مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1395، دوره 16، شماره 13، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص 141-144

مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین‌المللی تهویه‌مطبوع و تاسیسات حرارتی و برودتی
بیرجند، دانشگاه بیرجند، 6 و 7 مهر 1395

مهندسی مکانیک مدرس
mme.modares.ac.ir

بررسی تأثیر تغییرات دما بر آسایش حرارتی افراد در یک اتاق عمل

سید علیرضا ذوالفقاری[1*]، حانیه بیجاری[2]، مژگان چاجی[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
* بیرجند، صندوق پستی 615/97175، zolfaghari@birjand.ac.ir

چکیده

پیش‌بینی احساس حرارتی افراد حاضر در اتاق عمل حین جراحی نقش به سزایی در بهبود کیفیت عمل جراحی دارد. در عمل‌های جراحی با بی‌حسی موضعی که بیمار دارای احساس حرارتی هست، بررسی آسایش حرارتی در ناحیه بالای تخت بیمار دارای اهمیت زیادی است. در این تحقیق حساسیت‌سنجی افراد حاضر در اتاق عمل از جمله بیمار نسبت به تغییرات دمای هوای ورودی بررسی شده است. بدین منظور شاخص احساس حرارتی افراد در سه ناحیه بحرانی، محدوده بالای تخت بیمار، سمت راست و سمت چپ تخت عمل که محل حضور گروه جراحی است در سه دمای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل‌سازی عددی معادلات حاکم بر جریان و انرژی در داخل فضای نمونه به کمک نرم‌افزار ایرپک 16.0.3 انجام شده، اتاق عمل مورد بررسی شامل لامپ جراحی، تجهیزات پزشکی، گروه شش نفره جراحی و بیمار می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که افزایش یک درجه‌ای دما باعث افزایش شاخص احساس حرارتی بیمار و گروه جراحی به ترتیب به‌اندازه 0.1868 و 0.1156 شده است بنابراین حساسیت بیمار نسبت به تغییر یک درجه‌ای دما بیشتر است گرچه بیمار در شرایط آسایش حرارتی مطلوب‌تری قرار دارد

کلید واژگان: حساسیت‌سنجی، اتاق عمل، تغییرات دما، آسایش حرارتی

The effect of temperature changes on the thermal comfort of people in an operating room

Alireza Zolfaghari*, Haneyhe Bijari, Mojgan Chaji

Department of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran
* P.O.B. 615/97175 Birjand, Iran, zolfaghari@Birjand.ac.ir

ABSTRACT

Thermal comfort prediction of patient and surgical team has an important effect on the quality of surgery. Evaluation of thermal comfort at the top of the operating table is an important issue especially when the patient has thermal sensation in surgery under local anesthesia. This study was conducted to explore the influence of the inlet air temperature of the operating room (OR) on the thermal comfort of surgical team and patient. This was performed by applying a numerical calculation to map the air flow and energy field. In this regard, the AIRPAK software was employed to perform the numerical simulation. The results were reported in tree critical area: above the patient, the left and right side of operating table. Results revealed that due to increment of inlet temperature, Predicted percentage of dissatisfied of surgical team and patient increased by 0.1156 and 0.1868, respectively. Therefore, thermal sensitivity of patient to temperature variation is much higher than operation staff.

Keywords: Sensitivity, Operating room, Temperature, Thermal comfort

1- مقدمه

بیمارستان‌ها و مراکز درمانی نیازمند تهویه مطبوع مناسب جهت از بین بردن ذرات و آلودگی‌های محیطی هستند، از این‌رو ارائه یک طرح مناسب با در نظر گرفتن تمامی شرایط برای سیستم تهویه و تعویض هوا تضمین کننده‌ی محیطی سالم همراه با دستیابی به آسایش حرارتی برای پرستاران، پزشکان و بیماران است.

