

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 5) (2021) 799-802 DOI: 10.22060/mej.2020.17286.6563



Numerical simulation of salt gradient solar pond by employing the solar radiation estimating function considering wall-shading effects

J. Amini Foroushani¹, A. A. Abbasian Arani^{1*}, M. Gandomkar²

¹ Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

² Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

.capability of the proposed function for estimating the solar radiation correctly

Abstract: In this study, a function for estimating solar radiation has been proposed using air mass effects

and annual statistics of daylight conditions. A new relation for calculating the cloud cover factor has

been provided by using the annual statistics of clear sky, partially cloudy, and overcast days. Estimated

solar radiations have been compared with the measured experimental ones for two cities in Iran, and a

good agreement has been observed. The proposed function can be used at places where the facilities and required instruments for solar radiation measurement are not available. As an illustration, the function has been used in numerical simulations of salt gradient solar ponds. One dimensional thermal analyses

of the salt gradient solar ponds have been performed through an in-house code, which models the vari-

ous parameters. Variation of environmental temperature, solar radiation intensity based on zenith angle

of the sun, saline properties as a function of temperature and concentration, and wall-shading effects

are among those parameters. A fair agreement has been observed between the results of the slat gradi-

ent solar pond numerical simulations and the experimentally measured temperatures, which shows the

Review History:

Received: Oct. 28, 2019 Revised: Jun. 11, 2020 Accepted: Aug. 15, 2020 Available Online: Sep. 02, 2020

Keywords:

Solar radiation Solar energy Solar pond Air mass Cloud cover factor .

1- Introduction

Salt Gradient Solar Pond (SGSP) is a method of collecting solar energy in form of heat by using a pond and saline water. The collector part and the heat storage system are combined in SGSPs, which makes them economically feasible with respect to other methods [1]. Different concentrations of salt in water can be used for constructing a density gradient in pond's depth. Various parameters can affect the thermal behavior of SGSPs such as ambient temperature, Solar Radiation Intensity (SRI) at the pond's site, insulation of the pond, wall shading effects, and thickness of solar pond layers. As an illustration, there are various studies that use different functions for estimating averaged solar radiation [2]. There are also studies that calculate solar radiation through level of cloudiness of the sky. Solar radiation used in numerical simulations of SGSPs is usually taken from local weather stations. Since most weather stations are not equipped with a pyranometer, therefore, devising a function for estimating solar radiation with acceptable accuracy seems valuable. The objective of the current study is to introduce an approach for calculating Cloud Cover Factor (CCF) that is used for estimating average solar radiation. Additionally, air mass concept is used for calculating SRI in different zenith angles of the sun for a clear sky. As an illustration, the function is used for simulating SGSPs through an in-housed developed numerical code that predicts thermal behavior with a onedimensional distribution of temperature in pond's depth direction.

2- Method Description

2-1- Estimation of solar radiation intensity

The air mass concept indicates that when zenith angle increases, sunlight has to travel a longer distance through the air to reach the ground. It means solar radiation intensity decreases by increasing zenith angle of the sun. There are tables and functions that can calculate air mass with respect to zenith angle by assumption of flat or curved atmosphere. The SRI can be calculated by using the relation provided by researchers when the air mass and elevation of the location are known.

Generally, the effects of clouds on the SRI are taking into account by means of cloud cover factor. There are various studies suggesting different amount for CCF depend on the weather and sky conditions and geographic characteristics of the position. Although, SRI measurement requires special instruments, annual statistics of clear sky, partially cloudy, and overcast conditions are usually and easily accessible. The coefficient of 0.3 is selected for overcast days, which means SRI in an overcast day is 0.3 of SRI measured for a clear sky. Also, SRI for partially cloudy days is assumed to be mean value of SRI for the clear sky and the overcast condition.

2-2-Thermal analysis of Salt gradient solar pond

Thermal behavior of a SGSP usually is dominated by the temperature distribution in vertical direction. Thus, it is quite common to simulate a SGSP with a one-dimensional numerical analysis [1]. Generally, a SGSP consists of three

*Corresponding author's email: abbasian@kashanu.ac.ir





Fig. 1. Schematic of ponds with circular and rectangular cross-sections along with their shaded areas

layers; Lower Convective Zone (LCZ), Non-Convective Zone (NCZ), and Upper Convective Zone (UCZ). The LCZ and the UCZ always are assumed to have uniform temperatures due to the convection. The UCZ is directly in touch with the ambient air and therefore it is assumed to have the same temperature. Temperature distribution in NCZ varies almost linearly from UCZ to LCZ.

The ratio of shaded area with respect to the sunny parts cannot be neglected in small solar ponds. Therefore, the wall shading effects should be considered in such analyses. Two types of shapes with circular and rectangular cross-sections are quite common in the construction of small solar ponds. The schematics of the ponds with shading areas are displayed in Fig. 1. The shaded area of each one can be calculated using the relations available in the literature.

3- Results and Discussion

The method described in the previous section is applied for two cities in Iran, in which monthly averaged SRI has been measured experimentally and is available. Besides, small SGSP have been constructed in both cities and thermal behavior of them have been reported in detail [19, 20] for each month. The experiment has been carried out in the city of Bafgh in 2008 while the other one has been performed in the city of Urmia in 2016. The statistics of the weather are taken from meteorological organization for the above cities and years. Thus, CCF has been calculated and monthly averaged SRI has been derived. They compared with measured SRI reported in [3, 4]. The estimated values are in agreement with the measured data. Both comparisons are displayed in Figs. 2 and 3.



