

# بررسی فرایند جریان هوای داخل و مدل‌های تحلیلی آن در سوله‌های صنعتی کوچک با روش CFD

امید رهایی<sup>1</sup>

تاریخ دریافت: 93/03/09

تاریخ پذیرش: 93/08/25

**چکیده:** انباشت آلاینده‌های هوا در فضای داخلی اکثر سوله‌ها و عدم تخلیه مؤثر هوای آلوده از فضای داخلی کارگاه‌های صنعتی، مسئله‌ای اساسی برای سلامت کارکنان این کارگاه‌هاست. این درحالی است که استانداردهای متعددی وجود دارند که بر لزوم تهویه صنعتی مؤثر تأکید فراوان دارند. به هر حال ناکارایی سیستم‌های تهویه صنعتی عمومی در سوله‌های صنعتی کاملاً محسوس است و این درحالی است که محاسبات دقیقی از سوی مهندسين مکانیک برای پیش بینی مکنده‌های مؤثر تهویه در فضاهای صنعتی صورت می‌گیرد. این پژوهش به بررسی وضعیت جریان هوای داخل در ساختمان‌های صنعتی می‌پردازد و تلاش می‌کند تا از طریق شبیه سازی‌های عددی با روش دینامیک سیال محاسباتی علت اصلی ناکارایی سیستم‌های مکنده تهویه که عمدتاً سقفی هستند را بیابد. این شبیه سازی‌ها در یک سوله موردی صورت می‌گیرد که مورد بررسی و مشاهده دقیق قرار گرفته است. شبیه سازی‌ها در این پژوهش توسط برنامه‌های Gambit و Fluent انجام شدند: ابتدا روابی برنامه با انجام پروژه‌های مشابه و نیز تطبیق با نتایج تجربی به اثبات رسید. سپس با یک روش تحلیلی و با کمک برنامه Fluent به تجزیه و تحلیل داده‌ها اقدام شد. در خاتمه نیز به ارائه نتایج و تعمیم آنها بر جامعه آماری اقدام گردید. نتایج نشان دادند که جریان هوای داخل تحت تأثیر متغیرهای مستقل معماری به همراه موقعیت بازشوها، دمنده‌ها و مکنده‌ها قرار داشته و تغییرات در شرایط این متغیرها می‌تواند جریان هوای داخل را اصلاح و خروج آلاینده‌ها را امکان پذیر نماید.

**واژگان کلیدی:** سوله‌های صنعتی، تهویه صنعتی، جریان هوای داخل، مدل‌های تحلیلی.

<sup>1</sup> استادیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، پست الکترونیکی: O.Rahaei@srutu.edu

## 1- مقدمه

این پژوهش به بررسی وضعیت جریان هوای داخل ساختمان‌های صنعتی می‌پردازد و تلاش می‌کند تا از طریق شبیه‌سازی‌های عددی با روش دینامیک سیال محاسباتی علت اصلی ناکارایی سیستم‌های مکند تهویه که عمدتاً سقفی هستند را بیابد. این شبیه‌سازی‌ها در یک سوله موردی صورت می‌گیرد که مورد بررسی و مشاهده دقیق قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش توسط برنامه‌های *Fluent* و *Gambit* انجام شدند: ابتدا رویی برنامه با انجام پروژه‌های مشابه و نیز تطبیق با نتایج تجربی به اثبات رسید. سپس با یک روش تحلیلی و با کمک برنامه *Fluent* به تجزیه و تحلیل داده‌ها اقدام شد. در خاتمه نیز به ارائه نتایج و تعمیم آنها بر جامعه آماری اقدام گردید. نتایج نشان دادند که جریان هوای داخل تحت تأثیر متغیرهای مستقل معماری به همراه موقعیت بازشوها، دمنده‌ها و مکنده‌ها قرار داشته و تغییرات در شرایط این متغیرها می‌تواند جریان هوای داخل را اصلاح و خروج آلاینده‌ها را امکان پذیر نماید. فعالیت‌های صنعتی مختلف در صنایع منجر به تولید ذرات معلق، بخارات و گازهایی در محیط کار می‌شوند. ضامن تنش‌های گرمایی نیز می‌تواند سبب نا ایمن شدن محیط کار شود. به منظور حفظ حد تماس شغلی در حد استاندارد از روش‌های تهویه صنعتی استفاده می‌شود. اساس سیستم‌های تهویه به کار رفته در صنعت دو جنبه دارند: سیستم‌های مولد (دمنده) که هوای فراوری شده را تولید می‌کنند و سیستم‌های مکنده یا تخلیه که برای تخلیه آلاینده‌های تولید شده به منظور کنترل کیفیت هوای محیط کار در حد قابل قبول به کار می‌آیند.

