی که باید نور از درون جو طی کند تا به سطح زمین برسد افزایش می‌یابد. بر اساس مفهوم جرم هوا، در صورتی که خورشید به صورت کاملاً عمود بر زمین بتابد، تابش آن از یک واحد جرم هوا عبور کرده است. بر اساس آنچه در شکل ۴ نشان داده شده است با افزایش زاویه فراز خورشید شدت تابش به دلیل گذشتن از مقدار جرم هوای بیشتر، ضعیف‌تر می‌شود. روابط مختلفی برای تخمین جرم هوا به ازای زوایای مختلف و فرض جو تخت و یا جو منحنی ارائه شده‌اند [۴۱-۴۳]. همچنین جداولی نیز به صورت اپتیکال^۳ برای جرم هوا ارائه شده است [۲۷]. بر اساس اطلاعات این جداول و عبور منحنی مناسب از آنها، روابط تخمین جرم هوا ارائه شده‌اند، که یکی از دقیق‌ترین آنها به صورت زیر است [۲۸]. تطابق نتایج این رابطه با داده‌های اپتیکال موجود در جداول در شکل ۵ نشان داده شده است.

$$M(z_t) = \frac{1.002432 \cos^2 z_t + 0.148386 \cos z_t + 0.0096467}{\cos^3 z_t + 0.149864 \cos^2 z_t + 0.0102963 \cos z_t + 0.000303978} \quad (6)$$

با تعیین مقدار جرم هوا می‌توان شدت تابش در سطح را با استفاده از رابطه زیر بدست آورد [۴۴]:

$$I_{cs} = 1.1 \times I_0 \times \left(\left(1 - \frac{elevation}{7.1} \right) \times 0.7^{M(z_t)^{0.678}} + \frac{elevation}{7.1} \right) \quad (7)$$

این رابطه شدت تابش عمود بر سطح در محل را بر اساس ارتفاع مشخص می‌کند. به دلیل اینکه تاثیرات ابری بودن آسمان در رابطه محاسبه شدت تابش لحاظ نشده است، بنابراین مقدار بدست‌آمده

در نظر گرفته شده و چون تابش با نفوذ در عمق ضعیف‌تر می‌شود، گرادیان تابش نسبت به عمق منفی خواهد بود. بنابراین عبارت آخر در معادله مقداری مثبت دارد و به صورت چشمه عمل نموده و نشان‌دهنده جذب انرژی تابشی در لایه مورد بررسی است.

جهت حل معادلات در ابتدا لازم است هم برای لایه جابجایی زیرین و هم برای هر یک از لایه‌های در نظر گرفته شده در لایه میانی نشان داده شده در شکل ۲ معادلات تشکیل شوند. این دسته از معادلات یک‌بعدی و گذرا هستند که با گسسته‌سازی آنها دستگاه معادلات تشکیل می‌شود. به ازای هر گام زمانی و حل همزمان دستگاه معادلات به صورت ضمنی، توزیع دما بر اساس عمق برای آن گام زمانی حاصل می‌شود. ضمنی بودن تحلیل معادلات باعث می‌شود که حل بدون شرط پایدار باشد و با تکرار مراحل برای گام‌های زمانی پیش‌رونده، رشد تدریجی توزیع دما با زمان حاصل می‌شود. فرآیند حل در الگوی نشان‌داده شده در شکل ۳ آورده شده است.

شرایط مرزی شامل دیوارها و کف و همچنین لایه سطحی هستند که به لحاظ حرارتی باید معین باشند. بیان شد که اتلافات حرارتی از دیوارها و کف بر اساس قانون فوریه صورت می‌گیرد. بنابراین باید شرط مرزی به دمای محیط در اطراف استخر نسبت داده شود. شرایط دمایی لایه سطحی متاثر از دمای محیط است. شرط تساوی دمای لایه سطحی با دمای محیط بواسطه وجود اختلاط در این لایه و تماس مستقیم آن با هوای محیط فرض منطقی به نظر می‌رسد بنابراین مجدداً دمای محیط به عنوان شرط مرزی باید مورد استفاده قرار گیرد.

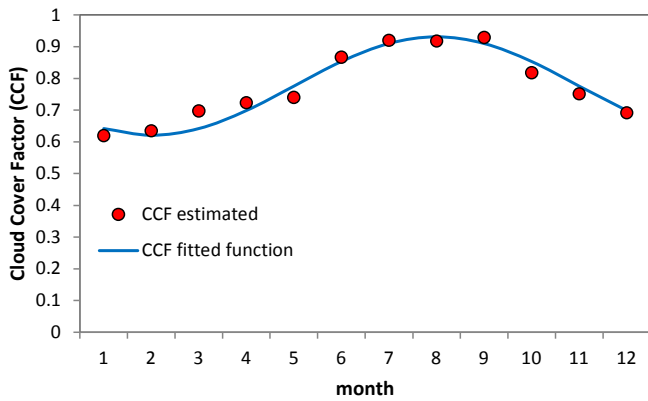
همچنین محاسبه مقدار $\frac{dl}{dz}$ مستلزم استخراج رابطه مناسب برای محاسبه مقدار شدت تابش در درون استخر است که آن نیز تابعی از شدت تابش رسیده به سطح استخر است و در بخش‌های بعدی به آن پرداخته می‌شود.

شرایط دمایی اولیه برای تحلیل عددی استخر مشابه با شرایط در آزمون تجربی در نظر گرفته شده است. در آزمون‌های تجربی لایه‌بندی استخر با آبی که در شرایط دمای محیط است انجام می‌شود. شرایط دمایی اولیه متفاوت از دمای محیط، سختی‌ها و هزینه‌های مربوط به خود را دارد و معمولاً لزومی به انجام آن نیست. بنابراین بر اساس زمان راه‌اندازی استخر که در گزارش‌های تجربی بیان شده است دمای محیط مشابه با آنچه در ادامه خواهد آمد محاسبه شده و دمای لایه‌های مختلف استخر برابر با دمای محیط قرار می‌گیرند.

۴-۲ مدل‌سازی عوامل محیطی

عوامل محیطی تاثیر مستقیمی بر عملکرد حرارتی استخر خورشیدی دارند. مقدار تابش رسیده به سطح استخر و چگونگی جذب آن در عبور از آب، تاثیر جو در جذب تابش خورشیدی و

-
- 1 - Solar constant
 - 2 - Zenith angle
 - 3 - Optical



شکل ۶. مقادیر CCF بدست آمده برای شهر ارومیه و مقادیر تابع تخمین CCF نسبت به ماهای مختلف میلادی

Fig. 6. CCF values obtained for Urmia city and values of CCF estimation function for different months of the year

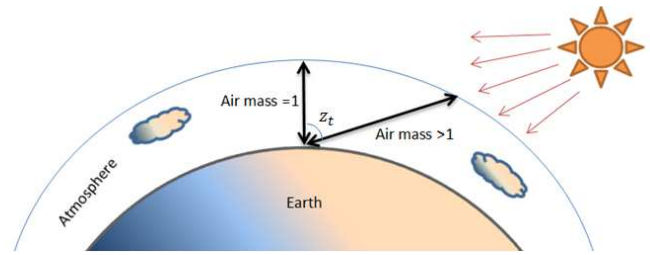
به روزهای آفتابی برای شرق کانادا بین ۰٫۱۷ تا ۰٫۳۵ گزارش شده است [۳۱]. معادله برلند^۲ مقدار ۰٫۲۲ تا ۰٫۲۷ را برای عرضهای جغرافیایی از استوا تا مدار شصت درجه پیش‌بینی می‌کند [۴۵]. مقادیر مشابهی برای شدت تابش در روزهای کاملاً ابری در مراجع آورده شده‌اند [۴۶-۴۸]. اطلاعات مربوط به داده‌برداری خورشیدی در ایالات متحده مقدار شدت تابش در روزهای کاملاً ابری را بین ۰٫۳۰ تا ۰٫۴۸ گزارش کرده است [۴۹].

