

مدل سازی تأثیر استفاده از پرده هوایی بر آسایش افراد و کیفیت هوا در استخرهای قهرمانی با جایگاه تماشاگران

سیدعلیرضا ذوالفقاری*، سعید عزیزی، سیدمحمد هوشمند

دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۳-۲۰
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۱۶
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۹-۱۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۲۷

کلمات کلیدی:

استخر قهرمانی با جایگاه تماشاگران
پرده هوایی
آسایش حرارتی
احساس موضعی
کیفیت هوای داخل

خلاصه: در استخرهای دارای جایگاه تماشاگران به دلیل وجود تفاوت در پوشش، میزان تری پوست و نرخ متابولیک شناگران و تماشاگران، ایجاد شرایط آسایش حرارتی برای همه ساکنان بسیار دشوار است. بر این اساس، یک ایده مناسب برای ایجاد این شرایط آسایشی متفاوت، استفاده از پرده هوایی برای جداسازی آیرودینامیکی فضای استخر و جایگاه تماشاگران می باشد. در این شرایط، امکان استفاده از دو سیستم تهویه مجزا برای دو قسمت مذکور فراهم خواهد بود. در این تحقیق، استخری با ابعاد قهرمانی همراه با جایگاه تماشاگران مدل سازی شده است و میدان سرعت، دما، رطوبت نسبی و غلظت آلاینده کلر برای این هندسه تعیین و گزارش شده است. همچنین، نتایج در دو حالت استفاده از پرده هوایی و بدون پرده هوایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که پرده هوایی تا حدود زیادی باعث کاهش نفوذ آلاینده کلر به قسمت تماشاگران می شود؛ به طوری که در جایگاه تماشاگران، غلظت آلاینده کلر به طور میانگین در حدود 0.0016 mg/m^3 کمتر از حالت بدون پرده هوایی است. در این تحقیق، برای تعیین شاخص آسایش حرارتی افراد از مدل موضعی ۶۵ نقطه‌ای استفاده شده است. انحراف معیار شاخص احساس حرارتی در هر ردیف، برای ردیف اول تا سوم در حالت استفاده از پرده هوایی به ترتیب برابر 0.26 ، 0.25 و 0.28 و در حالت بدون پرده هوایی برای ردیف اول تا سوم به ترتیب برابر 0.33 ، 0.39 و 0.35 است که این نتایج نشان دهنده احساس حرارتی مطلوب تر و یکنواخت تر در حالت استفاده از پرده هوایی می باشند.

۱- مقدمه

از آنجایی که بحث تبخیر در استخرها از اهمیت بالایی برخوردار است، تحقیقات زیادی درباره تهویه در استخرها و نحوه تخمین میزان تبخیر از استخر صورت پذیرفته است. در سال ۱۹۷۴ بیاسن و کرام [۲] رابطه‌ای تجربی برای تبخیر در استخرهای دارای شناگر ارائه کردند. در سال ۲۰۰۲ شاه [۳] با بررسی استخرهای بدون شناگر رابطه‌ای برای تخمین تبخیر در این نوع استخرها ارائه کرد و در سال ۲۰۰۳ شاه [۴] رابطه‌ای برای تبخیر از سطح آزاد آب برای استخرهای دارای شناگر پیشنهاد کرد. لی و هیزلبرگ [۵] بر اساس رابطه تبخیر شاه [۳] و همچنین دست‌نامه تاسیساتی اشری [۶] در استخری در کشور دانمارک تبخیر را مدل کردند.

طبق تعریف اشری [۱]، آسایش حرارتی حالتی ذهنی است که شخص از شرایط محیط احساس رضایت می کند. در استخرها به دلیل فعالیت، تری پوست و میزان پوشش افراد، ایجاد شرایط آسایش حرارتی مناسب از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بوده و در عین حال ایجاد این شرایط، بسیار پیچیده است. در استخرها علاوه بر رطوبت و تأثیری که می تواند بر آسایش حرارتی بگذارد، افزایش غلظت کلر در هوا باعث به خطر افتادن سلامتی افراد می شود. به همین دلیل، طراحی سیستم‌های تهویه مطبوع مناسب به منظور تأمین شرایط مطلوب در استخرها مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است.

همچنین، در سالهای اخیر، تحقیقات زیادی نیز در مورد مدل سازی و تخمین کلر، کیفیت هوا، تهویه مناسب، آسایش حرارتی

1 ASHRAE

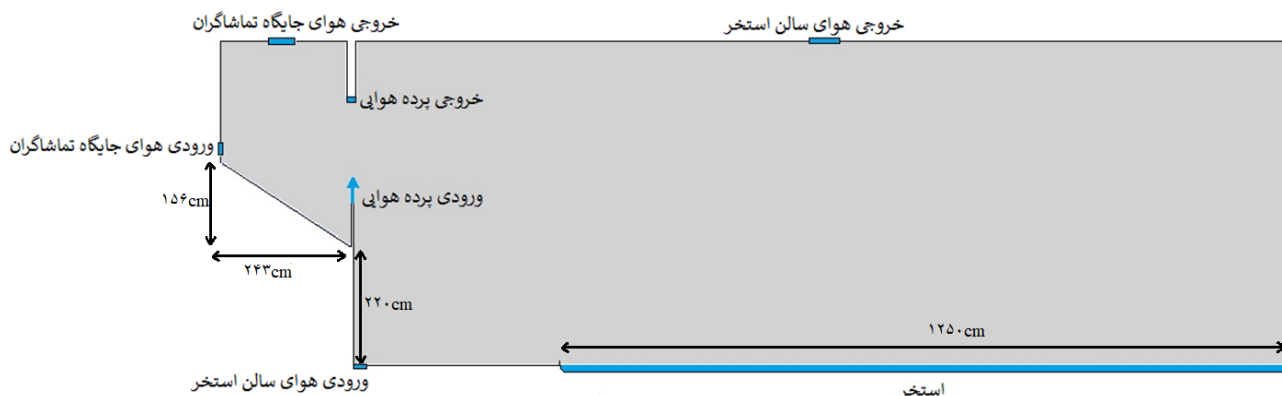
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: zolfaghari@birjand.ac.ir



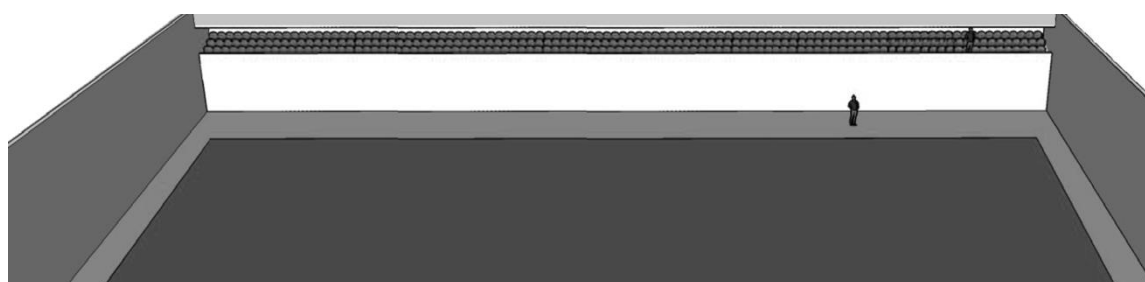
کار می‌رود. رایج‌ترین کاربرد پرده هوا به صورت یک فن دمنده رو به پایین است که بالای ورودی یک ساختمان یا بازشویی بین دو فضای دارای تهویه با شرایط متفاوت نصب می‌شود. در واقع دستگاه پرده هوایی یک جت هوا با سرعت نسبتاً زیاد و خروجی زاویه‌دار است که باعث جداسازی آبرودینامیکی دو فضا می‌شود و می‌تواند تا حد زیادی مانع از تبادل هوا بین دو محیط مجاور شود. هدف اصلی از استفاده از پرده هوایی برای کاهش نفوذ گرما، رطوبت و یا آلاینده‌ها بین دو محیط می‌باشد [۱۴].

ایده طراحی پرده هوایی ابتدا در سال ۱۹۰۴ توسط کمل به ثبت رسید و شرکت مینیویل [۱۵] آن را در سال ۱۹۵۶ به عنوان یک محصول تجاری به اروپا عرضه کرد. عملکرد مؤثر پرده‌های هوایی و توجه به آسایش حرارتی و بهبود کیفیت هوا باعث شد این دستگاه بیشتر مورد استفاده قرار گیرد. در سال ۱۹۸۵ هاز و کمن [۱۶] کارایی پرده هوایی حلقوی را برای حفاظت استادیوم در برابر بارندگی در ابعاد آزمایشگاهی بررسی نمودند و برای استفاده در ابعاد واقعی، نتایج را به صورت بی‌بعد گزارش کردند. جوریوا و همکاران [۱۷] مقدار بهینه برای متغیرهای طراحی یعنی عرض، سرعت و محل نصب پرده هوا برای افزایش خروج جریان جرم از تهویه تونل را تعیین کردند. فاستر و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۰۷ کارایی پرده هوایی را در کاهش نفوذ در اتاق سرد، در سرعت‌های مختلف جت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پیش‌بینی کردند و مقدار خطای حل عددی را به صورت ۳ بعدی به دست آوردند. گنسالوز و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۲ به صورت عددی و آزمایشگاهی تأثیر پرده هوایی را با استفاده از گاز ردیاب بر کاهش انتقال جرم و انرژی بین دو فضای مورد بررسی قرار دادند و در تحقیقی دیگر [۲۰]، به مقایسه درزبندی آبرودینامیکی دو پرده هوایی عمودی و افقی پرداختند و بهره‌وری آن‌ها را در موقعیت‌های مختلف تخمین زدند. جرالوز و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۳ به تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی بازده پرده هوا به منظور بهبود روش‌های نیمه تحلیلی موجود با اطلاعات شبیه‌سازی‌های عددی و اندازه‌گیری تجربی پرداختند تا یک مدل ساده شده دقیق که رفتار سه بعدی جت هوا را بدون نیاز به انجام محاسبات وقت‌گیر توصیف کند، به دست آورند. گوپرن و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۶ به صورت تجربی به بررسی مشخصات جریان پرده هوایی در ورودی یک ساختمان پرداختند و دریافتند در اختلاف فشار مورد آزمایش،

