

تحلیل سه بعدی جریان هوا و توزیع آلودگی در فضای یک اتاق

سیامک محمدی وند
دانشجوی کارشناسی ارشد

احمدرضا عظیمیان
دانشیار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

جا به جایی و دفع بوهای نامطبوع و ذرات آلاینده معلق در هوای داخل يك اتاق یا سالن و یا کارگاه صنعتی برای طراحان تاسیساتی و تهویه از الویت ویژه ای برخوردار است و باید با صرف حداقل توان و انرژی لازم صورت گیرد. در روش های معمولی این عمل با استفاده از يك فن و درجه هایی که به طور تجربی محل آنها تعیین می شود انجام می گیرد. در صورتی که بتوان مسئله را به صورتی مدل کرد، به کمک آن می توان شرایط بهینه را مشخص نمود. برای این منظور، معادلات ناویر - استوکس سه بعدی و معادله انتقال جرم را به همراه معادلات لازم برای مدل کردن انتشارش یعنی معادلات k و ϵ را به کمک الگوریتم سیمپل حل کرده و تصویری از جریان و نحوه انتقال جرم را به دست می آوریم. نتایج حاصل بسیار مفید بوده و سیمای جامعی از میدان جریان را ارائه کرده که با نتایج عددی و تجربی موجود قابل مقایسه اند و در استفاده بهینه از فضاهای داخلی می توانند کمک شایانی بکنند.

3 - D Flow Analysis and Contamination Distribution in a Room

A.R. Azimian
Associate Professor

S. Mohammadvand
P. G. Student

Mechanical Engineering Department,
Isfahan University of Technology

Abstract

Removal of air pollutions and bad smells from indoor areas are of prime importance to air conditioning designers and should be done in a proper efficient way. In conventional ways this would be done by means of a fan whose position is found by trial and error. However, if one can model the flow, it would be possible to find the optimum conditions. In order to model the problem it is required to solve the Navier - Stokes equations parallel to mass transfer equation. Also the turbulence behaviour of the flow is modeled by solving the $k - \epsilon$ equations. By solving these equations it would be possible to predict the flow pattern and the distribution of the pollutions in a room. The predicted results were interesting and comparable to the published data and could be used in optimum use of the indoor areas.

نتایج چنین بررسی جامعی کمک شایانی در استفاده مطلوب و بهینه از فضای مورد نظر می‌کند. در این بررسی ابتدا برنامه برای یک هندسه ساده که نتایج عددی و تجربی آن در دسترس بود، اجرا شد و ضمن مقایسه نتایج با یکدیگر اطمینان لازم از صحت عملکرد برنامه به دست آمد. سپس برنامه برای بررسی چگونگی پخش و جا بجایی آلودگی ایجاد شده در هوای داخل یک اتاق مورد ارزیابی قرار گرفت و اثرات جا به جا کردن محل دریچه های ورودی و خروجی هوا و اندازه آن و همچنین محل وجود منبع آلودگی بررسی شد که نتایج آن در پی می‌آید. نکته لازم به تذکر این است که در این بررسی جرم مخصوص هوا ثابت در نظر گرفته شده و فرض شده است که آلودگی در غالب یک بوی نامطلوب است و باعث تغییری در جرم مخصوص هوا نمی‌شود.

معادلات حاکم

معادله های حاکم برای حل این جریان مغشوش، شامل معادله بقای جرم، معادله های ممنتوم در جهت های سه گانه و معادله انتقال جرم به صورت زیر است.

معادله پیوستگی: در حالت کلی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

معادلات ممنتوم: در حالت کلی به این صورت است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i U_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \tau_{ij} + X_i \quad (2)$$

τ_{ij} تانسور تنش بوده و با عبارت زیر مشخص می‌شود:

$$\tau_{ij} = -p \delta_{ij} + \mu (D_{ij} - \beta \theta) \quad \text{تانسور تنش}$$

$$D_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad \text{تانسور تغییر شکل}$$

$$\theta = \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \quad \text{دیورژانس سرعت}$$

$$\beta = \begin{cases} 1 & 2D \\ \frac{2}{3} & 3D \end{cases}$$

$$X_i = \rho g_i \quad \text{نیروی وزنی}$$

اطلاع از وضعیت جریان سیال و نحوه جا به جایی و انتشار ذرات در فضاهای بسته نظیر دفاتر کار، اتاق های محل زندگی، کارگاه ها و غیره از مسائلی است که مورد توجه طراحان سیستم های تهویه مطبوع است. برای کسب دانش لازم در این مورد باید به گونه ای اطلاعات نقطه به نقطه داخل فضا را در اختیار داشت که یکی از راه های آن اندازه گیری مستقیم است که بسیار دشوار و پرهزینه می باشد. راه دیگر، حل معادلات حرکت سیال و انتقال جرم در داخل این فضاهاست که به کمک روش های عددی، معادلات مربوطه را در فضای سه بعدی با استفاده از کامپیوتر حل می کنیم. محققان بسیاری در گذشته برای مدل کردن جریان سه بعدی با اهداف تهویه مطبوع بررسی هایی را انجام داده اند که برخی از آنها تجربی، پاره ای تحلیلی و تعدادی هم عددی هستند که در ادامه به بعضی از آنها اشاره می شود. کوربوشی^۱ و فنگ^۲ [۱] تحقیق جامعی را در مورد جریان های سه بعدی داخلی با استفاده از مدل های اغتشاش ارائه دادند و جریان های با هندسه های مختلف را برای شبیه سازی محل های مورد نیاز تهویه مطبوع بررسی کردند. نپ میلر^۳ و کیرک پاتریک^۴ به بررسی رفتار هوای سردی که به همراه آلودگی از سقف وارد اتاقی می شود پرداختند و رفتار هوای خنک کننده را با بارهای حرارتی متفاوت بررسی کردند که انتقال حرارت توسط گرم کردن یکی از دیوارها صورت گرفت. یعقوبی، نپ میلر و کیرک پاتریک [۳] و [۴] در دو مقاله مختلف به پیشگویی عددی انتقال آلودگی و کیفیت هوا در یک دفتر کار تهویه شده پرداختند. در بررسی آنها سرمایه ش توسط دو روش جا به جایی و جت هوای سرد بررسی شده است و بار حرارتی نیز از طریق یک دیوار گرم وارد می شود.

در بررسی حاضر با حل معادلات ناوبر - استوکس سه بعدی در حالت مغشوش به همراه معادله انتقال جرم همراه با در نظر گرفتن وجود منبع آلودگی در داخل یک فضای سه بعدی و در نظر گرفتن طبیعتی کاملاً سه بعدی برای جریان سیال به طوری که هرگونه جریان برگشتی نیز در آن قابل پیش بینی باشد، می توان تصویر کامل و جامعی از رفتار جریان هوای ورودی به یک اتاق، نحوه توزیع آن، مسیر جریان های غالب و نواحی تشکیل گردابه ها را نشان داد و نحوه توزیع آلودگی را با توجه به محل نصب دریچه های ورودی و خروجی به دست آورد.

معادله انرژی جنبشی اغتشاش:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t + \mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \tilde{d}_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (7)$$

که

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

معادله اتلاف انرژی اغتشاش ϵ :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t + \mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \mu_t \tilde{d}_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - c_{2\epsilon} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (9)$$

که ضرایب مربوطه در جدول زیر آمده اند.

(جدول ب)

c_μ	$c_{1\epsilon}$	$c_{2\epsilon}$	σ_k	σ_ϵ	σ_c
0.09	1.44	1.92	1.0	1.22	0.5

شبکه بندی

معادلات حاکم به صورت معادله های دیفرانسیل پاره ای هستند. برای حل عددی این معادلات باید از آنها انتگرالگیری کرده و به صورت جبری نمایش داد. برای این منظور باید قلمرو حل را به اجزاء کوچکتر تقسیم کرد. بنابراین ابتدا محدوده حل را شبکه بندی کرده و سپس از معادلات در این فضاها های کوچک انتگرال گیری می شود و در نهایت معادلات جبری به دست آمده از روش های موجود حل می شود. برای ایجاد یک شبکه مناسب محدوده حل با سلول های کوچکی پوشانده می شود، به نحوی که در کنار مرزها وجوه سلول ها منطبق بر مرز باشد. در ایجاد شبکه معمولاً در محل هایی که گرادیان کمیت ها زیاد است لازم است که فواصل میان گره ها کم باشد و به عبارت دیگر سلول های کوچکتری اختیار شوند تا اینکه تغییرات زیاد کمیت ها در حل معادلات به نحوی ظاهر شود که همگرایی حل دچار اشکال نشود. بنابراین شبکه بندی محدوده حل دارای فواصل نامساوی خواهد شد. روش ایجاد این شبکه در مرجع [5] آمده است.