با توجه به اطلاعات فوق چنین بر می‌آید که در نظر گرفتن مقدار ۰٫۳۰ برای فاکتور پوشش ابر در روزهای ابری مناسب باشد. شدت تابش روزهای نیمه‌ابری برابر میانگین شدت تابش بین روزهای آفتابی و روزهای کاملاً ابری فرض می‌شود. بنابراین مقدار متوسط ماهانه فاکتور پوشش ابر می‌تواند از رابطه زیر تخمین زده شود:

$$CCF = \left(n_{cs} \times 1 + n_{pc} \times \left(\frac{1+0.3}{2} \right) + n_{oc} \times 0.3 \right) / n_{month} \quad (9)$$

به عنوان مثال برای شهر ارومیه در آذربایجان غربی، بر اساس اطلاعات هواشناسی گرفته شده از سازمان هواشناسی کشور، تعداد روزهای صاف ابری و نیمه ابری به شرح جدول ۱ است. با فرضیات بکاررفته مقادیر CCF در ماه‌های مختلف برای شهر ارومیه به صورت نمودار شکل ۶ است. به دلیل ماهیت نوسانی نتایج حاصل با دوره تناوب سالانه می‌توان مقدار CCF را بر اساس یک تابع نوسانی سینوسی یا کسینوسی تخمین زد. تابع سینوسی بکاررفته در شکل ۶ با استفاده از روش حداقل مربعات بدست آمده و مقدار فاکتور ابری بودن را با دقت مناسبی پیش‌بینی می‌کند. مقدار بیشینه خطای نسبی کمتر از ۸ درصد برای ماه مارس است. تابع بدست آمده به صورت زیر است.

$$CCF_{est} = 0.776 + 0.155 \sin\left(\frac{2\pi}{12}(7 + m_{no})\right) \quad (10)$$



شکل ۴. شکل شماتیک جو زمین و مسافت طی شده توسط تابش خورشید در درون جو

Fig. 4. Schematic diagram of the Earth's atmosphere and the distance traveled by the sun's rays inside the atmosphere

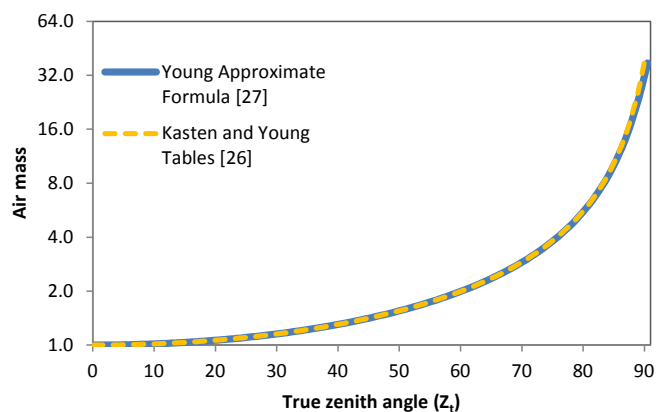
مربوط به روزهای آفتابی است.

۴-۲- تاثیر پوشش ابر بر میزان دریافت تابش استخر

برای بررسی تاثیر ابرها بر شدت تابش پیشنهادات مختلفی مطرح شده است [۱۹، ۲۹-۳۷]. استفاده از فاکتور پوشش ابر^۱ یکی از معمول‌ترین راه‌حل‌ها در این زمینه است. بر این اساس مقدار تابش با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۱]:

$$I_{normal} = I_{cs} \times CCF \quad (8)$$

مسئله اصلی در رابطه تعیین صحیح مقدار فاکتور پوشش ابر است. هرچند پیش‌بینی دقیق زمان ابری شدن آسمان و طول مدت و شدت آن ممکن نیست، ولی بدست آوردن آمار روزهای ابری و تاریخچه آن در یک محل مشخص، نیاز به تجهیزات اندازه‌گیری خاصی ندارد، بنابراین با داشتن متوسط ماهانه تعداد روزهای ابری می‌توان نسبت به محاسبه تاثیر آن اقدام نمود، زیرا که مقدار متوسط تابش اهمیت دارد. مقدار تابش در روزهای آفتابی برابر مقدار بدست آمده از رابطه است. برای محاسبه مقدار شدت تابش در روزهای ابری گزارشات مختلفی وجود دارد. به عنوان مثال نسبت شدت تابش در روزهای کاملاً ابری



شکل ۵. نتایج جرم هوا حاصل از رابطه (۶) و نتایج جداول بدست آمده به طریق اپتیکی

Fig. 5. Air mass results from Equation (6) and results of tables obtained optically

جدول ۱. میانگین ماهانه روزهای ابری، نیمه‌ابری و آفتابی برای شهر ارومیه [۵۰]

Table 1. Monthly average of cloudy, partly cloudy and sunny days for Urmia city [50]

روزهای آفتابی ^{***}	روزهای نیمه‌ابری ^{**}	روزهای کاملاً ابری ^{o1}	ماه‌های میلادی
۷٫۹	۱۲٫۵	۱۰٫۶	ژانویه
۶٫۸	۱۳٫۴	۸	فوریه
۹٫۹	۱۵٫۴	۵٫۷	مارس
۹٫۸	۱۶٫۷	۳٫۵	آوریل
۱۱	۱۷	۳	می
۱۹	۱۰٫۶	۰٫۴	ژون
۲۴	۶٫۹	۰٫۱	ژولای
۲۴	۶٫۷	۰٫۳	آگوست
۲۴٫۴	۵٫۳	۰٫۴	سپتامبر
۱۸	۹٫۹	۳٫۱	اکتبر
۱۴	۱۰٫۸	۵٫۳	نوامبر
۱۱٫۲	۱۲٫۴	۷٫۵	دسامبر

^o روزهای کاملاً ابری: مقدار ابر در آسمان بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد
^{**} روزهای نیمه ابری: مقدار ابر در آسمان بین ۲۰ تا ۸۰ درصد
^{***} روزهای آفتابی: مقدار ابر در آسمان از صفر تا ۲۰ درصد

شده‌اند. حداکثر اختلاف بین مقدار تخمین‌زده‌شده و اندازه‌گیری‌شده در ماه فوریه اتفاق افتاده و برابر ۳۹٫۹ وات بر متر مربع است. حداکثر خطای بین نتایج حاصل از تخمین فوق و اندازه‌گیری‌های تجربی مربوط به فصل‌های سرد است که شدت تابش در آنها کاهش می‌یابد. مقدار مطلق اختلاف در نتایج ممکن است برای ماه‌های مختلف از یک مرتبه باشد ولی خطای نسبی آنها یکسان نخواهد بود به عنوان مثال دو ماه گرم ژولای و سرد ژانویه در جدول ۲ نشان می‌دهد که مقدار مطلق اختلاف نتایج تجربی و مقدار تخمین‌زده‌شده تقریباً یکسان است در حالی که مقدار خطای نسبی برای ژانویه بیش از سه برابر ژولای است. علت افزایش خطا در ماه‌های سرد در تعریف خطای نسبی قرار

در مرحله بعد مقدار تابش رسیده بر سطح افقی استخر محاسبه می‌شود. برای محاسبه مقدار شدت تابش رسیده به سطح افقی استخر از رابطه زیر استفاده می‌شود [۵۱].

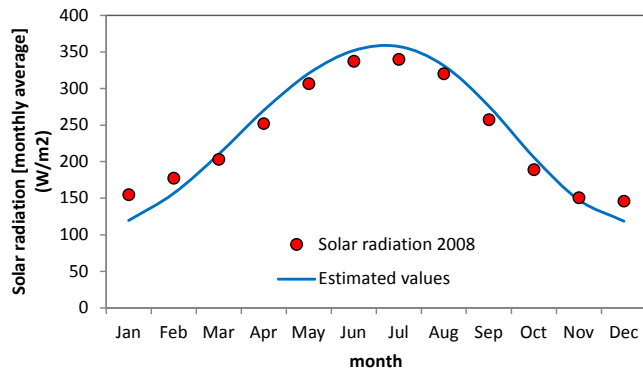
$$I_{sulf} = I_{normal} \times \cos z_t \quad (11)$$

مقادیر متوسط تابش ماهانه شهر ارومیه در مرجع [۲۲، ۱۸] گزارش شده است. شهر ارومیه در عرض جغرافیایی ۳۷٫۵۴۵ درجه شمالی واقع شده و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۱۳۳ متر است. مقدار متوسط ماهانه تابش بر اساس روش پیشنهاد شده در این تحقیق محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شده و با مقادیر متوسط اندازه‌گیری‌شده مقایسه شده است. همچنین اطلاعات به صورت نمودار در شکل ۷ نمایش داده

