

بررسی تأثیر عرض فیلتر روی مقادیر جذر میانگین مربعی^۱ اغتشاشات عرضی و طولی سرعت و تنش‌های برشی رینولدزی در شبیه‌سازی عددی دو بعدی لایه اختلاط^۲ مغشوش

احمد علی سهرابی
استادیار

سید سلمان نورآذر
استادیار

امیرعباس گنجایی ساری
فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله لایه اختلاط مغشوش در اعداد رینولدز بالا به روش گردابه‌ها بررسی شده است. برای این منظور ابتدا معادله گردابه‌ها از معادلات بقاء به دست آمده و سپس این معادله تحت اثر فیلتر قرار می‌گیرد تا اثر اغتشاش جریان نیز منظور شود. هدف اصلی در اینجا بررسی اثر عرض فیلتر بر اطلاعات آماری به دست آمده، یعنی ریشه میانگین مربعی اغتشاشات عرضی و طولی سرعت و تنش‌های برشی رینولدزی، می‌باشد. در این کار تحقیقی، نتایج نشان می‌دهد که مقادیر حداکثر ریشه میانگین مربعی اغتشاشات عرضی و طولی سرعت و تنش‌های برشی رینولدزی برای حالتی که عرض فیلتر به طور خطی تغییر می‌کند به نتایج آزمایشی [۱۰] نزدیکتر است.

Investigation of the filter width on the Root-Mean Square of Turbulence Intensities in a Two-Dimensional Mixing-Layer Flow

S. S. Nourazar
Assistant Professor

A.A. Sohrabi
Assistant Professor

A.A. Ganjaee-Sari
Graduate Student

Mechanical Eng. Dept. Amirkabir Univ. of Tech.

Abstract

The root-mean square (rms) of the turbulence intensities for a two-dimensional (2-d) mixing - layer flow has been obtained using the large-eddy simulation (les). The vorticity equation has been filtered and the sub-grid stresses have been modelled using the sub-grid scale vorticity model. The filter width

has been chosen to vary linearly along the downstream coordinate of the mixing layer.

The simulation has been done for the constant filter width and the filter width varying linearly along downstream coordinate. The results of the simulation with the linear variation of filter width show better agreement with the experiment than the results of the simulation with constant filter width.

مقدمه

جریان لایه اختلاط وقتی ایجاد می شود که دو جریان از سیال با دو سرعت متفاوت به هم رسیده و برخورد نمایند. ذراتی که در سطح تماس دو سیال قرار دارند به خاطر گرفتن دو سرعت در یک آن، علاوه بر انتقال دور خود شروع به چرخیدن می نمایند. این چرخش به شکل یک لایه در طول جریان گسترش می یابد. به این گسترش لایه اختلاط گفته می شود. این جریان در محفظه احتراق موشک های سوخت مایع و یا محفظه احتراق موتورهای جت و اتومبیل ها و در پشت بال هواپیماها و در بسیاری از مواضع دیگر که مورد استفاده در صنعت می باشند، ایجاد می شود. از این جهت بررسی لایه اختلاط به خصوص حالت مغشوش آن دارای اهمیت است. هدف اصلی در این مقاله بررسی اثر عرض فیلتر روی اطلاعات آماری به دست آمده، یعنی ریشه میانگین مربعی اغتشاشات عرضی و طولی سرعت و تنش های رینولدزی، می باشد. لیکن برای ورود به این مبحث باید ابتدا لایه اختلاط را بررسی نمود. سپس، بعد از ایجاد جریان دائم در خلال چهار هزار فاصله زمانی اطلاعات آماری برداشته می شوند. بنابراین برای ورود به بحث اصلی ابتدا روش حل لایه اختلاط مغشوش بررسی شده و سپس نتایج گرفته شده مورد نقد و بررسی قرار می گیرند.

معادلات حاکم بر جریان لایه اختلاط

معادلات حاکم بر جریان عبارتند از معادلات زیر:

$$u_{i,i} = 0.0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial t} + u \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + v \frac{\partial \omega_x}{\partial y} = u \left(\frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

معادله (۱) معادله پیوستگی و معادله (۲) معادلات ناویراستوکس هستند. با اثر دادن عملگر کرل^۳ روی معادلات ناویراستوکس می توان معادله گردابه را به شرح زیر یافت.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} = \nu u_{i,jj} - \frac{1}{\rho} P_{,j} \quad (3)$$

که u, v به ترتیب مؤلفه های سرعت در امتداد x, y می باشند و ν ضریب لزجت سینماتیکی سیال که در اینجا آب می باشد بوده و ω_x مؤلفه های رتیسیت در امتداد عمود بر صفحه جریان است.