اتاق عمل مکانی است که شرایط محیطی آن برای رسیدن به محیطی سالم و راحت برای مریض و گروه جراحی کنترل می‌شود [1] ذرات آلوده که به‌صورت معلق در هوا هستند گاهی در حین جراحی به‌صورت تماس مستقیم و یا رسوب ذرات معلق در هوا وارد زخم شده و باعث عفونت موضعی می‌شوند [2]، خطر عفونت ذرات آلوده معلق در هوا به‌طور مستقیم باکیفیت هوای اتاق و مخصوصاً تعداد ذرات موجود در مکان استریل شده‌ی محیط عمل رابطه دارد [4،3]. همچنین برای کاهش خطر عفونت موضع جراحی باید کیفیت عوامل محیطی مانند کیفیت هوا، آسایش حرارتی و دما کنترل شود [5]. در استانداردهای HVAC[1] باید شرایط آسایش حرارتی افراد هم تأمین شود بنابراین سیستم‌های تهویه مطبوع نه‌تنها برای جریان هوا در اتاق عمل بلکه برای آسایش حرارتی افراد حاضر هم تعریف شود [6،3] آسایش حرارتی به‌عنوان وضعیتی در ذهن است که بیانگر رضایت از محیط حرارتی تعریف‌شده است که توسط استاندارد بین‌المللی ایزو 7730 [7] بررسی می‌شود [9،8] این استاندارد بر پایه‌ی مدل آسایش حرارتی فنگر بیان‌شده که معیاری از رضایتمندی آسایش حرارتی افراد را پیش‌بینی می‌کند (PMV) [10]. این احساس تحت تأثیر عوامل محیطی مثل دمای هوا، متوسط دمای تابشی، سرعت نسبی هوا و رطوبت نسبی هوا و عوامل فردی مانند نوع فعالیت و پوشش افراد است [11،10].

به دلیل اهمیت سلامتی بیماران و کاهش خطر ابتلا به عفونت جراحی

[1] Heating and ventilation air conditioning

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:
Please cite this article using:
A.Zolfaghari, H.Bijari, M.Chaji, The effect of temperature changes on the thermal comfort of people in an operating room, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 141-144, 2016 (in Persian فارسی)

موضوع تهویه اتاق عمل مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در سال 2007، بلاراس و همکاران [1] به بررسی تجربی و اندازه‌گیری پارامترهای دما، رطوبت نسبی و نرخ تعویض هوای 20 اتاق عمل بیمارستان‌های مختلف و مقایسه‌ی نتایج با استانداردهای رایج بین‌المللی پرداختند، نتایج این تحقیق نشان داد که به علت کنترل ضعیف شرایط دمایی و قرارگیری نامناسب تجهیزات و تأثیر آن بر عملکرد سیستم تهویه این محیط‌ها حداقل میزان استانداردها را نیز کسب نمی‌کنند. در سال 2013، صدری زاده و همکاران [12] به بررسی تأثیر تعداد افراد حاضر در اتاق عمل بر رژیم جریان هوا و توزیع ذرات باکتری پرداختند که نتایج تحقیق نشان داد با افزایش شمار افراد در منطقه‌ی بحرانی نزدیک به میز جراحی پراکندگی ذرات باکتری افزایش‌یافته نرخ افزایش ذرات خطی نبوده و به مکان حضور افراد بستگی دارد و عمل‌های جراحی با ریسک عفونت بالا نباید با تعداد افراد بیش از 5 یا 6 نفر انجام شود. ون گاور و همکاران [13] در سال 2014 به بررسی استانداردهای مربوط به اتاق عمل (محدوده دما و سرعت مشخص) و مقایسه‌ی آن‌ها با استانداردهای آسایش حرارتی افراد پرداختند و نتایج تحقیق نشان داد که شرایط آسایش حرارتی هر یک از افراد گروه جراحی براساس نوع فعالیت و نوع پوشش متفاوت است. صدری زاده و همکاران [14] در سال 2014، به بررسی سیستم‌های تهویه متحرک جریان لایه‌ای هوا پرداختند و نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از این سیستم‌ها باعث کاهش غلظت و پراکندگی ذرات آلوده شده و ریسک عمل‌های با عفونت بالا را بسیار کاهش می‌دهد بهترین عملکرد این سیستم همراه با سیستم تهویه اصلی و با سرعت بهینه 0.4 متر بر ثانیه است. در سال 2014 صدری زاده و همکاران [15]، به بررسی تفاوت سیستم تهویه‌ی جریان هوای لایه‌ای افقی و عمودی بر میزان پخش و تجمع ذرات باکتری موجود در هوا پرداختند و نتایج تحقیق نشان داد که با توجه به مکان حضور افراد نسبت به تجهیزات اتاق عمل سیستم تهویه جریان هوای لایه‌ای افقی به‌عنوان سیستم تهویه ثانویه مناسب است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود تحقیقات بسیاری پیرامون عفونت‌های جراحی، تجمع و پراکندگی ذرات باکتری موجود در هوا، انواع سیستم تهویه و بررسی استانداردهای بین‌المللی تهویه‌ی اتاق عمل انجام شده است اما در تحقیقات پیشین اثر پارامترهایی از قبیل دما و سرعت هوای ورودی برآسایش حرارتی گروه جراحی و بیمار (در صورت اعمال بی‌حسی موضعی) در نظر گرفته نشده است در تحقیق حاضر سعی شده است ضمن مدل‌سازی اتاق عمل و تغییر دمای ورودی سیستم تهویه احساس حرارتی افراد حاضر در اتاق عمل مورد ارزیابی قرار بگیرد.

