



تأمین شرایط آسایش حرارتی خلبان داخل کابین یک بالگرد صحرائی

قنبر علی شیخزاده^{1*}، سروش صدری پور²، علیرضا آقایی³، محمدباقر شاهرزایی²، محمدرضا بابایی³

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

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

* کاشان، صندوق پستی 8731753153، sheikhz@kashanu.ac.ir

چکیده

در کار حاضر، میدان جریان جابه‌جایی اجباری آشفته و انتقال حرارت برای هوای داخل کابین یک بالگرد صحرائی مطالعه می‌شود. هدف اصلی کار حاضر، تأمین شرایط آسایش حرارتی خلبان یک بالگرد صحرائی داخل کابین در فصل تابستان (استفاده از سیستم سرمایش) است. به همین منظور، فضای اشغال شده توسط خلبان داخل کابین در نظر گرفته می‌شود. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم کنترل مبتنی بر الگوریتم سیمپل و مدل آشفتنگی $k-\varepsilon$ حل می‌شوند. تأثیر تغییر دما و سرعت هوای ورودی به کابین بر شرایط آسایش حرارتی خلبان ارائه می‌شوند و بهینه‌سازی برای کمترین مقدار شاخص درصد ناراضیاتی افراد انجام می‌شود. بر اساس نتایج، دما و سرعت هوای ورودی به کابین تأثیر قابل توجهی بر شاخص‌های آسایش حرارتی خلبان داخل کابین دارند. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت هوای ورودی به کابین، دما و سرعت هوا در ناحیه اشغال شده توسط خلبان به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. در نهایت شاخص‌های میانگین آراء و درصد ناراضیاتی افراد برای شرایط مختلف هوای ورودی محاسبه شدند و کمترین مقدار درصد ناراضیاتی افراد برای هوای ورودی با دمای 10°C و سرعت 0.4 m/s حاصل شد.

کلید واژگان: آسایش حرارتی، میانگین آراء افراد، انتقال حرارت، جابه‌جایی اجباری، جریان آشفته

Providing human thermal comfort conditions for pilot in a desert helicopter

Ghanbar Ali Sheikhzadeh*, Soroush Sadripour, Alireza Aghaei, Mohammad Bagher Shahrezaee, Mohammad Reza Babaei

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

* P.O.B. 8731753153, Kashan, Iran, sheikhz@kashanu.ac.ir

ABSTRACT

In this paper, forced turbulent convection flow and heat transfer of air inside a desert helicopter cabin was studied. The main goal was to provide human thermal comfort, by using cooling system, for a desert helicopter pilot in summer. A body subdomain was considered around the pilot that includes the pilot's using area in the cabin. The governing equations were numerically solved by the control volume approach based on the SIMPLE technique and standard $k-\varepsilon$ turbulent model. The effects of air supply parameters velocity and temperature on pilot's thermal comfort are presented and the optimization was carried out to find the best case with the minimum predicted percentage dissatisfied (PPD). It was found that temperature and velocity of supply air have a remarkable influence on thermal comfort characteristics. The air temperature and air velocity in pilot's body subdomain decreased and increased respectively, by increasing supply air velocity. Finally, the predicted mean vote (PMV) and PPD indexes were calculated for different supply air performances and the minimum PPD was obtained for the case with supply air temperature and velocity of $T_{in}=10^\circ\text{C}$ and $V_{in}=0.4\text{ m/s}$, respectively.

