



تحلیل آسایش حرارتی در فضای مجهز به ترکیب تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی سقفی

مهدی معرفت^{۱*}، نوید مروت^۲

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵، maerefat@modares.ac.ir

چکیده- هدف اصلی در طراحی سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع تأمین شرایط آسایش حرارتی می‌باشد. در تحقیق حاضر، عملکرد سیستم تهویه لایه‌ای و سیستم سرمایش تابشی سقفی به صورت جداگانه و در ترکیب با یکدیگر به منظور تأمین شرایط آسایش حرارتی کلی و موضعی مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، به بررسی و تحلیل پارامترهای PMV (میانگین آرای گروه بزرگی از افراد) و PPD (درصد نارضایتی حرارتی افراد) به عنوان دو شاخص آسایش حرارتی کلی پرداخته شده است. همچنین اختلاف دمای هوا در جهت عمودی و ریسک کوران حرارتی نیز به عنوان دو شاخص نارضایتی موضعی، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. براساس نتایج تحقیق حاضر، ترکیب تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی سقفی موجب توزیع یکنواخت‌تر شرایط آسایش حرارتی کلی نسبت به کاربرد جداگانه هر یک از سیستم‌ها می‌شود. همچنین اختلاف دمای هوا در جهت عمودی کاهش یافته و ریسک کوران حرارتی نیز وجود ندارد. از این رو ترکیب سیستم تهویه لایه‌ای با سرمایش تابشی سقفی به عنوان راهکاری نوین و کاربردی، توانایی تأمین شرایط آسایش حرارتی کلی و موضعی را دارا می‌باشد.

کلید واژگان: تهویه لایه‌ای، سرمایش تابشی سقفی، آسایش حرارتی، دینامیک سیالات محاسباتی.

Analysis of thermal comfort in space equipped with stratum ventilation and radiant cooling ceiling

M. Maerefat^{1*}, N. Morovat²

1- Assoc. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

2- MSc. Student, Mech. Eng., Tarbiat modares Univ., Tehran, Iran.

* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran. maerefat@modares.ac.ir

Abstract- The main goal in design of heating, cooling and air conditioning systems is to provide thermal comfort. In present study, performances of radiant cooling ceiling system and stratum ventilation have been studied separately and together to provide the overall and local thermal comfort conditions. Therefore, using computational fluid dynamics, indices PMV (predict mean vote) and PPD (predict percent dissatisfied) has been studied as two overall thermal comfort parameters. Also, vertical temperature gradient and draft risk has been studied as two indices dissatisfaction of local thermal comfort. According to the results of this study, combining stratum ventilation and radiant cooling ceiling caused a uniform distribution of overall thermal comfort conditions. Also vertical temperature gradient decreases and there is no draft risk. Therefore combining stratum ventilation and radiant cooling ceiling is introduced as the new Strategy and application ability to provide the proper conditions to achieve overall and local thermal comfort.

Keywords: Stratum Ventilation, Radiant Cooling Ceiling, Thermal Comfort, Computational Fluid Dynamics.

۱- مقدمه

هدف اصلی سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع ایجاد شرایط آسایش حرارتی برای انسان می‌باشد. براساس استاندارد اشری^۱ آسایش حرارتی به صورت زیر تعریف می‌شود: آسایش حرارتی حالتی ذهنی است که از شرایط محیط ابراز رضایت می‌کند و در چنین شرایطی افراد دارای احساس حرارتی مطلوب می‌باشند [۱].

به طور کلی در طراحی سیستم‌های تهویه مطبوع دو رویکرد وجود دارد:

- ۱- رویکرد سنتی که در آن به تأمین بار حرارتی و برودتی ساختمان توجه می‌شود.
- ۲- رویکرد نوین که در آن طراحی بر مبنای مدل‌های آسایش حرارتی صورت گرفته و تأمین شرایط آسایش حرارتی برای ساکنان مدنظر است.

از جمله سیستم‌هایی که براساس رویکرد نوین طراحی شده‌اند می‌توان به سیستم تهویه لایه‌ای و سیستم سرمایش تابشی سقفی اشاره نمود که به ترتیب براساس مکانیزم جابه‌جایی و تشعشع کار می‌کنند.

سیستم‌های تهویه مطبوع ساختمان را می‌توان به دودسته عمده تابشی و جابه‌جایی تقسیم کرد. عملکرد سیستم‌های جابه‌جایی، تبادل حرارت از طریق همرفت طبیعی یا اجباری و مطبوع ساختن دمای هوای اتاق برای ساکنان می‌باشد.

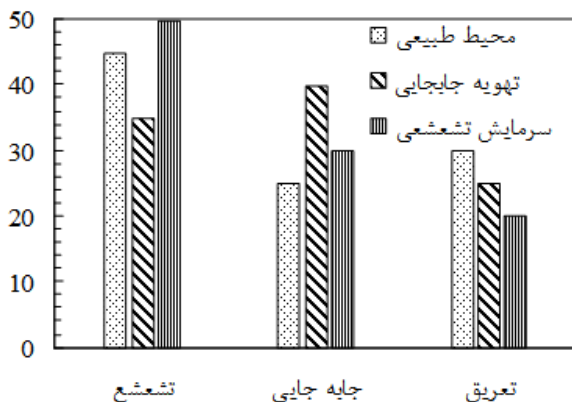
در سیستم‌های تابشی مکانیزم اصلی انتقال حرارت تشعشع می‌باشد. اساس کار این سیستم‌ها، فراهم کردن سطوح وسیع با ایجاد اختلاف دمای اندک نسبت به دمای هوای داخل می‌باشد. با توجه به این که سهم تابش در تبادل حرارت بدن در حدود ۴۲ درصد و بیشتر از سایر سازوکارهای انتقال حرارت است، سیستم‌های تابشی تطابق بهتری با فرایندهای انتقال حرارت بین بدن و محیط اطراف دارند [۲]. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در محیط طبیعی مکانیزم تشعشع غالب است و پس از آن تعریق بیشترین سهم را در انتقال حرارت از بدن انسان دارد.

در حالی که در حضور سرمایش تابشی سقفی، تشعشع مکانیزم غالب بوده و تعریق بسیار کاهش یافته است که این موضوع

موجب بهبود شرایط آسایش حرارتی می‌شود.

در شکل ۲ نمونه‌ای از سیستم سرمایش تابشی سقفی که در دانشگاه تربیت مدرس مورد مطالعه قرار گرفته است [۴]، مشاهده می‌شود.

از جمله مزایای سیستم سرمایش تابشی سقفی عدم وجود گرادیان عمودی دمای زیاد می‌باشد. همچنین به دلیل بالاتر بودن دمای سطوح تابشی نسبت به سیستم‌های وزشی و نزدیک‌تر بودن به دمای محیط اتاق، تطابق مناسبی میان توزیع عمودی دمای اتاق در سیستم‌های تابشی و توزیع ایده‌آل وجود دارد [۵]. از این رو سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی به عنوان راهکاری نوین در سیستم‌های تهویه مطبوع توانسته‌اند به خوبی آسایش حرارتی یکنواخت را ضمن مصرف کم انرژی فراهم کنند. با تمامی ویژگی‌های مثبتی که برای سیستم سرمایش تابشی سقفی ذکر شد، باید به این موضوع توجه داشت که عدم توانایی خروج بار نهان و پایین بودن کیفیت هوای فضای اقامتی از جمله معایب مهم و اساسی در این سیستم‌ها می‌باشد.



