

شبیه‌سازی جریان آشفته سه‌بعدی ناشی از برخورد جت با جریان اصلی با استفاده از رهیافت ترکیبی LES/URANS

سید روح‌اله قدسی ^۱	محمد طیبی رهنی ^۲	مهدی رضانی‌زاده ^۳	درین جراح‌باشی ^۴
دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرمسار	دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی شریف و دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات	دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه هوایی شهید ستاری	دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه ریورساید، آمریکا

(تاریخ دریافت: ۸۸/۴/۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۴/۲۰)

چکیده

در این مقاله نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان آشفته سه‌بعدی ناشی از برخورد یک جت با جریان اصلی در عدد رینولدز ۴۷۰۰ بر مبنای قطر و سرعت جت، با استفاده از رهیافت ترکیبی شبیه‌سازی گردابه بزرگ/ میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس ارائه شده است. برای حل معادلات گسسته شده، از روش حجم محدود روی شبکه غیریکنواخت جابه‌جا شده استفاده شده و برای ارزیابی دقت رهیافت ترکیبی، نتایج به‌دست آمده با نتایج تجربی موجود مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که رهیافت ترکیبی، با بهره‌گیری از مزیت‌های دو رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ و میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس، می‌تواند در تحلیل جریان‌های پیچیده از دقت قابل توجهی برخوردار باشد. همچنین، از مزایای دیگری مانند کاهش حجم محاسبات و امکان افزایش دامنه حل نیز بهره‌مند شود. در ضمن تأثیر نسبت تزریق‌های بالا در شکل ساختارهای جریان در ناحیه جت و پایین‌دست آن، مانند جفت گردابه خلاف‌گرد نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: رهیافت ترکیبی LES/URANS، جریان برخوردی جت با جریان اصلی، نسبت تزریق

Simulation of 3-D Turbulent Jet-into-Cross Flow, Using Hybrid LES/URANS Approach

S. R. Ghodsi Eng. Dep't. Garmsar Branch Islamic Azad Univ.	M. Taeibi-Rahni Aerospace Eng. Dep't. Sharif Univ. of Tech. and Mech. & Aerospace Eng. Dep't. Science and Research Branch Islamic Azad Univ.	M. Ramezani zadeh Aero. Eng. Dep't. S. Sattari Aeronautical Univ.	D. Jarrah bashi Mech. Eng. Dep't. Riverside Univ., U.S.A.
--	--	--	--

(Received: 29 Jun. 2009 ; Accepted: 11 Jul. 2011)

ABSTRACT

In this paper the results of simulation of a 3-D turbulent normal jet-into-cross flow at Reynolds number of 4700, based on the diameter and velocity of the jet, using hybrid LES/URANS approach, are presented. The computational methodology is based on finite volume and the grid is non-uniform and staggered. The results show that the hybrid LES/URANS approach can well predict complex flows. Furthermore, the flows upstream and downstream of the jet were affected by variation of the velocity ratio.

Keywords: Hybrid LES/URANS, Jet-into-Cross Flow, Velocity Ratio

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): Roholahghodsi@gmail.com

۲- استاد: taeibi@sharif.edu

۳- استادیار: ramezanizadeh@gmail.com

۴- دانشجوی دکتری

۱- مقدمه

پیش‌بینی جریان‌های آشفته یکی از مسائل مهم در علم مکانیک سیالات است. یکی از رویکردهای اصلی و مهم در این زمینه، تحلیل عددی این جریان‌ها است. به دلیل آن‌که محققان بسیاری در این زمینه فعالیت نموده‌اند، شاخه‌های زیادی در این علم پدید آمده و رهیافت‌های مختلف با ویژگی‌ها و معایب متفاوتی نیز در آن به وجود آمده است. یکی از موضوعاتی که همیشه در استفاده از این رهیافت‌ها مدنظر قرار می‌گیرد، حجم محاسبات و زمان مورد نیاز برای حل است.

در مورد انتخاب رهیافت مناسب برای پیش‌بینی جریان آشفته، باید به دو موضوع دقت شود. موضوع اول، میزان دقت نتایج و مقدار اطلاعات مورد نیاز است. به عنوان مثال در بسیاری از مسائل صنعتی داشتن مقادیر متوسط کمیت‌های مهم کافی است ولی در مسائل تحقیقاتی داشتن اطلاعات دقیق‌تر بسیار اهمیت دارد. موضوع دوم، مقدار حجم محاسبات در مقایسه با قدرت محاسباتی است. به عنوان مثال در هواشناسی، حجم محاسبات بسیار زیاد است ولی ممکن است امکاناتی مانند ابررایانه‌ها در اختیار نباشد که این باعث می‌شود زمان زیادی برای پیش‌بینی صرف شود و دیگر اطلاعات به‌دست آمده ارزش نداشته باشد.

با توجه به مطالب بیان شده، یافتن یک نقطه بهینه بین دقت موردنیاز و حجم محاسبات در شرایط یک مسئله می‌تواند بسیار سودمند باشد. یکی از رهیافت‌هایی که با هدف رسیدن به این حالت بهینه به‌وجود آمده و امروزه استفاده از آن در حال گسترش است، رهیافت ترکیبی شبیه‌سازی گردابه بزرگ/میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس^۱ است. در این روش از رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ و رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس در کنار یکدیگر استفاده می‌شود با وجود اینکه این دو رهیافت اختلاف‌های اساسی با هم دارند. رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ بر مبنای فیلترگیری مکانی و جدا نمودن مقیاس‌های بزرگ حل شونده از مقیاس‌های کوچک مدل شونده، بوجود آمده است ولی اساس رهیافت

میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس بر مبنای میانگین‌گیری زمانی و استفاده از کمیت‌های متوسط است. رهیافت ترکیبی به شاخه‌های مختلفی تقسیم می‌شود. در بعضی از موارد از رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس در نزدیک دیواره و در لایه مرزی که جریان از قانون عمومی^۲ تبعیت می‌کند استفاده می‌شود و سایر مناطق که تحت تأثیر مشخصات جریان است به‌وسیله رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ پیش‌بینی می‌شود. نمونه شناخته شده در این زمینه رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده^۳ است.

یک نوع دیگر رهیافت ترکیبی که در این تحقیق به آن پرداخته شده است، رهیافت ترکیبی دو ناحیه‌ای است. در این مورد، دیگر لزوماً از رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس در نزدیک دیواره استفاده نمی‌شود، بلکه با توجه به شرایط مسئله، ناحیه‌ای از جریان به‌وسیله این رهیافت پیش‌بینی می‌شود. با توجه به اینکه پیچیدگی‌های جریان در کدام منطقه اتفاق می‌افتد و یا کدام ناحیه از لحاظ دقت نتایج از اهمیت بیشتری برخوردار است، نواحی بین این دو رهیافت تقسیم می‌شود.

