

## بررسی جریان سه بعدی هوا در یک محفظه

احمد رضا عظیمیان\* و سیامک محمدی وند\*\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۷۷/۲/۲ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۷۸/۷/۱۷)

چکیده - آگاهی از وضعیت جریان هوا در یک محفظه در مسائل تهویه مطبوع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در روشهای سنتی، بارگرمایی با استفاده از جدولهای موجود به دست می‌آید و سیمای جریان سیال به تصویر کشیده نمی‌شود. با حل عددی جریان سیال در داخل یک فضای خاص می‌توان تصویر کامل و جامعی از جریان هوا را ارائه کرد. برای انجام این مهم، معادله‌های ناویر - استوکس سه بعدی و معادله‌های لازم برای مدل کردن اغتشاش یعنی معادله‌های  $k-\epsilon$  را به روش سیمپل حل می‌کنیم. نتایج به دست آمده تصویر جامعی از میدان جریان را ارائه می‌کنند که با نتایج عددی و تجربی موجود قابل مقایسه‌اند و در استفاده بهینه از فضاهای داخلی می‌تواند کمک شایانی باشد.

## Investigation of 3-D Flow in a Chamber

A.R. Azimian and S. Mohammadi vand

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology

**ABSTRACT-** Information about the flow conditions in a chamber is crucial in air conditioning problems. In conventional methods, the heating or cooling loads of the buildings are estimated through existing charts and no analysis of the flow structure is done. The numerical solution of flow equations provides a complete picture of the flow behaviour. This method requires the prior solution of Navier-Stokes equations. To model the Turbulence behaviour of the flow, the so called  $k-\epsilon$  equations are also solved.

The predicted results are comparable with the existing numerical and experimental results and could be used in optimum design of indoor areas.

۱ - مقدمه

صورت حجمهای سه بعدی مکعب شکل هستند و برای ارزیابی دقیق جریان هوا باید آنها را به همان صورت سه بعدی مطالعه کرد. در این راستا محققان بسیاری در گذشته بررسیهایی را انجام داده‌اند

اطلاع از وضعیت رفتاری جریان سیال در فضاهای بسته نظیر دفاتر کار، اتاقها و یا کارگاهها برای طراحان تأسیساتی و آرشیتکتهایی که فضا آرایسی می‌کنند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این فضاها به

\* - دانشیار \*\* - دانشجوی کارشناسی ارشد

## ۲ - معادله‌های حاکم

برای حل این میدان جریان مغشوش از معادله بقای جرم و معادله‌های ممتوم در جهتهای  $Z, Y, X$  استفاده می‌شود. همچنین معادله‌های  $k-\varepsilon$  استاندارد برای مدل کردن اغتشاش به کار می‌روند. بدیهی است که این معادله‌ها را متوسط‌گیری کرده و جملات نوسانی را بر حسب مقادیر متوسط مدل می‌کنیم. شکل نهایی معادله‌ها به صورت است

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( r^j \rho \tilde{u}_i \phi \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( r^j \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + r^j s_\phi \quad (1)$$

در این پژوهش به دلیل پایین بودن سرعت جریان از تغییرات خفیف  $\rho$  صرف نظر کرده و بنابر این  $\rho$  می‌تواند از داخل عملگر مشتق خارج شود. بالا نویس  $Z$  که در معادله (۱) استفاده شده است برای حالت تقارن محوری در مسائل دو بعدی است و  $r$  فاصله شعاعی در این گونه مسائل است. مقدار  $Z$  در مسائل با تقارن محوری و مختصات استوانه‌ای «۱» بوده و در بقیه مسائل (دو و سه بعدی) دکارتی «۰» است. مقادیر  $\phi$ ,  $\Gamma_\phi$ ,  $S_\phi$  برای هر یک از معادله‌های حاکم به دست آمده از معادله (۱) در جدول (۱) و ضرایب مربوطه در جدول (۲) آمده‌اند.