یک برنامه کامل تهویه باید هر دو جنبه تولید و تخلیه هوا (هوادهی و هواکشی) را در نظر بگیرد. چنانچه حجم کل هوای تخلیه شده از یک محیط بیش از حجم هوای تزریق شده به آن باشد، کارگران با فشار هوایی کمتر از هوای بیرون مواجه خواهند شد. این شرایط معمولاً رخ می‌دهد، زیرا به هنگام نصب سیستم‌های مکنده به تأمین هوای جایگزین توجه نمی‌شود. در این شرایط هوا به طور کنترل نشده از روزنه‌ها، سوراخ‌ها،

حفره‌ها، درها و پنجره‌های باز وارد محیط کار خواهد شد که معمولاً مشکلات زیادی در پی خواهد داشت. مطالعات نشان می‌دهد در بیشتر موارد غلظت آلاینده‌های هوایی در فضای عمومی داخل کارگاه، بالاتر از حد تماس شغلی مجاز است و فرایند تهویه صنعتی به خوبی صورت نمی‌پذیرد (جعفری، م. ج.، 1387). در حالی که کلیه سیستم‌های تهویه صنعتی طبق محاسبات دقیق و بر اساس استانداردهای روز توسط مهندسان محاسبه می‌شوند و مورد استفاده قرار می‌گیرند. لازم به یادآوری است که تهویه صنعتی به دو روش عمومی (GEV)<sup>1</sup> و موضعی (LEV)<sup>2</sup> صورت می‌پذیرد. اساس روش LEV بر عملکرد هودهای مکنده موضعی استوار است. در حالی که وظیفه تخلیه و تعویض هوای آلوده محیط داخلی کارگاه به عهده سامانه‌های تهویه صنعتی عمومی است (جعفری، م. ج.، 1387: 3) که مدنظر این مقاله است.

مطالعات نشان می‌دهد که باز بودن، بازشوهای کارگاه‌ها نیز تأثیر چندانی در فرایند تهویه ندارد. یک فرایند تهویه مؤثر عمومی، به فرایندی اطلاق می‌شود که با برقراری یک جریان هوای دائمی و آرام، تمام هوای آلوده داخلی با هوای پاک دمیده شده، جایگزین شود و این فرایند دائمی باشد. علی‌رغم تلاش‌های فراوان، در معماری سوله‌های صنعتی این فرایند اتفاق نمی‌افتد و هوای آلوده همواره در محل‌های مرده، ساکن می‌ماند. این مقاله به بررسی علل این مسأله با روش CFD می‌پردازد و به دنبال تحلیل جریان هوای داخل در سوله‌های صنعتی با هدف یافتن نواحی انباشت آلاینده‌ها و دلایل این انباشت در فضای داخلی سوله‌هاست.

### 1-1- مروری بر ادبیات موضوع

در سه دهه گذشته مطالعات تجربی متعددی بر جریان جابه‌جایی طبیعی انجام شده است. جریان جابه‌جایی طبیعی و آشفته در محفظه اولین بار توسط الدر (Elder, J.W., 1965: 99-111) و پس از آن توسط اسماید و گیل (Giel, P. W., and Schmidt, F., 1986: 1459-64) بررسی گردید. در این آزمایش‌ها از آب به جای هوا استفاده شد. چیززایت



شکل 1- توزیع سرعت به دست آمده از آزمایش اولسن در اتاقک حاوی هوا (Olsen, D. A, Glicksman, L.R, and Ferm, H. M, 1990)

جریان جابه‌جایی طبیعی در داخل یک محفظه حاوی هوا را به صورت عددی شبیه‌سازی کرده‌اند. هنکز و همکارانش از مدل  $k-\epsilon$  استاندارد و چندین مدل  $k-\epsilon$  با عدد رینولدز پایین برای شبیه‌سازی جریان هوا در یک محفظه مربعی با دیوارهای گرم و عدد رایلی  $10^{14}$  استفاده کرده‌اند. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی حاکی از آن است که مدل‌های  $k-\epsilon$  رینولدز پایین جواب‌های دقیق‌تری نسبت به مدل  $k-\epsilon$  استاندارد برای انتقال حرارت از دیوارها ارائه می‌کنند. لنخارست و همکارانش از مدل  $k-\epsilon$  استاندارد به همراه توابع دیوار برای شبیه‌سازی جریان هوا در یک اتاق با یک رادیاتور استفاده کردند. آنها از توابع دیواره برای محاسبه  $\epsilon$  و  $k$  استفاده نمودند ولی برای محاسبه سرعت و دما از توابع دیواره استفاده نکردند. عدد رایلی محفظه در مطالعات آنها حدود  $3 \times 10^{10}$  بود. مدل آنها پیش‌بینی مطلوبی از جریان متوسط انجام داده بود و با نتایج آزمایشگاهی نیز همخوانی داشت، با این حال در مدل‌سازی توربولانس ضعیف بود. چن از مدل‌های مختلف تنش رینولدزی (RSM) برای محاسبه جابه‌جایی طبیعی اجباری و توأم اتاق استفاده نمود (Chen, Q., 1996). نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد که کارایی روش‌های مختلف RMS در شبیه‌سازی جریان هوای ساختمان یکسان است. نتایج مدل‌سازی چن با مقادیر متوسط جریان به دست آمده از اندازه‌گیری‌های تجربی همخوانی داشت ولی مقادیر آشفتگی به خوبی پیش‌بینی نشده بود.

هانجالیگ و همکارانش از مدل‌های سه معادله‌ای  $k-\epsilon-\bar{\theta}^2$  و چهار معادله  $k-\epsilon-\bar{\theta}^2-\epsilon_1-V_1$  و مدل LRN تصحیح شده، برای محاسبه جریان هوا در

(Cheesewright, R., 1968: 1-9) سرعت میانگین، دمای هسته و نوسانات آشفتگی را در یک محفظه حاوی هوا با اختلاف دما در دیوارها بررسی کرد. عدد رایلی جریان محفظه حدود  $10^{10}$  و نسبت ابعاد محفظه 5 به 1 بوده است. دافاآلا<sup>3</sup> و بتس<sup>4</sup> (Dafa Alla, A., 1996: 165-194) جریان جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه بلند با نسبت منظر 28 به 0/2 و عدد رایلی  $8/3 \times 10^{10}$  را به صورت تجربی بررسی کرده‌اند، در این آزمایش از سرعت سنجی لیزر برای اندازه‌گیری سرعت و نوسانات آن و نیز از ترموکوپل برای اندازه‌گیری دما و نوسانات آن استفاده شده است.