در سال ۲۰۰۳، دیویدسون و دالستروم^۴ نتایج تحقیق خود روی رهیافت ترکیبی و شرایط مرزی بین دو ناحیه شبیه‌سازی گردابه بزرگ و میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس را منتشر نمودند [۱]. آنها از این رهیافت در تحلیل جریان یک منتشرکننده^۵ تخت غیرممتقارن در عدد رینولدز ۱۸,۰۰۰ بر مبنای ارتفاع کانال ورودی استفاده نمودند. برای ساخت شرایط ورودی از بانک اطلاعاتی به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی مستقیم^۶ کانال در مرز بین دو ناحیه استفاده کردند.

در سال ۲۰۰۷، بچمن^۷ و همکارانش به‌منظور آزمایش قابلیت رهیافت ترکیبی، از آن برای شبیه‌سازی جریان باد روی یک منطقه در نزدیک ولینگتون نیوزیلند استفاده نمودند [۲]. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق با نتایج

2- Universal Law

3- Detached Eddy Simulation (DES)

4- Dahlström and Davidson

5- Diffuser

6- Direct Numerical Simulation (DNS)

7- Bechmann

1-Large Eddy Simulation / Reynolds Averaged Navier-Stokes Approach

سرعت جت برابر با $5/7$ و عدد رینولدز نیز برحسب قطر و سرعت جت برابر با 5000 در نظر گرفته شده بود. پروفیل سرعت و شدت آشفتگی به‌دست آمده در مقایسه با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی دقت و تطابق قابل قبولی را نشان می‌داد.

در این مقاله، به‌منظور بررسی درستی نتایج و دقت رهیافت ترکیبی، از نتایج تجربی آجرش و همکارانش (۱۹۹۵) برای مقایسه استفاده شده و همچنین به‌وسیله نتایج رهیافت ترکیبی تأثیر نسبت تزریق در ساختار جریان و میزان نفوذ جت در جریان متقاطع بررسی شده است.

۲- معادلات حاکم

در رهیافت ترکیبی، از دو رهیافت شناخته شده شبه‌سازی گردابه بزرگ و میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس در کنار یکدیگر استفاده می‌شود. بنابراین روابط حاکم بر این دو رهیافت در اینجا شرح داده می‌شود. البته باید توجه داشت که این دو رهیافت اختلاف اساسی با هم دارند که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

در رهیافت شبه‌سازی گردابه بزرگ، روش حل معادلات براساس فیلترگیری مکانی قرار دارد. به این معنی که کمیت‌های اصلی جریان به‌وسیله یک فیلتر مکانی به دو قسمت تقسیم می‌شوند که عبارتند از: مقیاس‌های بزرگ و مقیاس‌های کوچک. مقیاس‌های بزرگ به‌وسیله حل مستقیم معادلات محاسبه می‌شوند، ولی برای به‌دست آوردن مقیاس‌های کوچک از مدل‌سازی استفاده می‌شود. یکی از دلایل این جداسازی، وابسته بودن شرایط مقیاس‌های بزرگ به هندسه جریان و مرزها است ولی در مورد مقیاس‌های کوچک این‌گونه نیست و به نظر می‌آید که تابع یک قانون عمومی هستند. بنابراین مدل‌سازی مقیاس‌های کوچک بسیار آسان‌تر از مقیاس‌های بزرگ صورت می‌گیرد.

برای جداسازی این مقیاس‌ها از یک تابع فیلتر مکانی استفاده می‌شود. در صورت استفاده از کمیت‌های فیلتر شده در معادلات حاکم، به شکل معادلات (۱-۲) درخواست می‌شود.

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

رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که رهیافت ترکیبی قسمت اعظم ساختارهای آشفتگی ناپایا را پیش‌بینی کرده است و از آن می‌توان برای بررسی جریان گذرا که شدت آشفتگی در آن زیاد است استفاده نمود. مدل مورد استفاده در این تحقیق دو معادله‌ای $k - \epsilon$ است.

مسئله‌ای که در این تحقیق به‌وسیله رهیافت ترکیبی مورد حل قرار گرفته، جریان ناشی از برخورد یک جت عمودی با یک جریان اصلی است. علت انتخاب این مسئله وجود پیچیدگی در ساختارهای جریان، به‌ویژه در اطراف جت است. برای این منظور از رهیافت شبه‌سازی گردابه بزرگ برای پیش‌بینی جریان در اطراف جت در پایین‌دست آن و از رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس در ناحیه بالادست جت استفاده می‌شود.

در سال ۱۹۹۵، آجرش^۱ و همکارانش [۳] جریان اطراف یک ردیف جت که به‌صورت عمودی وارد جریان اصلی می‌شدند را به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. در مطالعات تجربی، از یک تونل باد کم سرعت با یک ردیف جت شامل شش سوراخ مربع شکل استفاده شد.

در سال ۲۰۰۶، ماژاندر و سیکونن^۲ به‌وسیله رهیافت شبه‌سازی گردابه‌های بزرگ، جریان ناشی از برخورد یک جت با مقطع دایروی که به‌صورت عمودی وارد جریان اصلی می‌شد را تحلیل نمودند [۴]. در تحلیل آن‌ها، نسبت سرعت جت به جریان اصلی برابر با $2/3$ و عدد رینولدز بر اساس سرعت مرکز جت و قطر آن برابر با 46700 در نظر گرفته شده است. برای اطمینان از درستی عملکرد این روش، نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی روی این هندسه مقایسه شد که به‌طور کلی تطابق خوبی با واقعیت در آن‌ها مشاهده شد، هرچند شدت جریان پشت جت در این مطالعه، کمتر از واقعیت پیش‌بینی شده بود.

موپیدی و ماهش^۳ در سال ۲۰۰۷ نتایج حل جریان ناشی از برخورد یک جت با مقطع دایروی با یک جریان اصلی به‌وسیله رهیافت شبه‌سازی عددی مستقیم را منتشر نمودند [۵]. در حل آن‌ها نسبت سرعت جریان اصلی به

1- Ajersch
2- Majander and Siikonen
3- Muppidi and Mahesh

در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که به‌طور کلی شامل روش‌های صفرمعدله‌ای، یک معادله‌ای و دو معادله‌ای می‌شوند.

در این تحقیق از مدل آشفتگی انتقال تنش برشی^۴ استفاده شده است. این مدل در سال ۱۹۹۴ توسط منتر معرفی شد [۷]. در این روش، از مزایای دو روش مدل‌سازی دیگر استفاده می‌شود که عبارتند از $k - \varepsilon$ و $k - \omega$. مدل $k - \omega$ در نواحی نزدیک دیواره نتایج بهتری دارد ولی در نواحی دور از دیواره بسیار به شرایط جریان آزاد حساس است. مدل $k - \varepsilon$ شرایطی برعکس مدل $k - \omega$ دارد و در پیش‌بینی نواحی دور از دیواره موفق‌تر است. بنابراین در مدل SST، در زیرلایه لزج و ناحیه لگاریتمی از مدل $k - \omega$ و در نواحی دور از دیواره از مدل $k - \varepsilon$ استفاده می‌شود.

