



مدل سازی اثرات متقابل تبخیر، احساس حرارتی و غلظت آلاینده کلر در یک استخر شنای سرپوشیده

سیدعلیرضا ذوالفقاری^{1*}، سیدمحمد هوشمند²، علی فوادالدینی²، پیمان ابراهیمی ناغانی³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی 97175-376، zolfaghari@birjand.ac.ir

چکیده

محیط استخرهای سرپوشیده به دلیل رطوبت بالا، دمای زیاد هوا و ترکیبات خطرناک حاوی کلر، محیطی ناسالم به شمار می‌رود. بنابراین برای طراحی سیستم تهویه مطبوع در استخرهای سرپوشیده، باید غلظت آلاینده‌ها، رطوبت نسبی و شرایط آسایش حرارتی به‌طور همزمان مورد توجه قرار گیرد. در تحقیق حاضر، رویکردی جدید برای مدل‌سازی همزمان فرآیند تبخیر آب، سطح غلظت کلر، احساس حرارتی افراد و میدان‌های دما و سرعت در یک استخر سرپوشیده با ابعاد قهرمانی ارائه شده است. در همین راستا، الگوریتمی جدید جهت اعمال شرایط مرزی تطبیقی برای سطح تماس آب و هوا در استخر توسعه یافته است. در استخر مذکور، هوا از طریق دریچه‌های نواری سقفی با دمای 35 درجه سلسیوس، رطوبت نسبی 30 درصد و نرخ تعویض هوای 4 بار در ساعت به محیط وارد می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که توزیع پارامترهای دما، رطوبت نسبی و غلظت آلاینده کلر به‌طور چشمگیری به ارتفاع از سطح استخر وابسته است. به طوری که مقدار متوسط حجمی برای شاخص رطوبت نسبی از کف تا ارتفاع نیم متری، حدود 62% است؛ در حالی که متوسط حجمی رطوبت نسبی در فضای اشغال شده حدود 50% می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از آن است که مقدار غلظت آلاینده کلر در فاصله نیم متری از سطح استخر، حدود 60% از مقدار متوسط آن در فضای اشغال شده بیشتر است. ضمن این که میدان دما و توزیع شاخص آسایش حرارتی نیز به طور چشمگیری به ارتفاع از سطح استخر وابستگی دارد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 فروردین 1395

پذیرش: 17 خرداد 1395

ارائه در سایت: 29 تیر 1395

کلید واژگان:

تهویه مطبوع

استخر شنای سرپوشیده

کیفیت هوای داخل

آسایش حرارتی

مدل سازی تبخیر

Modeling mutual effects of evaporation, thermal sensation and concentration of chlorine contaminant in an indoor swimming pool

Seyed Alireza Zolfaghari^{*}, Seyed Mohamad Hooshmand, Ali Foadaddini, Peyman Ebrahimi Naghani

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

* P.O.B. 97175-376, Birjand, Iran, zolfaghari@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 April 2016
Accepted 06 June 2016
Available Online 20 July 2016

Keywords:

Air conditioning
indoor swimming pool
indoor air quality
thermal comfort
evaporation modeling

ABSTRACT

Due to high humidity, high air temperature and hazardous compounds including chlorine, indoor swimming pools are called an unhealthy environment. Therefore, the pollutants' concentration, relative humidity and thermal comfort conditions must be simultaneously considered in designing the air conditioning systems of indoor swimming pools. In this study, a new approach has been presented for concurrent modeling of water evaporation mechanism, chlorine concentration level, occupants' thermal sensation and temperature and velocity fields in a championship-size indoor swimming pool. In this regard, a new algorithm has been developed in order to apply adaptive boundary conditions at water-air interface in the pool. In the mentioned pool, the air enters the environment through a linear ceiling diffuser at temperature of 35°C, relative humidity of 30% and air exchange rate of 4 times per hour. The results show that the distribution of temperature, relative humidity and concentration of chlorine contaminant are significantly dependent on the height from the water surface. So, the volumetric average of relative humidity from the floor to 0.5m height is about 62%; while the volumetric average of relative humidity in the occupied zone is about 50%. Moreover, results indicate that in the distance of floor to 0.5m height, the mean value of chlorine's concentration is about 60% larger than its mean value in the occupied zone. Also, the temperature field and distribution of thermal comfort index are significantly dependent on the height.

آلاینده‌گی¹ و مصرف انرژی امری ضروری است. برای تامین این شرایط، استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع رواج پیدا کرده است. بر این اساس،

1- مقدمه

در طراحی ساختمان‌ها توجه به شرایط مناسب از نقطه نظر دما، رطوبت،

¹ Contaminant

Please cite this article using:

S. A. Zolfaghari, S. M. Hooshmand, A. Foadaddini, P. Ebrahimi Naghani, Modeling mutual effects of evaporation, thermal sensation and concentration of chlorine contaminant in an indoor swimming pool, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 179-188, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

همکاران [9] در کشور اسپانیا 21 استخر و 230 نفر از کارکنان آن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تجربی ایشان نشان داد که در 85% استخرهای مورد بررسی، مقدار کلر موجود در هوا از مقدار مجاز 1.5 mgm^{-3} بیشتر بوده و این موضوع، کارکنان این استخرها را به مشکلاتی مانند سوزش چشم، خشکی و خارش پوست و بیماری‌های مربوط به گوش دچار کرده است.

پیش از این، تحقیقات صورت گرفته در زمینه استخرها، با هندسه‌های متنوعی صورت گرفته است و در هر پژوهش، استخری با شرایط خاص بررسی شده است. این پراکندگی حالات بررسی شده، باعث می‌شود تا مقایسه نتایج شرایط مدل‌سازی و یا آزمایشگاهی با یکدیگر بسیار دشوار باشد. در بررسی‌های صورت گرفته در مورد آسایش حرارتی در استخرها نیز از مدل‌هایی استفاده شده است که یا اثر رطوبت در آن‌ها بررسی نشده و یا مدل مورد نظر، ترکیبی از چند مدل مجزا می‌باشد [10]. همچنین تبخیر در استخرها به صورت یک مقدار ورودی ثابت از سطح آب به فضای مورد بررسی در نظر گرفته شده است و اثر فشار، سرعت و دما بر تبخیر نادیده گرفته شده است. همچنین کیفیت هوا و اثر جانمایی دریچه ورودی هوا بر آن نیز بررسی نشده است. با توجه به مطالب گفته شده، نیاز به مدل‌سازی یک استخر با هندسه استاندارد و همچنین بررسی کیفیت هوا و آسایش حرارتی بر اساس یک مدل آسایش حرارتی با در نظر گرفتن تأثیر پارامترهایی از جمله دما و سرعت بر تبخیر از سطح آب وجود خواهد داشت.

پیچیدگی فرآیند طراحی تهویه استخر به گونه‌ای است که در صورت کاهش کیفیت هوای داخل، به ناچار نیازمند افزایش سرعت تهویه خواهیم بود؛ با افزایش سرعت هوا، شرایط آسایش حرارتی در داخل استخر متأثر می‌شود و باید برای برقراری مجدد شرایط آسایش حرارتی، دمای آب استخر افزایش یابد. از سوی دیگر، افزایش دمای آب منجر به کاهش حلالیت کلر در آب شده و در نتیجه بر اثر خروج آلاینده‌ها از آب استخر، کیفیت هوای داخل مجدداً کاهش پیدا می‌کند. این امر یک چرخه معیوب را نشان می‌دهد. با توجه به این پیچیدگی، برقراری ارتباط مناسب بین آسایش حرارتی و کیفیت هوا چالش مهمی خواهد بود. بر این اساس، در تحقیق حاضر شرایط آسایش حرارتی و کیفیت هوا در سالن یک استخر قهرمانی استاندارد به صورت همزمان مورد تحلیل قرار گرفته است.

2- فضای نمونه

مطابق "شکل 1" فضای نمونه مورد بررسی، سالنی با طول و عرض 60 و 35 متر است. استخر موجود در این سالن از نوع استخرهای قهرمانی استاندارد بوده که دارای طول و عرض 50 و 25 متر می‌باشد. دریچه ورودی هوا به صورت نواری در سقف قرار گرفته و دارای ابعاد 60×0.1 مترمربع است.