با اثر دادن فیلتر (معادله (۴)) روی معادله گردابه، یعنی متوسط گیری، معادله (۵) نتیجه خواهد شد. با چشم پوشی از دو جمله آخر و مدل نمودن مؤلفه های شبکه کمکی^۴ توسط اصل لزجت گردابه ای^۵ معادلات (۶) و (۷) و (۸) نتیجه خواهند شد.

$$\bar{f} = \int_{-\infty}^{\infty} G(X - \hat{X}) f(X, t) d\hat{X}$$

$$G(X) = \frac{1}{\Delta_\lambda} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{\omega}_x}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\omega}_x}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\omega}_x}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{\omega}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\omega}_x}{\partial y^2} \right)$$

$$- \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}' \bar{\omega}_x') - \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}' \bar{\omega}_x')$$

$$- \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}' \bar{\omega}_x') - \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}' \bar{\omega}_x')$$

$$- \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}' \bar{\omega}_x') - \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}' \bar{\omega}_x')$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}' \bar{\omega}_x') + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}' \bar{\omega}_y') \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{\omega}_x}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\omega}_x}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\omega}_x}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{\omega}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\omega}_x}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial Y}{\partial x} - \frac{\partial Z}{\partial y} \quad (6)$$

که در این معادله:

$$\frac{\partial \psi(i, N)}{\partial x} = 0.0, \quad i = 1, M \quad (10)$$

با حل معادله پواسون مقدار تابع جریان در هر نقطه از شبکه مشخص می‌شود و از اینجا می‌توان سرعت را در هر نقطه تعیین نمود. البته برای محاسبه سرعت در هر نقطه ابتدا سرعت را در روی نقاط شبکه محاسبه می‌کنیم و از راه میانمایی درجه دو به شرح زیر و باتوجه به شکل (۲) سرعت را در نقاط مختلف میدان می‌توان به دست آورد:

$$u_{x,y} = \frac{A_1 \times u_{i,j} + A_2 \times u_{i,j+1} + A_3 \times u_{i+1,j+1} + A_4 \times u_{i+1,j}}{A}$$

$$V_{x,y} = \frac{A_1 \times V_{i,j} + A_2 \times V_{i,j+1} + A_3 \times V_{i+1,j+1} + A_4 \times V_{i+1,j}}{A} \quad (11)$$

حال با داشتن سرعت در هر نقطه و فرض حرکت یکنواخت برای گردابه‌های مذکور جابجایی آنها در اثر سرعت‌های محاسبه شده، تعیین می‌شود. این عمل آذقدر تکرار می‌شود که حالت یکنواخت ایجاد شود. سپس برداشتن اطلاعات آماری شروع می‌شود.

حل معادله نفوذ به روش حرکت اتفاقی

برای حل معادله نفوذ به روش حرکت اتفاقی می‌بایست که اعداد اتفاقی با توزیع یکنواخت و با شرایط زیر تولید شده و مقادیر آنها به عنوان جابجایی در راستای افق و قائم به گردابه‌ها داده شود. اما شرایط اعداد اتفاقی مذکور:

$$\sigma = 2 (v + v_T) \Delta t \quad (12)$$

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i}{n} = 0.$$

که v ضریب لزجت سینماتیکی سیال و v_T ضریب لزجت گردابه‌ای سیال و η_i اعداد اتفاقی تولید شده در راستاهای افق و قائم و $\bar{\eta}$ متوسط اعداد اتفاقی تولید شده که می‌باید صفر باشد و σ پراش اعداد اتفاقی تولید

$$Y = (\bar{u} \omega'_x + \bar{u}' \bar{\omega}_x + \bar{u}' \omega'_x) = -v_T \frac{\partial \bar{\omega}_x}{\partial x}$$

$$Z = (\bar{V} \omega'_x + \bar{V}' \bar{\omega}_x + \bar{V}' \omega'_x) = -v_T \frac{\partial \bar{\omega}_x}{\partial y} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \bar{\omega}_x}{\partial t} + (\bar{u} - \frac{\partial v_T}{\partial x}) \frac{\partial \bar{\omega}_x}{\partial x} + (\bar{V} - \frac{\partial v_T}{\partial y}) \frac{\partial \bar{\omega}_x}{\partial y} =$$

$$(v + v_T) \frac{\partial^2 \bar{\omega}_x}{\partial x^2} + (v + v_T) \frac{\partial^2 \bar{\omega}_x}{\partial y^2} \quad (8)$$