اولسن<sup>5</sup> (Olsen, D. A., Glicksman, L.R., and Ferm, H. M., 1990: 640-647) در یک اتاقک حاوی هوا و درون یک محفظه مدل کوچک، آزمایشی را بر جریان جابه‌جایی طبیعی هوا با عدد رایلی حدود  $10^{10}$  انجام داده است. ابعاد اتاق حدودا به نسبت 1 به 3 بود. در این آزمایش جریان و دمای اندازه‌گیری شده در هسته و لایه مرزی نمایش داده شد. دو حلقه جانبی در آزمایش مشاهده گردید (تصویر 1) که در نتایج گزارش شده وجود نداشت.

این یکی از معدود آزمایش‌هایی است که بر روی یک اتاق با ابعاد و شرایط تقریبا واقعی انجام شده است. از نتایج این آزمایش برای اعتبار بخشی به مدل‌سازی‌های محققین بعدی در تحقیقات مشابه استفاده شده است (عمیدپور، م.، 1388: 91). ناگانو و تاگاوا آزمایش اولسن را با استفاده از مدل صفر معادله‌ای و مدل  $k-\epsilon$  شبیه‌سازی نمودند و برای اعتبار بخشی به محاسبات از نتایج آزمایش اولسن استفاده نمودند (تصویر 1). نتایج محاسبات در هر دو مدل، مشابه بود (Nagano, Y., and Tagawa, 1990: 33-39).

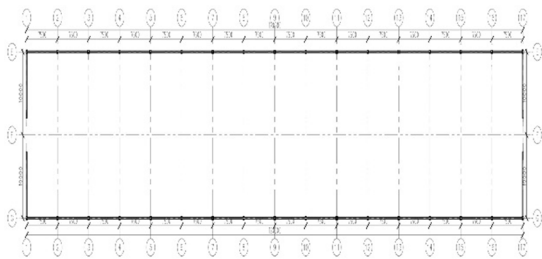
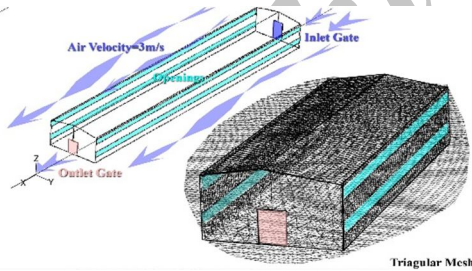
### 1-1- روش‌های عددی

تاکنون هنکز و همکارانش (Giel, P. W, and Schmidt, F. W., 1986: 1459-64)، لنخارست (Cheesewright, R., 1968: 1-9)، چن (Chen, Q., 1996: 233-244) و هانجالیگ (Markatos, N.C., 1996: 233-244) و هانجالیگ (and Pericleous, K.A., 1984: 755-772)

## 2- روش تحقیق

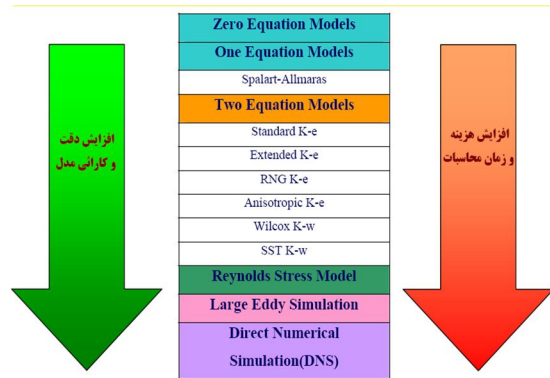
در این پژوهش، جریان هوای داخل در یک سوله صنعتی نمونه به منظور یافتن محل‌های انباشت آلاینده‌های هوا برد، تحلیل می‌گردد. اصلاح وضعیت معماری بر اساس نتایج این پژوهش می‌تواند موجب کاهش آلاینده‌ها و تخلیه مؤثرتر هوای آلوده از محیط کار شود. دو روش برای تحلیل جریان هوا در ساختمان وجود دارد: روش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی. روش‌های تجربی یا آزمایشگاهی قابل اطمینان‌ترند، ولی هزینه‌های فراوانی در پی خواهند داشت و وابسته به مکان و زمانند. (Loomans, M., and Mook, F., Van, 1995).

این درحالی است که در شبیه‌سازی‌های عددی می‌توان به راحتی با حل معادلات فیزیکی، جریان هوا را محاسبه نمود. شبیه‌سازی‌های عددی در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی بسیار ارزان‌تر، دقیق‌تر و سریع‌تر است. با این حال در این روش نمی‌توان تمامی شرایط فیزیکی را در نظر گرفت و همواره نیاز به یک سری تقریب وجود دارد. لذا ضرورت دارد تا شبیه‌سازی‌های عددی توسط نتایج آزمایشگاهی اعتبار بخشی شوند. سپس به عنوان یک ابزار در تحقیق مورد استفاده قرار گیرند (عمیدپور، م.، 1388).



شکل 2- پلان سوله نمونه (بالا) و سه بعدی سوله نمونه (پایین) به همراه شبکه (TET) ایجاد شده در پیش پردازشگر Gambit در سمت چپ (پایین) تصویر، مسیر باد و محل بازشوها به نمایش درآمده است.