جدول ۲: متوسط تابش ماهانه ثبت‌شده برای شهر ارومیه در سال ۲۰۱۶ و مقدار تابش تخمین‌زده‌شده توسط تابع

Table 2: Average monthly radiation recorded for the city of Urmia city in 2016 and the amount of radiation estimated by the function

ماه‌های میلادی	متوسط تابش ماهانه ثبت‌شده (W/m ²)	تخمین متوسط تابش ماهانه (W/m ²)	درصد خطا
ژانویه	۱۰۵	۷۵٫۲	-۲۸٫۳۸
فوریه	۱۴۴	۱۰۵٫۲	-۲۶٫۹۴
مارس	۱۸۹	۱۵۵٫۶	-۱۷٫۶۷
آوریل	۲۲۳	۲۱۳٫۴	-۴٫۳۰
می	۲۶۷	۲۸۴٫۸	+۶٫۶۷
ژون	۳۱۸	۳۲۹٫۹	+۳٫۷۴
ژولای	۳۱۳	۳۳۹٫۹	+۸٫۵۹
آگوست	۲۸۴	۳۰۷٫۳	+۸٫۲۰
سپتامبر	۲۳۴	۲۴۰٫۲	+۲٫۶۵
اکتبر	۱۳۱	۱۶۲٫۸	+۲۴٫۲۷
نوامبر	۱۰۹	۱۳۰٫۷	+۱۹٫۹۱
دسامبر	۸۸	۷۵٫۶	-۱۴٫۰۹



شکل ۸. مقادیر تخمینی تابش متوسط ماهانه بدست آمده برای شهر بافق و مقادیر متوسط تابش ثبت شده در سال ۲۰۰۸

Fig. 8. Estimated values of average monthly radiation obtained for Bafgh city and average values of radiation recorded in 2008

$$\tau = \sum_{i=1}^4 A_i e^{\left(\frac{-C_i z}{\cos(z_r)}\right)} \quad (12)$$

در این رابطه \hat{O} مقدار درصد تابش رسیده به عمق z است. ضرایب بکاررفته در این تابع در جدول ۳ داده شده است [۲]. آب در برابر طول موج‌های بلندتر عملاً به صورت یک ماده تیره عمل می‌کند.

۴-۴ محاسبه شدت تابش در استخر

نور خورشید پس از رسیدن به سطح آب به دو جزء تقسیم می‌شود. یک دسته پرتوها از سطح آب منعکس شده و دسته دیگر به لایه‌های آب نفوذ می‌کنند. مقدار درصد نور منعکس شده تابعی از زاویه برخورد نور به سطح آب است و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸].

$$R_r = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_i - \theta_r)}{\sin^2(\theta_i + \theta_r)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_r)}{\tan^2(\theta_i + \theta_r)} \right] \quad (13)$$

در این رابطه θ_i زاویه برخورد^۴ به سطح آب و θ_r زاویه انعکاس^۵ هستند. زاویه انعکاس تابع نوع ماده و زاویه برخورد نور است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۵۲].

$$\sin \theta_r = \frac{\sin \theta_i}{n_r} \quad (14)$$

بر اساس این روابط شدت تابش درست در زیر سطح برابر است با:

$$I_{in} = I_{surf}(1 - R_r) \quad (15)$$

معمولاً به دلیل انحلال نمک و عدم شفافیت کامل آب به دلایل

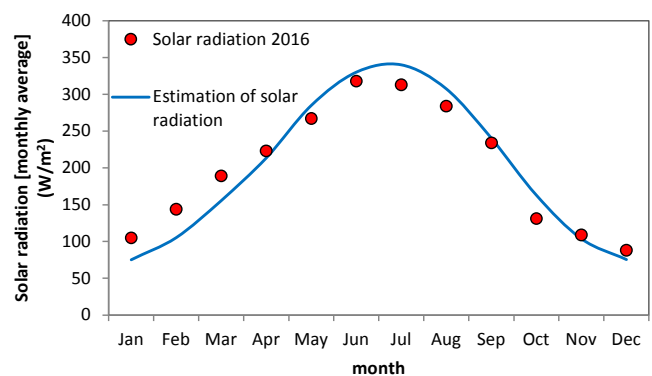
- 3 -Opaque medium
- 4 -Incident angle
- 5 -Refraction anglr

دارد. کاهش مقدار تابش متوسط در ماه‌های سرد با وجود اختلاف یکسان بین نتایج تجربی و تخمینی موجب می‌شود که درصد خطای نتایج افزایش یابد. روش دیگر بیان میزان خطا و اختلاف بین دو نمودار، استفاده از نرم اقلیدسی است. مقدار خطای کلی با استفاده از نرم اقلیدسی^۱ برابر ۸۱ وات بر متر مربع بدست می‌آید.

به عنوان نمونه‌ای دیگر، استخرهای خورشیدی مشابهی در استان یزد، شهر بافق ساخته و راه‌اندازی شد [۲۰، ۲۴] و میزان شدت تابش خورشیدی در گزارش‌های مربوط آورده شده است. با استفاده از روش پیشنهادشده و استفاده از آمار روزهای ابری و نیمه‌ابری شهرستان بافق نسبت به استخراج فاکتور پوشش ابر اقدام می‌شود. در نهایت شدت تابش تخمین‌زده‌شده و متوسط ماهانه دریافت تابش گزارش شده در مراجع در شکل ۸ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که تطابق نسبتاً خوبی بین نمودارها وجود داشته و مقدار حداکثر خطا برابر ۳۵/۲ وات بر متر مربع در ماه ژانویه بوده و نرم خطای اقلیدسی دو نمودار برابر ۶۵/۴ وات بر متر مربع است.

۴-۳- میزان جذب تابش خورشیدی در بدنه آب استخر

آب به صورت یک ماده نیمه شفاف^۲ در برابر تابش خورشید عمل می‌کند. طول موج‌های بلند نور خورشید عمدتاً در چند سانتی‌متر اول ورود به آب جذب می‌شوند و طول‌موج‌های کوتاه به عمق نفوذ می‌کنند. توابع مختلفی برای تخمین درصد شدت تابش به صورت تابعی از عمق مطرح شده‌اند [۲، ۴۱]. توابع ارائه‌شده معمولاً دارای دقت لازم برای استفاده در مباحث انرژی خورشیدی هستند. یکی از آنها تابع چهار ضابطه‌ای زیر است که جذب تابش را بر اساس طول موج‌های مختلف تخمین می‌زند [۲].



شکل ۷. مقادیر تخمینی تابش متوسط ماهانه بدست آمده برای شهر ارومیه و مقادیر متوسط تابش ثبت شده در سال ۲۰۱۶

Fig. 7. Estimated values of average monthly radiation obtained for the city of Urmia and average values of radiation recorded in 2016

- 1 -Euclidian norm
- 2 -Semi-opaque

برای آن محاسبه می‌شود.

همچنین رابطه محاسبه مساحت سایه برای استخرهای مکعبی نیز بدست آمده است [۱۵، ۱۷، ۱۸، ۵۱].

$$A_{shadow} = Ll \sin \alpha + Wl \cos \alpha - l^2 \sin \alpha \cos \alpha \quad (20)$$

در این رابطه l از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$l = z \tan \theta_r \quad (21)$$

مقدار z عمقی از استخر است که نسبت مساحت سایه به آفتاب برای آن محاسبه می‌شود. در شکل ۹ نمای شماتیک استخرهای استوانه‌ای و مکعبی و نحوه تشکیل سایه در آنها نشان داده شده است. با معلوم‌بودن درصد مساحت سایه در هر مقطع عمقی در استخر، مقدار شدت متوسط تابش گذرنده از مقطع مذکور می‌تواند از رابطه زیر بدست آید [۱۵]:

$$I = \frac{A_{sunny} + A_{shadow} \xi}{A} I_{sunny} \quad (22)$$

مناطق سایه در استخر چنانچه تجربه نشان می‌دهد کاملاً تاریک نیستند و پخش‌انور موجب می‌شود تا درصدی از تابش رسیده به مناطق آفتابی به مناطق سایه نیز برسد. بر اساس تحقیقات صورت‌گرفته مقدار ۳۰ درصد برای ξ مناسب و متعادل است [۱۵، ۱۷، ۱۸، ۵۱]. مقدار بدست‌آمده از رابطه فوق در رابطه به کار می‌رود و نرخ تغییرات آن با عمق مقدار جذب تابش در لایه‌های آب را نشان می‌دهد.