معادله پواسون با اثر دادن تعاریف سرعت‌های افقی و قائم برحسب تابع جریان^۶ در تعریف گردابه فیلتر شده^۷ به دست می‌آید.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0.0 \quad (9)$$

روش حل مسئله

برای حل مسئله باید ابتدا میدان حلی مطابق شکل (۱) در نظر گرفته و به شبکه نشان داده شده، شکسته شود. در لحظه ابتدایی روی خط میانی یک صفحه گردابه ایجاد می‌شود که برای مدل نمودن آن از گردابه‌های متمرکز که روی خط میانی قرار خواهند گرفت، استفاده می‌شود. معادله گردابه‌ها که در بالا به دست آمد از روش شکسته شدن^۸ به معادلات نفوذ و جابجایی^۹ حل می‌شود. برای حل معادله نفوذ از روش حرکت اتفاقی استفاده شده است. برای حل معادله جابجایی ابتدا معادله پواسون حل می‌شود. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای حل معادله پواسون به صورت زیر می‌باشد:

$$\psi(1, j) = 0.0, \quad j = 1, N$$

$$\psi(i, 1) = \int_0^{y_i} U dy, \quad i = 1, M$$

$$\psi(M, j) = \int_0^{y_j} U dy, \quad j = 1, N$$

شده است. برای محاسبه مقدار ضریب لزجت گردابه‌ای^{۱۰} از مدل گردابه که توسط آقای منصور^{۱۱} در سال ۱۹۷۹ ارائه شده است استفاده می‌شود.

$$v_T = (C_v \Delta_A) |\overline{\omega}_x| \quad (13)$$

$$C_v = 0.21 \quad (14)$$

که در این رابطه C_v یک ثابت Δ_A [۵] عرض فیلتر و $|\overline{\omega}_x|$ مقدار گردابه در هر نقطه است. در این مقاله هدف بررسی اثر دو روش متفاوت برای محاسبه عرض فیلتر است. روش اول محاسبه عرض فیلتر روش خطی و دومین روش، روش مقدار ثابت است، که رابطه آنها به شرح زیر می‌باشد:

$$\Delta_A = 0.015 \times x$$

$$\Delta_A = 10.0 \times H \quad (15)$$

که مقدار H فاصله اولیه گردابه‌ها از هم است و x مقدار طول هر نقطه از مبدأ مختصات می‌باشد.

بحث و نتیجه‌گیری، مقایسه اطلاعات محاسبه شده با مقادیر آزمایشی

همانطوری که در بالا ذکر شد در حل مسئله ابتدا برنامه چهار هزار فاصله زمانی اجرا شده سپس برداشت اطلاعات آماری شروع شد. در هر یک از این فواصل زمانی، تک تک گردابه‌ها بر طبق رابطه (۱۶) جابجا نموده و سپس مکان گردابه‌ها رسم گردیده‌اند. در شکل (۳) مکان گردابه‌ها^{۱۲} بعد از گذشت ۳۲۰۰، ۳۴۰۰، ۳۶۰۰، ۳۸۰۰ و ۴۰۰۰ فاصله زمانی نشان داده شده است. با تأمل در نمودارهای نشان داده شده می‌توان شکل‌گیری یک گردابه بزرگ متشکل از گردابه‌های نقطه‌ای و متمرکز را مشاهده نمود.

$$\Delta x = u \cdot \Delta t$$

$$\Delta y = v \cdot \Delta t \quad (16)$$

در شکل‌های (۴) و (۵) مقادیر به دست آمده از

برنامه برای تنش‌های برشی رینولدزی در دو حالت مدل خطی و مدل ثابت بر طبق رابطه (۱۰) نمایش داده شده است.

