

«یادداشت تحقیقاتی»

بررسی جریان آشفته دوبعدی و پدیده انتقال به روش شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES)

قاسم حیدری نژاد^{۱*}، عبدالله اسکندری ثانی^۲، امین ذوالفقاری^۳

۱- بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشجوی دکتری بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

gheidari@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: مرداد ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۸)

چکیده- خاصیت خنثی خاصیتی است که فقط از میدان جریان اثر می پذیرد، بدون اینکه بر آن تأثیر بگذارد. در این مقاله نخست معادلات حاکم بر جریان آشفته حل شده و پدیده انتقال خاصیتی خنثی، در جریان آشفته دو بعدی، به صورت عددی مطالعه شده است. سپس با در دست داشتن مقادیر سرعت ها، معادله انتقال برای یافتن خاصیت خنثی حل می شود. برای حل جریان آشفته میدان سرعت، از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) با مدل زیر شبکه از نوع اسماکورینسکی استفاده شده است. در بررسی اعتبار کد، جریان داخل حفره مبنای مقایسه بوده است. در محاسبات مربوط به پدیده انتقال برای خاصیت خنثی از روش LES توأم با مدل اسماکورینسکی استفاده شده تا سازگاری بیشتری بین نحوه حل معادلات سرعت و پدیده انتقال ایجاد شود، حل سه بعدی جریان آشفته مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است، لذا با استفاده از نوعی مدل دو بعدی، صرفه جویی مناسبی صورت می گیرد. در عوض، برای راست آزمایی مدل، عدد رینولدز جریان باید چنان انتخاب شود که فرض دوبعدی بودن جریان معتبر باشد. مقایسه نتایج عددی با مقادیر آزمایشگاهی در محدوده مدل دوبعدی، نشان دهنده دقت بالای روش پیشنهادی و سازگاری آن با حل عددی معادلات انتقال و مومنت است. دقت نتایج حاصل، این امید را ایجاد می کند که بتوان انتقال گونه ها و نهایتاً شبیه سازی احتراق را با استفاده از روش گردابه های بزرگ ممکن ساخت.

کلیدواژگان: خاصیت خنثی، آشفتگی، گردابه های بزرگ، فیلتر کردن، شبیه سازی عددی، مدل سازی جریان آشفته، جریان حفره، جریان پشت پله.

«Research Note»

On the two-dimensional turbulent flow and transport phenomena Using Large Eddy Simulation method

Gh. Heidarinejad^{1*}, A. Eskandari Sani², A. Zolfaghari³

1- Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

2- PhD student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

3- M. Sc., student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

*P O Box: 14115-143 Tehran, Iran

gheidari@modares.ac.ir

Abstract

A passive scalar is a property that is affected by the flow field without affecting it. In this paper, first, the governing equations on the turbulent flows are solved and the property of a passive scalar in two dimensions is numerically studied. Having the values of the velocity components, the governing equation on transport of a passive scalar is solved. To compute the turbulent velocity field, the Large Eddy Simulation (LES) method using Smagorinsky subgrid scale is invoked. The flow in a cavity has been the basis to validate the accuracy of the generated computer code. To ensure the compatibility between the flow and the transport of passive scalar fields a similar LES approach is used. As a three-dimensional numerical solution for a turbulent flow fields needs a massive computational time and efforts, therefore a two-dimensional simulation used for a proper saving. Instead, to validate the numerical results, the range of the Reynolds number of the flow is kept within the range of the two-dimensional measurements. Comparison of the numerical results and the experimental measurements in two-dimension reveals the high accuracy of the results and compatibility between the flow and passive scalar fields. Ability of developed scheme to accurately handle transport of a passive scalar is promising to extend LES method into the transport of more species and hence to simulate reacting flows.

Key words: Passive Scalar, Turbulence, Large Eddies, Filtering, Numerical Simulation, Turbulent Flow Modeling, Cavity Flow, Backward Facing step Flow

۱- مقدمه

پدیده انتقال خاصیت خثی در جریان مغشوش تا حد زیادی به کاربرد پدیده انتقال در دیگر فرایندها مربوط می شود. به عنوان مثال، در فرایند احتراق، دانستن مقدار هر جزء در هر نقطه از جریان الزامی است. همچنین در تمامی پدیده های انتقال حرارت، انتقال جرم و مانند آن، مشخص بودن مقدار هر ماده، اهمیتی بالا و پخش هر خاصیت جایگاه ویژه ای در هر مورد دارد.

