

استفاده از سیستم‌های گرمایش هیبریدی جهت تامین آسایش حرارتی

با حداقل مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی

مسعود میرزایی^۳

دانشکده هوا و فضا

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

علی کشاورز^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۹۲/۲/۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۸/۸)

نبی جهانتیغ^۱

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه زابل

چکیده

هدف از این مطالعه، کاهش مصرف انرژی در یک ساختمان مسکونی همزمان با تامین آسایش حرارتی با استفاده از سیستم هیبریدی به جای سیستم رایج گرمایش محیط‌های داخلی (سیستم گرمایش جابه‌جایی) می‌باشد. در این سیستم، رساندن دما تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد به روش جابه‌جایی و افزایش آن تا دمای آسایش به روش تابشی انجام شده است. دمای خشک، رطوبت نسبی، سرعت جریان هوا از عوامل تأثیرگذار بر آسایش حرارتی می‌باشند که در هر سیستمی با تغییر سطح و قدرت گرمکن، موقعیت دریچه ورود و خروج، سرعت هوای ورودی و جنس مصالح قابل کنترل می‌باشند. برای شبیه‌سازی، یک مانکن مجازی با ابعاد و شکل فیزیولوژیکی واقعی به صورت ایستاده درون یک اتاق قرار گرفته و جریان اطراف آن حل شده است. برای بررسی میدان جریان و انتقال حرارت، معادلات پیوستگی، انرژی و انتقال جرم و برای آسایش حرارتی معادلات فیزیولوژیکی همزمان با این معادلات حل شده‌اند. نتایج این تحقیق در مقایسه با نتایج ارائه شده در سایر مراجع از مطابقت خوبی برخوردار است. در سیستم گرمایش هیبریدی، توزیع سرعت، دما و رطوبت اطراف شخص همگن و یکنواخت می‌شود. سرعت مورد نیاز برای تامین شرایط آسایش در محدوده استاندارد ۰/۲ متر بر ثانیه حاصل می‌گردد. این کاهش سرعت باعث کاهش میزان افت انتقال حرارت و مصرف انرژی در این سیستم‌ها، به ترتیب حدود ۲۵ و ۱۹ درصد می‌شود. با تغییر در مقاومت حرارتی دیواره نیز معادل ۸ درصد انرژی مصرفی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: گرمایش هیبریدی، آسایش حرارتی، انتقال حرارت، شبیه‌سازی، کاهش مصرف انرژی

Using Hybrid Thermal Systems toward Thermal Comfort to Minimize Consumption Energy in Residential Buildings

N. Jahantigh

Faculty of Engineering
University of Zabol

A. Keshavarz

Mechanical Engineering Department
K.N. Toosi University of Technology

M. Mirzaie

Aerospace Department
K.N. Toosi University of Technology

(Received: 24/April/2013; Accepted: 30/October/2013)

ABSTRACT

The aim of this paper is to decrease the energy consumption in a residential building and provide thermal comfort by using hybrid system instead of the conventional method (convection heating method). In this system, the temperature of the room is kept around 10°C by convection system and then is raised to the thermal comfort by radiant heater. Thermal comfort is affected by temperature, relative humidity and velocity of the air flow. These parameters can be controlled by changing surface and temperature of the heater, position and velocity of the inlet and outlet, and type of the materials. In this simulation a 3D model of a virtual standing thermal manikin with real dimensions is considered. The continuity, momentum, energy, species equations for turbulent flow and physiological equation for thermal comfort are numerically solved for heat, moisture and flow field. The obtained numerical results have a good agreement with the experimental results reported in the literature. The velocity, temperature and the relative humidity contribution around the manikin is more uniform in the hybrid system. The velocity that is needed to provide the thermal comfort is also equal to 0.2 m/s in this system. This reduction of the velocity causes the heat transfer losses and energy consumption to around 25% and 19%, respectively. Also, the energy consumption decreases equal to 8% due to thermal resistance variation in the walls.

Keywords: Hybrid Heating, Thermal Comfort, Heat Transfer Simulation, Energy Consumption Decrease

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): njahantigh@uoz.ac.ir

۲- دانشیار: keshavarz@kntu.ac.ir

۳- دانشیار: mirzaie@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه سیستم‌های تهویه مطبوع یکی از بخش‌های جدایی‌ناپذیر طراحی ساختمان‌ها به‌شمار می‌رود. از طرفی، طراحی دقیق سیستم‌های تهویه مطبوع، مستلزم پیش‌بینی صحیح شرایط آسایش حرارتی می‌باشد. به‌طور کلی از گذشته تاکنون هدف اصلی سیستم‌های تهویه مطبوع، ایجاد شرایطی مطلوب به‌منظور تأمین احساس آسایش حرارتی انسان‌ها بوده است. در سال‌های اخیر توجه همه محققین و دانشمندان مصرف انرژی در بخش ساختمان، به یافتن راه‌کارهای مناسب برای حفظ منابع انرژی و بهینه‌سازی مصرف انرژی و نیز تأمین شرایط آسایش حرارتی معطوف شده است.

تحقیقات نشان داده است که احساس حرارتی افراد فقط تابعی از دما و رطوبت نسبی هوا نیست و به عوامل دیگری نیز وابسته می‌باشد. این عوامل به دو دسته، عوامل محیطی و عوامل انسانی تقسیم‌بندی می‌شوند. پارامترهای محیطی شامل دمای هوا، دمای متوسط تابشی، سرعت نسبی جریان هوا و رطوبت نسبی می‌باشد. پارامترها یا عوامل انسانی نیز شامل میزان فعالیت بدنی، نرخ متابولیک و نوع و میزان پوشش یا مقاومت حرارتی پوششی افراد می‌باشد [۱].

اولین بار فنگر^۱ برای بیان مقدار آسایش حرارتی افراد در یک محیط یک مدل تحلیلی پایا و بسیار ساده را براساس هفت عامل مؤثر مذکور ارائه نمود و براساس آن شاخص پی‌ام‌وی^۲ را برای پیش‌بینی میانگین رأی افراد در شرایط حرارتی پایا معرفی کرد [۲].

روش‌های مختلفی برای افزایش کارایی سیستم‌ها وجود دارد. با تغییر مصالح (تغییر مقاومت حرارتی) دیواره‌ها می‌توان میزان افت انتقال حرارت را به‌میزان قابل توجهی کاهش داد. همچنین با استفاده از سیستم‌های نوین گرمایشی مانند سیستم‌های هیبریدی علاوه بر کاهش افت حرارتی مصرف انرژی نیز به‌مقدار چشمگیری کاهش می‌یابد. سیستم‌های گرمایش هیبریدی از منابع مختلف انرژی و به‌صورت ترکیبی استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها در مقایسه با سیستم‌هایی که یک منبع برای تولید دارند، از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردارند.