معادله غلظت: معادله غلظت ماده A (رطوبت، بو یا آلودگی) با فرض خواص متغیر به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_A) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j C_A) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial x_j} \right) + R_A \quad (3)$$

C_A غلظت ماده A در سیال

R_A نرخ تولید غلظت A

D_{AB} ضریب دیفیوژن A در B

با تبدیل کمیت ها به صورت مجموع دو جزء متوسط و نوسانی وبا در نظر گرفتن جریان دائم، پس از متوسط گیری و ساده سازی، معادله ها به صورت زیر به دست می آیند.

پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0 \quad (4)$$

ممنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \tilde{d}_{ij}) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}) \quad (5)$$

معادله غلظت: با اعمال فرضیات مربوط به جریان مغشوش معادله زیر به دست می آید.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{C}_A) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_{AB} \frac{\partial \tilde{C}_A}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_c} \frac{\partial \tilde{C}_A}{\partial x_j} \right) + R_A \quad (6)$$

معادلات (4) الی (6) معادله های حاکم بر جریان سیال هستند که به علت تجزیه کمیت های متغیر به دو بخش متوسط و نوسانی و باتوجه به ساده سازی های مربوطه، معادلات ساده تر شده اند. به هر حال با اعمال اثرهای اغتشاش در معادلات، مجهول های اضافی ایجاد می شود، برای موازنه میان مجهول ها و معادلات، روابط دیگری باید معرفی گردد. این روابط را مدل های اغتشاش می نامند، که در حالت کلی مقادیر نوسانی را با استفاده از ثابت های تجربی به مقادیر متوسط مرتبط می کنند. در این بررسی از مدل دو معادله «انرژی جنبشی اغتشاش» و «نرخ اتلاف انرژی جنبشی» استفاده می کنیم که به صورت زیرند.

از آنجا که روش حل استفاده شده برای هر متغیر به شبکه خاصی نیاز دارد، لذا در کل محدوده حل از دو نوع شبکه بندی استفاده می شود که یکی شبکه بندی اصلی است که شامل متغیرهای فشار، انرژی اغتشاش، استهلاک انرژی اغتشاش، چگالی و غلظت می باشد و دیگری شبکه جا به جا شده است که فقط شامل سرعت در جهت های افقی، قائم و عمود بر صفحه کاغذ بوده و از جابجا کردن شبکه اصلی به اندازه نصف فاصله میان گره ها در جهت های غرب، جنوب و پایین تولید می شود. پس از اینکه معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری ساده تبدیل شدند، این معادلات که همه آنها به جز معادله غلظت به هم وابسته اند، باید از روش های تکراری حل شوند. بنابراین این از روش گوس - سایدل خط به خط که سرعت همگرایی آن زیاد است استفاده می شود. برای افزایش سرعت همگرایی قبل از محاسبه مجهولات در هر تکرار، ضریبی از مجهولات در معادلات حاکم قرار می گیرد و سپس معادلات حل می شود. در ضمن با تغییر این ضرایب می توان روند همگرایی معادلات مختلف را با هم یکسان کرد و نتیجه بهتری از حل گرفت.

شرایط مرزی

برای معرفی شکل و فیزیک مسئله، باید اطلاعات موجود در روی مرزها معلوم باشند تا از این اطلاعات به عنوان شناسنامه آن مرزها استفاده شود. این اطلاعات یا شرایط مرزی بسته به نوع مرزها متفاوت هستند. ورودی، خروجی و دیوارهای صلب، شرایط مرزی مختلف به کار رفته در این مسأله هستند. در ورودی کلیه اطلاعات و مشخصات سیال باید معلوم باشد، این اطلاعات شامل پروفیل سرعت، غلظت، انرژی اغتشاشی و خواص اولیه سیال می باشند. در این پژوهش پروفیل ورودی سرعت، یکنواخت فرض می شود ولی جهت آن می تواند متغیر باشد. برای غلظت در ورودی هم مقدار مشخصی انتخاب می شود. باتوجه به مغشوش بودن جریان سیال از نتایج تجربی کاتو^۵ از مرجع [۶] برای تخمین مقادیر ورودی ϵ, k استفاده می شود به گونه ای که:

$$k = 0.01 \sim 0.03 U_0^2, \quad L = 0.05 \sim 0.25 L_0, \quad \epsilon = C_D \frac{k^{3/2}}{L} \quad (10)$$

که در آن U_0 سرعت متوسط ورودی و L_0 طول

مشخصه ورودی و C_D ضریبی است که در ادامه در معادله ۱۵ از آن استفاده می شود. در مرز خروجی با فرض جریان توسعه یافته گرادیان کلیه متغیرها در جهت جریان صفر در نظر گرفته می شود، یعنی:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \eta} = 0 \quad (11)$$

که در آن ϕ هر متغیر مجهول و η جهت خروج جریان است.

از آنجا که اعمال شرط مرزی بر روی دیوار صلب برای هر معادله روشی متفاوت با معادلات دیگر دارد، بنابراین لازم است هر معادله به طور جداگانه بررسی شود.

شرط مرزی دیوار برای معادله ممنتوم: در روی دیوار صلب شرط عدم لغزش را به کار می بریم که در نتیجه تمام مؤلفه های سرعت صفر هستند. از طرفی در روی دیوار تمام شارها به جز، شار اندازه حرکت صفر است. شار اندازه حرکت در روی دیوار تنش برشی است. اگر تنش روی دیوار جزو اطلاعات ورودی باشد دیگر نیازی به بررسی سرعت در کنار دیوار نمی باشد. در غیر این صورت (اغلب حالات) باید سرعت در نقطه مجاور دیوار بررسی شود و معلوم شود که نقطه مزبور در زیر لایه آرام قرار دارد یا نه. اگر نقطه کنار دیوار در زیر لایه آرام باشد، برای تنش بررسی رابطه زیر برقرار است:

$$\tau_{wall} = - \mu_L \frac{u_p}{y_p} \quad (12)$$

در این رابطه "u" نماینده سرعت در جهتی است که قرار است شرط مرزی اعمال شود. زیرا تنش برشی در یک صفحه در دو راستای موازی با صفحه تولید می شود. اگر نقطه "p" در زیر لایه آرام نباشد، تنش برشی از روابط موجود برای جریان مغشوش به دست خواهد آمد.

$$\tau_{wall} = - \rho_p c_{\mu} \frac{1}{4} (|k_p|)^{1/2} \frac{u_p}{u_p^+} \quad (13)$$

که در معادله بالا u_p^+ سرعت بی بعد در خارج از زیر لایه آرام بوده و برابر است با:

$$u_p^+ = \frac{1}{\lambda} \text{Ln}(\eta y_p^+) \quad \text{و}$$

نتایج

برنامه را برای هندسه های مختلف اجرا کرده و نتایج آن را با کارهای تجربی و عددی تا حدی که اطلاعات مربوطه در دسترس بود مقایسه کردیم. اولین هندسه (شکل ۱) سلولی به ابعاد $(m) 0.3 \times 0.3 \times 0.3$ است که هندسه بارون نامیده می شود و نتایج تجربی و عددی آن در مرجع [۱] ارائه شده است. سلول مورد نظر توسط گردش آب آزمایش شده است. مؤلفه های عمودی و افقی سرعت توسط سرعت سنج لیزری دوبلر^۷ اندازه گیری شده است. بنابراین در این مقایسه اندکی خطا در نتایج مورد انتظار است زیرا در محاسبات پژوهش حاضر از نیروی غوطه وری هوا صرف نظر شده است. شکل ۱ درجه های ورودی و خروجی هوا به ابعاد $(m) 0.181 \times 0.095$ را در صفحه $z-y$ نشان می دهد. شکل های ۲ و ۳ آرایش دو بعدی بردارهای سرعت را که توسط مرجع [۱] با هندسه بارون محاسبه شده به ترتیب در صفحات $(x-y)$ ، $(z-y)$ نشان می دهد و شکل های ۴ و ۵ بردارهای سرعت محاسبه شده توسط این برنامه را در صفحات فوق نشان می دهد که تطابق کیفی خوبی را نشان می دهند که حاکی از عملکرد خوب برنامه است.

