

بررسی پارامتریک رفتار حرارتی استخر خورشیدی گرادیان نمک برای وضعیت آب‌وهوایی شهر ارومیه

حامد پورمختار^۱، مرتضی خلیلیان^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

pourmokhtarhamed@yahoo.com

^۲ استادیار مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

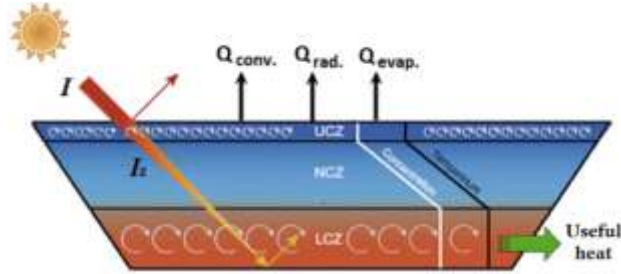
m.khalilian@urmia.ac.ir

چکیده: فناوری استخر خورشیدی، ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین سیستم تبدیل و ذخیره‌سازی انرژی حرارتی خورشید است. در این مطالعه، اثر پارامترهای مختلف از جمله ضخامت لایه‌های مختلف، افت حرارت از سطح استخر، اثر سایه دیوارها و اندازه سطح استخر بر دمای لایه ذخیره به صورت عددی، ارزیابی شده است. نتایج مدل عددی با نتایج تجربی به دست آمده برای یک استخر کوچک تست شده در دانشگاه ارومیه و تحت وضعیت آب‌وهوایی شهر ارومیه اعتبارسنجی شده و سازگاری قابل قبولی بین نتایج عددی و تجربی برای دمای لایه ذخیره استخر مشاهده شده است. نتایج نشان داد که ضخامت لایه سطحی تا حد امکان باید کمتر باشد و از آنجایی که لایه گرادیانی نقش اصلی در ذخیره‌سازی حرارت در لایه پایین و جلوگیری از اتلاف حرارت به صورت هدایتی از سطح استخر دارد، باید اندازه آن مناسب انتخاب شود. همچنین مشاهده شد که افت حرارت از سطح استخر از طریق تبخیر بیشتر از افت حرارت از طریق جابه‌جایی و تشعشع است. با بررسی موردی نشان داده شد که اثر سایه دیوارها در استخرهای کوچک بسیار زیاد است و باید در مدل‌سازی استخر حتماً لحاظ شود، ولی در استخرهای بزرگ اثر سایه تأثیر چندانی در دمای لایه ذخیره ندارد.

واژه‌های کلیدی: انرژی خورشیدی، استخر خورشیدی، مدل‌سازی عددی، بررسی تجربی، عملکرد حرارتی.

۱. مقدمه

بوده و شوری آن یکنواخت و در حد اشباع است. ضخامت LCZ متغیر بوده و تا ۲ متر می‌تواند برسد. دمای LCZ به فاکتورهای مختلفی مانند ضخامت NCZ، دمای محیط و پایداری گرادیان نمک بستگی دارد [۵].



شکل (۱): طرح‌واره‌ای از ساختار استخر خورشیدی گرادیان نمک

در چند دهه گذشته، مطالعات متعددی به صورت تجربی و عددی برای آنالیز عملکرد استخرهای خورشیدی به منظور درک مکانیسم کارکردی آنها انجام شده است. تمرکز کارهای تجربی عمدتاً بر روی ساخت، بهره‌برداری و اندازه‌گیری دما و غلظت در استخرهای خورشیدی بوده است و در مطالعات عددی با به‌کارگیری مدل‌های ریاضی مناسب، به آنالیز حرارتی استخرهای خورشیدی تحت شرایط مختلف پرداخته شده است. در حل‌های تحلیلی ارائه شده به دلیل ساده‌سازی‌های زیادی که برای آنالیز حرارتی استخرهای خورشیدی اعمال می‌شود، معمولاً نتایج به دست آمده تطابق خوبی با نتایج تجربی ندارد و از این جهت استفاده نمی‌شوند [۶]. در مقابل، روش‌های عددی این قابلیت را دارند که با شرایط مرزی و اولیه مناسب، به طور دقیق رفتار حرارتی استخرها را پیش‌بینی کنند.

ونگ و اکبرزاده رفتار حرارتی غیردائمی در استخر خورشیدی را با استفاده از یک مدل تفاضل محدود یک‌بعدی بررسی کردند [۷]. در این مطالعه، عملکرد استخر خورشیدی با توجه به تغییر پارامترهای مختلف سیستم بررسی شد و نتیجه گرفته شد که ضخامت لایه NCZ تأثیر مهمی در عملکرد استخر خورشیدی دارد. همچنین در این مطالعه، دمای لایه UCZ را برابر دمای محیط فرض کردند.

الرفاعی و همکاران مطالعه‌ای را با عنوان بررسی عددی عملکرد حرارتی غیردائم استخر خورشیدی گرادیان نمک به صورت دو‌بعدی انجام دادند و از چگالی، دما و غلظت نمک موجود در آب استخر به عنوان متغیرهای حل استفاده کردند [۸]. آن‌ها به دلیل اینکه افت حرارت از دیواره‌ها و کف استخر و برداشت غیریکنواخت حرارت از لایه ذخیره می‌تواند حل یک‌بعدی را با محدودیت مواجه کنند، حل دو‌بعدی را پیشنهاد و بررسی کردند. در این مطالعه نشان دادند که اثرات دو‌بعدی در استخرهای خورشیدی با نسبت منظری (نسبت

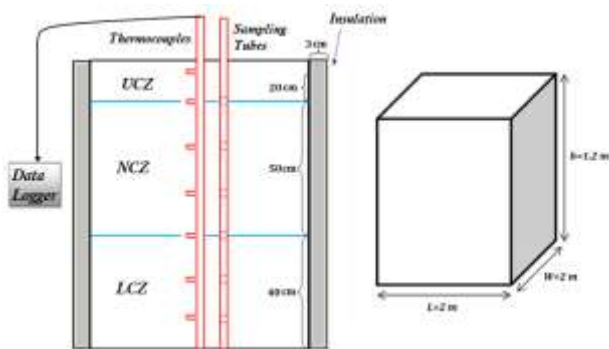
با توجه به کمبود منابع انرژی فسیلی و افزایش شدید تقاضا برای تولید توان به دلیل افزایش جمعیت و پیشرفت‌های اقتصادی اکثر کشورها، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید توان تنها راهکار پیشرو است [۱]. انرژی خورشیدی می‌تواند برای پاسخ‌گویی به نیازهای انرژی به منظور داشتن آینده‌ای پایدار کنترل و مهار شود [۲]. تکنولوژی‌های متعددی برای تبدیل انرژی حرارتی خورشید به انرژی حرارتی مفید ارائه شده است. به هر حال باید دقت کرد که انرژی خورشید منبع انرژی وابسته به زمان و ناپیوسته است. بنابراین چالش اصلی به‌کارگیری این منبع انرژی، ذخیره‌سازی این انرژی برای جبران نیازهای فزاینده انرژی است. لذا لازم است سیستم‌های کم‌هزینه ترکیبی شامل جمع‌کننده و ذخیره‌کننده انرژی حرارتی خورشید ایجاد و استفاده شود. استخر خورشیدی، یک کلکتور کم‌هزینه با توانایی ذخیره‌سازی حرارتی برای طولانی‌مدت است [۳]. دو نوع استخر خورشیدی وجود دارد: استخرهای جابه‌جایی با عمق کم و استخرهای دارای لایه بدون جابه‌جایی؛ در این مقاله به مطالعه یکی از استخرهای نوع دوم یعنی استخر با گرادیان نمک پرداخته شده است [۴].