در یک فضای مسکونی همیشه فضاهایی وجود دارد که امکان گرمایش از طریق تابش در آنجا نیست و لازم است از

طریق جابه‌جایی حرارت موردنظر در آن ناحیه تأمین گردد. با توجه به اینکه دمای آسایش هم متأثر از دمای جابه‌جایی و هم متأثر از دمای تابشی است. استفاده از هر یک از سیستم‌های گرمایشی، به‌صورت مجزا، باعث بالا رفتن مصرف انرژی می‌شود و شرایط مطلوب آسایش حرارتی نیز در این حالت تأمین نمی‌شود. استفاده ترکیبی سیستم‌های گرمایشی ضمن کاهش مصرف انرژی سریع‌تر به دمای آسایش می‌رسد. پس سیستم‌های هیبریدی ضمن استفاده از هر دو روش انتقال حرارت، آسایش حرارتی را به‌نحو مطلوب تأمین می‌کنند.

دمای خشک، رطوبت نسبی، سرعت جریان هوا از عوامل تأثیرگذار بر آسایش حرارتی می‌باشند که در هریک از سیستم‌ها با تغییر سطح و قدرت گرمکن، موقعیت درجه ورود و خروج، سرعت هوای ورودی و جنس مصالح قابل کنترل می‌باشند. در تحقیقات انجام‌شده تاکنون، که به‌روش‌های آزمایشگاهی انجام شده است بررسی تأثیر همه پارامترهای مؤثر بر آسایش حرارتی به‌صورت هم‌زمان امکان‌پذیر نبوده است. بنابراین محققین روش‌های عددی را برای حل میدان جریان به‌همراه کارهای آزمایشگاهی در سال‌های اخیر دنبال نموده‌اند.

تاکنون تجزیه و تحلیل هوای محیط‌های داخلی توسط محققین مختلف مانند اولسن^۳ و همکارانش انجام شده است [۳]. تحقیقات گذشته حاکی از این است که از بین سیستم‌های مختلفی که برای گرمایش محیط‌های داخلی استفاده شده است مردم در سیستم‌های دما پایین احساس آسایش حرارتی بیشتری دارند [۴].

در ادامه محققین کار خود را با مطالعه در حوزه‌های مختلف مانند مدل‌های آسایش حرارتی، شاخص‌های آسایش [۵]، آزمایش شاخص‌ها و مدل‌های آسایش در شرایط مختلف آب و هوایی [۶]، استانداردهای ملی و بین‌المللی آسایش حرارتی [۷]، بهینه‌سازی مدل‌های آسایش حرارتی، ملاحظات طراحی ساختمان‌ها براساس ایجاد شرایط آسایش حرارتی [۸]، محاسبه انتقال حرارت در اتاق در شرایط جابه‌جایی طبیعی و اجباری [۹]، محاسبه انتقال حرارت در اتاق در شرایط تابش خالص، مطالعات بر روی ساختمان‌های دارای سیستم‌های سرمایش و گرمایش جابه‌جایی و نیز ساختمان‌های دارای سیستم‌های سرمایش و گرمایش تابشی [۱۰]، شبیه‌سازی انتقال حرارت از بدن انسان با نرم‌افزارهای تجاری [۱۱]،

1- Fanger

2- PMV (Predict Mean Vote)

3- Olesen

۲- معادلات حاکم و روش حل

معادلات حاکم بر این میدان برای بررسی انتقال حرارت، رطوبت و جریان، معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و انتقال جرم برای جریان مغشوش و برای آسایش حرارتی معادلات فیزیولوژیکی می‌باشند که به‌طور همزمان حل می‌گردند. به‌دلیل مغشوش بودن جریان، معادلات اغتشاش و برای بررسی اثرات تابشی معادلات تابشی نیز در این مسأله باید حل گردند. برای بیان درجه یا مقدار آسایش حرارتی در یک محیط از معادله آسایش فانگر و ایده عملی پی ام وی (متوسط آرای پیش‌بینی) استفاده شده است [۲]. شکل کلی معادله بقای جرم به‌صورت معادله (۱) بیان می‌شود [۱۵]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0. \quad (1)$$

معادله (۲) شکل کلی معادله بقای مومنتوم را نشان می‌دهد [۱۵]:

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j. \quad (2)$$

معادله (۳) شکل کلی معادله انرژی می‌باشد [۱۵]:

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial e}{\partial x_k} = \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j}. \quad (3)$$

سمت چپ معادله (۳) نرخ تغییرات انرژی داخلی و سمت راست معادله عوامل تغییر در انرژی داخلی را نشان می‌دهد. اولین جمله تبدیل انرژی مکانیکی به گرمایی توسط تنش‌ها و جمله آخر نرخ گرمایی که از بیرون توسط رسانش افزوده می‌شود را نشان می‌دهد.

معادله (۴) معادله بقای گونه‌ها یا اجزاء است [۱۵]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = \nabla \cdot \left[\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{SC_t} \right) \nabla Y_i \right] + S_i. \quad (4)$$

که، Y_i کسر جرمی محلی جزء i ام، $D_{i,m}$ ضریب پخش جرمی جزء i و SC_t عدد توربولنت اشمیت و در آخر نیز ترم S_i هرگونه منبع دیگر را شامل می‌شود. شاخص پی ام وی براساس رابطه (۵) به‌دست می‌آید:

$$PMV = (0.303 \exp(-0.035M) + 0.028)L. \quad (5)$$

در رابطه (۵)، M نرخ متابولیک و L بار حرارتی بدن یا همان اختلاف بین گرمای تولیدشده در بدن و گرمای اتلافی از سطح

مطالعه بر روی تأثیر هر یک از پارامترهای هفت‌گانه بر آسایش حرارتی و میزان اثر بخشی هر یک از آنها بر آسایش حرارتی و درنهایت بررسی تاثیرگذاری مقاومت حرارتی جداره‌های مختلف مانند شیشه و دیوار بر روی آسایش حرارتی به‌انجام رسانده‌اند [۱۲].

درسال‌های اخیر از گرمکن تابشی برای گرمایش محیط‌های داخلی استفاده شده است که در همین راستا جیت^۱ جیت^۱ و همکاران ضمن استفاده از گرمکن‌های تابشی با دمای بالا اثرات آنها بر آسایش حرارتی را برای پنجره‌ها با شیشه‌های مختلف بررسی نموده‌اند [۱۳]. در ادامه کیلیک^۲ و همکاران به‌کمک روش‌های عددی و آزمایشگاهی مدل‌های با شکل فیزیولوژیکی شبیه به انسان را تجزیه و تحلیل کرده‌اند و با حل میدان جریان به بررسی انتقال حرارت و جریان پرداخته‌اند [۱۴].