از سوی دیگر، با وجود آنکه در رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس از کمیت‌های میانگین‌گیری شده استفاده می‌شود، ولی برای استفاده از آن در مسائل ناپایدار محققان، بر روی نوع ناپایدار این رهیافت نیز کار نموده‌اند. به‌طور کلی دو نوع میانگین‌گیری برای به‌دست آوردن مقدار متوسط وجود دارد، که عبارتند از: میانگین‌گیری زمانی و میانگین‌گیری اثرکلی^۵ که به ترتیب به‌وسیله روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{\phi} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \phi(t) dt, \quad (۶)$$

$$\langle \phi \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \phi^{(i)}(t). \quad (۷)$$

در حالت میانگین‌گیری اثر کلی، در یک بازه مشخص میانگین کمیت مورد نظر به‌دست می‌آید. باید توجه داشت که کمیت متوسط به‌دست آمده از میانگین‌گیری اثرکلی، تابعی از زمان است [۸]. حال اگر بخواهیم یک کمیت را به مقدار اغتشاشی و مقدار متوسط تقسیم کنیم، می‌توان از رابطه زیر استفاده نموده و در پایان آن را در معادلات حاکم وارد نمود [۹]:

$$\phi = \langle \phi \rangle + \phi'. \quad (۸)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\bar{P}}{dx_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (۲)$$

تأثیرات مقیاس‌های کوچک به‌وسیله تانسور تنش زیرشبکه‌ای^۱ به‌صورت زیر در معادلات مومنتوم وارد می‌شوند که باید مدل شوند:

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}. \quad (۳)$$

اولین مدل تنش زیرشبکه‌ای در سال ۱۹۶۳ توسط اسماکورینسکی تعریف شد که تاکنون بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل براساس فرضیه بوسینسک^۲ به‌وجود آمده است و فرض می‌شود که تولید و اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی در مقیاس‌های کوچک با هم در تعادل است. با این فرض تانسور تنش زیرشبکه‌ای به‌صورت زیر مدل می‌شود:

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2\nu_t \bar{S}_{ij}, \quad (۴)$$

که در آن، ν_t لزجت گردابه‌ای است. در این رابطه، بخش غیرایزوتروپیک تانسور تنش زیر شبکه‌ای متناسب با تانسور نرخ کرنش حل شونده \bar{S}_{ij} در نظر گرفته می‌شود. برای به‌دست آوردن لزجت گردابه‌ای از رابطه (۵) استفاده می‌شود.

$$\nu_t = \ell \left| \bar{S} \right| = C_s \Delta^2 \left| \bar{S} \right| \quad (۵)$$

در این رابطه، ℓ مقیاس طولی است و متناسب با پهنای فیلتر Δ و ضریب اسماکورینسکی C_s در نظر گرفته می‌شود. محدوده ضریب اسماکورینسکی بین ۰/۱ و ۰/۲۵ قرار دارد [۶]. در این تحقیق، مقدار ضریب اسماکورینسکی برابر با ۰/۱۷ در نظر گرفته شده است.

از سوی دیگر، اساس کار در رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس بر مبنای میانگین‌گیری زمانی است که با این کار مقادیر متوسط از مقادیر اغتشاشی جدا می‌شوند. مقادیر متوسط دیگر، تابعی از زمان نیستند بنابراین جمله تغییرات زمانی از معادلات مومنتوم حذف می‌شود و به جای آن یک کمیت دیگر به نام تنش رینولدز به‌وجود می‌آید که باعث بروز مشکل بستار^۳ می‌شود و برای رفع آن باید از مدل‌سازی استفاده نمود. روش‌های مختلفی

1- Subgrid Scale (SGS) Tensor

2- Boussinesq

3- Closure Problem

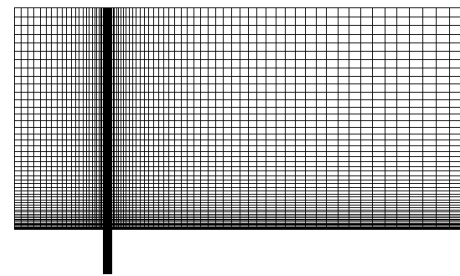
4- Shear Stress Transport (SST) Model

5- Ensemble Average

۳- روش عددی

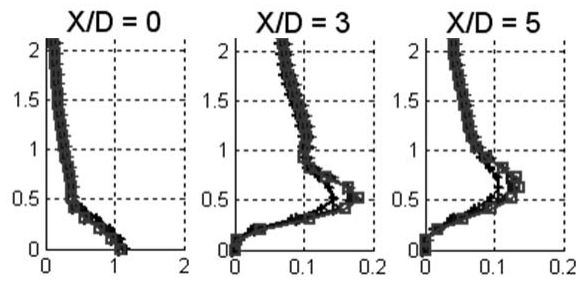
در این تحقیق از روش حجم محدود^۱ و الگوریتم نمونه^۲ روی یک شبکه با سازمان غیریکنواخت و جابه‌جا شده برای حل عددی استفاده شده است. گسسته‌سازی جملات لزجت و جابه‌جایی در معادلات انتقال بر اساس روش قانون توانی^۳ انجام گرفته و روش کرانک- نیکلسون^۴ برای گسسته‌سازی زمانی به کار گرفته شده است [۱۰]. برای حل دستگاه معادلات، از روش تکرار خط به خط و الگوریتم ماتریس سه قطری استفاده شده است.

شبکه مورد استفاده در این تحقیق، شبکه کارترین می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است شبکه در نزدیک دیواره و اطراف جت ریزتر می‌شود.



شکل (۱): تراکم شبکه کارترین مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان جت در جریان اصلی.

در جدول ۱ مشخصات سه شبکه‌بندی مختلف به‌منظور بررسی حساسیت حل به تراکم شبکه آورده شده است. در شکل ۲ مؤلفه سرعت V/V_j در سه مقطع و سه شبکه مختلف نشان داده شده و مشخص است که حساسیت نتایج به شبکه، در حالت دو و سه کاهش یافته است. لذا می‌توان گفت حل در حد قابل قبولی از تراکم شبکه مستقل است. البته باید توجه نمود ایجاد یک کد بر اساس رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ که به‌طور کامل از شبکه مستقل باشد، بسیار دشوار است. این موضوع به‌طور کامل توسط معین و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱].



شکل (۲): مقایسه پروفیل سرعت V/V_j در سه شبکه

مختلف در ($Z/D = 0$)

۸۹×۸۷×۸۹ : —●— ، ۸۰×۷۲×۸۰ : - - -□- - -

و ۱۰۱×۹۴×۲۱ : - - -▴- - -

در هر گام زمانی در هر دو رهیافت، حل معادلات گسسته تا رسیدن به بازه همگرایی انجام می‌گیرد و بعد از آن، همین کار در گام زمانی بعدی صورت می‌گیرد. برای این منظور از گام زمانی برابر با ۰/۰۱ استفاده شده است که تا زمان ۵۰ ثانیه ادامه پیدا می‌کند [۱۲].