و اثرات نامطلوب کلر در استخرها انجام شده است. آگازوتی و همکاران [۷] در سال ۱۹۹۵ اثرات کلر را بر روی شناگران در ۱۲ استخر در شمال ایتالیا بررسی کرده و راه‌هایی برای کاهش آلاینده‌ها در استخر پیشنهاد کردند. هسو و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۹ مقدار کلر در یک استخر را شبیه‌سازی کردند و با مقدار کلر موجود در استخری با ابعاد رایج مقایسه نمودند. راندال و سوچو [۹] در سال ۲۰۱۳ اثر کیفیت هوا را بر سیستم تنفسی ورزشکاران، با اندازه‌گیری ذرات جدا شده از بدن در محیط‌های ورزشی، بررسی کردند و نتیجه گرفتند که کیفیت پایین هوا در محیط‌های ورزشی باعث به وجود آمدن مشکلاتی برای سیستم تنفسی ورزشکاران خواهد شد. فرناندز و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۳ با بررسی ۲۳۰ نفر از کارکنان در ۲۱ استخر در اسپانیا، مشاهده کردند که در ۸۵ درصد از استخرهای مورد بررسی مقدار کلر بیشتر از مقدار مجاز بوده و کارکنان آن‌ها دچار مشکلاتی مانند خشکی و خارش پوست، سوزش چشم و بیماری‌های مربوط به گوش شده‌اند. در سال ۱۳۹۵ ذوالفقاری و همکاران [۱۱] اثرات متقابل تبخیر، احساس حرارتی و غلظت آلاینده‌ها را در یک استخر شنای سرپوشیده بدون جایگاه تماشاگران را با استفاده از مدل دو نقطه‌ای گایج [۱۲] مورد بررسی قرار دادند و در سال ۱۳۹۶ هوشمند و همکاران [۱۳] به ارزیابی تأثیر مشخصه‌های فردی بر احساس حرارتی در یک استخر شنای سرپوشیده بدون جایگاه تماشاگران با تغییر در جانمایی دریچه‌های ورودی هوا پرداختند، آن‌ها نشان دادند که زنان نسبت به مردان و افراد لاغر نسبت به افراد دارای اضافه وزن نسبت به شرایط سرما حساس‌ترند. همان‌طور که دیده می‌شود لزوم ایجاد شرایط آسایش حرارتی برای افراد و کنترل میزان رطوبت، جلوگیری از افزایش میزان کلر و کنترل کیفیت هوا به دلیل آسیب‌هایی که می‌تواند بر سلامتی انسان بگذارد، نیاز به طراحی سیستم تهویه کارآمد را دو چندان می‌کند. از طرفی در استخرهای دارای جایگاه تماشاگران به دلیل تفاوت در پوشش، میزان تری پوست و نرخ متابولیک شناگران و تماشاگران، شرایط آسایش آن‌ها به شدت متفاوت است. به همین دلیل، لازم است تا دو سیستم تهویه مجزا برای این دو قسمت طراحی شود. یک ایده مناسب برای جداسازی فضای استخر از جایگاه تماشاگران، استفاده از پرده هوایی به عنوان یک جداساز آبرودینامیکی است. پرده هوا، دستگاهی است که برای جلوگیری از جابجایی هوا یا آلاینده‌ها از یک فضا به فضای دیگر به



شکل ۱. فضای نمونه تحقیق حاضر
Fig. 1. Present study geometry



شکل ۲. نمای سه بعدی هندسه تحقیق حاضر
Fig. 2. 3D view of the present study geometry

۲- فضای نمونه و شرایط مرزی

فضای نمونه، مربوط به استخر قهرمانی با جایگاه تماشاگران می‌باشد که نمایی از هندسه آن، در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس قوانین فدراسیون شنا [۲۵] برای استخرهای قهرمانی هندسه استخر دارای طول و عرض ۵۰ و ۲۵ متر در نظر گرفته شده است. در هندسه حاضر استخر از هر طرف ۵ متر با دیواره فاصله دارد و سالن استخر دارای ارتفاع ۶ متر می‌باشد. جایگاه تماشاگران در ارتفاع ۲۲۰ سانتی‌متری از کف سالن استخر قرار دارد. جایگاه تماشاگران و سالن استخر دارای ورودی و خروجی هوا مطابق شکل ۱ می‌باشند. ورودی هوای سالن استخر برای یکسان‌سازی الگوی جریان به صورت نواری در طول استخر و با عرض ۰/۱ متر در کف سالن استخر قرار دارد و دارای دمای ۳۵ درجه سلسیوس و سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه است. ورودی هوای جایگاه تماشاگران نیز به صورت نواری واقع در دیوار عمودی پشت سر تماشاگران و دارای عرض ۰/۱۵ متر و فاصله ۲۰ سانتی‌متری از کف جایگاه تماشاگران قرار دارد. خروجی‌های هوا در هر دو قسمت سالن استخر و جایگاه تماشاگران به صورت نواری با

پرده هوایی باعث کاهش نفوذ به ساختمان می‌شود و نتایج حاصله نیز اعتبار روش‌های عددی را تأیید کرد.

برای این منظور، در این مقاله به ازای دو حالت مختلف (حالت ۱: عدم به کارگیری پرده هوایی و حالت ۲: استفاده از پرده هوا)، شرایط مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده‌اند. در هر دو حالت، از تهویه مجزا و شرایط ورودی متفاوت برای جایگاه تماشاگران و محوطه استخر استفاده شده است. در بخش جایگاه تماشاگران، به علت وجود اختلاف عمودی دمای هوا، قسمت‌های مختلف بدن احساس حرارتی به شدت متفاوتی را تجربه می‌کنند. به همین خاطر برای ارزیابی آسایش حرارتی در آن قسمت نمی‌توان از مدل‌های معروف فنر [۲۳] و گایج [۱۲] استفاده کرد. در این تحقیق برای بررسی احساس آسایش حرارتی افراد از مدل آسایش حرارتی موضعی و ۶۵ نقطه‌ای تانابه [۲۴] استفاده شده است که این مدل بدن را به ۱۶ بخش تقسیم می‌کند و هر بخش شامل چهار لایه پوست، چربی، ماهیچه و بخش مرکزی است و همچنین جریان خون نیز به عنوان یک نقطه در نظر گرفته شده است.

و توابع دیواره فقط در مجاورت دیواره‌های صلب تعریف شده گردیده است. لذا برای مدل‌سازی رفتار پرده هوایی، لازم بوده است تا شبکه محاسباتی در مجاورت آن به شدت ریز شود و همین امر بار محاسباتی بسیار بالایی را به کار حاضر تحمیل نموده است.

۳- معادلات حاکم

در این بخش، معادلات حاکم بر جریان و انرژی و همچنین معادلات آسایش حرارتی بیان خواهد شد [۱۱].

۳-۱- معادلات حاکم بر جریان و انرژی

معادله پیوستگی:

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

معادله بقای تکانه خطی:

$$(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu_{\text{eff}} \nabla^2 \vec{V} + \vec{S} \quad (2)$$

معادله انرژی:

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

معادله بقای گونه برای بخار آب:

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

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 رابطه بالا Q_c جمله چشمه برای معادله بقای گونه کلر است. عبارت‌های ω_w و ω_c غلظت گونه‌ها می‌باشند. همچنین، جمله \vec{S} در رابطه (۲) بیان‌کننده نیروهای حجمی (شناوری) وارد بر سیال بوده و با تقریب بوزینسک^۱ محاسبه می‌شود.

عرض ۳۰ سانتی‌متر و در وسط سقف هر قسمت قرار گرفته و شرط مرزی آن‌ها برای سرعت گرادیان صفر است. با حل فضای نمونه در دمای ۲۴ درجه سلسیوس برای ورودی هوای جایگاه تماشاگران و سرعت ۱ متر بر ثانیه نتایج حل در دو حالت وجود و عدم وجود پرده هوایی با هم مقایسه شده است. ورودی هوای پرده هوایی دارای عرض ۲ سانتی‌متر و دارای دمای ۲۵ درجه سلسیوس و سرعت ۲ متر بر ثانیه است. خروجی پرده هوایی دقیقاً ۲ متر بالاتر از ورودی هوای پرده هوایی و در ارتفاع ۵ متری از کف سالن استخر قرار گرفته و دارای عرض ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. به دلیل این که بهترین محدوده برای میزان رطوبت نسبی فضای استخرها به منظور کاهش آلاینده‌های میکروبی و شیمیایی ۴۰ تا ۶۰ درصد است [۲۶]، رطوبت نسبی برای تمام ورودی‌ها ۵۰ درصد در نظر گرفته شده است همچنین سطح استخر دارای رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد بوده و شرط مرزی برای گونه آب روی دیواره‌ها گرادیان صفر است. شایان ذکر است که طبق دست‌نامه اشری [۶] شرایط طراحی متداول برای استخرهای قهرمانی به این صورت است که دمای آب استخر باید بین ۲۴ تا ۲۸ درجه سلسیوس باشد؛ به همین دلیل، در تحقیق حاضر دمای استخر ۲۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که دیواره‌های استخرها برای به حداقل رساندن تقطیر، عایق ساخته می‌شود. به همین خاطر در هندسه تحقیق حاضر دیوارها عایق و شرط مرزی دما برای دیواره‌ها گرادیان صفر در نظر گرفته شده است همچنین شرط عدم لغزش برای دیواره‌ها حاکم است. به دلیل استفاده از مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استاندارد، روی دیواره‌ها برای k و ε شرط مرزی تابع دیواره در نظر گرفته شده است. ضمناً با یک تخمین مهندسی می‌توان نشان داد که عدد ریچاردسون در شرایط استخر مذکور می‌تواند به حدود ۳۵۰ برسد که نشان دهنده آن است در بخش‌های قابل توجهی از هندسه مورد بررسی، سازوکار جابه‌جایی طبیعی غالب است و عدد رایلی نیز برابر $10^{11} \times 6/8$ می‌باشد.

ضمن اینکه حل به صورت دوبعدی انجام شده است به این صورت که به دلیل این که طول استخر زیاد و در حدود ۶۰ متر می‌باشد و بحرانی‌ترین محل از لحاظ افزایش میزان آلاینده کلر و احساس حرارتی وسط سالن استخر می‌باشد، یک قطاع از وسط استخر و به دلیل تقارن نصف آن شبیه‌سازی شده است. ضمن اینکه در کار حاضر برای مدل‌سازی پرده هوایی از تابع دیواره استفاده نشده است

1 Boussinesq approximation

که با سایر بخش‌های بدن تبادل حرارت دارد. معادلات موازنه انرژی بین چهار لایه مرکز، ماهیچه، چربی، پوست و بخش خون به صورت زیر می‌باشد [۲۴]:

$$\text{Core layer: } C(i,1)(dT(i,1)/dt) = Q(i,1) - B(i,1) - D(i,1) - \text{RES}(i,1) \quad (8)$$

$$\text{Muscle layer: } C(i,2)(dT(i,2)/dt) = Q(i,2) - B(i,2) - D(i,2) + D(i,1) \quad (9)$$

$$\text{Fat layer: } C(i,3)(dT(i,3)/dt) = Q(i,3) - B(i,3) - D(i,3) + D(i,2) \quad (10)$$

$$\text{Skin layer: } C(i,4)(dT(i,4)/dt) = Q(i,4) - B(i,4) + D(i,3) - Q_t(i,4) - E(i,4) \quad (11)$$

$$\text{Central blood: } C(65) \left(\frac{dT(65)}{dt} \right) = \sum_{i=1}^{i=16} \sum_{j=1}^{j=4} B(i,j) \quad (12)$$

این معادلات بیان کننده نحوه تبادل حرارت بین بخش‌ها و لایه‌های مختلف بدن و بخش خون می‌باشند. علائم و کمیت‌های موجود در معادلات مذکور در بخش علائم و نشانه‌ها معرفی شده است.