همانطوری که مشاهده می‌شود تشابه^{۱۳} بین مقادیر به دست آمده بسیار قابل توجه است. مقادیر ارائه شده در فواصل ۴۵، ۵۰ و ۵۵ سانتیمتری می‌باشند. در شکل‌های (۶) و (۷) و (۸) و (۹) نیز به ترتیب مقادیر ریشه میانگین مربعی اغتشاشات طولی و عرضی سرعت برای دو مدل گفته شده در بالا نمایش داده شده است. شباهت بسیار مناسب بین این مقادیر در طول‌های ۴۵ و ۵۰ و ۵۵ سانتیمتر قابل بررسی است و البته نشان دهنده روش مناسب و صحیح محاسبات است که البته به علت خطاهای غیر قابل چشم‌پوشی اختلافاتی بین مقادیر آزمایشی و مقادیر محاسبه شده از برنامه مشاهده می‌شود.

اطلاعات محاسبه شده عبارت از تنش‌های رینولدزی و ریشه میانگین مربعی اغتشاشات عرضی و طولی هستند. با توجه به اینکه در آزمایش [۱۰] مبدأ لایه اختلاط بر مبدأ محورهای مختصات منطبق نمی‌باشد، در حالی که در تشابه‌سازی حاضر مبدأ محورهای مختصات و مبدأ لایه اختلاط بر هم منطبق فرض شده است، لذا مقایسه تک تک نقاط تشابه‌سازی با آزمایش [۱۰] امکان‌پذیر نبوده است. به همین دلیل مقایسه مقادیر تشابه‌سازی با آزمایش براساس مقایسه مقادیر ماکزیمم‌ها قرار گرفته است. اطلاعات آماری داده شده به شکل نرمال شده ارائه شده‌اند که برای نرمال نمودن آنها از عامل ΔU استفاده شده است، که:

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (17)$$

برای تنش‌های رینولدزی از $(\Delta U)^2$ و برای ریشه میانگین مربعی اغتشاشات سرعت عرضی و طولی از ΔU استفاده شده است. اطلاعات آماری محاسبه شده در مکان‌های ۴۵ و ۵۰ و ۵۵ سانتیمتر از مبدأ مختصات محاسبه می‌شوند. در جدول‌های زیر مقادیر تنش‌های رینولدزی و ریشه میانگین مربعی اغتشاشات عرضی و طولی سرعت در مکان‌های فوق‌الذکر آمده‌اند. در هر یک از این مکان‌ها دو مدل مذکور برای عرض فیلتر، یعنی مدل خطی و مدل ثابت، به کار رفته‌اند که نتایج آنها ذیلاً ارائه می‌شود.

جدول (۱) تنش های برشی رینولدزی نرمال شده

| مقدار تنش رینولدزی ازمایشی | مقدار تنش رینولدزی در فاصله ۵۵ سانتیمتر | مقدار تنش رینولدزی در فاصله ۵۰ سانتیمتر | مقدار تنش رینولدزی در فاصله ۴۵ سانتیمتر | مدل به کار رفته برای عرض فیلتر |
|-------------------------------|--|--|--|-----------------------------------|
| ۱۳۷/۵ | ۵۸/۰ | ۶۵/۰ | ۶۷/۵ | مدل خطی |
| ۱۳۷/۵ | ۵۰/۰ | ۵۸/۰ | ۵۸/۰ | مدل ثابت |

جدول (۲) ریشه میانگین مربعی اغتشاشات عرضی سرعت نرمال شده

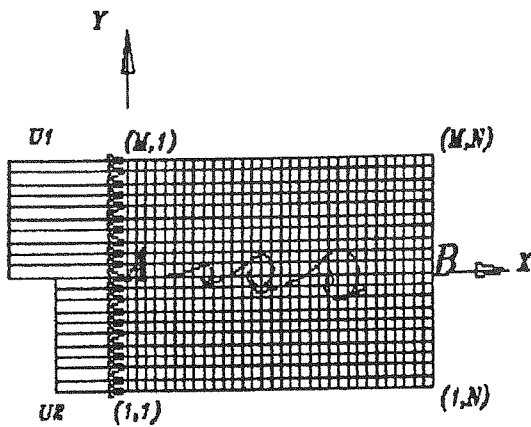
| مقدار ریشه میانگین مربعی اغتشاشات سرعت آزمایشی | مقدار ریشه میانگین مربعی اغتشاشات سرعت فاصله ۵۵ سانتیمتر | مقدار ریشه میانگین مربعی اغتشاشات سرعت فاصله ۵۰ سانتیمتر | مقدار ریشه میانگین مربعی اغتشاشات سرعت فاصله ۴۵ سانتیمتر | مدل به کار رفته برای عرض فیلتر |
|--|--|--|--|-----------------------------------|
| ۰/۱۴۵ | ۰/۱۰۲۵ | ۰/۱۰۷۵ | ۰/۱۲۵ | مدل خطی |
| ۰/۱۴۵ | ۰/۰۹۹ | ۰/۱۰۲۵ | ۰/۱۱ | مدل ثابت |