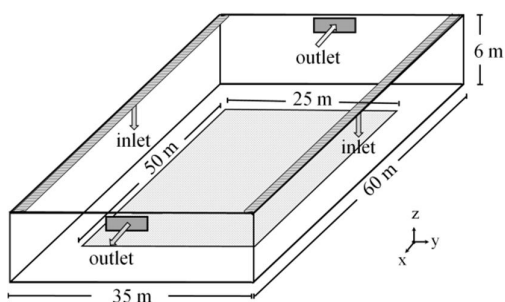


Fig. 1 Present study sample room

شکل 1 فضای نمونه مورد بررسی

هدف استفاده از این سیستم‌ها، ایجاد فضایی یکنواخت و مناسب از نظر آسایش حرارتی¹ و کیفیت هوای داخل² می‌باشد. فضاهایی که در آن‌ها از سیستم‌های تهویه مطبوع استفاده می‌شود بسیار متنوع بوده و دامنه وسیعی از ساختمان‌های مسکونی، اداری، آموزشی، صنعتی، درمانی و ورزشی را در بر می‌گیرد. با توجه به تفاوت در محیط و شرایط خاصی که در هر کدام از محیط‌های مذکور حکم فرماست، طراحی و اجرای متناسب سیستم‌های تهویه مطبوع اهمیت خواهد داشت.

از جمله مکان‌هایی که طراحی مناسب سیستم تهویه مطبوع باید در آن با دقت زیادی مورد بررسی قرار گیرد، استخرهای سرپوشیده هستند. به طور کلی، محیط استخرهای سرپوشیده به دلیل رطوبت بالا، دمای تقریباً زیاد هوا و ترکیبات خطرناک حاوی کلر، محیطی ناسالم به شمار می‌رود. بنابراین تأمین کیفیت هوای داخل در استخرها بیش از آن که از دیدگاه تأمین شرایط آسایش شناگران مهم باشد، از دیدگاه حفظ سلامت آنان دارای اهمیت است. محیط گرم و مرطوب استخرهای سرپوشیده شرایط بسیار مناسبی را برای رشد قارچ‌ها و باکتری‌ها فراهم می‌آورد و در صورت عدم توجه به وضعیت محیط داخل استخر، سلامت شناگران به خطر می‌افتد. همچنین بالا بودن رطوبت نسبی هوا نه تنها شرایط آسایش و سلامت شناگران را متأثر می‌کند، بلکه در دراز مدت صدمات جبران‌ناپذیری را به سازه ساختمان و تجهیزات موجود وارد می‌کند. بنابراین در بحث تهویه مطبوع استخرها برای تأمین شرایط مطلوب هوای داخل سالن باید چهار عامل دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت جریان هوا و کیفیت هوای سالن مورد توجه قرار گیرد.

از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه تهویه مطبوع فضای استخرهای سرپوشیده می‌توان به کار تربانتی و همکاران [1] در سال 1997 اشاره کرد. در این تحقیق به بررسی تعدادی فضای ورزشی در یونان پرداخته شده است. ایشان در تحقیق خود، تأثیر عواملی مانند عایق کردن سقف و دیوارها، نصب سایه‌بان روی بعضی پنجره‌ها، افزودن پنجره به هندسه، کم کردن سطح پنجره‌ها و ... را بر مصرف انرژی بررسی نمودند. لی و هیزلبرگ [2] در سال 2005 به شبیه‌سازی تبخیر از سطح آزاد آب و حرکت هوا در استخر شنا پرداختند. آن‌ها روابط مختلف تبخیر از سطح آزاد آب را بررسی کرده و براساس رابطه شاه [3] و دست‌نامه کاربردهای تأسیساتی اشری [4] استخری دانشگاهی مربوط به کشور دانمارک را شبیه‌سازی کردند. در سال 2013 راندال و سوچو [5] با اندازه‌گیری ذرات جدا شده از بدن در محیط‌های ورزشی، اثر کیفیت هوا بر سیستم تنفسی ورزشکاران را بررسی کردند و به این نتیجه دست یافتند که کیفیت پایین هوا در محیط‌های ورزشی باعث بروز مشکلات تنفسی برای ورزشکاران خواهد شد.

در مورد کلر که یکی از اصلی‌ترین آلاینده‌ها در فضای استخر محسوب می‌شود نیز تحقیقات متعددی صورت گرفته است. در سال 1995، آگازوتی و همکاران [6] با نمونه برداری از 12 استخر در ایتالیا، مقدار کلر موجود در هوا و آب استخرها را بررسی نمودند. آن‌ها اثرات کلر روی شناگران را نیز بررسی کرده و روش‌هایی برای کاهش آلاینده‌گی در استخر پیشنهاد کردند. هسو و همکاران [7] در سال 2009 با مدل‌سازی استخری با ابعاد رایج در تایوان، مقدار کلر موجود در هوا را براساس شرایط محیطی شبیه‌سازی کرده و با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه نمودند. اشمالز و همکاران [8] در سال 2011 در استخری با ابعاد قهرمانی به محاسبه مقدار کلر موجود در آب و مقدار کلر ورودی به هوا از سمت آب پرداختند. در سال 2013، فرناندز و

¹ Thermal comfort

² Indoor air quality

شبکه‌ای با 3685500 سلول محاسباتی مناسب تشخیص داده شده است. نتایج مربوط به استقلال از شبکه در "شکل 2" نشان داده شده است. این نتایج مربوط به توزیع دما و سرعت روی خطی عمودی در مرکز سالن می‌باشد.

4- شرایط مرزی و روش حل

در فضای نمونه بررسی شده دمای هوای ورودی به استخر 35 درجه سلسیوس می‌باشد. به دلیل این‌که در استخرهای قهرمانی دیوار سالن با عایق‌بندی مناسب ساخته می‌شود، شرط مرزی دمایی روی دیواره‌ها گرادیان صفر در نظر گرفته شده است. طبق دست‌نامه کاربردهای تأسیساتی اثری [4] دمای آب استخر قهرمانی باید در محدوده 24 تا 28 درجه سلسیوس قرار داشته باشد.

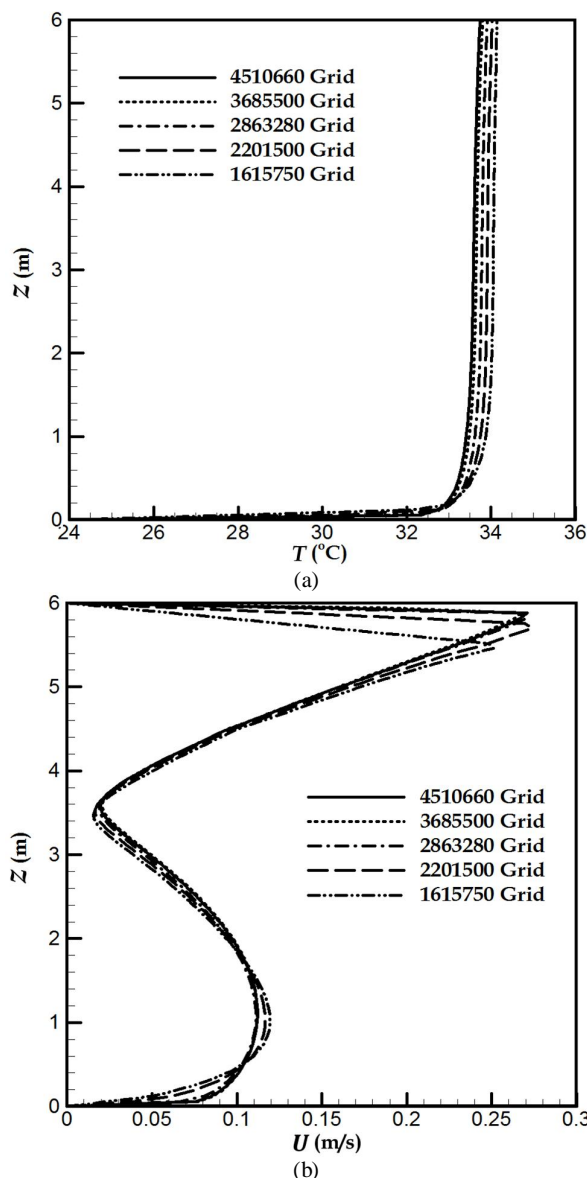


Fig. 2 Grid independence study for (a) Temperature distribution, (b) Velocity magnitude

شکل 2 نمودار بررسی استقلال از شبکه حل برای (الف) توزیع دما، (ب) اندازه سرعت

همچنین دو دریچه خروجی در دیوارهای عرضی قرار گرفته که دارای ابعاد 3x1 مترمربع می‌باشد. در تحقیق حاضر منظور از ناحیه حضور افراد غیرشناگر، حاشیه پیرامون استخر (از لبه استخر تا دیوار سالن) است و تا ارتفاع 1.8 متر را در بر می‌گیرد. اهمیت این ناحیه از فضای نمونه در بخش 3-5 تشریح شده است.