شکل ۱ پخش گرمایی بدن [۳]



شکل ۲ نمونه‌ای از پانل سرمایش تابشی سقفی نصب شده در آزمایشگاه مهندسی حرارتی دانشگاه تربیت مدرس

1. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers



شکل ۳ جریان هوای سیستم تهویه لایه‌ای [۱۰]

هوای مورد نیاز در ناحیه تنفس شخص فراهم شده و توجه اندکی هم به کیفیت هوا و آسایش حرارتی در ناحیه بالای اتاق ($1/5m \leq \text{ارتفاع}$) داشته و ناحیه پایین اتاق را ($0/8m \leq \text{ارتفاع}$) مورد توجه قرار نمی‌دهد. در این سیستم‌ها مکان دریچه‌ها و سرعت هوا باید به خوبی بهینه شود تا از ریسک کوران حرارتی^۱ در اطراف بدن شخص جلوگیری شود. لین و همکاران [۱۲] با توجه به شاخص‌های PMV و PPD نشان دادند که سیستم تهویه لایه‌ای تنها قادر به تأمین آسایش حرارتی در ناحیه استنشاقی افراد می‌باشد. در تحقیقی دیگر لین و همکاران به بررسی توزیع ذرات گازهای آلاینده در فضای مجهز به این سیستم‌ها پرداختند [۱۰]. مصرف انرژی سیستم‌های تهویه لایه‌ای، تهویه جابه‌جایی و تهویه اختلاطی نیز مورد مقایسه قرار گرفته که نتایج این تحقیق نشان دهنده مصرف انرژی به مراتب پایین‌تر سیستم تهویه لایه‌ای می‌باشد [۱۳]. علی‌رغم تمامی تحقیقات صورت گرفته و ویژگی‌های مثبت سیستم تهویه لایه‌ای، این سیستم‌ها همچنان با مشکل عدم توزیع یکنواخت آسایش حرارتی و نیز وابستگی شدید میدان سرعت به میدان دما مواجه می‌باشند. همچنین امکان استفاده از این سیستم‌ها در فضاهای با بار حرارتی بالا وجود ندارد.

مطالعات انجام شده در گذشته عمدتاً بر روی ترکیب سیستم تهویه جابه‌جایی و یا تهویه اختلاطی با سرمایش تابشی سقفی بوده است و تاکنون مطالعه‌ای بر روی ترکیب تهویه لایه‌ای با سرمایش تابشی سقفی صورت نگرفته است. از این رو در تحقیق حاضر با توجه به مزایا و معایب سیستم تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی سقفی، ترکیب این سیستم‌ها به عنوان

به منظور رفع این معایب، ترکیب سرمایش تابشی سقفی با انواع سیستم‌های تهویه توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است.

در سال ۲۰۰۲ میریل و همکاران به بررسی تجربی و شبیه‌سازی سیستم سرمایش و گرمایش تابشی سقفی از نظر آسایش حرارتی و مصرف انرژی و کارایی این سیستم‌ها در کشور فرانسه پرداخته و به این نتیجه رسیدند که با حفظ دمای سطح پانل در دمای 17°C ضمن ایجاد شرایط آسایش حرارتی از مشکل میعان نیز جلوگیری می‌شود [۵]. در سال ۲۰۰۳ ژانگ و همکاران به بررسی ترکیب سرمایش تابشی سقفی با تهویه اختلاطی پرداختند [۶]. در سال ۲۰۰۸ چودهاری و همکاران به بررسی آسایش حرارتی در یک فضای اداری در منطقه گرم و مرطوب استرالیا پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که سرمایش تابشی سقفی همراه با سیستم تهویه جابه‌جایی و پیش سرمایش هوای ورودی، بهترین شرایط آسایش حرارتی را فراهم می‌کند [۷]. در سال ۲۰۱۱ فونسکا و همکاران به بررسی تجربی شرایط حرارتی یک اتاق مجهز به سرمایش تابشی سقفی پرداختند و اثر پارامترهای مختلف را بر روی آسایش حرارتی گزارش کرده‌اند [۸]. در سال ۲۰۱۳ اکسیزیدیس و همکاران به بررسی و مقایسه عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی و تهویه جابه‌جایی با توجه به مصرف انرژی و آسایش حرارتی پرداخته [۹] و نتیجه گرفتند ترکیب سیستم سرمایش تابشی سقفی و تهویه جابه‌جایی امکان دستیابی به آسایش حرارتی با مصرف کم انرژی را فراهم می‌کند.

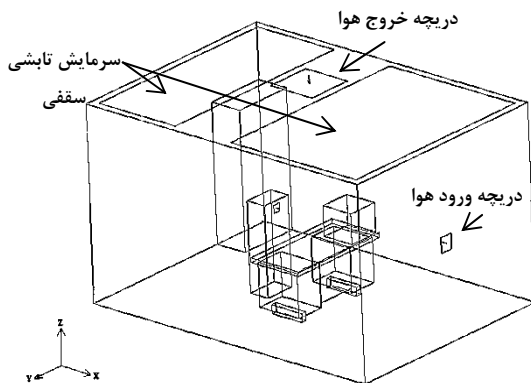
همان طور که مشاهده می‌شود در تحقیقات صورت گرفته ترکیب سیستم تهویه جابه‌جایی و یا تهویه اختلاطی با سیستم سرمایش تابشی سقفی مورد توجه بوده است و تاکنون مطالعه‌ای بر روی ترکیب تهویه لایه‌ای با سرمایش تابشی سقفی صورت نگرفته است.

در شکل ۳ نمونه‌ای از جریان هوای ایجاد شده به وسیله سیستم تهویه لایه‌ای که توسط لین و همکاران [۱۰] مورد مطالعه قرار گرفته، نشان داده شده است.

سیستم تهویه لایه‌ای از جمله سیستم‌های تهویه مطبوع نوین می‌باشد که به منظور دستیابی به آسایش حرارتی مطلوب و کاهش مصرف انرژی اولین بار توسط لین و همکاران [۱۲، ۱۱] برای اتاق‌های کوچک و متوسط مورد بررسی قرار گرفته است. در این سیستم تنها بر ناحیه‌ای که سر و گردن افراد قرار دارد، توجه می‌شود.

جدول ۱ منابع حرارت داخلی در اداره

منابع حرارتی	مقدار تولید گرما (W)
آدمک شبیه سازی شده	۱۰۰
کامپیوتر	۱۸۰



شکل ۴ فضای مورد مطالعه

در شکل ۵ شبکه بندی فضای محاسباتی مشاهده می شود. با توجه به تغییرات شدید میدان جریان در اطراف منابع حرارتی، در این نواحی از شبکه بندی با ابعاد کوچک تر استفاده شده است.

۴- معادلات حاکم

در تحقیق حاضر مدل صفر معادله ای داخلی مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل از یک معادله جبری برای بیان گرانیروی اغتشاشی استفاده می کند:

$$\mu_t = 0.03874 \rho v l \quad (1)$$

که ρ چگالی سیال، v مقدار سرعت محلی و l فاصله تا نزدیک ترین دیوار است.

بر اساس معادله ۱، معادلات ناویراستوکس متوسط گیری شده نوشته می شود. معادلات حاکم بر پیوستگی، اندازه حرکت خطی و انرژی در حالت کلی به صورت زیر نوشته می شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Phi) + \text{div}(\rho \vec{u} \Phi - \Gamma_\Phi \text{grad} \Phi) = S_\Phi \quad (2)$$

که جزییات Φ ، Γ_Φ و S_Φ در جدول ۲ آورده شده اند.

۵- شرایط مرزی

شرط مرزی هوای ورودی، سرعت یکنواخت در نظر گرفته شده است.