2- فضای نمونه

فضای مورد بررسی در تحقیق حاضر شامل یک اتاق عمل با طول، عرض و ارتفاع 8.5، 7.7 و 3.2 متر می‌باشد. هوای ورودی از طریق 24 دریچه تغذیه هوای متقارن موجود روی سقف اتاق تأمین می‌شود.

نرخ جریان حجمی هوای کلی برابر 2500 لیتر بر ثانیه می‌باشد. هوای خروجی از طریق 4 دریچه تعبیه شده روی دیوارهای دو طرف بیمار خارج می‌شود. طول، عرض و ارتفاع میز جراحی 2.1، 0.6 و 0.88 متر بوده و در مرکز اتاق قرار گرفته است. دو میز وسایل پزشکی با طول، عرض و ارتفاع‌های 0.5، 0.3 و 1.2 متر و 0.5، 0.3 و 1.5 متر در نظر گرفته شده‌اند. هر کدام از این میزها حرارتی معادل 255 وات بر مترمربع از تمامی سطوح‌شان منتشر می‌سازند. دو میز تجهیزات با طول، عرض و ارتفاع 0.5، 0.45 و 0.9 متر در دو طرف میز جراحی بافاصله 0.9 متری قرارگرفته‌اند.

یک لامپ جراحی به شکل استوانه بالای سر افراد مقابل تخت عمل و با قطر 0.52 و ارتفاع 0.13 متر ثابت شده است و حرارتی معادل با 320 وات بر مترمربع تولید می‌کند. هرکدام از افراد گروه جراحی دارای تولید حرارتی به اندازه 116 وات بر مترمربع هستند. همچنین فرد بیمار دارای متابولیک 0.6 می‌باشد. شش نفر گروه جراحی ایستاده و بدون حرکت در نظر گرفته شده، سه نفر در سمت راست تخت و سه نفر در سمت دیگر تخت قرار گرفته‌اند. "شکل 1" فضای کلی از نمونه مورد بررسی را نشان داده است که توسط نرم‌افزار ایرپیک مدل‌سازی شده است.

همچنین در این تحقیق دمای هوای ورودی از دریچه‌های موجود روی سقف در سه حالت مختلف 19، 20 و 21 درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفته است.