پس از مقایسه نتایج حاصل از اجرای برنامه با نتایج مرجع [۱] و کسب اطمینان از صحت عملکرد آن، برنامه برای دو هندسه دیگر اجرا شد. هندسه اول مشابه هندسه به کار رفته توسط یعقوبی و همکاران است و می توان نتایج را با یکدیگر مقایسه کرد. هندسه دوم به تأثیر تغییر موقعیت دریچه خروجی بر روی نحوه توزیع غلظت و جریان سیال می پردازد. هندسه اول اتاقی به ابعاد $(m) 1 \times 1 \times 1$ با دریچه های ورودی و خروجی به ابعاد $(m) 0.19 \times 0.19$ در صفحات $z-y$ است. دریچه های هوا درست مقابل هم هستند. هوا از دریچه ورودی با سرعت $3 (m/s)$ با مؤلفه های $(v=w=0)$ و $u=3$ و غلظت $(\frac{mol}{m^3}) 4 \times 10^{-4}$ وارد اتاق می شود. در وسط اتاق منبع آلودگی به قدرت $(\frac{mol}{m^3 \cdot s}) 5 \times 10^{-3}$ قرار دارد. عدد رینولدز جریان 27432 است و برنامه پس از 2000 تکرار به همگرایی لازم رسید که معیار همگرایی 10^{-4} است. نتایج میدان جریان و کانتورهای غلظت به صورت زیر است.

بردارهای سرعت

شکل های ۶ الف - ب - ج نمونه ای از بردارهای

$$y_p^+ = \rho \frac{1}{4} C_p (|k_p| \frac{1}{2}) \frac{y_p}{\mu_e} \quad (14)$$

که در آن $\eta = 9.7$ و $\lambda = 0.42$ هستند. معیار تفکیک زیر لایه آرام از مغشوش کمیت، y_p^+ می باشد. به طوری که اگر $y_p^+ > 11/63$ باشد، نقطه p در جریان اصلی مغشوش قرار دارد، در غیر این صورت p در زیر لایه آرام است.

شرط مرزی دیوار برای معادله انرژی اغتشاش (k) : از آنجا که مدل های ارائه شده جریان آشفته برای جریان نزدیک دیوار صادق نیستند، معادله k برای سلول مجاور دیوار با فرض اضافی شار k روی دیوار برابر صفر حل می شود و عبارت تولید در معادله k یعنی (G) ، براساس تنش بیان می شود.

شرط مرزی دیوار برای معادله ϵ : به جای آنکه معادله ϵ در سلول مجاور دیوار حل شود، مستقیماً ϵ در کنار دیوار محاسبه می شود، این کار توسط مشاهدات تجربی که روی تغییرات طول مشخصه در کنار دیوار انجام شده است صورت می گیرد. طول مشخصه براساس k و ϵ برابر است با:

$$L = c_D \frac{k^{\frac{1}{2}}}{\epsilon} \quad (15)$$

اگر تغییرات L معلوم باشد، با حل k در کنار دیوار، دیگر نیازی به حل ϵ در این محدوده نخواهد بود. بررسی های تجربی نشان داده اند که L در کنار دیوار متناسب با فاصله از دیوار تغییر می کند، با این نتیجه تجربی فرمول زیر برای ϵ_p در سلول مجاور دیوار ارائه شده است:

$$\epsilon_p = \frac{c \frac{3}{4} k_p^{\frac{3}{2}}}{\lambda \delta_p} \quad (16)$$

که δ_p می تواند بسته به موقعیت دیوار مقادیر x_p و y_p و z_p را اخذ کند.

شرط مرزی دیوار برای معادله غلظت: برای معادله انتقال، جرم دیوارها را غیر قابل نفوذ فرض کرده و گرادیان غلظت در جهت عمود بر دیوار، صفر در نظر گرفته می شود:

$$\frac{\partial c}{\partial \eta} \Big|_{\text{wall}} = 0 \quad (17)$$

سرعت را در موقعیت های مختلف z در صفحات $(x - y)$ نشان می دهد. شکل ۶ - الف با $z = 0 / 0.27 (m)$ بسیار نزدیک دیوار تحتانی است و اثر برخورد توده جریان ورودی به دیوار مقابل در سمت راست شکل نشان داده شده است. توده جریان ورودی پس از برخورد به دیوار شرقی به اطراف پخش می شود. شکل ۶ - ب بردارهای سرعت را در $z = 0 / 5 (m)$ نشان می دهد که چون این مقطع از دریچه های ورودی و خروجی عبور می کند، ورود و خروج جریان و دو گردابه تشکیل شده در دو قسمت بالا و پایین به خوبی دیده می شود. شکل ۶ - ج در $z = 0 / 9.73 (m)$ قرار دارد و وضعیت جریان تقریباً مشابه وضعیت شکل ۶ - الف است. به علت موقعیت دریچه ها و حالت تقارنی که وجود دارد الگوی جریان در صفحات $(x - z)$ بسیار شبیه الگوی جریان در صفحات $(x - y)$ است و شکل های ۷ - الف - ب - ج موضوع را به خوبی نشان می دهد. در صفحه $z - y$ الگوی کلی جریان بسته به موقعیت صفحات انتخاب شده از گوشه ها به وسط و یا از وسط به کناره ها است. شکل های ۸ - الف و ۸ - ب را ببینید. گفتنی است که بین الگوی جریان این هندسه و الگوی ارائه شده توسط یعقوبی و دیگران تطابق خوبی وجود دارد. بررسی کانتورهای غلظت که در شکل های ۹ - الف و ۹ - ب نشان داده شده است تمرکز آلودگی را حول محور مرکزی نشان می دهد که حکایت از خروج آلودگی از محور مرکزی جریان است. بدین ترتیب که باتوجه به منبع آلودگی که در سطح پایینی قرار دارد، بر اثر جریان مکشی قسمت مرکزی که ناشی از ورود و خروج جریان است آلودگی از قسمت منبع به سمت جریان مرکزی کشیده شده و به سمت خروجی هدایت می شود. تمرکز بسیار شدید کانتورهای غلظت در شکل ۹ - الف در صفحه $(z - y)$ و شکل ۹ - ب در صفحه $(x - y)$ این مسأله را به خوبی نشان می دهد، البته در کار یعقوبی و همکاران به یکی از سطوح، حرارت نیز داده می شود که در کار حاضر چنین نیست و بنابراین اندک تفاوت هایی دیده می شود.

حال تغییری در محل و اندازه دریچه های ورودی و خروجی و همچنین محل منبع آلودگی داده و به بررسی میدان جریان و غلظت می پردازیم. تغییرات انجام شده به این ترتیب است که محل دریچه خروجی که در هندسه قبلی در صفحه $(y - z)$ قرار داشت به صفحه $(x - y)$ منتقل می شود، یعنی در امتداد عمود بر ورودی قرار

می گیرد و در اندازه دریچه های ورودی و خروجی نیز اندکی تغییر داده می شود. محل منبع آلودگی نیز از وسط صفحه پایینی به گوشه منتقل شده است. هندسه مسأله و نتایج نمایش سه بعدی بردارهای سرعت در شکل های ۱۰ - الف و ب آمده است. نتایج کامل اجرای برنامه در شکل های ۱۱ تا ۱۶ نشان داده شده اند که در ادامه تشریح می شوند.

بردارهای سرعت

صفحه $x - z$: شکل های ۱۱ - الف و ۱۱ - ب به ترتیب به فاصله $y = 0 / 0.27$ و $y = 0 / 13$ از دیوار جنوبی واقع شده و چون در برگیرنده دریچه خروجی هستند، اثری از گردابه اصلی و بزرگ ایجاد شده در مقاطع بعدی در این صفحه نیست. البته این مسئله موجب از بین رفتن کامل گردابه نمی شود. زیرا در قسمت پایین نمودارها یعنی نزدیک به دیوار تحتانی گردابه ای وجود دارد. در شکل های ۱۱ - ج و ۱۱ - د با دور شدن از دریچه ورودی و خروجی و عدم وجود مانع، جریان دارای گردابه مرکزی بزرگی در کل صفحه است که جهت دوران جریان در این گردابه مطابق با جهت ورود جریان است. در شکل ۱۱ - ه که $y = 0 / 8.17 (m)$ می باشد، مقطع در وسط دریچه ورودی است و به خوبی مشهود است که جریان ورودی با برخورد به دیواره شرقی $(x = 1)$ به سمت دیوار فوقانی منحرف شده و در امتداد صفحه فوقانی حرکت می کند. به دلیل ورود جریان، مرکز گردابه همانطور که ملاحظه می شود در گوشه سمت چپ بالا واقع شده است. در شکل ۱۱ - و که در انتهای دریچه ورودی است، جدایی جریان در دیوار تحتانی به وجود می آید به نحوی که قسمتی از جریان با جریان ورودی همراه و به طرف آن منحرف شده و بقیه آن بر اثر مکش گردابه ای که در شکل ۱۱ - ه قرار دارد به سمت بالای شکل حرکت می کند. در شکل های ۱۲ کانتورهای غلظت در این صفحات نشان داده شده اند که بعداً راجع به آنها بحث خواهد شد.