در معادله‌های بالا

$$G = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_t + \mu \quad (3)$$

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

## ۳ - روش حل معادله‌های جبری و شرایط مرزی

پس از تبدیل معادله‌های دیفرانسیل به معادله‌های جبری ساده، این معادله‌ها که به هم وابسته‌اند باید از روشهای تکراری حل شوند. در اینجا از روش گوس - سایدل خط به خط استفاده می‌شود که سرعت همگرایی آن زیاد است. همگرایی در حل وقتی حاصل

که برخی از آنها تجربی، پاره‌ای تحلیلی و تعدادی هم بررسی عددی‌اند و در اینجا به بعضی از آنها اشاره می‌شود. در تاریخچه بررسی حل عددی جریانهای سه بعدی یکی از کارهای شاخص، کار پاتانکار و اسپالدینگ [۱] است. در این حل فرض شده که یک جهت غالب جریان وجود دارد و هیچ جریان برگشتی ایجاد نمی‌شود و به دلیل عدم برگشت جریان، میدان جریان پایین دست تأثیر کمی بر شرایط بالادست دارد. کار تو، کور و اسپالدینگ [۲] در کار عددی دیگری به بررسی جریان آرام در لایه مرزی سه بعدی پرداختند. در کار دیگری لاندرو و اسپالدینگ [۳] برای حل جریانهای مغشوش مدل دو معادله‌ای  $k-\varepsilon$  استاندارد را ارائه کردند. پراتاب و اسپالدینگ [۴] جریان سیال و انتقال گرما در جریانهای سه بعدی داخل مجاری را بررسی کردند. این بررسی شامل مواردی بود که جریانهای با طبیعت «بخش سهموی ۱» را در بر می‌گرفت. رودی و ریواتسا [۵] با بررسی جریانهای سه بعدی و کاربرد آنها در جریان متقاطع یک جت، محلهایی را که احتمال برگشت جریان وجود دارد را به صورت بیضوی و بقیه جریان را به صورت سهموی حل کردند. وانکا [۷و۶] روش چند شبکه‌ای برانت را برای پیش بینی جریانهای دو و سه بعدی در حالت دائم و آرام به کار برد و صرفه جویی حاصل از سرعت همگرایی ناشی از تغییر شبکه را نشان داد. کوربوشی و فنگ [۸] تحقیق جامعی را در مورد جریانهای سه بعدی داخلی با استفاده از مدل‌های اغتشاش ارائه دادند و جریانهای هندسه‌های مختلف برای شبیه سازی محلهای مورد نیاز تهویه مطبوع را بررسی کردند. در بررسی حاضر با حل معادله‌های ناویر-استوکس سه بعدی در حالت مغشوش در داخل یک فضای سه بعدی و با در نظر گرفتن طبیعتی کاملاً سه بعدی برای جریان سیال به طوری که هر گونه جریان برگشتی نیز در آن قابل پیش بینی باشد می‌توان تصویر کامل و جامعی از رفتار جریان هوای ورودی به یک اتاق، نحوه توزیع آن، مسیر جریانهای غالب و نواحی تشکیل گردابه‌ها را به دست آورد. نتایج چنین بررسی جامعی کمک شایانی در استفاده مطلوب و بهینه از فضای مورد نظر می‌کند. به طوری که اگر بخواهیم در آن فضا وسیله‌ای قرار دهیم که در معرض جریان هوا قرار داشته باشد که فرضاً خنک یا خشک شود، می‌توان به راحتی آن محل را مکانیابی کرد.

$\phi$	$\Gamma_\phi$	جدول ۱ $S_\phi$	معادله
۱	.	.	بقای جرم
u	$\mu_{\text{eff}}$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial x} \right)$	اندازه حرکت در جهت x
v	$\mu_{\text{eff}}$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial y} \right)$	اندازه حرکت در جهت y
w	$\mu_{\text{eff}}$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial z} \right)$	اندازه حرکت در جهت z
k	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k}$	$G - \rho \varepsilon$	انرژی اغتشاش
$\varepsilon$	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} G - c_{2\varepsilon} \rho \varepsilon)$	نرخ اتلاف اغتشاش

جدول ۲

$c_\mu$	$c_{1\varepsilon}$	$c_{2\varepsilon}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
۰/۰۹	۱/۴۴	۱/۹۲	۱/۰	۱/۲۲