3- معادلات حاکم

برای پیش‌بینی پاسخ حرارتی بدن به شرایط محیطی نیاز به مدل آسایش حرارتی با صحت عملکرد و دقت کافی است. یکی از مدل‌های پرکاربرد و قابل اتکا در زمینه مدل‌سازی احساس حرارتی افراد، مدل آسایش حرارتی فنگر [10] است. این مدل در استانداردهای تأسیساتی ایزو 7730 و اشری 55 [9] و به‌عنوان مدل استاندارد آسایش حرارتی معرفی شده است. در مدل فنگر [10] معادله‌ی موازنه‌ی انرژی برای بدن انسان در شرایط پایا نوشته می‌شود و اختلاف میان تولید و اتلاف حرارت از بدن، به‌عنوان عامل تعیین کننده‌ی شرایط حرارتی بدن تعریف می‌شود:

$$L = (M - W) - (Q_k + Q_C + Q_r + Q_e - Q_{\text{res}}) \quad (1)$$

که M نرخ متابولیک، W کار انجام شده توسط شخص Q_e, Q_r, Q_C, Q_k به ترتیب اتلاف حرارت توسط سازوکارهای هدایت، جابجایی، تابش و تبخیر و Q_{res} اتلاف حرارت از طریق تنفس (همگی برحسب وات بر مترمربع) است. بر این اساس فنگر رابطه‌ی تجربی زیر را برای ارزیابی احساس حرارتی فرد پیشنهاد می‌کند:

$$\text{PMV} = [0.303\exp(-0.036M) + 0.028]L \quad (2)$$

شاخص PMV بیانگر احساس حرارتی افراد است و مقدار آن بین 3- و 3 متغیر است و هر عدد صحیح بین این دو مقدار معادل یک احساس معین حرارتی است، به‌طوری‌که 3 معادل احساس خیلی گرم، 2 معادل گرم، 1 معادل کمی گرم، 0 معادل خنثی، 1- معادل کمی سرد، 2- معادل سرد و 3- معادل خیلی سرد است [10]. همچنین استاندارد ایزو 7730 معرف محدوده $-0.5 \le \text{PMV} \le 0.5$ به‌عنوان محدوده‌ی مجاز آسایش حرارتی است. در این شرایط میانگین درصد نارضایتی حرارتی افراد نسبت به محیط از 10 درصد فراتر نخواهد رفت.

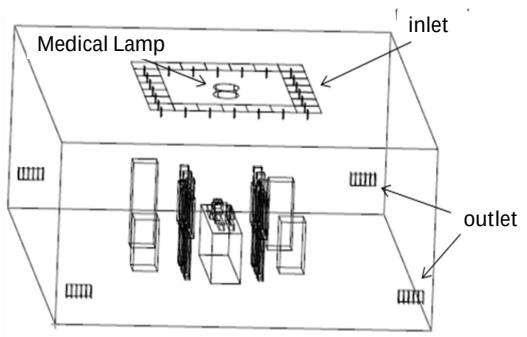

Fig. 1 Isometric view of operating room model

شکل 1 نمای ایزومتریک اتاق عمل مدل‌سازی شده

4- نتایج

در تحقیق حاضر حساسیت‌سنجی افراد حاضر در اتاق عمل از جمله بیمار نسبت به تغییرات دمای هوای ورودی بررسی شده است. محدوده دما 19 تا 24 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی در محدوده 50 تا 60 درصد برای اتاق‌های عمل در تابستان و زمستان مطابق استانداردها تعیین شده است.

در این مقاله دما در سه مقدار 19، 20 و 21 درجه سلسیوس متغیر بوده و کانتور شاخص احساس حرارتی افراد در ارتفاع 1.6 متر برای هر دما مطابق "شکل‌های 2 تا 4" ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دمای 19 درجه در مقایسه با دو دمای دیگر محدوده‌ی آسایش حرارتی مطلوب برای افرادی ایستاده و با فعالیت بدنی متوسط (نرخ متابولیک 2) گسترده‌تر می‌باشد.

نواحی مطلوب PMV برابر صفر دارد که در شکل رنگی سبز تیره و در شکل سیاه و سفید قسمت کمی تیره‌تر آن را نشان می‌دهد.

جدول 1 شاخص احساس حرارتی و دما در مناطق بحرانی که شامل محدوده حضور افراد گروه جراحی در سمت چپ و سمت راست تخت عمل و همچنین محدوده حضور بیمار بالای تخت عمل گزارش شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش یک درجه‌ای دمای هوای ورودی از 19 به 20 در ناحیه بالای تخت بیمار دما حدود 0.7 درجه افزایش یافته و همچنین شاخص احساس حرارتی بیمار 0.1912 افزایش می‌یابد این تغییرات از دمای 20 به 21 درجه موجب افزایش 0.65 درجه حرارت و 0.1824 شاخص احساس حرارتی بیمار شده است.