راهکاری نوین و کاربردی به منظور تأمین آسایش حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش انجام تحقیق

پیش بینی جریان هوا در داخل ساختمان می تواند اطلاعات بسیار مفیدی برای طراحی بهینه سیستم های تهویه مطبوع در اختیار قرار دهد. همچنین توسعه یک روش قابل اطمینان و مقرون به صرفه برای این پیش بینی بسیار ضروری است. یک روش مناسب برای شبیه سازی های عددی استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۱ می باشد. با این وجود در استفاده از این روش توجه به دو پارامتر زمان و دقت حل بسیار ضروری است. در جریان های آرام نتایج با دقت خوبی قابل محاسبه می باشند اما در جریان های مغشوش دستیابی به جواب های قابل قبول دشوار است. از جمله مدل های اغتشاشی مورد استفاده در شبیه سازی جریان سیال در فضاهای داخلی می توان به مدل صفر معادله ای داخلی^۲ اشاره نمود. این مدل توسط وران [۱۴] به منظور شبیه سازی جریان هوا در فضاهای داخلی، در اثر جابجایی طبیعی، جابجایی اجباری و جابجایی اختلاطی ارائه شده است [۱۵، ۱۴].

با بررسی انواع مدل های اغتشاشی توسط نویسندگان مقاله حاضر و نیز صحت سنجی نتایج حاصل با نتایج تجربی، مدل صفر معادله ای داخلی به عنوان مدل مناسب از نظر دقت و زمان اجرا، برای شبیه سازی ها مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶].

۳- شبیه سازی عددی

به منظور تأمین شرایط آسایش حرارتی در فضای مجهز به ترکیب سیستم تهویه لایه ای و سرمایش تابشی سقفی، میدان های دما و سرعت به کمک شبیه سازی سه بعدی در نرم افزار ایرپک مورد بررسی قرار گرفته است. فضای مورد بررسی یک اتاق با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۳/۹، ۲/۹ و ۲/۶ متر می باشد. منابع حرارتی فضای اداری در جدول ۱ نشان داده شده اند. در سیستم تهویه لایه ای، هوا از طریق دریچه ای با ابعاد ۲۱۰ در ۱۷۰ میلی متر وارد فضای اقامتی نشان داده شده در شکل ۴ می شود.

1. CFD
2. Indoor Zero Equation

جدول ۲ معادلات ناویر استوکس در مدل صفر معادله‌ای داخلی

Φ	Γ_Φ	S_Φ
1	0	0
u	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + g_x (\rho - \rho_{\text{ref}})$
v	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + g_y (\rho - \rho_{\text{ref}})$
w	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + g_z (\rho - \rho_{\text{ref}})$
h	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_h}$	$S_h, \sigma_h = 1$ $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \mu_t = 0.03874 \rho \nu l$

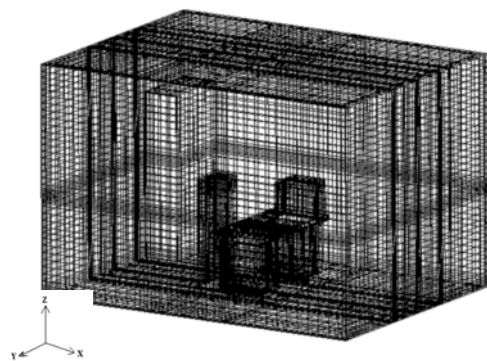
تغییرات در ناحیه نزدیک دیواره به علت پایین بودن عدد رینولدز از رفتار لگاریتمی پیروی می‌کند [۱۲]. برای حل عددی از روش حجم محدود، شبکه سازمان یافته، فرض بوزینسک برای جابجایی طبیعی، روش بالادست مرتبه دوم برای گسسته‌سازی معادلات و از الگوریتم سیمپل به منظور کوپلینگ معادلات سرعت و فشار استفاده شده است.

۶- توصیف نمونه مورد بررسی

در تحقیق حاضر، برای ترکیب سیستم تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی سقفی، به تحلیل و بررسی شرایط آسایش حرارتی در فضای نشان داده شده در شکل ۴ پرداخته شده است. به این منظور چهار شاخص PMV، PPD، اختلاف دمای هوا در جهت عمودی و ریسک کوران حرارتی مورد مطالعه قرار گرفته است. در جدول ۳ نمونه‌های مورد مطالعه معرفی شده است.

جدول ۳ پارامترهای نمونه‌های مورد بررسی

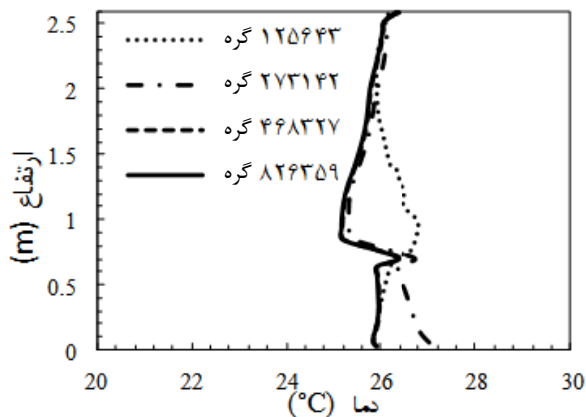
نمونه	ACH	V_{inlet} (m/s)	T_{inlet} (°C)	T_p (°C)	بار حرارتی (W)
۱	۵/۵	۱/۱۹	۱۹	-	۲۸۰
۲	۵/۵	۱/۱۹	۲۱	-	۲۸۰
۳	۵/۵	۱/۱۹	۲۴	-	۲۸۰
۴	۵/۵	۲/۱	۱۹	-	۲۸۰
۵	۵/۵	۲/۱	۲۱	-	۲۸۰
۶	۵/۵	۲/۱	۲۴	-	۲۸۰
۷	۵/۵	-	-	۱۹	۲۸۰
۸	۵/۵	-	-	۲۱	۲۸۰
۹	۵/۵	-	-	۲۴	۲۸۰
۱۰	۵/۵	۱/۱۹	۱۹	۱۹	۲۸۰
۱۱	۵/۵	۱/۱۹	۲۱	۲۱	۲۸۰
۱۲	۵/۵	۱/۱۹	۲۴	۲۴	۲۸۰



شکل ۵ شبکه‌بندی فضای محاسباتی

شرط مرزی خروجی شرط نیومن در نظر گرفته می‌شود، یعنی جرم هوای ورودی به دریچه خروجی برابر جرم خروجی از آن می‌باشد. دمای سطح پانل‌های سرمایش تابشی ثابت فرض شده است. سقف و کف عایق فرض شده و دیوارها با شرط شار حرارتی ثابت در نظر گرفته می‌شوند. خصوصیات هندسی حرارتی دیوارها مطابق تحقیق [۱۲] انتخاب شده است تا امکان مقایسه فراهم شود. ضخامت دیوارها ۲۰ سانتی‌متر و با ضریب هدایت حرارتی 0.7 W/mK فرض شده است. دمای هوای خارج ۳۶ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود که معادل یک روز گرم تابستانی در شرایط آب و هوایی تهران می‌باشد. برای شبیه‌سازی تشعشع از مدل (DO^۱) استفاده می‌شود. حرارت تولید شده توسط شخص و کامپیوتر براساس مقادیر واقعی می‌باشد که از استاندارد اشری ۵۵ فصل ۲۹ استخراج شده است. شرط دیوارهای عایق برای دیوارهای داخلی، سقف، کف و میز در نظر گرفته می‌شود. در نزدیکی دیوارها از شرط تابع دیواره^۲ استاندارد استفاده شده است، زیرا ثابت شده

1. Discrete Ordinate
2. Wall Function



شکل ۶ بررسی استقلال حل از شبکه

شاخص PMV در واقع میزان متوسط گروه بزرگی از افراد را در مورد آسایش حرارتی پیش‌بینی می‌نماید و بر اساس معادله (۳) محاسبه می‌شود [۱۹].