Fig. 2. estimated and measured SRI for the city of Bafgh in 2008



Fig. 3. estimated and measured SRI for the city of Urmia in 2016



Fig. 4. Temperature distribution predicted by numerical simulation with measured data for cubic pond of Urmia



Fig. 5. Variation of LCZ temperature in a year for cubic pond of Urmia

The maximum differences between the estimated SRI with measured ones are equal to 35.2 for the city of Bafgh and 39.9 for the city of Urmia. Obviously, differences are almost 10 percent of the maximum SRI in a year for both experiments.

Temperature distribution inside the pond can be derived by using the estimated SRI for simulating SGSPs with wall shading effects and using a function for ambient temperature. As an illustration, temperature distribution resulted from the numerical simulation in comparison with the experimentally measured data for the cubic pond constructed in the city of Urmia is displayed for every two months in Fig. 4.

Fig. 5 displays variation of LCZ temperature during a year. The maximum difference occurs in December, which is about 6.5 °C. It seems that the in-house developed code can predict the thermal behavior of SGSPs by using the proposed function for estimating SRI.

4- Conclusions

The results showed that the relation used for calculating the cloud cover factor is accurate to predict the monthly averaged solar radiation intensity. It has been observed that the in-house developed code for simulating the SGSPs with wall shading effects predicts the experimental data accurately. The solar radiation intensity can be predicted by using the proposed function with acceptable accuracy. The relation for cloud cover factor proposed in current study seems accurate for geography of Iran. The requirements for estimating solar radiation intensity by using the proposed function is usually available everywhere and do not need special instruments or facilities. In absence of experimental measurements for solar radiation intensity, it would be difficult to predict the thermal characteristics of a SGSP. Thus, it is suggested to use the proposed function or other similar functions for predicting SRI alternatively.

References

- K. Sukhatme, S.P. Sukhatme, Solar energy: principles of thermal collection and storage, Tata McGraw-Hill Education, 1996.
- [2] M. Mazidi, M.H. Shojaeefard, M.S. Mazidi, H. Shojaeefard, Two-dimensional modeling of a saltgradient solar pond with wall shading effect and thermophysical properties dependent on temperature and concentration, Journal of Thermal Science, 20(4) (2011) 362-370.
- [3] 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.

[4] M. Khalilian, Experimental and numerical investigations

of the thermal behavior of small solar ponds with wall shading effect, Solar Energy, 159 (2018) 55-65.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

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) 799-802*



DOI: 10.22060/mej.2020.17286.6563

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ویژه ۵، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۳۸۵ تا ۳۴۰۰ DOI: 10.22060/mej.2020.17286.6563



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

جواد امینی فروشانی'، علی اکبر عباسیان آرانی'*، محمد گندمکار

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

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 فرضيات معمول، شرايط محيطي به صورت واقعىتر لحاظ شدهاند. اين شرايط دماي محيط متغير 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 ابریبودن 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 اندازه گیری شده تجربی مقایسه شده است. شدت تابش بدست آمده در مدل سازی عددی استخر خور شیدی مورد تحقیق با نتایج تجربی موجود تطابق خوبی دارد.

تاريخچه داورى: دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۶ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۲ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸ ارائه أنلاين: ١٣٩٩/٠۶/١٢

> كلمات كليدى: استخر خورشيدي شبيەسازى عددى تخمين شدت تابش سيستم ذخيره انرژى انرژی خورشیدی.

۱- مقدمه

انرژی خورشیدی به دلیل عدم تولید گازهای گلخانهای، فراوانی و ارزانی، نسبت به دیگر انرژیها متمایز می شود و جذابیت دارد. در بین روشهای موجود در جذب و استفاده از انرژی خورشیدی، استخرهای خورشيدي مشخصات ويژهاي دارند مانند تركيب بخش جذبكننده و ذخیرهکننده انرژی گرمایی که باعث سادگی و کاهش هزینههای ساخت می شود [۱]. همچنین استخرهای خورشیدی می توانند به صورت یک سامانه ذخیره گرمایی ٔ 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 می شود. با توقف حرکت این جریان ها،

به دلیل پایین بودن ضریب انتقال حرارت آب کم است. استخرهای خورشيدى مختلفى بر اساس روش توقف جريان همرفت ساخته شده است که فراگیرترین آن استخرهای خورشیدی گرادیان نمک^۲ است که دارای سه لایه مختلف هستند (شکل۱). لایه اول، لایه جابجایی سطحی^۳ است که غلظت نمک در آن یک

سیال گرم در عمق استخر باقی میماند و انتقال حرارت به محیط

عمدتاً از طريق رسانش از بدنه آب استخر اتفاق مىافتد كه مقدار آن

دست و پایین و در حد شوری آب دریاست. لایه میانی یا لایه عدم همرفتی[†] 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 ذخیره کننده گرما را دارد. غلظت نمک در لایه جابجایی زیرین تقریبا یکسان است. وجود گرادیان نمک در آب استخر باعث بوجودآمدن گرادیان چگالی می شود 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 می شود [۳].

- 3 -Upper convective zone
- Non-convective zone
- 5 -Lowe convective zone

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: abbasian@kashanu.ac.ir (Creative Commons License) 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 فرمائید.