Keywords: Thermal comfort, Predicted mean vote, Heat transfer, Forced convection, Turbulent flow

افراد² (PPD) نسبت به شرایط گرمایی استفاده نمودند. ابرون [5] در یک مطالعه تجربی، مفهوم کلی آسایش حرارتی مسافران و ارتباط بین پارامترهای مختلف آن را بررسی نمود. ژئی و همکاران [6] مدل فیزیکی و ریاضی جریان هوا و انتقال حرارت داخل یک بالگرد را شبیه‌سازی نمودند. کاوفمن [7] در مطالعه تجربی خود، ملزومات سیستم تهویه مطبوع برای مسافران و وسایل حمل و نقل هوایی را پیش‌بینی نمود. در بررسی دیگری معرفت و مروت [8] به صورت عددی و با بررسی پارامترهای PMV و PPD به تحلیل آسایش حرارتی در فضای مجهز به ترکیب تهویه لایه‌ای و سرمایش تابشی سقفی پرداختند. فتنه‌اللهزاده و همکاران [9] به صورت عددی اثر دمای هوای ورودی را بر آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل برای اتاقی با سیستم تهویه

1- مقدمه

تأمین شرایط آسایش حرارتی در وسایل حمل و نقل هوایی بسیار مهم است و بر دقت و عملکرد خلبانها تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. پارامترهای مهم آسایش حرارتی انسان عبارتند از: دمای خشک هوا، دمای تشعشعی محیط، سرعت جریان هوا نسبت به بدن، رطوبت نسبی، نحوه پوشش و نوع فعالیت افراد [1-3]. برای انجام فرآیند خنک‌کاری، اولین انتخاب کاهش دمای محیط است. همچنین با ایجاد یک جریان ملایم هوا می‌توان دمای آسایش حرارتی را بالا برد. هو و همکاران [4] بهبود شرایط آسایش حرارتی داخل ساختمانها با استفاده از فن‌های سقفی را به صورت عددی مطالعه نمودند. آنها در مطالعه خود از شاخص‌های میانگین آراء افراد¹ (PMV) و درصد ناراضیاتی

² Predicted percentage dissatisfied

Please cite this article using:

Gh.A.Sheikhzadeh, S.Sadripour, A.Aghaei, M.B.Shahrezaee, M.R.Babaei, Providing human thermal comfort conditions for pilot in a desert helicopter, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 100-103, 2016 (in Persian)

¹ Predicted mean vote

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

$$Q_i = Q_{c(i)} - Q_{r-in(i)} - Q_{r-out(i)} \quad (3)$$

$$Q_{c(i)} = \left(\frac{T_i - T_{out}}{\frac{b_i}{k_i} + \frac{1}{h_{out(i)}}} \right) \cdot A \quad (4)$$

$$m_{inf} c_{p,air} (T_{air} - T_{in}) = \sum_{i=1}^N h_i A_i (T_i - T_{air}) \quad (5)$$

اولین جمله در سمت چپ رابطه (2) به انتقال حرارت جابه‌جایی بین سطوح داخلی جداره‌ها و هوای کابین مربوط است. جمله دوم نیز مربوط به حرارت تشعشی دریافتی از سایر سطوح است. در رابطه (3)، حرارت منتقل‌شده از سطح داخلی جداره‌ها به محیط بیرون از طریق مکانیزم‌های هدایت و جابه‌جایی و $Q_{r-in(i)}$ حرارت دریافتی سطح i از تشعشع خورشیدی ورودی از طریق پنجره‌ها به داخل می‌باشد. از طرفی $Q_{r-out(i)}$ حرارت تشعشی خورشیدی رسیده به سطوح خارجی دیواره‌ها است. نتایج جدول 1 و موازنه انرژی نشان می‌دهند که شار حرارتی روی سطح پنجره‌های بالگرد برابر 172 W/m^2 است. همچنین دمای سطح داخلی سقف، دیواره جلویی و کف بالگرد به ترتیب برابر 50°C ، 40°C و 30°C است.

در کار حاضر لباس نخ‌ی خلبانی تابستانه (1.5 clo) برای خلبان در نظر گرفته می‌شود [7]. نرخ تولید حرارت در شرایط کاری یک خلبان (با نرخ متابولیک 1.1 met برابر 37.4 W/m^2 است) [6].