۱-۲-۳- حرارت تولید شده

در معادلات (۸) تا (۱۱) جمله $Q(i,j)$ بیانگر نرخ تولید حرارت در هر لایه از هر بخش بدن است که از رابطه (۱۳) قابل محاسبه است. نرخ تولید حرارت، حاصل جمع نرخ متابولیک بنیانی هر بخش $Q_b(i,j)$ ، حرارت تولید شده در اثر کار مکانیکی در هر بخش $W(i,j)$ و حرارت تولید شده از طرق لرز $C_h(i,j)$ می‌باشد. باید توجه داشت که حرارت تولید شده توسط کار و لرز تنها در قسمت ماهیچه‌ها یعنی لایه دوم ($J=2$) رخ می‌دهد و برای سایر لایه‌ها این مقادیر صفر می‌باشد [۲۴].

$$Q(i,j) = Q_b(i,j) + W(i,j) + C_h(i,j) \quad (13)$$

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

که در آن \bar{g} بردار شتاب گرانش زمین (ms^{-2}) و β ضریب انبساط حجمی (K^{-1}) است. ضریب لزجت مؤثر سیال که شامل لزجت سیال و لزجت اغتشاشی^۱ می‌باشد نیز با v_{eff} نشان داده شده است. لزجت اغتشاشی سیال با مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استاندارد محاسبه می‌شود.

$$v_{\text{eff}} = \nu + \nu_t \quad (7)$$

برای حل معادلات حاکم و انجام محاسبات، از حلگر اوپن فوم^۲ و بسته حل اسپشی بویانت بوزینسک سیمپل فوم^۳ استفاده شده است. این حلگر معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی را با روش حجم محدود حل می‌کند. این بسته حل با استفاده از تقریب بوزینسک به حل معادلات پیوستگی، تکانه خطی و انرژی به صورت جفت شده به کمک الگوریتم سیمپل می‌پردازد. حلگر اسپشی بویانت بوزینسک سیمپل فوم با اضافه نمودن جمله پخش گونه و جمله چشمه برای کلر به بسته تحلیل جریان پایه بویانت بوزینسک سیمپل فوم^۴ ساخته شده است.

۲-۳- مدل آسایش حرارتی ۶۵ نقطه‌ای تانابه

مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی آسایش حرارتی افراد ارائه شده است که در میان آن‌ها، مدل‌های معروف گایج [۱۲] و فنگر [۲۳] بسیار ساده و پرکاربرد هستند. ولی مدل‌های مذکور، آسایش حرارتی قسمت‌های مختلف بدن را بررسی نکرده و به صورت کلی شرایط آسایش را برای کل بدن پیش‌بینی می‌کنند. این در حالی است که در تحقیق حاضر، نیاز است تا احساس حرارتی بخش‌های مختلف بدن مورد ارزیابی قرار گیرد. بر این اساس، در تحقیق حاضر از مدل آسایش حرارتی ۶۵ نقطه‌ای تانابه [۲۴] استفاده شده است. این مدل، بدن را به ۱۶ بخش تقسیم می‌کند و هر بخش دارای ۴ لایه (مرکز، ماهیچه، چربی و پوست) می‌باشد و نقطه ۶۵ ام مربوط به خون است

1 Turbulence viscosity

2 OpenFoam

3 specieBuoyantBoussinesqSimpleFoam

4 buoyantBoussinesqSimpleFoam

لایه مرکزی ($J=1$) و بخش سینه ($i=2$) رخ می‌دهد بیان می‌کند و در این رابطه $t_a(1)$ و $P_a(1)$ دمای هوا و فشار بخار در بخش سر می‌باشد [۲۴].

$$RES(2,1) = \begin{cases} 0.0014(34 - t_a(1)) + \\ 0.017(5.867 - p_a(1)) \end{cases} \sum_{i=1}^{i=16} \sum_{j=1}^{j=4} Q(i,j) \quad (20)$$

۳-۲-۵- اتلاف حرارت تبخیری از پوست

مقدار اتلاف حرارت تبخیری در سطح پوست توسط رابطه (۲۱) محاسبه می‌گردد که رابطه (۲۲) اتلاف حرارت از طریق پخش بخار آب روی پوست می‌باشد [۲۴]:

$$E(i,4) = E_b(i,4) + E_{sw}(i,4) \quad (21)$$

$$E_b(i,4) = 0.06(1 - E_{sw}(i,4) / E_{max}(i,4)) E_{max}(i,4) \quad (22)$$

$$E_{max}(i,4) = h_e(i) (p_{sk,s}(i) - p_a(i)) A_{Du}(i) \quad (23)$$

$$E_{sw}(i,4) = \left\{ \begin{array}{l} C_{sw} Err(1,1) + S_{sw} (Wrms - Clds) + \\ P_{sw} Wrm(1,1) Wrms \end{array} \right\} \times \quad (24)$$

$$SKINS(i) km(i,4)$$

رابطه (۲۴) بیانگر میزان اتلاف حرارتی از طریق تبخیر عرق روی پوست می‌باشد. ضمن اینکه رابطه (۲۳) بیانگر ماکزیمم حرارت مبادله شده از طریق تبخیر است که در آن h_e ضریب انتقال حرارت تبخیری از سطح پوست به محیط اطراف می‌باشد که تابعی از ضریب نفوذ تبخیری لباس $i_{cl}(i)$ بوده و توسط رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود. کمیت‌های $p_{sk,s}(i)$ و $p_a(i)$ در رابطه (۲۳) به ترتیب فشار بخار اشباع روی پوست و فشار بخار محیط اطراف هستند که توسط روابط (۲۶) و (۲۷) محاسبه می‌شوند [۲۴].

$$h_e(i) = \left(\frac{i_{cl}(i).LR}{0.155I_{cl}(i) + \left(\frac{i_{cl}(i)}{h_c(i)} f_{cl}(i) \right)} \right) \quad (25)$$

$$W(i,j) = 58.2(M - Q_b) A_{Du} Metf(i) \quad (14)$$

$$C_h(i,j) = \left\{ \begin{array}{l} -C_{ch} Err(1,1) - S_{ch} (Wrms - Clds) - \\ P_{ch} Cld(1.1) Clds \end{array} \right\} Chilf(i) \quad (15)$$

اگر مقادیر به دست آمده برای $W(i,j)$ و $C_h(i,j)$ در لایه ماهیچه‌ای منفی باشد، این مقادیر برابر با صفر فرض می‌شود.

۳-۲-۲- حرارت انتقال داده شده از طریق جریان خون

پارامتر $B(i,j)$ بیانگر حرارت مبادله شده بین خون و سایر بخش‌های بدن است که از طریق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود. در این رابطه $a = 1/0$ و $\rho C = 1/0.67 \text{ Wh}/^\circ\text{C}$ در نظر گرفته شده است. ضمن اینکه $T(65)$ بیانگر دمای خون در مرکز هر قسمت می‌باشد [۲۴].

$$B(i,j) = a \rho c BF(i,j) (T(i,j) - T(65)) \quad (16)$$

$$BF(i,j) = BFB(i,j) + \left(\frac{W(i,j) + C_h(i,j)}{1.16} \right) \quad (17)$$

$$BF(i,4) = \frac{BFB(i,4) + SKINV(i) \times D_L}{1 + (SKINC(i) \times S_T)} \times km(i,4) \quad (18)$$

رابطه (۱۷) بیانگر نرخ جریان خون در تمامی لایه‌ها به جز پوست است و معادله (۱۸) برای لایه پوست می‌باشد و $BFB(i,j)$ نیز بیانگر نرخ جریان بنیانی خون برای هر بخش می‌باشد.

۳-۲-۳- تبادل حرارت با سازوکار هدایت

مقدار حرارت مبادله شده از طریق سازوکار هدایت با لایه مجاور در هر بخش از بدن به وسیله رابطه (۱۹) بیان می‌شود که $C_d(i,j)$ معرف هدایت حرارتی بین دو لایه مجاور است [۲۴].

$$D(i,j) = C_d(i,j) (T(i,j) - T(i,j+1)) \quad (19)$$

۳-۲-۴- اتلاف حرارت به وسیله تنفس

رابطه (۲۰) میزان حرارت اتلاف شده از طریق تنفس را که تنها در

$$Wrm(i, j) = Err(i, j), \quad Cld(i, j) = 0 \quad (31)$$

$$Cld(i, j) = -Err(i, j), \quad Wrm(i, j) = 0 \quad (32)$$

همچنین، سیگنال‌های حسی یکپارچه توسط روابط (۳۳) و (۳۴) محاسبه می‌شوند

$$Wrms = \sum_{i=1}^{16} (SKINR(i) \times Wrm(i, 4)) \quad (33)$$

$$Clds = \sum_{i=1}^{16} (SKINR(i) \times Cld(i, 4)) \quad (34)$$

۳-۲-۸- سیستم تنظیم حرارت مدل ۶۵ نقطه‌ای

تمامی معادلات کنترلی از سه بخش تشکیل شده‌اند. یکی از آن‌ها به سیگنال مرکز سر و دیگری به سیگنال پوست و سومین سیگنال، به هر دو وابسته است. سیستم تنظیم حرارت بدن براساس چهار فرایند شامل تولید حرارت از طریق اتساع عروق، انقباض عروق، تعرق و لرز می‌باشد. سیگنال‌های کنترلی D_L و S_T به ترتیب جهت اتساع و انقباض عروق پوست مورد استفاده قرار می‌گیرند و توسط روابط (۳۵) و (۳۶) محاسبه می‌شوند [۲۴].

$$D_L = C_{dl} Err(1.1) + S_{dl} (Wrms - Clds) + P_{dl} Wrms \quad (35)$$

$$S_T = -C_{st} Err(1.1) - S_{st} (Wrms - Clds) + P_{st} Clds \quad (36)$$

$$km(i, 4) = 2.0^{Err(i, 4)/RT(i, 4)} \quad (37)$$

که $RT(i, 4)$ برابر $10^\circ C$ می‌باشد. همچنین، مقادیر $A_{Du}(i)$ ، $Chilf(i, j)$ ، C_{dl} ، $C_d(i, j)$ ، C_{ch} ، $C(i, j)$ ، $BFB(i, j)$ ، P_{sw} ، P_{st} ، P_{dl} ، P_{ch} ، $Metf(i)$ ، $D(i, j)$ ، C_{sw} ، C_{st} ، S_{dl} ، S_{ch} ، Q_b ، $SKINS(i)$ ، $SKINR(i)$ ، $SKINC(i)$ ، S_{dl} ، S_{ch} ، Q_b ، $SKINV(i)$ و $T_{set}(i, j)$ در جداول ارائه شده توسط تانابه و همکاران [۲۴] نمایش داده شده است.

$$p_{air} = \left(\frac{RH}{100} \right) \exp \left(16.6536 - \frac{4030.183}{T_{air} + 235} \right) \quad (26)$$

$$p_{sk,sat} = \exp \left(16.6536 - \frac{4030.183}{T_{air} + 235} \right) \quad (27)$$