صفحه $(x - y)$: شکل ۱۲ - الف، با $z = 0 / 0.27 (m)$ ، در ابتدای دریچه ورودی واقع شده است. همانطور که ملاحظه می شود جهت جریان ورودی به سمت دیوار شرقی است و پس از برخورد به آن قسمت اعظم جریان، به دلیل فضای بیشتر، به سمت پایین شکل (دیوار جنوبی) منحرف شده که همین برگشت جریان سبب تشکیل گردابه اصلی در این صفحه است. قسمت کوچکی

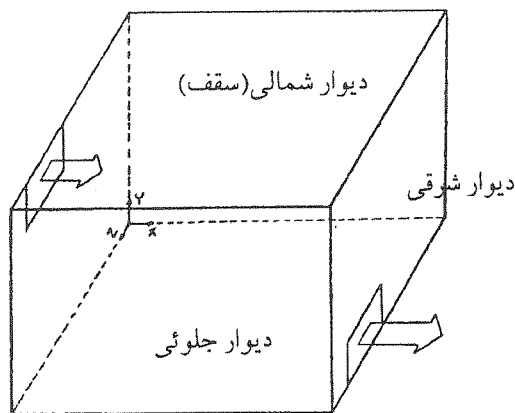
از جریان ورودی پس از برخورد با دیوار شرقی به سمت بالای شکل (دیوار شمالی) حرکت کرده و به دلیل فضای کم، گردابه کوچکی در گوشه بالای سمت راست تشکیل می‌شود. جدایی جریان روی دیواره غربی بر اثر مکش ورودی است. شکل ۱۳ - ب هنوز در محدوده دریچه ورودی قرار دارد و همان رژیم جریان در شکل ۱۳ - الف را دارد. با این تفاوت که مرکز گردابه اصلی در این شکل در گوشه پایین سمت راست تشکیل شده است، به نحوی که جدایی جریان در گوشه سمت چپ پایین به علت مکش ورودی و مکش این گردابه تغییر موقعیت داده است. شکل ۱۳ - ج با $z = 0/323$ (m) از دریچه ورودی عبور کرده و گردابه بزرگ اصلی کامل شده است، ولی گوشه بالای سمت راست هنوز تحت تأثیر گردابه تشکیل شده در دو شکل ۱۳ - الف و ۱۳ - ب قرار دارد. شکل ۱۳ - د دارای جریانی با آرایش شبیه شکل ۱۳ - ج است. در شکل‌های ۱۳ - ه و ۱۳ - و با نزدیک شدن به دریچه خروجی رژیم جریان عوض می‌شود و گردابه اصلی به گوشه بالای سمت چپ منتقل شده و قسمت عمده‌ای از جریان به سمت خروجی متمایل می‌شود. این تغییر رژیم در شکل ۱۳ - و بارز بوده و گردابه اصلی را از بین می‌برد و تقریباً تمام جریان برای خروج به گوشه پایین سمت چپ شکل هجوم می‌آورد. شکل‌های ۱۴ کانتورهای غلظت را در این صفحات نشان می‌دهند که در ادامه راجع به آنها بحث می‌شود. صفحه $z-y$: شکل ۱۵ - الف نزدیک هر دو دریچه ورودی و خروجی است. در گوشه بالای سمت چپ، جریان در جهت عمود بر صفحه به سمت بیرون رانده شده و باعث مکش جریان به سمت خود می‌شود. از طرفی دریچه خروجی در گوشه پایین سمت راست شکل بخشی از جریان را برای خروج به طرف خود جذب می‌کند. گردابه واقع در گوشه بالای سمت راست به دلیل این مکش به وجود آمده است. شکل ۱۵ - ب با $x = 0/13$ (m) هنوز نزدیک دو دریچه قرار دارد و دو گردابه در دو گوشه به وجود آمده‌اند. این دو گردابه در شکل ۱۵ - ج با $x = 0/323$ (m) و شکل ۱۵ - د با $x = 0/595$ (m) نیز دیده می‌شود. علت اصلی تشکیل این دو گردابه، حرکت جریان در مجاورت دیوارهای فوقانی و جنوبی به سمت خروجی است. در شکل‌های ۱۵ - ه و ۱۵ - و که از دریچه‌های ورودی و خروجی فاصله زیادی دارد و نزدیک به دیوار شرقی است، این دو گردابه از بین رفته و تمام صفحه شاهد هجوم جریان برای رسیدن به صفحات دیگر و خروج از

اتاق است. این دو صفحه چون به دیوار شرقی، محل برخورد توده هوای ورودی، نزدیک می‌باشند، نقش بخش جریان روی دیوار شرقی در آنها دیده می‌شود. به خصوص در شکل ۱۵ - و گوشه بالای سمت چپ شاهد جدایی جریان است. این نقطه محل برخورد توده هوای ورودی و دیواره شرقی است که بخش بیشتر جریان به سمت پایین و بخش کوچتری به علت فضای کمتر به بالا هدایت می‌شوند.

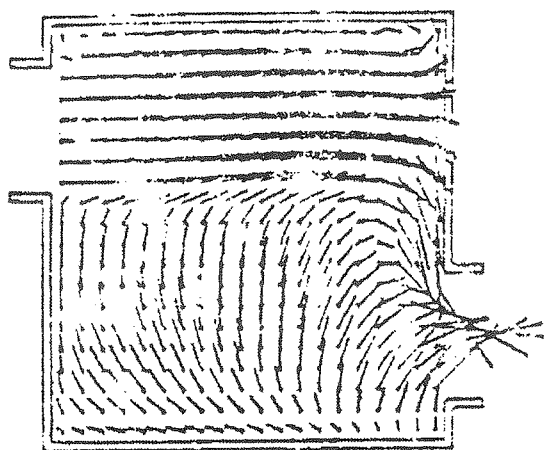
کانتورهای آلودگی

صفحه $x-z$: شکل ۱۲ - الف، با $y = 0/27$ (m) در ابتدای منبع آلودگی قرار داشته و شامل دریچه خروجی هم است. غلظت آلودگی خروجی $(\frac{m}{m^3})$ 5×10^{-4} است که نسبت به ورودی (4×10^{-2}) حدود ۲۵٪ افزایش را در این مقطع نشان می‌دهد. گرادیان زیاد غلظت آلودگی در اطراف منبع دیده می‌شود شرط مرزی تمام دیوارها نفوذ ناپذیری است و در شکل‌ها هم مشخص است که گرادیان در جهت عمود بر دیوار صفر می‌باشد. شکل ۱۲ - ب که دارای $y = 0/13$ (m) می‌باشد. در قسمت‌های انتهایی منبع آلودگی قرار دارد. به دلیل وجود گردابه در همین نقطه، انتقال آلودگی از طریق جا به جایی و انتشار در بقیه فضا کمتر انجام می‌شود. شکل ۱۲ - ج که به فاصله $y = 0/323$ (m) از دیوار جنوبی قرار دارد، شاهد کامل شدن گردابه اصلی است و همین موجب انتقال آلودگی و انتشار آن در کل صفحه است. بنابراین اگر منبع در این صفحه قرار می‌گرفت انتشار آلودگی به مراتب بیشتر می‌بود و متوسط غلظت آلودگی در این مقطع می‌توانست بیشتر باشد. در شکل ۱۲ - د با دور شدن از منبع آلودگی و وجود گردابه اصلی، آلودگی دارای غلظت متوسطی در کل صفحه است و گرادیان تغییرات آن خیلی زیاد نیست. شکل‌های ۱۲ - ه و ۱۲ - و شامل دریچه ورودی است و بنابراین با توجه به رژیم جریان، آلودگی هوا کمتر و به عبارت دیگر دارای هوای تمیزتر و یا خالص‌تری نسبت به بقیه مقاطع صفحه $x-z$ است.