3- معادلات حاکم

در تحقیق حاضر، برای تحلیل جریان و انرژی از معادلات پیوستگی، بقای تکانه خطی و بقای انرژی تحت شرایط پایا و غیرقابل تراکم با در نظر گرفتن اثرات شناوری حرارتی به کمک تقریب بوزینسک¹ استفاده شده است.

معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

معادله بقای تکانه خطی:

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla P + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 \vec{V} + \vec{S} \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\rho c_p u \cdot \nabla T = k_{\text{eff}} \nabla^2 T + Q_t \quad (3)$$

معادله بقای گونه برای بخار آب:

$$\vec{V} \cdot \nabla \omega_w = D_{\text{eff}(w/a)} \nabla^2 \omega_w + Q_w \quad (4)$$

معادله بقای گونه برای کلر:

$$\vec{V} \cdot \nabla \omega_c = D_{\text{eff}(c/a)} \nabla^2 \omega_c + Q_c \quad (5)$$

در روابط بالا Q_c و Q_w و Q_t به ترتیب مقادیر جمله چشمه برای معادله انرژی، بقای گونه بخار آب و بقای گونه کلر می‌باشند. مقدار پراتل توربولانسی 0.85 در نظر گرفته شده و شیوه به دست آوردن مقادیر جمله‌های چشمه در بخش 4 توضیح داده شده است. عبارت‌های ω_w و ω_c غلظت گونه می‌باشد. همچنین، جمله \vec{S} به کار رفته در رابطه (2) بیانگر نیروهای حجمی (شناوری) وارد بر سیال بوده و با تقریب بوزینسک محاسبه می‌شود.

$$\vec{S} = \rho \vec{g} (1 - \beta(T - T_{\text{ref}})) \quad (6)$$

که در این رابطه β ضریب انبساط حجمی (K^{-1}) و \vec{g} بردار شتاب گرانش زمین (ms^{-2}) می‌باشد. ضریب لزجت مؤثر سیال با μ_{eff} نشان داده شده و شامل لزجت سیال و لزجت اغتشاشی² سیال است.

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (7)$$

لزجت اغتشاشی سیال با مدل دو معادله‌ای $k - \epsilon$ استاندارد محاسبه می‌گردد.

با توجه به این‌که هندسه فضای نمونه دارای دو صفحه تقارن طولی و عرضی می‌باشد، به منظور صرفه‌جویی در زمان محاسبات عددی، تنها یک چهارم هندسه مدل‌سازی و حل شده است. برای انجام محاسبات و حل معادلات حاکم حلگر عددی اوپن فوم³ و بسته حل اسپشی بویانت بوزینسک سیمپل فوم⁴ مورد استفاده قرار گرفته است. این حلگر از روش حجم محدود برای حل عددی بهره می‌برد. همچنین در این حلگر از تقریب بوزینسک برای در نظر گرفتن اثرات جابجایی طبیعی بر معادله جریان و از الگوریتم سیمپل⁵ برای تصحیح جفت شدگی بین فشار و سرعت استفاده شده است. همچنین برای حل مسأله از یک شبکه سازمان یافته استفاده شده است و در طی حل عددی، استقلال از حل شبکه محاسباتی به دقت مورد بررسی قرار گرفته و

¹ Boussinesq approximation

² Turbulence viscosity

³ OpenFoam

⁴ SpecieBuoyantBoussinesqSimpleFoam

⁵ SIMPLE

استفاده شده است. "شکل 4" شیوه حل معادلات برای مدل‌سازی تبخیر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در این روش حل با اختصاص مقادیر حدسی برای جمله چشمه گونه و انرژی آغاز می‌شود. سپس در هر تکرار پس از حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی میدان سرعت و دمای به‌دست می‌آید. با توجه به میدان سرعت و دمای به‌دست آمده، میزان گونه ورودی ناشی از تبخیر براساس رابطه توصیه شده توسط دست‌نامه کاربردهای تأسیساتی اشری [4] محاسبه شده و با مقدار حدس اولیه مقایسه می‌گردد. در صورتی که این دو مقدار به اندازه کافی به هم نزدیک باشند، حل به اتمام می‌رسد. در غیر این صورت مقدار تبخیر به‌دست آمده مبنای حل معادلات در تکرار بعد قرار می‌گیرد.

روش توصیه شده دست‌نامه کاربردهای تأسیساتی اشری [4] جهت محاسبه تبخیر برای استخرهای بدون شناگر مطابق رابطه (8) می‌باشد:

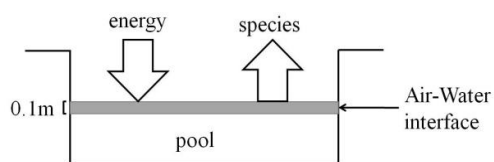


Fig. 3 Air-water interface

شکل 3 سطح مشترک بین آب و هوا

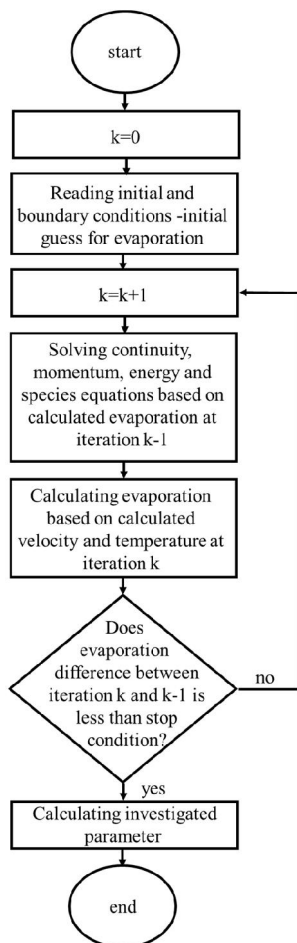


Fig. 4 Solution algorithm for modeling water evaporation

شکل 4 الگوریتم حل مسئله برای مدل‌سازی تبخیر آب

در تحقیق حاضر مقدار دمای آب 24 درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. همچنین، در استخر قهرمانی نیاز است تا هوا، بین 4 تا 6 بار در ساعت تعویض شود [4]. از این‌رو، در تحقیق حاضر نرخ تعویض هوا 4 بار در ساعت در نظر گرفته شده است. براساس حجم استخر و همچنین سطح دریچه ورودی سرعت هوا در ورودی به داخل فضای نمونه برابر 1.2 متر بر ثانیه می‌باشد. در خروجی نیز شرط گرادیان صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین شرط عدم لغزش روی دیواره‌ها حاکم است. همچنین با توجه به استفاده از مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ استاندارد، برای شرط مرزی مربوط به k و ϵ روی دیواره‌ها از تابع دیواره استفاده شده است. با توجه به این که از نظر مصرف انرژی بهترین حالت در سیستم‌های تهویه مطبوع جابجایی این است که بخشی از هوای خروجی مجدداً به چرخه بازگردد، رطوبت نسبی هوای ورودی 30 درصد بوده و رطوبت روی سطح استخر 100 درصد در نظر گرفته می‌شود. شرط مرزی گونه آب روی دیواره‌ها نیز گرادیان صفر می‌باشد. بر- اساس تحقیق اشمالز و همکاران [8] با توجه به این که مقدار فشار جزئی بخار کلر در لایه اشباع در مقایسه با غلظت کلر موجود در آب بسیار کم و قابل صرف‌نظر کردن است، میزان انتقال جرم کلر از آب به هوا تنها به شرایط آب استخر از جمله دما، میزان غلظت کلر در آب، میزان سطح تماس آزاد آب با هوا و وجود یا عدم وجود شناگر وابسته می‌باشد. با توجه به شرایط تعریف شده برای استخر مورد مطالعه در تحقیق حاضر، میزان گونه کلر ورودی از تحقیق اشمالز و همکاران [8] استخراج شده و در قالب یک جمله چشمه در معادله گونه اعمال شده است. ناحیه اثر این جمله چشمه حجم کوچکی روی سطح آزاد آب استخر می‌باشد که این ناحیه در "شکل 3" نشان داده شده است. همچنین شرط مرزی گونه کلر روی دیواره‌ها گرادیان صفر می‌باشد.