به‌دلیل نامتقارن بودن هندسه، افراد حاضر در سمت راست بیمار که نزدیک میز تجهیزات با ارتفاع بلندتری هستند با تغییر یک درجه‌ای دما شاخص احساس حرارتی آن‌ها افزایش بیشتری نسبت به افراد سمت چپ داشته است؛ بنابراین هر چه منابع تولید حرارت موجود در اتاق عمل نزدیک‌تر به افراد باشند حساسیت آسایش حرارتی آن‌ها نسبت به تغییرات دما بیشتر می‌شود.

میانگین تغییر شاخص احساس حرارتی برای بیمار به ازای تغییر یک درجه‌ای دما 0.1868 و برای گروه جراحی 0.1156 می‌باشد بنابراین حساسیت بیمار نسبت به تغییر یک درجه‌ای دما بیشتر است گرچه همان‌طور که در جدول 1 مشاهده می‌شود بیمار در شرایط آسایش حرارتی مطلوب‌تری قرار دارد.

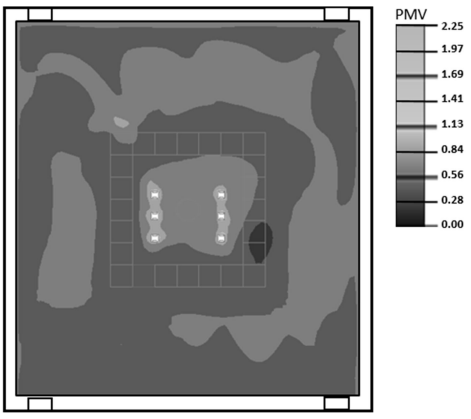

Fig. 2 The PMV contour at a height of 1.6 meters for people with inlet air temperature 19℃

شکل 2 کانتور شاخص ارزیابی احساس افراد در ارتفاع 1.6 متری دمای ورودی 19 درجه سلسیوس

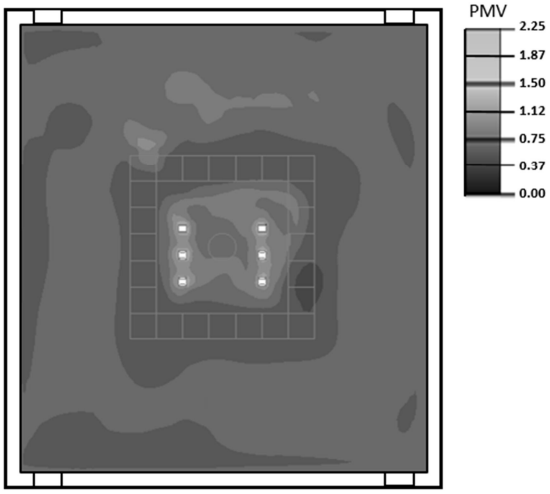

Fig. 3 The PMV contour at a height of 1.6 meters for people with inlet air temperature 20℃

شکل 3 کانتور شاخص ارزیابی احساس افراد در ارتفاع 1.6 متری دمای ورودی 20 درجه سلسیوس

جدول 1 شاخص احساس حرارتی و دما در مناطق بحرانی

Table 1 The temperature and PMV in critical area

منطقه بحرانی	دمای هوای ورودی	شاخص احساس حرارتی*	میانگین دما (درجه سلسیوس)
ناحیه بالای تخت عمل	19 درجه سلسیوس	-0.38387	21.25
	20 درجه سلسیوس	-0.19256	21.95
	21 درجه سلسیوس	-0.01016	22.60
ناحیه حضور افراد سمت چپ تخت عمل	19 درجه سلسیوس	1.08259	21.99
	20 درجه سلسیوس	1.19500	22.82
	21 درجه سلسیوس	1.31106	23.64
ناحیه حضور افراد سمت راست تخت عمل	19 درجه سلسیوس	1.11280	22.47
	20 درجه سلسیوس	1.22865	23.29
	21 درجه سلسیوس	1.34696	24.14