۴-۶- مدل سازی روز و شب و تاثیر آن بر استخر

با به پایان رسیدن روز موضوع تابش خورشیدی و جذب آن در استخر پایان می‌یابد ولی اتلافات حرارتی از استخر به همان روشها

متعدد و همچنین انعکاس نور از دیوارها و کف استخر و همچنین پراکندگی^۱ نور در آب، برای شدت تابش در استخر کاهش در نظر گرفته می‌شود که آن را با θ نشان می‌دهند مقدار آن به طور معمول ۰٫۸۵ لحاظ می‌شود [۸]. با لحاظ نمودن مقدار جذب تابش در محیط سیال، نهایتاً مقدار شدت تابش در نواحی آفتابی داخل استخر به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$I_{sunny} = I_{surf} (1 - R_r) \tau \theta \quad (16)$$

۴-۵- تاثیر سایه‌ها بر عملکرد حرارتی استخر

در صورتی که ابعاد استخر نسبتاً کوچک باشد مقدار سایه‌ها نسبت به مساحت تحت تابش مستقیم آفتاب در استخر درصدی را به خود اختصاص می‌دهد که تاثیر آن در عملکرد حرارتی استخر قابل چشم‌پوشی نیست و باید تاثیر آن در مدل عددی لحاظ شود. فعالیت‌های گوناگون و تا حدی مشابه در این زمینه صورت گرفته است، نگاه کنید به [۱۳-۱۸]. به طور خلاصه مساحت سایه در استخرهای استوانه‌ای از روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۵، ۱۷، ۱۸].

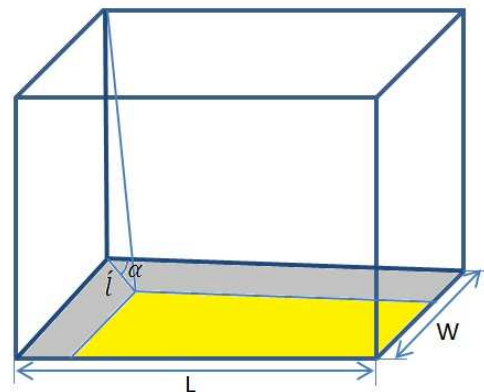
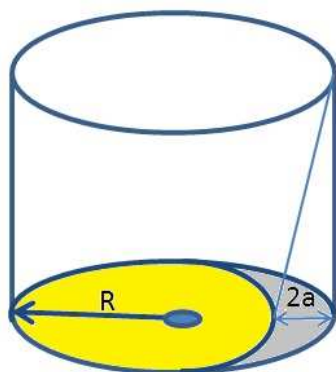
$$S_{shadow} = \pi R^2 - S_{sunny} \quad (17)$$

$$S_{sunny} = 2 \left(R^2 \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{R^2 - a^2}}{a} \right) - a \sqrt{R^2 - a^2} \right) \quad (18)$$

در این رابطه a نصف حداکثر طول سایه در استخر استوانه شکل است. مقدار آن از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$a = \frac{z}{2} \tan \theta_r \quad (19)$$

مقدار z عمقی از استخر است که نسبت مساحت سایه به آفتاب



شکل ۹. شکل شماتیک یک استخر استوانه‌ای و یک استخر مکعبی و نحوه تشکیل سایه در هر یک [۱۷]

Fig. 9. Schematic of a cylindrical pool and a cubic pool and how to form a shadow in each [17]

همچنین طول مدت روز را می‌توان با رابطه زیر بدست آورد [۵۳]:

$$h_{daylight} = \frac{24}{\pi} \cos^{-1}(-\tan \psi \tan \delta) \quad (27)$$

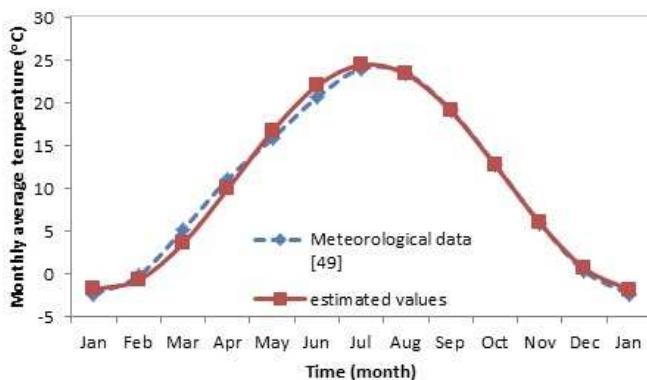
مجموع دو رابطه فوق ساعت غروب خورشید را معلوم می‌کند. به ازای هر شبانه روز ابتدا محاسبه می‌شود که گام زمانی در کدام محدوده قرار دارد و در صورت روز بودن اقدام به محاسبه موقعیت زاویه‌ای خورشید در آسمان می‌شود. جرم هوا محاسبه شده و شدت تابش بر سطح استخر و سپس در درون آن با لحاظ اثر سایه‌ها بدست می‌آید. گام زمانی در این پژوهش پنج دقیقه در نظر گرفته می‌شود.

۴-۷- مدل سازی دمای محیط

معمولاً برای شبیه‌سازی دمای محیط از متوسط ماهانه دمای محیط در محل استفاده می‌کنند. متوسط دمای ماهانه تاثیرات فصلی را پوشش می‌دهد، ولی در مورد تغییرات روزانه و همچنین نرخ تغییرات متوسط دما در بازه یک ماه اطلاعاتی ارائه نمی‌دهد. در تحقیق حاضر، به جهت هر چه نزدیک‌تر شدن مدل سازی عددی استخر خورشیدی به شرایط واقعی و حذف فرضیات کلی، مدل ریاضی برای تغییرات ماهانه، روزانه و ساعتی دمای محیط استفاده می‌شود. واضح است که دمای محیط تابع عوامل پیچیده جوی و محیطی است و استفاده از تابعی که دقیقاً رفتار طبیعت را پیش‌بینی کند ممکن نیست ولی با استفاده از داده‌های آماری دما در سال‌های گذشته و متوسط تغییرات دما در یک شبانه روز می‌توان تابعی به شکل زیر برای تخمین دمای محیط بکار برد [۵۵].

$$T_{amb} = T_1 + T_2 \sin \left[\frac{2\pi}{365}(n + n_0) \right] + T_3 \sin \left[\frac{2\pi}{24}(h + h_0) \right] \quad (28)$$

در این رابطه T_1 متوسط سالانه دمای محل، T_2 دامنه تغییرات



شکل ۱۰. تغییرات متوسط دمای ماهانه شهر ارومیه بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج تابع تخمین دمای محیط

Fig. 10. Average monthly temperature changes in Urmia city based on measured data and results of ambient temperature estimation function

ادامه دارد. مقدار تلفات حاصل از رسانش از کف و دیوارها و بدنه آب استخر به دلیل افت دما در شب افزایش یافته و ذخیره حرارت صورت گرفته در طول روز تا حدی از دست می‌رود. عایق‌پوش کردن مناسب استخر می‌تواند مقدار این تلفات را به صورت جدی کاهش دهد. اتلافات حرارتی حاصل از تابش گرمایی از استخر به دلیل اختلاف دمای محدود استخر با محیط معمولاً در نظر گرفته نمی‌شوند. به علاوه طول موج تابش حرارتی از لایه زیرین و میانی به دلیل دمای نسبتاً پایین استخر در طول موج‌های بلند اتفاق می‌افتد که آب نسبت به جذب این امواج به صورت تیره عمل می‌کند و تابش‌ها عملاً امکان خروج از استخر را ندارند.