در تحقیقات گذشته برای بررسی میدان جریان ساده‌سازی‌های زیادی در هندسه مدل، اثرات تابشی، اثرات پنجره با شیشه‌های شفاف، اعمال شده است. در این مقاله ضمن استفاده از سیستم‌های هیبریدی سعی شده است این ساده‌سازی‌ها انجام نشود. به‌روش عددی اثرات متقابل گرمکن و آسایش حرارتی شخص تعیین شده است. تأثیر سیستم گرمایشی هیبریدی بر آسایش حرارتی و نیز مصرف انرژی نسبت به سیستم‌های گرمایشی جابه‌جایی و نیز تأثیر مصالح بر میزان انتقال حرارت و آسایش حرارتی در هریک از سیستم‌ها بررسی شده است. ضمناً شکل فیزیولوژیکی مانکن کاملاً منطبق بر هندسه واقعی بدن در نظر گرفته شده است. اثرات تابشی نیز به‌دلیل استفاده از روش DO^۳ برای محاسبات تابشی به‌صورت دقیق مورد محاسبه قرار گرفته است که تاکنون در سایر مطالعات با این دقت مورد ارزیابی قرار نگرفته است. همچنین توجه اساسی در این مقاله بر روی مصرف کمتر انرژی توأم با تأمین آسایش حرارتی بوده است.

به‌طور کلی، علاوه بر بررسی اثر پارامترهای هفت‌گانه به‌طور همزمان و مقاومت دیواره در سیستم‌های هیبریدی، اثر عوامل ایجاد ناراضیاتی موضعی مانند کوران، تابش متقارن، گرادیان عمودی دما و نیز دمای کف نیز بررسی و کنترل شده است.

1- Jeet

2-Kilic

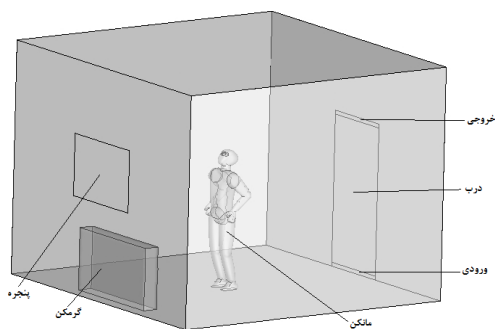
3-Discrete Ordinates

داخلی و جریان‌های با انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. معادلات ارائه شده همگی به فرم کلی هستند و برای حالت پایا ترم‌های زمانی آن حذف می‌شوند.

به دلیل اینکه مدل DO محدوده معینی از ضخامت‌های نوری را پوشش می‌دهد و دربرگیرنده حل تابشی در دیوارهای نیمه‌شفاف می‌باشد و از طرفی هزینه محاسبات و همچنین حافظه موردنیاز در این مدل نسبتاً کم می‌باشد در این مطالعه برای بررسی تشعشع در مرزها استفاده شده است. در محاسبات دقت همگرایی برای معادله پیوستگی از مرتبه 10^{-6} و برای معادله انرژی از مرتبه 10^{-8} است. جهت بررسی دقت نتایج از مدل ارائه شده توسط موراکومی^۲ و همکاران استفاده شده است [۱۶].

۳- هندسه مسأله

هندسه مسأله شامل یک مانکن ایستاده و یک گرمکن تابشی می‌باشد که درون اتاق قرار گرفته است و در شکل ۱ نشان داده شده است. یک پنجره و یک درب و دو دریچه ورودی و خروجی در پایین و بالای این درب برای واردنمودن رطوبت و نیز تأمین گردش جریان و تأمین حرارت جابه‌جایی موردنیاز برای اتاق در نظر گرفته شده است. مدل و اتاق با نرم‌افزار سالید ورک^۳ ۲۰۱۱ طراحی شده است. این مدل با نرم‌افزار گمبیت^۴ شبکه‌بندی شده است. ابعاد اتاق $4 \times 4 \times 3$ متر است. مانکن $1/7$ متر قد و در حدود ۷۵ کیلوگرم جرم دارد. شکل فیزیولوژیکی طراحی شده اجازه مقایسه نتایج با مدل واقعی و نتایج تجربی را می‌دهد. ابعاد پنجره $1 \times 1/2$ متر و برای درب 1×2 متر می‌باشد.



شکل (۱): شماتیک کلی اتاق و گرمکن.

بدن می‌باشد. این بار حرارتی براساس معادله (۶) به دست می‌آید.

$$M - W = q_c + E_{sk} + q_{res} + E_{res} \quad (6)$$

در معادله (۶)، E_{sk} نرخ اتلاف تبخیری از سطح پوست است.

$$E_{sk} = \frac{w(P_{as} - P_a)}{R_{cl}} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، w رطوبت نسبی پوست، P_{as} (kPa) فشار بخار در سطح پوست، P_a (kPa) فشار جزئی بخار در محیط و R_{cl} ($m^2 kPa/w$) مقاومت کل تبخیری لایه‌های پوست پوشش است. q_{res} نرخ تبادل حرارت جابه‌جایی و E_{res} نرخ تبادل حرارت تبخیری در تنفس است که به ترتیب از معادلات (۸) تا (۹) محاسبه می‌شوند؛

$$q_{res} = 0.0014M(34 - T) \quad (8)$$

$$E_{res} = 1.72 \times 10^{-5}M(5867 - P_a) \quad (9)$$

در معادله (۹)، T دمای میانگین محیط است.

به منظور حل جریان در این مدل از یک کد کامپیوتری سه‌بعدی پایا استفاده شده است که معادلات پیوستگی و انتقال حرارت و جرم را به‌طور همزمان حل می‌کند. برای معادله فشار از الگوریتم سیمپل^۱ استفاده می‌شود که در جریانات پایا بهتر از سایر روش‌ها عمل می‌کند و به علت استفاده از یک مرحله تصحیح در هر تکرار از بقیه سریع‌تر است و در سلول‌های هرمی و چهار وجهی پایدارتر و دقیق‌تر از سایر الگوریتم‌ها عمل می‌کند. ترم‌های جابه‌جایی با گسسته‌سازی مرتبه دوم مدل شده است. این روش با وجود اینکه در هر تکرار از روش مرتبه اول کندتر است، اما در تعداد تکرار کمتری همگرا شده و زمان حل را کاهش می‌دهد. به علاوه، به علت درگیرکردن گره‌های بیشتری نسبت به گسسته‌سازی مرتبه اول، از دقت و پایداری بیشتری برخوردار است.