جدول 1 ضریب انتقال حرارت کلی و ضریب صدور تشعشی جداره‌های بالگرد [12]
Table 1 Overall heat transfer coefficient of cabin materials [12]

emissivity (ϵ)	U ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)	جداره
0.25	1.341	دیواره‌های کابین
0.8	4.251	شیشه (پنجره)

3- شاخص‌های عمومی آسایش حرارتی

برای ارزیابی شرایط آسایش حرارتی انسان در محیط‌های بسته، از شاخص میانگین آراء افراد استفاده می‌شود. این شاخص با توجه به نرخ متابولیک بدن افراد، نحوه پوشش، سرعت جریان هوا، دما و رطوبت نسبی، عددی بین 3- تا 3 اختیار می‌کند که هر عدد گویای یک احساس گرمایی است: داغ=3، گرم=2، نسبتاً گرم=1، طبیعی=0، نسبتاً خنک=1-، خنک=2- و سرد=3- . محدوده مناسب شاخص PMV مقادیر بین 0.5- تا 0.5 است و با استفاده از روابط (6) تا (10) محاسبه می‌شود [14].

جابه‌جایی در تابستان را با استفاده از شاخص‌های PMV و PPD بررسی نمودند. ذوالفقاری و همکاران [10] نیز به‌صورت عددی یک سیستم تهویه مطبوع متمرکز را به‌منظور تأمین شرایط آسایش حرارتی هنگام خواب، تحلیل نمودند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در پژوهش‌های گذشته بیشتر شرایط آسایش حرارتی داخل ساختمان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است و وسایل نقلیه کمتر مورد توجه بوده‌اند. در کار حاضر تأثیر سرعت و دمای هوای ورودی به کابین یک بالگرد صحرایی بر میدان جریان و انتقال حرارت در فصل تابستان (سیستم سرمایش)، به‌منظور دستیابی به شرایط آسایش حرارتی خلبان بررسی می‌شود. بدین منظور، شاخص‌های PMV و PPD برای فضای اشغال‌شده توسط خلبان داخل کابین گزارش می‌شوند.

2- مدل فیزیکی و معادلات حاکم

نمای شماتیک یک بالگرد صحرایی تک‌نفره و شرایط مرزی آن، در "شکل 1" نشان داده شده است. ابعاد بالگرد شبیه‌سازی شده به این صورت است: $L1=120 \text{ cm}$ ، $L2=L6=50 \text{ cm}$ ، $L3=30 \text{ cm}$ ، $L4=14 \text{ cm}$ ، $L7=80 \text{ cm}$ ، $L8=L9=200 \text{ cm}$ ، $L10=100 \text{ cm}$. قطر دریچه‌های ورود و خروج هوا برابر $D=14 \text{ cm}$ است. دیواره پشت خلبان عایق کاری شده است و شرط مرزی روی شیشه‌ها و سایر دیواره‌های کابین به ترتیب شار حرارتی ثابت و دمای ثابت است. با توجه به مطالعه خراسانی‌زاده و همکاران [11]، متوسط سالیانه شار حرارتی خورشیدی روی سطح افقی و متوسط سالیانه ساعات آفتابی روز در کویر مرکزی ایران به ترتیب برابر $\bar{H}=19.61 \text{ W/m}^2 \cdot \text{day}$ و $t=8.925 \text{ hr}$ است. بنابراین طبق رابطه (1) متوسط شار حرارتی دریافتی به‌وسیله جداره‌های خارجی بالگرد برابر 597 W/m^2 است. جدول 1 ضریب انتقال حرارت کلی و ضریب صدور تشعشی جداره‌های بالگرد را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، خواص ترموفیزیکی هوا در دمای 23°C عبارتند از $k=2.5992 \cdot 10^{-2}$ ، $c_p=1006.923 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ، $\rho=1.1794 \text{ kg/m}^3$ ، $\beta=3.3767 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ و $\mu=1.82675 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ ، $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ [11].

$$Q = \frac{\bar{H}}{3600 t} \quad (1)$$

با استفاده از یک کد کامپیوتری دمای داخلی سطوح به‌عنوان شرط مرزی دما ثابت به‌دست می‌آیند. بدین منظور با انجام موازنه انرژی برای جداره‌های موجود در کابین، رابطه‌های (2) تا (4) حاصل می‌شوند [13].