ساختمان‌های مختلف خالی و پارتیشن بندی شده استفاده نمودند (Hanjalic, K., and Vasc, 1993). عدد رایلی در مطالعات آنها حدود  $10^{10}$  تا  $10^{12}$  بود که با عدد رایلی در فضاهای داخلی واقعی مطابقت دارد. نتایج دما و سرعت متوسط به دست آمده از مدل با مقادیر تجربی همخوانی مطلوبی داشت.



شکل 1- مرتب سازی مدل‌های مختلف بر اساس دقت و هزینه‌های محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان هوا. مدل  $k - \epsilon$  به عنوان 57 یک مدل بهینه با دقت بالا و سرعت مناسب در اکثر پروژه‌های مشابه انتخاب شده است (عمیدپور، م.، 1388)

جدول 1- مقایسه زمان محاسبه جریان هوای ساختمان توسط مدل‌های مختلف توربولانس

نام	تعداد شبکه	زمان محاسبات
روش صفر معادله ای	250	33 ثانیه
$k - \epsilon$	$10^4$	5 ساعت
روش RANS متغیر	$10^5$	6 ساعت
LES	$10^6$	100 ساعت
DNS	$10^{11}$	$10^5$ سال

(عمیدپور، م.، 1388)

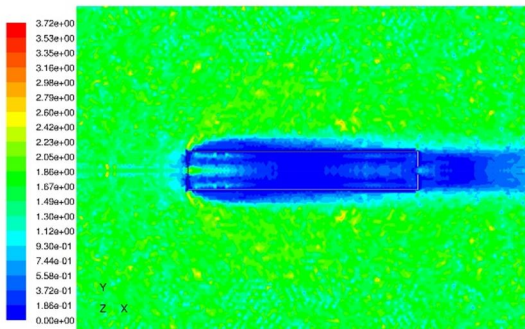
بر اساس مطالعات انجام شده بر روی شبیه‌سازی‌های عددی، هیچ مدل توربولانس مناسبی برای پیش بینی جریان هوا داخل ساختمان ارائه نشده است و نتایج به دست آمده، از مطالعات تجربی اولسن تاکنون به طور کامل و دقیق شبیه‌سازی نشده‌اند. در جدول 1 و تصویر 2 مقایسه‌ای بین مدل‌های مختلف توربولانس با توجه به معیارهای هزینه و زمان محاسبه ارائه شده است. بر مبنای این جدول، روش  $k - \epsilon$  برای مدل سازی توربولانس، روش مناسبی به نظر می‌رسد.

اولیه کاربر در CFD و نرم‌افزار Fluent جهت ارزیابی بازدهی سیستم تهویه در کارخانجات صنایع غذایی که تهویه اجباری دارند، در دستور کار قرار گرفت (Chanteloup, V. & Mirade, P.S., 2008).

در دهه اخیر تحقیقات مشابه بسیاری صورت پذیرفت که همگی با روش CFD و با کمک نرم‌افزار fluent مورد محاسبات عددی قرار گرفت (Lin, Z., Chow, T.T., Fong, K.F., Tsang, C.F., and Wang, Q., 2004) و (Lau, J., and Chen, Q., 2006) و (Jiang, Y., and Chen, Q., 2001) و (K., Borresen, B. A., and Hold, A.E., 2000) و (Naghman Khan, Su, Y., and Riffat, S. B., 2008).

## 2-2- معرفی نمونه موردی

جامعه آماری مورد بررسی در این پژوهش شامل سوله‌هایی است که جهت کارگاه‌های صنعتی مورد استفاده‌اند. در این پژوهش، انتخاب یک نمونه موردی به عنوان شرایط ثابت آزمایشگاهی مورد نیاز است. این سوله موردی در شهرک صنعتی کاوه، با ابعاد  $120 \times 20$  و به ارتفاع 8 متر به صورت سقف تیزه دار با الگوی 8 (فرم شکلی سقف‌های شیب‌دار که خط‌الراس آن در وسط است) ساخته شده است (تصویر 3).



شکل 3- انتورهای سرعت جریان هوا در شرایط آزمون (باد از چپ به راست با سرعت 3 m/s می‌وزد) در تراز +50 سانتی متری از سطح زمین

جهت انجام فرایند تهویه صنعتی عمومی، تعدادی جت فن که هوا را با سرعت 20 متر بر ثانیه به سمت خارج پرتاب می‌کند، در سقف کارگاه قرار داده شده است. مطابق تصویر 9، دریچه‌های بدون فن دیگری جهت

در این پژوهش، روش شبیه سازی عددی در نمونه موردی (یک سوله نمونه)، مورد استفاده واقع شد که با روش‌های تجربی اولسن (Olsen, D. A., Glicksman, L.R., and Ferm, H. M., 1990: 640-647) که در ادبیات موضوع آورده شده است، اعتبار بخشی شده است. تحلیل‌ها با کمک نرم‌افزار fluent انجام می‌گیرند و نتایج آن ثبت می‌گردند. روش مورد استفاده در محاسبات عددی، روش دینامیک سیال محاسباتی بود که در تحلیل‌ها و ثبت نتایج مورد استفاده است: از پیش پردازشگر Gambit به منظور مدل سازی شبکه استفاده گردید و نرم‌افزار Fluent نیز به منظور تحلیل شبکه‌ها مورد استفاده واقع شد.