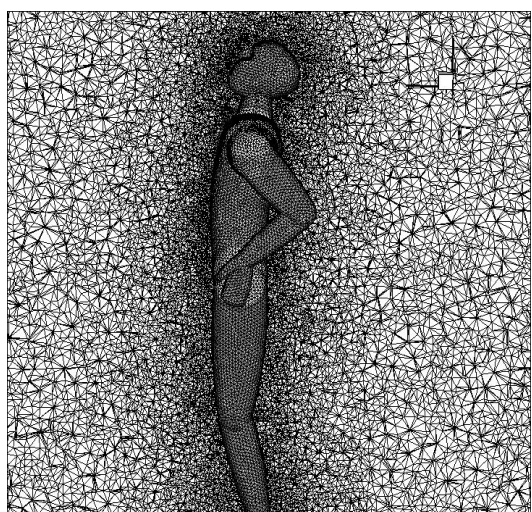
علاوه بر معادلات فوق با داخل نمودن شتاب جاذبه، جابه‌جایی آزاد نیز وارد محاسبات شده است. مدل $RNG k - \epsilon$ برای مدل‌سازی جریان مغشوش و روش DO برای بررسی اثرات تابشی در نظر گرفته شده است.

علت انتخاب مدل $RNG k - \epsilon$ برای اغتشاش در میدان حل سه‌بعدی این مطالعه، پایداری و دقت بالای آن است. این مدل به‌طور گسترده‌ای در اعداد رینولدز بالا به همراه قانون دیواره به کار می‌رود که برای مدل‌سازی جریان در محیط‌های

2- Murakumi
3- Solid Work
4- Gambit

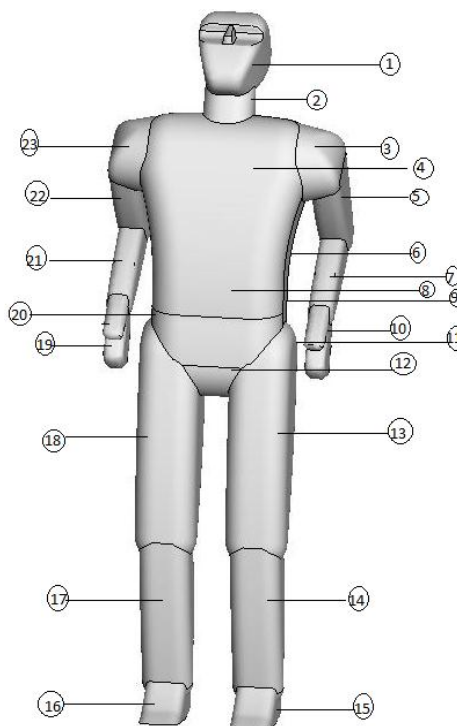
1- SIMPLE

تمامی میدان حل امکان‌پذیر نیست. برای شبکه‌بندی، ابتدا سطح مدل با استفاده از یک شبکه بی‌سازمان مثلثی مش زده می‌شود. این نوع شبکه‌بندی، توانایی پوشش کوچک‌ترین سطوح مدل را نیز دارد. سپس فضای بین مدل و اتاق و گرمکن‌های حرارتی با الگوریتم T-GRID مش زده می‌شود. به علت اهمیت بررسی فضای اطراف شخص، اندازه شبکه در اطراف شخص باید ریز باشد برای انجام این کار از یک تابع توزیع مناسب که از لایه مرزی اطراف سطح آغاز و تا گام پیشینه فضا ادامه دارد، استفاده می‌شود. با توجه به تعداد زیاد سلول‌های محاسباتی و فیزیک جریان رسیدن به همگرایی از اهمیت بالایی برخوردار است و استقلال نتایج از شبکه اهمیت پیدا می‌کند. علاوه بر اینکه مقدار باقی‌مانده برای معادله پیوستگی، مومنتوم و انرژی نیز به دقت قابل‌قبولی رسیده است در این مسأله برای بررسی همگرایی، کمیت ضریب کلی انتقال حرارت نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی استقلال از شبکه، متوسط دمای حجمی، متوسط رطوبت نسبی، متوسط دمای تابشی و شار خروجی از سطح مانکن حرارتی برای تعداد سلول‌های مختلف محاسبه شده است. با رسیدن تعداد سلول‌ها در این مدل به تعداد ۵۸۷۴۳۶۹ سلول حجمی چهاروجهی و ۹۵۶۳۲۸۷ سلول سطحی تغییرات پارامترهای مورد بررسی، ثابت مانده است که نشان‌دهنده استقلال از شبکه مسأله مورد بررسی می‌باشد. در شکل ۳ شبکه محاسباتی بر روی سطح مانکن و فضای اتاق داده شده است.



شکل (۳): شبکه محاسباتی در فضای اتاق.

اجزای مدل حرارتی به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. کل مساحت سطح مانکن ۲/۳۱ مترمربع است.



شکل (۲): اجزای مدل حرارتی.

نام و مساحت اجزای مدل در جدول ۱ آمده است.

جدول (۱): نام و مساحت اجزای مختلف مدل.

شماره	نام سطح مدل	مساحت m ²
۱	سر	۰/۱۵۸۹۸
۲	گردن	۰/۰۲۸۹۲۶
۲۳ و ۳	کتف چپ و راست	۰/۰۴۸۲۴۹
۴	سینه	۰/۲۳۴۸۱۲
۲۲ و ۵	بازوی چپ و راست	۰/۰۹۸۰۲۶
۲۰ و ۶	پهلوی چپ و راست	۰/۰۲۱۱۴۱
۲۱ و ۷	ساعد چپ و راست	۰/۰۶۸۷۱۵
۸	شکم	۰/۰۳۸۹۵۱
۹	کمر	۰/۲۱۰۵۰۲
۱۹ و ۱۰	مچ چپ و راست	۰/۰۵۲۱۶۳
۱۱	باسن	۰/۰۴۱۲۸۸
۱۲	لگن	۰/۰۲۷۳۱۳
۱۸ و ۱۳	ران چپ و راست	۰/۲۸۷۵۴۸
۱۷ و ۱۴	ساق چپ و راست	۰/۱۶۰۳۴۶
۱۶ و ۱۵	پای چپ و راست	۰/۰۵۱۳۶۶
	کل	۲/۳۱۵۸۱۴

۴- شبکه محاسباتی

به علت وجود سطوح بسیار کوچک و با شکل هندسی بسیار پیچیده در مسأله، عملاً استفاده از یک شبکه باسازمان در

۵- شرایط مرزی

حالت‌های مختلف حل این مسأله در جدول ۳ آمده است.

جدول (۳): حالت‌های مختلف حل مساله.