برای مدل‌سازی عددی استخر به صورت گذرا برای دوره‌های فصلی و سالانه لازم است تا ساعات طلوع و غروب خورشید و تابش و عدم تابش خورشیدی و همچنین مختصات خورشید در آسمان در هر لحظه با روابط ریاضی بیان شوند. حرکات اجرام آسمانی بویژه خورشید به صورت قانونمند بر اساس موقعیت مورد نظر روی کره زمین و زمان محلی بیان شده‌اند. بر این اساس زاویه فراز خورشید با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۵۲، ۵۳].

$$\cos z_t = \sin \psi \sin \delta + \cos \psi \cos \delta \cos \omega \quad (23)$$

در این رابطه ψ عرض جغرافیایی محل و δ زاویه میل خورشید است. ω نیز زاویه ساعتی نام دارد و بر اساس ساعت محلی و از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\omega = \frac{2\pi}{24}(h - 12) \quad (24)$$

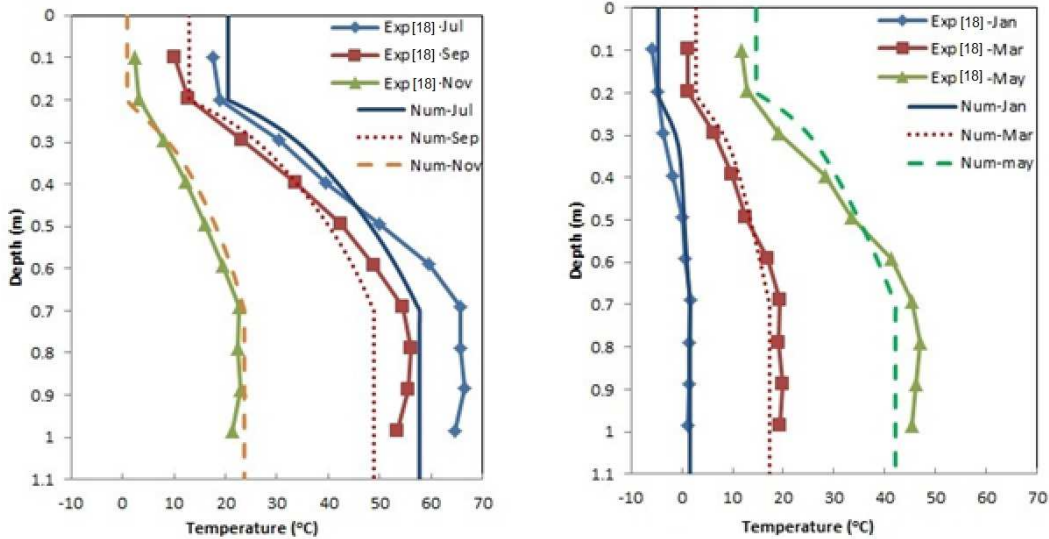
مقدار زاویه ساعتی برای ساعت دوازده محلی صفر و قبل از آن منفی و بعد از آن مثبت است. زاویه میل خورشید بر اساس کج بودن محور چرخش زمین نسبت به مدار آن حول خورشید بوجود می‌آید و مقدار آن از رابطه زیر قابل محاسبه است [۵۴]:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{2\pi}{365}(284 + n) \right] \quad (25)$$

در این رابطه n شماره روز در سال میلادی است و حاصل عبارت بر حسب درجه است. در مدل عددی بخش روز از ساعت طلوع خورشید آغاز و تا ساعت غروب ادامه می‌یابد. پدیده‌های فلق و شفق در مدل عددی صرف نظر شده است. ساعت طلوع با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید [۵۳].

$$h_{sunrise} = 6 + \frac{12}{\pi} \sin^{-1}(-\tan \psi \tan \delta) \quad (26)$$

- 1 -Declination angle
- 2 -Hour angle



شکل ۱۱. مقایسه نتایج متوسط ماهیانه دما حاصل از روش عددی و آزمون تجربی [۱۸] در استخر خورشیدی استوانه شکل برای ماه‌های مختلف
Fig. 11: Comparison of monthly average temperature results from numerical method and experimental data [18] in cylindrical solar pool for different months

یک شبانه روز دمای محیط حدوداً ۸ درجه نوسان دارد. با قراردادن مقدار n_0 برابر ۲۶۴ و h_0 برابر ۳ تابع دمای محیط حداکثر تطابق را بر داده‌های اندازه‌گیری شده پیدا می‌کند. بدین منظور از روش حداقل مربعات استفاده شده است. حداکثر درصد خطا نسبت به بیشینه متوسط دمای ماهانه برابر ۶٫۷۵ درصد برای ماه مارس بوده است.

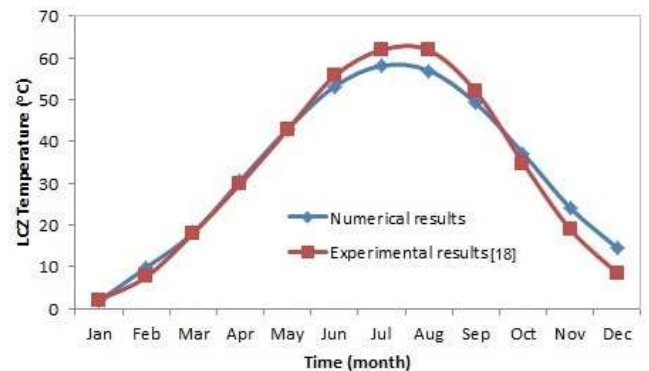
۵- تابعیت خواص سیال بر حسب دما و غلظت

فرض دیگری که در شبیه‌سازی استخرهای خورشیدی بویژه تحلیل‌های یک بعدی انجام می‌شود فرض ثابت بودن خواص سیال است. مشخصاً در تحلیل‌های دو یا سه بعدی به جهت لزوم شبیه‌سازی جریان‌ات همرفتی ناشی از توزیع دما و غلظت، نمی‌توان خواصی مانند چگالی را ثابت فرض نمود. ولی در تحلیل‌های عمدتاً یک بعدی جهت سادگی خواص ثابت فرض می‌شوند. خواصی مانند چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه مستقیماً بر روی ظرفیت گرمایی کل استخر موثر هستند و لحاظ نمودن تغییرات آنها با دما و غلظت نمک می‌تواند نتایج مدل‌سازی عددی را با درصدی خطا مواجه نماید. روابط زیر مشخصاً تابعیت سه متغیر ضریب هدایت حرارتی، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه را برای محلول آب و نمک کلرید سدیم نشان می‌دهد [۵۶، ۵۷]. در این روابط دما بر حسب کلون و غلظت بر حسب Kg/m^3 می‌باشد و نتایج حاصل نیز بر حسب واحدهای SI بدست می‌آید.

$$k = 0.5553 - 0.0000813C + 0.0008(T - 20) \quad (29)$$

$$\rho = 998 + 0.65C - 0.4(T - 20) \quad (30)$$

$$c_p = 4180 - 4.396c + 0.0048c^2 \quad (31)$$



شکل ۱۲. تغییرات متوسط دمای ماهانه لایه جابجایی زیرین استخر با مقطع دایره حاصل از تحلیل عددی و بدست آمده از آزمون تجربی [۱۸]

Fig. 12. Average monthly temperature changes of the bottom convection layer of the pool with a circular cross section obtained from numerical analysis and experimental data [18]

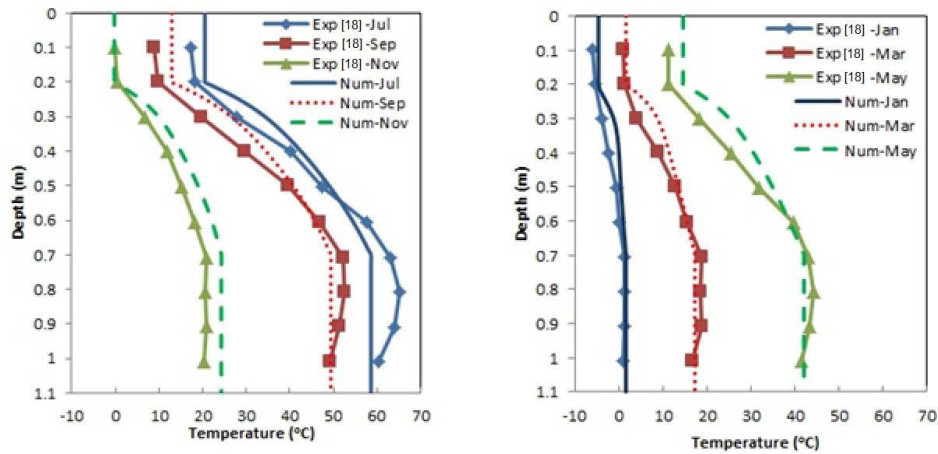
متوسط دمای ماهانه و T_3 دامنه تغییرات دما در یک شبانه روز به طور متوسط است. همچنین n شماره روز در سال میلادی و h ساعت محلی است. مقادیر n_0 و h_0 طوری تعیین می‌شوند که بهترین تطابق بین تابع و داده‌های ثبت شده دمایی بوجود آید.