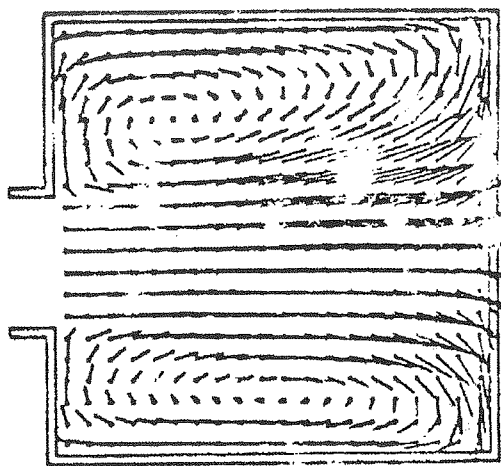
صفحه $(x-y)$: شکل ۱۴ - الف به فاصله $z = 0/27$ (m) از دیوار تحتانی شاهد حضور قسمتی از منبع آلودگی و دریچه ورودی است. همین ویژگی در شکل ۱۴ - ب، $z = 0/13$ (m) نیز دیده می‌شود. از برخورد هوای با غلظت کم ورودی با هوای غلیظ اطراف منبع آلودگی انتظار مشاهده گرادیان زیاد غلظت می‌رود.



شکل (۱) هندسه بارون.



شکل (۲) بردارهای سرعت به دست آمده در هندسه بارون.

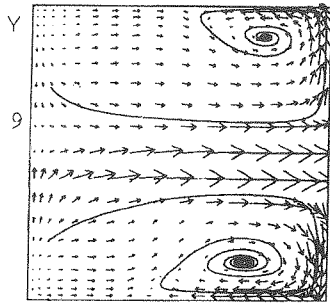


شکل (۳) بردارهای سرعت به دست آمده در هندسه بارون.

گرادیان غلظت با رسیدن به شکل های ۱۴ - ج و ۱۴ - د با دور شدن از منبع، دریچه ورودی و محل تشکیل گردابه اصلی کمتر می شود و به حدود ۲۰٪ تا ۳۰٪ می رسد. این گرادیان غلظت در شکل های ۱۴ - ه و ۱۴ - و با رسیدن به دریچه خروجی و تحلیل رفتن گردابه اصلی باز هم کمتر شده و به حدود ۱۰٪ می رسد. صفحه Z-Y: اولین شکل این صفحه یعنی شکل ۱۶ - الف به فاصله $x = 0.27 / m$ از دیوار غربی قرار دارد و حاوی هر دو دریچه ورودی و خروجی است. در این مقطع و شکل های ۱۶ - ب و ۱۶ - ج که تحت تأثیر منبع آلودگی قرار دارند. بر اثر وجود منبع که در مرکز گردابه قرار گرفته و عدم پخش زیاد آلودگی، قسمت بالای سمت راست این شکل ها دارای غلظت خیلی کمی در حد غلظت ورودی هستند. در شکل ۱۶ - د با بزرگ شدن گردابه سمت چپ، گرادیان غلظت بیشتر شده و سهم قسمت تمیز کمتر می شود. با نزدیکی به دیوار شرقی که هوایی تمیزی به آن می رسد و توجه به رژیم جریان آن، هوایی با آلودگی کمتر مورد انتظار است. در شکل های ۱۶ - ه و ۱۶ - و این مسئله مشهود است.

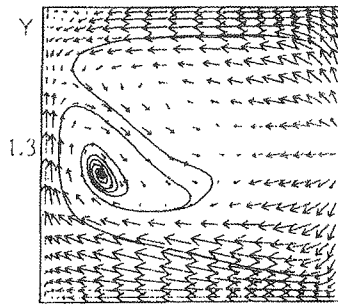
بحث و نتیجه گیری

مقایسه الگوی جریان دو هندسه فوق به خوبی نشان می دهد که با جا به جا کردن محل دریچه، حالت تقارنی که در الگوی جریان در حالت اول وجود داشت کاملاً از بین رفته و به جای گردابه های تقریباً متقارنی که در دو سوی جریان جت مرکزی تشکیل می شد، این بار یک گردابه بزرگ در ناحیه مرکزی اتاق تشکیل می شود. مقایسه الگوهای جریان در صفحات (z-y) هم نشان می دهد که به جای جریان های از مرکز به گوشه ها و از گوشه ها به مرکز که در لایه های مختلف این صفحات در هندسه اول وجود داشت، در موقعیت جدید دریچه صرفنظر از گردابه هایی که وجود دارد الگوی کلی جریان از یک گوشه به سمت گوشه مقابل و یا بر عکس است که ناشی از به ترتیب مکش و یا رانش هر یک از دریچه های ورودی و یا خروجی است. به همین گونه الگوی مشابهی را در مورد رفتار کانتورهای غلظت می توان ملاحظه کرد که از مقایسه شکل های مربوطه واضح است. بدین ترتیب بسته به میزان و شدت غلظتی که در هر نقطه مورد نظر است در مورد محل و موقعیت و اندازه دریچه ها، سرعت و امتداد جریان، تعیین حداقل میزان آلودگی مجاز و غیره می توان تصمیم گیری کرد.



Z=0.595 X

شکل (ب-۶)

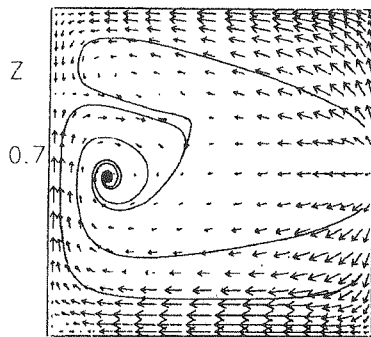


Z=0.373 X

شکل (ج-۶)

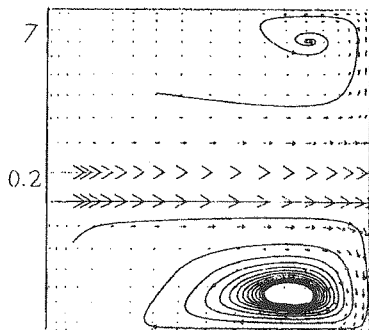
شکل (۶) بردارهای سرعت در صفحه X-Y.

$U_{in}=3.0(m/s)$



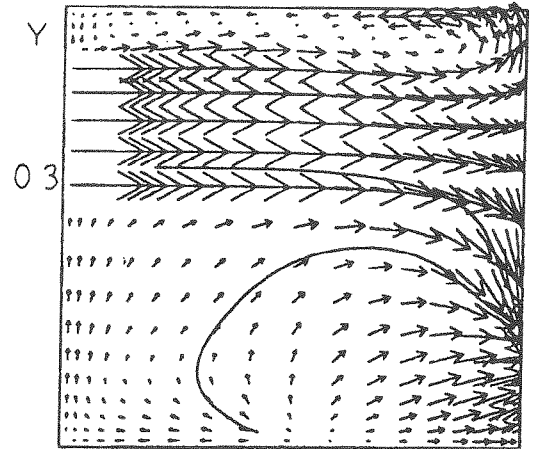
Y=0.027 X

شکل (الف-۷)



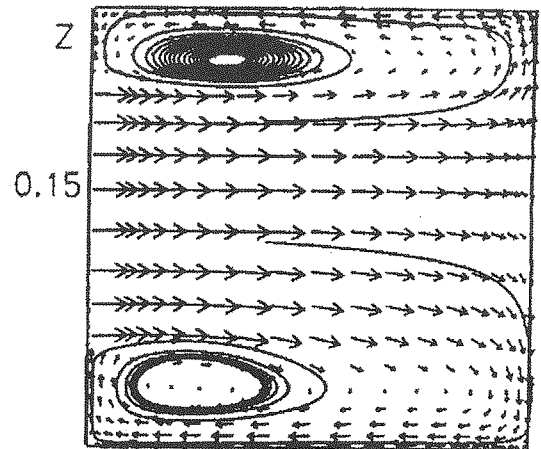
Y=0.325 X

شکل (ب-۷)



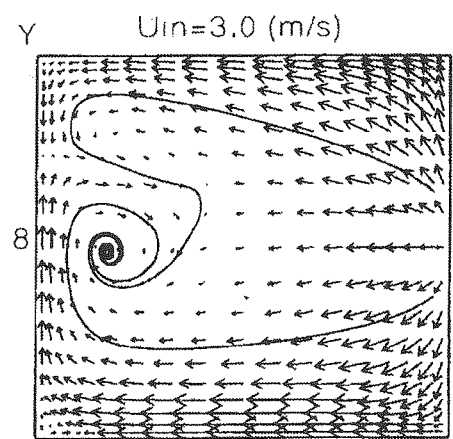
Z=0.201 X

شکل (۴) بردارهای سرعت در صفحه X-Y.