فناوری استخر خورشیدی گرادیان نمک بر مبنای ذخیره انرژی خورشید در لایه پایین استخر به علت وجود گرادیان چگالی نمک در لایه‌های بالایی آن است. در حقیقت، بعد از گذشت مدت زمانی از پر شدن این استخرها، ۳ لایه درون آن شکل می‌گیرد که از نظر چگالی و دما با یکدیگر تفاوت دارند. با توجه به شکل (۱)، به لایه بالایی که از نظر غلظت و دما یکنواخت بوده و انتقال حرارت در آن از نوع جابه‌جایی است، لایه جابه‌جایی بالا (UCZ) اطلاق می‌شود که دمای آن تقریباً برابر دمای محیط و شوری آن در حد شوری آب دریا (۳،۳ درصد وزنی) می‌باشد. به لایه دوم که به لایه گرادیانی موسوم است و انتقال حرارت در آن فقط از نوع هدایتی است، لایه غیرجابه‌جایی (NCZ) اطلاق می‌شود. چون هرچه از سطح بالایی استخر به ته استخر می‌رویم، دما و شوری بیشتر می‌شود که به صورت شبه خطی این افزایش صورت گرفته تا به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در لایه گرادیانی به دلیل افزایش چگالی با عمق، امکان انتقال حرارت جابه‌جایی وجود ندارد و انتقال حرارت فقط از طریق هدایت صورت می‌پذیرد. لایه جابه‌جایی پایین (LCZ) که به لایه ذخیره‌سازی حرارت نیز موسوم است، سنگین‌ترین لایه از نظر چگالی آب نمک

1. Upper Convective Zone (UCZ)
2. Non-Convective Zone (NCZ)
3. Lower Convective Zone (LCZ)

۲. آزمایش تجربی

یک استخر آزمایشگاهی کوچک با سطح مقطع مربعی و با ارتفاع ۱/۱ متر و مساحت سطح 4 m^2 در دانشگاه ارومیه ساخته و تست شد. طرح‌واره‌ای از ساختار و ابعاد استخر ساخته شده در شکل (۲) نشان داده شده است. این استخر از ورق آهن گالوانیزه به ضخامت 20 mm ساخته شد. بدنه استخر با پشم شیشه به ضخامت 20 mm عایق گردید و بدنه داخلی و کف استخر به منظور بالا رفتن جذب حرارتی با رنگ مشکی پوشانده شد. لایه پایین استخر به ضخامت 80 cm با آب نمک با غلظت 300 (gr/l) پر شد و سپس با قرار دادن نازل تزریق آب در ارتفاع 40 cm از کف استخر، آب تازه با سرعت کم به داخل آب نمک تزریق شد و حین تزریق، نازل به سمت بالا حرکت داده شد تا لایه وسط نیز با ارتفاع 50 cm به صورت گرادپانی ایجاد شود. لایه سطحی نیز با آب تازه به ضخامت 20 cm پر شد. معمولاً برای ایجاد پایداری و جلوگیری از اختلاط لایه‌ها و حفظ مقدار غلظت آب نمک در لایه LCZ ، مقداری نمک دائماً از طریق لوله‌ای به کف استخر اضافه می‌شود. برای اندازه‌گیری دمای آب در استخر از ۱۲ سنسور دما با دقت $\pm 1^\circ \text{C}$ از کف تا سطح استخر با ارتفاع ۵، ۱۰ تا 110 cm با فاصله 10 cm از هم استفاده شد. یک داده‌نگار مقادیر دما در سنسورهای دما را در هر 10 min ثبت و ذخیره می‌کرد. نتایج برای مدت یکسال ثبت و آنالیز شده است.



شکل (۲): طرح‌واره‌ای از ساختار و ابعاد استخر خورشیدی ساخته شده

۳. مدل عددی استخر خورشیدی

در این مطالعه، از روش تفاضل محدود برای حل مدل یک‌بُعدی رفتار گذرای انتقال حرارت در استخر خورشیدی استفاده شده است. معادله کلی یک‌بُعدی و گذرای انتقال حرارت در جهت عمق استخر به صورت رابطه (۱) است:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_i - Q_o \quad (1)$$

عرض به ارتفاع) کمتر از ۴ صادق است و برای مقادیر بالاتر تأثیر چندانی در نتایج ندارد.

جعفرزاده مطالعه‌ای را با عنوان بررسی رفتار حرارتی استخر خورشیدی گرادپان نمک کوچک با در نظر گرفتن اثر سایه دیواره‌ها انجام داد و نشان داد که در بررسی عملکرد استخرهای خورشیدی، اثر سایه نقش مهمی می‌تواند داشته باشد. در این مطالعه، از شرایط مرزی ساده در آنالیز عددی استفاده شده و دمای لایه بالا برابر با دمای محیط در نظر گرفته شده است [۹].

اندروز و اکبرزاده در تحقیقی با عنوان افزایش راندمان گرمایی استخر خورشیدی با برداشت حرارت از NCZ ، روشی جایگزین برای برداشت حرارت از LCZ استخر خورشیدی معرفی و پیش‌بینی کردند که راندمان حرارتی استخر خورشیدی را می‌توان با برداشت حرارت از لایه NCZ نسبت به برداشت حرارت از LCZ تا حدود 50% افزایش داد [۱۰].

برنارد و همکاران رفتار حرارتی استخر خورشیدی گرادپان نمک را به صورت یک‌بُعدی و به روش ظرفیت کلی^۱ شبیه‌سازی و با نتایج تجربی اعتبارسنجی کردند [۱۱]. آن‌ها برای اعتبارسنجی نتایج عددی، اقدام به ساخت و تست استخر خورشیدی استوانه‌ای با مساحت سطح مقطع 50 m^2 در بارسلون اسپانیا کردند.

شایان ذکر است با توجه به اطلاعات نویسندگان، تاکنون مقاله‌ای که به صورت کامل تمام شرایط لازم برای مدل‌سازی انتقال حرارت در استخر خورشیدی را در نظر بگیرد و از روابط و ضرایب صحیح استفاده نماید، ارائه نشده است و تعدادی اشتباه تأثیرگذار در روابط و راه‌حل‌های ارائه شده وجود دارد [۱۲-۱۳]. لذا در این مقاله سعی شده است ضمن ارائه مدل عددی کامل و با در نظر گرفتن تمام جزئیات و شرایط لازم، روابط صحیح معرفی و استفاده شود. در مطالعه حاضر، برای آنالیز عملکرد حرارتی استخر خورشیدی کوچک در دوره ذخیره‌سازی انرژی حرارتی چون برداشت حرارت وجود ندارد و از افت حرارت از دیواره‌ها و کف به دلیل عایق‌کاری مناسب می‌توان صرف نظر کرد، از مدل یک بعدی حرارت برای آنالیز رفتار حرارتی استخر استفاده شده و دمای UCZ و LCZ نیز از بررسی معادلات بقای انرژی در این لایه‌ها به دست آمده است. برای اعتبارسنجی نتایج عددی از داده‌های تجربی که برای یک استخر خورشیدی مکعبی کوچک با مساحت سطح مقطع 4 m^2 در دانشگاه ارومیه ساخته و استخراج شد، استفاده شده است.