همان‌گونه که قبل از این نیز گفته شد، میزان رطوبت جزء مهم‌ترین شاخصه‌هایی است که باید در استخر مورد مطالعه قرار بگیرد. به‌علاوه تبخیر با جذب گرما از محیط اثری اساسی بر توزیع دما و سرعت خواهد داشت. بنابراین جهت مطالعه آسایش حرارتی در محیط استخر مدل‌سازی تبخیر حائز اهمیتی ویژه می‌باشد. با توجه به این که فرایند تبخیر شامل دو بخش ورود گونه آب به هوا و جذب گرما از هوا به وسیله آب می‌باشد، مدل‌سازی تبخیر در تحقیق حاضر به‌وسیله اعمال یک جمله چشمه در معادله گونه و انرژی انجام شده است. ناحیه اثر جملات چشمه مذکور حجم کوچکی روی سطح آزاد آب استخر می‌باشد که این ناحیه در "شکل 3" نشان داده شده است.

مدل‌سازی تبخیر از سطح استخر در شماری از تحقیقات گذشته از جمله تحقیق تحقیق لی و هیزلبرگ [2] و کوپر و همکاران [11] صورت گرفته است. در این تحقیقات با توجه به این که مدل‌سازی براساس داده‌های آزمایشگاهی انجام شده است، میزان تبخیر براساس مقادیر به‌دست آمده از اندازه‌گیری سرعت، دما و رطوبت نسبی در سطح استخر و براساس رابطه توصیه شده توسط دست‌نامه کاربردهای تأسیساتی اشری [4] محاسبه شده و در مدل‌سازی به عنوان مقداری معلوم مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیق حاضر با توجه به عدم وجود داده آزمایشگاهی مقدار تبخیر معلوم نیست. بنابراین مقدار آن باید در جریان حل و براساس میدان سرعت و دما حاصل شود. از طرفی میدان سرعت و دما نیز شدیداً تحت تاثیر میزان تبخیر می‌باشد. وجود این رابطه متقابل موجب می‌گردد که نتوان میدان دما و سرعت را محاسبه نمود و سپس به محاسبه میزان تبخیر از سطح آب پرداخت. برای مرتفع ساختن این مشکل در تحقیق حاضر از یک حل تکراری

تفرق در آن لحاظ نشده است. مدل دو نقطه‌ای گایچ [15] که در 1986 ارائه گردید، بدن را به صورت دو استوانه هم مرکز مدل می‌کند. استوانه خارجی شامل پوست بوده و استوانه داخلی نیز شامل بخش مرکزی بدن (چربی، ماهیچه‌ها و اعضای داخلی) می‌باشد [12].

معادلات موازنه انرژی این مدل برای مرکز و پوست بدن به صورت روابط (12) و (13) تعریف می‌شوند [16].

$$\frac{(1-\alpha)m_b C_{p,b} dT_{cr}}{A_D dt} = M - W - Q_{res} - Q_{cr-sk} \quad (12)$$

$$\frac{\alpha m_b C_{p,b} dT_{sk}}{A_D dt} = Q_{cr-sk} - (Q_{eva} + Q_{conv} + Q_{rad}) \quad (13)$$

که در این روابط T_{sk} و T_{cr} به ترتیب دمای مرکز بدن و سطح پوست برحسب درجه سلسیوس می‌باشند؛ A_D مساحت دویوز نامیده می‌شود و معرف مساحت سطح بدن در شرایط بدون لباس است که طبق دست‌نامه مبانی اشری [17] برای انسان استاندارد اشری که دارای قد 1.7 متر و وزن 70 کیلوگرم می‌باشد این مقدار برابر 1.8 متر مربع در نظر گرفته می‌شود.

همچنین Q_{res} نشان دهنده انتقال حرارت از طریق تنفس، $Q_{cv} + Q_{rd}$ انتقال حرارت محسوس بین بدن و محیط اطراف از طریق جابه‌جایی و تابش و Q_{ev} انتقال حرارت نهان از بدن بر اثر تبخیر عرق می‌باشد و از طریق روابط (14) تا (17) قابل محاسبه هستند [18].

$$Q_{res} = 0.0014M(34 - T_a) + 0.0173M(5.87 - P_a) \quad (14)$$

$$Q_{cv} + Q_{rd} = \frac{T_{sk} - T_a}{R_t} \quad (15)$$

$$Q_{ev} = wQ_{ev,max} \quad (16)$$

$$Q_{ev,max} = \frac{P_{sat,sk} - P_a}{R_{e,t}} \quad (17)$$

عبارت w معرف میزان تری پوست می‌باشد که با توجه به شرایط خاص استخر مسئله w برابر 1 در نظر گرفته شده است. در روابط ذکر شده $P_{sat,sk}$ ، P_a و $R_{e,t}$ به ترتیب بیانگر فشار بخار آب در هوای اشباع و در دمای پوست، فشار بخار آب در هوا هر دو برحسب (kPa) و مقاومت تبخیری کل بین بدن و محیط اطراف ($m^2 kPa/W$) هستند.

پاسخ حرارتی بدن به تغییر در شرایط فردی و محیطی بر اساس سیگنال‌های حرارتی بدن مانند اتساع و انقباض عروق، تفرق و لرز کنترل می‌شود. گایچ روابط مربوط به این سیگنال‌های حرارتی را به صورت روابط (18) تا (21) تعریف کرده است.

$$WSIG_{cr} = \max[(T_{cr} - T_{cr,n}), 0] \quad (18)$$

$$WSIG_{sk} = \max[(T_{sk} - T_{sk,n}), 0] \quad (19)$$

$$CSIG_{cr} = \max[(T_{cr,n} - T_{cr}), 0] \quad (20)$$

$$CSIG_{sk} = \max[(T_{sk,n} - T_{sk}), 0] \quad (21)$$

که در این روابط $WSIG_{cr}$ سیگنال گرم مرکز بدن، $WSIG_{sk}$ سیگنال گرم پوست، $CSIG_{cr}$ سیگنال سرد مرکز بدن و $CSIG_{sk}$ سیگنال سرد پوست می‌باشد. همچنین $T_{sk,n}$ و $T_{cr,n}$ به ترتیب بیانگر دمای مرکز بدن و دمای پوست در حالت خنثی هستند و مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر 36.8 و 33.7 درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین، در مدل مورد استفاده، انتقال حرارت بین دو بخش مرکزی بدن و پوست از طریق هدایت و جریان خون صورت می‌گیرد و رابطه (22) بیانگر آن می‌باشد [16].

$$Q_{cr-sk} = (K + c_{p,bl} \dot{m}_{bl})(T_{cr} - T_{sk}) \quad (22)$$

در این رابطه K میزان موثر ضریب انتقال حرارت هدایت بدن بوده و $c_{p,bl}$ گرمای ویژه خون می‌باشد و مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر $2K^{-1}Wm^{-2}$ و $4187 Jkg^{-1}C^{-1}$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین \dot{m}_{bl} نرخ جریان

$$E = 0.5 \times \frac{(0.0888 + 0.0783V)(P_w - P_a)}{h_w} \quad (8)$$

در این رابطه، E مقدار تبخیر از سطح آزاد آب برحسب ($kgm^{-2}s^{-1}$) و V بیانگر سرعت موازی سطح آزاد آب برحسب (ms^{-1})، P_a بیانگر فشار جزئی بخار آب در دما و رطوبت هوا برحسب (kPa)، P_w فشار جزئی بخار آب اشباع در دمای استخر برحسب (kPa) و h_w گرمای نهان تبخیر برحسب (Jkg^{-1}) می‌باشد. با تقسیم مقدار تبخیر محاسبه شده از رابطه (8) بر ارتفاع حجم در نظر گرفته شده بالای سطح آب مقدار جمله چشمه به دست می‌آید. ضمن این‌که با ضرب همین مقدار در گرمای نهان تبخیر مقدار جمله چشمه برای معادله انرژی محاسبه می‌گردد.

همچنین از نتایج تحقیق اشمالز و همکاران [8] برای مقدار کلر ورودی به هوا از سمت آب استفاده شده است و برای جمله چشمه باید مقدار کلر تبخیر شده را بر ارتفاع حجم در نظر گرفته شده بالای سطح آب تقسیم کرد.