PMV (*)

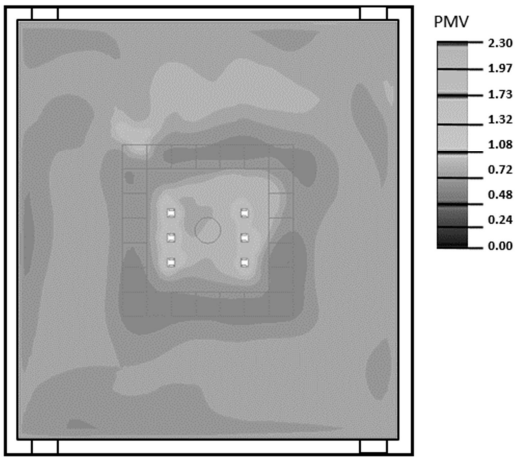

Fig. 4 The PMV contour at a height of 1.6 meters for people with inlet air temperature 21℃

شکل 4 کانتور شاخص ارزیابی احساس افراد در ارتفاع 1.6 متری دمای ورودی 21 درجه سلسیوس

"شکل 5" نمایانگر توزیع دما در صفحه‌ی عرضی می‌باشد، به علت بالا بودن نرخ تعویض هوای ساعتی دمای اکثر نقاط اتاق همان دمای هوای ورودی است (در این شکل رنگ بیمار و لامپ جراحی بیانگر دما نمی‌باشد). همان‌طور که می‌دانیم در اتاق عمل برای جمع‌آوری آلاینده‌ها از ناحیه‌ی حضور هوا می‌بایست بردارهای سرعت یک جهته و به سمت پایین باشد، که این مطلب در "شکل 6" که نمایی از بردارهای سرعت در صفحه‌ی عرضی اتاق است مشهود است.

5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در عمل‌های جراحی با بی‌حسی موضعی از جمله بعضی از عمل‌های ارتوپدی، جراحی‌های زنان و همچنین در موارد خاص برای بیماران قلبی، بیمار دارای احساس حرارتی بوده و توجه به آسایش حرارتی بیمار در این نوع جراحی‌ها بسیار مهم به نظر می‌رسد.

در تحقیق حاضر اثر تغییرات دما بر آسایش حرارتی گروه جراحی و بیمار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطابق جدول 1 نشان داد که افزایش یک درجه‌ای دما باعث افزایش شاخص احساس حرارتی بیمار و گروه جراحی به ترتیب به اندازه 0.1868 و 0.1156 شده است، بنابراین حساسیت بیمار نسبت به تغییر یک درجه‌ای دما گرچه همان‌طور که در جدول 1 مشاهده می‌شود بیمار در شرایط آسایش حرارتی مطلوب‌تری قرار دارد بیشتر است.

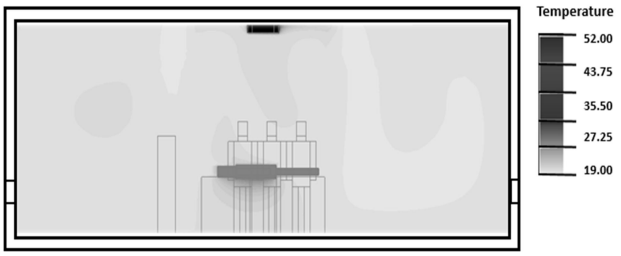

Fig. 5 The Temperature contour at a wide of 4.25 meter with inlet air temperature 20℃

شکل 5 کانتور دما در دمای ورودی 20 درجه سلسیوس و عرض 4.25

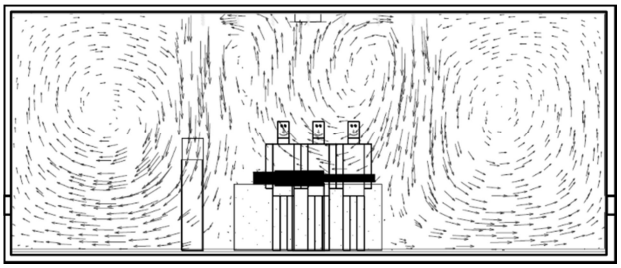

Fig. 6 The Velocity contour at a wide of 4.25 meters with inlet air temperature 20℃