۳-۲-۶- انتقال حرارت محسوس بر روی سطح پوست

پارامتر $Q_t(i, 4)$ نشان دهنده نرخ انتقال حرارت جابجایی و تابشی بین پوست و محیط اطراف است که توسط رابطه (۲۸) محاسبه می‌شود. در این رابطه $h_t(i)$ ضریب انتقال حرارت کلی بین پوست و محیط اطراف است که از طریق رابطه (۲۹) محاسبه می‌گردد [۲۴].

$$Q_t(i, 4) = h_t(i) (T(i, 4) - t_o(i)) A_{Du}(i) \quad (28)$$

$$\frac{1}{h_t(i)} = 0.155 I_{cl}(i) + (1/h_c(i) + h_r(i) f_{cl}(i)) \quad (29)$$

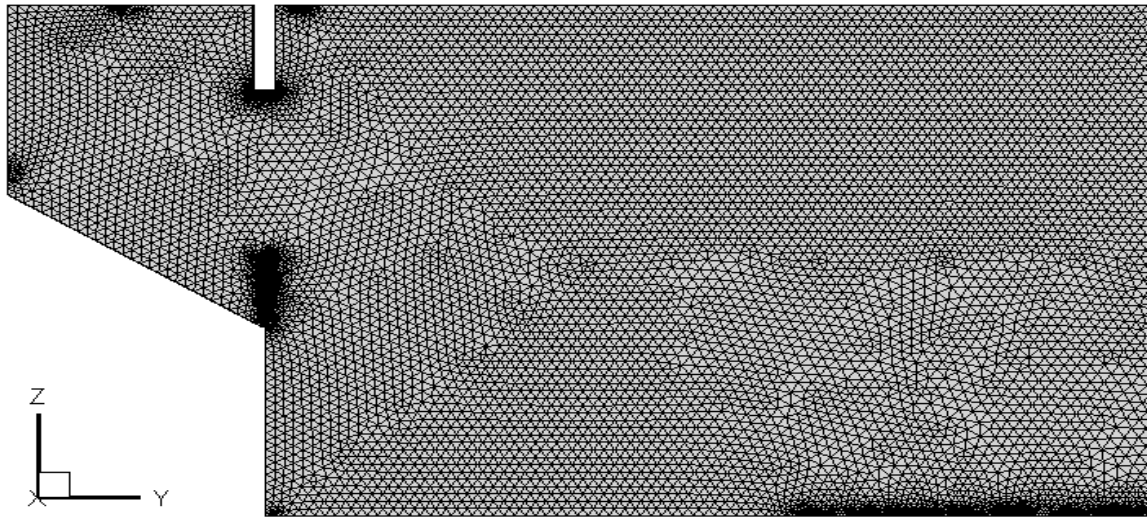
۳-۲-۷- سیستم کنترلی مدل ۶۵ نقطه‌ای

سیستم کنترلی برای این مدل، سیگنال‌های ارسال شده توسط حسگرهای عصبی بدن است که از طریق رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود. در این رابطه T_{set} به عنوان دمای کنترلی نقش مهمی را در تنظیم حرارت بدن ایفا می‌کند [۲۴].

$$Err(i, j) = (T(i, j) - T_{set}(i, j)) + RATE(i, j) F(i, j) \quad (30)$$

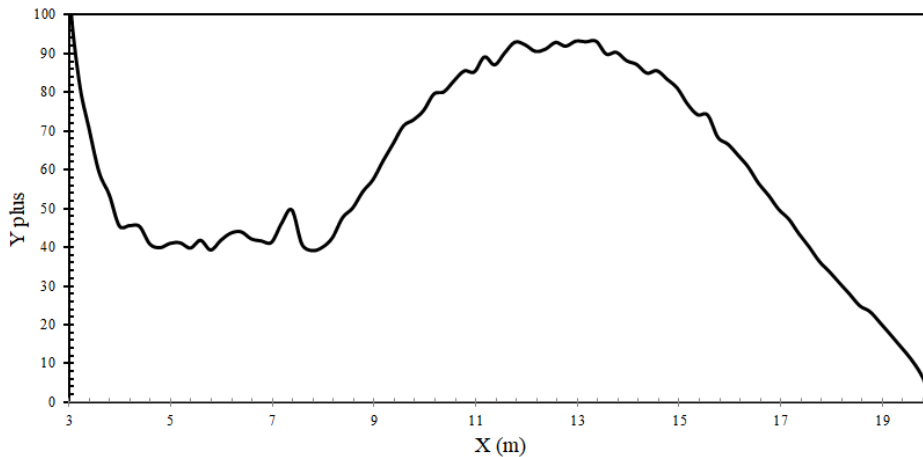
که $RATE(i, j)$ ، در رابطه (۳۰) حساسیت دینامیکی دریافت کننده‌های حرارتی و $F(i, j)$ نیز نرخ تغییر دما در هر بخش می‌باشد. از آنجایی که تاکنون تحلیل و آزمایش دقیقی برای تعیین مقدار $RATE(i, j)$ انجام نشده است لذا طبق پیشنهاد تانابه و همکاران [۲۴] برای آن مقداری برابر با صفر لحاظ می‌شود.

سیگنال گرم $Wrm(i, j)$ و سیگنال سرد $Cld(i, j)$ به گیرنده‌های سرد و گرم وابسته‌اند که برای محاسبه آن‌ها هنگامی که سیگنال خطا مثبت باشد ($Err(i, j) > 0$) از رابطه (۳۱) و در غیر این صورت ($Err(i, j) < 0$) از رابطه (۳۲) محاسبه می‌شوند [۲۴].



شکل ۳. شبکه بندی هندسه تحقیق حاضر

Fig. 3. Generated mesh for the present study



شکل ۴. نمودار توزیع مقدار y^+ در مجاورت کف سالن استخر برای شبکه بندی هندسه تحقیق حاضر

Fig. 4. Distribution of y^+ in the pool hall floor for generated mesh

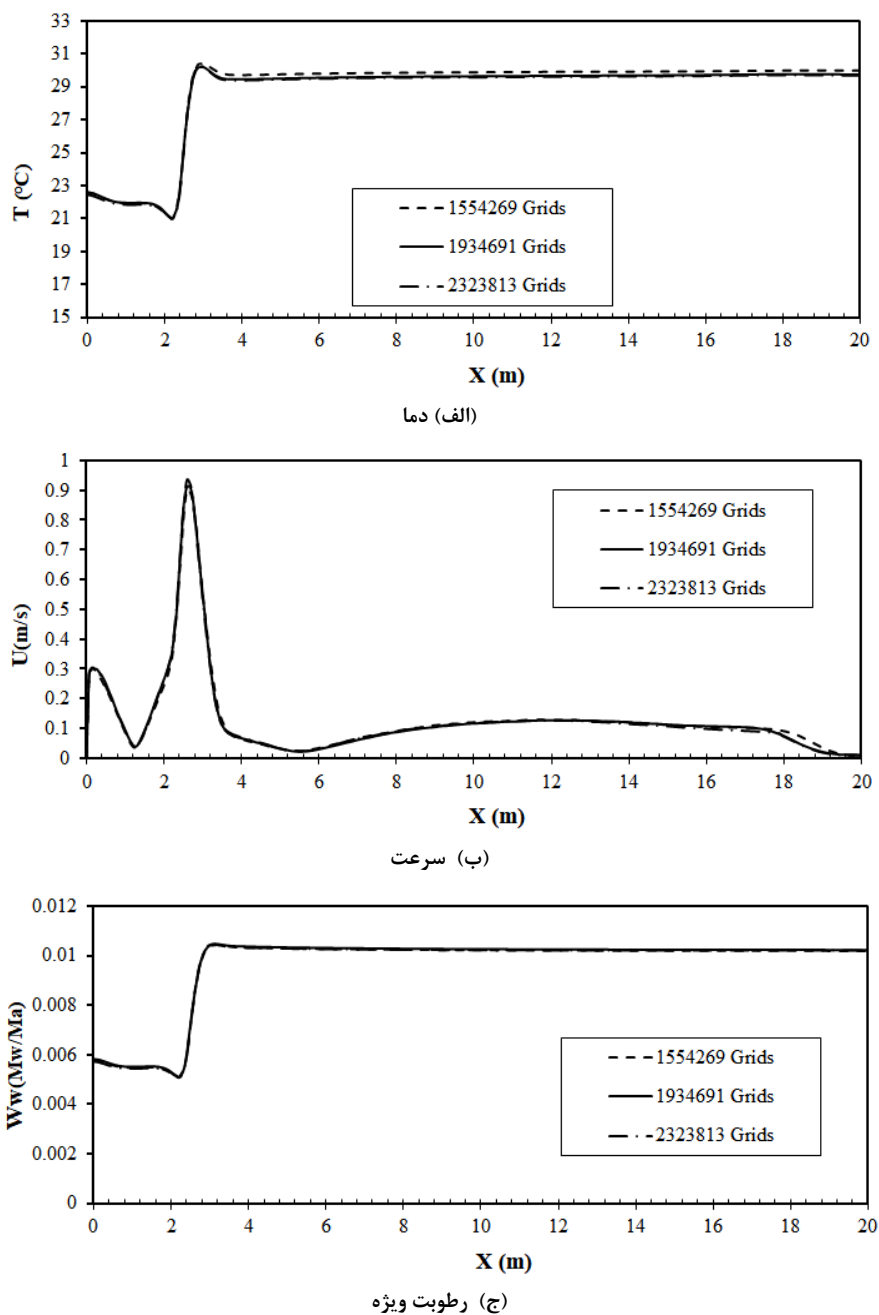
نشان می‌دهد. شکل ۵ نشان دهنده میزان دما، سرعت و رطوبت ویژه (نسبت جرم بخار به جرم کل هوا) در خط افقی در طول استخر در ارتفاع ۴ متری از سطح استخر است؛ همانطور که دیده می‌شود به دلیل نزدیک بودن نتایج حاصل از شبکه‌های با تعداد گره ۱۹۳۴۶۹۱ و ۲۳۲۳۸۱۳ شبکه با تعداد گره ۱۹۳۴۶۹۱ برای حل هندسه مربوطه انتخاب شد.