برای نمونه دمای متوسط سالانه شهر ارومیه بر اساس اطلاعات ثبت شده از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۷ میلادی، ۱۱٫۳ درجه سانتی گراد است [۵۰]. متوسط دمای ماهانه ثبت شده و تخمین زده شده توسط رابطه در شکل ۱۰ آورده شده است. دامنه تغییرات متوسط دمای ماهانه برابر ۱۳٫۲ درجه سانتی گراد است. همچنین به طور متوسط در

جدول ۴. دمای متوسط ماهانه لایه جابجایی زیرین برای استخر استوانه شکل

Table 4. Average monthly temperature of the bottom convection layer for the cylindrical pool

ماه‌های میلادی	اندازه‌گیری تجربی [۱۸] (°C)	نتایج تحلیل عددی (°C)	درصد خطای نسبی
ژانویه	۲٫۰	۱٫۸	-۱۰
فوریه	۷٫۶	۹٫۸	+۲۸/۹۴
مارس	۱۸٫۱	۱۸٫۱	۰
آوریل	۲۹٫۹	۳۰٫۷	+۲/۶۷
می	۴۲٫۸	۴۳٫۰	+۰/۴۶
ژون	۵۵٫۷	۵۳٫۲	-۴/۴۹
ژوئای	۶۱٫۹	۵۷٫۸	-۶/۶۲
آگوست	۶۱٫۸	۵۷٫۰	-۷/۷۷
سپتامبر	۵۱٫۹	۴۹٫۲	-۵/۲۰
اکتبر	۳۴٫۸	۳۷٫۱	+۶/۶۰
نوامبر	۱۹٫۰	۲۴٫۱	+۲۶/۸۴
دسامبر	۸٫۴	۱۴٫۴	+۷۱/۴۳



شکل ۱۳. مقایسه نتایج متوسط ماهیانه دما حاصل از روش عددی و آزمون تجربی [۱۸] در استخر خورشیدی با مقطع مربع برای ماه‌های مختلف

Fig. 13. Comparison of average monthly temperature results from numerical method and experimental data [18] in solar pool with square cross section for different months

نتایج مشابه برای جهت‌گیری جغرافیایی استخر در مطالعه‌های دیگر نیز گزارش شده است [۱۷]. این بحث در مورد استخر استوانه شکل به دلیل تقارن موضوعیت ندارد. در نهایت پروفیل دمایی در لایه‌های مختلف استخر برای بازه‌های زمانی مشخص بدست آمدند. پروفیل دمایی حاصل از تحلیل عددی در زمان‌های مشابه برای استخر با مقطع دایره در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج بدست‌آمده از اندازه‌گیری‌های تجربی نیز در کنار نتایج عددی نشان داده شده است که نشان می‌دهد تطابق نتایج عددی با تجربی اگرچه دارای شباهت است ولی در برخی از ماه‌ها مانند مارس و نوامبر دارای خطایی کمتر و در برخی ماه‌ها خطای بیشتری در دمای لایه زیرین دارند. عمده تفاوت بین نتایج در دمای لایه زیرین است. دمای متوسط ماهانه لایه جابجایی زیرین نیز در نتایج گزارش‌شده تجربی وجود دارد. مقایسه بین نتایج عددی و تجربی دمای متوسط لایه زیرین در شکل

۶- بحث و بررسی نتایج

با اعمال شرایط مطرح‌شده بندهای پیشین در مدل‌سازی عددی استخر خورشیدی که منطبق بر شرایط آزمون تجربی است، نتایج مختلفی از تحلیل عددی قابل استحصال است ولی پیش از آن لازم است تا نتایج تحلیل عددی با استفاده از نتایج آزمون تجربی صحت‌سنجی شوند و مقدار تطابق نتایج آن با واقعیت مشخص گردند. از این رو نتایج بر طبق نحوه گزارش آنها در آزمون تجربی مرجع [۱۸]، و در بازه‌های زمانی مشابه استخراج می‌شوند.

استخر ساخته‌شده در دانشگاه ارومیه از ابتدای سال ۲۰۱۶ راه‌اندازی شد و نتایج آن برای یک بازه یک‌ساله گزارش شدند [۱۸]. در تحقیق مذکور، جهت‌گیری استخر مکعب شکل نسبت به جهات جغرافیایی بررسی شد و در نهایت برای استحصال بهترین کارایی حرارتی، امتداد شمالی جنوبی برای قرارگیری استخر انتخاب شد.

جدول ۵. دمای متوسط ماهانه لایه جابجایی زیرین برای استخر مکعب‌شکل

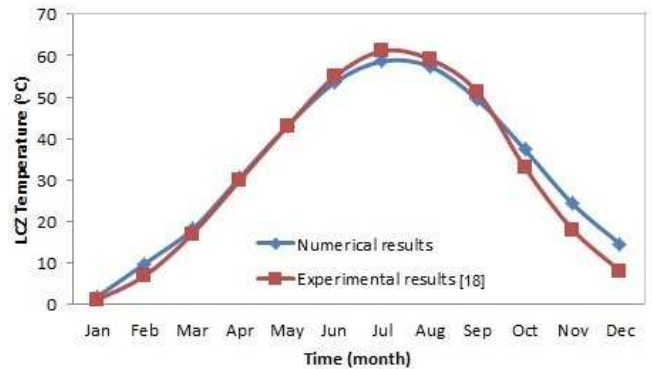
Table 5. Average monthly temperature of the bottom convection layer for the cube-shaped pool

ماه‌های میلادی	اندازه‌گیری تجربی [۱۸] (°C)	نتایج تحلیل عددی (°C)	درصد خطای نسبی
ژانویه	۱٫۲	۱٫۹	+۵۸/۳۳
فوریه	۷٫۰	۹٫۹	+۴۱/۴۳
مارس	۱۷٫۰	۱۸٫۱	+۶/۴۷
آوریل	۳۰٫۰	۳۰٫۶	+۲/۰۰
می	۴۳٫۰	۴۳٫۱	+۰/۲۳
ژون	۵۵٫۰	۵۳٫۵	-۲/۷۲
ژولای	۶۱٫۱	۵۸٫۴	-۴/۴۲
آگوست	۵۹٫۲	۵۷٫۴	-۳/۰۴
سپتامبر	۵۱٫۲	۴۹٫۴	-۳/۵۱
اکتبر	۳۳٫۰	۳۷٫۳	+۱۳/۰۳
نوامبر	۱۸٫۱	۲۴٫۳	+۳۳/۷۰
دسامبر	۸٫۱	۱۴٫۶	+۸۰/۲۴

عددی با نتایج تجربی برای فوریه کمتر از نصف مقدار بدست‌آمده برای آگوست بوده و این در حالی است که مطلق خطای نسبی برای فوریه تقریباً چهار برابر آگوست است. این مطلب نشان می‌دهد تعیین دقت نتایج عددی منحصراً با استفاده از خطای نسبی صحیح نیست بنابراین جهت مقایسه دو نمودار موجود در شکل ۱۲، نرم اقلیدسی^۱ یا نرم درجه دوم خطای دو نمودار محاسبه می‌شود که مقدار آن برابر ۱۱٫۲۲ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس آنچه از نمودار پروفیل دمایی (شکل ۱۱) در ماه ژولای دیده می‌شود، دمای متوسط لایه زیرین که به صورت تجربی اندازه‌گیری شده حدود ۶۶ درجه است، ولی مقدار تجربی گزارش‌شده این دما در شکل ۱۲ برابر ۶۲ درجه اعلام شده و همین تفاوت دما باعث ناسازگاری نتایج عددی برای پروفیل دمایی در ماه ژولای با نتایج تجربی شده است.

مشابه نمودارهای فوق برای استخر خورشیدی با مقطع مربع نیز در شکل ۱۳، جدول ۵ و شکل ۱۴ ارائه شده است. پروفیل‌های دمایی در راستای عمق استخر حاصل از تحلیل عددی تطابق نسبتاً قابل قبولی با نتایج گزارش‌شده تجربی نشان می‌دهد. همچنین حداکثر تفاوت دمای بدست‌آمده از حل عددی و نتایج تجربی برای لایه جابجایی زیرین برابر ۶٫۵ درجه سانتی‌گراد و در ماه دسامبر بدست آمده است.

