



## تأمین شرایط آسایش حرارتی خلبان داخل کابین یک بالگرد صحرا ای

قنبعلی شیخزاده<sup>۱\*</sup>، سروش صدری پور<sup>۲</sup>، علیرضا آقایی<sup>۳</sup>، محمدباقر شاهرضایی<sup>۲</sup>، محمدرضا بابایی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

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

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

\* کاشان، صندوق پستی ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳ sheikhz@kashanu.ac.ir

### چکیده

در کار حاضر، میدان جریان جایی اجرایی آشفته و انتقال حرارت برای هوای داخل کابین یک بالگرد صحرا ای 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 سیمبل و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  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 نارضایتی افراد انجام می‌شود. بر اساس نتایج، دما و سرعت هوای ورودی به کابین تأثیر قابل توجهی بر شاخص‌های آسایش حرارتی خلبان داخل کابین دارد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت هوای ورودی به کابین، دما و سرعت هوای در ناحیه اشغال شده توسط خلبان به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. در نهایت شاخص‌های میانگین آراء و درصد نارضایتی افراد برای شرایط مختلف هوای ورودی محاسبه شدن و کمترین مقدار درصد نارضایتی افراد برای هوای ورودی با دمای  $10^{\circ}\text{C}$  و سرعت  $0.4 \text{ m/s}$  حاصل شد.

کلیدواژگان: آسایش حرارتی، میانگین آراء افراد، انتقال حرارت، جایی اجرایی، 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  $k-\epsilon$  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

افراد<sup>۲</sup> (PPD) نسبت به شرایط گرمایی استفاده نمودند. ابرون [۵] در یک مطالعه تجربی، مفهوم کلی آسایش حرارتی مسافران و ارتباط بین پارامترهای مختلف آن را بررسی نمود. زی و همکاران [۶] مدل فیزیکی و ریاضی جریان هوای و انتقال حرارت داخل یک بالگرد را شبیه‌سازی نمودند. کاوفمن [۷] در مطالعه تجربی خود، ملزومات سیستم تهویه مطبوع برای مسافران وسایل حمل و نقل هوایی را پیش‌بینی نمود. در بررسی دیگری معرفت و مروت [۸] 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 برداختند. فتح‌الله‌زاده و همکاران [۹] به صورت عددی اثر دمای هوای ورودی را بر آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل برای اتفاقی با سیستم تهویه

### ۱- 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 هوای دمای تشعشعی محیط، سرعت جریان هوای نسبت به بدن، رطوبت نسبی، نحوه پوشش و نوع فعالیت افراد [۳]. برای انجام فرآیند خنک‌کاری، اولین انتخاب کاهش دمای محیط است. همچنین با ایجاد یک جریان ملایم هوای می‌توان دمای آسایش حرارتی را بالا برد. هو و همکاران [۴] 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 افراد<sup>۱</sup> (PMV) و درصد نارضایتی

<sup>2</sup> Predicted percentage dissatisfied

Please cite this article using:

Gh.A.Shekhpou, 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) (قارس)

<sup>1</sup> Predicted mean vote

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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

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

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

اولین جمله در سمت چپ رابطه (2) به انتقال حرارت جابه‌جایی بین سطوح داخلی جدارهای و هوای کابین مربوط است. جمله دوم نیز مربوط به حرارت تشعشعی دریافتی از سایر سطوح است. در رابطه (3)،  $Q_{c(i)}$  حرارت منتقل شده از سطح داخلی جدارهای به محیط بیرون از طریق مکانیزم‌های هدایت و جابه‌جایی و  $Q_{r-in(i)}$  حرارت دریافتی سطح i از تشعشع خورشیدی وروردی از طریق پنجره‌ها به داخل می‌باشد. از طرفی  $Q_{r-out(i)}$  حرارت تشعشعی خورشیدی رسیده به سطوح خارجی دیوارهای است. نتایج جدول 1 نمای شماتیک یک بالگرد صحرائی تکنفره و شرایط مرزی آن، در "شکل 1" نشان داده شده است. ابعاد بالگرد شبیه‌سازی شده به این صورت است:  $L7=80\text{ cm}$ ,  $L4=14\text{ cm}$ ,  $L3=30\text{ cm}$ ,  $L2=L6=50\text{ cm}$ ,  $L1=120\text{ cm}$ ,  $L10=100\text{ cm}$ ,  $L9=200\text{ cm}$ ,  $L5=L8=150\text{ cm}$  و  $D=14\text{ cm}$ . دیواره پشت خلبان عایق‌کاری شده است و شرط مرزی روی شیشه‌ها و سایر دیوارهای 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  $\bar{H}=19.61\text{ W/m}^2\text{-day}$  و  $t=8.925\text{ hr}$  است. بنابراین طبق رابطه (1) متوسط شار حرارتی دریافتی به وسیله جدارهای خارجی بالگرد برابر  $597\text{ W/m}^2$  است. جدول 1 ضریب انتقال حرارت کلی و ضریب صدور تشعشعی جدارهای بالگرد را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، خواص ترموفیزیکی هوا در دمای  $23^\circ\text{C}$  عبارتند از  $k=2.5992 \cdot 10^{-2}$ ,  $c_p=1006.923\text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $\rho=1.1794\text{ kg/m}^3$ ,  $\beta=3.3767 \cdot 10^{-3}$ ,  $\mu=1.82675 \cdot 10^{-5}\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ,  $\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$  [11].