۵- اعتبار سنجی

به منظور اعتبارسنجی کد عددی مورد استفاده در تحقیق حاضر، از نتایج تحقیق لی و هیزلبرگ [۵] استفاده شده است. در شکل ۶

۴- استقلال حل از شبکه محاسباتی

به منظور انتخاب شبکه مناسب برای هندسه مربوطه لازم است تا نتایج حاصل با چند شبکه محاسباتی مختلف مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور چند شبکه با تعداد گره‌های ۱۵۵۴۲۶۹، ۱۹۳۴۶۹۱ و ۲۳۲۳۸۱۳ بررسی شده است. در هر مرحله، تعداد گره‌ها تقریباً ۱/۲ برابر شده است. شکل ۳ شبکه بندی هندسه تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود در مجاورت ورودی و خروجی هوا و همچنین در نزدیک استخر شبکه بندی ریزتر شده است و علاوه بر آن، در مجاورت دیوارها از شبکه لایه مرزی استفاده شده است. همچنین، شکل ۴ مقدار y^+ را در مجاورت کف سالن استخر



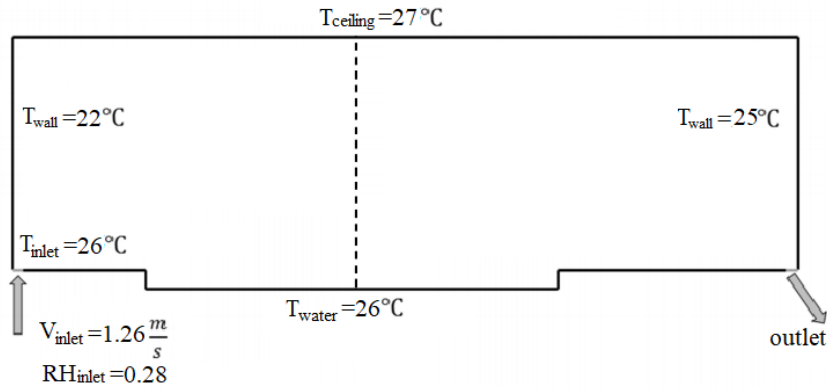
شکل ۵. نمودار بررسی استقلال از شبکه برای سه تعداد شبکه متفاوت. (الف) دما، (ب) سرعت، (ج) رطوبت

Fig. 5. Grid independency diagram for three different mesh numbers. (a) Temperature, (b) Velocity, (c) Humidity

۶- نتایج و بحث

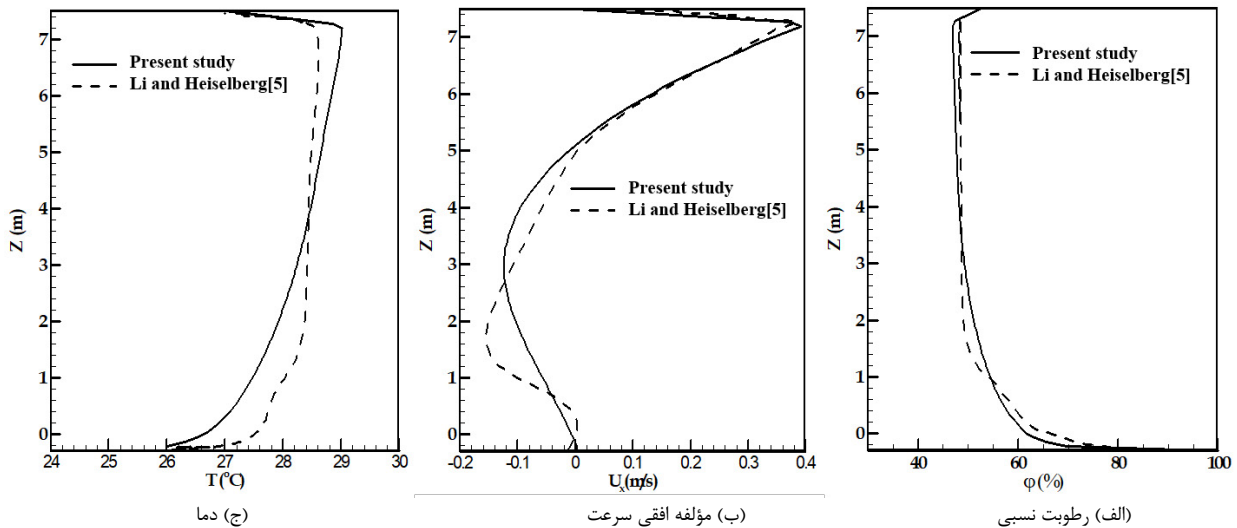
همان‌طور که پیشتر نیز بیان شد، هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر استفاده از پرده هوایی برای جداسازی آیرودینامیکی دو قسمت تماشاگران و شناگران به منظور کاهش نفوذ آلاینده به قسمت تماشاگران و مقایسه آن با حالت بدون پرده هوایی و همچنین بررسی آسایش حرارتی در این دو حالت می‌باشد. در هندسه حاضر دریچه ورودی هوا در قسمت سالن استخر

نمایی از فضای نمونه مورد بررسی در تحقیق لی و هیزلبرگ [۵] نشان داده شده است. مقایسه نتایج رطوبت نسبی، سرعت و دما با تحقیق لی و هیزلبرگ [۵] در محل خط عمودی در وسط استخر نشان دهنده تطابق قابل قبول روش حل عددی تحقیق حاضر با نتایج تجربی می‌باشد. نمودارهای نشان داده شده در شکل ۷ نشان دهنده مقایسه نتایج رطوبت نسبی، سرعت و دما با تحقیق لی و هیزلبرگ [۵] در محل خط عمودی در وسط استخر می‌باشد.



شکل ۶. نمایی از هندسه، شرایط مرزی و محل دریچه‌های ورودی و خروجی در استخر مورد بررسی در تحقیق لی و هیزلبرگ [۵]

Fig. 6. An overview of geometry, boundary conditions, inlet and outlet location in the pool from Li and Heiselberg research [5]

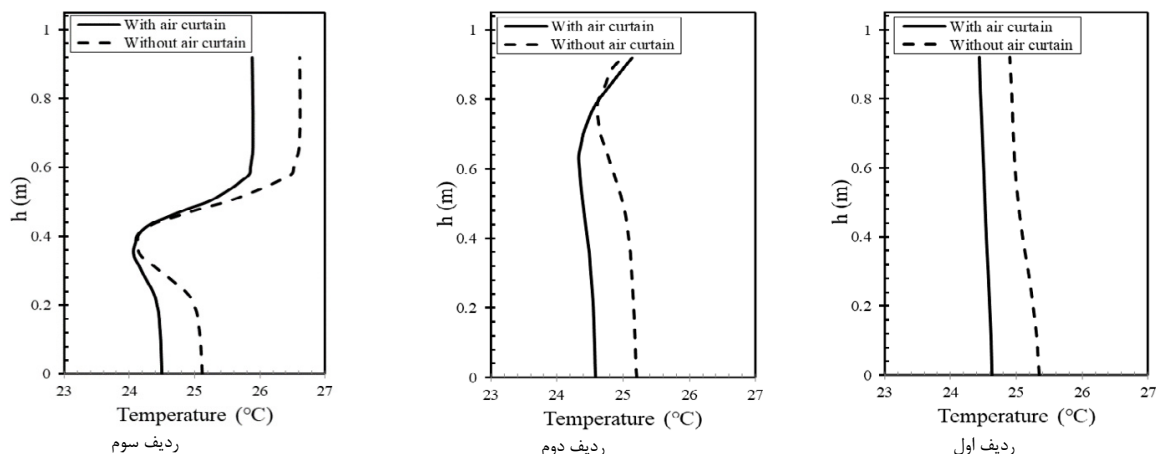


شکل ۷. مقایسه نتایج کد عددی تحقیق حاضر با نتایج لی و هیزلبرگ [۵]. (الف) رطوبت نسبی، (ب) مؤلفه افقی سرعت، (ج) دما

Fig. 7. Validation of numerical code results with Li and Heiselberg reserch [5]. (a) Relative humidity, (b) Horizontal velocity component, (c) Temperature

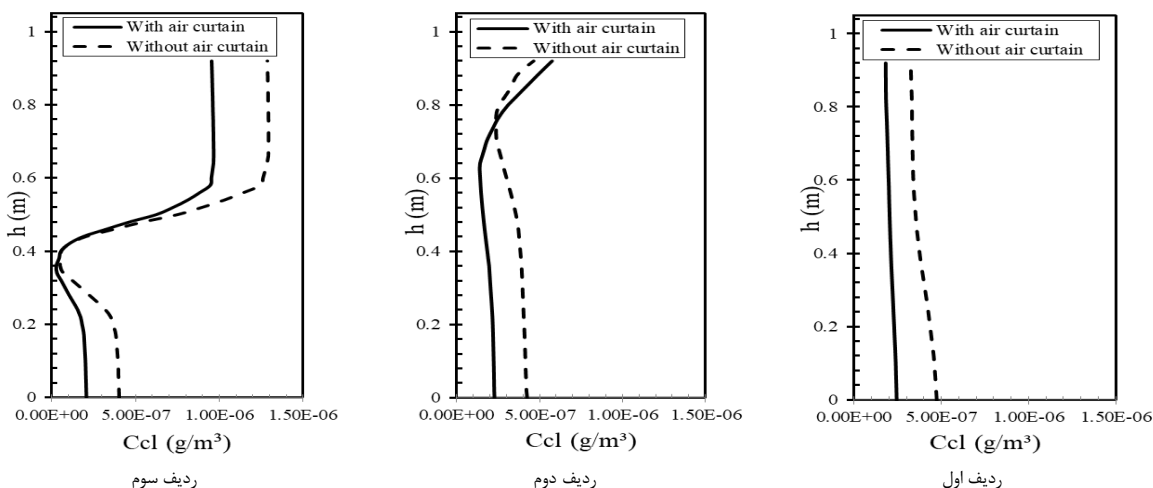
تماشاگران است و فاصله افقی هر ردیف از یکدیگر ۷۰ سانتی‌متر و فاصله افقی ردیف اول از پرده هوایی تقریباً ۸۰ سانتی‌متر است. در شبیه‌سازی‌های محیط‌های داخلی نتایج سرعت و دما بر حسب متر بر ثانیه و سلسیوس گزارش می‌شود. در نتیجه برای درک بهتر نتایج و مقایسه راحت‌تر حالات در این مقاله نیز از این واحدها برای بیان نتایج استفاده شده است. سایر نتایج مانند آسایش حرارتی نیز دارای استاندارد خاصی بوده (استاندارد اشری) که برای گزارش نتایج باید از این استاندارد استفاده گردد، که در این مقاله نیز این شیوه رعایت شده است.