$$h_i A_i (T_{air} - T_i) + \epsilon_i \sigma A_i \left(\sum_{k=1}^N F_{i-k} (T_k^4 - T_i^4) \right) = Q_i \quad (2)$$

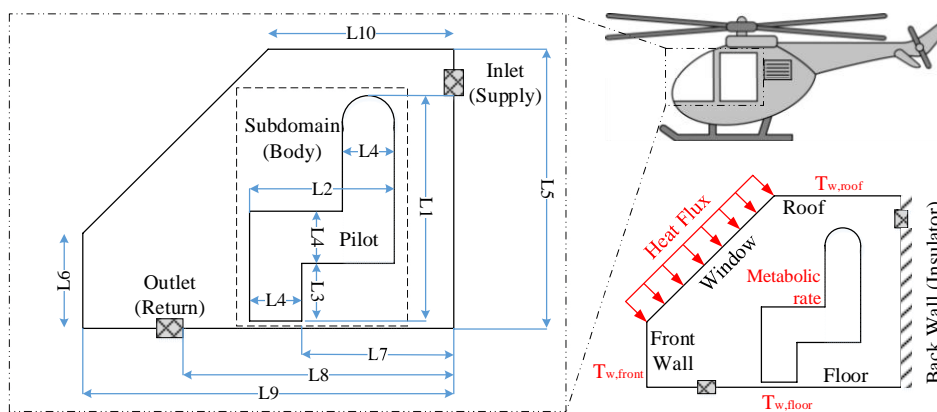


Fig. 1 Schematic diagram of a desert helicopter (physical geometry and boundary conditions).

شکل 1 نمای شماتیک مدل فیزیکی و شرایط مرزی یک بالگرد صحرایی

جدول 1 دما و سرعت متوسط در فضای اشغال شده توسط خلبان برای تعداد گره‌های مختلف در شرایط $V_{in}=0.3$ m/s و $T_{in}=0$ °C

Table 1 Average Temperature and velocity of body subdomain for different grid sizes with $T_{in}=0$ °C and $V_{in}=0.3$ m/s

Nodes	$T_{body,avg}$ (°C)	error(%) = $\left[\frac{T_{i+1} - T_i}{T_i}\right]$	$V_{body,avg}$ (m/s)	error(%) = $\left[\frac{V_{i+1} - V_i}{V_i}\right]$
3851	10.52	7.03	0.241	6.22
6718	9.78	2.04	0.256	1.17
11812	9.58	0.31	0.253	0.79
15732	9.55	-	0.251	-

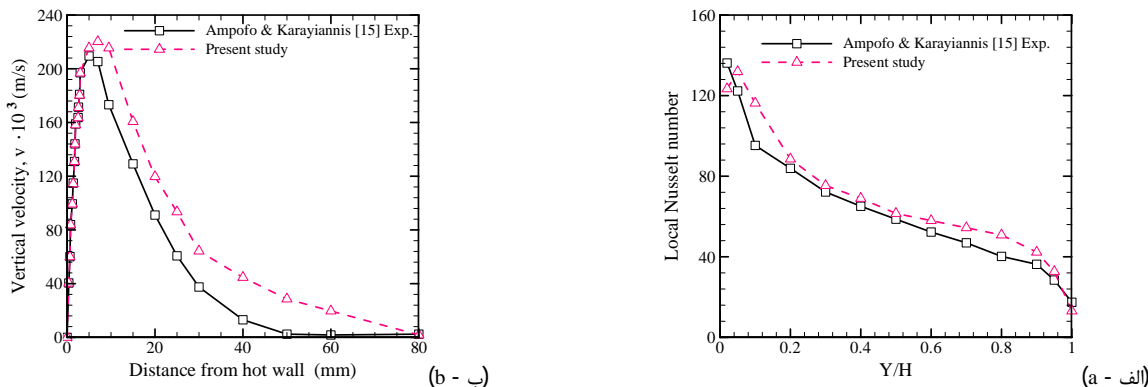


Fig. 2 Comparison of (a) hot wall local Nusselt number and (b) vertical velocity at mid-height, between results of present study and [15] reference.