با وجود بررسی های متعدد انجام شده در زمینه جریان توربولانس، بررسی فرایند پدیده انتقال همچنان دارای نقاط ضعفی بوده و قوت کارهای انجام شده در زمینه سیالات را ندارد. همچنین با وجود روش های متعدد عددی برای بررسی جریان سیال، هنوز روش حل همزمان جریان توربولانس و پدیده انتقال به اندازه کافی توسعه نیافته است. به علاوه، سازگاری مدل سازی ها برای معادلات سیال با مدل سازی معادلات انتقال به طور کامل بررسی نشده است [۱].

روش LES یکی از روش های معتبر عددی برای حل جریان سیال است. از دید کاربردی این روش را می توان میانه ای بین روش RANS و DNS دانست. روش RANS به عنوان روشی معتبر در حل جریان سیال شناخته می شود، با وجود این، کاربرد آن در جریان های وابسته به زمان، اطلاعات مناسبی را درباره رفتار سیال به دست نمی دهد. روش DNS نیز با وجود داشتن دقت بالا، مشکلات متعددی در حل هندسه یا حالت های پیچیده داشته و در بعضی موارد، استفاده از آن ناممکن است. روش LES اولین بار در سال ۱۹۶۳ ارائه و در آن زمان برای بررسی های هواشناسی به کار گرفته می شد [۲]. اساس روش LES در حل مستقیم مقیاس های بزرگ و مدل سازی ریزمقیاس ها است. این کار بر دو پایه استوار است، اول اینکه تلفات در گردابه های بزرگ کم بوده و انرژی بیشتری را با خود حمل می کند و بنابراین از اهمیت بیشتری برخوردار است. دوم اینکه مدل سازی گردابه های کوچک به علت همگن بودن ابعاد و رفتار آنها

فیلتر در مدل اسماکورینسکی نامحسوس بوده اما در مدل‌های دینامیکی به صورت جدی مطرح می‌گردد. از آنجا که پارامتر مورد نیاز در مدل اسماکورینسکی (C_{SGS}) به صورت یک ثابت تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نوع فیلتراسیون معادلات حاکم اثر چندانی بر انتخاب آن نداشته و از معادلات نهایی فیلتر شده بدون توجه به نوع فیلتر، جهت حل میدان جریان استفاده می‌گردد.

شکل فیلتر شده معادلات حاکم برای سیال تراکم ناپذیر به شرح زیر می‌باشند:

۱- پیوستگی :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

۲- مومنتوم: که از تأثیر نیروی حجمی صرف نظر شده است.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

۳- انرژی: که از اتلاف ناشی از لزجت صرف نظر شده است.

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

۴- انتقال:

$$\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{\varphi}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

در این معادلات ν لزجت سینماتیکی، α ضریب نفوذ حرارت و D ضریب نفوذ خاصیت می‌باشند. عدد پرانتل (Pr) به صورت نسبت نفوذ مومنتوم به نفوذ حرارت $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ تعریف می‌شود.

بسیار آسان است. به علت حساسیت برقراری ارتباط بین این دو قسمت، موسوم به آشمار انرژی است که این ارتباط با مدل‌سازی ریز مقیاس‌ها صورت می‌گیرد.

روش LES در مدل‌سازی خاصیت‌های شناخته شده (حتی از نوع خنثی) با مشکلاتی روبرو است. زیرا در حالی که پخش بسیاری از خواص در مقیاس‌های لکولی صورت می‌گیرد، روش LES فقط به حل مقیاس‌های بزرگ جریان می‌پردازد. مدل‌سازی معادلات انتقال نیز به روش‌هایی صورت می‌گیرد که مدل‌های زیرشبکه^۱ نامیده می‌شوند. با کاربرد مدل‌های زیرشبکه می‌توان معادلات انتقال را حل و مقادیر لحظه‌ای مورد نظر را محاسبه کرد.

هدف از این تحقیق، کاربرد روش LES در حل میدان برای خاصیت خنثی در میدان جریان مغشوش سیال تراکم ناپذیر در دو بعد است. به این منظور، از مدل اسماکورینسکی برای مدل‌سازی جمله‌های ایجاد شده در معادله متوسط‌گیری شده (مکانی) انتقال و سازگار ساختن این مدل برای کاربرد برای میدان اسکالر، استفاده شده است.