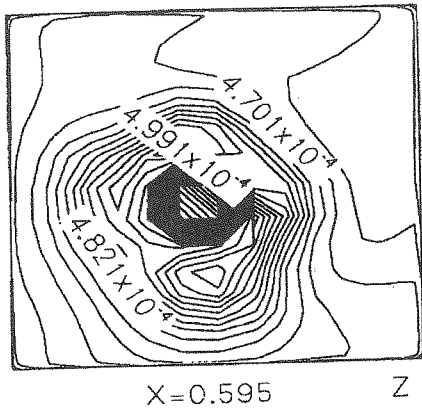
Y=0.242 X

شکل (۵) بردارهای سرعت در صفحه X-Z.



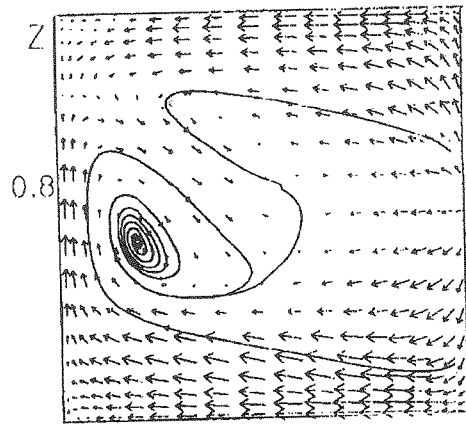
Z=0.027 X

شکل (الف-۶)



X=0.595 Z

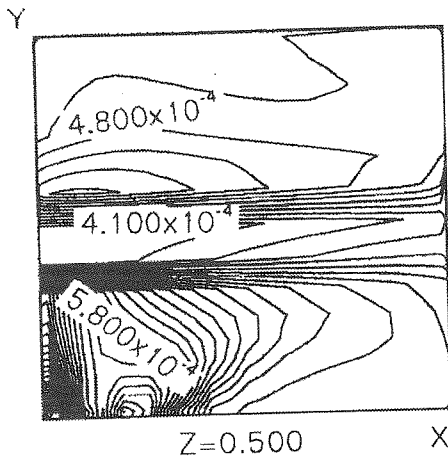
شکل (۹-الف)



Y=0.9/3

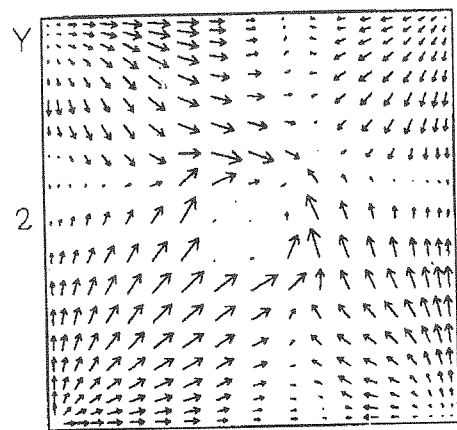
شکل (۷-ع)

شکل (۷) بردارهای سرعت در صفحه X-Z.



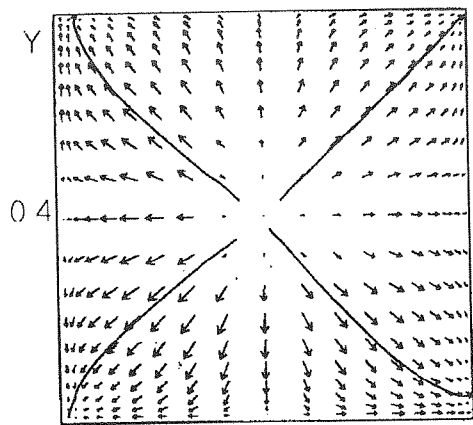
Z=0.500 X

شکل (۹-ب) کانتورهای غلظت در صفحه Y-Z.



X=0.130 Z

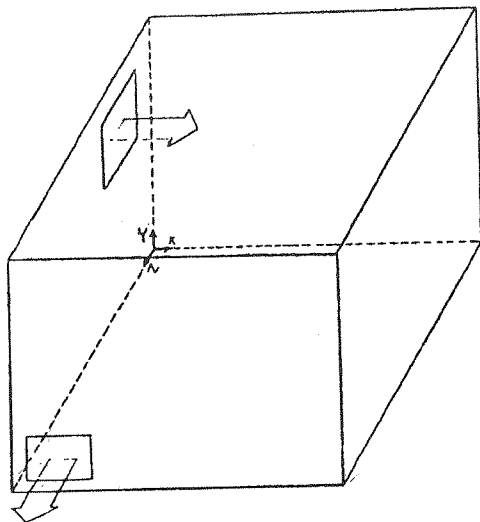
شکل (۸-الف)



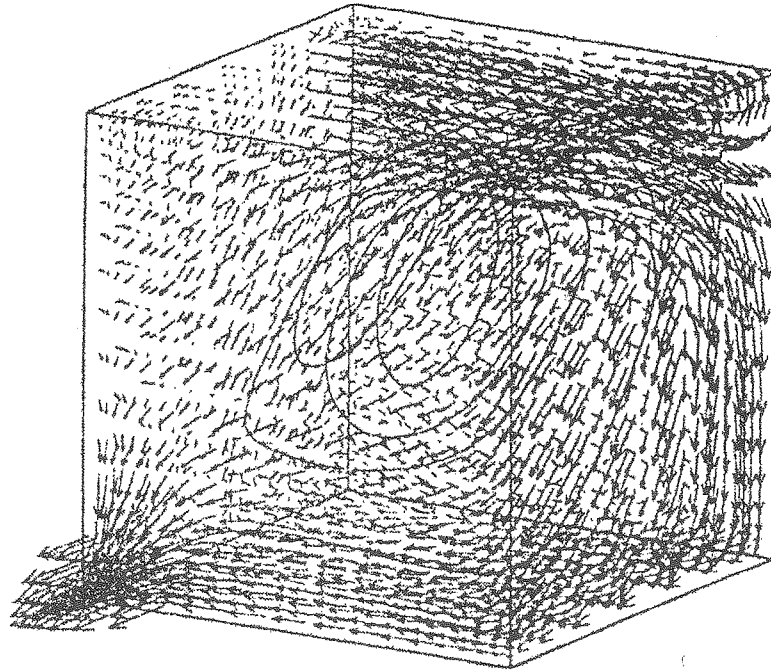
X=0.973 Z

شکل (۸-ب)

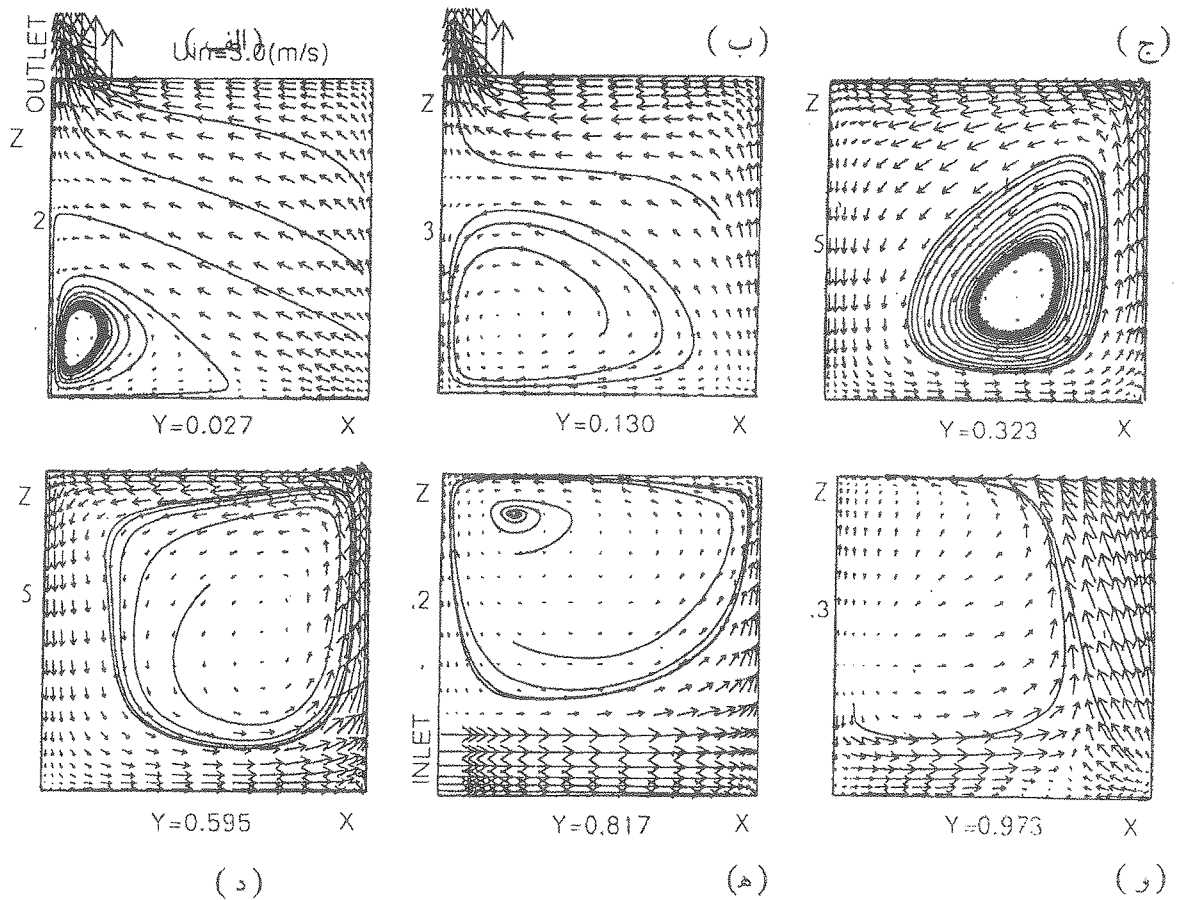
شکل (۸) بردارهای سرعت در صفحه Y-Z.