جدول (۳) ریشه میانگین مربعی اغتشاشات طولی سرعت نرمال شده

| مقدار ریشه میانگین مربعی اغتشاشات سرعت آزمایشی | مقدار ریشه میانگین مربعی اغتشاشات سرعت فاصله ۵۵ سانتیمتر | مقدار ریشه میانگین مربعی اغتشاشات سرعت فاصله ۵۰ سانتیمتر | مقدار ریشه میانگین مربعی اغتشاشات سرعت فاصله ۴۵ سانتیمتر | مدل به کار رفته برای عرض فیلتر |
|--|--|--|--|-----------------------------------|
| ۰/۱۷ | ۰/۱۰۵ | ۰/۱۰۷۵ | ۰/۱۰۷۵ | مدل خطی |
| ۰/۱۷ | ۰/۱۰۲۵ | ۰/۱۰۵ | ۰/۱۰۵ | مدل ثابت |

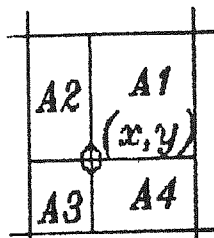
نتیجه گیری

- به طور خلاصه نتیجه های به دست آمده از بررسی به عمل آمده بالا را می توان در چند نکته زیر بیان نمود:
- ۱- مدل خطی برای عرض فیلتر نسبت به مدل ثابت دارای جواب های نزدیک تر به آزمایش می باشد.
 - ۲- از آنجا که بالادست جریان زمان کمتری برای رسیدن به حالت ثابت لازم دارد، دارای جواب های نزدیک تر به آزمایش نسبت به پایین دست جریان می باشد.
 - ۳- در محاسبات انجام شده اختلاف مقادیر تنش های برشی رینولدزی با آزمایش نسبت به اختلاف مقادیر ریشه میانگین مربعی اغتشاشات طولی سرعت با آزمایش و اختلاف مقادیر ریشه میانگین مربعی اغتشاشات طولی سرعت با آزمایش نسبت به اختلاف مقادیر ریشه میانگین مربعی اغتشاشات عرضی سرعت با آزمایش بزرگ تر می باشد.



شکل (۱) شبکه و مختصات در نظر گرفته شده برای حل

$$4(i+1, j) \quad 3(i+1, j+1)$$



$$1(i, j) \quad 2(i, j+1)$$

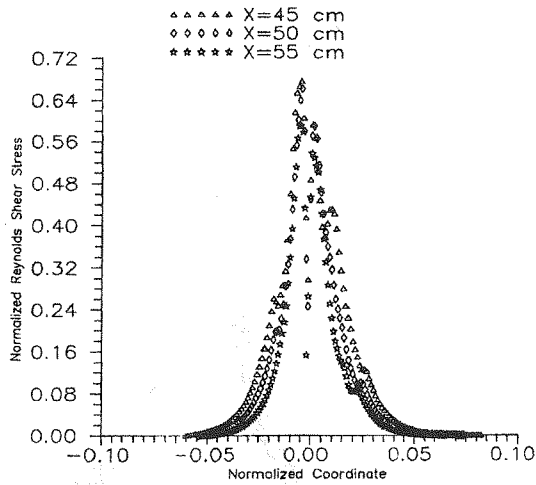
شکل (۲) روش میانجیابی درجه دو برای محاسبه مقدار گردابه در روی نقاط شبکه و مقدار سرعت برای گردابه ها

همان طوری که از مقادیر داخل جدول مشاهده می شود، مقادیر تنش های رینولدزی هر چه به سمت بالا دست جریان پیش روی شود، از مقادیر آزمایشی دورتر می شوند. اما در بهترین حالت هنوز مقادیر محاسباتی چهل و دو صدم (۰/۴۲) مقادیر آزمایشی هستند. برای مدل خطی در پایین دست جریان خطای محاسبات حدوداً ۵۱٪ و در بالا دست جریان خطای محاسبات حدوداً ۵۸٪ می باشد. برای مدل ثابت در پایین دست جریان خطای محاسبات حدوداً ۵۸٪ بوده در حالی که در بالا دست جریان خطای محاسبات تقریباً ۶۳/۶٪ نسبت به آزمایش است.