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان مغشوش سیال تراکم ناپذیر نیوتنی شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انتقال است که در دو بعد نوشته شده و با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ با مدل زیر شبکه از نوع اسماکورینسکی حل شده‌اند. اساس روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ بر حل گردابه‌های بزرگ و مدل‌سازی گردابه‌های کوچک است که این کار با اعمال فیلتر بر معادلات حاکم صورت می‌گیرد. لذا، تأثیر استفاده از

1. SGS (Sub Grid Scale)

عدد بی بعد دیگری که در معادله انتقال کاربرد پیدا می کند، عدد اشمیت (Sc) است که به صورت نسبت نفوذ مومنتوم به نفوذ خاصیت $Sc = \frac{\nu}{D}$ تعریف می شود.

۳- روش عددی

اعمال فیلتر در معادلات متوسط گیری شده (مکانی) مومنتوم و انتقال به ایجاد ترم های غیرخطی $\overline{u_j u_j}$ ، $\overline{u_j \phi}$ منجر می گردد که امکان تفکیک و حل آن به روش مستقیم وجود ندارد. این ترم ها که به ترتیب ترم تنش رینولدز و شار اسکالر نامیده می شوند به صورت زیر نوشته می شوند:

$$\overline{u_j u_j} = \overline{u_i u_j} + \tau_{ij} \quad (5)$$

$$\overline{u_j \phi} = \overline{u_i \phi} + q_{ij} \quad (6)$$

جهت حل معادلات، لازم است که هر یک از ترم ها مدل شوند.

با استفاده از مدل اسمگورینسکی ترم ایجاد شده در معادله مومنتوم ($\overline{u_j u_j}$) که به عنوان تنش های رینولدز ریزشکه ای^۱ شناخته می شود به صورت زیر نوشته می شود:

$$\tau_{ij} = \overline{u_j u_j} - \overline{u_i u_j} \quad (7)$$

مدل های زیادی تا کنون جهت شبیه سازی این ترم ها پیشنهاد شده است؛ ولی معتبرترین و مناسب ترین مدل ها، مدل های وابسته به جریان و هندسه بوده و البته این موضوع همچنان به عنوان زمینه ای قوی جهت

تحقیقات از پتانسیل بالایی برخوردار است. همانطور که پیشتر نیز گفته شد یکی از مدل های که علی رغم سادگی نتایج خوبی در پی داشته و همچنان از کاربرد زیادی برخوردار است، مدل اسمگورینسکی است که یکی از مدل های لزجت گردابه ای بوده و در این کار نیز مورد استفاده قرار گرفته است. اساس مدل اسمگورینسکی استفاده از هندسه و خصوصیات جریان جهت مدل سازی نبوده و ثابت (C_{SGS}) موجود در معادلات بدون مدل سازی و به صورت یک ثابت تجربی مورد استفاده قرار می گیرد. به این ترتیب بر اساس مدل اسمگورینسکی می توان ترم تنش رینولدز را به صورت زیر نوشت:

$$\tau_{ij} = -2\nu_t \overline{S_{ij}} \quad (8)$$

ν_t یا ν_{SGS} لزجت گردابه ای ریزمقیاس و $\overline{S_{ij}}$ تانسور نرخ کرنش از معادله های زیر بدست می آیند:

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$\nu_t = k_v \Delta^2 |\overline{S}| \quad (10)$$

که مقدار k_v نیز طبق رابطه زیر محاسبه میشود:

$$k_v = (C_{SGS})^2 \quad (11)$$

ثابت اسمگورینسکی است که ثابتی تجربی بوده و در هر مساله به طور خاص و بنابر موارد تجربه شده قبلی فرض می گردد. با این وجود محدود ۰/۵-۰/۱ در اغلب مسایل جواب مناسبی در برداشته است. مقدار فرض شده در این مساله برابر $C_{SGS}=0.1$ بوده که مطابقت خوبی با نتایج تجربی در پی داشته است.

1. SGS Reynolds stress

$$D_T = \frac{v_t}{Sc_t} \quad (15)$$

در مدل اسماکورینسکی Sc_t (عدد اشمیت توربولانس) یک ثابت تجربی است که در هر مساله به یک صورت و بسته به تجربه و نظر کاربر استفاده می‌گردد. به طور معمول برای جریان هوا مقدار Sc_t در محدوده ۰.۵ - ۰.۷ در نظر گرفته می‌شود. در اکثر موارد مقدار ۰.۷ پیشنهاد می‌شود که همین مقدار برای مساله حاضر نیز در نظر گرفته شده است [۴].