نرم اقلیدسی^۱ خطای دو نمودار موجود در نمودار شکل ۱۴ برابر با ۱۱/۱۶ درجه سانتی‌گراد بدست آمده که تقریباً با خطای بدست‌آمده جهت استخر با مقطع دایره یکسان است. از نتایج بدست‌آمده تجربی نتیجه می‌شود که حداکثر دمای قابل استحصال در لایه جابجایی زیرین برای استخر با مقطع دایره اندکی بالاتر از استخر با مقطع مربع بوده است [۱۷، ۱۸]. هر دو روش نشان می‌دهند که حداکثر دما در



شکل ۱۴. تغییرات متوسط دمای ماهانه لایه جابجایی زیرین استخر با مقطع مربع حاصل از تحلیل عددی و بدست‌آمده از آزمون تجربی [۱۸]

Fig. 14. Average monthly temperature changes of the bottom convection layer of the pool with a square cross section obtained from numerical analysis and experimental data [18]

۱۲ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۱۲ دیده می‌شود تا ماه ژون نمودارها تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند. همچنین نتایج تجربی و عددی متوسط دمای ماهانه لایه جابجایی زیرین برای استخر استوانه در جدول ۴ ارائه شده است. حداکثر اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در مورد دمای لایه زیرین در ماه دسامبر اتفاق افتاده و برابر ۶٫۱ درجه سانتی‌گراد است. خطاهای نسبی نیز در این جدول نشان داده شده است. بیشترین خطاهای نسبی مربوط به ماه‌های سرد زمستان است. افزایش خطای نسبی در ماه‌های سرد عمدتاً به دلیل شیوه تعریف این نوع خطا ایجاد می‌شود. به عنوان نمونه ماه نسبتاً گرم آگوست با ماه نسبتاً سرد فوریه مقایسه می‌شود. جدول ۴ نشان می‌دهد که اختلاف دمای بین نتیجه بدست‌آمده از تحلیل

1 -Euclidian norm

۸- اختصارات

A	مساحت سطح مقطع استخر
a	نیمه طول سایه در استخر با مقطع دایره
A_i	ضریب تابع استهلاک تابش
$A_{LCZ-walls}$	مساحت دیوارهای لایه زیرین
CCF	غلظت نمک در آب
C_i	فاکتور پوشش ابر
C_p	ضریب توان در تابع استهلاک تابش
CCF_{est}	ظرفیت گرمایی
h	فاکتور پوشش ابر تخمینی
$h_{sunrise}$	ساعت محلی طلوع خورشید
I	ساعت محلی طلوع خورشید
I_0	شدت تابش در عمق استخر
I_{cs}	ثابت شدت تابش خورشیدی
I_{in}	شدت تابش در روز آفتابی
I_{normal}	شدت تابش در زیر سطح آب
k	شدت تابش رسیده بر سطح عمود بر تابش
$k_{instl.}$	شدت تابش رسیده به سطح
L	ضریب انتقال حرارت رسانش محلول آب و نمک
l	ضریب انتقال حرارت رسانش عایق حرارتی
l_{LCZ}	طول استخر با مقطع مستطیل
m_{no}	طول سایه در استخر با مقطع مستطیل
n_{oc}	ضخامت لایه جابجایی زیرین
n_{pc}	شماره ماه در سال میلادی
n_r	شماره روز در سال میلادی
Q_{rad}	تعداد روز کاملاً ابری در هر ماه
Q_{side}	ضریب شکست نور در آب
Q_{bottom}	انرژی تابشی رسیده به لایه زیرین
$Q_{LCZ to NCZ}$	انرژی حرارتی تلف شده از دیوارها
Q_{ext}	انرژی حرارتی تلف شده از کف
R	انرژی حرارتی منتقل شده از لایه زیرین به لایه میانی
R_r	انرژی برداشت شده از استخر
S_{shadow}	شعاع استخر با مقطع دایره
S_{sunny}	کسر تابش منعکس شده از سطح آب
T	سطح سایه در استخر برای یک عمق مشخص
t	سطح آفتابی در استخر برای یک عمق مشخص
	دما
	زمان

لایه زیرین در ماه ژولای و حداقل آن در ماه دسامبر اتفاق می افتد. همچنین عدم قطعیت اندازه گیری دما در آزمون های تجربی ۰٫۲۸ درجه سانتی گراد گزارش شده است [۱۷].

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

با فرض غلبه تغییرات دمایی در جهت عمق نسبت به دیگر جهات، با استفاده یک کد یک بعدی، نسبت به شبیه سازی عملکرد حرارتی استخر خورشیدی اقدام شد. دمای لایه جابجایی سطحی و لایه جابجایی زیرین به صورت یکنواخت در نظر گرفته شد و با تقسیم لایه غیرهمرفتی میانی به زیرلایه های متعدد معادله بقای انرژی برای زیرلایه ها و لایه جابجایی زیرین استخراج شده و در یک دستگاه معادلات حل شدند و با تکرار حل در گام های زمانی پیشرونده تحلیل گذرا انجام شد. عوامل محیطی مانند دمای محیط، شدت تابش، مساحت سایه دیوارها، و خواص سیال، بر خلاف فرض های معمول بکاررفته در شبیه سازی استخر، به صورت متغیر در نظر گرفته شدند. شدت تابش معمولاً به صورت متوسط ماهانه که توسط ایستگاه های هواشناسی و تابش سنجی ارائه می شوند مورد استفاده قرار می گیرند. با استفاده از روش بکاررفته در این مقاله با استفاده از کاربرد مفهوم جرم هوا و محاسبه مقدار تقریبی تابش آفتابی و تصحیح آن با استفاده از فاکتور پوشش ابر، مقدار شدت تابش در هر لحظه از روز و در هر روز از سال محاسبه و در مدل عددی بکار رفت. رابطه ای برای محاسبه فاکتور پوشش ابر ارائه شد که مقدار تابش را با دقت قابل قبولی ارائه می نماید. تابش تخمین زده شده با دو نمونه شدت تابش اندازه گیری شده تجربی گزارش شده در مراجع مقایسه شد. در نهایت نتایج مدل سازی عددی برای استخرهای خورشیدی نمونه استخراج شد و با مقادیر گزارش شده تجربی مقایسه شد که تطابق قابل قبولی بین آنها دیده می شود. مقدار حداکثر اختلاف بین نتایج تجربی و نتایج عددی ۱۱/۲۲ درجه سانتی گراد برای استخر با مقطع دایره و ۱۱/۱۶ درجه برای استخر با مقطع مربع بوده است. مقدار متوسط دمای لایه زیرین این دو استخر حدود ۶۶ درجه سانتی گراد گزارش شده است که با نتایج تجربی تطابق خوبی دارد.

98-107.

- [14] I. Bozkurt, M. Karakilcik, The effect of sunny area ratios on the thermal performance of solar ponds, *Energy Conversion and Management*, 91 (2015) 323-332.
- [15] M.R. Jaefarzadeh, Thermal behavior of a small salinity-gradient solar pond with wall shading effect, *Solar Energy*, 77(3) (2004) 281-290.
- [16] M. Aramesh, A. Kasaeian, F. Pourfayaz, D. Wen, Energy analysis and shadow modeling of a rectangular type salt gradient solar pond, *Solar Energy*, 146 (2017) 161-171.
- [17] P.P.P.T.A. SOLAR, S. ONE-DIMENSIONAL, Dehghan A.A., Amini J., in: Fourth Int. Conf. on Energy Research & Development, Kuwait, 2008.
- [18] M. Khalilian, Experimental and numerical investigations of the thermal behavior of small solar ponds with wall shading effect, *Solar Energy*, 159 (2018) 55-65.
- [19] R. Brinsfield, M. Yaramanoglu, F. Wheaton, Ground level solar radiation prediction model including cloud cover effects, *Solar energy*, 33(6) (1984) 493-499.
- [20] A.A. Dehghan, A. Movahedi, M. Mazidi, Experimental investigation of energy and exergy performance of square and circular solar ponds, *Solar energy*, 97 (2013) 273-284.
- [21] I. Bozkurt, M. Karakilcik, Exergy analysis of a solar pond integrated with solar collector, *Solar Energy*, 112 (2015) 282-289.
- [22] M. Khalilian, Exergetic performance analysis of a salinity gradient solar pond, *Solar Energy*, 157 (2017) 895-904.
- [23] K. Ranjan, S. Kaushik, Exergy analysis of the active solar distillation systems integrated with solar ponds, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(5) (2014) 791-805.
- [24] M. Mazidi, M.H. Shojaeefard, M.S. Mazidi, H. Shojaeefard, Two-dimensional modeling of a salt-gradient solar pond with wall shading effect and thermo-physical properties dependent on temperature and concentration, *Journal of Thermal Science*, 20(4) (2011) 362-370.
- [25] A.A. Sabziparvar, H. Shetaee, Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran, *Energy*, 32(5) (2007) 649-655.
- [26] J. Almorox, C. Hontoria, Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain, *Energy Conversion and Management*, 45(9-10) (2004) 1529-1535.
- [27] F. Kasten, A.T. Young, Revised optical air mass tables and approximation formula, *Applied optics*, 28(22) (1989) 4735-4738.
- [28] A.T. Young, Air mass and refraction, *Applied optics*, 33(6) (1994) 1108-1110.
- [29] T. Muneer, M. Gul, Evaluation of sunshine and cloud cover based models for generating solar radiation data, *Energy Conversion and Management*, 41(5) (2000) 461-482.
- [30] S. Owczarek, Vector model for calculation of solar