هوا در سطح استخر به صورت رابطه (۷) است [۱۶-۱۷]:

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_i - \theta_r)}{\sin^2(\theta_i + \theta_r)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_r)}{\tan^2(\theta_i + \theta_r)} \right] \quad (7)$$

رابطه بین زاویه برخورد (θ_i) و زاویه شکست (θ_r) پرتوی تابش به صورت رابطه (۸) است:

$$\sin \theta_i = n \sin \theta_r \quad (8)$$

که در آن n ضریب شکست است و برای آب مقدار آن $1/33$ می باشد. بنابراین، معادله شار تابش مستقیم در عمق استخر به صورت زیر است:

$$I_z(z, t) = I_0(t)h(z) = (1-R)I(t)h(z) \quad (9)$$

z عمق نقطه مورد نظر در استخر است. $h(z)$ که تابع بی‌بعد تضعیف تابش است که بیانگر نرخ تضعیف تابش خورشید در عمق استخر می باشد. بریانت و کولیک رابطه (۱۰) را به عنوان تابع تضعیف تابش ارائه دادند [۱۸]:

$$h(z) = 0.36 - 0.08 \ln[z / \cos \theta_r] \quad (10)$$

۲.۳. مساحت سطح مؤثر تابش

در استخرهای خورشیدی کوچک با دیوارهای جانبی عمودی، اثر سایه دیوارها بسیار مهم است و این اثر باید در مدل سازی لحاظ شود. انرژی تشعشعی جذب شده توسط حجم آب نمک مابین عمق های z_1 و z_2 ، با رابطه (۱۱) محاسبه می شود:

$$I_0 \left[h(z_1) (A_e + \xi A_{sh})_{z_1} - h(z_2) (A_e + \xi A_{sh})_{z_2} \right] \quad (11)$$

که در آن A_e مساحت مؤثر تابش و A_{sh} مساحت تحت اثر سایه هستند و ξ کسری از تابش مستقیم است که به دلیل برگشت از دیوارها و کف استخر به شکل تابش پراکنده در سطح تحت اثر سایه جذب می شود. از آنجا که در مراجع برای ξ مقادیر 10% تا 40% پیشنهاد شده [۱۸]، در این مطالعه به دلیل تمیزی آب استخر، 30% در نظر گرفته شده است.

برای یک استخر مربعی شکل با L (طول)، W (عرض) و A (مساحت سطح مقطع) که در شکل (۳) نشان داده شده، مساحت سطح اثر سایه به صورت رابطه (۱۲) است [۹]:

$$A_{sh} = Ll' \sin \alpha + Wl' \cos \alpha - l'^2 \sin \alpha \cos \alpha \quad (12)$$

زاویه α از رابطه (۱۳) به دست می آید:

$$\alpha = |\varphi - \gamma| \quad (13)$$

φ و γ به ترتیب زاویه گرا^۱ و زاویه قرارگیری استخر (زاویه بین امتداد خط رو به جنوب و خط عمود بر صفحه منطبق بر عرض استخر) است.

که در آن ρ چگالی سیال، C_p گرمای ویژه سیال و k ضریب هدایت حرارتی سیال هستند. همچنین مقدار انرژی حرارتی ورودی و مقدار انرژی حرارتی خروجی از استخر خورشیدی به صورت زیر می باشد.

فرضیات زیر در مدل سازی عددی در نظر گرفته شده است:

۱. هر دو لایه جابه جایی بالا و پایین به صورت کاملاً مخلوط اند و

دما و غلظت یکنواختی دارند؛ یعنی $(\frac{\partial T}{\partial t}) = 0$ و $(\frac{\partial C}{\partial t}) = 0$ ، از این رو

رابطه (۱) برای این دو لایه به صورت رابطه (۲) نوشته می شود:

$$\rho C_p A Z \frac{\partial T}{\partial t} = Q_i - Q_o \quad (2)$$

که در آن A و Z به ترتیب مساحت سطح و ضخامت لایه مورد نظر و Q_i و Q_o انرژی ورودی به و خروجی از لایه به صورت (w/m^2) می باشد.

۲. افت حرارت از سطح استخر به صورت انتقال حرارت

جابه جایی، تبخیری و تشعشعی است و از افت حرارت از دیوارها به دلیل فرض عایق بودن آن ها صرف نظر می شود.

۳. تمام تابش رسیده به سطح لایه جابه جایی پایین کاملاً در این

لایه جذب می شود [۹].

۴. خواص فیزیکی آب نمک به صورت تابعی از دما و غلظت

نمک در نظر گرفته شده و از روابط (۳)، (۴) و (۵) محاسبه می شوند [۱۴-۱۵]:

$$k = 0.5553 - 0.0000813C + 0.0008(T - 20) \quad (3)$$

$$\rho = 998 + 0.65C - 0.4(T - 20) \quad (4)$$

$$C_p = 4180 + 4.396C + 0.0048C^2 \quad (5)$$

که واحد دما (T) در این روابط $^{\circ}C$ و واحد غلظت نمک (C)، (kg/m^3) می باشد.

۵. به عنوان شرط اولیه، دما در تمام عمق استخر همدمای محیط در

ماه شروع کار استخر یعنی ماه ژانویه فرض می شود.

۱.۳. روابط تابش در استخر خورشیدی

موقعی که تابش خورشید (I) به سطح استخر می رسد، قسمتی از آن به سمت آسمان برگشت می خورد و باقی مانده آن به داخل استخر نفوذ می کند. مقدار باقی مانده تابش از رابطه (۶) به دست می آید:

$$I_0 = (1-R)I \quad (6)$$

با توجه به معادله فریزنل^۱، ضریب برگشت از سطح مشترک آب-

زیر نوشته می شود:

$$\rho C_p A Z_U \frac{\partial T_U}{\partial t} = Q_{solar,UCZ} + Q_{NCZ/UCZ} - Q_U \quad (20)$$

که انرژی تابشی جذب شده در حجم کنترل بالا به صورت وات است:

$$Q_{solar,UCZ} = A I_0 - (A_e + \xi A_{sh})_{x_w} I_0 h(Z_U) \quad (21)$$

انرژی انتقال هدایتی از NCZ به UCZ به صورت رابطه (۲۲)

می شود:

$$Q_{NCZ/UCZ} = k_w A_{UCZ/NCZ} \frac{T_{NCZ} - T_{UCZ}}{\Delta Z} \quad (22)$$

در معادله (۲۰)، افت حرارت از سطح استخر خورشیدی از طریق

مکانیزم های انتقال حرارت تشعشعی، جابه جایی و تبخیری است:

$$Q_U = Q_{rad} - Q_{conv} - Q_{evap} \quad (23)$$

افت حرارت تشعشعی از رابطه (۲۴) تعیین می شود:

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A_s \left[(T_U)^4 - (T_{sky})^4 \right] \quad (24)$$

که در آن، ε ضریب نشر آب است و مقدار آن 0.83 فرض می شود و σ ثابت استفن-بولتزمن است [۱۱]. دمای آسمان، T_{sky} ، از رابطه

(۲۵) محاسبه می شود [۱۲]:

$$T_{sky} = T_a \left(0.55 + 0.061 \sqrt{P_a} \right)^{0.25} \quad (25)$$

افت حرارت جابه جایی از رابطه (۲۶) تعیین می شود:

$$Q_{conv} = h_c A_s (T_U - T_a) \quad (26)$$

که در آن ضریب انتقال حرارت جابه جایی از رابطه (۲۷) تعیین می شود [۱۹]:

$$h_c = 5.7 + 3.8 U \quad (W / m^2 \text{ } ^\circ C) \quad (27)$$

که در این رابطه U سرعت باد در ارتفاع 2 m از سطح استخر است.