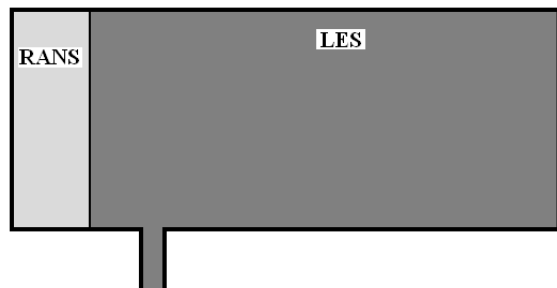
۴- مدل فیزیکی و شرایط مرزی

در این تحقیق، یک جت با سطح مقطع مربعی با طول D در نظر گرفته شده که به‌صورت عمودی به یک جریان متقاطع تزریق می‌شود. دامنه حل این مسئله مطابق با هندسه مورد استفاده در تحقیق تجربی آجرش انتخاب و نمایی از آن در شکل ۳ نشان داده شده است. عدد رینولدز بر اساس سرعت و طول دهانه جت برابر با ۴۷۰۰ در نظر گرفته شده است. به‌منظور بررسی تأثیر تغییر نسبت تزریق، سرعت جریان اصلی تغییر داده می‌شود. در اینجا از سه نسبت تزریق متفاوت ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ استفاده شده است.

در رهیافت ترکیبی دو ناحیه‌ای، دامنه حل بین دو رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ و میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس با توجه به شرایط مسئله تقسیم می‌شود.

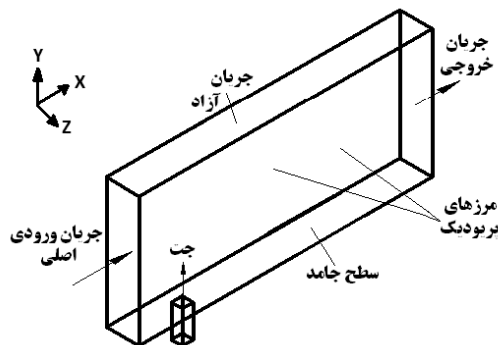
- 1- Finite Volume
- 2- Simple
- 3- Power Law Scheme
- 4- Crank-Nicolson Scheme

۵- شرط مرزی دوره‌ای^۱: برای در نظر گرفتن اثر متقابل جت‌ها بر روی یکدیگر از این شرط استفاده می‌شود. در شکل ۵ این شرایط مرزی از دو نمای مختلف نشان داده شده‌اند.



شکل (۴): دو ناحیه شبیه‌سازی گردابه بزرگ و میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس در دامنه حل.

یکی از شرایط مرزی ورودی که در رهیافت ترکیبی مفهوم پیدا می‌کند، شرایط مرز مشترک دو ناحیه شبیه‌سازی گردابه بزرگ و میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس است. در این مسئله و با توجه به ناحیه‌بندی صورت گرفته، ناحیه رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس در بالادست جت و ناحیه شبیه‌سازی گردابه بزرگ در اطراف و پایین‌دست جت قرار دارد. از سوی دیگر، مرز مشترک در فاصله‌ای از جت قرار داده شده است که جریان برگشتی احتمالی در پشت جت به آن نرسد. بنابراین، با توجه به این شرایط، مرز مشترک از دید ناحیه رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس یک مرز خروجی جریان و از دید ناحیه شبیه‌سازی گردابه بزرگ یک مرز ورودی جریان است.



شکل (۳): نمایی از دامنه حل مسئله جریان برخوردی جت با جریان اصلی.

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده ناحیه‌ای که به وسیله رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس حل می‌شود در بالادست جت واقع شده و ناحیه اطراف جت و پایین‌دست آن به وسیله رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ پیش‌بینی می‌شود.

یکی از موضوعات مهم، تعریف شرایط مرزی است. در این مسئله پنج نوع شرط مرزی وجود دارد که عبارتند از:

- ۱- شرط مرزی ورودی: برای ایجاد پروفیل سرعت، از قانون توانی $1/7$ در ورودی جریان اصلی و جریان یکنواخت در ورودی جت استفاده شده است.
- ۲- شرط مرزی جریان آزاد،
- ۳- شرط مرزی دیوار صلب (شرط عدم لغزش)،
- ۴- شرط مرزی خروجی: در این مرز گرادین تمام کمیت‌ها برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود و قانون بقای جرم نیز باید مدنظر قرار گیرد و

جدول (۱): سه شبکه مختلف با تعداد گره‌های متفاوت.

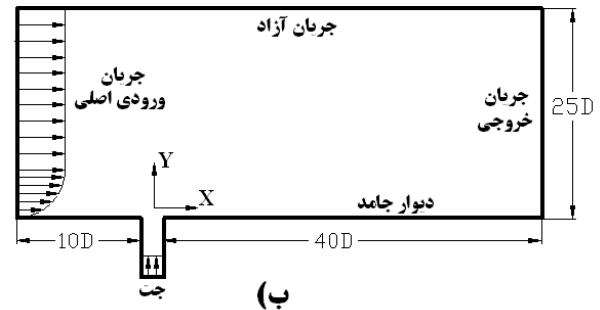
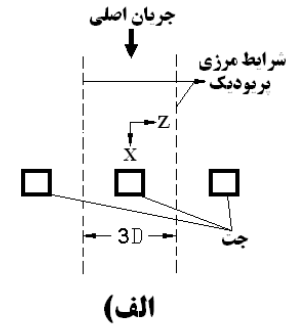
تعداد کل گره‌ها	جت				جریان اصلی				شبکه
	تعداد گره‌ها	Z	Y	X	تعداد گره‌ها	Z	Y	X	
۶۲۵۲۱	۱۷۷۱	۷	۲۳	۱۱	۶۰۷۵۰	۱۵	۵۰	۸۰	۱
۱۰۵۷۴۴	۴۲۸۴	۹	۲۸	۱۷	۱۰۱۴۵۰	۱۹	۶۰	۸۹	۲
۱۴۴۱۳۵	۶۲۷۰	۱۱	۳۰	۱۹	۱۳۷۸۶۵	۲۱	۶۵	۱۰۱	۳

۵- نتایج

نتایج به‌دست آمده در دو بخش ارائه می‌شود. در بخش اول، برای بررسی دقت رهیافت ترکیبی نتایج آن با نتایج تجربی آجرش و همکارانش (۱۹۹۵) مقایسه می‌گردد و در بخش دوم، تأثیرات تغییر نسبت تزریق بررسی می‌شود.