۴- شرایط مرزی

شرایط مرزی در روش گردابه‌ای بزرگ از اهمیت زیادی برخوردار است. در معادله مومنتوم شرط مرزی عدم لغزش^۱ در تمام دیوارها در نظر گرفته شده است، به عبارت دیگر سرعت مماس بر دیواره برابر صفر قرار داده شده است و همچنین دیوارها غیر قابل نفوذ فرض شده‌اند. برای هندسه حفره^۲، سرعت افقی برای دیوار بالایی^۳ در نظر گرفته شده و در تمام دیوارها نیز همانطور که ذکر شد از شرط عدم لغزش استفاده گردیده است. در هندسه پله شرط ورودی به صورت سرعت ورودی^۴ و سهمی وار لحاظ شده است. همچنین شرط مرزی پایین دست در هندسه پله به صورت جریان توسعه یافته^۵ فرض شده و به این ترتیب از رابطه $\frac{\partial u}{\partial x}|_{outlet} = 0$ در خروجی استفاده گردیده است. در حل معادله انتقال در پله نیز شرایط اولیه برای اسکالر (به عنوان مثال غلظت) برابر صفر لحاظ شده است. مقدار اسکالر، در ورودی پله برابر^۱ منظور شده و در دیوارهای دیگر، مقدار اسکالر به اندازه مقدار اولیه و برابر صفر ثابت شده است.

1. No Slip Boundary condition
2. Cavity
3. Top wall
4. Inlet velocity
5. fully developed

$\bar{\Delta}$ مقیاس طول یا عرض فیلتر است که با اندازه شبکه در نظر گرفته شده در ارتباط است. برای حاسبه $\bar{\Delta}$ روابط مختلفی مطرح شده است که با توجه به نظر کاربران مورد استفاده قرار گرفته است. معمولاً $\bar{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ از متوسط‌گیری هندسی ابعاد شبکه به دست می‌آید.

$\bar{S}_{ij}$ در معادله (۹) ماهیت تانسوری داشته و در هر نقطه به صورت یک ماتریس 3×3 با ۹ عضو تعریف می‌شود که i و j نشان دهنده جهات مختلف می‌باشند. همچنین $|\bar{S}|$ معرف اندازه تانسور S در هر نقطه است که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad (12)$$

ترم شار اسکالر که به صورت $q_j = \overline{u_j \phi} - \bar{u}_j \bar{\phi}$ تعریف می‌شود، نشان‌دهنده تاثیر ریزمقیاس‌ها بر پدیده انتقال می‌باشد. در این کار جهت مدل‌سازی ترم مذکور از مدل اسماکورینسکی استفاده شده که از سازگاری بیشتری با نحوه مدل‌سازی معادلات مومنتوم برخوردار است و نتایج خوبی در برداشته است. به این صورت روش مورد استفاده جهت جداسازی مشابهت زیادی به روش اسماکورینسکی مورد استفاده در مورد ترم تنش رینولدز داشته است. در اینجا نیز همانند قبل مدل‌سازی مستلزم کاربرد عدد ثابتی است که در هر معادله بسته به متغیرهای موجود تعریف می‌شود.

$$q_j = \overline{u_j \phi} - \bar{u}_j \bar{\phi} \quad (13)$$

در معادله انتقال q_j به این صورت محاسبه می‌گردد.

$$q_j = -D_T \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \quad (14)$$

که D_T از رابطه کلی زیر به دست می‌آید [3]:

۵- بررسی اعتبار مدل

جهت بررسی اعتبار حل جریان داخل حفره و جریان پشت پله مورد استفاده قرار گرفته است که نتایج مربوط به حفره در اینجا مورد بحث قرار گرفته است.

۵-۱- جریان داخل حفره

حفره از هندسه‌های پرکاربردی است که معمولاً به دلیل سادگی جهت مقایسه انتخاب می‌گردد. حفره مورد استفاده در این کار مانند شکل زیر می‌باشد که در آن دیواره بالایی به صورت یک دیوار متحرک^۱ در نظر گرفته شده است.