(مطابق شکل ۱)، به صورت نواری در کنار دیواره و در قسمت کف سالن قرار گرفته است تا سرعت هوای ورودی که به صورت عمودی دمیده می‌شود باعث ایجاد کوران در محدوده حضور شناگران نشود. دریچه‌ی خروجی هوا نیز به صورت نواری در سقف قرار دارد. در قسمت تماشاگران نیز به منظور یکنواخت‌سازی توزیع هوای محیط، دریچه ورودی هوا به صورت نواری در دیوار پشتی و دریچه خروجی هوا بر روی سقف جایگاه، قرار گرفته است. در این هندسه جایگاه تماشاگران دارای سه ردیف صندلی بوده که ردیف اول نزدیک به پرده هوایی و ردیف سوم نزدیک به دیوار پشتی و ورودی هوای قسمت



شکل ۸. نمودار مقایسه دما بر حسب ارتفاع در دو حالت با و بدون پرده هوایی

Fig. 8. Comparing temperature distribution in two modes with and without air curtain



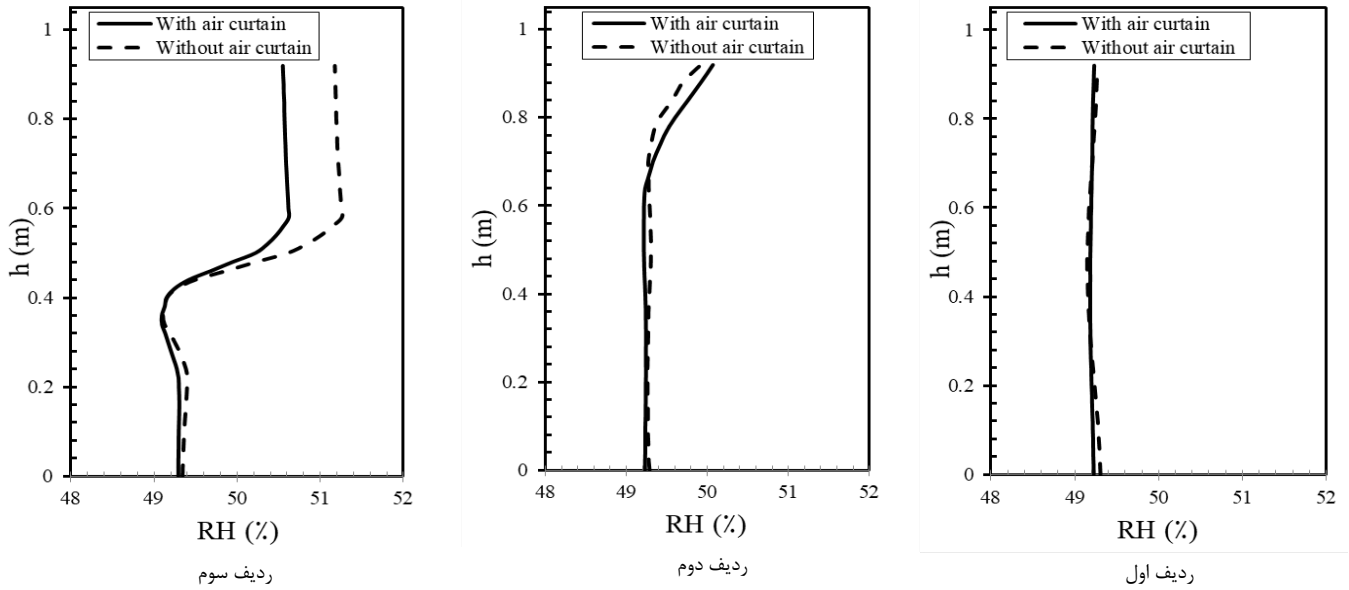
شکل ۹. مقایسه غلظت آلاینده کلر بر حسب ارتفاع در دو حالت با و بدون پرده هوایی

Fig. 9. Comparing the chlorine contaminant concentration in two modes with and without air curtain

در حالت استفاده از پرده هوایی دیده می‌شود که این امر در به دست آمدن آسایش حرارتی مطلوب‌تر مؤثر می‌باشد.

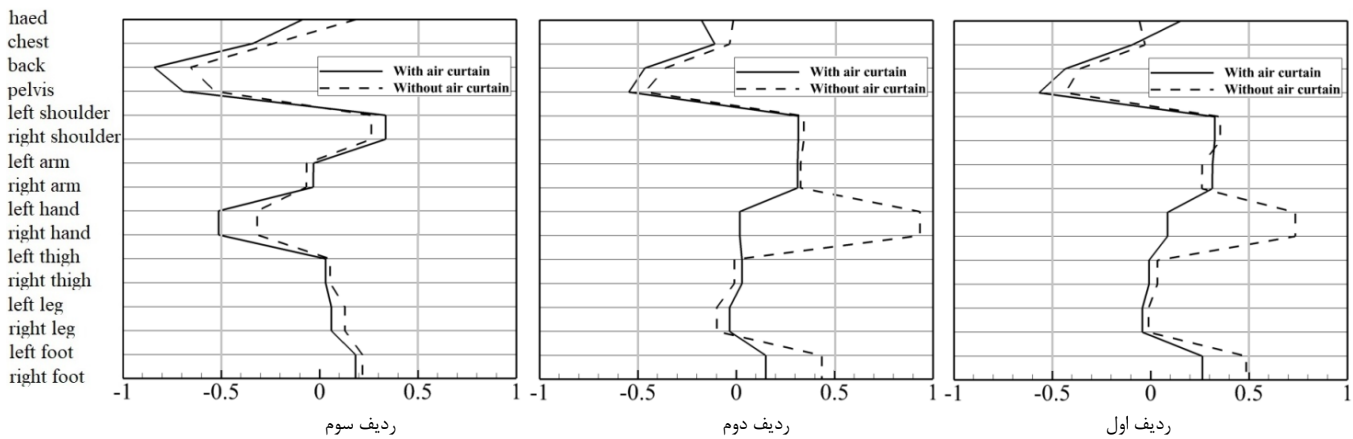
سطح مجاز برای غلظت آلاینده کلر در استخر $1/5 \text{ mg/m}^3$ است [۱۰]. افزایش غلظت آلاینده کلر تاثیرات نامطلوبی بر سلامتی فرد دارد به طوری که افزایش بیش از حد آن باعث مرگ نیز می‌شود از این رو کنترل کیفیت هوا برای کاهش این آلاینده از عوامل مهم انتخاب یک سیستم تهویه مناسب است. اگر چه در هر دو این حالت‌ها به دلیل زیاد نبودن آلاینده کلر در قسمت سالن استخر، مقدار کلر در قسمت تماشاگران کمتر از حد مجاز بوده و مقدار آن مناسب است ولی با توجه به نمودارهای شکل ۹ مشاهده می‌شود که با استفاده از پرده هوایی می‌توان به طور قابل ملاحظه‌ای از نفوذ آلاینده به قسمت

شکل ۸ نمودار تغییرات دما بر حسب ارتفاع برای سه ردیف مختلف نشستن افراد در قسمت تماشاگران را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود در حالتی که از پرده هوایی استفاده شده است سه ردیف دارای دمای کمتری هستند و این کاهش دما به طور میانگین برای ردیف اول و نزدیک به سالن استخر در حدود $0/56^\circ\text{C}$ ، برای ردیف وسط $0/43^\circ\text{C}$ و همچنین برای ردیف سوم و نزدیک به دریچه ورودی هوا حدود $0/5^\circ\text{C}$ است و این اختلاف دما تا حدود $0/73^\circ\text{C}$ در بعضی نقاط نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که دمای قسمت تماشاگران کمتر از سالن استخر بوده و پرده هوایی باعث نفوذ کمتر حرارت از سالن استخر به قسمت جایگاه تماشاگران شده است و علاوه بر آن، یکنواختی حرارتی بیشتری بر حسب ارتفاع



شکل ۱۰. مقایسه درصد رطوبت نسبی بر حسب ارتفاع در دو حالت با و بدون پرده هوایی

Fig. 10. Comparing the relative humidity in two modes with and without air curtain



شکل ۱۱. مقایسه میزان آسایش حرارتی اعضای مختلف بدن در دو حالت با و بدون پرده هوایی

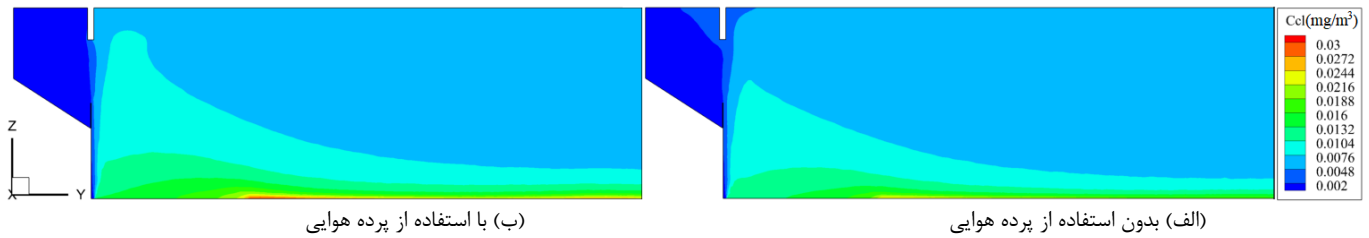
Fig. 11. Comparing the thermal comfort of different body members in two modes with and without air curtain

همچنین، سطح رطوبت نسبی همان‌طور که در نمودارهای شکل ۱۰ نیز دیده می‌شود برای هر سه ردیف در حدود ۵۰٪ بوده و به دلیل این که بهترین محدوده برای میزان رطوبت نسبی فضای استخرها به منظور کاهش آلاینده‌های میکروبی و شیمیایی ۴۰ تا ۶۰ درصد است [۲۶]، این مقدار برای استخرهای سرپوشیده مناسب است. در هندسه همراه با پرده هوایی تغییرات رطوبت نسبی، نسبت به ارتفاع به دلیل خاصیت جداسازی آیرودینامیکی پرده هوایی، دارای یکنواختی بیشتری است.

در نمودارهای مربوط به شکل ۱۱ احساس حرارتی قسمت‌های

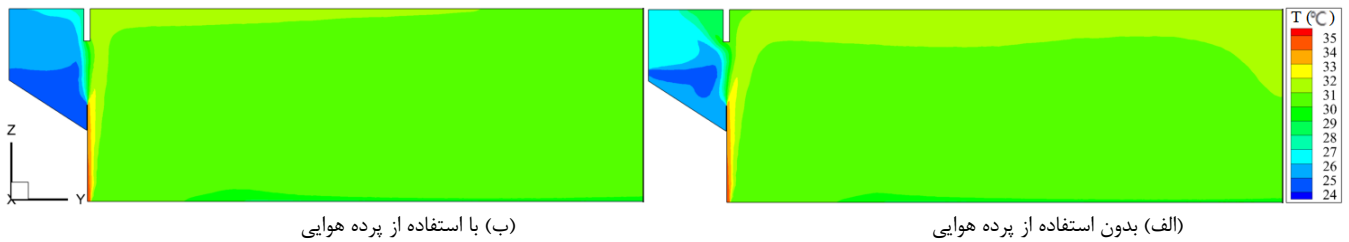
تماشاگران جلوگیری کرد به صورتی که در حالت استفاده از پرده هوایی به طور میانگین غلظت کلر در ردیف اول 0.00017 mg/m^3 و ردیف وسط 0.00012 mg/m^3 و همچنین ردیف سوم 0.00017 mg/m^3 کمتر از حالت بدون بکارگیری پرده هوایی است لازم به ذکر است که بیشترین غلظت کلر در سه ردیف جایگاه تماشاگران و در محدوده تنفس افراد در حالت بدون پرده هوایی برابر 0.00097 mg/m^3 و در حالت همراه با پرده هوایی برابر 0.00097 mg/m^3 است که می‌توان نتیجه گرفت پرده هوایی حدود ۲۶٪ مقدار بیشینه غلظت کلر را کاهش داده است.

curtain



شکل ۱۲. میدان غلظت آلاینده کلر در استخر قهرمانی. (الف) بدون بکارگیری پرده هوایی، (ب) با بکارگیری پرده هوایی

Fig. 12. Chlorine contaminant Concentration Field in Olympic-size Pool. (a) without air curtain, (b) with air curtain