## 1-2- یک مدل صفر معادله‌ای جدید برای شبیه‌سازی جریان جابه‌جایی داخل ساختمان

به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی یک مدل صفر معادله‌ای برای پیش بینی توزیع سرعت و دمای هوای داخل پیشنهاد می‌شود. در این مدل فرض می‌شود که ویسکوزیته گردابه‌ای تابعی از سرعت محلی و طول مقیاس است. این مدل می‌تواند بسیار سریع تر از سایر مدل‌ها، جریان جابه‌جایی آزاد، اجباری و توأم را در ساختمان محاسبه نماید.

هرچند که تحلیل‌های جریانات هوای داخل به منظور دستیابی به نقاط ضعف و قوت معماری در میان معماران عمومیت ندارند، با این حال در خصوص تحلیل رفتار سیال، تحقیقات فراوانی خصوصاً در دو دهه اخیر در سراسر جهان (چه با روش‌های تجربی و چه با شبیه سازی‌های عددی) انجام شده است. عمده شبیه سازی‌های عددی با روش CFD صورت می‌پذیرند (عمیدپور، م.، 1388: 91).

در سال 2006 پژوهشگران روش شبیه سازی دینامیک سیال محاسباتی (CFD) را جهت پیش بینی سرعت جریان هوا در یک سردخانه صنعتی انتخابی (ویژه گوشت) به کار بردند. در این تحقیق برای شبیه سازی از نرم‌افزار fluent استفاده گردید که با آزمایش‌های تجربی اعتبار بخشی شده است (Mirade, P.S. & Picgirard, L., 2006). در تحقیق دیگری، بررسی اجرای طرح هوای میانی (MAA)<sup>6</sup> با پیش‌فرض‌های

تخلیه هوای داخل در سقف پیش بینی شده‌اند که در زمان برقراری جریان باد در فضای داخل (در زمان خاموش بودن فن‌های تهویه سقفی و باز بودن درهای اصلی) مورد استفاده است. جریان باد غالب مطابق دیاگرام تصویر 3 نمایش داده شده است (اندازه‌گیری شده توسط محققین با کمک دستگاه سرعت سنج باد، آزمون تجربی).

### 3 - یافته‌های پژوهش

#### شبیه سازی سوله نمونه با روش CFD

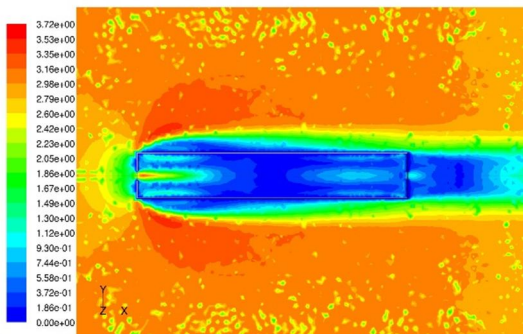
شبیه سازی‌های پژوهش حاضر، بر اساس روش اعتبار بخشی شده ناگانو (1990) که بر مبنای تحقیق تجربی اولسن (1990) معتبر شده بود، با استفاده از یک مدل صفر معادله ای و مدل  $k-\epsilon$  شبیه سازی گردید. عمیدپور (1388) نیز از روش مشابهی در تحقیقات خود استفاده نمود، با این تفاوت که از روش CFD و به کمک نرم افزار Gambit و Fluent اقدام به شبیه سازی و تحلیل گردید.

در این پژوهش نیز از روشی مشابه که بر مبنای مطالعات تجربی اولسن (1990) معتبر شده است، استفاده گردید. بر این اساس در این مرحله حجم سوله نمونه (تصویر 3) توسط پیش پردازشگر Gambit شبکه بندی (mesh) شد. از شبکه چهار وجهی (TET) جهت شبکه بندی حجم مورد نظر استفاده گردید. از آنجا که ابعاد سالن اصلی 120 در 20 است، فاصله گره‌های شبکه در هر یک از اضلاع در ابتدا 1 متر در نظر گرفته شد، با این حال نتیجه شبکه به دست آمده بسیار پیچیده شد و اصطلاحاً Skewness (چولگی) آن بسیار زیاد شد. پس از انجام محاسبات دقیق و چندین بار سعی و خطا، سرانجام فاصله 2 متر برای شبکه میانی و 0/5 متری برای نواحی مجاور دیوارها، سطح زمین و سقف در نظر گرفته شد. این اعداد حداقل Skewness را برای شبکه ایجاد می‌نمود.

نواحی مجاور دیوارها با احتساب توربولانس و نیز فاصله 2 متری گره‌های شبکه و ابعاد سالن، 1 متر در نظر گرفته شد. شبکه مورد نظر در نرم‌افزار Fluent خوانده شد و مطابق شرایط آزمون (اعتبار بخشی به شبیه

سازی‌ها)، در معرض وزش بادی که از سمت غرب به شرق با سرعت 3 متر بر ثانیه می‌وزد، قرار گرفت. جهت تحلیل وضع موجود، ابتدا کلیه درها و پنجره‌ها که با ابعاد واقعی شبیه سازی شده بودند، در وضعیت باز، و مکنده‌های سقفی در وضعیت خاموش فرض شدند. شبیه سازی‌های مذکور (توسط Fluent) به صورت کانتورهای سرعت باد در ترازهای ارتفاعی 50، +150 و 250+ سانتی متری از سطح زمین و نیز در برش‌های طولی سوله به ترتیب در تصاویر 4، 5، 6، 7 و 8 نشان داده شده‌اند.