5- تشریح پارامترهای مورد بررسی

5-1- رطوبت نسبی

رطوبت نسبی از جمله پارامترهایی است که باید در استخر مورد بررسی قرار گیرد. رابطه مورد استفاده برای محاسبه رطوبت نسبی به صورت رابطه (9) می‌باشد.

$$\phi = \frac{p_w}{p_{ws}} \quad (9)$$

که p_w و p_{ws} به ترتیب فشار بخار آب و فشار اشباع آب در دمای هوا برحسب kPa هستند و از روابط (10) و (11) به دست می‌آیند.

$$p_w = \frac{(101325 + p)\omega_w}{0.62198 + 0.37802\omega_w} \quad (10)$$

$$p_{ws} = \exp\left(16.6536 - \frac{4030.183}{T_{air} + 235}\right) \quad (11)$$

شایان ذکر است که مقدار رطوبت نسبی در استخرهای قهرمانی باید بین 50 تا 60 درصد باشد [4].

5-2- غلظت کلر

در تحقیق حاضر، میزان غلظت کلر به عنوان اصلی‌ترین آلاینده مورد بررسی قرار گرفته است. سطح غلظت مجاز برای کلر در هوای استخرها $3 mgm^{-3}$ است [9].

5-3- آسایش حرارتی

در سال 1934 اولین مدل ریاضی برای آسایش حرارتی توسط بارتن¹ ارائه گردید [12]. پس از آن، مدل‌های زیاد دیگری نیز ارائه شدند که در این بین، دو مدل فنگر² [13] و گایچ³ [14] بیشتر از سایر مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در هر دو مدل، انتقال حرارت و انتقال جرم روی بدن به صورت یک بعدی در نظر گرفته شده است. ساختار مدل فنگر [13] با توجه به این‌که در آن، مدل‌سازی تنظیم حرارت در شرایط گذرا صورت نمی‌گیرد، نسبت به مدل گایچ ساده‌تر می‌باشد. بر همین اساس، برای تحلیل شرایط در حالت گذرا معمولاً از مدل دو نقطه‌ای گایچ [14] استفاده می‌شود. مدل ارائه شده توسط فنگر بر مبنای تعادل حرارتی بین بدن و محیط بوده و برخی از پاسخ‌های فیزیولوژیکی و تطبیقی بدن مانند لرز هنگام سرما و یا انقباض و انقباض عروق با تغییر شرایط حرارتی محیط اطراف و همچنین تبخیر از سطح بدن و

¹ Burton

² Fanger

³ Gagge

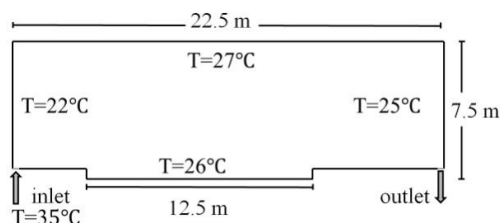


Fig. 5 Sample room for Li and Heiselberg[2] study

شکل 5 فضای نمونه تحقیق لی و هیزلبرگ [2]

جدول 1 پارامترهای تحقیق لی و هیزلبرگ [2]

Table 1 Parameters for Li and Heiselberg[2] study

پارامتر	اندازه
فاصله بین کف و سطح آب استخر	0.3 متر
عرض دریچه ورودی هوا	0.7 متر
عرض دریچه خروجی هوا	0.063 متر
سرعت هوای ورودی	1.26 متر بر ثانیه
رطوبت نسبی هوای ورودی	28 درصد

"شکل 6" نشان دهنده مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق لی و هیزلبرگ [2] می‌باشد. مقایسه روی خطی عمودی در میانه استخر صورت گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همخوانی نسبتاً خوبی میان نتایج تحقیق حاضر و تحقیق ایشان به چشم می‌خورد و همین امر نشان‌دهنده صحت و اعتبار قابل قبول مدل‌سازی حاضر است.

7- نتایج و بحث

در تحقیق حاضر توزیع دما، سرعت، غلظت آلاینده کلر، رطوبت نسبی و آسایش حرارتی در وضعیت قرارگیری دریچه ورودی هوا روی سقف مورد تحلیل قرار گرفته است. جهت نمایش توزیع پارامترهای مدنظر تحقیق دو صفحه A و B مینا قرار گرفته‌اند (شکل 7). صفحه‌های A و B به ترتیب صفحه تقارن عرضی و طولی فضای نمونه می‌باشند.

در "شکل 8" توزیع دما روی دو صفحه A و B نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با توجه به این‌که دریچه ورودی هوا در سقف قرار گرفته است، هوای گرم ورودی پس از ورود به سالن در قسمت بالای استخر قرار گرفته و اثرگذاری آن در نزدیکی سطح و ناحیه نزدیک به سطح آب کم می‌باشد. براساس دستنامه کاربردهای تأسیساتی اشرفی [4] در استخر قهرمانی محدوده دمایی مجاز بین 26 تا 29 درجه سلسیوس است. همان‌گونه که در "شکل 8" مشاهده می‌شود دمای هوا در محدوده حضور افراد از حد مجاز فراتر رفته و به 30 درجه سلسیوس رسیده است. در جدول 2 نتایج میانگین‌گیری شده دما از سطح استخر تا سه ارتفاع متفاوت نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میانگین دما برای هر سه ارتفاع در محدوده مجاز قرار دارد.

در "شکل 9" توزیع سرعت و خطوط جریان روی دو صفحه A و B نشان داده شده است. مطابق شکل، مقدار اندازه سرعت در اکثر فضای نمونه مقداری یکنواخت است و در نزدیکی سطح آب به کمترین مقدار خود می‌رسد که برای رسیدن به آسایش حرارتی، مطلوب می‌باشد.

در "شکل 10" توزیع گونه کلر نشان داده شده است. مطابق شکل مقدار غلظت کلر از 0.18 میلی‌گرم بر متر مکعب در نزدیکی سطح آب به کمتر از 0.01 میلی‌گرم بر متر مکعب در ناحیه سقف سالن می‌رسد. همچنین

خون برحسب $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ می‌باشد و به صورت رابطه (23) تعریف می‌گردد. [18]

$$\dot{m}_{bl} = \frac{6.3 + 200WSIG_{cr}}{3600(1 + 0.5CSIG_{sk})} \quad (23)$$

سرد شدن بدن با ایجاد لرز همراه می‌باشد. بدن با این روش نرخ متابولیک را افزایش می‌دهد تا دمای بدن افزایش پیدا کند. تولید متابولیک به علت لرز را می‌توان از رابطه (24) محاسبه نمود.

$$M_{shiv} = 19.4CSIG_{sk}CSIG_{cr} \quad (24)$$

این مقدار با متابولیک ناشی از فعالیت بدنی جمع شده و مقدار کلی نرخ متابولیک را ارائه می‌کند. ضمن این‌که دمای مرکز بدن از رابطه (25) قابل محاسبه می‌باشد [18].

$$T_b = \alpha T_{sk} + (1 - \alpha)T_{cr} \quad (25)$$

پارامتر α به کار رفته در رابطه بالا بیانگر کسری از جرم بدن است که در لایه پوست متمرکز شده است؛ این پارامتر براساس رابطه (26) تعیین می‌گردد:

$$\alpha = 0.042 + \frac{0.745}{3600\dot{m}_{bl} + 0.585} \quad (26)$$

مدل گایج شاخصی بنام TSENS را معرفی می‌کند که به کمک آن احساس حرارتی افراد به صورت شاخصی بدون بعد تعریف می‌گردد. این شاخص دامنه احساس حرارتی افراد را بین -5 تا +5 در نظر می‌گیرد و براساس این معیار، -5 بیانگر سرمای غیر قابل تحمل، -4 خیلی سرد، -3 سرد، -2 خنک، -1 کمی خنک، 0 مطلوب، +1 کمی گرم، +2 گرم، +3 داغ، +4 خیلی داغ و +5 نیز بیانگر گرمای غیر قابل تحمل است. محدوده مطلوب آسایش حرارتی در این معیار از 0.5 تا 0.5- می‌باشد. مقدار این معیار از رابطه (27) بدست می‌آید.