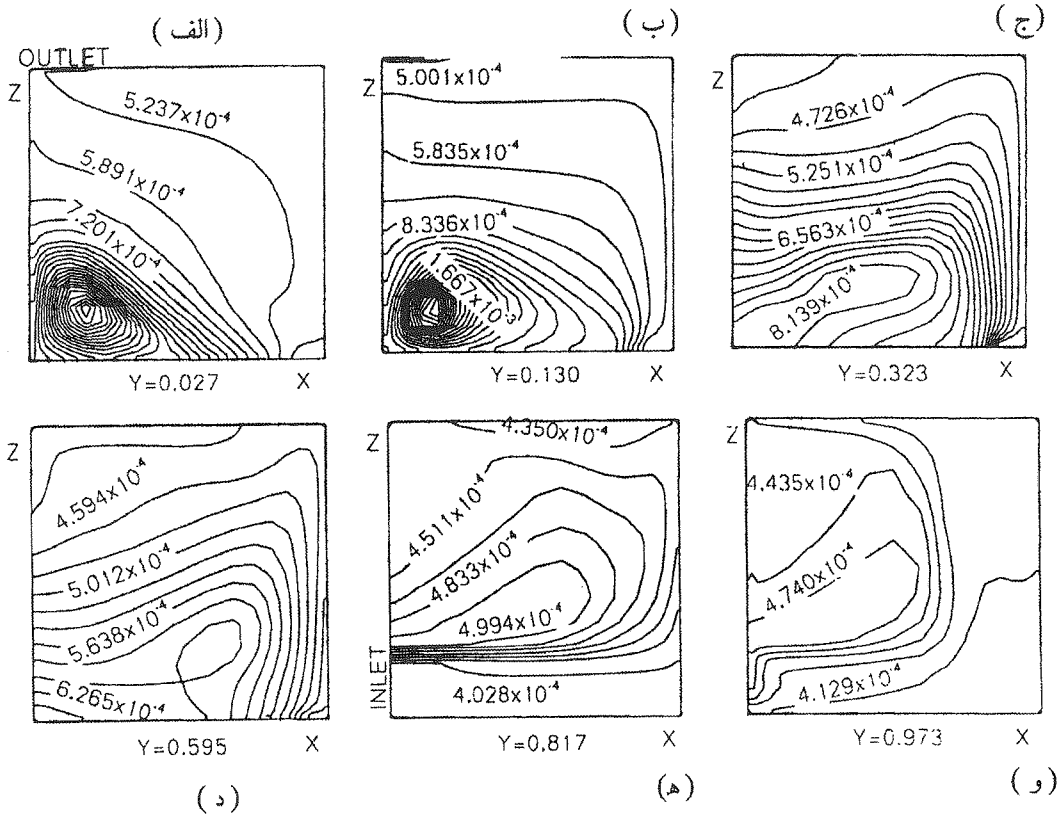
شکل (۱۰-الف) محفظه اتاق و دریچه های ورودی و خروجی در اجرای دوم.



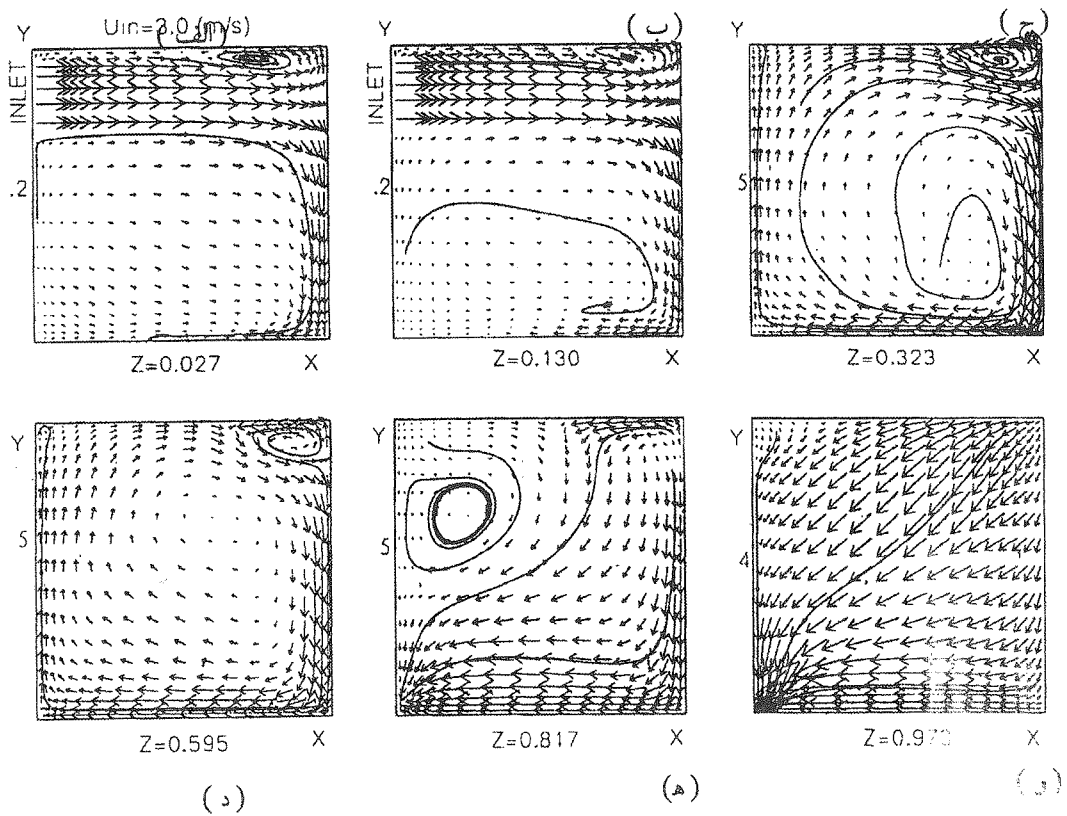
شکل (۱۰) ب- نمایش سه بعدی آرایش بردارهای سرعت در اجرای دوم.



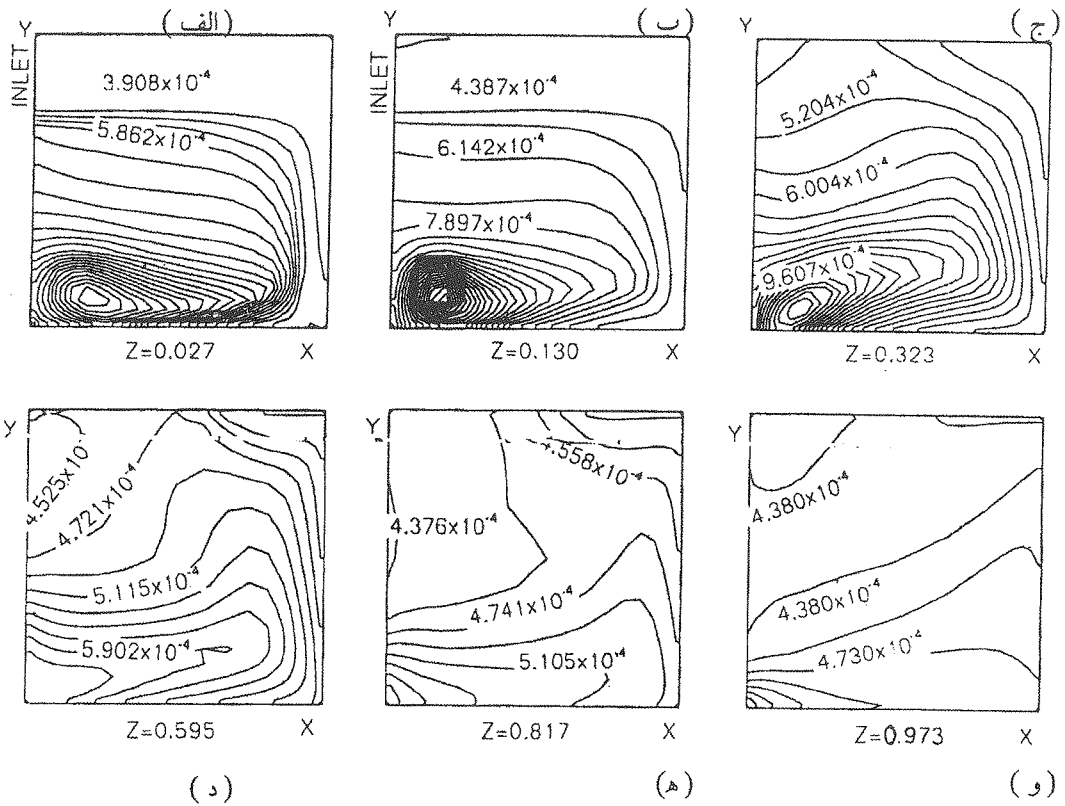
شکل (۱۱) بردارهای سرعت در صفحه $X - Z$.