نوع حالت	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
نوع سیستم	جابه‌جایی	هیبریدی	هیبریدی	هیبریدی
ضخامت دیواره (mm)	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰
ضریب هدایت پنجره (W/m.K)	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۲۴
ضخامت پنجره (mm)	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
ضریب هدایت دیواره (W/m.K)	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۱۸

۶- نتایج و بحث

در سیستم هیبریدی هر یک از پارامترهای ورودی نظیر سطح دریچه ورودی، سرعت ورودی، قدرت گرمکن، موقعیت گرمکن در راستای طولی و عرضی و سطح گرمکن در شرایط بهینه شده قرار دارد. براساس این بهینه‌سازی که به روش تکنیک طراحی آزمایش‌ها و از طرح دوسطحی انجام شده است بهترین موقعیت برای دست یافتن به آسایش حرارتی قرارگرفتن گرمکن در روبه‌روی شخص و در زیر پنجره و سرعت برابر ۰/۱۵ متر بر ثانیه و سطح ۱/۲۸۳ مربع و دمای گرمکن برابر ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

برای سیستم جابه‌جایی با توجه به تمام محدودیت‌های معماری و تأسیساتی موجود، بهترین مکان قرارگیری ورودی و خروجی مقابل یکدیگر و در ارتفاع متفاوت (برای کم شدن ناحیه سکون) می‌باشد. در این وضعیت علاوه بر آسایش حرارتی کلی بدن، شار حرارتی خروجی از سطح بدن در تمامی اندام‌های متقارن بدن مانند دست‌ها و پاها برابر شده ولی عوامل نارضیاتی مانند کوران و گرادیان عمودی دما در این سیستم‌ها باعث ایجاد نارضیاتی موضعی گردیده است. برای سیستم جابه‌جایی مکان مناسب برای ورودی در پایین‌ترین ارتفاع ممکن از کف می‌باشد تا علاوه بر کاهش رطوبت نسبی، گرمایش با سرعت‌های پایین‌تر انجام شود تا میزان نارضیاتی ناشی از کوران کاهش یافته و تأثیر جابه‌جایی آزاد که باعث کاهش مصرف انرژی به میزان قابل توجه می‌شود، افزایش یابد [۱۷].

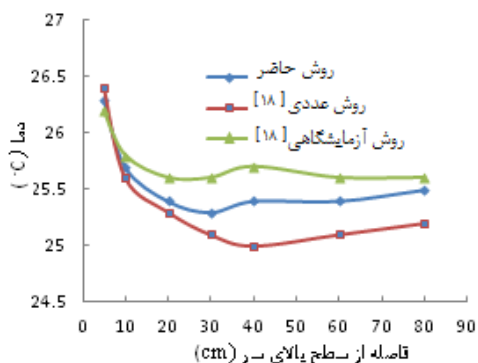
در ادامه، علاوه بر مقایسه بین دو سیستم جابه‌جایی و هیبریدی، اثر مقاومت حرارتی دیواره‌ها و پنجره در حالتی که از سیستم هیبریدی استفاده شود بر شار حرارتی و میزان اتلاف و میزان مصرف انرژی بررسی شده است و میزان عوامل نارضیاتی چهارگانه کوران، تابش نامتقارن، گرادیان عمودی دما

برای سیستم گرمایشی جابه‌جایی هوا با دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه از طریق دریچه زیر پنجره وارد می‌شود و از دریچه بالای درب خارج می‌شود. بقیه شرایط شبیه حالت سیستم هیبریدی می‌باشد. در سیستم هیبریدی دمای گرمکن تابشی ۳۰ درجه سانتی‌گراد بوده و برای تأمین گردش جریان و نیز رساندن دمای اتاق به ۱۰ درجه سانتی‌گراد از طریق جابه‌جایی، هوای با دمای ۱۰ °C و با سرعت ۰/۱۵ متر بر ثانیه از دریچه پایین درب وارد می‌شود. برای تأمین رطوبت مناسب، کسر جرمی بخار آب نیز در ورودی ۹/۵ گرم آب بر کیلوگرم هوا در نظر گرفته شده است. شرط مرزی در خروجی‌ها از نوع فشار بوده و مقدار نسبی فشار صفر پاسکال است. با توجه به تراکم ناپذیر جریان، در ورودی از شرط سرعت استفاده می‌شود. با توجه به استاندارد اشری^۱ ۲۰۰۰ نرخ متابولیسم برای حالت ایستاده بدون فعالیت برابر W/m^2 ۱۰۴/۶ می‌باشد [۷]. دمای سطح مدل براساس معادله بالانس بین مرکز بدن، سطح پوست و محیط اطراف برای قسمت‌های دارای پوشش مانند پاها، سینه، شکم و کمر برابر ۳۳/۱ درجه سانتی‌گراد و برای قسمت‌های بدون پوشش مانند سر، گردن، بازو و دست‌ها برابر ۳۳/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. کسر جرمی بخار آب در اطراف مدل برابر ۱۰ گرم آب بر کیلوگرم است. شرط مرزی کف اتاق دما ثابت و برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. برای سایر دیوارها به جز دیواره دارای پنجره، شار صفر در نظر گرفته شده است. جنس سقف و دیواره‌ها از آجر معمولی بوده که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است. ضریب انتقال حرارت برای دیوار دارای پنجره $W/m.K$ ۲۵ است. ضخامت تمامی دیوارها و سقف نیز ۰/۲۵ متر است. درب از جنس چوب بوده و ضریب انتقال حرارت برای آن $w/m.K$ ۱۵ می‌باشد. مقدار ضریب صدور برای شخص ۰/۹۸ در نظر گرفته شده است.

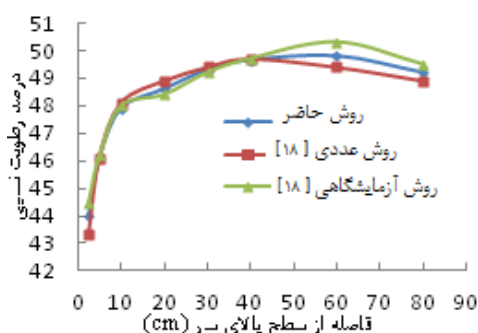
جدول (۲): مشخصات فیزیکی درب و دیوارها [۷].

پنجره	دیوار	درب	
۲۰	۲۵۰	۵۰	ضخامت (mm)
۲۵۰۰	۱۹۲۲	۷۲۰/۸۳	چگالی (kg/m^3)
۸۵۰	۸۴۰	۲۳۱۰	گرمای ویژه (J/Kg-K)
۰/۲	۰/۲۵	۰/۱۷۳	ضریب رسانش (W/mK)
۰/۸۲	۰/۹۵	۰/۹	ضریب صدور

1- ASHRAE



شکل (۵): مقایسه دمای به دست آمده با نتایج مرجع [۱۸].



شکل (۶): مقایسه رطوبت نسبی به دست آمده با نتایج مرجع [۱۸].

در ادامه برای وضعیت سوم که کمترین پی ام وی حاصل شده است کانتورهای سرعت، دما و رطوبت به عنوان نمونه آورده شده و پیرامون آنها بحث گردیده است. برای بقیه حالت‌ها فقط نتایج کلی در جدول ۵ ذکر شده است.