$$T_b < T_{b,c} \quad \begin{cases} 0.4685(T_b - T_{b,co}) \\ 0.47\eta_e(T_b - T_{b,co}) \end{cases} \quad T_b < T_{b,c}$$

$$T_b \leq T_b \leq T_{b,h} \quad \begin{cases} T_{b,h} - T_{b,co} \\ 0.47\eta_e + 0.4685(T_b - T_{b,h}) \end{cases} \quad T_b \leq T_b \leq T_{b,h} \quad (27)$$

در روابط بالا پارامتر η_e بازده تبخیری نامیده شده و برابر با 0.85 در نظر گرفته می‌شود. مقدار $T_{b,c}$ و $T_{b,h}$ از روابط (28) و (29) محاسبه می‌شود.

$$T_{b,co} = 0.194(M - W) + 36.301 \quad (28)$$

$$T_{b,h} = 0.347(M - W) + 36.669 \quad (29)$$

در صورتی که در فضای نمونه مورد بررسی بتوان در بدترین حالت آسایش حرارتی مطلوبی را به دست آورد می‌توان نتیجه گرفت که در سایر قسمت‌ها نیز آسایش حرارتی در محدوده مطلوب قرار خواهد داشت. در استخرها ناحیه دور استخر که در آن افرادی قرار گرفته‌اند که دارای تری پوست کامل بوده و فعالیت بدنی آن‌ها کم می‌باشد، بدترین ناحیه از نقطه نظر آسایش حرارتی می‌باشد. با در نظر گرفتن این ناحیه تا ارتفاع 1.8 متری با عنوان ناحیه حضور افراد غیرشناگر و انتخاب نرخ متابولیک 115 Wm^{-2} و تری پوست 1 برای افراد حاضر در این ناحیه آسایش حرارتی بررسی شده است.

6- اعتبارسنجی

در این تحقیق برای اعتبارسنجی حل، از نتایج تحقیق لی و هیزلبرگ [2] استفاده شده است. فضای نمونه تحقیق مذکور مطابق "شکل 5" می‌باشد. همچنین در جدول 1 پارامترهای این تحقیق نشان داده شده است.

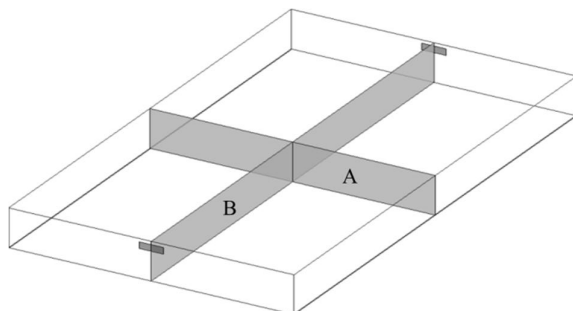


Fig. 7 Results' presentation planes in sample room

شکل 7 صفحات ارائه نتایج در فضای نمونه

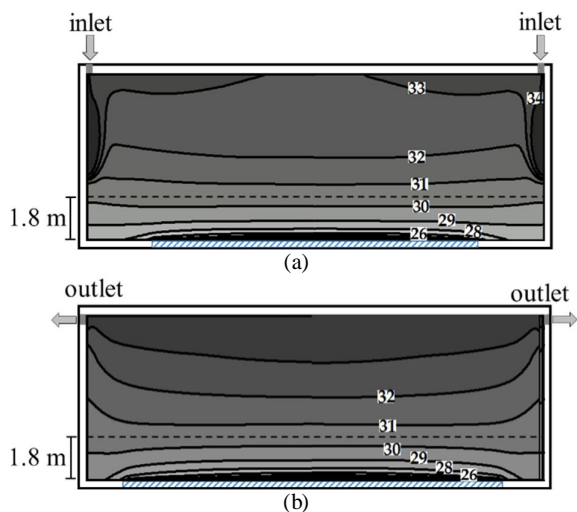


Fig. 8 Temperature field in °C at (a) plane A (b) plane B

شکل 8 میدان دما برحسب درجه سلسیوس روی (الف) صفحه A، (ب) صفحه B

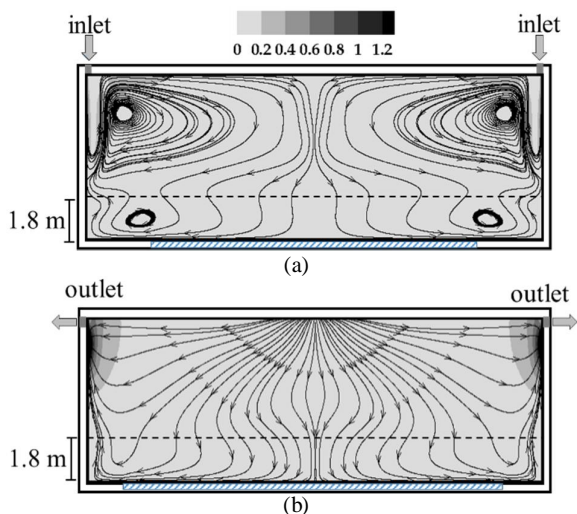
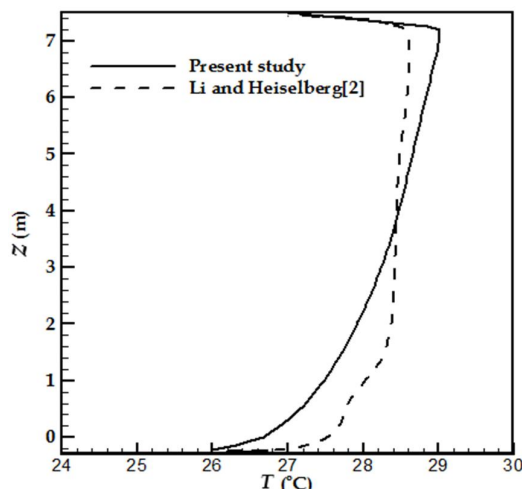


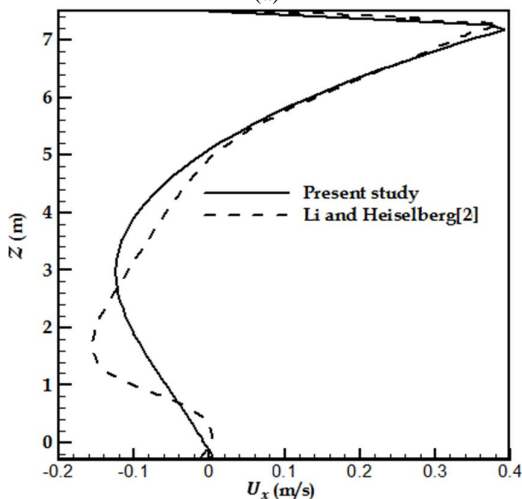
Fig. 9 Velocity field in m/s at (a) plane A (b) plane B

شکل 9 میدان سرعت برحسب متر بر ثانیه روی (الف) صفحه A، (ب) صفحه B

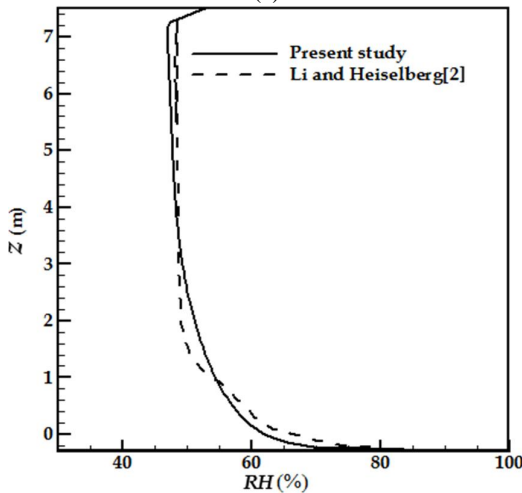
همان گونه که مشاهده می شود مقدار غلظت کلر در ناحیه حضور افراد (ارتفاع کمتر از 1.8 متر) بین 0.03 تا 0.18 میلی گرم بر متر مکعب تغییر می کند. غلظت آلاینده کلر نیز باید کمتر از 1.5 میلی گرم بر مترمکعب باشد [9]. در جدول 2 نتایج میانگین گیری شده غلظت کلر از سطح استخر تا سه



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Present study results compared with results of Li and Heiselberg[2] (a) Temperature (°C), (b) Velocity in x direction (m/s), (c) Relative humidity (%)