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99(M - W) - Pa] - 0.42 \times [(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M (5867 - Pa) - 0.0014M (34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (3)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \times 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (4)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v_{ar}} \\ 12.1\sqrt{v_{ar}} & \text{for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 1.29I_{cl} & \text{for } I_{cl} \leq 0.078 \text{ (m}^2\text{K/W)} \\ 1.05 + 0.645I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0.078 \text{ (m}^2\text{K/W)} \end{cases} \quad (6)$$

که M نرخ متابولیک (W/m^2)، W کار خارجی I_{cl} ، مقاومت حرارتی لباس ($\text{m}^2\text{K/W}$)، f_{cl} نسبت پوشش فرد در حالت با لباس به حالت بدون لباس، t_a دمای هوا $^\circ\text{C}$ ، $\bar{t}_r$

نمونه‌های ۱ تا ۳ مربوط به سیستم تهویه لایه‌ای است که سرعت هوای ورودی $1/19 \text{ (m/s)}$ و دمای هوای ورودی متغیر است. نمونه‌های ۴ تا ۶ مربوط به سیستم تهویه لایه‌ای است که سرعت هوای ورودی $2/1 \text{ (m/s)}$ و دمای هوای ورودی متغیر است. نمونه‌های ۷ تا ۹ مربوط به سیستم سرمایش تابشی سقفی می‌باشد که دمای سطح پانل تغییر می‌کند. نمونه‌های ۱۰ تا ۱۲ نیز برای ترکیب تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی سقفی است که دمای هوای ورودی و سطح پانل متغیر در نظر گرفته شده است. نسبت پوشش سقف پانل نیز ۸۰ درصد در نظر گرفته شده است.

۷- بررسی استقلال حل از شبکه

به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، برای ترکیب تهویه لایه‌ای با سرمایش تابشی سقفی با دمای هوای ورودی و دمای سطح پانل ۲۴ درجه سانتیگراد، توزیع دما در ارتفاع اتاق در مختصات $x = 1.65$ و $y = 1.45$ متر برای شبکه‌بندی‌های مختلف مقایسه شده است. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود نتایج برای ۴۶۸۳۲۷ و ۸۲۳۶۵۹ سلول با دقت خوبی به یکدیگر نزدیک می‌شوند که نشان دهنده استقلال حل از شبکه می‌باشد، از این رو در حل عددی از شبکه‌بندی با ۴۶۸۳۲۷ سلول محاسباتی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که برای سایر نمونه‌های مورد بررسی نیز استقلال حل از شبکه بررسی شده است و شکل ۶ به عنوان نمونه‌ای از بررسی‌ها آورده شده است.

۸- تشریح پارامترهای مورد ارزیابی

۸-۱- شاخص PMV^1

به منظور ارزیابی آسایش حرارتی از شاخص PMV استفاده می‌شود که براساس مدل فنر [۱۷] استخراج شده است. این مدل پرکاربردترین مدل مورد استفاده است که در آن ۴ عامل محیطی و ۲ عامل شخصی، به عنوان عوامل موثر بر آسایش حرارتی در نظر گرفته می‌شود. چهار عامل محیطی عبارتند از: سرعت هوا، دمای هوا، رطوبت هوا و میانگین دمای تشعشعی. دو عامل شخصی نیز سطح فعالیت و میزان پوشش افراد می‌باشد. به طور کلی اثبات شده است که دمای هوا و سطح فعالیت بیشترین تأثیر را بر آسایش حرارتی دارند [۲۰].

1. Predict Mean Vote

بر اساس استاندارد اشری حداکثر مقدار قابل قبول اختلاف دمای هوا در جهت عمودی، $2/5 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ می باشد [۲۰].

۸-۴- ریسک کوران حرارتی

کوران حرارتی، سرد شدن محلی بدن انسان است که به صورت غیر دلخواه بر اثر جریان هوا ایجاد می شود. وقتی که کوران حرارتی در یک محیط موجود باشد، افراد خواستار دمایی بالاتر و یا توقف سیستم تهویه مطبوع می شوند [۱۹].

در نارضایتی ناشی از این عامل سه پارامتر دمای هوا، سرعت متوسط جریان هوا و شدت اغتشاشات جریان هوای وزشی مؤثرند. منظور از شدت اغتشاش، نسبت انحراف استاندارد سرعت اغتشاشی به سرعت میانگین جریان هوا می باشد. به کمک برنامه CFD، به صورت سه بعدی الگوی جریان هوا، دمای هوا، سرعت جریان هوا و توزیع اغتشاشات بدست می آید که به کمک آنها مقدار PD که نشان دهنده نارضایتی ناشی از کوران حرارتی می باشد، بدست می آید.

$$PD = (34 - T)(u - 0.05)^{0.62} (3.14 + 0.37uTu)$$

$$Tu = 100(2k)^{0.5} / u$$

که T دمای هوا ($^\circ\text{C}$)، u سرعت هوا (m/s)، Tu شدت توربولانسی و k انرژی جنبشی اغتشاشی (J/kg) می باشد.

۹- صحت سنجی حل عددی

تحلیل و بررسی آسایش حرارتی در فضای مجهز به ترکیب سیستم تهویه لایه ای و سرمایش تابشی سقفی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه قرار گرفته است. به دلیل مغشوش بودن جریان هوا ($Re_{cr} = 2000$, $Re = 13849$, $Pe = 10291$) از مدل های توربولانسی برای پیش بینی جریان هوا استفاده می شود. به دلیل خطای ذاتی روش های $RANS^1$ مدل مورد استفاده برای شبیه سازی باید صحت سنجی شود. برای این منظور نتایج حاصل از چهار مدل اغتشاشی صفر معادله ای، صفر معادله ای داخلی، $k-\epsilon$ و $k-eRNG$ استخراج گردیده و با نتایج تجربی لین و همکاران [۱۱] مقایسه شده است.

به منظور صحت سنجی حل عددی، مقادیر سرعت و دما در ۸ خط محاسباتی استخراج شده و نتایج حاصل با نتایج تجربی

میانگین دمای تشعشعی t_{ar} ، $^\circ\text{C}$ ، سرعت نسبی هوا (m/s)، Pa فشار نسبی بخار آب (Pa)، h_c ضریب انتقال حرارت جابجایی ($\text{W/m}^2 \text{K}$)، t_{cl} دمای سطح لباس $^\circ\text{C}$ می باشند. شاخص PMV در قالب ۷ تقسیم بندی نشان داده شده در جدول ۴ آسایش حرارتی را پیش بینی می کند:

در شبیه سازی حاضر نرخ متابولیک 1 met در نظر گرفته شده که متناظر با فردی نشسته در یک اداره می باشد. رطوبت نسبی محیط و هوای ورودی ۵۰ درصد در نظر گرفته شده که بر اساس استاندارد ASHRAE برای این رطوبت نسبی دمای آسایش حرارتی در محدوده $24/4$ تا $27/2$ درجه سانتی گراد قرار دارد. همچنین نسبت پوشش لباس ۱ در نظر گرفته می شود.

۸-۲- پیش بینی درصد نارضایتی

برای پیش بینی آرای انفرادی اشخاص باید از شاخص PPD استفاده کرد. این شاخص درصد افرادی را که احساس گرما یا سرما می شناسند، محاسبه می نماید. لذا این شاخص، تعداد افرادی را که در بین گروه بزرگی از اشخاص احساس نارضایتی حرارتی دارند، تعیین می کند [۱۹].

$$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0.03353 \times PMV^4)$$

$$-0.2179PMV^2) \quad (7)$$

۸-۳- اختلاف دمای هوا در جهت عمودی

به طور عادی دمای هوا با افزایش ارتفاع از کف زیاد می شود. اگر این اختلاف دما زیاد شود ممکن است بدن به طور کلی در شرایط آسایش باشد، اما گرم شدن محلی در ناحیه سر و سرد شدن محلی در ناحیه پا اتفاق بیفتد که این موضوع بیانگر اختلاف دمای هوا در جهت عمودی می باشد. اختلاف دمای هوا در جهت عمودی یکی از عوامل مؤثر بر نارضایتی حرارتی موضعی می باشد که تاثیر به سزایی بر آسایش حرارتی افراد دارد، از این رو بررسی آن ضروری می باشد.