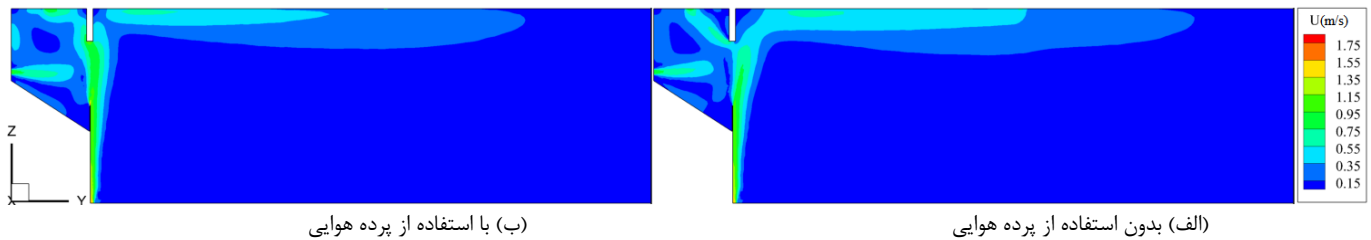
شکل ۱۳. میدان دما در استخر قهرمانی (الف) بدون استفاده از پرده هوایی، (ب) با استفاده از پرده هوایی

Fig. 13. The temperature field in Olympic-size pool (a) without air curtain, (b) with air curtain

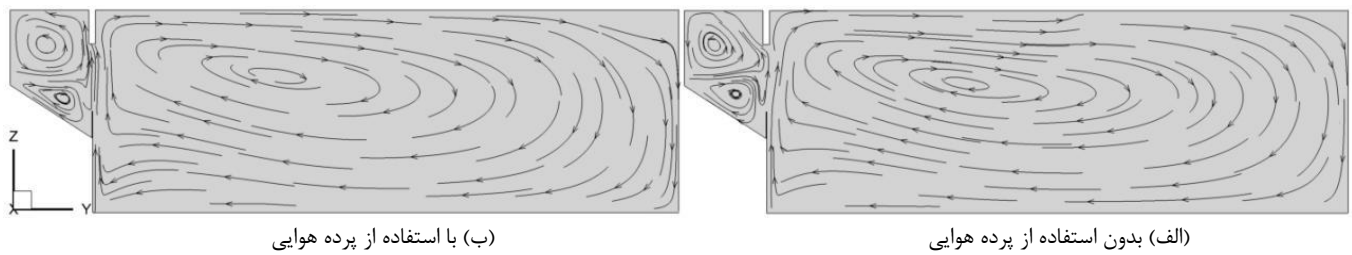
شرایط احساس سرما را تجربه می‌کند در بقیه حالات احساس غالب در این سه ردیف در محدوده $-0/5$ تا $+0/5$ قرار دارد که به لحاظ آسایش حرارتی مطلوب است ولی در حالتی که از پرده هوایی استفاده نشده است، افراد دارای احساس حرارتی نسبتاً غیریکنواختی هستند که این غیر یکنواختی در ردیف میانی مشهودتر است؛ به طوری که میانگین اختلاف بیشترین و کمترین میزان احساس حرارتی در سه ردیف در حالت استفاده از پرده هوایی تقریباً برابر ۱ واحد و در حالت بدون پرده هوایی برابر $1/2$ است.

با توجه به شکل ۱۲ که میدان غلظت آلاینده کلر را در حالات استفاده از پرده هوایی و بدون پرده هوایی نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده نمود که اگر از پرده هوایی استفاده شود، پرده هوایی از نفوذ آلاینده کلر به قسمت تماشاگران تا حدود زیادی جلوگیری می‌کند و در نتیجه غلظت آلاینده کلر در قسمت تماشاگران حدود ۳۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. همچنین، در شکل ۱۳ میدان دما در صفحه میانی استخر نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود که در حالت استفاده از پرده هوایی دمای هوا در قسمت تماشاگران دارای یکنواختی بیشتری است. در حالت بکارگیری پرده

مختلف بدن با استفاده از مدل ۱۶ بخشی تانابه [۲۴]، در دو حالت با و بدون پرده هوایی مقایسه شده است. که در این مدل، احساس حرارتی عددی بین -3 تا $+3$ بوده که احساس منفی مربوط به سرما و عدد مثبت مربوط به گرما است که در این شماره‌بندی -3 احساس حرارتی خیلی سرد و $+3$ احساس حرارتی خیلی گرم می‌باشند و احساس حرارتی $-0/5$ تا $+0/5$ احساس حرارتی مطلوب می‌باشد و فرد در این حالت احساس رضایت می‌کند. با دقت به نمودار مربوط به شکل ۱۱ این‌گونه استنباط می‌شود که با نزدیک شدن به دریچه ورودی هوای جایگاه تماشاگران، احساس حرارتی این سه ردیف به سمت سرما متمایل می‌شود به این صورت که در حالت استفاده از پرده هوایی میانگین احساس حرارتی در ردیف اول $0/06$ ، ردیف دوم $0/02$ و برای ردیف سوم برابر $-0/11$ و در حالت بدون بکارگیری پرده هوایی برای ردیف‌های اول تا سوم به ترتیب برابر $0/18$ ، $0/19$ و $-0/04$ واحد آسایش حرارتی است که همان‌طور که دیده می‌شود میانگین احساس در هر سه ردیف در حالت بدون پرده هوایی به سمت گرما متمایل‌تر است. در حالتی که از پرده هوایی استفاده شده است به جز در ردیف سوم و نزدیک به ورودی هوا که قسمت پشت فرد تا حدودی



شکل ۱۴. میدان سرعت در استخر قهرمانی (الف) بدون بکارگیری پرده هوایی، (ب) با بکارگیری پرده هوایی
Fig. 14. Velocity field in Olympic-size pool (a) without air curtain, (b) with air curtain



شکل ۱۵. خطوط جریان در استخر قهرمانی (الف) بدون بکارگیری پرده هوایی، (ب) با بکارگیری پرده هوایی
Fig. 15. Streamlines in the in Olympic-size Pool (a) without air curtain, (b) with air curtain

جریان در قسمت تماشاگران در دو حالت بکارگیری پرده هوایی و عدم بکارگیری پرده هوایی با هم متفاوت است. با توجه به به نمودارهای غلظت کلر و دما دلیل افزایش غلظت کلر و دما در ارتفاع نزدیک به ۰/۸ متری در ردیف دوم و در حالت به کارگیری پرده هوایی می‌تواند به نفوذ کلر از پرده هوایی و همراه شدن با الگوی جریان متفاوت نسبت به حالت بدون پرده هوایی در ردیف دوم بازگردد و در حالت بدون پرده هوایی با توجه به کانتور سرعت (شکل ۱۴) نیز می‌توان فهمید جهت وزش مقداری نسبت به حالت بکارگیری پرده هوایی در راستای عمودی جابه‌جا شده و هوای تازه در این ارتفاع در حالت بدون پرده هوایی در ارتفاع مورد نظر بیشتر می‌باشد ولی به طور میانگین در این ردیف و به طور کامل در دو ردیف دیگر غلظت کلر در حالت بکارگیری پرده هوایی کاهش یافته که به طور میانگین در سه ردیف جایگاه تماشاگران، مقدار کاهش غلظت کلر در حدود ۳۰ درصد می‌باشد.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق، استخری با ابعاد قهرمانی همراه با جایگاه تماشاگران در دو حالت بکارگیری پرده هوایی برای جداسازی

هوایی میانگین اختلاف میان بیشترین و کمترین دما در سه ردیف برابر با 0.9°C است در حالی که در حالت بدون پرده هوایی این میانگین برابر 1.2°C است که نشان دهنده نفوذ کمتر حرارت به قسمت تماشاگران در حالت استفاده از پرده هوایی و یکنواختی بیشتر محیط می‌باشد. همچنین، شکل ۱۴ میدان اندازه سرعت در صفحه میانی استخر را نشان می‌دهد. با توجه به تری پوست و نوع پوشش شناگران سرعت زیاد هوا در محدوده حضور آنها باعث ایجاد کوران و در نتیجه باعث ایجاد نارضایتی می‌شود و باید سیستم تهویه هوا به صورتی طراحی شود که دارای کمترین سرعت در محدوده حضور شناگران باشد. با قرار گرفتن دریچه ورودی هوا به صورت نواری در کف و نزدیک دیواره در سالن استخر و وزش عمودی هوا و همچنین دریچه خروجی سقفی، علاوه بر این که می‌توان نرخ تعویض هوای مورد نیاز برای سالن استخر را فراهم نمود، می‌توان مطابق شکل ۱۴ سرعت هوا در محدوده حضور شناگران را کنترل نمود و مقدار آن را به کمتر از 0.2 متر بر ثانیه رساند که این مقدار سرعت، برای ناحیه کنار استخر و منطقه حضور شناگران مناسب است. شکل ۱۵ نیز نشان دهنده خطوط جریان در دو حالت بکارگیری پرده هوایی و عدم بکارگیری پرده هوایی می‌باشد. همان طور که دیده می‌شود الگوی

ضریب کنترل لرز برای لایه مرکزی بخش سر	C_{ch}	$(W / ^\circ C)$
هدایت گرمایی گره (i, j) و گره همسایه $(W / ^\circ C)$	$C_d(i, j)$	
ضریب کنترل اتساع عروق برای لایه مرکزی بخش سر	C_{dl}	$(1/h^\circ C)$
حرارت تولید شده توسط لرز (W)	$C_h(i, j)$	
ضریب پخش حرارت تولیدی توسط لرز در لایه ماهیچه	$Chilf(i, j)$	
سیگنال سرد $(^\circ C)$	$Cld(i, j)$	
سیگنال سرد یکپارچه $(^\circ C)$	$Clds$	
ضریب کنترل اتساع عروق لایه مرکزی سر $(1/^\circ C)$	C_{st}	
ضریب کنترل تعرق لایه مرکزی سر $(W / ^\circ C)$	C_{sw}	
نرخ تبادل حرارت رسانش با لایه مجاور (W)	$D(i, j)$	
سیگنال اتساع عروق $(1/h)$	D_L	
اتلاف حرارت تبخیری از سطح پوست (W)	$E(i, \varphi)$	
اتلاف حرارت توسط پخش بخار آب در پوست (W)	$E_b(i, \varphi)$	
ماکزیمم اتلاف حرارت تبخیری (W)	$E_{max}(i)$	
اتلاف حرارت از طریق تبخیر عرق بر روی پوست (W)	$E_{sw}(i, \varphi)$	
سیگنال خطا $(^\circ C)$	$Err(i, j)$	
فاکتور سطح لباس	$f_{cl}(i)$	
نرخ تغییرات دما $(^\circ C / h)$	$F(i, j)$	
ضریب انتقال حرارت جابجایی $(W/m^2^\circ C)$	$h_c(i)$	
ضریب انتقال حرارت تبخیری از سطح پوست	$h_c(i)$	(W/m^2kPa)
ضریب انتقال حرارت تشعشی $(W/m^2^\circ C)$	$h_r(i)$	
ضریب انتقال حرارت کلی از سطح پوست $(W/m^2^\circ C)$	$h_t(i)$	
شمارشگر تعداد بخش (۱-۱۶)	i	
مقاومت تبخیری لباس	$i_{cl}(i)$	