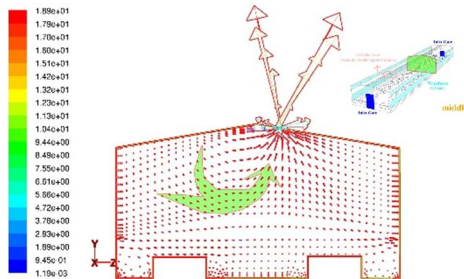
تصاویر 4 و 5 و 6 نشان می‌دهد که در تراز ناظر (درون سوله) نقاط بسیاری وجود دارند که در صورت وجود باد دائمی خارج، علی‌رغم باز بودن همه بازشوها هیچ گونه جریان هوایی در آنها برقرار نمی‌شود که این موجب انباشت آلاینده‌های هوا در درون کارگاه است. مقایسه تصاویر 7 و 8 نشان می‌دهد که فقط جریان ضعیف باد در مقابل درهای اصلی برقرار است که از آنجا که این سرعت قابل پیش بینی نیست، مشکلاتی در پی دارد. آلاینده‌ها از نیمه شرقی کارگاه به نیمه غربی آن می‌روند و در آنجا ساکن می‌شوند. خروجی‌های سقفی نیز تقریباً هیچ نقشی در تخلیه آلاینده‌ها ندارند.



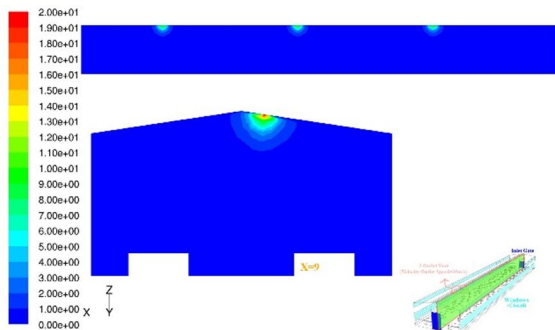
شکل 4- کانتورهای سرعت جریان هوا در شرایط آزمون (باد از چپ به راست با سرعت 3 m/s می‌وزد) در تراز +150 سانتی‌متری از سطح زمین

شبیه سازی‌ها در وضعیت روشن بودن جت فن‌های سقفی و باز بودن پنجره‌ها و بسته بودن درهای اصلی با شرایط مرزی و مفروضات قبلی تکرار شدند. در این مدل فقط پنجره‌های پایینی در دیوارهای جانبی باز هستند و بقیه درها و پنجره‌ها بسته‌اند.

آلاینده‌ها از فن‌های سقفی در فضای داخلی وجود ندارد و هوا به صورت بی‌برنامه از پنجره وارد شده و از بخش‌های فوقانی خارج می‌شود در حالی که در تراز ناظر هیچ حرکت مؤثری ندارد.



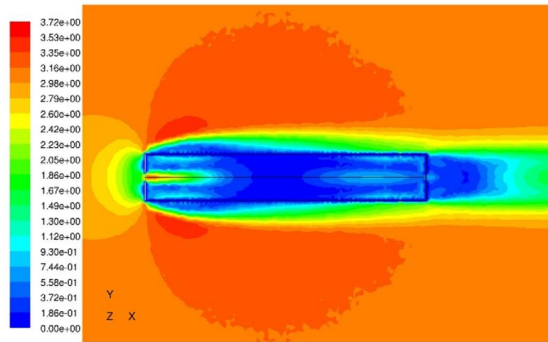
شکل 8- جریان هوای داخل در مقطع عرضی مدل کارگاه: جریان بسیار آرامی (در حد صفر) برقرار است



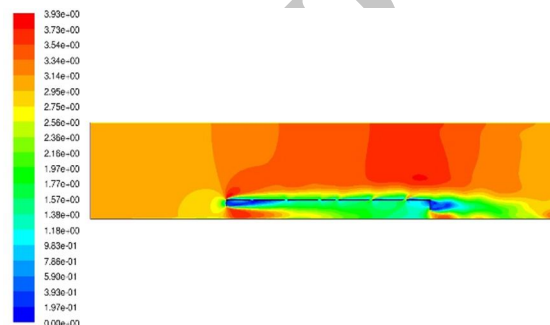
Contours of Velocity Magnitude (m/s) Jul 25, 2010 FLUENT 6.3 (3d, pbns, ske)

شکل 9- کانتورهای جریان هوای داخل برای مدل کارگاه زمان روشن بودن چت فن‌های سقفی: جریان هوای راکد در داخل کارگاه

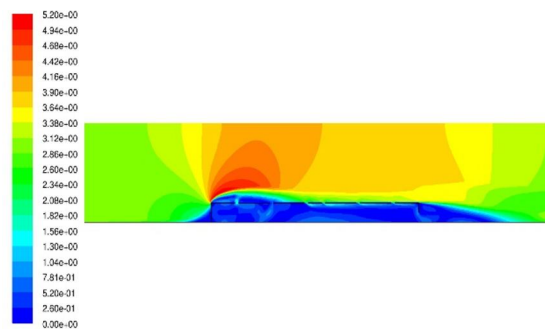
بر اساس داده‌های این بخش، شرایط جریان هوای داخل در هر دو حالت بحرانی است: در حالت اول کلیه بازشوها در شرایط باز فرض شدند و در صورت وزش باد دائمی مطلوب (بهترین شرایط تهویه طبیعی) در امتداد طولی سوله (مطابق تصاویر 4 تا 8) فقط در بخش محدودی از فضای داخلی جریان هوا برقرار است و در بسیاری از نقاط سوله، هوا راکد بوده که محل انباشت آلاینده‌های هوا برد است. تصاویر 7 و 8 نشان از آشفتگی جریان هوای داخل و پدید آمدن گردابه‌های بسته‌های هوایی دارند که همین امر موجب انتقال آلودگی از یک نقطه به سایر نقاط کارگاه است و جریانات برگشتی موجب انباشت آن در فضای داخلی و انتقال آن به تمام نقاط داخلی دارند.