روی داده‌های تجربی تخمین می‌زنند. در اینجا از نتایج تجربی کاتو [۶] استفاده می‌شود. شرط مرزی خروجی با فرض جریان توسعه یافته، گرادیان صفر است. برای جریان توسعه یافته باید آن قدر از میدان جریان اصلی فاصله گرفت که تأثیر شرایط موجود بر روی جریان خروجی به حد قابل صرف نظر کردن برسد که در این حالت شکل و فیزیک مسئله باید قابلیت ایجاد جریان توسعه یافته را داشته باشد. برای مثال مسافت و زمان کافی در اختیار جریان باشد تا بدون مواجه شدن با موانع و تغییر جهتها به حالت توسعه یافته نزدیک شود که با ادامه شبکه در خروجی این کار عملی می‌شود. بنابراین

$$\frac{\partial \phi}{\partial \eta} = 0 \quad (5)$$

می‌شود که مجهول محاسبه شده در دو تکرار متوالی به عدد ثابتی رسیده باشد. بنا بر این تفاضل نسبی مجهول در دو تکرار و تساوی دو طرف معادله می‌تواند معیار همگرایی باشد. برای افزایش سرعت همگرایی قبل از محاسبه مجهولات در هر تکرار، ضریبی از مجهولات در معادله‌های حاکم قرار می‌گیرد و سپس معادله‌ها حل می‌شوند شرایط مرزی مختلف به کار رفته شامل ورودی جریان، خروجی جریان و دیوار صلب اند.

در ورودی کلیه اطلاعات و مشخصات سیال باید معلوم باشد، این اطلاعات شامل پروفیل سرعت، انرژی اغتشاشی و خواص اولیه سیال اند. در این بررسی پروفیل ورودی سرعت یکنواخت فرض می‌شود ولی جهت آن می‌تواند متغیر باشد. انرژی اغتشاش k و نرخ اتلاف آن  $\varepsilon$  که مقادیر ورودی آنها معمولاً معلوم نیستند را از

که در آن  $\phi$  هر متغیر مجهول و  $\eta$  جهت خروج جریان است. اعمال شرط مرزی بر روی دیوار صلب برای معادله‌های مختلف به صورت متفاوتی است. بر روی دیوار صلب تمام مؤلفه‌های سرعت صفر هستند.

#### ۴- نتایج

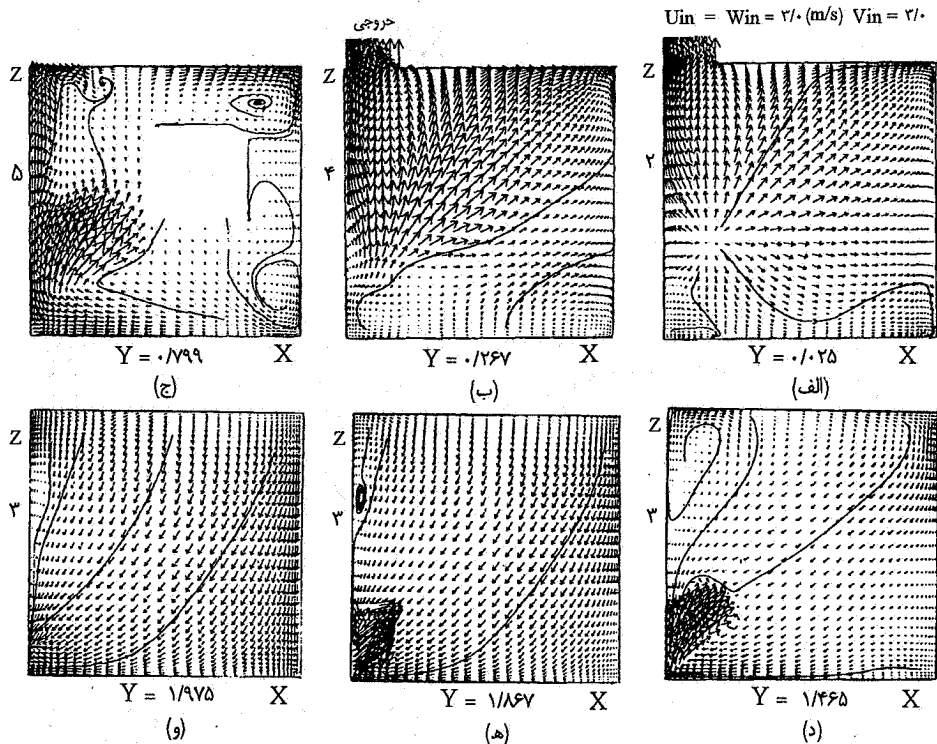
برنامه را برای هندسه‌های مختلف اجرا کرده و نتایج آن را با کارهای تجربی و عددی تا حدی که اطلاعات مربوطه در دسترس بود مقایسه کردیم. اولین هندسه، اتاقی است به ابعاد  $2 \times 2 \times 2$  (m) با دریچه‌های ورودی و خروجی یکسان  $(m) 0.366 \times 0.366 \times 0$  که به ترتیب در وسط سقف و در گوشه پایینی دیوار عمودی قرار دارد که نتایج تجربی و عددی آن در مرجع [۸] ارائه شده است. برای به دست آوردن نتایج تجربی همان گونه که در مرجع [۸] آمده است اتاقی با ابعاد کامل با صفحات چوبی توسط ساکاموتو ساخته شد و سرعت متوسط و توزیع چند کمیت آماری با بادسنج اولتراسونیک اندازه‌گیری شد. نتایج برنامه حاضر و نتایج عددی و تجربی مرجع [۸] تطابق خوبی را نشان می‌دهند که به علت محدودیت صفحات مقاله از ارائه آنها خودداری می‌شود. پس از مقایسه نتایج حاصل از اجرای برنامه، با نتایج مرجع [۸] و کسب اطمینان از صحت کار برنامه آن را برای هندسه دیگری اجرا کردیم.