⁻Salt gradient solar ponds 2

¹⁻Heat storage system



شکل۱. 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

تاثیر 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 تاثیر گذار 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 واقعیات 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 تاثیر ضخامت لایهها و ابعاد استخر نیز بررسی شدند [۷, ۱۱, ۱۲]. استخرهای تحقیقاتی معمولاً دارای ابعاد کوچکی هستند بنابراین تاثیر سایه ناشی از دیوارهای استخر بر عملکرد آنها اهمیت بیشتری دارد. در این راستا تحقیقات و مقالات زیادی با رویکرد بررسی تاثیر سایهها در استخر انجام شده است [١٣-١٨]. همچنین تاثیر شکل استخر نیز بر روی عملکرد حرارتی آن بررسی شد و بویژه در مورد استخرهای با مقاطع مربع و مستطیل شکل، جهت گیری 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 بوجودآمده در

استخر نسبت به استخرهای مربع و مستطیل با شرایط مشابه، عملکرد حرارتی بهتری دارند. همچنین در استخرهای مستطیل و مربعشکل در صورتی که امتداد استخر شمالی- جنوبی باشد عملکرد بهتری نسبت به دیگر جهات خواهد داشت [۱۸, 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 گرمشده در استخر خورشیدی گرادیان نمک بهت پاستوریزه کردن شیر در هندوستان استفاده میشد. همچنین از آنها برای تولید الکتریسیته 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 مهندسین جذاب هستند.

شبیه سازی عددی استخرهای خورشیدی با اهداف مختلفی صورت می گیرد. تحلیل رفتار حرارتی و عملکرد گرمایی استخر از اولین انگیزه های شبیه سازی عددی بوده است [۷]. با استفاده از ابزار عددی که در ابتدا با استفاده از نتایج تجربی صحت سنجی^۲ شده، می توان برای بهینه سازی ابعاد و ضخامت لایه ها و کلیه متغیرهای دخیل در استخر استفاده نمود. همچنین برای تحلیل انرژی و اکسرژی لازم است تا مقدار تبادل حرارت بین لایه ها و اتلاف به محیط از

^{1 -}Banglore

^{2 -}Validation

طریق دیوارها، کف و بدنه آب ساکن معین باشد. بدست آوردن این مشخصات در آزمایش تجربی مشکل است بنابراین با استفاده از نتایج صحت سنجی شده شبیه سازی عددی نسبت به تحلیل انرژی و اکسرژی لایه های مختلف و کل استخر خور شیدی اقدام می کنند [۲۰–۲۳].

در عمده تحقیقات صورت گرفته در زمینه شبیه سازی عددی استخر خورشیدی، از اطلاعات مراکز ثبت میزان تابش خورشیدی و متوسط ماهانه تابش دریافتی در محل استفاده می شود. همچنین متوسط دمای ماهانه ثبت شده در مراکز هواشناسی به عنوان دمای محیط فرض شده است [٦٢, ١٨-٢٢, ٢۴]. در برخی از مقالات نیز توابع تخمین تابش در مورد مناطق مشخص جغرافیایی ارائه شده و بکار رفته است [٢٩–٢٨]. شماری از مقالات نیز با احتساب درصد ابری بودن آسمان، تاثیرات آن را بر میزان تابش دریافتی در سطح زمین بررسی کردهاند [۲, ٢٩–٣٧]. از آنجا که اکثر ایستگاههای هواشناسی فاقد تجهیزات تابش سنج هستند؛ میزان تابش متوسط ماهانه برای کاربرد در کد شبیه سازی ممکن است موجود نباشد، از این رو وجود یک تابع تخمین تابش که علاوه بر سادگی، دقت مناسبی را جهت استفاده در شبیه سازی عددی استخرهای خورشیدی داشته باشد ضروروی به نظر می رسد.

در این مطالعه با استفاده از کد توسعهیافته به زبان فورترن ، 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 می شود. با استفاده از روابط موجود در مورد ساعت طلوع و طول مدت روز، شبیه سازی به صورت حل گذرا انجام و ساعات روز و شب نیز در شبیهسازی اعمال می شود. 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 كد اعمال مي شوند. هدف اين مقاله ارائه تابع تخمين 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 کاربردینمودن تابع برای استفاده در شبیهسازی استخر اقدام می شود. در نهایت با مقایسه نتایج عددی بدستآمده با نتایج تجربی موجود در مراجع نسبت به صحتسنجي تحليل عددي اقدام مي شود.

۲- آزمون تجربی مورد استفاده برای راستی آزمایی حل عددی برای آزمودن صحت نتایج عددی نیاز است که نتایج در شرایط یکسان با آزمایش تجربی مقایسه شود. برای کاربرد شرایط محیطی

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 می گیرد. 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 ۲٫۰، ۵٫۰ و ۴٫۰ 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

۳- مدلسازی استخر خورشیدی گرادیان نمک

اندازه گیری های 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. اندازه گیری ها نشان می دهد که دمای این لایه با دقت بسیار خوبی با دمای محیط برابر است [۲۰]. جریانات همرفتی در که توسط لایه میانی مهارشده در ناحیه لایه زیرین محدود می شوند. وجود جریان های همرفتی در این لایه توزیع دما را تعدیل کرده و اختلاف دمای نقاط مختلف این لایه ناچیز است، بنابراین تحلیل

۳-۱- 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 می آید [۱۵, ۱۷]:

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

در این رابطه دیده می شود که میزان نرخ انباشت یا برداشت انرژی ذخیره شده در لایه زیرین به چه عواملی مرتبط است. انرژی