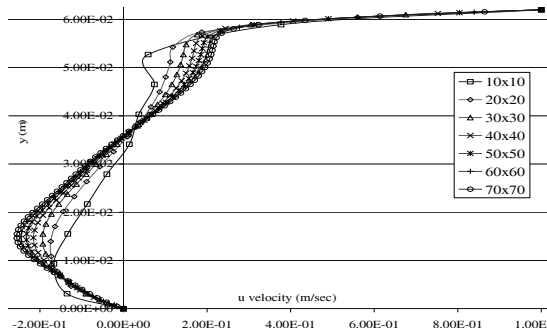


شکل ۱ جریان داخل حفره (Cavity)

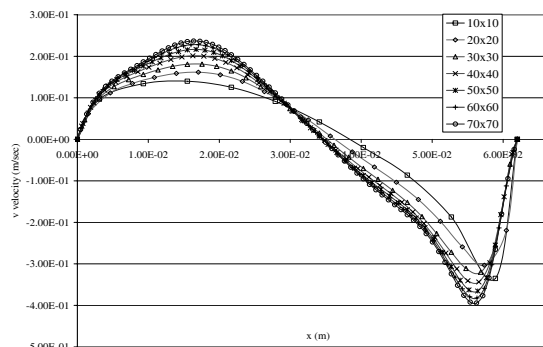
۵-۱-۱- استقلال نتایج از شبکه محاسباتی

با ریز کردن شبکه محاسباتی انتخابی، حل عددی به جواب‌های بهتری نایل شده و جواب‌های حاصل مطابقت بیشتری با نتایج آزمایشگاهی پیدا می‌کنند.

نمودارهای ۲ و ۳ نتایج ریز نمودن گرید انتخابی در هندسه حفره برای $Re=1000$ را نشان می‌دهد.



شکل ۲ استقلال حل سرعت افقی از شبکه محاسباتی حفره

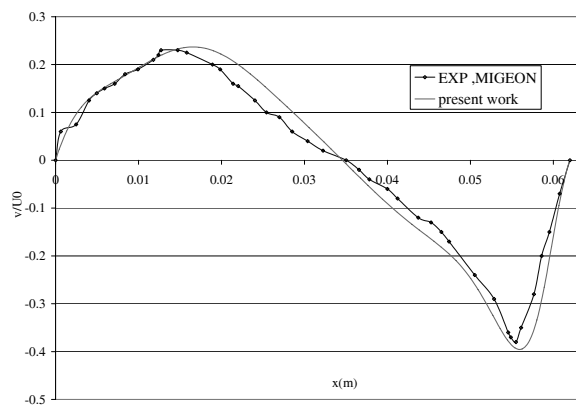


شکل ۳ استقلال حل سرعت عمودی از شبکه انتخابی حفره

مقادیر سرعت افقی^۲ در وسط حفره و در امتداد محور عمودی با انتخاب شبکه‌های محاسباتی مختلف به دست آمده است. همانطور که از نمودار نیز برمی‌آید با ریز نمودن شبکه، جواب‌ها به سمت یک مقدار مشخص میل می‌کنند و بنابراین از شبکه 70×70 جهت محاسبات بعدی استفاده گردیده است. مشابه این عملیات برای سرعت عمودی نیز به کار رفته و با کاربرد شبکه‌های مختلف مقدار سرعت عمودی در خط تقارن افقی حفره محاسبه گردیده است.

2. u velocity

1. Moving Wall



شکل ۵ مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و حل سرعت عمودی در محور تقارن افقی حفره

مقدار لحظه‌ای مولفه افقی سرعت در خط تقارن عمودی حفره به دست آمده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است (شکل ۵). به همین ترتیب مقدار لحظه‌ای مولفه عمودی سرعت در خط تقارن افقی نیز محاسبه شده و نتایج مقایسه آن با مقادیر آزمایشگاهی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که از این دو نمودار برمی آید، نتایج حل عددی از همخوانی مناسبی با مقادیر آزمایشگاهی مشابه برخوردار می باشد.

۶- نتیجه گیری و بحث

نوع خاصیت متقل شونده با ضریب نفوذ یا ضریب پخش آن خاصیت در سیال مشخص می گردد. همانطور که پیشتر نیز گفته شد، در این رابطه عدد اشمیت^۱ (Sc) که مشخص کننده نسبت نفوذ مومتموم به نفوذ خاصیت می باشد، تعریف می گردد که مشخص کننده نوع خاصیت متقل شونده است.