شکل 6 بردارهای سرعت در دمای ورودی 20 درجه سلسیوس و عرض4.25

6- فهرست علایم

M	نرخ متابولیک (سوخت‌وساز بدن)، (w/m^2)
PMV	میانگین احساس حرارتی افراد (بی‌بعد)
Q_c	اتلاف حرارت توسط سازوکار جابجایی، (w/m^2)
Q_k	اتلاف حرارت توسط سازوکار هدایت (w/m^2)
Q_r	اتلاف حرارت توسط سازوکار تابش، (w/m^2)
Q_{res}	اتلاف حرارت از طریق تنفس، (w/m^2)
Q_s	اتلاف حرارت توسط سازوکار تابش، (w/m^2)
W	نرخ کار خارجی، (w/m^2)

7- مراجع

[1] C. A. Balaras, E. Dascalaki, A. Gaglia, HVAC and indoor thermal conditions in hospital operating rooms, *Energy and Buildings*, Vol. 39, No. 4, pp. 454-470, 4//, 2007.

[2] W. A. C. Zoon, M. G. M. van der Heijden, M. G. L. C. Loomans, J. L. M. Hensen, On the applicability of the laminar flow index when selecting surgical lighting, *Building and Environment*, Vol. 45, No. 9, pp. 1976-1983, 9//, 2010.

[3] T. Chow, Z. Lin, W. Bai, The integrated effect of medical lamp position and diffuser discharge velocity on ultra-clean ventilation performance in an operating theatre, *Indoor and built environment*, Vol. 15, No. 4, pp. 315-331, 2006.

[4] P. Ham, Handboek ziekenhuisventilatie, *Leiden: TNO Preventie en Gezondheid*, 2002.

[5] J. Verheyen, N. Theys, L. Allonsius, F. Descamps, Thermal comfort of patients: Objective and subjective measurements in patient rooms of a Belgian healthcare facility, *Building and Environment*, Vol. 46, No. 5, pp. 1195-1204, 2011.

[6] G. Walenkamp, Beheersplan luchtbehandeling voor de Operatieafdeling, *Werkgroep Infectiepreventie. Maastricht, the Netherlands*, 2005.

[7] P. Fanger, Moderate Thermal Environments Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, *ISO 7730*, 1984.

[8] L. Peeters, R. De Dear, J. Hensen, W. D'haeseleer, Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation, *Applied Energy*, Vol. 86, No. 5, pp. 772-780, 2009.

[9] A. Ashrae, Standard 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineering, Atlanta, GA*, 2004.

[10] P. O. Fanger, Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering, *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.*, 1970.

[11] M. A. Melhado, J. Hensen, M. Loomans, Literature review of staff thermal comfort and patient "thermal risks" in operating rooms, in *Proceeding of*, 11-14.

[12] S. Sadrizadeh, A. Tammelin, P. Ekolind, S. Holmberg, Influence of staff number and internal constellation on surgical site infection in an operating room, *Particuology*, Vol. 13, pp. 42-51, 2014.

[13] R. Van Gaever, V. A. Jacobs, M. Diltoer, L. Peeters, S. Vanlanduit, Thermal comfort of the surgical staff in the operating room, *Building and Environment*, Vol. 81, pp. 37-41, 2014.

[14] S. Sadrizadeh, S. Holmberg, Effect of a portable ultra-clean exponential airflow unit on the particle distribution in an operating room, *Particuology*, Vol. 18, pp. 170-178, 2015.

[15] S. Sadrizadeh, S. Holmberg, A. Tammelin, A numerical investigation of vertical and horizontal laminar airflow ventilation in an operating room, *Building and Environment*, Vol. 82, pp. 517-525, 2014.