افت حرارت تبخیری از رابطه (۲۸) تعیین می شود [۱۲]:

$$Q_{evap} = \left(\frac{L h_c}{1.6 C_p P_{atm}} \right) (P_s - P_a) A_s \quad (28)$$

که فشار بخار آب، P_s ، در دمای سطح، T_s ، به صورت رابطه (۲۹) محاسبه می شود:

$$P_s(T) = \exp \left(18.403 - \frac{3885}{T_U + 230} \right) \quad (29)$$

فشار جزئی بخار آب در هوای محیط، P_a ، نیز از رابطه (۳۰)

تعیین می شود:

$$P_a = R_h \exp \left(18.403 - \frac{3885}{T_a + 230} \right) \quad (30)$$

که در آن رطوبت نسبی، R_h ، نسبت $P_a / P_s(T_a)$ است.

$$\varphi = \text{Sin} \left[\frac{\text{Cos} \delta \text{Sin} \omega}{\text{Cos} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_i \right)} \right] \quad (14)$$

δ و ω به ترتیب زاویه میل خورشید و زاویه ساعت است:

$$\delta = 23.45 \text{Sin} \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (15)$$

n چندمین روز سال میلادی است که شمارش از اول ژانویه آغاز

می شود.

$$\omega = \frac{360}{24} (h_s - 12) \quad (16)$$

h_s ساعت محلی خورشید است که نسبت به محل خورشید

محاسبه می شود. ساعت ۱۲ ظهر محلی خورشیدی زمانیکه خورشید

در بالاترین نقطه آسمان قرار دارد و عمود می تابد، مبدأ محسوب

می شود. این زاویه برای قبل ساعت ۱۲ خورشیدی منفی و بعد این

ساعت مثبت است. زاویه عرض جغرافیایی برای نیمکره شمالی مثبت

و برای نیمکره جنوبی منفی است. زاویه طول جغرافیایی برای نیمکره

شرقی مثبت و برای نیمکره غربی منفی است.

l' از رابطه (۱۷) محاسبه می شود:

$$l' = z \times \tan \theta_r \quad (17)$$

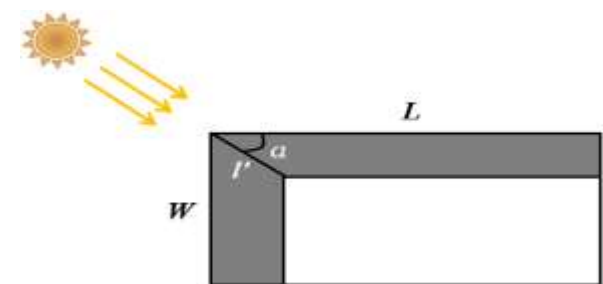
بنابراین مساحت سطح مؤثر تابش عبارت است از:

$$A_e(z) = A - A_{sh} = LW - A_{sh} \quad (18)$$

در نتیجه ضریب سایه برای استخر مستطیلی شکل به صورت رابطه

(۱۹) محاسبه می شود:

$$S(z) = \frac{A_e(z)}{A} = 1 - \left[\frac{l'}{W} \sin \alpha + \frac{l'}{L} \cos \alpha - \frac{l'^2}{LW} \sin \alpha \cos \alpha \right] \quad (19)$$



شکل (۳): سطح مؤثر و سطح سایه در استخر مربعی

۳.۳. معادله انرژی برای لایه جابه جایی بالا (UCZ)

دما در لایه UCZ، (T_U) ، یکنواخت و یکسان فرض می شود و برای

به دست آوردن مقدار آن، معادله بقای انرژی برای این لایه به صورت

کسر تابش مستقیم به تابش پراکنده، A_e ، A_{sh} به ترتیب مساحت سطح مؤثر و سایه (m^2)، I_0 تابش ورودی به سطح استخر (W/m^2)، h تابع تضعیف تابش، Z_U ، Z_N به ترتیب ضخامت لایه UCZ و NCZ است.

انرژی انتقال هدایتی از LCZ به NCZ به صورت زیر است:

$$Q_{LCZ/NCZ} = k_w A_{LCZ/NCZ} \frac{T_{LCZ} - T_{NCZ}}{\Delta Z} \quad (36)$$

انرژی اتلافی از کف استخر به صورت رابطه (۳۷) است:

$$Q_{ground} = U_g A (T_L - T_g) \quad (37)$$

برای دوره ذخیره سازی انرژی حرارتی استخر خورشیدی، مقدار برداشت از استخر خورشیدی وجود ندارد، لذا:

$$Q_{ext} = 0 \quad (38)$$

۶.۳. حل عددی

از دو معادله انرژی برای UCZ و LCZ، به عنوان شرایط مرزی برای حل معادله انرژی در NCZ استفاده شده است. دمای UCZ و LCZ به فرم غیردیفرانسیلی به صورت رابطه (۳۹) نوشته می شوند:

$$T_U^{t+1} = \frac{\Delta t}{\rho_U C_{pU} Z_U} \left\{ I_0 - \left(\frac{A_e + \xi A_{sh}}{A} \right)_{Z_U} \right\} I_{Z_U}^n + k_U \frac{T_2' - T_U' - \frac{Q_U'}{A}}{\Delta Z} \left\{ + T_U' \right. \quad (39)$$

$$T_L^{t+1} = \frac{\Delta t}{\rho_L C_{pL} Z_L} \left\{ \left(\frac{A_e + \xi A_{sh}}{A} \right)_{Z_U + Z_N} \right\} I_{Z_U + Z_N}^n - k_L \frac{T_L' - T_M' - U_g (T_L' - T_g')}{\Delta Z} \left\{ + T_L' \right. \quad (40)$$

در ادامه، معادله (۳۳) با در نظر گرفتن معادلات (۳۹) و (۴۰) به عنوان شرایط مرزی حل و با استفاده از الگوریتم نوشته شده در نرم افزار متلب حل شده است.

۴. نتایج و بحث

۱.۴. مقایسه مقادیر حاصل از مدل سازی عددی و نتایج

تجربی برای دمای LCZ

برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از حل گذرا (بدون برداشت حرارت)، استخری با مساحت سطح مقطع ۴ مترمربع و ضخامت NCZ، UCZ و LCZ به ترتیب ۰/۲ و ۰/۵ و ۰/۴ متر شبیه سازی شده است. داده های هواشناسی در طول سال برای شهر ارومیه در جدول (۱) آورده شده است [۲۰].

۴.۳. معادله انرژی برای لایه گرادیانی (NCZ)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(c, T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + E(Z, t) \quad (31)$$

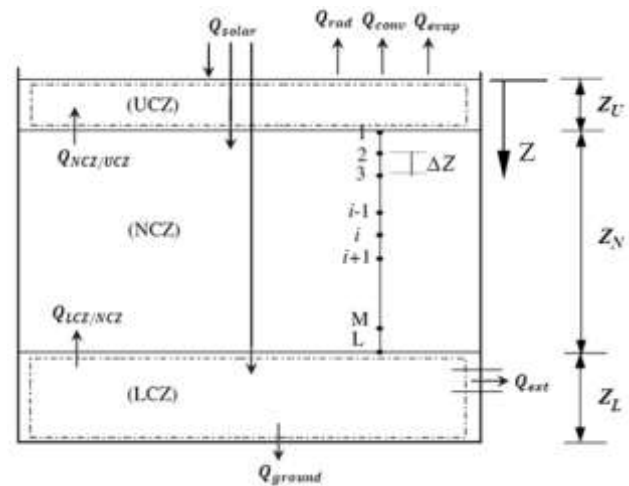
که در آن $E(Z, t)$ ، به صورت (W/m^3) ، انرژی تابشی جذب شده است:

$$E(Z, t) = - \frac{d}{dz} \left[\frac{A_e + \xi A_{sh}}{A} I_z(z, t) \right] \quad (32)$$

معادله انرژی در این لایه را می توان به معادله انرژی چندین زیرلایه تقسیم کرد و به صورت رابطه (۳۳) نوشت:

$$T_i^{t+1} = \left(\frac{\Delta t}{\rho_i C_{pi} \Delta Z A} \right) \times \{ (k_i A / \Delta Z) \times [(T_{i+1}' - T_i') + (T_{i-1}' - T_i')] + (A_e + \xi A_{sh})_{i+1} I_{i+1} - (A_e + \xi A_{sh})_i I_i \} + T_i' \quad (33)$$

با توجه به شکل (۴)، لایه NCZ به ۱۰ زیرلایه با عرض هر لایه $\Delta Z = 0.05m$ تقسیم می شود. همچنین گام زمانی، ۱ ساعت (۳۶۰۰ ثانیه) لحاظ شده است.