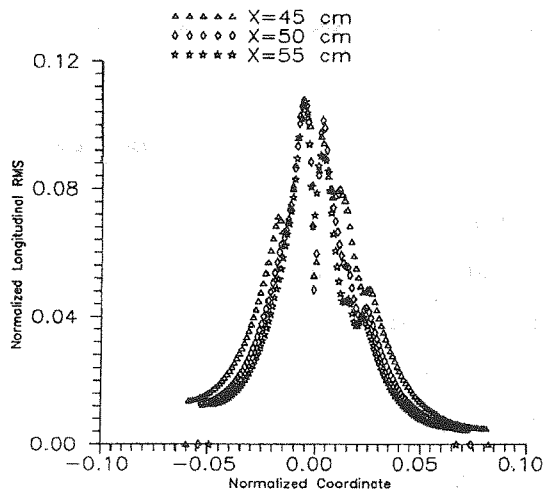
برای مقادیر ریشه میانگین مربعی اغتشاشات عرضی و طولی سرعت اختلاف با مقادیر آزمایشی بسیار کمتر است. مقادیر ریشه میانگین مربعی اغتشاشات طولی سرعت در پایین دست جریان برای حالت مدل خطی، خطای حدوداً ۲۷٪ و در بالا دست جریان خطای تقریباً ۲۸/۲٪ را نسبت به مقادیر آزمایشی دارند. در حالی که برای مدل ثابت در پایین دست جریان خطای حدوداً ۲۸/۲٪ و در بالا دست جریان خطای تقریباً ۳۹/۷٪ می باشد. برای مقادیر ریشه میانگین مربعی اغتشاشات عرضی سرعت در پایین دست جریان برای حالت مدل خطی، خطای حدوداً ۱۳/۸٪ و در بالا دست جریان خطای تقریباً ۲۹/۳٪ را نسبت به مقادیر آزمایشی دارند. در حالی که برای مدل ثابت در پایین دست جریان خطای حدوداً ۲۴/۱٪ و در بالا دست جریان خطای تقریباً ۳۱/۷٪ می باشد.

بنابراین ملاحظه می شود که وقتی که مقدار عرض فیلتر براساس مقدار آشفتگی و اغتشاشات جریان تعیین می شود، مدل خطی مدل بهتری نسبت به حالت دیگر مورد بحث، یعنی مقدار ثابت برای عرض فیلتر، در دسترس قرار می دهد.

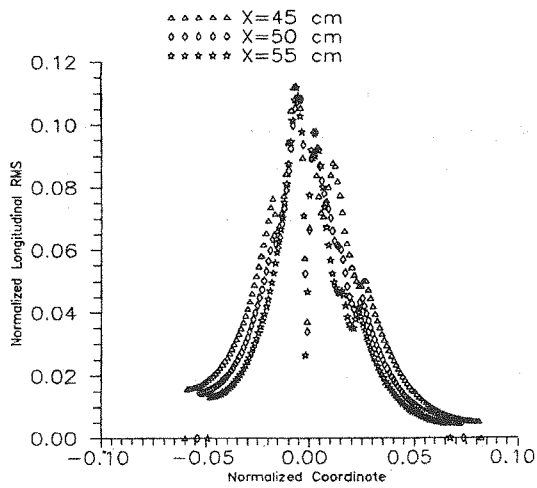
نکته دیگری که در اینجا قابل بحث و بررسی می باشد این است که مقدار آشفتگی و اغتشاشات جریان با پیش روی به سمت پایین دست جریان افزایش می یابد. همانطوری که از بحث بالا پیدا است اختلاف مقادیر تنش های برشی رینولدزی و مقادیر ریشه میانگین مربعی اغتشاشات طولی و عرضی سرعت با مقادیر آزمایشی در پایین دست جریان نسبت به بالا دست جریان کمتر می باشد، که دلیل این امر را می توان به این شکل بیان نمود که در بالا دست جریان زمان لازم برای ایجاد شدن حالت ثابت^{۱۲} در جریان نسبت به پایین دست جریان کمتر می باشد. بنابراین خطای کوچکتر برای پایین دست جریان در فاصله های زمانی بعدی رخ خواهد داد.