^{1 -}Fortran

^{2 -}Air mass

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 می شود (\dot{q}_{sub}). همچنین حرارت از کف استخر نیز به محیط منتقل می گردد ($\dot{q}_{\scriptscriptstyle Rottom}$). استخرهای کوچک معمولا به صورت مخزن مستقر بر روی سطح زمین ساخته می شوند، 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 می شود. به دلیل اینکه استخر از جمیع جهات با هوای محیط احاطه شده و حتی در بخش كف نيز تنها با لايه عايق پوشيده شده بنابراين محاسبه اتلاف از دیوارها و کف با استفاده از قانون فوریه ٔ محاسبه می شوند. اتلاف از طریق رسانش از حجم آب موجود در لایه میانی نیز میتواند صورت گیرد ($\dot{v}_{_{LCZWNCZ}}$) 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}_{err}). 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 ذخیره شده در لایه زیرین می شوند. مقدار انتقال حرارت به دیوارها و کف با استفاده از قانون فوریه برای انتقال حرارت هدایت و فرض شبه-پايابودن وضعيت استخر محاسبه مىشوند. روابط انتقال حرارت از دیوارها و کف به صورت زیر است.

$$\dot{Q}_{Side} = -k_{insul.} A_{LCZ-walls} \frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{side walls}$$
(Y)

$$\dot{Q}_{Bottom} = -k_{insul.} A \frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{bottom}$$
(٣)

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.

$$\int_{LCZtoNCZ} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{LCZ-NCZ \text{ boundry}}$$
(*)

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



شکل۲. لایههای جابجایی سطحی و زیرین به همراه تقسیمبندی لایه غیرهمرفتی میانی

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

طریق هدایت از بدنه آب این لایه انجام می شود، بنابراین گرادیان دما در جهت عمق در این لایه وجود دارد. برای معین و دیده شدن گرادیان دما ضخامت این لایه در جهت عمق به تعداد محدودی زیرلایه تقسیم بندی شده و معادله بقای انرژی برای هر زیرلایه بدست می آید. شکل ۲ نمای شماتیک استخر و تقسیم بندی لایه ها برای تحلیل عددی را نشان می دهد. 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]:

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

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





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 درنظر گرفتهشده 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. ضمنیبودن 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 نشاندادهشده 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 $\frac{dI}{dz}$ 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 می شود.

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 می گیرند.

۴- 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

مقدار و شدت ابریبودن آسمان در روزهای سال از عوامل تاثیرگذار بر کارائی 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 می کاهد و با افزایش زاویه فراز^۲ خورشید مقدار مسافتی که باید نور از درون جو طی کند تا به سطح زمین برسد افزایش می یابد. 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 می شود. روابط مختلفی برای تخمین جرم هوا به ازای زوایای مختلف و فرض روابط مختلفی برای تحمین جرم هوا ارائه شده است [۲۷]. بر اساس نیز به صورت اپتیکال^۳ برای جرم هوا ارائه شده است [۲۷]. بر اساس طلاعات این جداول و عبور منحنی مناسب از آنها، روابط تخمین جرم هوا ارائه شدهاند، که یکی از دقیقترین آنها به صورت زیر است [۲۸]. مطابق نتایج این رابطه با دادههای اپتیکال موجود در جداول در شکل ۵ نشان داده شده است.

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

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

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

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

^{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

با توجه به اطلاعات فوق چنین بر می آید که درنظر گرفتن مقدار ۲۰٫۳۰ برای فاکتور پوشش ابر در روزهای ابری مناسب باشد. شدت تابش روزهای نیمه ابری برابر میانگین شدت تابش بین روزهای آفتابی و روزهای کاملاً ابری فرض می شود. بنابراین مقدار متوسط ماهانه فاکتور پوشش ابر می تواند از رابطه زیر تخمین زده شود:

$$CCF = \left(n_{cs} \times 1 + n_{pc} \times \left(\frac{1 + 0.3}{2}\right) + n_{oc} \times 0.3\right) / n_{month}$$
(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 شکل۶ با استفاده از روش حداقل مربعات بدست آمده و مقدار فاکتور ابریبودن را با دقت مناسبی پیشبینی میکند. مقدار بیشینه خطای نسبی کمتر از ۸ درصد برای ماه مارس است. تابع بدستآمده به صورت زیر است.

$$CCF_{est} = 0.776 + 0.155 \sin(\frac{2\pi}{12}(7 + m_{no}))$$
 (1 •)





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 یکی از معمول ترین راه حلها در این زمینه است. بر این اساس مقدار تابش با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود [۳۱]:

$$I_{normal} = I_{cs} \times CCF \tag{A}$$

مسأله اصلی در رابطه تعیین صحیح مقدار فاکتور پوشش ابر است. هرچند پیشبینی دقیق زمان ابریشدن آسمان و طول مدت و شدت آن ممکن نیست، ولی بدستآوردن آمار روزهای ابری و تاریخچه آن در یک محل مشخص، نیاز به تجهیزات اندازه گیری 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



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

1 - Cloud cover factor (CCF)

2 -Berland

| indic it it following and | cruge of cloudy, put thy | cioudy und sunny days | |
|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| روزهای آفتابی ^{۳***} | روزهای نیمهابری ^{۲۵۰} | روزهای کاملاً ابری ^۱ * | ماہھای میلادی |
| ٧/٩ | ١٢,۵ | ۶. ۱۰ | ژانویه |
| ۶ _/ ٨ | ۱۳,۴ | ٨ | فوريه |
| ٩,٩ | ۱۵/۴ | ۵,Y | مارس |
| ۹٫٨ | ۱ <i>۶</i> /۷ | ۳,Δ | آوريل |
| 11 | ١٧ | ٣ | مى |
| ۱۹ | ۶. ۱۰ | •,۴ | ژو ن |
| 74 | ۶٫۹ | •,1 | ژولای |
| 74 | ۶ _/ ۷ | ٠٫٣ | آگوست |
| 24,4 | $\Delta_{/}$ ٣ | •, ۴ | سپتامبر |
| ۱۸ | ٩,/٩ | ٣, ١ | اكتبر |
| 14 | $h \cdot \lambda$ | ۵٫٣ | نوامبر |
| 11/1 | ۱۲/۴ | ΥıΔ | دسامبر |