شکل (۴): تقسیم بندی لایه NCZ و حجم کنترل های UCZ و LCZ

۵.۳. معادله انرژی برای لایه جابه جایی پایین (LCZ)

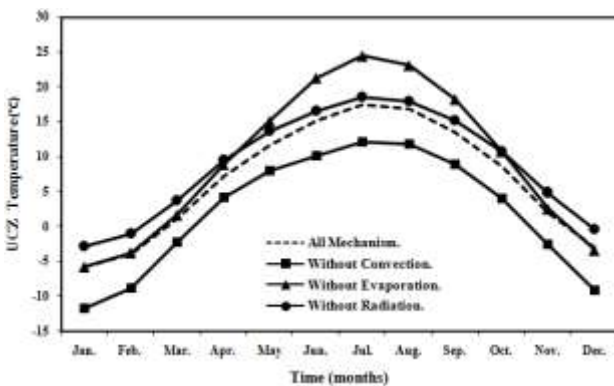
دما در لایه LCZ، (T_L) ، یکنواخت و یکسان فرض می شود و برای به دست آوردن مقدار آن، معادله بقای انرژی برای این لایه به صورت رابطه (۳۴) نوشته می شود:

$$\rho C_p A Z_L \frac{\partial T_L}{\partial t} = Q_{solar, LCZ} - Q_{LCZ/NCZ} - Q_{ground} - Q_{ext} \quad (34)$$

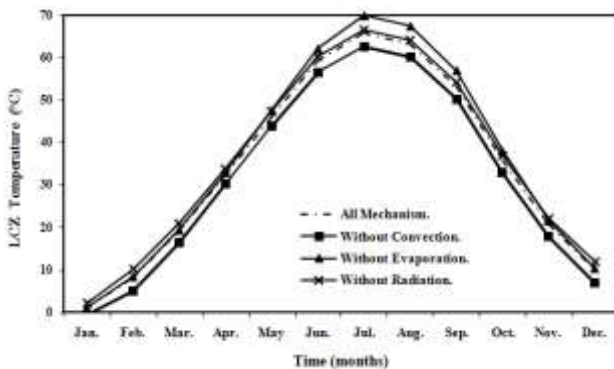
که $Q_{solar, LCZ}$ انرژی تابشی ورودی به حجم کنترل پایین است:

$$Q_{solar, LCZ} = (A_e + \xi A_{sh})_{Z_U + Z_N} I_0 h(Z_U + Z_N) \quad (35)$$

از طریق تشعشع و جابه‌جایی است و همچنین در صورت نادیده گرفتن افت تشعشعی، تغییر چندانی در دمای LCZ مشاهده نمی‌شود که نشان‌دهنده تأثیر کم افت تشعشعی در دمای استخر می‌باشد.



شکل (۶): تغییرات دمای UCZ با تلفات مختلف از سطح استخر



شکل (۷): تغییرات دمای LCZ با تلفات مختلف از سطح استخر

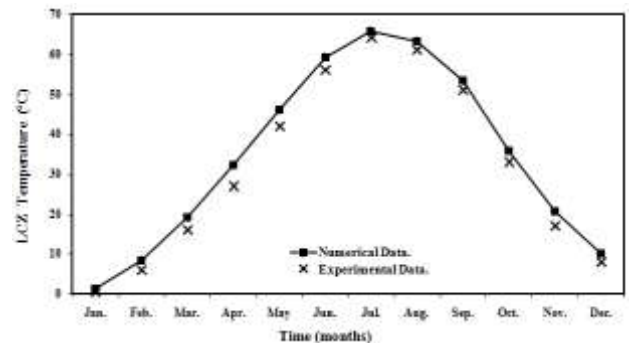
۳.۴. بررسی تأثیر دمای UCZ بر دمای LCZ

برخی از پژوهشگران در بررسی عملکرد استخر خورشیدی برای ساده‌سازی، دمای UCZ را برابر دمای محیط در نظر می‌گیرند [۷ و ۱۰]. این در حالی است که با به‌کاربردن معادله بقای انرژی برای UCZ و به‌دست‌آوردن دمای آن، مشاهده می‌شود که با توجه به شکل (۸)، دمای UCZ کمتر از دمای محیط است. در شکل (۹)، تأثیر دمای UCZ در دمای LCZ نشان داده شده است. با توجه به شکل (۹)، مشخص می‌شود که در حل گذرا با فرض دمای UCZ برابر با دمای محیط، دمای LCZ بیشتر از مقادیر دمای ثبت‌شده تجربی به دست آمده است. لذا بهتر است در مدل‌سازی عددی دمای UCZ از رابطه انرژی مربوطه محاسبه شود.

شکل (۵) مقایسه تغییرات دمای LCZ حاصل از مدل‌سازی عددی و داده‌های تجربی را نشان می‌دهد. با مقایسه داده‌های تجربی و عددی مشخص می‌شود که سازگاری خوبی بین نتایج وجود دارد و اختلاف کمی هم که بین نتایج مشاهده می‌شود، می‌تواند ناشی از انتخاب ضرایب لازم برای محاسبات باشد.

جدول (۱): داده‌های هواشناسی شهر ارومیه [۲۰]

Months	تابش در سطح (W/m^2)	دمای هوا ($^{\circ}C$)	سرعت باد (m/s)	رطوبت نسبی (%)
Jan.	۱۰۵	-۳/۵۲	۳/۸۵	۸۴/۱
Feb.	۱۴۴/۱۷	-۲/۲۲	۴/۱۷	۸۰/۶
Mar.	۱۸۹/۱۷	۲/۳۹	۴/۴۹	۷۲/۵
Apr.	۲۲۳/۳۳	۹/۰۲	۴/۶۷	۶
May	۲۶۷/۵	۱۴/۵	۴/۶۳	۴۷/۲
Jun.	۳۱۸/۳۳	۲۰/۱	۵/۲۶	۳۴/۶
Jul.	۳۱۳/۳۳	۲۳/۲	۶/۴۵	۳۵/۳
Aug.	۲۸۴/۱۶	۲۲	۶/۲۷	۳۸/۱
Sep.	۲۳۴/۱۷	۱۷/۷	۴/۹۵	۴۱/۲
Oct.	۱۳۱/۶۷	۱۱/۶	۴/۲۸	۵۴/۱
Nov.	۱۰۹/۱۷	۴/۰۹	۳/۷۱	۷۲/۷
Dec.	۸۸/۷۵	-۱/۳۴	۳/۶۹	۸۱/۸



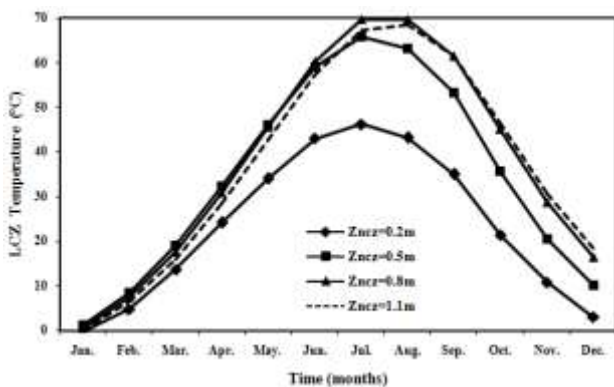
شکل (۵): اعتبارسنجی توزیع دمای LCZ در مدل حاضر با داده‌های تجربی