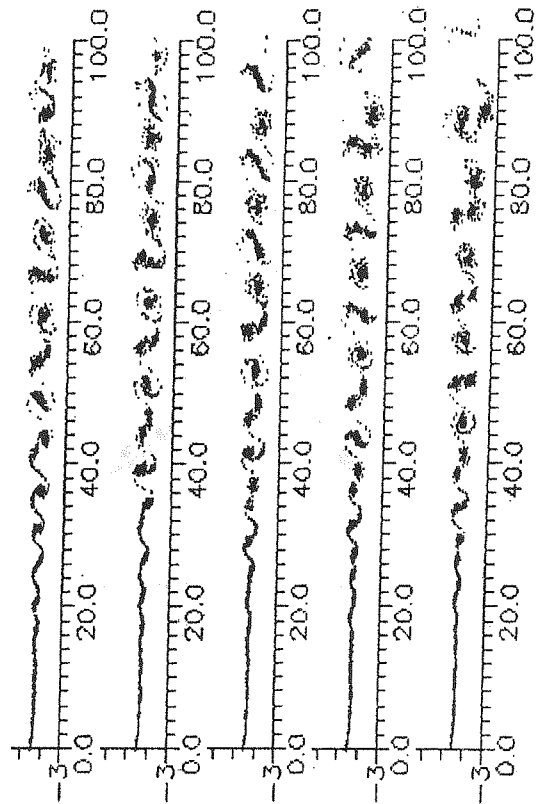
شکل (۵) مقادیر تنش های برشی رینولدزی با استفاده از مدل خطی



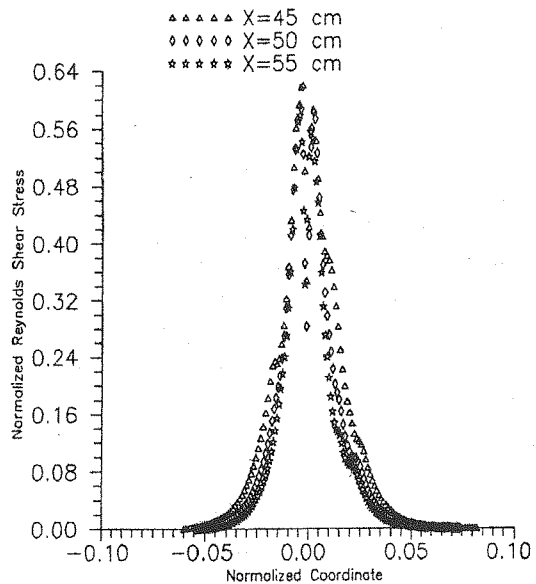
شکل (۶) مقادیر ریشه میانگین مربعی اغتشاشات طولی سرعت مدل ثابت



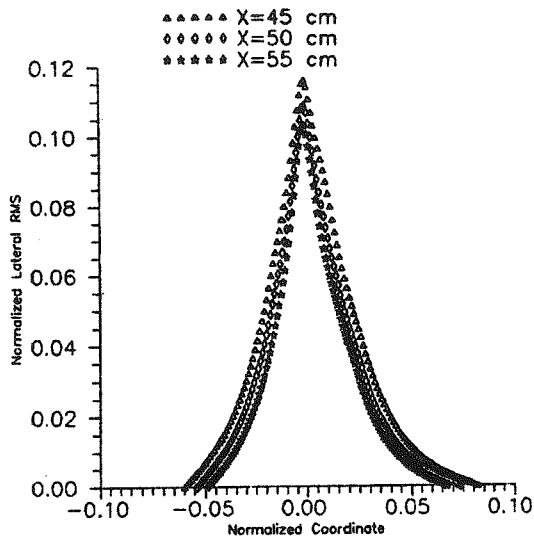
شکل (۷) مقادیر ریشه میانگین مربعی اغتشاشات طولی سرعت مدل خطی