آیرودینامیکی فضای سالن استخر و جایگاه تماشاگران و بدون استفاده از پرده هوایی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از پرده هوایی، به طور میانگین دمایی در حدود ۰/۵ درجه سلسیوس کمتر از حالت بدون پرده هوایی برای سه ردیف جایگاه تماشاگران فراهم می‌شود. همچنین، استفاده از پرده هوایی باعث کاهش نفوذ آلاینده کلر به قسمت تماشاگران شده و غلظت آلاینده کلر در قسمت جایگاه تماشاگران را حدود ۳۰ درصد کاهش می‌دهد. ضمن این که سطح رطوبت نسبی در جایگاه تماشاگران در حدود ۵۰٪ بوده که این مقدار برای استخرهای سرپوشیده مناسب می‌باشد. همچنین، با استفاده از نتایج مدل ۶۵ نقطه‌ای آسایش حرارتی و به دست آوردن احساس حرارتی بخش‌های مختلف بدن، می‌توان چنین نتیجه گرفت وجود پرده هوایی می‌تواند انحراف معیار شاخص احساس حرارتی را نسبت به حالت بدون پرده هوایی کاهش دهد و در نتیجه احساس حرارتی یکنواخت‌تری را در محیط ایجاد نماید. به طوری که انحراف معیار شاخص احساس حرارتی برای افراد مستقر در ردیف‌های اول تا سوم در حالت استفاده از پرده هوایی به ترتیب برابر ۰/۲۶، ۰/۲۵ و ۰/۲۸ است و در حالت بدون پرده هوایی این مقادیر به ترتیب برابر ۰/۳۳، ۰/۳۹ و ۰/۳۵ می‌باشد. همچنین در قسمت سالن استخر به دلیل حساس بودن پوست شناگران نسبت به افزایش سرعت، سیستم تهویه به گونه‌ای مدل‌سازی شده است که سرعت هوا در محدوده حضور شناگران کمتر از ۰/۲ متر بر ثانیه باشد تا باعث ایجاد کوران و نارضایتی برای آن‌ها نشود.

فهرست علائم

A_{Du}	مساحت سطح تمام بدن (m^2)
$A_{Du}(i)$	مساحت سطح هر بخش (m^2)
$B(i, j)$	نرخ تبادل حرارت مابین خون و گره (i, j) (W)
$BF(i, j)$	نرخ جریان خون $(1/h)$
$BFB(i, j)$	نرخ جریان بنیانی خون $(1/h)$
$C(i, j)$	ظرفیت گرمایی $(Wh / ^\circ C)$

ضریب توزیع لایه پوست برای سیگنال انقباض عروق	$SKINC(i)$	مقاومت حرارتی لباس (clo)	$I_{cl}(i)$
		شمارشگر تعداد لایه (۴-۱)	j
ضریب وزنی سیگنال‌های سنسور یکپارچه	$SKINR(i)$	فاکتور محلی	$km(i, \varphi)$
ضریب توزیع لایه پوستی برای تعرق	$SKINS(i)$	ضریب لوییس (°C / kPa)	LR
ضریب توزیع لایه پوستی برای انقباض عروق	$SKINV(i)$	نرخ متابولیسم کل بدن (met)	M
ضریب کنترل انقباض عروق لایه پوست هر بخش (۱/°C)	S_{st}	ضریب پخش لایه ماهیچه در تولید حرارت از کار خارجی	$Metf(i)$
ضریب کنترل تعرق در لایه پوست هر بخش (W / °C)	S_{sw}	فشار (kPa)	P
سیگنال انقباض عروق	S_T	فشار بخار محیط (kPa)	$p_a(i)$
دمای هوا در ناحیه سر (°C)	$t_a(i)$	شاخص میانگین رأی پیش‌بینی شده (بی بعد)	PMV
دمای عملکردی (°C)	$t_o(i)$	شاخص درصد ناراضایتی افراد (/.)	PPD
دمای خون در مرکز بدن (°C)	$T(65)$	فشار بخار اشباع روی سطح پوست (kPa)	$p_{sk,s}(i)$
دما هر گره (°C)	$T(i, j)$	ضریب کنترل لرز لایه مرکزی سر و لایه پوست هر بخش	P_{ch}
دمای متوسط تابش (°C)	T_{rd}	(W/°C ^۲)	
دما مینا (°C)	$T_{set}(i, j)$	ضریب کنترل اتساع عروق لرز لایه مرکزی سر و لایه پوست هر بخش (۱/h°C ^۲)	P_{dl}
سرعت (m/s ^{-۱})	V	ضریب کنترل انقباض عروق لرز لایه مرکزی سر و لایه پوست هر بخش (۱/°C ^۲)	P_{st}
کار خارجی (W)	$W(i, j)$	ضریب کنترل تعرق سیگنال‌های لایه مرکزی سر و لایه پوستی هر بخش (W/°C ^۲)	P_{sw}
سیگنال گرم (°C)	$Wrm(i, j)$	نرخ تولید حرارت (W)	$Q(i, j)$
سیگنال گرم یکپارچه (°C)	$Wrms(i, j)$	نرخ متابولیسم بنیانی کل بدن (met)	Q_b
علائم یونانی		نرخ متابولیسم بنیانی (W)	$Q_b(i, j)$
نفوذ حرارتی (m ^۲ /s)	α	نرخ تبادل حرارت جابجایی و تشعشعی سطح پوست و محیط (W)	$Q_t(i, j)$
ضریب انبساط حجمی (۱/K)	β	RATE حساسیت پویا حسگرها (h)	$RATE(i, j)$
چگالی (kg / m ^۳)	ρ	اتلاف حرارت از طریق تنفس (W)	$RES(\tau, 1)$
ضریب لزجت دینامیکی (kg / ms)	μ	جمله چشمه (N/m ^۲)	S
		ضریب کنترل لرز لایه پوستی هر بخش (W / °C)	S_{ch}
		ضریب کنترل اتساع عروق لایه پوستی هر بخش (۱/h°C)	S_{dl}

مراجع

- [1] ASHRAE, Handbook of Fundamentals, American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers,

- [12] A.P. Gagge, A. Fobelets, L. Berglund, A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Trans.:(United States), 92(CONF(-8606125-1986)).
- [13] M. Hooshmand, F. Davodi, A. Foadaddini, A. Zolfaghari, H. Hasanzadeh. " Evaluating the effects of individual characteristics on thermal sensation in an indoor pool with different arrangements for inlet air diffusers." Amirkabir Journal of Mechanical Engineering (2017) (in Persian).
- [14] A.S. El-Asfour, E.-S.K.A. El-Kassem, S.R. Taha, Heat Transfer Rates of Vertically Downward, Single Plane Jet, Air Curtains, in: 7th International Energy Conversion Engineering Conference, 2009, pp. 4610.
- [15] Miniveil Air Systems, Company History, accessed 12 December (2017), <<http://www.miniveil.com/history.html>>
- [16] A. Haasz, B. Kamen, Annular air-curtain domes for sports stadia, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 92-75 (1986) (1)25.
- [17] M. Juraeva, K.J. Ryu, S.-H. Jeong, D.J. Song, Numerical optimization study to install air curtain in a subway tunnel by using design of experiment, Journal of Mechanical Science and Technology, 190-183 (2014) (1)28.
- [18] A. Foster, M. Swain, R. Barrett, P. D'Agaro, L. Ketteringham, S. James, Three-dimensional effects of an air curtain used to restrict cold room infiltration, Applied Mathematical Modelling, 1123-1109 (2007) (6)31.
- [19] J. Gonçalves, J. Costa, A. Figueiredo, A. Lopes, Study of the aerodynamic sealing of a cold store-Experimental and numerical approaches, Energy and Buildings, 55 789-779 (2012).
- [20] J. Gonçalves, J. Costa, A. Figueiredo, A. Lopes, CFD modelling of aerodynamic sealing by vertical and horizontal air curtains, Energy and buildings, (2012) 52 160-153.
- [21] H. Giráldez, C.P. Segarra, I. Rodríguez, A. Oliva, Improved semi-analytical method for air curtains prediction, Energy and buildings, 266-258 (2013) 66.
- [22] S. Goubran, D. Qi, W.F. Saleh, L.L. Wang, R. Zmeureanu, Inc. Atlanta, GA, USA, (2009).
- [2] K. Biasin, W. Krumme, Evaporation in an indoor swimming pool, Electrowarme International, 1974) 32).
- [3] M. Shah, Rate of evaporation from undisturbed water pools to quiet air: evaluation of available correlations, International Journal of HVAC&R Research, (2002) (1)8 131-125.
- [4] M. Shah, Prediction of evaporation from occupied indoor swimming pools, Energy and Buildings, (2003) (7)35 713-707.
- [5] 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).
- [6] ASHRAE, HVAC applications, American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers, Inc. Atlanta, GA, USA, (2007)
- [7] G. Aggazzotti, G. Fantuzzi, E. Righi, G. Predieri, Environmental and biological monitoring of chloroform in indoor swimming pools, Journal of Chromatography A, 190-181 (1995) (1)710.
- [8] H. Hsu, M. Chen, C. Lin, W. Chou, J. Chen, Chloroform in indoor swimming-pool air: monitoring and modeling coupled with the effects of environmental conditions and occupant activities, Water research, -3693 (2009) (15)43 3704.
- [9] K.W. Rundell, M. Sue-Chu, Air quality and exercise-induced bronchoconstriction in elite athletes, Immunology and Allergy Clinics, 421-409 (2013) (3)33.
- [10] Á. Fernández-Luna, P. Burillo, J.L. Felipe, L. Gallardo, F.M. Tamara, Chlorine concentrations in the air of indoor swimming pools and their effects on swimming pool workers, Gaceta sanitaria, 417-411 (2013) (5)27.
- [11] A. Zolfaghari, 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 188-179 :(2016) 16.7 (in Persian).

- multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD), *Energy and Buildings*, 646-637 (2002) (6)34.
- [25] Fédération Internationale de Natation, FINA Facilities Rules, (2013).
- [26] A.V. Arundel, E.M. Sterling, J.H. Biggin, T.D. Sterling, Indirect health effects of relative humidity in indoor environments, *Environmental Health Perspectives*, 65 351 (1986).
- Experimental study on the flow characteristics of air curtains at building entrances, *Building and Environment*, 235-225 (2016) 105.
- [23] P.O. Fanger, Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering, *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*, (1970).
- [24] S.-i. Tanabe, K. Kobayashi, J. Nakano, Y. Ozeki, M. Konishi, Evaluation of thermal comfort using combined

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S.A. Zolfaghari, S. Azizi, S.M. Hooshmand, *Effect of Air Curtain on Occupants Thermal Comfort and Indoor Air Quality in an Athletic Swimming Pool with Spectators' Stand*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(1) (2021) 191-208.

DOI: [10.22060/mej.2018.14584.5892](https://doi.org/10.22060/mej.2018.14584.5892)