جدول۱. 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 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

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] .

$$I_{surf} = I_{normal} \times \cos z_t \tag{(11)}$$

مقادیر متوسط تابش ماهانه شهر ارومیه در مرجع [۱۲, ۲۲] گزارش شده است. شهر ارومیه در عرض جغرافیانی 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 اندازه گیری شده مقایسه شده است. همچنین اطلاعات به صورت نمودار در شکل ۷ نمایش داده

شدهاند. حداکثر اختلاف بین مقدار تخمینزدهشده و اندازه گیریشده در ماه فوریه اتفاق افتاده و برابر ۳۹٫۹ وات بر متر مربع است. حداکثر خطای بین نتایج حاصل از تخمین فوق و اندازه گیریهای 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

جدول۲: 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

| درصد خطا | تخمین متوسط تابش ماهانه (W/m ²) | متوسط تابش ماهانه ثبتشده (W/m ²) | ماہھای میلادی |
|------------------------------------|---|--|---------------|
| $-\Upsilon\lambda/\Upsilon\lambda$ | ۲۵٫۲ | ۱۰۵ | ژانویه |
| -78/94 | ۱ • ۵٫۲ | 144 | فوريه |
| - <i>\ Y/FY</i> | 100,8 | ١٨٩ | مارس |
| - 4/2. | ۲۱۳/۴ | ۲۲۳ | آوريل |
| +&/&V | $\chi \chi_{\lambda}$ | 261 | مى |
| +٣/٧۴ | ۳۲۹,۹ | ۳۱۸ | ژون |
| +٨/۵٩ | ۳۳۹,۹ | ۳۱۳ | ژولای |
| +λ/۲ • | * • Y / * | ۲۸۴ | آگوست |
| +۲/۶۵ | 24.7 | ۲۳۴ | سپتامبر |
| +74/71 | ١٦٢/٨ | ١٣١ | اكتبر |
| +) ۹/۹) | ۱۳ ۰ /۷ | ١٠٩ | نوامبر |
| -14/•9 | ۲۵٫۶ | ٨٨ | دسامير |

دارد. کاهش مقدار تابش متوسط در ماههای سرد با وجود اختلاف یکسان بین نتایج تجربی و تخمینی موجب می شود 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 ۲ برابر ۸۱ وات بر متر مربع بدست می آید.

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 گزارششده 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 ۲۸/۲ وات بر متر مربع در ماه ژانویه بوده و نرم خطای اقلیدسی دو نمودار برابر ۶/۵۸ 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 می کند. طول موجهای بلند نور خورشید عمدتاً در چند سانتیمتر اول ورود به آب جذب میشوند و طول موجهای کوتاه به عمق نفوذ می کنند. توابع مختلفی برای تخمین درصد شدت تابش به صورت تابعی از عمق مطرح شدهاند [۲, ۴۱]. توابع ارائه شده 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].



شکل۷. مقادیر تخمینی تابش متوسط ماهانه بدستآمده برای شهر ارومیه و مقادیر متوسط تابش ثبتشده 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



شکل۸. مقادیر تخمینی تابش متوسط ماهانه بدستآمده برای شهر بافق و مقادیر متوسط تابش ثبتشده در سال ۲۰۰۸

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

$$\tau = \sum_{i=1}^{4} A_i e^{\left(\frac{-C_i z}{\cos(z_r)}\right)} \tag{11}$$

در این رابطه $\hat{0}$ مقدار درصد تابش رسیده به عمق z است. ضرایب بکاررفته در این تابع درجدول ۳ داده شده است [۲]. آب در برابر طول موجهای بلندتر عملاً به صورت یک ماده تیره^۳ عمل می کند.

۴-۴- محاسبه شدت تابش در استخر

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

$$R_{r} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^{2}(\theta_{i} - \theta_{r})}{\sin^{2}(\theta_{i} + \theta_{r})} + \frac{\tan^{2}(\theta_{i} - \theta_{r})}{\tan^{2}(\theta_{i} + \theta_{r})} \right]$$
(117)

در این رابطه i^{θ} زاویه برخورد[†] به سطح آب و f^{θ} زاویه انعکاس^ه هستند. زاویه انعکاس تابع نوع ماده و زاویه برخورد نور است و از رابطه زیر محاسبه می شود [۵۲]. sin $\theta_r = \frac{\sin \theta_i}{n}$ (۱۴)

بر اساس این روابط شدت تابش درست در زیر سطح برابر است با:
$$I_{in} = I_{surf} (1-R_r)$$
 (۱۵)

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

^{1 -}Euclidian norm

^{2 -}Semi-opaque

^{3 -}Opaque medium

^{4 -}Incident angle

^{5 -}Refraction anglr

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

$$I_{sunny} = I_{surf} \left(1 - R_r \right) \tau \,\theta \tag{19}$$

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 [۱۸, ۱۷, ۱۸].

$$S_{shadow} = \pi R^2 - S_{sunny} \tag{1Y}$$

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

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

$$a = \frac{z}{2} \tan \theta_r \tag{19}$$





1 -Propagation

برای آن محاسبه می شود.
همچنین رابطه محاسبه مساحت سایه برای استخرهای مکعبی
نیز بدست آمده است [۱۵, ۱۷, ۱۸, ۵۱].
$$A_{shadow} = Ll\sin lpha + Wl\cos lpha - l^2 \sin lpha \cos lpha$$
 (۲۰)