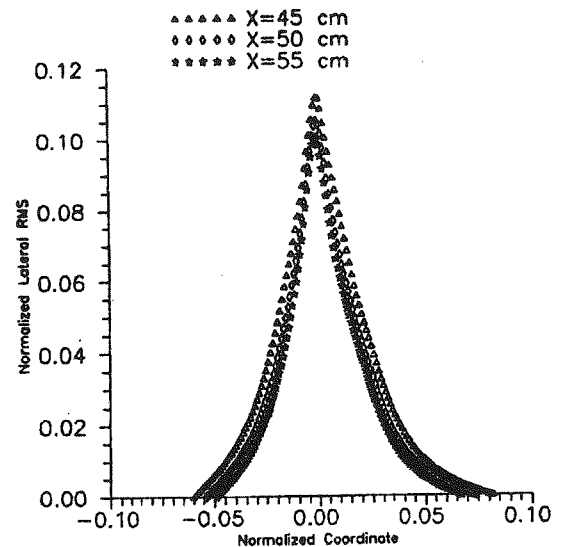
شکل (۳) مکان گردابه ها به ترتیب از راست به چپ بعد از ۳۲۰۰، ۳۴۰۰، ۳۶۰۰، ۳۸۰۰ و ۴۰۰۰ فاصله زمانی



شکل (۲) مقادیر تنش های برشی رینولدزی با استفاده از مدل ثابت



شکل (۹) مقادیر ریشه میانگین مربعی اغتشاشات عرضی سرعت مدل خطی



شکل (۸) مقادیر ریشه میانگین مربعی اغتشاشات عرضی سرعت مدل ثابت

زیر نویس ها

- 1 - Root Mean Square (RMS)
- 2 - Mixing Layer
- 3 - Curl
- 4 - Sub Grid Scales
- 5 - Eddy Viscosity
- 6 - Stream Function
- 7 - Filtered Vorticity

- 8 - Fraction Method
- 9 - Diffusion and Convection
- 10 - Eddy Viscosity Coefficient
- 11 - Mansour et al (1979)
- 12 - Streak Lines
- 13 - Similarity
- 14 - Stationary

مراجع

- [1] Aref, H. & Siggia, E. D. "Vortex Dynamics of the Two-dimensional Turbulent Shear Layer" *Fluid Mech* 100, pp. 705-737 (1980).
- [2] Ashurt, W. T. "Numerical Simulation of turbulent Mixing Layer via Vortex Dynamics, Turbulent Shear Flows" I, (Ed) Durst al, Springer-Verlag New York, 402-413 (1979).
- [3] Batchelor, G. K. "An Introduction to Fluid Dynamics" Cambridge University Press. (1967).
- [4] Baker, G. R. "The Cloud-In-Cell Technique Applied to the Roll up of Vortex Sheets" *J. Computational Physics* 31, 76-95 (1979).
- [5] Chorin, A. J. "Numerical Study of Slightly Viscous Flow" *J. Fluid Mech* 57, 785-796 (1973).
- [6] Christiansen, J. P. & Hockney, R. W. "A Two-Dimensional Poisson Solver Program", *Computational Physics Communication* 2, 139-155 (1971).
- [7] Leonard, A. "Vortex Methods for Flow Simulation", *J. of Computational Physics*, 37 (3), 289 (1980).
- [8] Lin, P. "Numerical Simulation of a Plane Turbu-

- lent Mixing Layer" University of Washington, pp. 37, (1986).
- [9] Mansour, N. N. "A Hybrid Vortex- In -Cell Finite Difference Method for Shear Layer Computation", AIAA 23rd Aerospace Sciences Meeting, Jan 14-17, (1985)/ Reno, Nevada.
- [10] Nakamura, Y., Leonard, A. & Spalart, P. "Vortex Simulation of an Inviscid Shear Layer" AIAA Paper 82-0948, (1982).
- [11] Nourazar, S. S. "Simulation of a Turbulent Mixing Layer Using the Vortex Method in Conjunction with Sub-Grid Models and Probability Density Function Method", OCIMAE May (1993).
- [12] Nourazar, S. S. & Milane, R. "Comparison of the Effect of Two Subgrid-Scale Models in the Simulation of a Two-Dimensional Spatially Growing Mixing Layer Using the Vortex Method" FED-Vol. 188, Turbulent Flows ASME 47-52 (1994).
- [13] Nourazar, S. S. & Milane, R. "On the Prediction of the Large-Scale Structures of a Two-Dimensional Spatially Growing Mixing Layer Using the Subgrid-Scale Vorticity Model" FED-vol. 188, Turbulent Flows ASME 53-58 (1994).
- [۱۴] صالحی فتح آبادی، ح ، « شبیه سازی سیستم ها به وسیله کامپیوترهای رقمی » ، واحد فوق برنامه بخش فرهنگی دفتر مرکزی جهاد دانشگاهی ، (پاییز ۱۳۶۵).