شکل 5- کانتورهای سرعت جریان هوا در شرایط آزمون (باد از چپ به راست با سرعت 3 m/s می‌وزد) در تراز +250 سانتی متری از سطح زمین



شکل 6- کانتورهای سرعت جریان هوا در شرایط آزمون (باد از چپ به راست با سرعت 3 m/s می‌وزد) در برش طولی سوله که از محور F (پلان شکل 3: آکس اصلی گذرنده از وسط دروازه‌ها) می‌گذرد.



شکل 7- کانتورهای سرعت جریان هوا در شرایط آزمون (باد از چپ به راست با سرعت 3 m/s می‌وزد) در برش طولی سوله که از فاصله 3 متری محور F در شمال و جنوب (پلان شکل 3: طرفین دروازه‌ها) می‌گذرد.

همانند شرایط واقعی فقط سه هواکش سقفی با فن‌های روشن پیش بینی شد و باقی مانده‌ها پس از 1900 تکرار همگرا گشتند. لازم به یادآوری است که سرعت پرتاب هوا به خارج، از طریق هواکش‌ها 20 متر بر ثانیه فرض شد (تصاویر 9 و 10). شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که هیچ جریان هوای مؤثری به منظور تخلیه

در حالت دوم که بازشوها بسته فرض شدند و سیستم‌های سقفی تهویه صنعتی در حالت روشن قرار گرفتند، با باز بودن پنجره‌های جانبی جریان هوای داخل فقط در زیر سقف برقرار است. این امر بدین معنی است که مکنده‌های سقفی، جریان هوا را از پنجره‌های جانبی در مجاورت دیوارها به سمت بالا هدایت کرده و از زیر سقف به سمت مکنده‌ها می‌برند. بدین ترتیب هیچ جریان مؤثر هوایی در داخل کارگاه برقرار نشد و همان‌طور که در تصاویر 9 و 10 نشان داده شده است، هوا در فضای داخلی کارگاه کاملاً راکد بوده است و صرفاً انباشت آلاینده‌ها را در پی دارد.

#### 4 - نتیجه گیری

به منظور حفظ سلامت کارکنان در ساختمان‌های صنعتی، ضرورت دارد تا غلظت آلاینده‌های هوا از حد مجاز تجاوز ننماید. در این زمینه استانداردهای متعددی تهیه شده که هر ساله به روز می‌گردند. بر این اساس پیش بینی یک سامانه مناسب به منظور انجام فرایند تهویه صنعتی مؤثر مورد تأکید فراوان قرار گرفته است. تحقیقات نشان می‌دهند که علی‌رغم استانداردهای متعدد و قوانین صریح، فرایند تهویه صنعتی در کارخانجات به خوبی صورت نمی‌پذیرد و بازدهی لازم را ندارد.

از سویی نیز این مطلب دریافت می‌شود که پیش بینی جریان‌ات هوای داخل به منظور ایجاد شرایط آسایش برای کاربران فضاهای معماری و خصوصاً ساختمان‌های صنعتی اهمیت فراوان دارد. بر اساس مطالعات صورت گرفته می‌توان دریافت که جهت کنترل غلظت آلاینده‌ها در فضاهای صنعتی بسته، لازم است تا جریان‌ات هوای داخل تحت کنترل باشند. لذا پیش بینی مسیر جریان‌ات هوای داخل، فرایند تهویه صنعتی عمومی را تسهیل می‌نماید.

مطالعات این پژوهش نشان می‌دهد که عمده تحقیقات صورت گرفته برای بهینه نمودن سیستم‌های تهویه، در مورد اجزای مکانیکی آن بوده است و عمدتاً جنبه محاسباتی و تحلیلی داشته‌اند. با این حال معیاری برای پیش بینی جریان هوای داخل در فضاهای بسته

صنعتی بر اساس متغیرهای مستقل معماری پیشنهاد نشده است و معمولاً معماران به دلیل نداشتن دانش محاسباتی کافی از اظهار نظر در این زمینه خودداری نموده‌اند. به هر حال برای پیش بینی جریان هوای داخل به منظور بهینه سازی فرایند تهویه صنعتی تحت تأثیر عوامل معماری، تحلیل آن ناگزیر است.

شبیه سازی‌ها نشان دادند که جریان هوای داخل در هر دو حالت آزمون این پژوهش، بسیار آشفته و غیر قابل پیش بینی بوده و در تراز ناظر در فضای داخلی کارگاه‌های صنعتی انباشت آلاینده‌ها را در پی دارد. در شرایطی که از تهویه طبیعی و اثر باد خارج جهت فرایند تهویه صنعتی عمومی استفاده می‌شود، روشن یا خاموش بودن دستگاه‌ها عملاً تفاوتی ندارد. زیرا تخلیه هوای آلوده داخل به کمک جت فن‌های سقفی، غیر ممکن است و هوای جایگزین بدون برنامه بوده و همان باد خارج است که مستقیماً به زیر سقف می‌زند و از فن‌های سقفی خارج می‌شود.