جابه‌جایی در تابستان را با استفاده از شاخص‌های PMV و PPD بررسی نمودند. ذوالقاری و همکاران [10] نیز به صورت عددی یک سیستم تهویه مطبوع مرکز را به منظور 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 وسائل نقليه کمتر مورد توجه بوده‌اند. در کار حاضر تأثیر سرعت و دمای هوای ورودی به کابین یک بالگرد صحرائی بر میدان جریان و انتقال حرارت در فصل تابستان (سیستم سرمایش)، به منظور دست‌یابی به شرایط آسایش حرارتی خلبان بررسی می‌شود. بدین منظور، شاخص‌های PMV و PPD برای فضای اشغال شده توسط خلبان داخل کابین گزارش می‌شوند.

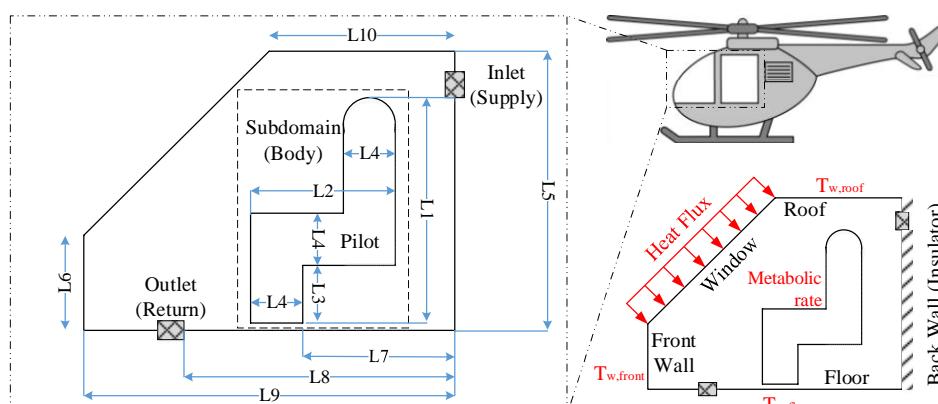
## 2- مدل فیزیکی و معادلات حاکم

"شکل 1" نشان داده شده است. ابعاد بالگرد شبیه‌سازی شده به این صورت است:  $L7=80\text{ cm}$ ,  $L4=14\text{ cm}$ ,  $L3=30\text{ cm}$ ,  $L2=L6=50\text{ cm}$ ,  $L1=120\text{ cm}$ ,  $L10=100\text{ cm}$ ,  $L9=200\text{ cm}$ ,  $L5=L8=150\text{ cm}$  و  $D=14\text{ cm}$ . دیواره پشت خلبان عایق‌کاری شده است و شرط مرزی روی شیشه‌ها و سایر دیوارهای 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  $\bar{H}=19.61\text{ W/m}^2\text{-day}$  و  $t=8.925\text{ hr}$  است. بنابراین طبق رابطه (1) متوسط شار حرارتی دریافتی به وسیله جدارهای خارجی بالگرد برابر  $597\text{ W/m}^2$  است. جدول 1 ضریب انتقال حرارت کلی و ضریب صدور تشعشعی جدارهای بالگرد را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، خواص ترموفیزیکی هوا در دمای  $23^\circ\text{C}$  عبارتند از  $k=2.5992 \cdot 10^{-2}$ ,  $c_p=1006.923\text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $\rho=1.1794\text{ kg/m}^3$ ,  $\beta=3.3767 \cdot 10^{-3}$ ,  $\mu=1.82675 \cdot 10^{-5}\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ,  $\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$  [11].