جدول ۴ مقیاس آسایش حرارتی

احساس حرارتی	سرد	خنک	نسبتاً خنک	متعادل	نسبتاً گرم	گرم	داغ
PMV	-۳	-۲	-۱	۰	+۱	+۲	+۳

در شکل ۸ میدان‌های سرعت و دما در صفحه $x-z$ ($y=1.45\text{ m}$) رسم شده است. دمای هوا در ورود به فضا کمتر از دمای سایر نواحی می‌باشد. همچنین سرعت هوای ورودی بیشتر از سرعت سایر نواحی می‌باشد. جریان هوای ورودی از سیستم تهویه لایه‌ای هوای تازه را در ناحیه استنشاقی (ناحیه بین ارتفاع ۰/۸ تا ۱/۴ متر) تأمین می‌کند و سپس بر اثر نیروی شناوری به سمت پایین جریان می‌یابد. این سیستم، هوا با کیفیت بهتر را در ناحیه تنفس شخص تأمین می‌کند. به دلیل وجود میز و شخص، چندین گردابه در جریان هوای اطراف آن ایجاد می‌شود. در ناحیه نزدیک به شخص به دلیل گرمای تولید شده، جریان هوا به سمت بالا حرکت می‌کند. هوای گرم شده به سمت بالا رفته که در اثر تماس با سقف سرد، جریان هوای بازگشتی به فضای اتاق وجود دارد.

یکی از مشکلات سیستم تهویه لایه‌ای ریسک کوران حرارتی می‌باشد، همان طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت هوای ورودی اگرچه آسایش حرارتی کلی تأمین می‌شود ولی نارضایتی ناشی از کوران حرارتی، به عنوان یکی از عوامل مهم و مؤثر در نارضایتی حرارتی موضعی، به شدت افزایش می‌یابد. از این رو در طراحی فضاهای مجهز به این سیستم‌ها باید دقت ویژه‌ای مبذول داشت. با افزایش دمای هوای ورودی نیاز به سرعت هوای بیشتری می‌باشد که باعث افزایش ریسک کوران حرارتی می‌شود. این موضوع یکی از دلایل ترکیب سیستم تهویه لایه‌ای با سرمایش تابشی سقفی می‌باشد. هدف از این کار امکان افزایش دمای هوای ورودی ضمن ثابت نگه داشتن سرعت هوا می‌باشد تا علاوه بر تأمین آسایش حرارتی کلی، مشکل ریسک کوران حرارتی، که از جمله عوامل نارضایتی حرارتی موضعی می‌باشد، برطرف شود.

۱۰-۲- ارزیابی آسایش حرارتی

به منظور ارزیابی آسایش حرارتی کلی، دو شاخص PMV و PPD و برای بررسی نارضایتی حرارتی موضعی، دو شاخص اختلاف دمای هوا در جهت عمودی و ریسک کوران حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است.

در جدول ۵ خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده برای چهار شاخص PMV, PPD, PD و اختلاف دمای هوا در جهت عمودی از میج پا تا سر فرد، در صفحه $y=1.45\text{ m}$ آورده شده است. علت انتخاب صفحه $y=1.45\text{ m}$ ، حضور شخص و نیز دریچه هوای ورودی در این صفحه می‌باشد.

لین و همکاران [۱۱] مقایسه شده است [۱۶]. به عنوان نمونه‌ای از این نتایج نمودار تغییرات سرعت در امتداد ($x=2.15, y=1.75$) در شکل ۷ رسم شده است.

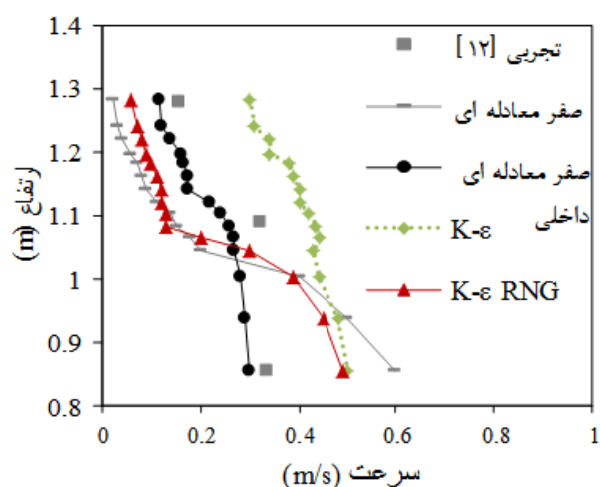
همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود تنها مدل صفر معادله‌ای داخلی قادر به پیش‌بینی رفتار سرعت جریان هوا می‌باشد و سایر مدل‌ها، حتی رفتار را به درستی پیش‌بینی نمی‌کنند. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود نتایج مدل صفر معادله‌ای داخلی با دقت خوبی بر داده‌های تجربی منطبق می‌باشد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی نشان دهنده دقت قابل قبول مدل صفر معادله‌ای داخلی در پیش‌بینی میدان جریان می‌باشد [۱۶] بنابراین در تحقیق حاضر از این مدل استفاده می‌شود.

۱۰-۱- نتایج و بحث

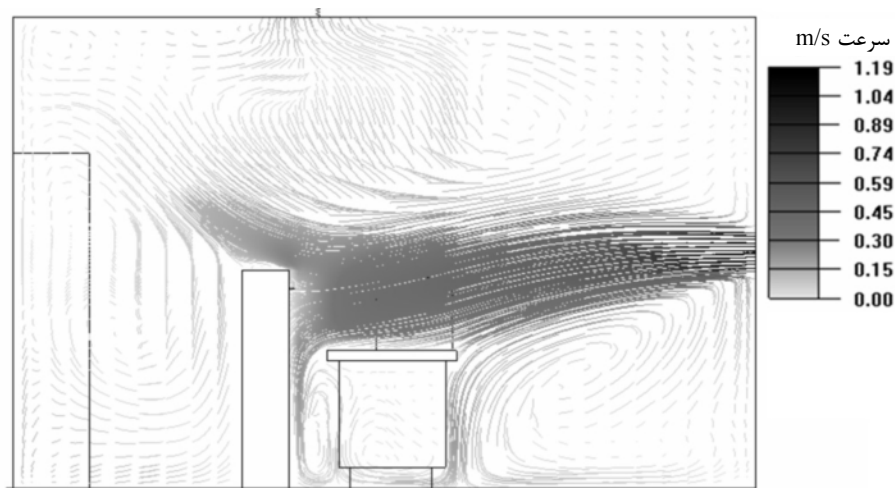
۱۰-۱-۱- میدان سرعت و میدان دما

الگوی جریان ایجاد شده به وسیله سیستم‌های تهویه، تأثیر زیادی بر آسایش حرارتی و کارایی سیستم تهویه دارد. از این رو مطالعه میدان‌های دما و سرعت به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر سیستم تهویه امری ضروری می‌باشد.

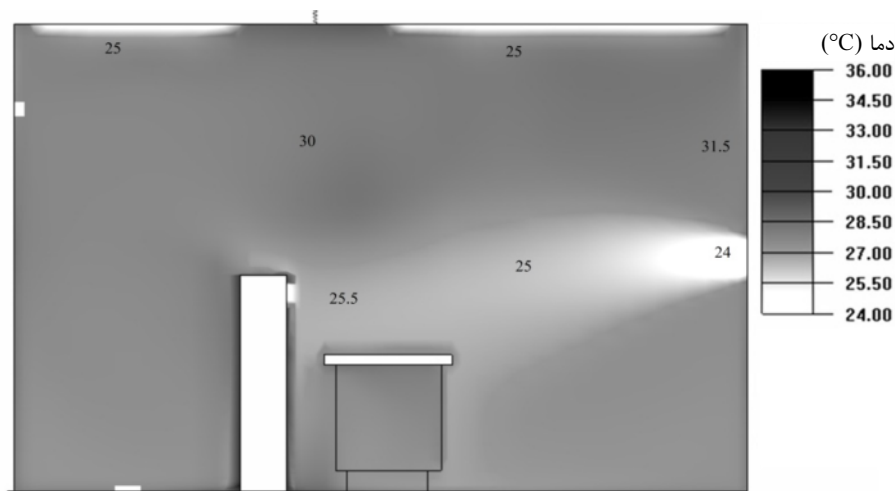
جریان وزشی در فضای مورد بررسی متأثر از دو عامل می‌باشد. اول، اختلاف دما بین سطوح گرم و هوای داخل که منجر به جریان رو به بالا در مجاورت دیوار می‌شود و دوم اثر مرز جامد که سبب تشکیل سرعت و لایه مرزی حرارت در فضا می‌شود. جریان القایی ایجاد شده در این فضا بیشتر متأثر از سطح گرم خارجی و سطح سرد پانل می‌باشد [۲۱].