در صورت خاموش بودن جت فن‌های سقفی نیز نتیجه تغییر نمی‌کند. زیرا جریان هوای خارج بدون برنامه وارد شده و از سوی فضای زیر سقف به سمت دیگر کارگاه هدایت می‌شود. بدین ترتیب بخش زیادی از هوای فضای داخلی سوله، همچنان راکد بوده و محل انباشت آلودگی‌های مختلف است. در شرایط روشن بودن فن‌های سقفی و بسته بودن درهای اصلی کارگاه باز مشاهده می‌گردد که جریان هوای داخل در زیر سقف برقرار است و تأثیری در تخلیه مؤثر آلاینده‌ها ندارد. بدین ترتیب ملاحظه می‌گردد که در هر دو حالت، تنها راه برای تخلیه مؤثر هوای آلوده از داخل کارگاه، مداخله در متغیرهای مستقل معماری سوله بوده، چنان‌که بتوانند جریان مؤثر هوا را در فضای داخل کارگاه برقرار نمایند.

پیشنهاد می‌گردد که نقاط تأمین هوای جایگزین در زیر کف کارگاه باشد، که در این صورت با بسته بودن پنجره‌های جانبی، جریان مؤثرتری برقرار خواهد شد که این خود زمینه‌ای برای تحقیقات آتی به حساب می‌آید.



4:1459-1464

Hanjalic, K., and Vasc (1993) "computation of turbulent natural convection in rectangular enclosure with algebraic flux model", *Int.J. Heat Mass Transfer*, no. 36: 3603-3624

Jiang, Y. and Chen, Q. (2001) "Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89 (2001): 1155-1178, 2001 Elsevier Science Ltd.

Lau, J., and Chen, Q. (2006) "Energy analysis for workshops with floor-supply displacement ventilation under the U.S. climates", *Energy and Buildings*, 38 (2006): 1212-1219, 2006 Elsevier B.V.

Lin, Z., Chow, T.T., Fong, K.F., Tsang, C.F., and Wang, Q. (2004) "Comparison of performances of displacement and mixing ventilations, Part II: indoor air quality", *International Journal of Refrigeration*, 28 (2005): 288-305, 2004 Elsevier Ltd and IIR.

Loomans, M. and mook, F. van (1995) Survey on measuring indoor airflows FAGO, report 95.25.W., Eindhoven University of technology Sweden.

Markatos, N.C. and Pericleous, K.A. (1984) "Laminar and turbulent natural convection in enclosed cavity", *Int. J. Heat mass transfer*, vol 27, no. 5: 755-772

Mirade, P.S. & Picgirard, L. (2006) "Improvement of ventilation homogeneity in an industrial batch-type carcass chiller by CFD investigation", *Food Research International*, 39 (2006): 871-881, 2006 Elsevier Ltd.

Nagano, Y., and Tagawa (1990) "An improved k-ε model for Boundary layer flows", *J. Fluid Engng Asme Trans*, 112: 33-39

Naghman Khan, Su, Y., and Riffat, S. B. (2008) "A review on wind driven ventilation techniques", *Energy and Buildings*, 40 (2008): 1586-1604, 2008 Elsevier B.V.

Olsen, D. A., Glicksman, L.R., and Ferm, H. M. (1990) "Steady state natural convection in a empty and partitioned enclosure at high Rayleigh numbers", *J. Heat Transfer, Trans. ASME* 112: 640-647.

## پی نوشت

<sup>1</sup> General Exhaust (dilution) Ventilation

<sup>2</sup> Local Exhaust Ventilation

<sup>3</sup> DafaAla

<sup>4</sup> Bets

<sup>5</sup> Olsen

<sup>6</sup> Middle Age of Air

## منابع

جعفری، م. ج. (1387) تهویه صنعتی. تهران: انتشارات فدک ایستاتیس

شجاعی فرد، م. و همکاران (1381) راهنمای نرم افزارهای Gambit و Fluent. تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت

عمیدپور، م. (1388) بررسی اثرات استفاده از بخاری‌های بدون دودکش بر روی کیفیت هوای داخل، پروژه تحقیقاتی، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک. کارفرما: شرکت بهینه سازی مصرف سوخت ایران.

Calay, R. K., Borresen, B. A. and Hold, A. E. (2000) "Selective ventilation in large enclosures", *Energy and Buildings*, 32 (2000): 281-289, 2000 Elsevier Science S.A.

Chanteloup, V. & Mirade, P.S. (2008) "Computational fluid dynamics (CFD) modelling of local mean age of air distribution in forced-ventilation food plants", *Journal of Food Engineering*, 90 (2009): 90-103, 2008 Elsevier Ltd.

Cheesewright, R. (1968) "turbulent natural convection from a vertical plane surface", *journal of heat transfer, Transaction of ASME*: 1-9

Chen, Q. (1996) "Prediction of room air motion by Reynols-Stress models", *Building and Environment*, no. 31: 233-244

Dafa Alla, A.A. and Bets, P.V. (1996) "Turbulent natural convection in a tall cavity", *Experimental heat transfer*, no. 9: 165-194

Elder, J.W. (1965) Turbulence free convection in a vertical slot, *J. Fluid Mech*, report 23: 99-111

Giel, p. w. and Schmidt, F. W. (1986) "all experiment study of high Rayleigh number natural convection". In: an enclosure proceeding of the 8<sup>th</sup> International heat transfer conference, vol