شکل 2 مقایسه (الف) توزیع عدد ناسلت روی دیوار گرم و (ب) توزیع سرعت در ارتفاع میانی محفظه، بین نتایج کار حاضر و مطالعه [15]

با تعداد گره‌های متفاوت در نظر گرفته شد. بر این اساس و همچنین با توجه به جدول 2، شبکه‌بندی با تعداد گره‌های 11812، به‌عنوان مناسب‌ترین شبکه‌بندی از نظر دقت و زمان حل انتخاب شد.

برای اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری با رژیم آشفته، از نتایج تجربی آمپوفو و کاراینیس [15] در یک محفظه مربعی با دیواره‌های عمودی گرم و سرد استفاده شد. مطابق "شکل 2" انطباق خوب جواب‌ها بین نتایج کار حاضر و مرجع [15]، در مورد عدد ناسلت محلی روی دیواره گرم و سرعت عمودی هوا در ارتفاع میانی محفظه دیده می‌شود.

5- روش حل عددی

معادله‌های حاکم با استفاده از روش حجم محدود مبتنی بر الگوریتم سیمپل و مدل آشفتگی k-ε حل می‌شوند. برای انفصال جمله‌های پخش و جابه‌جایی از طرح تفاضل پسر دو مرتبه دوم استفاده می‌شود. معیار همگرایی خطاها برای تمام پارامترها در این مساله 10^{-6} است.

6- ارائه نتایج

مطالعات سازمان هواشناسی کشور نشان می‌دهند که رطوبت نسبی و دمای تشعشعی در کویر کاشان به ترتیب برابر 23% و 30°C است. با توجه به استفاده از هوای محیط برای سیستم تهویه مطبوع و عدم امکان رطوبت‌زنی در بالگرد مورد نظر به دلیل محدودیت‌های سیستم رادار، همین مقدار رطوبت نسبی برای فضای داخل کابین در نظر گرفته می‌شود.

"شکل 3" تأثیر دما و سرعت هوای ورودی به کابین را بر دما و سرعت هوا در فضای اشغال شده توسط خلبان نشان می‌دهد. همچنین مطابق مرجع [16]، محدوده مناسب سرعت جریان هوا برای تأمین آسایش حرارتی بین 0.15 تا 0.25 m/s قرار دارد. به این ترتیب مطابق "شکل 3" مشاهده می‌شود که در بین تمامی مدل‌های موجود، تقریباً اکثر مدل‌ها در محدوده مجاز سرعت قرار دارند؛ اما چون دمای آسایش به پارامترهای مختلفی بستگی دارد، برای انتخاب شرایط بهینه از شاخص‌های آسایش حرارتی استفاده می‌شود

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028] \cdot \{(M - W) - 3.96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273.15)^4 - (T_r + 273.15)^4] - f_{cl} \cdot h_c (T_{cl} - T_{air}) - 3.05[5.733 - 0.007(M - W) - 0.001p_w] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 0.0173M(5.867 - 0.001p_w) - 0.0014M(34 - T_{air})\} \quad (6)$$

$$T_{cl} = 35.7 - 0.0275(M - W) - R_{cl} \{3.96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273.15)^4 - (T_r + 273.15)^4] + f_{cl} \cdot h_c (T_{cl} - T_{air})\} \quad (7)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(T_{cl} - T_{air})^{0.25} & \text{for } 2.38(T_{cl} - T_{air})^{0.25} > 12.1 v^{0.5} \\ 12.1 v^{0.5} & \text{for } 2.38(T_{cl} - T_{air})^{0.25} \leq 12.1 v^{0.5} \end{cases} \quad (8)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 0.2I_{cl} & \text{for } I_{cl} \leq 0.5 \text{ clo} \\ 1.05 + 0.1I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0.5 \text{ clo} \end{cases} \quad (9)$$