در این رابطه
$$l$$
 از رابطه زیر بدست میآید:
 $l = z \tan \theta_r$ (۲۱)

مقدار ^z عمقی از استخر است که نسبت مساحت سایه به آفتاب برای آن محاسبه میشود. درشکل 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]:

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

مناطق سایه در استخر چنانچه تجربه نشان می دهد کاملاً تاریک نیستند و پخش^۲نور موجب می شود تا درصدی از تابش رسیده به مناطق آفتابی به مناطق سایه نیز برسد. بر اساس تحقیقات صورت گرفته مقدار ۳۰ درصد برای ²خ مناسب و متعادل است [۱۵, می مار ۱۸, ۱۸]. مقدار بدست آمده از رابطه فوق در رابطه به کار می رود و نرخ تغییرات آن با عمق مقدار جذب تابش در لایه های آب را نشان می دهد.

۴- ۶- مدلسازی 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



2 -Scatter

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. عایق پوش 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 می کند و تابش ها عملاً امکان خروج از استخر را ندارند.

برای مدلسازی عددی استخر به صورت گذرا برای دورهای 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 می شود [۵۲, ۵۳].

 $\cos z_t = \sin \psi \sin \delta + \cos \psi \cos \delta \cos \omega \tag{(77)}$

در این رابطه Ψ عرض جغرافیایی محل و δ زاویه میل خورشید است. ω نیز زاویه ساعتی^۲ نام دارد و بر اساس ساعت محلی و از رابطه زیر تعیین می شود. $\omega = \frac{2\pi}{24}(h-12)$

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

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{2\pi}{365}(284+n)\right] \tag{7}$$

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].

$$h_{sunrise} = 6 + \frac{12}{\pi} \sin^{-1} \left(-\tan\psi \tan\delta \right)$$
 (19)

1 -Declination angle

2 -Hour angle

$$h_{daylight} = \frac{24}{\pi} \cos^{-1} \left(-\tan\psi \tan\delta \right) \tag{YV}$$

مجموع دو رابطه فوق ساعت غروب خورشید را معلوم می کند. به ازای هر شبانه روز ابتدا محاسبه می شود که گام زمانی در کدام محدوده قرار دارد و در صورت روزبودن اقدام به محاسبه موقعیت زاویه ای خورشید در آسمان می شود. جرم هوا محاسبه شده و شدت تابش بر سطح استخر و سپس در درون آن با لحاظ اثر سایه ها بدست می آید. گام زمانی در این پژوهش پنج دقیقه در نظر گرفته می شود.

۴- ۷- مدلسازی دمای محیط

معمولاً برای شبیه سازی دمای محیط از متوسط ماهانه دمای محیط در محل استفاده می کنند. متوسط دمای ماهانه تاثیرات فصلی را پوشش می دهد، ولی در مورد تغییرات روزانه و همچنین نرخ تغییرات متوسط دما در بازه یک ماه اطلاعاتی ارائه نمی دهد. در تحقیق حاضر، به جهت هر چه نزدیک ترشدن مدل سازی عددی استخر خورشیدی به شرایط واقعی و حذف فرضیات کلی، مدل ریاضی برای تغییرات ماهانه، روزانه و ساعتی دمای محیط استفاده می شود. واضح است که دمای محیط تابع عوامل پیچیده جوی و محیطی است واضح است که دمای محیط تابع عوامل پیچیده جوی و محیطی است نیست ولی با استفاده از داده های آماری دما در سال های گذشته و متوسط تغییرات دما در یک شبانه روز می توان تابعی به شکل زیر برای تخمین دمای محیط بکار برد [۵۵].

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

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



شکل۱۰. تغییرات متوسط دمای ماهانه شهر ارومیه بر اساس دادههای اندازه گیریشده 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



شکل۱۱. 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



شکل ۱۲. تغییرات متوسط دمای ماهانه لایه جابجایی زیرین استخر با مقطع دایره حاصل از تحلیل عددی و بدستآمده 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^{T} دامنه تغییرات دما در یک شبانه روز به h مور متوسط است. همچنین n شماره روز در سال میلادی و h ساعت محلی است. مقادیر n_0^{0} و h_0^{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 ثبتشده و تخمینزدهشده توسط رابطه درشکل ۱۰ آورده شده است.دامنه تغییرات متوسط دمای ماهانه برابر ۱۳٫۲ درجه سانتی گراد است. همچنین به طور متوسط در

یک شبانه روز دمای محیط حدوداً ۸ درجه نوسان دارد. با قراردادن مقدار n_0^n برابر n_0^n برابر ۳ تابع دمای محیط حداکثر تطابق را بر دادههای اندازه گیری شده پیدا می کند. بدین منظور از روش حداقل مربعات استفاده شده است. حداکثر درصد خطا نسبت به بیشینه متوسط دمای ماهانه برابر P_0 درصد برای ماه مارس بوده است.

۵- تابعیت خواص سیال بر حسب دما و غلطت

فرض دیگری که در شبیه سازی استخرهای خورشیدی بویژه تحلیل های یک بعدی انجام می شود فرض ثابت بودن خواص سیال است. مشخصاً در تحلیل های دو یا سه بعدی به جهت لزوم شبیه سازی جریانات همرفتی ناشی از توزیع دما و غلظت، نمی توان خواصی مانند چگالی را ثابت فرض نمود. ولی در تحلیل های عمدتاً یک بعدی جهت سادگی خواص ثابت فرض می شوند. خواصی مانند چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه مستقیماً بر روی ظرفیت گرمایی کل استخر موثر هستند و لحاظ ننمودن تغییرات آنها با دما و غلظت نمک می تواند نتایج مدل سازی عددی را با در صدی 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 می دهد [۵۶, ۵۲].