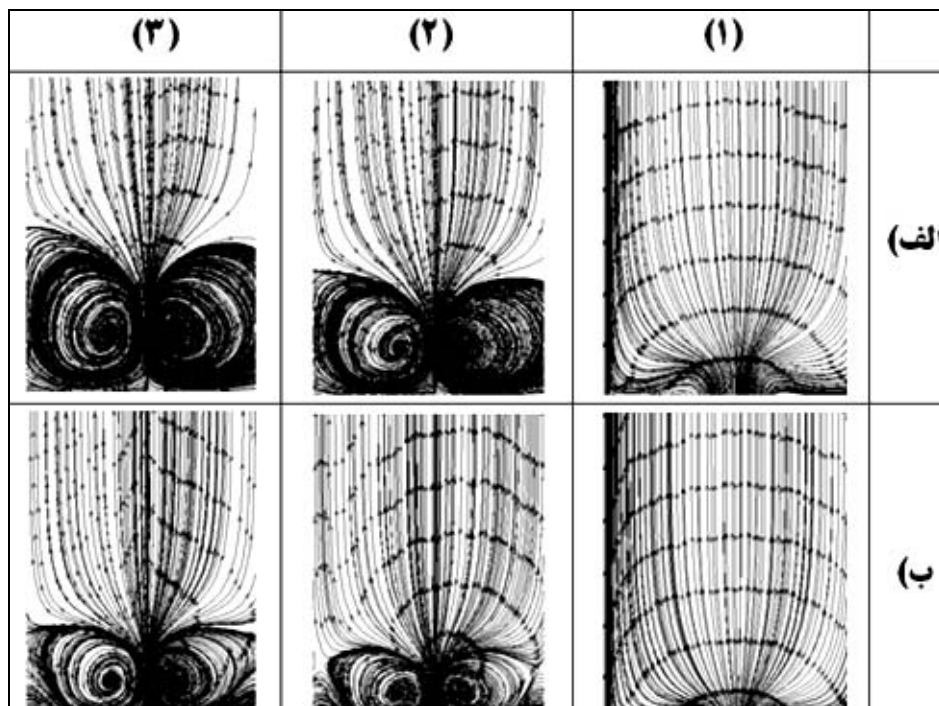
یکی از موارد کاربرد رهیافت ترکیبی، ایجاد امکان افزایش دامنه حل است. یک رویکرد در مواجهه با جریان‌های پیچیده این است که از رهیافت‌های دقیق مانند رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ استفاده نمود، ولی به دلیل افزایش حجم محاسبات نمی‌توان دامنه حل را گسترش داد. در رهیافت ترکیبی این امکان به وجود می‌آید، نواحی که از اهمیت کمتری برخوردار بوده ولی در شکل‌گیری ساختارهای جریان در نواحی موردنظر نقش دارند نیز با رهیافت‌های تقریبی‌تر مورد محاسبه قرار گیرند. در نتیجه، پیش‌بینی جریان از دقت بیش‌تری برخوردار می‌شود.

در بخش اول از نسبت تزریق ۰/۵ استفاده شده و نحوه تولید شرایط مرزی از طریق استفاده از مقدار متوسط محاسبه شده توسط رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس است. برای آن‌که مشخص شود که آیا استفاده از رهیافت ترکیبی مفید واقع می‌شود یا نه، مقایسه‌ای بین نتایج رهیافت ترکیبی با نتایج رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ انجام شده است. به این منظور در رهیافت ترکیبی مرز مشترک در $X/D = -۶/۴$ قرار داده شده و در رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ نیز فرض می‌شود که مرز سمت چپ (جریان ورودی) در این ناحیه واقع شده است. یعنی به‌طور کلی در رهیافت ترکیبی با افزودن ناحیه رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس دامنه حل بزرگ‌تر می‌شود ولی در رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ این دامنه محدود می‌ماند و فقط جریان داخل دامنه با محیط خارج که در حل وارد نشده‌اند از طریق شرایط ورودی ثابت، مرتبط می‌شوند.



شکل (۵): شرایط مرزی.

نکته مهمی که در اینجا وجود دارد، تفاوت اساسی بین مبانی دو رهیافت است. به دلیل آن‌که کمیت‌های به‌دست آمده در ناحیه شبیه‌سازی گردابه بزرگ، تابعی از زمان بوده و در آن‌ها اغتشاش وجود دارد، می‌توان با میانگین‌گیری از این کمیت‌ها شرط خروجی برای ناحیه رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس را تولید نمود. از سوی دیگر، به دلیل آن‌که کمیت‌های به‌دست آمده به وسیله رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس، مقادیر متوسط بوده و اغتشاشات در آنها وجود ندارد، تولید شرط مرزی ورودی برای ناحیه شبیه‌سازی گردابه بزرگ دشوار است. روش‌های مختلفی برای تولید شرط مرزی ورودی برای ناحیه شبیه‌سازی گردابه بزرگ پیشنهاد شده است که مورد بحث این مقاله نیست. در اینجا فقط از مقادیر متوسط به‌دست آمده از رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس برای تولید شرط ورودی برای ناحیه شبیه‌سازی گردابه بزرگ در هر گام زمانی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه مرز مشترک در ناحیه‌ای قرار گرفته که ساختارهای پیچیده در آن وجود ندارد، بنابراین احتمال بروز خطا در محاسبه مقادیر متوسط جریان در این نحوه تولید شرایط مرزی کاهش می‌یابد.