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

شاخص درصد ناراضیاتی افرا نسبت به شرایط گرمایی، درصد افرادی را محاسبه می‌نماید که از لحاظ سرما یا گرما احساس آسایش ندارند. مقدار مناسب این شاخص مقادیر کمتر یا مساوی 15% است. این شاخص با استفاده از رابطه (11) محاسبه می‌شود [14]:

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2) \quad (11)$$

4- راستی آزمایی

به‌منظور بررسی استقلال نتایج از تعداد نقاط شبکه، چهار شبکه‌بندی مختلف

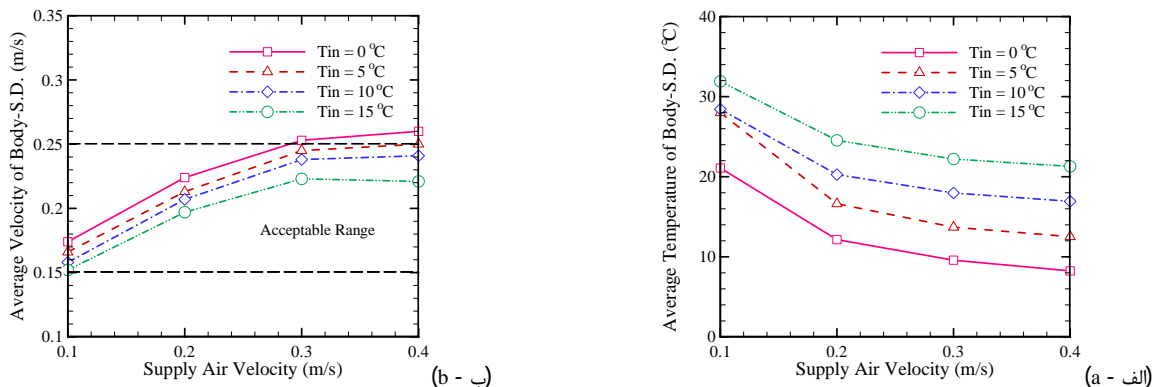


Fig. 3 Effect of different inlet temperature and velocity on (a) average temperature of body subdomain, and (b) average velocity of body subdomain.

شکل 3 تأثیر دما و سرعت هوای ورودی به کابین بر (الف) دمای متوسط و (ب) سرعت متوسط، در فضای اشغال شده توسط خلبان

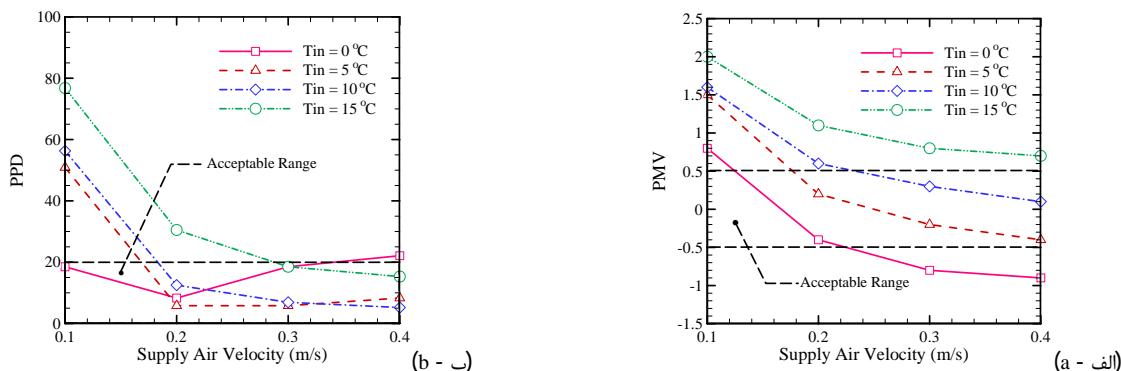


Fig. 4 Effect of different inlet temperature and velocity on human thermal comfort parameters (a) PMV, and (b) PPD, of body subdomain.