۶-۱- تاثیر Re بر انتقال

نمودارهای شکل ۶ نشان دهنده فرآیند انتقال در جریان پشت پله می باشند. شبیه سازی فرآیند انتقال برای سه عدد Re انجام شده و

در شکل ۳، نتایج برای شبکه های مختلف نشان داده است و همانند قبل شبکه ۷۰×۷۰ به عنوان شبکه محاسباتی در نظر گرفته شده جهت تحلیل های بعدی مورد استفاده قرار گرفته است.

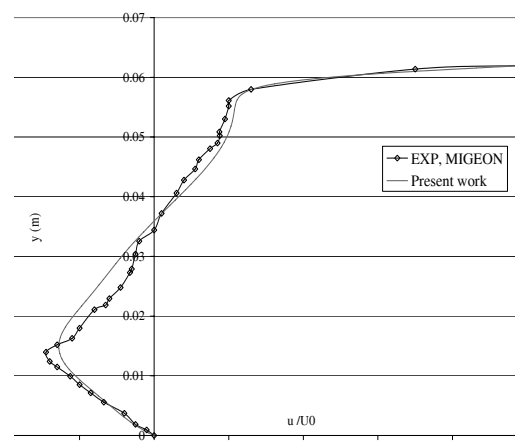
۵-۱-۲- اعتبار نتایج

جهت بررسی اعتبار نتایج و اطمینان از نحوه کار برنامه، از مقادیر آزمایشگاهی مشابه جهت مقایسه استفاده گردیده است [۵]، [۶]، [۷]. مشخصات حفره در نظر گرفته شده در نمونه آزمایشگاهی در جدول ۱ دیده می شود.

جدول ۱ مشخصات حفره در نمونه آزمایشگاهی

عرض (B)	ارتفاع (H)	چگالی	لزجت
m	m	kg/m ³	(Nm/sec)
۰/۰۶۲	۰/۰۶۲	۱۰۰۰	۰/۰۰۱۱۶

مقدار Re با توجه به ابعاد بالا و خصوصیات فیزیکی سیال برابر ۱۰۰۰ به دست می آید.



شکل ۴ مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و حل سرعت افقی در محور تقارن عمودی حفره

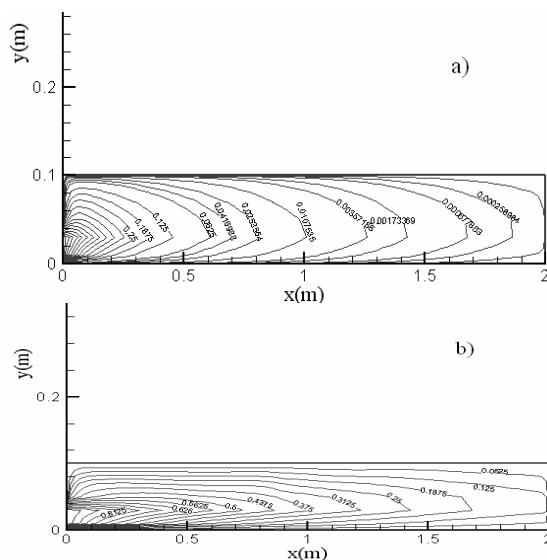
1. Schmidt Number

افزایش عدد Re سبب افزایش توربولانسی شده و افزایش انتقال اسکالر را در پی دارد. افزایش آشفتگی با افزایش اغتشاشات در مقیاس‌های مولکولی سبب بهبود انتقال می‌گردد که از نتایج این قسمت نیز برمی‌آید.

۶-۱- تأثیر Sc

در این قسمت تأثیر عدد Sc بر میزان انتقال بررسی شده است. با ثابت نگه داشتن Re و دیگر مشخصات حل، عدد Sc تغییر داده شده و تأثیر آن بر پدیده انتقال نشان داده شده است.

عدد Sc مشخص کننده نسبت نفوذ مومستوم به نفوذ خاصیت می‌باشد. همانطور که انتظار نیز می‌رود، افزایش عدد Sc سبب گردیده که عمق نفوذ خاصیت بیشتر شده و به عبارتی خطوط هم‌اسکالر تیزتری حاصل شود. دلیل این اتفاق این است که با افزایش Sc تأثیر سرعت بیشتر شده و ترم‌های جابجایی^۱ اثر بیشتری نسبت به ترم‌های پخش^۲ پیدا می‌کنند که در مجموع سبب می‌گردد اسکالر عمق نفوذ بیشتری پیدا کند.