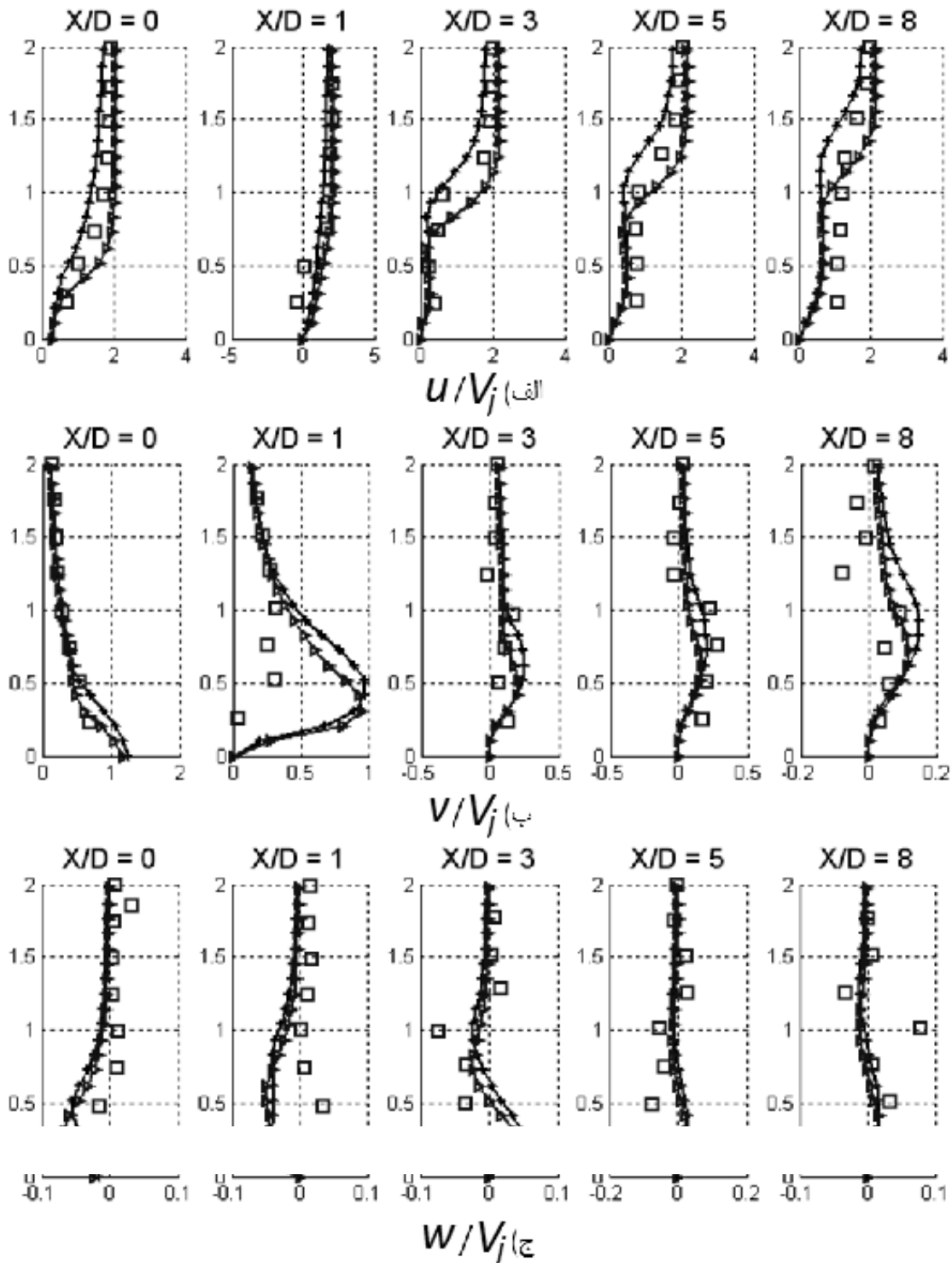


شکل (۶): مقایسه خطوط جریان در صفحه Z-Y در X/D های برابر با (۱)، (۲)، (۳) و (۴).
 (الف) رهیافت ترکیبی، (ب) رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ. محل مرز مشترک در $X/D = -6/4$ قرار دارد.

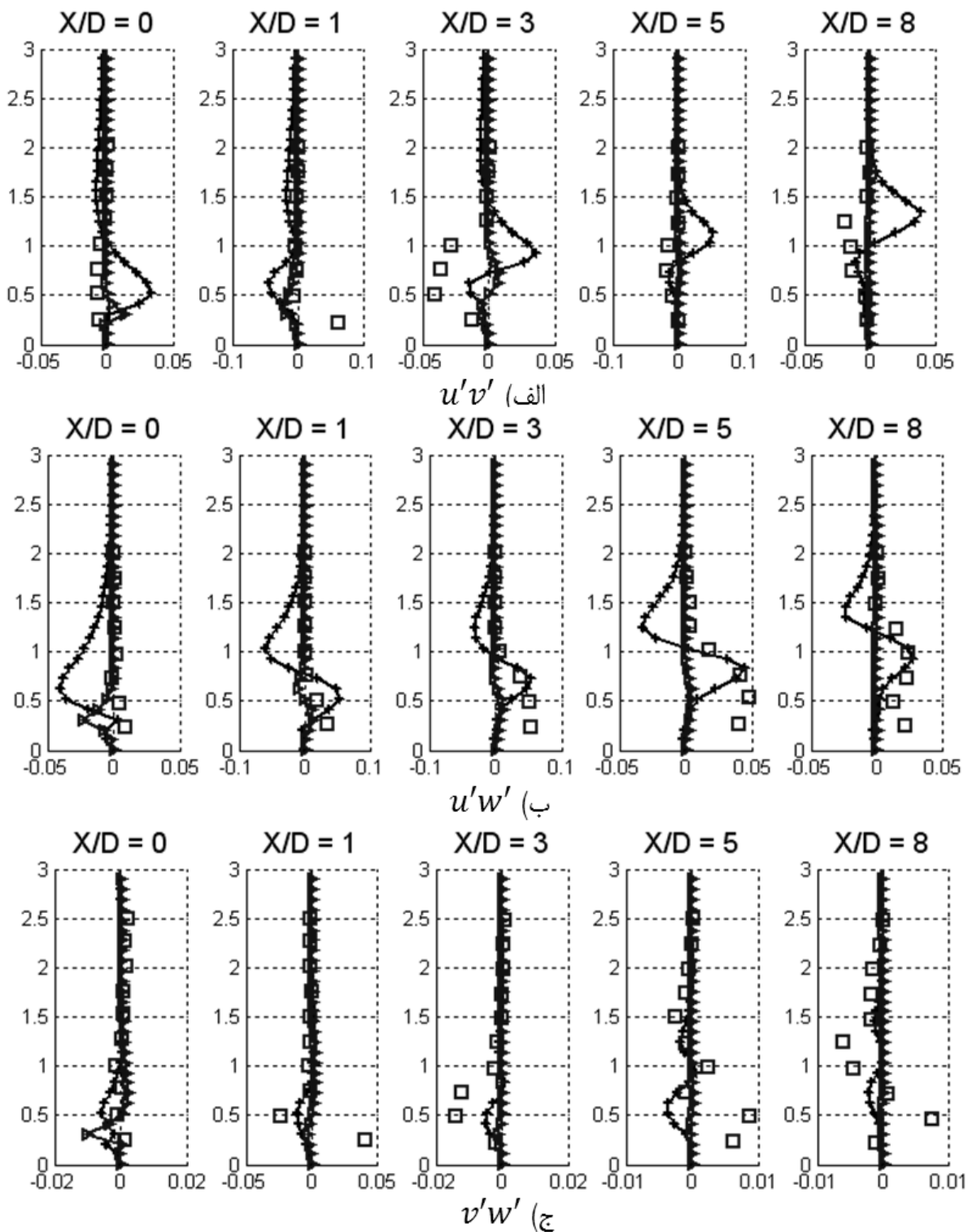
میانگین‌گیری شده را مورد بررسی قرار می‌دهیم، برای این منظور در شکل ۷ این پروفیل‌ها در مقطع $Z/D = 0$ در X/D های واقع در ۰، ۱، ۳، ۵ و ۸ ترسیم شده‌اند. اگر به پروفیل سرعت u/V_j دقت شود، مشاهده می‌شود اولاً در مقایسه نتایج دو رهیافت ترکیبی و شبیه‌سازی گردابه بزرگ با نتایج تجربی، پیش‌بینی رهیافت ترکیبی به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد.

در پروفیل سرعت v/V_j جواب‌ها به یکدیگر تا حدودی نزدیک‌تر هستند و همین‌طور به نتایج تجربی و این اختلاف در مورد پروفیل سرعت w/V_j به حداقل می‌رسد که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم دو مرز دوره‌ای بر این مؤلفه سرعت است. میزان خطا در محاسبه این مقدار از مؤلفه‌های سرعت دیگر بیشتر و مرتبه آن‌ها نیز از بقیه مؤلفه‌های سرعت کوچکتر است.