شکل ۷ تغییرات سرعت در امتداد خط ($x=2.15, y=1.75$)



الف- میدان جریان (m/s)



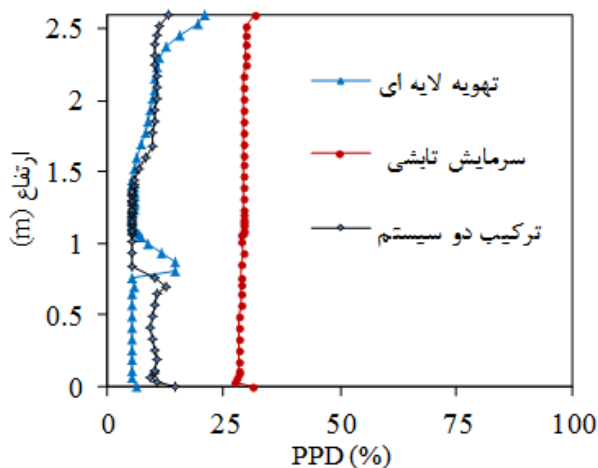
ب- میدان دما (°C)

شکل ۸ میدان‌های جریان و دما در صفحه $y=1/45$ (m)

در نمونه‌های ۱ تا ۳ که مربوط به سیستم تهویه لایه‌ای می‌باشد تنها در نمونه ۱ که دمای هوای ورودی ۱۹ درجه سانتی‌گراد است قادر به تأمین آسایش حرارتی مطلوب ($-0.5 \leq PMV \leq +0.5$) می‌باشد، اما $PPD = 20\%$ می‌باشد که بیشتر از حد مجاز ($PPD \leq 15\%$) است. همچنین مقادیر اختلاف دمای هوا در جهت عمودی و PD اگرچه در حد مجاز می‌باشند اما با توجه به جدول ۶ باعث می‌شوند که این سیستم در دسته‌بندی B سیستم‌های تهویه مطبوع قرار گیرد. نمونه‌های ۴ تا ۶ مربوط به حالتی است که سرعت هوای ورودی از سیستم تهویه لایه‌ای به $2/1$ (m/s) افزایش یافته است. در این نمونه‌ها اگرچه PMV مطلوب حاصل می‌شود، اما مقدار PD بسیار بالا می‌باشد به صورتی که موجب

جدول ۵ مقادیر شاخص‌های آسایش حرارتی در نمونه‌های مورد بررسی

نمونه	PMV	PPD%	PD%	ΔT (°C/m)
۱	۰/۳۵	۲۰	۲۵	۱
۲	۰/۷	۲۶	۲۳	۱
۳	۱/۱	۳۳/۲	۲۲	۱/۲
۴	-۰/۳	۱۰	۶۰	۰/۵
۵	-۰/۱	۱۸	۵۶	۰/۵
۶	۰/۲	۱۶	۴۵	۰/۵
۷	۰/۸	۲۳	۲	۰/۲
۸	۱/۳	۲۶	۲	۰/۳
۹	۱/۹	۲۹/۳	۲	۰/۳
۱۰	-۰/۳	۱۰	۱۴	۰/۱
۱۱	-۰/۲	۸	۱۱	۰/۱
۱۲	۰/۱	۷	۸	۰/۱



شکل ۱۰ توزیع PPD در ناحیه حضور شخص
($x = 1.65$, $y = 1.45$)

در سیستم تهویه لایه‌ای مقادیر $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$ و $PPD \leq 20\%$ نشان دهنده توانایی نسبتاً مناسب این سیستم‌ها در توانایی شرایط آسایش حرارتی کلی می‌باشد. برای ترکیب تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی سقفی دامنه تغییرات PMV کمتر از حالتی است که تنها از سیستم تهویه لایه‌ای استفاده شود ($0 \leq PMV \leq 0.5$). تغییرات PPD بر حسب ارتفاع اتاق نشان دهنده تقریباً یکسان بودن تغییرات PPD برای حالت تهویه لایه‌ای و حالت ترکیب آن با سیستم سرمایش تابشی سقفی می‌باشد.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ کانتورهای PMV و PPD را در سه مقطع $x = 1.55$ m , $y = 1.45$ m , $z = 1.1$ m برای ترکیب تهویه لایه‌ای با سرمایش تابشی سقفی با دمای هوای ورودی و پانل ۲۴ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی مقاطع نشان داده شده مقدار PMV در ناحیه حضور شخص نزدیک به صفر می‌باشد که بر اساس جدول ۶ نشان‌دهنده تعادل گرمایی مناسب میان شخص و محیط می‌باشد. در سایر نواحی نیز تغییرات PMV در محدوده -0.75 تا 0.75 بوده و از این رو تغییرات شدیدی در مقدار PMV فضا وجود ندارد. بنابراین برای شخص متحرک در فضای اتاق نیز شرایط آسایش حرارتی در محدوده قابل قبولی وجود دارد.

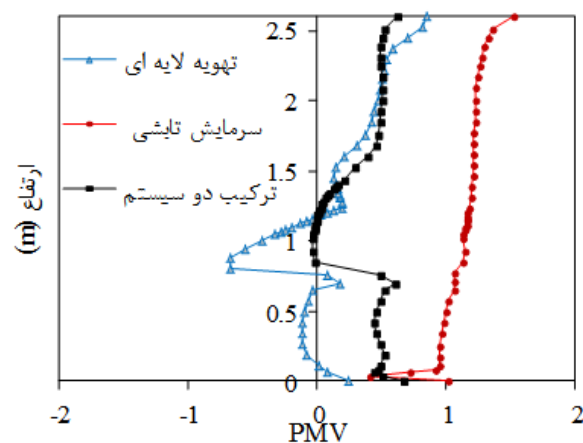
کانتورهای درصد نارضایتی افراد نشان دهنده مقدار PPD کمتر از ۵ درصد در ناحیه استنشاقی شخص می‌باشد و

می‌شود این سیستم در دسته‌بندی C سیستم‌های تهویه قرار گیرد. نمونه‌های ۷ تا ۹ مربوط به فضای مجهز به سرمایش تابشی سقفی می‌باشد که همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود اگرچه از نظر اختلاف دمای هوا در جهت عمودی و شاخص PD بسیار مناسب می‌باشد، ولی قادر به تأمین آسایش حرارتی نمی‌باشد.

نمونه‌های ۱۰ تا ۱۲ مربوط به ترکیب سیستم تهویه لایه‌ای با سرمایش تابشی سقفی می‌باشد. هر سه نمونه از توانایی تأمین آسایش حرارتی کلی و نیز آسایش حرارتی موضعی می‌باشند و همچنین در دسته‌بندی A سیستم‌های تهویه قرار می‌گیرند. البته با توجه به این که در استاندارد اشری پیشنهاد شده است که در فصل تابستان مقادیر PMV مثبت در نظر گرفته شود، نمونه ۱۲ به خوبی آسایش حرارتی کلی و موضعی را تأمین می‌کند.