شکل 4 تأثیر دما و سرعت هوای ورودی به کابین بر شاخص‌های (الف) PMV و (ب) PPD، در فضای اشغال شده توسط خلبان

[7] J.W. Kaufman, Estimated ventilation requirements for personal air cooling systems, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Vol. 72, No. 9, pp. 842-847, 2001.

[8] M. Maerefat, N. Morovat, Analysis of thermal comfort in space equipped with stratum ventilation and radiant cooling ceiling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 11, pp. 41-54, 2014. (in Persian فارسی)

[9] M.H. Fatollahzadeh, Gh. Heidarinejad, H. Pasharshahi, Investigating the effect of supply air temperature on thermal comfort and indoor air quality for a displacement ventilated room in summer, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 35-44, 2014. (in Persian فارسی)

[10] A. Zolfaghari, A. Foadaddini, M. Hooshmand, Performance analysis of a task/ambient air conditioning system for providing the thermal comfort conditions during sleep, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 302-310, 2016. (in Persian فارسی)

[11] H. Khorasanizadeh, M. Meschi, Determination of the monthly, seasonal, semi-yearly and yearly optimum tilt angles of flat plate solar collectors in Kashan, *Journal of Energy Engineering Management*, Vol. 3, No. 4, pp. 38-49, 2014. (in Persian فارسی)

[12] J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3rd Edition, New York: Wiley, 2013.

[13] M. Moaref, S.A.R. Zolfaghari, A. Omidvar, Proper design of the facade and the outer shell of the building is an effective way to prevent the occurrence of condensation in the cooling system, radiant ceiling, *Iranian Journal of Energy*, Vol. 10, No. 26, pp. 3-18, 2006. (in Persian فارسی)

[14] ASHRAE Handbook Fundamentals, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Atlanta, 2005.

[15] F. Ampofo, T.G. Karayiannis, Experimental bench mark data for turbulent natural convection in an air filled square cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3551-3572, 2003.

[16] Sh. Heidari, Comparative analysis between air movement, air temperature and comfort case study: hot and dry region of Iran, *Journal of fine arts*, Vol. 17, No. 2, pp. 37-42, 2013.

(شکل 4). مطابق "شکل 4" از بین تمامی مدل‌ها، مدل با $T_{in}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ و $V_{in}=0.4\text{ m/s}$ به‌عنوان مدل بهینه با کمترین مقدار PPD معرفی می‌شود. همچنین این مدل در محدود مجاز سرعت نیز قرار دارد.

7- نتیجه‌گیری

در کار حاضر، یک مطالعه عددی برای تأمین آسایش حرارتی خلبان یک بالگرد تک‌نفره انجام شده است. بدین منظور میدان‌های جریان و انتقال حرارت با استفاده از روش حجم محدود مبتنی بر الگوریتم سیمپل و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ مطالعه شدند. براساس نتایج، دما و سرعت هوای ورودی به کابین تأثیر قابل توجهی بر آسایش حرارتی خلبان دارند و بدون رطوبت‌زنی نیز می‌توان برای خلبان بالگرد، شرایط آسایش حرارتی را فراهم نمود.

8- مراجع

[1] M. Prek, Thermodynamics analysis of human thermal comfort, *Energy*, Vol. 31, No. 5, pp. 732-743, 2006.

[2] P.O. Fanger, *Thermal comfort analysis and application environmental engineering*, McGraw Hill, New York, 1972.

[3] B. Cao, Y. Zhu, Q. Ouyang, X. Zhou, L. Huang, Field study of human thermal comfort and thermal adaptability during the summer and winter in Beijing, *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 1051-1056, 2011.

[4] S.H. Ho, L. Rosario, M.M. Rahman, Thermal comfort enhancement by using a ceiling fan, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 1648-1656, 2009.

[5] D.J. Osborne, Passenger comfort - An overview, *Applied Ergonomics*, Vol. 9, No. 3, pp. 131-136, 1978.

[6] Xie Yong-qi, YU Jian-zu, Gao Hong-xia, Simulation Study on Helicopter Nacelle Ventilation Cooling System, *Journal of Aerospace Power*, Vol. 2, 2006.