۸- توزیع سرعت برای سیستم هیبریدی در حالت سوم

توزیع پارامترهای سرعت و دما و رطوبت نسبی برای فرد در سیستم هیبریدی در حالت سوم در شکل‌های ۹-۷ آورده شده است.

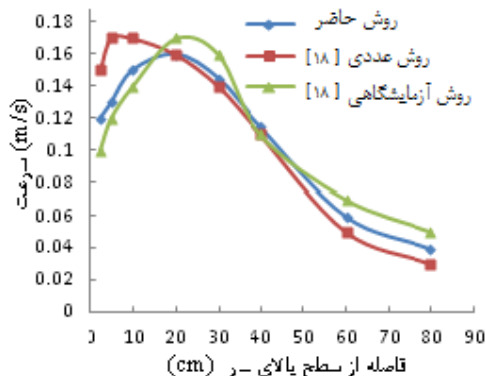
سرعت در نزدیکی سطح مدل بیشتر از نقاط دورتر از آن است. بیشترین سرعت در اطراف سر مدل می‌باشد زیرا دمای میانگین محیط در آن زیاد است و در نتیجه گرادیان دمایی موجود از مدل، به محیط در آن کوچک‌تر است و سرعت در آن ناحیه بیشتر می‌باشد. محدوده سرعت در اطراف شخص مطابق با استاندارد اشری می‌باشد. در محدوده اطراف شخص محدوده سکون وجود ندارد و سرعت نیز دارای مقادیر بالا نمی‌باشد در نتیجه شخص کاملاً احساس آسایش می‌کند. زیرا مقدار

و نیز دمای کف در سیستم هیبریدی مورد بررسی قرار گرفته است.

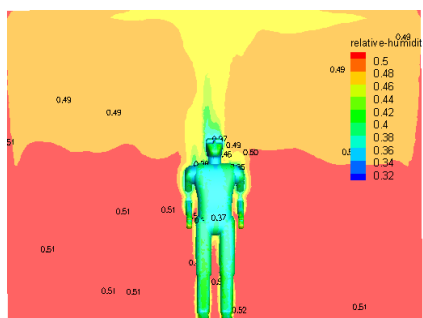
۷- اعتبارسنجی نتایج

برای بررسی صحت و دقت جواب‌ها، نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی و عددی مرجع [۱۸] مقایسه شده است. به این منظور نتایج این پژوهش با سرعت جریان، رطوبت نسبی و دما که در نقاط مختلف بالای سر مدل اندازه‌گیری شده است، مقایسه گردیده است. شکل‌های ۴-۶ به ترتیب به مقایسه بین سرعت، دما و رطوبت نسبی به دست آمده با نتایج عددی و تجربی محققین ذکر شده می‌پردازد. همان‌گونه که شکل ۴ نشان می‌دهد بیشینه اختلاف بین سرعت محاسبه شده با نتایج تجربی و عددی مرجع [۱۸] از ۲ درصد تجاوز نمی‌کند. تغییر اندک سرعت در راستای عمودی باعث می‌شود که میزان نارضایتی موضعی ناشی از کوران بسیار کاهش یابد و در محدوده استاندارد اشری قرار گیرد. این یکی از مزیت‌های این سیستم‌ها نسبت به سایر سیستم‌های رایج جابه‌جایی می‌باشد.

مقایسه بین دما و رطوبت نسبی محاسبه شده در شکل‌های ۵-۶ نیز دقت بالای محاسبات را تأیید می‌کند. بیشینه اختلاف بین دمای محاسبه شده و نتایج تجربی و عددی ۰/۳ و ۰/۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. تغییرات محدود دما در راستای عمودی باعث کاهش نارضایتی ناشی از گرادیان عمودی دما می‌شود که این نیز یکی دیگر از مزیت‌های این سیستم‌ها نسبت به سایر سیستم‌های گرمایش به حساب می‌آید. این مقادیر برای رطوبت نسبی نیز به ترتیب ۰/۵ و ۰/۴ درصد می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج مذکور می‌توان نتیجه گرفت که روش عددی مورد استفاده دقت قابل قبولی دارد.



شکل (۴): مقایسه سرعت به دست آمده با نتایج مرجع [۱۸].



شکل (۹): توزیع رطوبت نسبی برای سیستم هیبریدی در حالت بهینه سوم.

با مشاهده کانتور سرعت در حالت‌های دیگر نیز مشاهده می‌گردد که در وضعیت هیبریدی تقارن بهتری بر جریان اطراف شخص حاکم می‌باشد. حتی در حالت دوم مقدار بیشینه سرعت کمتر بوده است و در محدوده ۰/۲ متر بر ثانیه قرار دارد که متناسب با شرایط آسایش مطابق استاندارد اشری می‌باشد.

۱۰- آسایش حرارتی و مصرف انرژی

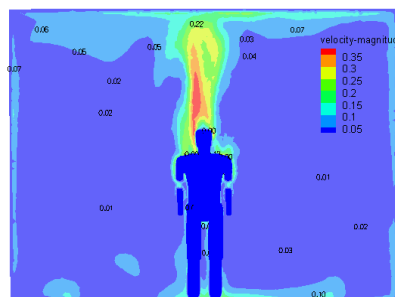
در جدول ۴ مقایسه بین شار جابه‌جایی و شار تابشی برای حالت اول و دوم آورده شده است که برای تمام اجزای بدن مقدار آن بیان شده است. غیر از نحوه تأمین انتقال حرارت بقیه پارامترها در دو وضعیت یکسان بوده است.

جدول (۴): مشخصات انتقال حرارت برای دو حالت.

نام سطح	حالت اول		حالت دوم	
	شار تابشی W/m ²	شار جابه‌جایی W/m ²	شار تابشی W/m ²	شار جابه‌جایی W/m ²
سر	۴۳/۱۴	۳۸/۶۱	۴۱/۵۳	۳۹/۶۵
سینه	۳۵/۸۲	۳۷/۴۴	۴۵/۳۵	۳۴/۴۳
شکم	۳۳/۷۳	۳۵/۹۰	۴۶/۰۳	۳۱/۹۲
لگن	۳۱/۷۳	۳۲/۲۷	۳۹/۹۵	۳۰/۶۸
کمر	۳۳/۳۲	۳۱/۷۶	۳۸/۳۲	۳۲/۵۷
باسن	۸۴ ۳۳/	۳۳/۷۹	۴۰/۲۳	۳۱/۹۱
بازو	۳۷/۱	۳۲/۴۷	۴۱/۳۹	۳۶/۵۴
ساعد	۳۸/۳۵	۳۰/۶۶	۳۹/۶۹	۳۷/۶۱
کتف	۳۵/۲۷	۳۸/۷۱	۵۴/۲۸	۳۴/۲۹
مچ	۴۱/۶۹	۲۹/۲۴	۳۸/۶۹	۴۰/۱۵
ران	۳۴/۴۴	۳۱/۶۹	۴۸/۳۷	۳۳/۷۳
ساق	۴۱/۳۴	۳۶/۱۰	۴۳/۸۴	۴۰/۶۹
پا	۴۶/۸۱	۳۴/۶۹	۴۲/۶۴	۴۵/۳۱
گردن	۳۳/۳۶	۳۵/۲۳	۴۵/۷۸	۳۸/۶۲
پهلوی	۲۲/۰۱	۲۰/۹۷	۴۴/۱۸	۱۹/۸۶
میانگین	۳۷/۱	۳۳/۷	۴۴/۳۵	۳۵/۶۸