مسئله مورد بررسی اتاقی است به ابعاد  $(m) 4 \times 2 \times 4$  با دو دریچه ورودی به ابعاد  $(m) 0.759 \times 0.298$  و خروجی به ابعاد  $(m) 0.759 \times 0.259$  که به ترتیب در صفحات  $x-y$  و  $z-y$  قرار دارند. ورود هوا از دریچه ورودی با سرعت برابری  $(m/s) 5/196$  (با مؤلفه‌های  $w=3m/s$  و  $v=-3$  و  $u=3$ ) است. میدان جریان را به صورت بردارهای سرعت استخراج کرده و به عنوان نمونه در صفحات  $(y-z)$ ،  $(x-z)$  و  $(x-y)$  شش مقطع را در فواصل مناسب انتخاب می‌کنیم تا بتوانیم با نشان دادن آنها الگوی جریان را در اتاق ارائه کنیم. حال به بررسی بردارهای سرعت در مقاطعی از صفحات سه گانه می‌پردازیم.

الف - صفحه  $x-z$ : شکل (۱- الف) که به فاصله  $y=0/0.25$  از دیوار جنوبی قرار دارد به وضوح نمایش دهنده مسیر حرکت هوا بر روی کف اتاق است. نقطه‌ای که مرکز واگرایی بردارهاست. در واقع محل برخورد توده هوای ورودی است که به دلیل جهت رو به پایین

جریان ورودی در این نقطه به کف اتاق برخورد کرده و از آن به اطراف پخش می‌شود. در گوشه پایین سمت چپ به دلیل نزدیکی جریان پخش شده و جریانی که از گوشه آمده برخوردی به وجود می‌آید. در گوشه بالا سمت چپ که دریچه خروجی قرار دارد جریان مستقیماً به بیرون هدایت می‌شود. بنابراین، این قسمت از جریان بدون گردش در اتاق از آن خارج شده و به همین دلیل در بررسیهای با اتلاف انرژی باید سهم این قسمت از جریان را به حداقل رسانید. شکل (۱- ب) به فاصله  $(m) 0.267/y=0$  از دیوار جنوبی قرار دارد. در این مقطع هم ادامه اثر برخورد توده هوای منعکس شده از کف اتاق با گوشه‌های دیوار به شکل گردابه دیده می‌شود که چون فاصله زیادی از کف ندارد هنوز هم پخش شدن آن به اطراف آشکار بوده و در ضمن خارج شدن قسمتی از جریان از دهانه خروجی نیز ملاحظه می‌شود. در شکل (۱- ج) با  $(m) 0.799/y=0$  تشکیل گردابه اصلی ملاحظه می‌شود. در این صفحه به علت وجود مانع آشفستگی در جریان ملاحظه می‌شود. از آنجا که جریان از دو سوی مانع لغزیده و در نقطه مرکز گردابه به هم برخورد می‌کنند در بالای مانع نیز گردابه‌ای تشکیل شده است. گردابه‌ای که در گوشه سمت راست پایین تشکیل شده ناشی از برگشت قسمتی از جریان از گردابه بالایی است. در شکل (۱- د) به دریچه ورودی نزدیک شده‌ایم، گردابه بزرگ اصلی برای همراهی با جریان ورودی به طرف محل دریچه ورودی هجوم می‌برد، بدین معنی که مرکز گردابه به گوشه سمت چپ بالا نزدیک می‌شود. در شکل (۱- ه) مرکز گردابه اصلی به دیوار غربی چسبیده است یعنی گردابه عملاً از بین رفته زیرا سرعت بالای جریان ورودی تمایل زیادی را در تمام صفحه برای همراه ساختن جریان با خود ایجاد کرده است. شکل (۱- و) با  $(m) 1/975/y=0$  که در مسیر ورودی قرار دارد گردابه‌ای در آن تشکیل شده است.