 Kg/m^3 در این روابط دما بر حسب کلوین و غلظت بر حسب می این می این می آید. می اشد و نتایج حاصل نیز بر حسب واحدهای SI

$$k = 0.5553 - 0.0000813C + 0.0008(T - 20) \tag{(Y9)}$$

 $\rho = 998 + 0.65C - 0.4(T - 20) \tag{(\%)}$

$$c_p = 4180 - 4.396c + 0.0048c^2 \tag{(1)}$$

| درصد خطای نسبی | نتایج تحلیل عددی (°C) | اندازهگیری تجربی [۱۸] (C°) | ماەھای میلادی |
|------------------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------|
| -1• | ١٫٨ | ۲,۰ | ژانویه |
| +۲٨/٩۴ | ٩٫٨ | ۲,۶ | فوريه |
| • | Λ_{i} | ۱۸,۱ | مارس |
| +7/۶۷ | ۳۰,۷ | ۲٩,٩ | آوريل |
| + • / * ۶ | ۴۳٬۰ | ۴۲٫۸ | مى |
| -4/41 | ۵۳٬۲ | ۵۵/۲ | ژون |
| -\$/\$1 | ۵Y/A | <i>۶</i> ۱/۹ | ژولای |
| $-\mathbf{V}/\mathbf{V}\mathbf{V}$ | ۵۷,۰ | ۶۱ _/ ۸ | آگوست |
| <i>−</i> ∆/۲ • | F9, T | ۵۱٬۹ | سپتامبر |
| + % / % • | ٣٧٫١ | ٣۴٫٨ | اكتبر |
| +YS/XF | ۲۴٫۱ | ۱۹,۰ | نوامبر |
| +41/42 | 14,4 | ٨,۴ | دسامير |

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



شکل ١٣. مقایسه نتایج متوسط ماهیانه دما حاصل از روش عددی و آزمون تجربی [١٨] 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

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 صحت سنجى شوند و مقدار تطابق نتايج آن با واقعيت 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 یک ساله گزارش شدند [۱۸]. در تحقیق مذکور، جهت گیری استخر مکعب شکل نسبت به جهات جغرافیایی بررسی شد و در نهایت برای استحصال بهترین کارائی حرارتی، امتداد شمالی جنوبی برای قرارگیری استخر انتخاب شد.

نتایج مشابه برای جهت گیری جغرافیایی استخر در مطالعهای 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 اندازه گیری های 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 لايه جابجايي زيرين نيز در نتايج گزارششده تجربي وجود دارد. مقایسه بین نتایج عددی و تجربی دمای متوسط لایه زیرین در شکل

| درصد خطای نسبی | نتایج تحلیل عددی (℃) | اندازهگیری تجربی [۱۸] (C°) | ماەھای میلادی |
|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|
| $+\Delta\lambda/\Im$ | ١,٩ | 1,7 | ژانویه |
| +41/42 | ٩,٩ | Y /• | فوريه |
| +%/۴۷ | ۱۸٫۱ | ۱۷,• | مارس |
| +۲/•• | ۳۰,۶ | ٣٠,٠ | آوريل |
| +•/٣٣ | ۴۳٬۱ | ۴۳٬۰ | مى |
| -۲/۷۲ | $\Delta \Upsilon _{/}\Delta$ | ۵۵,۰ | ژون |
| -4/41 | ۵۸٬۴ | ۶۱,۱ | ژولای |
| -٣/• ۴ | ۵۷٫۴ | ۵٩,۲ | آگوست |
| $-\mathfrak{r}/\mathfrak{d}$) | 49,4 | ۵۱٫۲ | سپتامبر |
| +17/•7 | ٣٧٫٣ | ٣٣,٠ | اكتبر |
| + ٣٣/٧ • | ۲۴٫۳ | ۱۸,۱ | نوامبر |
| + λ • / ۲ ۴ | 14,8 | ٨,١ | دسامبر |

جدول۵. دمای متوسط ماهانه لایه جابجایی زیرین برای استخر مکعب شکل Table 5. Average monthly temperature of the bottom convection layer for the cube-shaped pool



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. همچینی حداکثر تفاوت دمای بدستآمده از حل عددی و نتایج تجربی برای لایه جابجایی زیرین برابر ۶٫۵ درجه سانتی گراد و در ماه دسامبر بدست آمده است.

نرم اقلیدسی خطای دو نمودار موجود در نمودار شکل ۱۴ برابر با ۱۱/۱۶ درجه سانتی گراد بدست آمده که تقریباً با خطای بدست آمده جهت استخر با مقطع دایره یکسان است. از نتایج بدست آمده تجربی نتیجه می شود که حداکثر دمای قابل استحصال در لایه جابجایی زیرین برای استخر با مقطع دایره اندکی بالاتر از استخر با مقطع مربع بوده است [۱۲, ۱۸]. هر دو روش نشان می دهند که حداکثر دما در



شکل ۱۴. تغییرات متوسط دمای ماهانه لایه جابجایی زیرین استخر با مقطع مربع حاصل از تحلیل عددی و بدست آمده 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 می شود تا ماه ژون نمودارها تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند. همچنین نتایج تجربی و عددی متوسط دمای ماهانه لایه جابجایی زیرین برای استخر استوانه درجدول ۴ ارائه شده است. حداکثر اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در مورد دمای لایه زیرین در ماه دسامبر اتفاق افتاده و برابر P_i درجه سانتی گراد 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 می شود. به عنوان نمونه ماه نسبتاً گرم آگوست با ماه نسبتاً سرد فوریه مقایسه می شود. جدول ۴ نشان می دهد که اختلاف دمای بین نتیجه بدست آمده از تحلیل

^{1 -}Euclidian norm

لایه زیرین در ماه ژولای و حداقل آن در ماه دسامبر اتفاق میافتد. همچنین عدم قطعیت اندازه گیری دما در آزمونهای تجربی ۲۸ درجه سانتی گراد گزارش شده است [۱۷].