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در حالت دوم که از سیستم هیبریدی استفاده شده است با بالا رفتن شار تابش، معیار

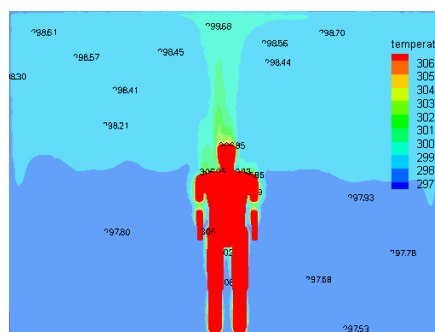
نارضایتی ناشی از کوران که به دلیل اغتشاشات بسیار سرعت به وجود می‌آید و باعث کاهش کارایی سیستم‌ها برای تأمین آسایش حرارتی می‌شود در این سیستم‌ها در محدوده استاندارد اشری (کمتر از ۵ درصد) شده است.



شکل (۷): توزیع سرعت برای سیستم هیبریدی در حالت سوم.

۹- توزیع دما برای سیستم هیبریدی در حالت سوم

همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود توزیع دما در محیط کاملاً یکنواخت می‌باشد. بیشترین دما در نزدیک سطح مدل و برابر با ۲۵/۳۶ درجه سانتی‌گراد و در بالای سر مدل می‌باشد. اختلاف دمای نواحی بالا و پایین برابر ۱/۷۵ درجه سانتی‌گراد است. توزیع مناسب در اطراف شخص یا همان حالت تقارن دمایی باعث می‌شود شخص در نقاط مختلف به صورت نقطه‌ای احساس بالا یا پایین بودن دما ننماید و در نتیجه به آسایش حرارتی مناسب برسد. هرچه یکنواختی بیشتر باشد نارضایتی ناشی از گرادیان عمودی در محدوده استاندارد اشری (کمتر از ۶ درصد) قرار گرفته است. ضمن اینکه شاخص پی ام وی نیز در محدوده $-0.5 \leq PMV \leq +0.5$ قرار دارد. این محدوده نارضایتی کمتر از ۱۰ درصد را به همراه دارد.



شکل (۸): توزیع دما برای سیستم هیبریدی در حالت سوم.

بر اساس کانتور توزیع رطوبت نسبی مطابق شکل ۹، رطوبت اطراف شخص معادل ۴۶٪ تا ۵۰٪ می‌باشد و کمترین مقدار آن در نواحی اطراف گرمکن که بیشترین دما را دارد، می‌باشد.

به حالت سوم که مقاومت حرارتی دیواره کم بوده است کاهش انرژی معادل ۸ درصد ایجاد شده است.

۱۱- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به بررسی و مقایسه مقدار مصرف انرژی و چگونگی تامین آسایش حرارتی در سیستم‌های هیبریدی با سایر سیستم‌های معمول گرمایشی پرداخته شده است. علاوه بر این اثر مقاومت دیواره بر کارایی سیستم‌های هیبریدی بررسی شده است. در سیستم‌های هیبریدی قسمتی از شار مورد نیاز به روش جابه‌جایی و مابقی به روش تابشی تامین شده است. توزیع کاملاً یکنواختی در کانتورهای دما، رطوبت و سرعت در سیستم هیبریدی نسبت به سیستم جابه‌جایی ایجاد می‌گردد. چهار عامل ناراضیتی ناشی از کوران، گرادبان عمودی دما، دمای کف، تابش نامتقارن که به دلیل اختلاف زیاد سرعت در راستای عمودی، اختلاف زیاد دما در راستای عمودی، اختلاف زیاد در دمای سطوح تابش‌کننده و بالابودن دمای کف ایجاد می‌گردد، در سیستم‌های هیبریدی در محدوده استاندارد اشری قرار گرفته است و باعث افزایش کارایی این سیستم‌ها شده است. دما و سرعت مورد نیاز برای رسیدن به شرایط آسایش در سیستم‌های هیبریدی نسبت به سیستم‌های جابه‌جایی بسیار کمتر می‌باشد و در نتیجه پدیده کوران و گرادبان عمودی دما در این سیستم‌ها ایجاد نمی‌شود. به دلیل نوع قرارگیری گرمکن‌های تابشی و محدوده دمای سطح تابشی، میزان ناراضیتی تابش نامتقارن در این سیستم‌ها کاهش یافته است. نیز همچنین ابعاد درجه مورد نیاز برای ورود هوا به داخل اتاق در سیستم‌های هیبریدی به مراتب کمتر از سیستم‌های جابه‌جایی است که این عامل نیز باعث کم‌شدن مصرف انرژی می‌گردد. با استفاده از سیستم‌های هیبریدی علاوه بر تامین شرایط آسایش حرارتی در زمان کمتر، اتلاف حرارت در سیستم‌های هیبریدی تا ۲۵ درصد کاسته می‌شود. همچنین مقدار انرژی لازم برای رساندن به شرایط آسایش تا ۱۹ درصد کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در سیستم‌های هیبریدی مصرف سوخت تا ۱۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با تغییر مقاومت حرارتی دیواره‌ها معادل ۸ درصد کاهش انرژی ایجاد می‌گردد. شاخص آسایش حرارتی در سیستم‌های هیبریدی با مقاومت حرارتی مطلوب معادل ۰/۰۰۳۴ می‌باشد که نشان‌دهنده آسایش حرارتی مناسب گرمایشی براساس استانداردهای تهویه مطبوع می‌باشد.

آسایش حرارتی به صفر نزدیک‌تر شده و شرایط آسایش تأمین می‌گردد. باتوجه به اینکه قسمت‌هایی از بدن در تماس مستقیم با گرمکن‌های تابشی قرار دارد انتقال حرارت سریع‌تر صورت می‌گیرد و مقدار گرمای تابشی نیز افزایش می‌یابد. این امر باعث بهینه‌شدن شاخص پی ام وی می‌گردد. به طوری که در وضعیت اول شاخص برابر با ۰/۸۹- بوده است و در وضعیت دوم این شاخص به ۰/۰۳۴ رسیده است.