شکل 6 مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج لی و هیزلبرگ [2] (الف) دما (درجه سلسیوس)، (ب) مولفه افقی سرعت (متر بر ثانیه)، (ج) رطوبت نسبی (درصد)

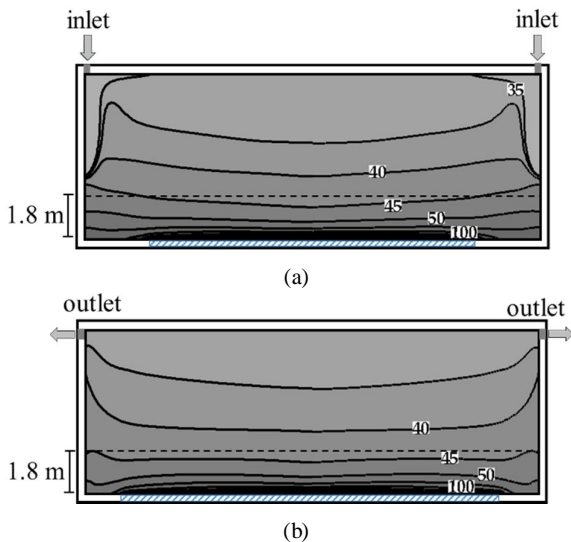


Fig. 11 Relative humidity field (%) (a) plane A (b) plane B

شکل 11 میدان رطوبت نسبی برحسب درصد (الف) صفحه A، (ب) صفحه B

می‌باشد. با افزایش ارتفاع شاخص آسایش حرارتی توزیع یکنواخت‌تری پیدا می‌کند. میانگین شاخص آسایش حرارتی در سه ارتفاع 0.1، 1.1 و 1.8 متر به ترتیب برابر 0.61، -0.6 و -0.6 می‌باشد. بنابراین توزیع این شاخص در راستای ارتفاع تقریباً یکنواخت است.

8- نتیجه گیری

از دیدگاه تهیه مطبوع و سلامت، میزان رطوبت جزء مهمترین شاخصه‌هایی است که باید در استخرهای سرپوشیده مورد مطالعه قرار بگیرد. به علاوه تبخیر با جذب گرما از محیط اثری اساسی بر توزیع دما و سرعت خواهد داشت. بنابراین جهت مطالعه آسایش حرارتی در محیط استخر مدل‌سازی تبخیر حائز اهمیتی ویژه می‌باشد. در تحقیق حاضر با ارائه روشی برای مدل‌سازی فرآیند تبخیر و اثر آن و همچنین در نظر گرفتن آلاینده کلر به ارزیابی هم‌زمان آسایش حرارتی و کیفیت هوا در استخری سرپوشیده با ابعاد استاندارد قهرمانی پرداخته شده است. درجه‌های ورودی هوا به صورت نواری در سقف قرار گرفته و هوای ورودی 35 درجه سلسیوس با رطوبت نسبی 30 درصد به سالن وارد می‌شود. نرخ تعویض هوا نیز 4 بار در ساعت می‌باشد. براساس نتایج مدل‌سازی مقدار میانگین گیری شده دما، غلظت آلاینده کلر و رطوبت نسبی از سطح سالن تا ارتفاع 1.8 متر به ترتیب برابر 29.3 درجه سلسیوس، 0.05 میلی‌گرم بر متر مکعب و 50.6 درصد می‌باشد. میزان رطوبت نسبی و غلظت کلر براساس دست‌نامه کاربردهای تأسیساتی اشری [4] در محدوده مجاز قرار دارد. این موضوع نشان می‌دهد دفع آلاینده و همچنین تخلیه رطوبت از فضای داخل سالن به خوبی صورت گرفته است. با این حال مقدار میانگین دما اندکی از محدوده مجاز (26 تا 29 درجه سلسیوس) فراتر رفته است. شاخص آسایش حرارتی برای فردی غیرشناگر و در وضعیت تری پوست کامل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در این وضعیت مقدار میانگین شاخص آسایش حرارتی در سراسر بدن در حدود -0.6 می‌باشد که در محدوده مجاز (بین 0.5 و -0.5) قرار ندارد. در این شرایط فرد اندکی احساس سرما خواهد کرد. البته این انحراف از مقدار آسایش حرارتی را می‌توان با کاهش سرعت هوا و یا افزایش دمای هوا و آب برطرف نمود. این امر می‌تواند به عنوان موضوع تحقیقات آتی مطرح شود.

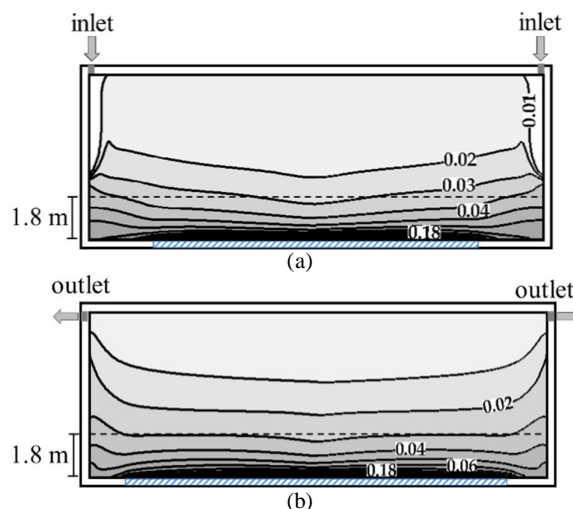


Fig. 10 Concentration field of chlorine in mg/m^3 at (a) plane A (b) plane B

شکل 10 میدان غلظت آلاینده کلر برحسب میلی‌گرم بر مترمکعب روی (الف) صفحه A، (ب) صفحه B

ارتفاع متفاوت نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میانگین غلظت کلر برای هر سه ارتفاع در محدوده مجاز قرار دارد. در "شکل 11" توزیع رطوبت نسبی نشان داده شده است. مطابق شکل مقدار رطوبت نسبی از 100 درصد در نزدیکی سطح آب به کمتر از 35 درصد در ناحیه سقف سالن می‌رسد. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار رطوبت نسبی در ناحیه حضور افراد (ارتفاع کمتر از 1.8 متر) بین 45 تا 100 درصد تغییر می‌کند. بر اساس دست‌نامه کاربردهای تأسیساتی اشری [4] در استخر قهرمانی محدوده مجاز رطوبت نسبی بین 50 تا 60 درصد می‌باشد. در جدول 2 نتایج میانگین‌گیری شده رطوبت نسبی از سطح استخر تا سه ارتفاع متفاوت نشان داده شده است. مقدار میانگین رطوبت نسبی تا ارتفاع 0.5 متر 62.3 درصد است که فراتر از محدوده مجاز می‌باشد. با این حال این مقدار برای دو ارتفاع 1 و 1.8 متر به ترتیب برابر 54.5 و 50.6 می‌باشد که در محدوده مجاز قرار دارد.

در "شکل 12" توزیع شاخص احساس حرارتی برای سه ارتفاع 0.1، 1.1 و 1.8 متری نشان داده شده است. لبه استخر در شکل با خط چین نشان داده شده و همان‌گونه که در بخش 3-5 گفته شد حد فاصل بین لبه استخر و دیواره سالن ناحیه حضور افراد غیرشناگر است که مطابق توضیحات ذکر شده، شاخص احساس حرارتی برای افراد حاضر در این ناحیه بررسی شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود شاخص آسایش حرارتی در این ناحیه در محدوده مجاز (بین 0.5 تا -0.5) قرار ندارد. مقدار شاخص در نواحی نزدیک به استخر کمتر است چرا که سرعت هوا در نزدیک استخر بیشتر سایر نواحی

جدول 2 نتایج متوسط برای دما، غلظت آلاینده کلر، رطوبت نسبی و سرعت

Table 2 Averaged values for temperature, concentration of chlorine, relative humidity and velocity					
نتایج میانگین گیری شده	دما (°C)	غلظت آلاینده کلر (mg/m^3)	رطوبت نسبی (%)	سرعت (ms^{-1})	
از سطح آب تا ارتفاع 0.5 متری	27.2	0.079	62.3	0.029	
از سطح سالن تا ارتفاع 1 متری	28.6	0.060	54.5	0.019	
از سطح سالن تا ارتفاع 1.8 متری	29.3	0.050	50.6	0.009	