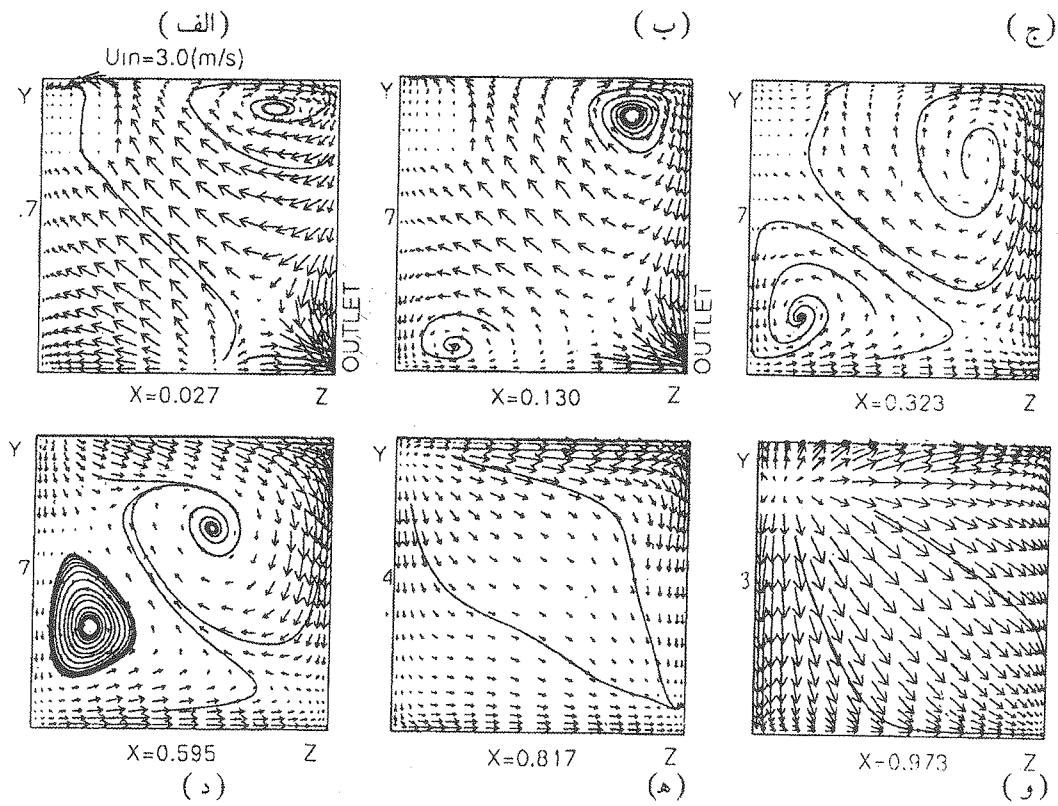
شکل (۱۲) کانورهای غلظت در صفحه $X-Z$.



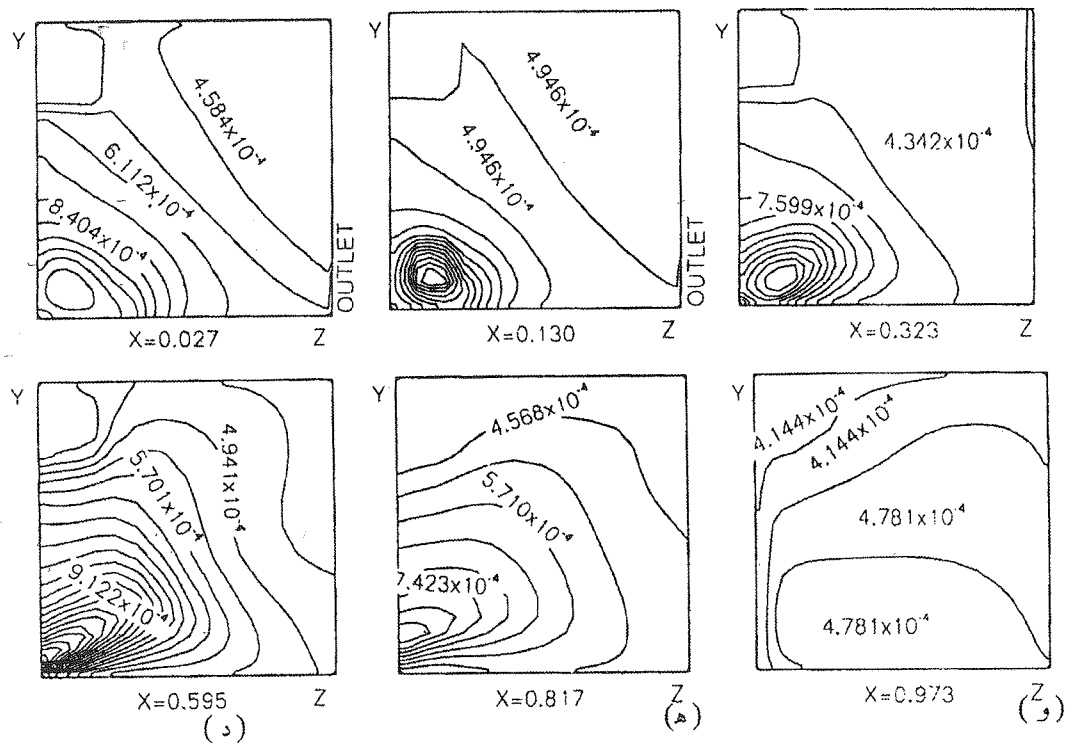
شکل (۱۳) بردارهای سرعت در صفحه $X-Y$.



شکل (۱۴) کانتورهای غلظت در صفحه $x - y$.



شکل (۱۵) بردارهای سرعت در صفحه $y - z$.



شکل (۱۶) کانطورهای غلظت در صفحه $Y-Z$.

زیر نویس ها

- 1 - T.Kurbuchi
- 2 - J. B. Fang
- 3 - K. Knappmiller
- 4 - A. Kirkpatrick
- 5 - Reynolds Stresses
- 6 - Kato
- 7 - Baron's geometry

مراجع

- [1] Kurbuchi, T., and Fang, J. B., "A numerical method for calculating indoor airflows using a turbulence model," NISTIR, 89-4211, 1990.
- [2] Knappmiller, K.D., and Patrick, A.T.K., "Computational determination of the behavior of a cold air ceiling jet in a room with a plume," ASHRAE Transactions Symposia, OR-94-6-2, 1994.
- [3] Yaghoubi, M.A., Knappmiller, K.D., and Patrick, A.T.K., "Numerical prediction of contaminant transport and indoor air quality in a ventilated office space," Particulate Science and Technology, 13, pp. 117 - 131, 1995.
- [4] Yaghoubi, M.A., Knappmiller, K.D. and Patrick, A.T.K., "Three-dimensional numerical simulation of air contamination dispersal in a room," ASHRAE Transactions Symposia, CH-95-15-1, 1995.
- [5] Hoffman, K. A., and Chiang, S.T., "Computational fluid dynamics for engineers," A Publication of Engineering System, Whchita, Kansas, 62208-1078, USA 1994.
- [6] Vanka, S.P., "A calculation procedure for three-dimensional steady recirculating flows using multigrid methods," Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng. 55, pp. 321-338, 1986.