۷- جمعبندی و نتیجهگیری

با فرض غلبه تغییرات دمایی در جهت عمق نسبت به دیگر جهات، با استفاده یک کد یک بعدی، نسبت به شبیهسازی 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 زیرلایههای متعدد معادله بقای انرژی برای زیرلایهها و لایه جابجایی زیرین استخراج شده و در یک دستگاه معادلات حل شدند و با تکرار حل در گامهای زمانی پیشرونده تحلیل گذرا انجام شد. عوامل محیطی مانند دمای محیط، شدت تابش، مساحت سایه دیوارها، و خواص سیال، بر خلاف فرضهای معمول بکاررفته در شبیهسازی استخر، به صورت متغیر در نظر گرفته شدند. شدت تابش معمولا به صورت متوسط ماهانه که توسط ایستگاههای هواشناسی و تابش سنجی ارائه میشوند 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. رابطهای برای محاسبه فاكتور يوشش ابر ارائه شد كه مقدار تابش را با دقت قابل قبولی ارائه مینماید. تابش تخمینزدهشده با دو نمونه شدت تابش اندازه گیری شده تجربی گزارش شده در مراجع مقایسه شد. در نهایت نتايج مدلسازى عددى براى استخرهاى خورشيدى نمونه استخراج شد و با مقادیر گزارششده تجربی مقایسه شد که تطابق قابل قبولی بين آنها ديده مي شود. مقدار حداكثر اختلاف بين نتايج تجربي 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.

۸– اختصارات

| Α | مساحت سطح مقطع استخر |
|-----------------------|---|
| а | نیمه طول سایه در استخر با مقطع دایره |
| A_{i} | ضريب تابع استهلاك تابش |
| $A_{\rm LCZ-walls}$. | مساحت ديوارهاي لايه زيرين |
| | غلظت نمک در آب |
| CCF. | فاكتور پوشش ابر |
| C_i | ضریب توان در تابع استهلاک تابش |
| C_p | ظرفیت گرمایی |
| CCF_{est} | فاکتور پوشش ابر تخمینی |
| h | ساعت محلى |
| | طول مدت روز |
| h _{sunrise} | ساعت محلى طلوع خورشيد |
| Ι | شدت تابش در عمق استخر |
| I_0 | ثابت شدت تابش خورشیدی |
| I_{cs} | شدت تابش در روز آفتابی |
| I_{in} | شدت تابش در زیر سطح آب |
| I _{normal} | شدت تابش رسیده بر سطح عمود بر تابش |
| | شدت تابش رسیده به سطح |
| k | ضریب انتقال حرارت رسانش محلول آب و نمک |
| k _{insul.} | ضريب انتقال حرارت رسانش عايق حرارتي |
| <i>L</i> . | طول استخر با مقطع مستطيل |
| l | طول سایه در استخر با مقطع مستطیل |
| $.l_{LCZ}$ | ضخامت لايه جابجايي زيرين |
| m_{no} | شماره ماه در سال میلادی |
| 10 | شماره روز در سال میلادی |
| | تعداد روز آفتابی در هر ماه |
| | |
| n _{oc} | تعداد روز کاملاً ابری در هر ماه |
| n_{nc} | تعداد روز نیمهابری در هر ماه |
| n _r | ضریب شکست نور در آب |
| Q_{rad} | انرژی تابشی رسیده به لایه زیرین |
| Q_{side} | انرژی حرارتی تلفشده از دیوارها |
| Q_{bottom} | انرژی حرارتی تلفشده از کف |
| $Q_{LCZ \ to \ NCZ}$ | انرژی حرارتی منتقلشده از لایه زیرین به لایه میانی |
| Q_{ext} | انرژی برداشتشده از استخر |
| R | شعاع استخر با مقطع دايره |
| R_r | کسر تابش منعکس شده از سطح اب |
| S _{shadow} | سطح سایه در استحر برای یک عمق مشخص |
| S_{sunny} T | سطح افتابی در استخر برای یک عمق مسخص ۱.۰ |
| t | دما د مان |

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 salinitygradient 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 saltgradient solar pond with wall shading effect and thermophysical 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 مستطيل |
| Ζ | عمق |
| Z_t | زاويه فراز خورشيد |
| .α | زاویه امتداد سایه با دیوار در استخر مستطیلی |
| δ | زاویه میل خورشید |
| . <i>р</i> | چگالی محلول آب و نمک |
| $	heta_i$ | زاویه برخورد تابش به سطح آب |
| $	heta_r$ | زاویه شکست تابش در آب |
| $\dot{\theta}$ | کسر تابش رسیده به عمق |
| .ψ | عرض جغرافيايي محل استخر |
| .τ | درصد تابش عبوری از عمق مشخص |
| ω | زاويه 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, Meteorologiacal Organizationm, 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. Albuisson, 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.

براى ارجاع به اين مقاله از عبارت زير استفاده كنيد: 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