۲.۴. بررسی تأثیر افت حرارت از سطح استخر بر دمای

UCZ و LCZ

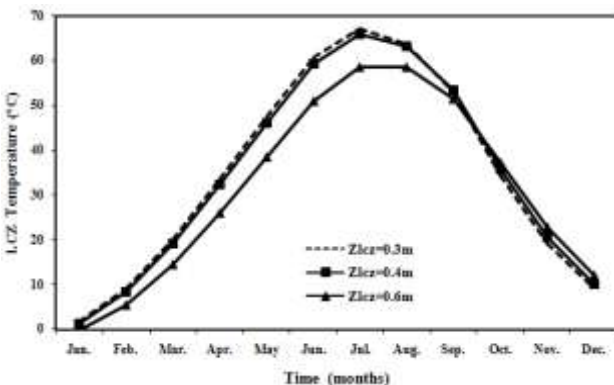
نرخ حرارت اتلافی از سطح استخر نقش مهمی در عملکرد حرارتی استخر خورشیدی دارد. تلفات حرارتی از طریق مکانیسم‌های جابه‌جایی، تبخیر و تشعشع صورت می‌گیرد. برای مقایسه تأثیر تلفات حرارتی از UCZ، در هر مرحله، اثر یکی از تلفات حرارتی حذف و تأثیر آن بر روی دمای UCZ و LCZ بررسی شده است. با مشاهده شکل (۶) و شکل (۷)، مشخص است که تأثیر تلفات از طریق تبخیر بیشتر از تلفات

چراکه با افزایش ضخامت از ۰/۲ m به ۰/۵ m دمای LCZ، ۲۰°C افزایش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش ضخامت NCZ به ۰/۸ m، دما حدود ۱۱°C افزایش می‌یابد و سپس با افزایش ضخامت تا ۱/۱ m، دمای LCZ تا ماه Aug کمتر از دما در ضخامت ۰/۸ m می‌باشد و در ماه‌های پایانی سال، دمای LCZ در ضخامت ۱/۱ m اندکی بیشتر از دما برای ضخامت ۰/۸ m است. این به دلیل آن است که با افزایش ضخامت NCZ، میزان تابش رسیده به LCZ کاهش یافته و دمای استخر در ماه‌های ابتدایی دیرتر گرم می‌شود و در ماه‌های پایانی سال دیرتر سرد می‌شود.

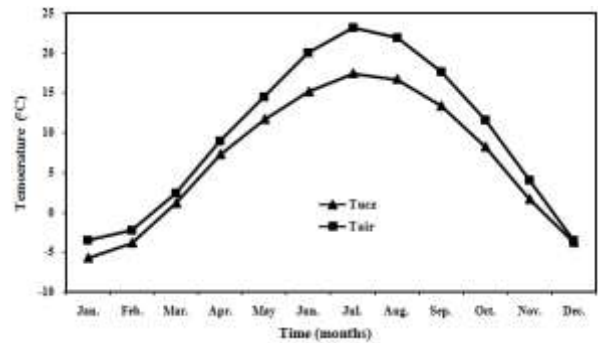


شکل (۱۱): تأثیر ضخامت NCZ در دمای LCZ

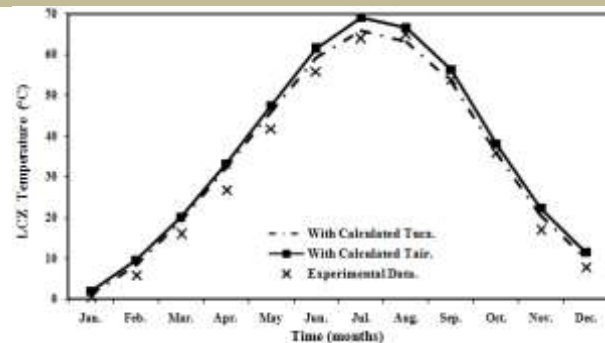
تأثیر تغییر ضخامت LCZ در دمای این لایه در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در ماه‌های گرم، چون به تدریج تابش خورشید زیاد می‌شود و اگر ضخامت LCZ کم باشد، تابش خورشید زودتر در دمای آن اثر گذاشته و دمای آن نسبت به حالتی که ضخامت LCZ زیاد باشد، بیشتر می‌شود. در ماه‌های سرد سال به دلیل کمتر شدن میزان تابش و پایین آمدن دمای محیط، LCZ با ضخامت بیشتر خود را دیرتر از دست داده و در نتیجه دمای آن نسبت به حالتی که ضخامت LCZ کم است، زیاد می‌شود.



شکل (۱۲): تأثیر ضخامت LCZ در دمای LCZ



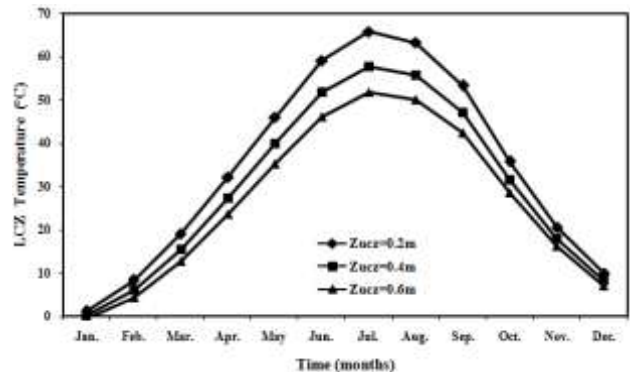
شکل (۸): تغییرات دمای محیط و دمای محاسبه شده UCZ



شکل (۹): تغییرات دمای LCZ با دمای محاسبه شده UCZ و با فرض دمای UCZ برابر دمای محیط

۴.۴. بررسی اثر تغییر ضخامت لایه‌های استخر بر دمای LCZ

در شکل (۱۰)، تأثیر تغییر ضخامت UCZ در دمای LCZ نشان داده شده است. از نتایج به دست آمده مشخص شد که با افزایش ضخامت UCZ، دمای LCZ کاهش می‌یابد. بنابراین برای به حداکثر رساندن دمای LCZ ضخامت UCZ تا حد ممکن باید کمتر انتخاب شود.



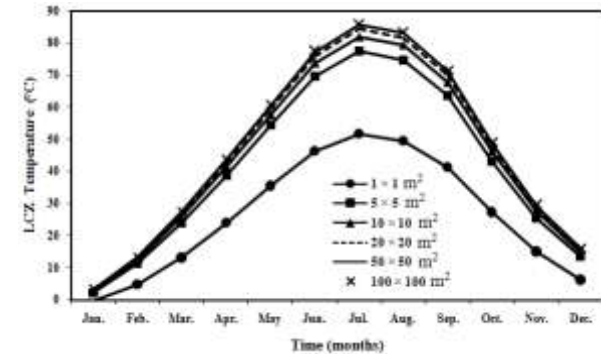
شکل (۱۰): تأثیر ضخامت UCZ در دمای لایه LCZ

در شکل (۱۱)، تأثیر تغییر ضخامت NCZ در دمای LCZ نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت NCZ، دمای LCZ افزایش می‌یابد. این افزایش دما به این دلیل است که NCZ با ضخامت بیشتر به عنوان عایق حرارتی برای عمل کرده و از تلفات حرارتی به محیط از سطح استخر جلوگیری می‌کند. افزایش دمای LCZ با افزایش ضخامت NCZ نسبت خطی ندارد؛

۵.۴ بررسی تغییرات دمای LCZ در استخر نمونه با ضخامت‌های

بهینه لایه‌ها

با بررسی پارامتریک تأثیر تغییر ضخامت لایه‌های مختلف استخر بر دمای لایه ذخیره در استخر نمونه ساخته شده، مقادیر ضخامت‌های بهینه هر یک از لایه‌ها برای دستیابی به دمای حداکثر به دست آمده است. سپس با اندازه ضخامت‌های ۰/۲، ۰/۸ و ۰/۴ به ترتیب برای LCZ، NCZ و UCZ، تغییرات دمای لایه LCZ به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که با ضخامت‌های بهینه، هم دمای حداکثر افزایش یافته و هم دمای لایه ذخیره در ماه‌های سرد بیشتر شده است.