ب - صفحه  $x-y$ : شکل (۲- الف) نزدیک دیوار پایینی بوده و مقطع آن در آستانه دریچه ورودی انتخاب شده است. در این شکل دو گردابه در دو گوشه پایین دیده می‌شود. علت تشکیل گردابه سمت چپ مشابه علت توضیح داده شده در شکل (۱- الف) صفحه  $x-z$  است و گردابه سمت راست از برخورد جریان پخش شده بر روی کف با دیوار شرقی ایجاد شده است. در این شکل همچنین هجوم جریان برای پیوستن به توده ورودی هوا قابل تشخیص است.

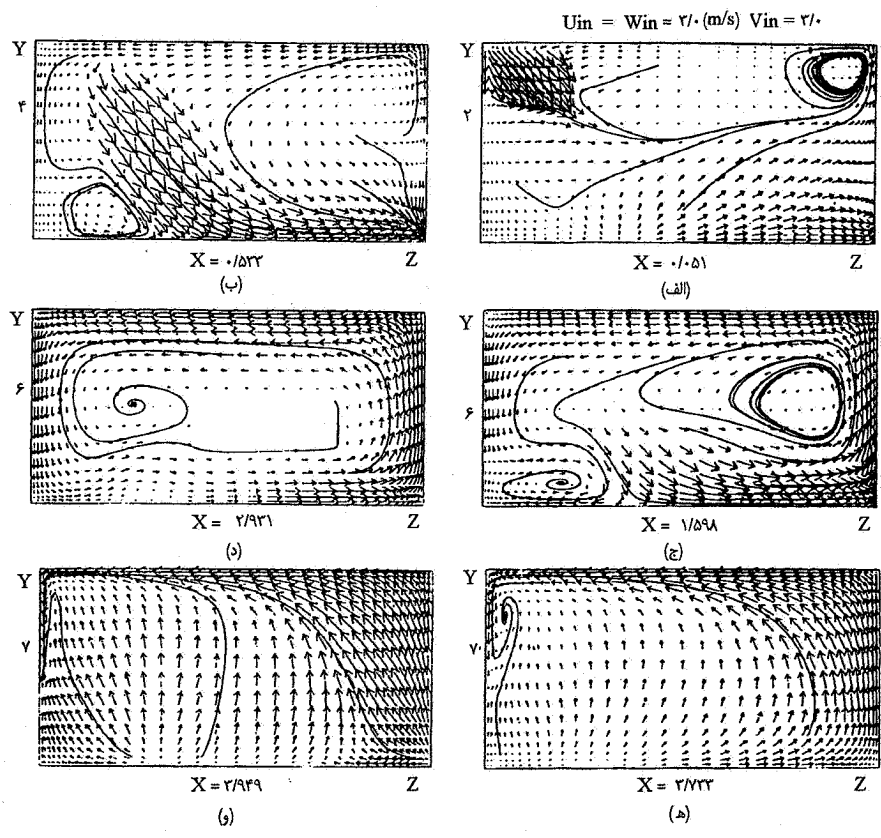
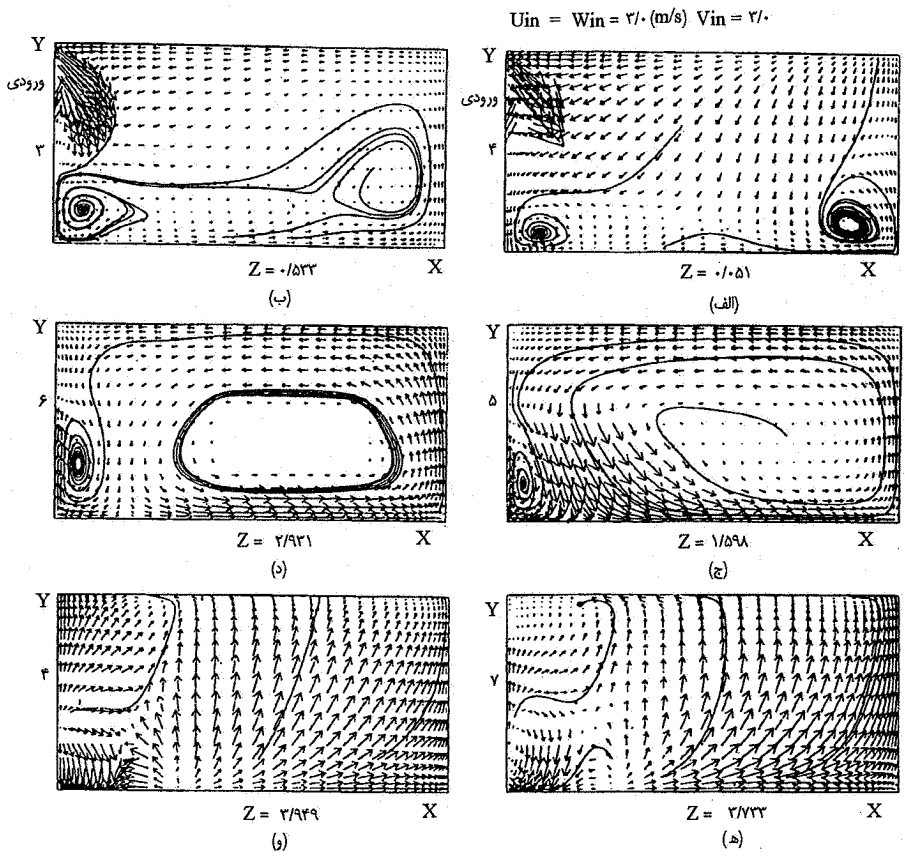


شکل ۱- بردارهای سرعت در صفحه X-Z

مکش ورودی و در دیوار جنوبی به علت مکش خروجی جدایی جریان دیده می‌شود. در شکل (ب-۳) با  $x = 0/533 \text{ (m)}$  گردابه اصلی صفحه Z-Y در حال شکل‌گیری است. در گوشه پایین سمت چپ، گردابه به وجود آمده ناشی از برخورد جریان بالایی و پایینی است که در اثر نزدیکی مقطع به محل برخورد توده هوای ورودی با کف و برگشت جریان ایجاد شده است. در شکل (ج-۳) با  $x = 1/598 \text{ (m)}$  با عبور از محل دریچه خروجی، گردابه اصلی شکل گرفته ولی در گوشه پایین و در سمت چپ هنوز شاهد برخورد دو جریان پیش گفته هستیم. مرکز گردابه اصلی در نزدیک صفحه بالایی و نزدیک دریچه خروجی است. در شکل (د-۳) با رسیدن به مانع، گردابه‌ای در پشت آن تشکیل می‌شود ولی گردابه اصلی هنوز برقرار است و به علت غلبه جریان گردابه اصلی بر جریان برگشتی، از گردابه گوشه پایین اثری دیده نمی‌شود. در شکل (ه-۳) که  $x = 3/733 \text{ (m)}$  است، شاهد تغییر محل مرکز گردابه به گوشه بالا و سمت چپ هستیم. جدایی جریان در پایین شکل به علت نزدیکی مقطع انتخاب شده به دیوار شرقی است که در اثر برخورد جریان کف اتاق با دیوار شرقی ایجاد می‌شود. شکل (و-۳) دارای آرایشی مانند شکل (ه-۳) است.