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

با استفاده از یک کامپیوتری دمای داخلی سطوح به عنوان شرط مرزی دما ثابت به دست می‌آیند. بدین منظور با انجام مراحلی از تراکمی این دمای موجود در کابین، رابطه‌های (2) تا (4) حاصل می‌شوند [13].

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



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

جدول ۱ دما و سرعت متوسط در فضای اشغال شده توسط خلبان برای تعداد گرههای مختلف در شرایط  $V_{in}=0.3 \text{ m/s}$  و  $T_{in}=0^\circ\text{C}$ Table 1 Average Temperature and velocity of body subdomain for different grid sizes with  $T_{in}=0^\circ\text{C}$  and  $V_{in}=0.3 \text{ m/s}$ 

Nodes	$T_{body,avg}$ ( $^\circ\text{C}$ )	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	-

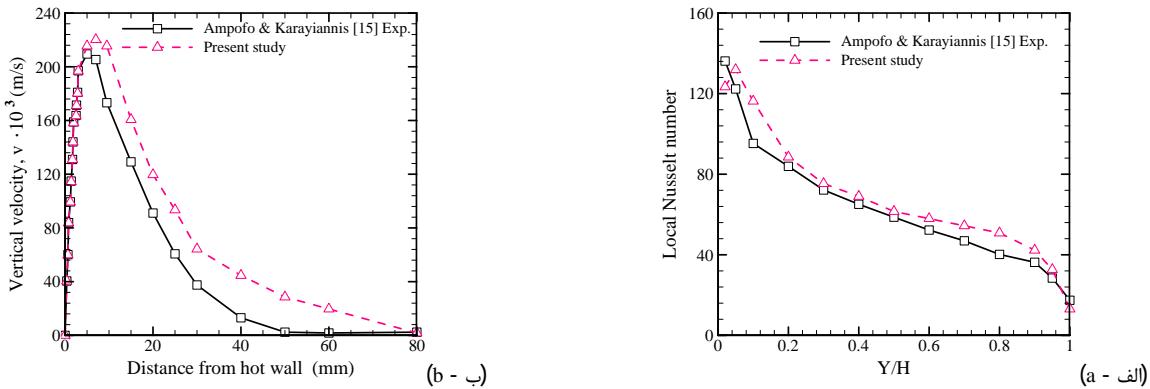


Fig. 2 Comparison of (a) hot wall local Nusselt number and (b) vertical velocity at mid-height, between results of present study and [15] reference.

شکل ۲ 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 مختلف در نظر گرفته شد. بر این اساس و همچنین با توجه به جدول ۲، شبکه‌بندی با تعداد گرههای 11812، به عنوان مناسب‌ترین شبکه‌بندی از نظر دقت و زمان حل انتخاب شد.

برای اعتبارسنجی برنامه کامپیوتی با رژیم آشفته، از نتایج تجربی آمبوفو و کاراینیس [15] در یک محفظه مربعی با دیوارهای عمودی گرم و سرد استفاده شد. مطابق "شکل ۲" 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 سیمیل k-ε حل می‌شوند. برای انفال جمله‌های پخش و جابه‌جایی از طرح تفاضل پرسو مرتبه دوم استفاده می‌شود. معیار همنگایی خطاهای برای تمام پارامترها در این مساله  $10^{-6}$  است.

## 6- ارائه نتایج

مطالعات سازمان هوافضای ایالات متحده آمریکا نشان می‌دهند که رطوبت نسبی و دمای تشبعی در کویر کاشان به ترتیب برابر 23% و  $30^\circ\text{C}$  است. با توجه به استفاده از هوای محیط برای سیستم تهویه مطبوع و عدم امکان رطوبت‌زنی در بالگرد مورد نظر بدليل محدودیت‌های سیستم رادار، همین مقدار رطوبت نسبی برای فضای داخل کابین در نظر گرفته می‌شود.