در شکل ۶، نتایج در صفحه Z-Y در X/D های واقع در ۰، ۳ و ۵ با هم مقایسه شده‌اند و شکل‌های (الف) مربوط به حل رهیافت ترکیبی و شکل‌های (ب) مربوط به حل رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطوط جریان پیش‌بینی شده در حالت (الف) تأثیر بیشتری از جت گرفته‌اند ولی در حالت (ب) این‌گونه مشاهده نمی‌شود. دلیل این اختلاف این است که جریان جت در جریان بالادست خود تأثیر گذاشته و که این باعث می‌شود کل جریان تحت تأثیر قرار گیرد. اگر مرز ورودی به جت نزدیک و مقدار آن ثابت باشد به‌طور مشخص تأثیر جت در ناحیه مرز دیده نمی‌شود و این باعث می‌شود ورودی غیر واقعی شده و باعث بروز خطا در پیش‌بینی جریان جت شود. برای آنکه بفهمیم نتیجه کدام رهیافت به واقعیت نزدیک‌تر است و از سوی دیگر دقت نتایج رهیافت ترکیبی را نیز مورد بررسی قرار دهیم، پروفیل کمیت‌های مختلف را با هم مقایسه می‌کنیم. در ابتدا پروفیل مؤلفه‌های سرعت



شکل (۷): پروفیل مؤلفه‌های سرعت متوسط بی‌بعد شده u/V_j ، v/V_j و w/V_j در مقطع $Z/D=0$ و در X/D های ۰، ۱، ۳، ۵ و ۸ (—●—: رهیافت ترکیبی LES/RANS، —□—: رهیافت LES و □: آجرش).



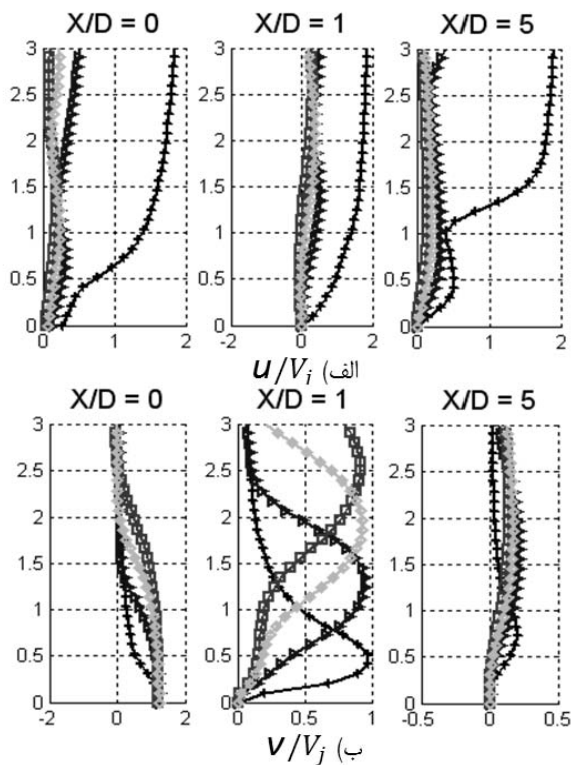
شکل (۸): پروفیل تنش‌های رینولدز $u'w'$ ، $u'v'$ و $v'w'$ در مقطع $Z/D = 0.5$ و در X/D های ۰، ۱، ۳، ۵ و ۸. (—●—: رهیافت ترکیبی LES/RANS، —□—: رهیافت LES و □: آجرش).

برای بررسی کیفی بهتر، می‌توان خطوط جریان را مقایسه نمود. در شکل ۱۰ با برش در صفحات Z-Y نمای از روبروی جفت گردابه‌های خلاف‌گرد نشان داده شده است. به‌طور مشخص، تأثیر نسبت تزریق در اندازه و شکل جفت گردابه‌های خلاف‌گرد قابل ملاحظه است. علاوه بر بزرگ‌تر شدن گردابه‌ها، با افزایش نسبت تزریق مرکز آن‌ها نیز از سطح فاصله بیش‌تری می‌گیرند. در حالتی که $R = 0.5$ است، در مقطع $X/D = 0$ گردابه‌ای تشکیل نشده است و مقدمات ایجاد آن در حال شکل‌گیری است، ولی هرچه نسبت تزریق بیشتر می‌شود، مشاهده می‌شود که انحنا خطوط جریان در بالای جت بیشتر شده و در نسبت‌های تزریق ۱ و ۲، گردابه‌های خلاف‌گرد از همان $Z/D = 0$ شروع شده‌اند و این موضوع در $R = 2$ به‌طور واضح قابل مشاهده است. نکته جالب دیگر در پایین جفت گردابه خلاف‌گرد است. در نسبت تزریق‌های بالا به وضوح دو ناحیه با جریان چرخشی در زیر گردابه‌ها نمایان شده‌اند ($X/D = 3$).

در شکل ۱۱ خطوط جریان از نمای X-Y ترسیم شده‌اند. به‌طور مشخص می‌توان دید که با بالا رفتن نسبت تزریق دیگر خبری از برگشت جریان به داخل جت وجود ندارد. علاوه بر اینکه با عبور از نسبت تزریق ۱/۵ جریان برگشتی نیز در بالادست جت وجود ندارد و همه خطوط به سمت بالا متمایل می‌شود که نتیجه تأثیر مستقیم قدرت جت می‌باشد. تفاوت در شکل ۱۱ بین خطوط جریان از نمای X-Y ترسیم شده است. به‌طور مشخص می‌توان دید که با بالا رفتن نسبت تزریق خبری از برگشت جریان به داخل جت وجود ندارد. علاوه بر اینکه با عبور از نسبت تزریق ۱/۵ جریان برگشتی نیز در بالادست جت وجود ندارد، همه خطوط به سمت بالا متمایل می‌شوند که نتیجه تأثیر مستقیم قدرت جت است. تفاوت بین نواحی جریان در جلوی جت نیز معلوم است، قدرت جت باعث شده است که در حالت (د) که $R = 2$ است، دیگر انحنایی در محدوده شکل در مسیر جت دیده نشود. در صورتی که در $R = 0.5$ ، این انحناء و ساختارهای گردابه‌ای کوچک در کنار جت به خوبی قابل ملاحظه است.

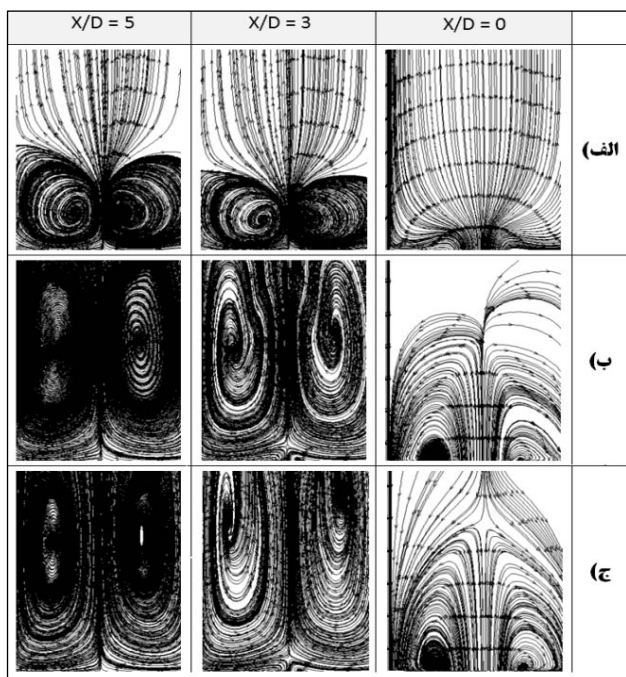
در شکل ۸ پروفیل‌های تنش رینولدز $\overline{u'u'}$ ، $\overline{v'v'}$ و $\overline{w'w'}$ و در مقطع $Z/D = 0.5$ در X/D های ۰، ۱، ۳، ۵ و ۸ حاصل از رهیافت ترکیبی و رهیافت شبه‌سازی گردابه بزرگ با نتایج تجربی آجرش مورد مقایسه قرار گرفته است. در مورد حل جریان که به‌وسیله رهیافت ترکیبی حاصل نشده است، مشاهده می‌شود که تنش رینولدز $\overline{u'u'}$ دقت قابل قبولی دارد ولی در مورد $\overline{v'v'}$ اوضاع متفاوت و بهتر است و همین شرایط نیز در مورد تنش رینولدز $\overline{v'v'}$ وجود دارد. مشاهده می‌شود، به‌دلیل آن‌که شرایط ورودی جریان در ناحیه شبه‌سازی گردابه بزرگ به‌صورت یک پروفیل سرعت ثابت در نظر گرفته نشده و از نتایج حل جریان به‌دست آمده است، اغتشاشات بیش‌تری در نتایج وجود دارد و تنش‌های رینولدز بیش‌تر خود را نشان داده‌اند. باید توجه نمود که مرتبه تنش‌های رینولدز برابر با ۰/۰۱ است.