۱۰-۳- تحلیل شاخص‌های PMV و PPD

شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب تغییرات PMV و PPD در ارتفاع اتاق برای ناحیه حضور شخص نشان می‌دهد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات PMV و PPD برای سه سیستم تهویه لایه‌ای، سرمایش تابشی سقفی و نیز ترکیب تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی سقفی، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سیستم سرمایش تابشی سقفی به هیچ‌وجه توانایی تأمین آسایش حرارتی را ندارد. مقادیر $PMV \geq 1$ و $PPD \approx 30\%$ نشان دهنده عدم توانایی این سیستم در تأمین شرایط آسایش حرارتی کلی می‌باشد.



شکل ۹ توزیع PMV در ناحیه حضور شخص
($x = 1.65$, $y = 1.45$)

لایه‌ای با سرمایش تابشی سقفی می‌توان به شرایط آسایش حرارتی یکنواخت در فضای اتاق اشاره داشت.

همچنین در سایر نواحی نیز عموماً در محدوده کمتر از ۱۰ درصد است. بنابراین از جمله مزایای مهم ترکیب سیستم تهویه

جدول ۶ دسته‌بندی سیستم‌های تهویه مطبوع بر اساس شاخص‌های آسایش حرارتی

دسته‌بندی	احساس گرمایی بدن به صورت کلی		ناراضی‌های حرارتی موضعی	
	PPD (%)	PMV	گرادیان دمای عمودی	PD%
A	< 6	$-0.2 < PMV < +0.2$	< 3	< 15
B	< 10	$-0.5 < PMV < +0.5$	< 5	< 20
C	< 15	$-0.7 < PMV < +0.7$	< 10	< 25



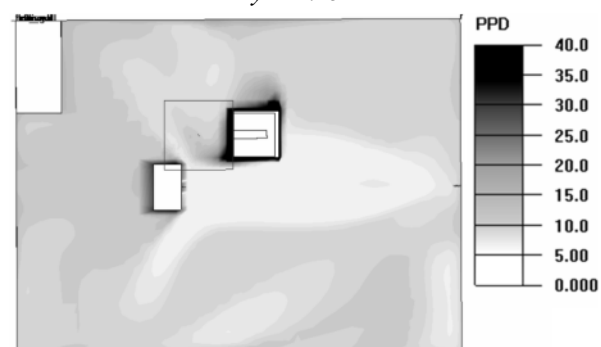
$y = 1.45$ m



$y = 1.45$ m



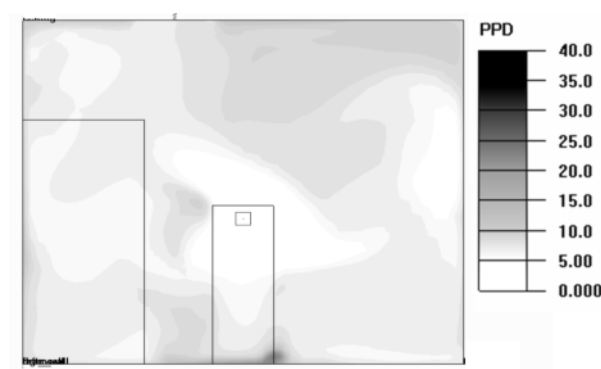
$z = 1.1$ m



$z = 1.1$ m



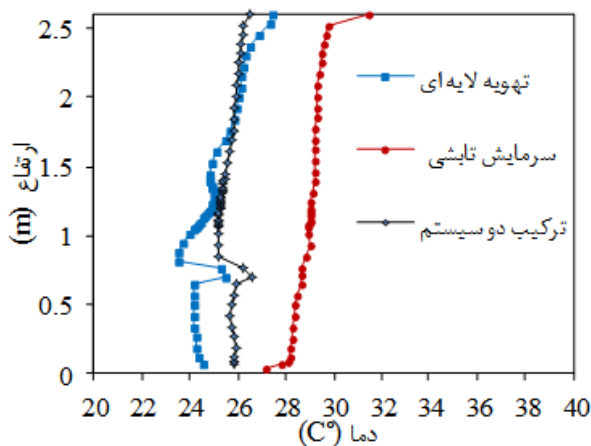
$x = 1.65$ m



$x = 1.65$ m

شکل ۱۲ کانتورهای PMV در سه مقطع از فضای اتاق

شکل ۱۱ کانتورهای PPD در سه مقطع از فضای اتاق



شکل ۱۴ توزیع دما در ناحیه حضور شخص
($x = 1.65$, $y = 1.45$)

از طرفی اختلاف دمای اندک بین سطوح تابشی و محیط باعث کاهش گرادیان عمودی دما می‌شود. با توجه به این موارد باید به این موضوع توجه داشت که اگرچه در سیستم تهویه لایه‌ای دمای هوای منبع بالاست ولی با توجه به نیاز به ایجاد گرادیان دمای معکوس (سر و گردن خنک‌تر از پا) باید فاصله میان درجه هوای ورودی و شخص کم باشد.

با توجه به تحلیل چهار شاخص PD , PPD , PMV و اختلاف دمای هوا در جهت عمودی و نیز بررسی کانتورهای دما و سرعت در فضای مورد بررسی، مشاهده می‌شود که ترکیب تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی سقفی به خوبی می‌تواند ضمن تأمین آسایش حرارتی کلی، آسایش حرارتی موضعی را نیز فراهم نماید. از این رو ترکیب تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی سقفی، راه‌کاری نوین و کاربردی به منظور تأمین شرایط آسایش حرارتی می‌باشد که در دسته A سیستم‌های تهویه مطبوع قرار دارد.

۱۱- جمع بندی

در تحقیق حاضر به تحلیل آسایش حرارتی در فضای مجهز به ترکیب تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی سقفی، به کمک دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شده است. به این منظور ۱۲ نمونه فضای محاسباتی شامل ۶ نمونه فضای مجهز به تهویه لایه‌ای که دارای سرعت و دمای هوای ورودی متفاوت می‌باشند، ۳ نمونه فضای مجهز به سرمایش تابشی سقفی با دمای سطح پانل متفاوت و نیز ۳ نمونه ترکیب تهویه لایه‌ای و

۱۰-۴ تحلیل ریسک کوران حرارتی

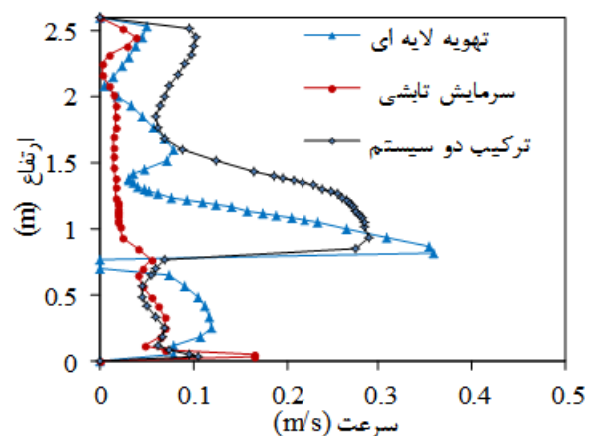
در شکل ۱۳ نمودار تغییرات سرعت در ناحیه حضور شخص رسم شده است. با توجه به این شکل سرعت هوا در ارتفاع ۱/۱ متر که ناحیه سر و گردن شخص است، کمتر از ۰/۲۵ متر بر ثانیه می‌باشد، بر اساس استاندارد اشری ۵۵ (سال ۲۰۰۴) در این سرعت باید حداقل دما ۲۳/۵ درجه سانتی‌گراد باشد تا ریسک کوران حرارتی وجود نداشته باشد.

با توجه به شکل ۱۴ دمای هوا در ناحیه سر و گردن شخص در حدود ۲۵/۲ سانتیگراد می‌باشد، بنابراین مشکل ریسک کوران حرارتی در فضای مجهز به ترکیب تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی وجود نخواهد داشت که این موضوع نیز از دیگر مزایای ترکیب سیستم تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی می‌باشد.