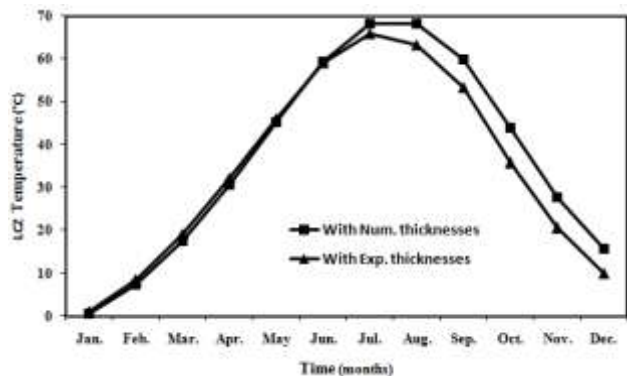
شکل (۱۴): تأثیر اندازه سطح استخر بر دمای LCZ

۷.۴ بررسی موردی اثر اندازه استخر بر دمای LCZ

برای مقایسه موردی تأثیر اندازه استخر در دمای LCZ، ۲ استخر ساخته شده در منطقه ال پاسو^۱ و کشور کولمبیا به ترتیب با مساحت سطح مقطع 3000 m^2 و 8 m^2 مورد بررسی قرار گرفت [۹]، داده‌های هواشناسی برای بررسی این ۲ استخر در جدول‌های (۳) و (۴) آورده شده است. با مشاهده شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نتیجه می‌شود که در استخرهای با مساحت سطح مقطع کوچک، تأثیر سایه زیاد بوده ولی در استخرهای با مساحت سطح مقطع بزرگ‌تر، تأثیر سایه خیلی کم است؛ به عبارت دیگر می‌توان گفت در استخرهای با سطح مقطع بزرگ می‌توان از تأثیر سایه چشم‌پوشی کرد، ولی در استخرهای با سطح مقطع کوچک باید تأثیر سایه در دمای LCZ حتماً لحاظ شود.

جدول (۳): داده‌های هواشناسی استخر ال پاسو [۹]

T_a (°C)	I_o (W/m^2)	Month S	T_a (°C)	I_o (W/m^2)	Month S
۲۷/۹	۲۹۸/۳۱	Jul.	۶	۱۴۱/۱۳	Jan.
۲۶/۷	۲۷۴/۰۴	Aug.	۸/۹	۱۹۳/۹۶	Feb.
۲۳/۶	۲۴۵/۷۶	Sep.	۱۲/۸	۲۳۷/۸۳	Mar.
۱۱/۸	۱۹۷/۵۱	Oct.	۱۷/۴	۲۹۵/۵۲	Apr.
۱۱/۳	۱۵۸/۱۸	Nov.	۲۲/۱	۳۱۴/۵۲	May
۶/۷	۱۲۸/۸۱	Dec.	۲۶/۹	۳۳۳/۳۳	Jun.



شکل (۱۳): تغییرات دمای LCZ برای استخر نمونه در شهر ارومیه

۶.۴ بررسی اثر سایه دیوارهای جانبی بر دمای LCZ

برای بررسی تأثیر سایه دیوارها در دمای LCZ، مساحت سایه و مساحت سطح مؤثر و ضریب سایه، برای اندازه‌های مختلف استخر محاسبه شده است. جدول (۲) و شکل (۱۴)، تأثیر سطح اثر سایه و دمای LCZ استخر با مقطع مربع را نشان می‌دهند. با توجه به جدول (۲)، مشخص است که هرچه قدر اندازه سطح مقطع بزرگ‌تر می‌شود، مساحت مؤثر تابش بیشتر شده و در نتیجه دمای LCZ بیشتر می‌شود.

جدول (۲): دمای محاسبه‌شده LCZ در اندازه‌های مختلف سطح مقطع

استخر برای ماه جولای

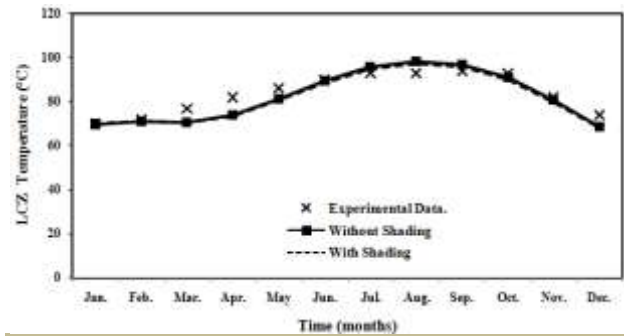
T_{LCZ} (°C)	$S = \frac{A_e}{A}$ (%)	A_e (m^2)	A_{sh} (m^2)	A (m^2)	ابعاد
۶۵/۸۱	۶۲/۹۳	۲/۵۲	۱/۴۸	۴	۲ × ۲
۷۷/۳۳	۸۴/۶	۲۱/۱۶	۳/۸۴	۲۵	۵ × ۵
۸۱/۸۵	۹۲/۲۲	۹۲/۲۲	۷/۷۸	۱۰۰	۱۰ × ۱۰
۸۴/۲۷	۹۶/۰۹	۳۸۴/۳۵	۱۵/۶۵	۴۰۰	۲۰ × ۲۰
۸۵/۷۷	۹۸/۴۳	۲۴۶۰/۷۵	۳۹/۲۵	۲۵۰۰	۵۰ × ۵۰
۸۶/۲۷	۹۹/۲۱	۹۹۲۱/۴	۶۷/۸	۱۰۰۰۰	۱۰۰ × ۱۰۰

بررسی پارامتریک رفتار حرارتی استخر خورشیدی گرادیان نمک برای وضعیت... ۷۱

ذخیره برای ضخامت‌های مختلف لایه‌های سطحی، گرادایانی و ذخیره بررسی شده است. از نتایج حاصل مشخص شد که ضخامت UCZ تا حد امکان باید کمتر باشد و ضخامت NCZ نباید از یک مقداری کمتر باشد، چون این لایه که نقش عایق برای LCZ را دارد با کاهش ضخامت آن، تلفات حرارت از لایه‌های بالا و سطح استخر زیاد می‌شود و در نتیجه دمای LCZ افت می‌کند و همچنین ضخامت NCZ نباید از یک مقداری افزایش یابد؛ چراکه با افزایش ضخامت NCZ، میزان تابش رسیده به LCZ کاهش و در نتیجه دمای آن کم می‌شود. با بررسی تأثیر تغییر ضخامت لایه‌های استخر بر عملکرد استخر نمونه و استخراج اندازه‌های بهینه ضخامت‌ها، چگونگی تغییرات دمای LCZ با ضخامت‌های بهینه به دست آمد. از نتایج به دست آمده مشخص شد که دمای حداکثر LCZ با ضخامت‌های بهینه افزایش یافته است. در این مطالعه، اثر سایه دیوار نیز به عنوان یک پارامتر بسیار مهم در عملکرد استخر خورشیدی بررسی شده و نتیجه حاکی از آن است که اثر سایه دیوارها در عملکرد استخرهای کوچک بسیار زیاد است و باید در مدل‌سازی استخرهای کوچک حتماً لحاظ شود، ولی در استخرهای بزرگ، اثر سایه دیوارها تأثیر چندانی در دمای LCZ ندارد.