T_{amb}	دمای محیط
T_{LCZ}	دمای لایه جابجایی زیرین
W	عرض استخر با مقطع مستطیل
z	عمق
z_t	زاویه فراز خورشید
α	زاویه امتداد سایه با دیوار در استخر مستطیلی
δ	زاویه میل خورشید
ρ	چگالی محلول آب و نمک
θ_i	زاویه برخورد تابش به سطح آب
θ_r	زاویه شکست تابش در آب
θ	کسر تابش رسیده به عمق
ψ	عرض جغرافیایی محل استخر
τ	درصد تابش عبوری از عمق مشخص
ω	زاویه ساعت
ξ	درصد تابش رسیده به ناحیه سایه در استخر

۹- مراجع

- [1] K. Sukhatme, S.P. Sukhatme, *Solar energy: principles of thermal collection and storage*, Tata McGraw-Hill Education, 1996.
- [2] A. Rabl, C.E. Nielsen, *Solar ponds for space heating*, *Solar Energy*, 17(1) (1975) 1-12.
- [3] J. Andrews, A. Akbarzadeh, Enhancing the thermal efficiency of solar ponds by extracting heat from the gradient layer, *Solar Energy*, 78(6) (2005) 704-716.
- [4] H. Tabor, *Solar ponds*, *Solar Energy*, 27(3) (1981) 181-194.
- [5] H. Tabor, *Solar ponds as heat source for low-temperature multi-effect distillation plants*, *Desalination*, 17(3) (1975) 289-302.
- [6] H. Tabor, R. Matz, A status report on a solar pond project, *Solar Energy*, 9(4) (1965) 177-182.
- [7] A. Akbarzadeh, G. Ahmadi, Computer simulation of the performance of a solar pond in the southern part of Iran, *Solar Energy*, 24(2) (1980) 143-151.
- [8] Y. Wang, A. Akbarzadeh, A parametric study on solar ponds, *Solar Energy*, 30(6) (1983) 555-562.
- [9] F. Zangrando, On the hydrodynamics of salt-gradient solar ponds, *Solar Energy*, 46(6) (1991) 323-341.
- [10] F. Zangrando, A simple method to establish salt gradient solar ponds, *Solar Energy*, 25 (1980) 467-470.
- [11] C. Angeli, E. Leonardi, A one-dimensional numerical study of the salt diffusion in a salinity-gradient solar pond, *International journal of heat and mass transfer*, 47(1) (2004) 1-10.
- [12] J.R. Hull, Computer simulation of solar pond thermal behavior, *Solar Energy*, 25(1) (1980) 33-40.
- [13] M. Karakilcik, I. Dincer, I. Bozkurt, A. Atiz, Performance assessment of a solar pond with and without shading effect, *Energy conversion and management*, 65 (2013)

- [43] E. Schoenberg, Theoretische Photometrie, in: Grundlagen der Astrophysik, Springer, 1929, pp. 1-280.
- [44] E. Laue, The measurement of solar spectral irradiance at different terrestrial elevations, Solar Energy, 13(1) (1970) 43-57.
- [45] K.Y. Kondretyev, Radiation in the Atmospheres, Using results of Berland, Academic Press, New York, 1969.
- [46] M.A. Atwater, J.T. Ball, A surface solar radiation model for cloudy atmospheres, Monthly weather review, 109(4) (1981) 878-888.
- [47] F. Kasten, G. Czeplak, Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud, Solar energy, 24(2) (1980) 177-189.
- [48] M. Atwater, J. Ball, Effects of clouds on insolation models, Solar Energy, 27(1) (1981) 37-44.
- [49] F. Quinlan, SOLMET Volume 2: Hourly Solar Radiation—Surface Meteorological Observations, National Oceanic and Atmospheric Administration, Asheville, NC, (1979).
- [50] IRIMO, I.R. Iran, Meteorological Organization, in: <https://www.irimo.ir/eng/index.php>, 2018.
- [51] J. Amini, A.A. Dehghan, The Influence of Shape and Orientation on Thermal Performance of a Salt Gradient Solar Pond, in: 16rd Annual international conference of mechanical engineering (ISME2008), Kerman, Iran., 2008. (in persian)
- [52] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar engineering of thermal processes, John Willey & Sons, New York, (1980).
- [53] J.S. Hsieh, Solar energy engineering, (1986).
- [54] P. Cooper, The absorption of radiation in solar stills, Solar energy, 12(3) (1969) 333-346.
- [55] R. Kayali, S. Bozdemir, K. Kiymac, A rectangular solar pond model incorporating empirical functions for air and soil temperatures, Solar Energy, 63(6) (1998) 345-353.
- [56] D.W. Kaufmann, Sodium chloride: the production and properties of salt and brine, (1960).
- [57] J.H. Perry, Chemical engineers' handbook, in, ACS Publications, 1950.
- radiation intensity and sums incident on tilted surfaces. Identification for the three sky condition in Warsaw, Renewable Energy, 11(1) (1997) 77-96.
- [31] K. Kimura, D.G. Stephenson, Solar radiation on cloudy days, ASHRAE J., 75 (1969).
- [32] D. Cano, J.-M. Monget, M. Albuissou, H. Guillard, N. Regas, L. Wald, A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellites data, Solar energy, 37(1) (1986) 31-39.
- [33] S. Rangarajan, M. Swaminathan, A. Mani, Computation of solar radiation from observations of cloud cover, Solar Energy, 32(4) (1984) 553-556.
- [34] M. Mohandes, A. Balghonaim, M. Kassas, S. Rehman, T. Halawani, Use of radial basis functions for estimating monthly mean daily solar radiation, Solar Energy, 68(2) (2000) 161-168.
- [35] J. Sabbagh, A. Sayigh, E. El-Salam, Estimation of the total solar radiation from meteorological data, Sol. Energy;(United States), 19(3) (1977).
- [36] J.E. Hay, Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces, Solar energy, 23(4) (1979) 301-307.
- [37] H. Ögelman, A. Ecevit, E. Tasdemiroğlu, A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data, Solar Energy, 33(6) (1984) 619-625.
- [38] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar energy thermal processes, University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, Madison, WI, 1974.
- [39] R. Burlon, S. Bivona, C. Leone, Instantaneous hourly and daily radiation on tilted surfaces, Solar Energy, 47(2) (1991) 83-89.
- [40] W.C. Dickinson, P.N. Cheremisionoff, Solar energy technology, Handbook Part A, 498 (1980).
- [41] H. Bryant, I. Colbeck, Solar pond for London.[For space heating of houses], Sol. Energy;(United States), 19(3) (1977).
- [42] P. Würfel, U. Würfel, Physics of solar cells: from basic principles to advanced concepts, John Wiley & Sons, 2009.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

J. Amini Foroushani, A. A. Abbasian Arani, M. Gandomkar. Numerical simulation of salt gradient solar pond by employing the solar radiation estimating function considering wall-shading effects, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 5)(2021) 3385-3400.

DOI: [10.22060/mej.2020.17286.6563](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17286.6563)