۱۰-۵ تحلیل اختلاف دمای هوا در جهت عمودی

گرادیان دما در نواحی پایینی (ارتفاع کمتر از ۰/۶ متر) بسیار کم می‌باشد که نشان دهنده اختلاط کامل هوا در این نواحی است.

با توجه به شکل ۱۴ گرادیان دما در ناحیه حضور شخص کمتر از ۰/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد در حالی که در فضایی که تنها مجهز به تهویه لایه‌ای است اختلاف دمای هوا در جهت عمودی ۳ درجه سانتی‌گراد در ارتفاع اتاق می‌باشد. سهم بالای تابش در انتقال حرارت توسط سیستم سرمایش تابشی سقفی، باعث بهبود شرایط آسایش حرارتی و از بین رفتن گرادیان عمودی دمای نامطلوب می‌شود.



شکل ۱۳ توزیع سرعت در ناحیه حضور شخص
($x = 1.65$, $y = 1.45$)

۱۲- مراجع

- [1] ASHRAE Standard 55, *Thermal Environment Conditions for Human Occupancy*. 2004.
- [2] Watson, R.D., and Chapman, K.S., "Handbook of Radiant Heating and Cooling", McGraw-Hill, New York, 2001
- [3] Banhidi, L.J., "Radiant Heating Systems-Design and Applications", Pergamum Press, 1991.
- [4] Mashhodi Fallah M., *Experiment analysis of radiant cooling ceiling In terms of thermal comfort parameters with different source of cold water*, MSc Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, 2011. (In Persian)
- [5] Miriel, J., Serres, L., Trombe, A., "Radiant ceiling panel heating-cooling systems: Experimental and simulated study of the performances thermal comfort and energy consumptions", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, 2002, pp.1861-1873.
- [6] JaeWeon, Jeong, Stanley A. Mumma, "Ceiling radiant cooling panel capacity enhanced by mixed convection in mechanically ventilated spaces", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, 2003, pp. 2293-2306.
- [7] Chowdhury, A.A., Rasul, M.G., Khan, M.K., "Thermal comfort analysis and simulation for various low-energy cooling-technologies applied to an office building in a subtropical climate", *Applied Energy*, Vol.85, 2008, pp.449-462.
- [8] Fonseca, N., "Experimental study of thermal condition in a room with hydronic cooling radiant surfaces", *International journal of refrigeration*, Vol. 34, 2011, pp. 686-695.
- [9] Oxizidis, S., Agis, M., Papadopoulos, "Performance of radiant cooling surfaces with respect to energy consumption and thermal comfort", *Energy and Buildings*, 2013, 199-209.
- [10] Tian L., Lin Z., Wang Q., "Comparison of gaseous contaminant diffusion under stratum ventilation and under displacement ventilation", *Journal of Building and Environment*, Vol. 45, 2010, pp. 2035-2046.
- [11] Tian L., Lin Z., Wang Q., "Experimental investigation of thermal and ventilation performances of stratum ventilation", *Journal of Building and Environment*, Vol. 46, Issue 6, 2011, pp. 1309-1320.
- [12] Tian L., Lin Z., Liu J., Yao T., Wang Q., "The impact of temperature on mean local air age and thermal comfort in a stratum ventilated office", *Journal of Building and Environment*, Vol. 46, Issue 2, 2011, pp. 501-510.
- [13] Lin Z, Lee C.K., Fong K.F., Chow T.T., Yao T., Chan A., "Comparison of annual energy performances with different ventilation methods for cooling", *Energy and Buildings*, 2011, pp. 130-

سرمایش تابشی سقفی مورد مطالعه قرار گرفته است. در تمامی نمونه‌های مورد بررسی چهار شاخص PMV, PPD, اختلاف دمای هوا در جهت عمودی و پیش‌بینی ریسک کوران حرارتی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر مشاهده می‌شود که سیستم تهویه لایه‌ای اگرچه به تنهایی امکان تأمین شرایط آسایش حرارتی کلی را دارد، اما با مشکل عدم توزیع یکنواخت شرایط آسایش حرارتی مواجه می‌باشد. همچنین با توجه به پایین بودن دمای هوای ورودی نسبت به دمای هوای اتاق، علی‌رغم تأمین شرایط آسایش حرارتی کلی، نارضایتی حرارتی موضعی وجود دارد. به منظور تأمین شرایط آسایش حرارتی با دمای بالاتر هوای ورودی، در نمونه‌های ۴ تا ۶ سرعت هوای ورودی در فضای مجهز به تهویه لایه‌ای افزایش داده شده است. در این حالت نیز مشاهده شد که اگرچه آسایش حرارتی کلی با دمای هوای ورودی بالاتر تأمین شده است، اما ریسک کوران حرارتی بسیار افزایش یافته و به کلی شرایط آسایش حرارتی را بر هم می‌زند.

در فضای مورد بررسی در تحقیق حاضر سیستم سرمایش تابشی سقفی نیز مورد مطالعه قرار گرفته و مشاهده شد که برای دماهایی بالاتر از دمای نقطه شبنم که احتمال میعان بخارات آب بر روی سطح پانل وجود ندارد، شرایط آسایش حرارتی کلی تأمین نمی‌شود اما از نظر شرایط آسایش حرارتی موضعی با مشکل مواجه نمی‌باشد. با توجه به تحلیل و بررسی سیستم تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی سقفی به صورت جداگانه و در نظر گرفتن مزایا و معایب هر سیستم، ترکیب این دو سیستم به منظور تأمین آسایش حرارتی مورد مطالعه قرار گرفته است. در فضای مجهز به ترکیب سرمایش تابشی سقفی و تهویه لایه‌ای مشاهده شد که توزیع آسایش حرارتی کلی یکنواخت‌تر بوده و پارامترهای PMV و PPD در محدوده شرایط مناسب آسایش حرارتی قرار دارند. گرادیان دمای عمودی نسبت به سیستم تهویه لایه‌ای بسیار کاهش یافته و به دلیل افزایش دمای هوای ورودی، سرعت هوای مورد قبول افزایش یافته و در نتیجه ریسک کوران حرارتی وجود ندارد. از این رو ترکیب سرمایش تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی سقفی در دسته‌بندی A سیستم‌های تهویه مطبوع قرار گرفته و به عنوان راهکاری نوین و کاربردی به منظور تأمین شرایط آسایش حرارتی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

- [18] Chiang, W., Wang, C., Huang, J. "Evaluation of cooling ceiling and mechanical ventilation systems on thermal comfort using CFD study in an office for subtropical region", *Building and Environment*, 2012, pp.113-127.
- [19]. HeidarineZhad G., Dolfani Sh., Zangeneh M.A., HeidarineZhad, M., *Tehrmlal comfort*, Road housing and urban development research center, Tehran, pp. 57-60, 2009. (In Persian)
- [20] Chakrouna, W., Ghali, K., Ghaddar, N. "Air quality in rooms conditioned by chilled ceiling and mixed displacement ventilation for energy saving", *Energy and Buildings*, 2011, pp. 2684–2695.
- [21] Dorosti Gh., Maerefat M., Omidvar, A. "Utilization of induced convection in ceiling radiant cooling systems for improving of performance", *Modares Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 45-56, 2010. (In Persian)
- 136.
- [14] Weiran X., *New turbulence models for indoor airflow simulation*, PhD., Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [15] Qingyan C., Weiran X., "A zero-equation turbulence model for indoor air flow simulation", *Energy and Building*, 1998, pp. 137-144.
- [16] Morovat N., Maerefat M., Rasoli, H., "The study of turbulence models in simulation of airflow field in space with stratum ventilation", *21st International Conference on Mechanical Engineering*, Tehran, 2013. (In Persian)
- [17] Fanger P.O. *Thermal comfort-analysis and applications in environmental engineering*, New York: McGraw Hill companies. Inc., 1970.