فهرست علائم

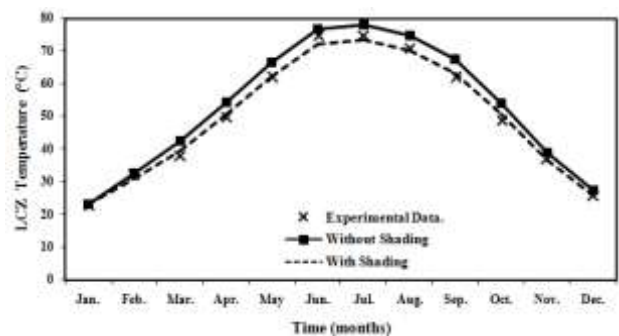
C_p	گرمای ویژه سیال ($J/kg^{\circ}C$)
T	دما ($^{\circ}C$)
Q	حرارت
k	ضریب هدایت حرارتی
C	غلظت نمک (Kg/m^3)
I_0	تابش ورودی به سطح استخر
R	ضریب برگشت تابش
n	ضریب شکست
h	تابع تضعیف تابش
A	مساحت
A_{sh}	مساحت سایه
A_e	مساحت مؤثر
h_c	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($W/m^2^{\circ}C$)
P_a	فشار جزئی بخار آب در هوای محیط
P_s	فشار بخار آب در دمای سطح استخر
R_h	رطوبت نسبی



شکل (۱۵): مقایسه تغییرات دمای LCZ حاصل از حل عددی با اثر سایه و بدون اثر سایه با داده‌های تجربی استخر الپاسو

جدول (۴): داده‌های هواشناسی استخر کویت [۱۰]

T_a ($^{\circ}C$)	I_o (W/m^2)	Months	T_a ($^{\circ}C$)	I_o (W/m^2)	Months
۳۷/۶	۳۰۸/۰۶	Jul.	۱۲/۶	۱۲۸/۸۱	Jan.
۳۷/۲	۲۸۷/۵	Aug.	۱۴/۶	۱۸۲/۳۳	Feb.
۳۳/۶	۲۵۶/۶۷	Sep.	۱۹/۱	۲۰۳/۶۳	Mar.
۲۸/۱	۱۹۰/۳۲	Oct.	۲۵/۹	۲۴۳/۳۳	Apr.
۲۰/۵	۱۳۵	Nov.	۳۲	۲۸۲/۶۶	May
۱۴/۷	۱۰۶/۸۵	Dec.	۳۵/۷	۳۲۸/۷۵	Jun.



شکل (۱۶): مقایسه تغییرات دمای LCZ حاصل از حل عددی با اثر سایه و بدون اثر سایه با داده‌های تجربی استخر کویت

۵. جمع‌بندی

در این مطالعه، برای آنالیز رفتار حرارتی استخر خورشیدی در شرایط آب‌وهوایی شهر ارومیه، از یک مدل عددی تفاضل محدود استفاده شده است. در این مطالعه، برخلاف اکثر مقالات که برای مدل‌سازی رفتار حرارتی استخر، دمای UCZ را برابر دمای محیط لحاظ می‌کنند، دمای این لایه از بررسی معادله بقای انرژی مربوط به دست آمده و تأثیر انواع افت‌های حرارت از سطح استخر بر دمای UCZ و LCZ نشان داده شده است. با توجه به تفاوت بین دمای محیط و دمای UCZ، نتیجه مهمی که حاصل شد این است که باید در مدل‌سازی استخر خورشیدی، دمای UCZ به طور دقیق از معادله انرژی محاسبه شود. همچنین دمای لایه

σ	ثابت استفن - بولتزمن	E	انرژی تابشی جذب شده
φ	زاویه گرا	ΔZ	ضخامت هر المان
	زیرنویس ها	h_s	ساعت محلی خورشید
e	مؤثر	n	چندمین روز میلادی
sh	سایه	W	عرض استخر
i	ورودی	Z	ضخامت لایه مورد نظر
o	خروجی	z	ارتفاع نقطه مورد نظر
rad	تشدیدی		علائم یونانی
$conv$	همرفتی	γ	زاویه قرارگیری استخر
$evap$	تبخیری	δ	زاویه میل خورشید
sky	آسمان	θ	زاویه تابش
$ground$	زمین	ξ	کسر تابش مستقیم به تابش پراکنده
ext	برداشت	ε	ضریب نشر آب
s	سطح استخر	ω	زاویه ساعت
		ρ	چگالی (Kg / m^3)

مراجع

- [1] Sukhatme, K., Sukhatme, S. P., "Solar Energy Principles of Thermal Collection And Storage", New Delhi, Tata McGraw-Hill, pp. 150-170 1996.
- [2] Duffie, J.A., Beckman, W. A., "Solar Engineering of Thermal Processes", New Jersey, John Wiley and Sons, Vol. 3, pp. 325-350, 2006.
- [3] Tabor, H.A., Weinberger, Z., "Non-Convecting Solar Ponds, Solar Energy Handbook", New York: McGraw-Hill, pp. 45-56, 1980.
- [4] Hawlader, M. N., Brinkworth, B. J., "An Analysis of The Non-Convecting Solar Pond", Solar Energy, Vol. 27, No. 3, pp. 195-204, 1981.
- [5] Munoz, F., Almanza, R., "A Survey of Solar Pond Developments", Energy, Vol. 17, No. 10, pp. 927-938, 1992.
- [6] Kurt, H., Halici, F., Binark, A. K., "Solar Pond Conception- Experimental And Theoretical Studies", Energy conversion and management, Vol.41, No. 9, pp. 939-951, 2000.
- [7] Wang, Y. F., Akbarzadeh, A., "A Study on the Transient Behavior of Solar Ponds," Energy, Vol. 7, No. 12, pp. 1005-1017, 1981.
- [8] EL-Refae, M. M., Akbarzadeh, R. R., Juwayhel, F., "Transient Performance of a Two-Dimensional Salt Gradeint Solar Ponds – A Numerical Study", International Journal of Energy Research, Vol. 20, pp. 713-731, 1996.
- [9] Jafarzadeh, M. A., "Thermal Behavior of Small Salinity- Gradeint Solar Pond with Wall shading Effect", solar Energy, Vol. 77, pp. 90-281, 2004.
- [10] Andrews, J., Akbarzadeh, A., "Enhancing the Thermal Efficiency of Solar Ponds by Extracting Heat from the Gradient Layer", Solar Energy, Vol. 78, No. 6, pp. 704-716, 2005.
- [11] Bernard, F., Casas, S., Gibert, O., Akbarzadeh, A., Cortina, j. l., Valderrama, C., "Salinity-Gradeint Solar Pond: Validation And Simulation Model", Solar Energy, Vol. 84, pp. 366-377, 2013.
- [12] Khalilian, M., Shahrooz, M., Abbaszadeh, M., "Erroneous Equations Used to Calculate Evaporation and Radiation Heat Losses From UCZ Layer in Solar Ponds", Solar Energy, Vol. 122, pp. 1425-8, 2015.
- [13] Khalilian, M., "Erroneous Equations Used of Assess the Performance of a Solar Pond", Energy Conversion and Management, Vol. 114, pp. 394-8, 2016.
- [14] Kaufmann, D. W., "Sodium Chloride: The Production and Properties of Salt and Brine", pp. 722-729, New York, Reinhold, 1971.
- [15] Perry, J. H., "Chemical Engineers Handbook", Vol. 27, No. 9, pp. 533, 1950.
- [16] Tabor, H., "Non-Convecting Solar Ponds. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical", Physical and Engineering Sciences, Vol. 295, No. 1414, pp. 423-433, 1980.

- [17] Duffie, J. A., Beckman, W. A., "*Solar Engineering of Thermal Processes*", New York: Wiley, 2013.
- [18] Bryant, H. C., Colbeck, I., "A *Solar Pond for London*", *Solar Energy*, Vol. 19, No. 3, pp. 321-2, 1977.
- [19] McAdams, W. H., "*Heat Transmission, third ed. McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo*", Japan, 1954.
- [20] *Surface Meteorology and Solar Energy, a Renewable Energy Resource*, Accessed on 10 November 2016; <https://eosweb.larc.nasa.gov>.