جدول ۵: نرخ اتلاف حرارت از بدن، اتاق و مقادیر پی ام وی.

حالت	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم
دمای متوسط	۲۴/۵	۲۴/۵۲	۲۵/۳	۲۶/۱۲
رطوبت نسبی	۵۵/۳۶	۵۱/۲۳	۵۰/۴۶	۴۸/۶
شار جابه‌جایی	۳۶/۶۸	۳۶/۱۶	۳۲/۸۶	۲۹/۴
شار تابشی	۳۳/۶۱	۴۱/۲۲	۴۵/۳۳	۴۹/۸۱
اتلافات (تعریق، تنفس)	۳۵/۲۷	۲۵/۱۸	۲۲/۲۱	۱۹/۳۴
کل شار از بدن	۱۰۵/۵۶	۱۰۲/۵۶	۱۰۰/۳	۹۸/۴۵
شاخص پی ام وی	-۰/۸۹	-۰/۳۷	-۰/۰۳۴	-۰/۰۷۱
اتلاف حرارت اتاق	۶۸۴/۶۱	۵۴۶/۲۸	۵۱۲/۸۳	۴۶۸/۱۸
انرژی مصرفی	۳۵۴/۶۸	۳۰۸/۴۱	۲۸۶/۵۷	۲۶۳/۳۹

براساس اطلاعاتی که از حل معادلات حاکم بر انتقال حرارت بین انسان و محیط پیرامون آن در حالت هیبریدی بهینه‌شده به دست آمده است؛ نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی ۳۴ درصد، نرخ انتقال حرارت تابشی حدود ۴۱ درصد کل، انتقال حرارت تبخیری به واسطه تعریق، تنفس و تبخیر معادل ۲۴ درصد کل انتقال حرارت از بدن می‌باشد.

چنان‌که مشاهده می‌شود در سیستم‌های هیبریدی توزیع سرعت و دما در اطراف شخص کاملاً متقارن می‌باشد؛ در نتیجه ناراضیتی ناشی از تابش نامتقارن در محدوده استاندارد قرار می‌گیرد و محدوده سکون که سرعت آن صفر می‌باشد و باعث ناراضیتی یا عدم آسایش حرارتی می‌شود به کم‌ترین مقدار خود رسیده است. براساس جدول ۵ علاوه بر تامین شرایط آسایش حرارتی، تلفات حرارتی که از دیواره‌ها در حالت دوم انجام می‌شود بسیار کمتر از تلفات حرارتی در حالت اول می‌باشد. با تبدیل شرایط گرمایشی از صرفاً جابه‌جایی به ترکیبی مقدار تلفات تا ۲۵ درصد کاهش یافته است. براساس مدل‌سازی این فضای نمونه با نرم‌افزار انرژی پلاس و مقایسه میزان مصرف انرژی بین حالت اول (سیستم گرمایشی معمولی) و وضعیت سوم (سیستم هیبریدی) صرفه‌جویی ۱۹ درصدی در مصرف سوخت ایجاد گردیده است، علاوه بر آن شار حرارتی خروجی از سطح مدل نیز بسیار کمتر شده است. همچنین با تغییر در مقاومت دیواره‌ها در حالت چهارم نسبت

۱۲- مراجع

17. Hosieni Moghadam, A. and Keshavarz, A., "Numerical Analysis Of Convective Heat Transfer in Residential Room in order to Thermal Comfort Conditions", M. S Final Project, 2012, (in persian).
18. Kilic M., Sevilgen G., "Numerical analysis of Air Flow, Heat Transfer, Moisture Transport and Thermal Comfort in a Room Heated by Two-Panel Radiators", Energy And Buildings, Vol. 43, pp. 137-146, 2011.
1. Stolwijk, J. "A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man", Washington, DC, National Aeronautics and Space Administration, 1971.
2. Fanger P.O. "Thermal Comfort Analysis and Application in Environmental Engineering", McGraw-Hill, New York, 1970.
3. Olesen, B.W., Mortensen, E. and Thorshauge J. "Thermal Comfort in a Room Heated by Different Methods", Technical Paper, Los Angeles Meeting. ASHRAE Transactions, Vol. 86, No. 2256, 1980.
4. Hutter E. "Comparison of Different Heat Emitters in Respect of Thermal Comfort and Energy Consumption", In Proceeding of the Int. Center for Heat and Mass Transfer, Heat and Mass Transfer in Building Material and Structures, pp. 753-769, 1991.
5. Wyon D.P., Fanger P.O., Olesen B.W., and Pedersen C.J.K. "The Mental Performance of Subjects Clothed for Comfort at Two Different Air Temperatures", Ergonomics 18, pp. 358-374, 1975.
6. De Dear, R.J. and Bragger, G.S. "Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference", ASHRAE Trans. Vol. 104, pp.145-167, 1998.
7. ASHRAE Handbook-Fundamental, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Ch. 8, Atlanta 2001.
8. Zolfaghari, S.A. and Marefat, M. "New Scales Design of HVAC Systems in Buildings Based on Thermal Comfort", Second National Conference of Novel Building Technologies, December 2010, (in Persian).
9. Ergin, S. and Zkan, O. "Measurements and Numerical Modeling of Natural Convection in a Stairwell", PhD Thesis, Dept. of Mech. Eng., Brunel University, England, 1993.
10. Chen, Q. "Comfort and Energy Consumption Analysis in Buildings with Radiant Panels", Energy and Buildings, Vol. 14. pp. 287 - 297, 1990.
11. Prek, M. "Thermodynamic Analysis of Human Heat and Mass Transfer and their Impact on Thermal Comfort", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 48, pp. 731-739, 2005
12. HENSEN, J.L.M., "Literature Review on Thermal Comfort in Transient Conditions" Building and Environment, Vol. 25, No. 4, pp. 309-316, 1990.
13. Jeet, S.K., Chapman, S., and Keshavarz, A. "Window Performance for Human Thermal Comfort", 4765 ,RP -1126.
14. Kilic, M. and Sevilgen, G. "Modeling Airflow, Heat Transfer and Moisture Transport around A Standing Human Body by Computational Fluid Dynamics", Int. Comm. in Heat and Mass Transfer, Vol. 35, pp. 1159-1164, 2008.
15. White, F.M. "Viscous Fluid Flow", 2nd ed., McGraw Hill, New York, 2006
16. Murakum, S., Kato, S., and Nakagawa, H. "Numerical Prediction of Horizontal Non-Isothermal 3-D Jet in Room Base on K - E Model", ASHRAE transactions, Vol. 97, pp. 38-48, 1991.