"شکل ۳" تأثیر دما و سرعت هوای ورودی به کابین را بر دما و سرعت هوای در فضای اشغال شده توسط خلبان نشان می‌دهد. همچنین مطابق مرجع [16]، محدوده مناسب سرعت جریان هوای برای تأمین آسایش حرارتی بین ۰.۱۵ تا  $0.25 \text{ m/s}$  قرار دارد. به این ترتیب مطابق "شکل ۳" 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.

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

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

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

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

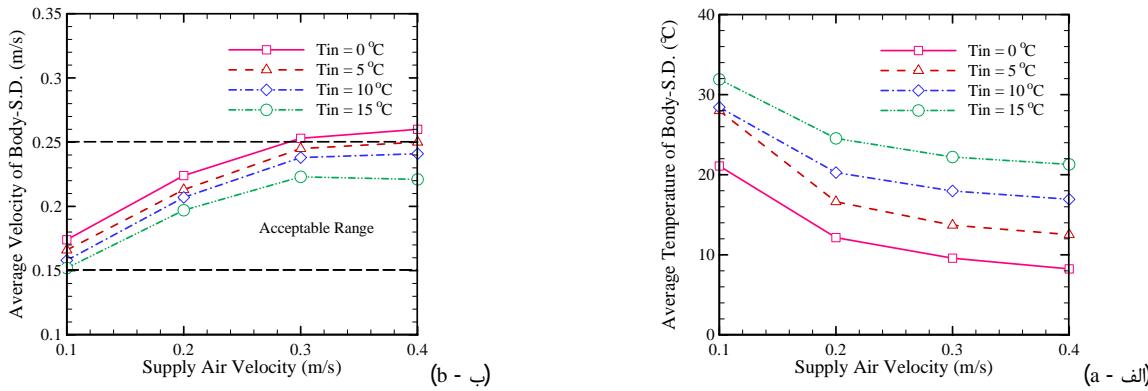
$$p_w = \frac{(101325 + p)w}{0.62198 + 0.37802 \cdot w} \quad (10)$$

شاخص درصد نارضایتی افرا نسبت به شرایط گرمایی، درصد افرادی را محاسبه می‌نماید که از لحظه 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:

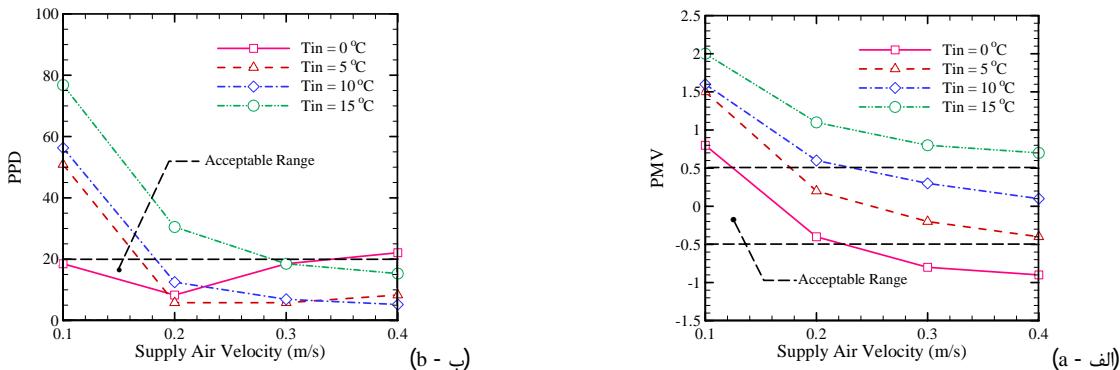
$$PPD = 100 - 95 \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2) \quad (11)$$

## 4- راستی آزمایی

به منظور بررسی استقلال نتایج از تعداد نقاط شبکه، چهار شبکه‌بندی مختلف



**شکل ۳** تأثیر دما و سرعت هوای ورودی به کابین بر (الف) دمای متوسط و (ب) سرعت متوسط، در فضای اشغال شده توسعه خلبان



**شکل ۴** تأثیر دما و سرعت هوای ورودی به کابین بر شاخص‌های (الف) PMV و (ب) PPD، در فضای اشغال شده توسعه 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)
- [9] M.H. Fatollahzadeh, Gh. Heidarnejad, H. Pasdarshahri, 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)
- [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)
- [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)
- [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)
- [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  $T_{in}=10$  oC و  $V_{in}=0.4$  m/s به عنوان 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 تامین 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 روابط زنی 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. Oborne, 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.