میانگین احساس حرارتی افراد، (بی بعد)	PMV
انتقال حرارت، (W)	Q
جمله چشمه گونه کلر، (1/s)	Q_c
جمله چشمه مربوط به دما، (K/s)	Q_T
جمله چشمه گونه بخار آب، (1/s)	Q_w
مقاومت، (m^2kPa/W)	R
رطوبت نسبی، (%)	RH
پارامتر مربوط به جمله چشمه	S
دما، (K)	T
دما، ($^{\circ}C$)	T
شاخص آسایش حرارتی	$TSENS$
سرعت در راستای ز، (m/s)	u_z
اندازه سرعت، (m/s)	U
سرعت موازی سطح آب، (m/s)	V
نرخ فعالیت، (W/m^2)	W
تری بدن، (بی بعد)	w
سیگنال گرم	$WSIG$

علائم یونانی

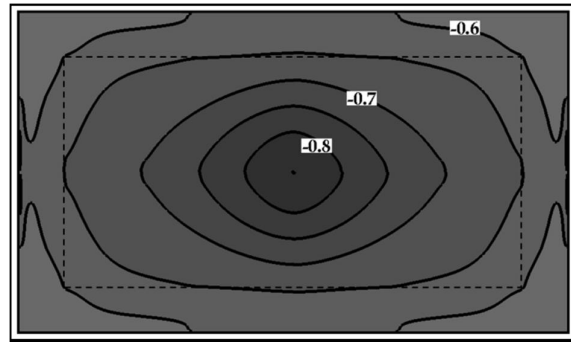
کسر تجمع گرمی در ناحیه ی پوست، (بی بعد)	α
بازده تبخیری، (بی بعد)	η
چگالی، (kg/m^3)	ρ
غلظت گونه، (بی بعد)	ω

زیر نویس ها

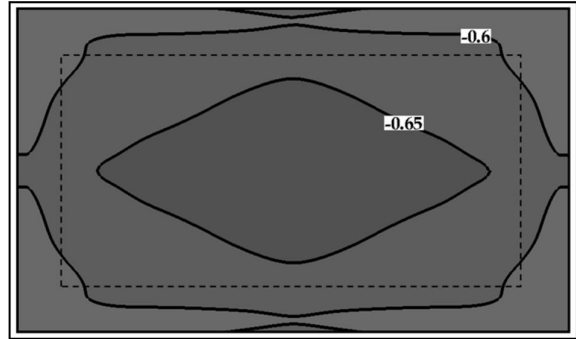
مربوط به هوا	A
فعالیت بدنی	act
میانگین	avg
مربوط به بدن	b
مربوط به خون	bl
خنک	co
مربوط به کلر	c
مرکز بدن	cr
جابه جایی	cv
کل	e,t
تبخیر	ev
گرم	h
شمارنده	j
خنثی	n
تابش	rd
مربوط به تنفس	res
ساز و کار لرز	$shiv$
سطح پوست	sk
آب	w

10- مراجع

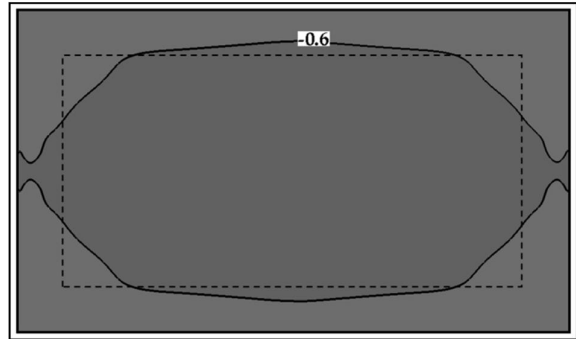
[1] E. Trianti-Stourna, K. Spyropoulou, C. Theofylaktos, K. Droutsas, C. A. Balaras, M. Santamouris, D. N. Asimakopoulos, G. Lazaropoulou, N. Papanikolaou, Energy conservation strategies for sports centers: Part B. Swimming pools, *Energy and Buildings*, Vol. 27, No. 2, pp. 123-135, 1998.



(a)



(b)



(c)

Fig. 12 Thermal comfort field at the height of (a) 0.1 m (b) 1.1 m (c) 1.8 m

شکل 12 میدان شاخص احساس حرارتی افراد در ارتفاع (الف) 1.0 متر، (ب) 1.1 متر، (ج) 8.1 متر

9- فهرست علائم

A_D	مساحت دوبویز، (m^2)
C	غلظت گونه، (بی بعد)
$CSIG$	سیگنال سرد
D	ضریب پخش گونه، (m^2/s)
E	نرخ تبخیر از سطح آب، (kg/m^2s)
g	شتاب گرانش، (m/s^2)
h_w	گرمای نهان تبخیر برای آب، (J/kg)
M	نرخ متابولیک، (W/m^2)
\dot{m}	نرخ جریان خون، (kg/m^2s)
P	فشار، (kPa)
P_a	فشار جزئی بخار آب، (kPa)
P_w	فشار جزئی بخار آب اشباع در دمای استخر، (kPa)

- [10] G. M. Revel, M. Arnesano, Measuring overall thermal comfort to balance energy use in sports facilities, *Measurement*, Vol. 55, No. 1, pp. 382-393, 2014.
- [11] P. Koper, B. Lipska, W. Michnol, Assessment of thermal comfort in an indoor swimming pool making use of the numerical prediction CFD, *Architecture Civil Engineering Environment*, Vol. 3, No. 3, pp. 95-104, 2010.
- [12] M. Maerefat, A. Omidvar, *Thermal Comfort*, pp. 17-20, Tehran: Kelid Amoozesh, 2008. (in Persian فارسی)
- [13] P. O. Fanger, *Thermal comfort Analysis and applications in environmental engineering*, pp. 87-93, New York: McGraw-Hill, 1972.
- [14] A. P. Gagge, An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, *ASHRAE Transactions*, Vol. 77, No. 1, pp. 247-262, 1971.
- [15] A. P. Gagge, A. Fobelets, L. Berglund, A standard predictive index of human response to the thermal environment, *ASHRAE Transactions*, Vol. 92, No. CONF-8606125-, pp. 709-732, 1986.
- [16] A. Zolfaghari, M. Maerefat, A new simplified model for evaluating non-uniform thermal sensation caused by wearing clothing, *Building and Environment*, Vol. 45, No. 3, pp. 776-783, 2010.
- [17] ASHRAE, *Handbook-Fundamentals*, Atlanta, Ga: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009.
- [18] P. Dongmei, C. Mingyin, D. Shiming, Q. Minglu, A four-node thermoregulation model for predicting the thermal physiological responses of a sleeping person, *Building and Environment*, Vol. 52, No. 1, pp. 88-97, 2012.
- [2] Z. Li, P. Heiselberg, CFD Simulations for water evaporation and airflow movement in swimming baths indoor environmental engineering, Aalborg University, Denmark, Report for the project *Optimization of ventilation system in swimming bath*, 2005.
- [3] M. Shah, Rate of evaporation from undisturbed water pools to quiet air: evaluation of available correlations, *International Journal of HVAC&R Research*, Vol. 8, No. 1, pp. 125-131, 2002.
- [4] ASHRAE, *HVAC applications*, Atlanta, Ga: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2007.
- [5] K. W. Rundell, M. Sue-Chu, Air quality and exercise-induced bronchoconstriction in elite athletes, *Immunology and allergy clinics of North America*, Vol. 33, No. 3, pp. 409-421, 2013.
- [6] G. Aggazzotti, G. Fantuzzi, E. Righi, G. Predieri, Environmental and biological monitoring of chloroform in indoor swimming pools, *Journal of chromatography*, Vol. 710, No. 1, pp. 181-190, 1995.
- [7] H. T. Hsu, M. J. Chen, C. H. Lin, W. S. Chou, J. H. Chen, Chloroform in indoor swimming-pool air: monitoring and modeling coupled with the effects of environmental conditions and occupant activities, *Water Research*, Vol. 43, No. 15, pp. 3693-704, Aug. 2009.
- [8] C. Schmalz, F. H. Frimmel, C. Zwiener, Trichloramine in swimming pools-formation and mass transfer, *Water Research*, Vol. 45, No. 8, pp. 2681-2690, 2011.
- [9] Á. Fernández-Luna, P. Burillo, J. L. Felipe, L. Gallardo, F. M. Tamaral, Chlorine concentrations in the air of indoor swimming pools and their effects on swimming pool workers, *Gaceta Sanitaria*, Vol. 27, No. 5, pp. 411-417, 2013.