شکل (ب-۲) با  $z = 0/533 \text{ (m)}$  وسط دریچه ورودی انتخاب شده است. ملاحظه می‌شود که گردابه اصلی این صفحه در این مقطع تقریباً تشکیل شده است. شکل (ج-۲) با  $z = 1/598 \text{ (m)}$  که از دریچه ورودی عبور کرده و گردابه اصلی به وضوح و کامل قابل ملاحظه است. گردابه‌ای که در گوشه سمت چپ پایین در حال شکل‌گیری است با گردابه‌ای که در همین محل در شکل‌های (ب-۲) الف) و (ب-۲) ملاحظه شد تفاوت دارد. علت تشکیل این گردابه جدید وجود مانع است که قسمتی از جریان از آن عبور نکرده و با بازگشت خود این گردابه را به وجود می‌آورد. این گردابه در شکل (د-۲) با  $z = 2/931 \text{ (m)}$  کامل شده است. در این شکل همچنین حرکت منظم جریان در امتداد گردابه وجود دارد که گوشه بالای سمت چپ هم تحت تأثیر گردابه یاد شده قرار گرفته است. در شکل‌های (ه-۲) و (و-۲) جریان هنوز تمایل به حفظ گردابه را دارد ولی با نزدیک شدن به مقطع خروجی قسمتی از جریان از مسیر قبلی خارج و به بیرون می‌لغزد.

ج - صفحه Z-Y: در شکل (الف-۳)،  $x = 0/05 \text{ (m)}$  است، از آنجا که ورودی جریان در این صفحه قرار دارد، در سه محل در دیوار شمالی بر اثر مکش گردابه سمت راست، در دیوار تحتانی به علت



## ۵- نتیجه گیری

جابه‌جاییهای لازم در موقعیت دریچه‌ها، تغییر جهت و یا سرعت جریان، و غیره... اثرات آنها را بر روی میدان جریان بررسی کرد. در هر حال از نتایج چنین تحلیلی می‌توان در بهتر تهویه کردن اتاقهای کار، نشیمن، خواب، کارگاههای کوچک و بزرگ و یا دیگر فضاها به بهترین وجه ممکن استفاده کرد.

با بحث و بررسی انجام شده در بالا بر روی میدان جریان، تصویر کامل و جامعی از وضعیت جریان هوا در هر نقطه اتاق به دست می‌آید و با داشتن چنین تحلیلی از میدان جریان هر گونه تصمیم‌گیری در مورد استفاده بهینه از فضای اتاق برای کاربردهای مختلف امکانپذیر می‌شود. ضمن اینکه می‌توان با انجام

واژه نامه

### 1. partially - parabolic

1. Patankar, S.V., and Spalding, D.B., "a Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in the Three-Dimensional Parabolic Flows," *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 1787-1806, 1971.
2. Caretto, L.S., Curr, R.M., and Spalding, D.B., "Two Numerical Methods for Three-Dimensional Boundary Layer," *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, pp. 39-57, 1972.
3. Launder, B.E., and Spalding, D.B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows," *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, Vol. 3, pp. 299-289, 1973.
4. Pratap, V.S., and Spalding, D.B., "Fluid Flow and Heat Transfer in Three-Dimensional Duct Flows," *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 19, pp. 1183-1188, 1976.
5. Rodi, W., and Rivatsa, S.K.S., " a Locally Elliptic

مراجع

- Calculation Procedure for Three-Dimensional Flows and its Application to a Jet in a Cross-flow," *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, Vol. 23, pp. 67-83, 1980.
6. Vanka, S.P., " a Calculation Procedure for Three-Dimensional Steady Recirculating Flows Using Multigrid Methods," *Comp. meth. in Appl. Mech. and Eng.*, Vol. 55, pp. 321-338, 1986.
  7. Vanka, S.P., "Block-Implicit Multigrid Calculation of Two-Dimensional Recirculating Flows," *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, Vol. 59, pp. 29-48, 1986.
  8. Kurbuchi, T., and Fang, J.B., " A Numerical Method for Calculating Indoor Airflows Using a Turbulence Model," NISRIT 89-4211, 1990.