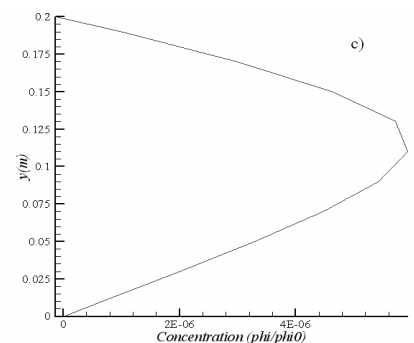
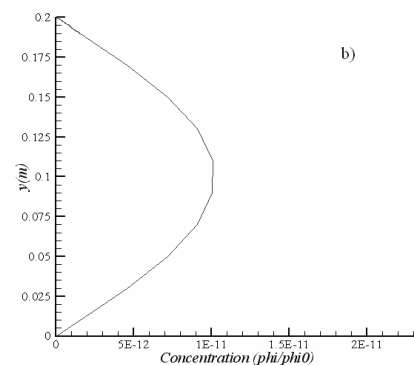
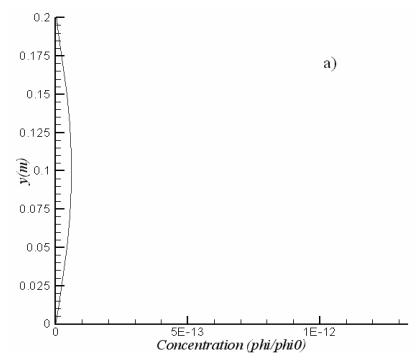


شکل ۷ توزیع خاصیت اسکالر برای $Re=1000$

a) $Sc=0.02$, b) $Sc=0.1$

نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. مقدار پی‌بعد متوسط‌گیری شده زمانی اسکالر در خط عمودی مرکزی هندسه آورده شده و برای شرایط مختلف نشان داده شده است.

همانطور که از نمودارها نیز برمی‌آید، افزایش عدد Re با یکسان ماندن هندسه، عدد $Sc = 0.01$ و دیگر مشخصات جریان سبب افزایش انتقال خاصیت شده است.



شکل ۶ تأثیر عدد Re بر انتقال خاصیت در جریان پشت پله

a) $Re=400$, b) $Re=1000$, c) $Re=4000$

1. Convective
2. Diffusion

- [2] J. Smagorinsky, "General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiments" J. Mon Weather Rev. 91, pp.99-164, 1963
- [3] Brendon Hall, Eckart Meiburg. Large Eddy Simulation of Particle Driven Gravity Currents. Department of Mechanical and Environmental Engineering University of California, Santa Barbara.
- [4] M.S. Ying Huai. Large Eddy Simulation in the Scalar Field. Dem Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des Titelseines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte
- [5] C. MIGEON, A. TEXIER AND G. PINEAU. EFFECTS OF LID-DRIVEN CAVITY SHAPE ON THE FLOW ESTABLISHMENT PHASE, Journal of Fluids and structure, (2000) 14, 469-488
- [6] Nie, J.H., Armaly, B.F. Int. J. Heat Mass Transfer, 47: 4713-4720 (2004).
- [7] J.H. Nie, B.F. Armaly. Reverse flow regions in three dimensional backward facing step flow. International journal of heat and mass transfer, 1-8.

به عبارت دیگر با افزایش Sc کانتورهای اسکالر شکل سهموی بیشتری به خود گرفته و اثر سرعت بیشتر از اثر نفوذ گشته است. در واقع می توان اینگونه بیان نمود که با افزایش عدد Sc جریان مقدار بیشتری از خاصیت را با خود همراه می برد.

۷- نتیجه گیری

تعمیم توانایی حل معادلات حرکت (پیوستگی و مومنتم) به معادله انتقال یک خاصیت خشی با استفاده از روش گردابه های بزرگ، این نوید را می دهد که بتوان اختلاط و در نهایت پدیده احتراق را با استفاده از یک روش سازگار ممکن نمود. چون عدد رینولدز جریان در محدوده قابل مقایسه با اندازه گیری های آزمایشگاهی انتخاب شده است، لذا دقت نتایج حاصل نیز بسیار خوب بوده و انحراف زیادی دیده نمی شود.

۸- منابع

- [1] D.C. Wilcox, "Turbulence modeling for CFD", California, DCW Industr. Inc., 1993