یکی از موضوعاتی که در تحلیل جریان ناشی از برخورد جت با جریان اصلی و ساختارهای تشکیل‌دهنده آن می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد، تأثیر مقدار نسبت تزریق در شکل‌گیری ساختارها و توسعه آن‌ها است. در اینجا، نتایج به‌دست آمده از ۴ نسبت تزریق مختلف ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲ با هم مقایسه خواهند شد. در شکل ۹، پروفیل‌های سرعت متوسط u/V_j و v/V_j در $Z/D = 0$ با هم مقایسه شده‌اند. در مورد سرعت متوسط u/V_j ، به‌دلیل آنکه با افزایش نسبت تزریق در این مسئله جریان اصلی کاهش می‌یابد، تغییرات منحنی قابل توجهی است. به عبارت دیگر سرعت جت با بالا رفتن نسبت تزریق به جریان اصلی غالب می‌شود. این روند در تمام مقاطع X/D قابل مشاهده است. در مورد سرعت v/V_j موضوع کمی متفاوت است و اختلافات به وضوح در نزدیک جت قابل مشاهده هستند. به عنوان مثال در $X/D = 0$ هرچه نسبت تزریق بیش‌تر شده است، منحنی سرعت در Y/D بالاتر متمایل به صفر می‌شود و یا در $X/D = 1$ مشخص است، که با بالا رفتن نسبت تزریق، محل قله نمودار از سطح، فاصله بیش‌تری می‌گیرد.

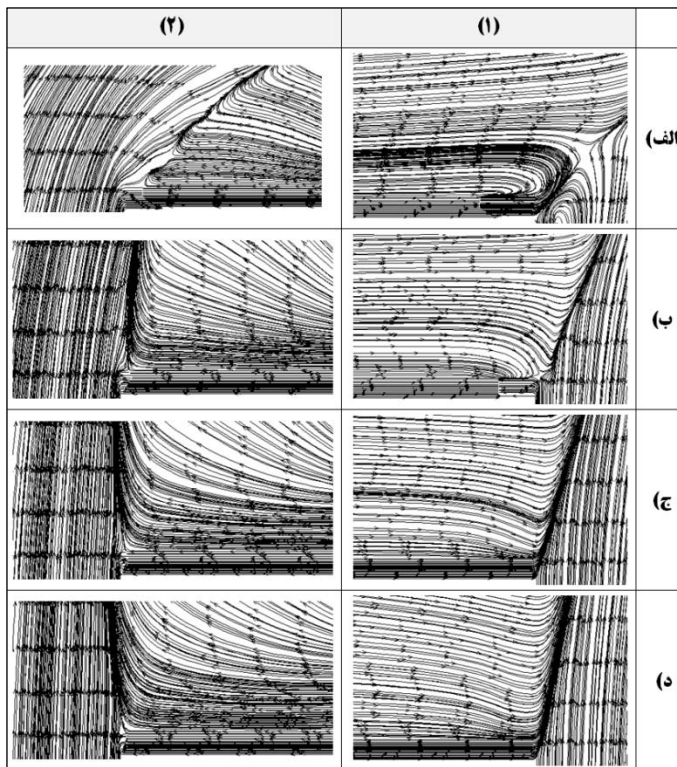


شکل (۹): پروفیل مؤلفه‌های سرعت متوسط بی‌بعد شده v/V_j و u/V_j در مقطع $Z/D = 0$ و در X/D های ۰، ۱ و ۵ در نسبت تزریق‌های مختلف:

- $R = 0.5$:
- $R = 1/0$:
- $R = 1/5$:
- $R = 2/0$:



شکل (۱۰): خطوط جریان در صفحه Z-Y در X/D های برابر با ۰، ۲ و ۵ در نسبت تزریق‌های مختلف:
 الف) $R = 0.5$
 ب) $R = 1/0$
 ج) $R = 2/0$



شکل (۱۱): خطوط جریان در صفحه X-Y در $Z/D=0$ در (۱) بالادست جت و (۲) پایین دست جت در نسبت تزریق‌های مختلف:

$$R = 0.5 \text{ (الف)}$$

$$R = 1.0 \text{ (ب)}$$

$$R = 1.5 \text{ (ج)}$$

$$R = 2.0 \text{ (د)}$$

مراجع

1. Dahlström, S. and Davidson, L. "Hybrid RANS/LES Employing Interface Condition with Turbulent Structure", *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, Vol. 4, No. 1, pp. 689-696, 2003.
2. Bechmann, A., Sorensen, N.N., Johansen, J., Vinther, S., Nielsen, B.S. and Botha, P. "Hybrid RANS/LES Method for High Reynolds Numbers, Applied to Atmospheric Flow over Complex Terrain", *J. Physics: Conference Series*, Vol. 75, No. 1, 2007.
3. Ajersch, P., Zhou, J.M., Ketler, S., Salcudean, M. and Gartshore, I.S. "Multiple Jets in a Cross Flow: Detailed Measurements and Numerical Simulations", *ASME 95-GT-9*, pp. 1-16, 1995.
4. Majander, P. and Siikonen, T. "Large Eddy Simulation of a Round Jet in a Cross Flow", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 27, No. 3, pp. 402-415, 2006.
5. Muppidi, S. and Mahesh, K. "Direct Numerical Simulation of Round Turbulent Jets in Cross Flow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 574, No. 1, pp. 59-84, 2007.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج گرفته شده از حل جریان، ناشی از برخورد یک جت با جریان اصلی به‌وسیله رهیافت ترکیبی ارائه شده است. مقایسه نتایج حاصله با نتایج تجربی و همچنین رهیافت شبه‌سازی گردابه بزرگ نشان داد که رهیافت ترکیبی، از دقت خوبی برای پیش‌بینی جریان‌های آشفته برخوردار بوده و با ایجاد امکان افزایش دامنه حل می‌تواند به دقیق‌تر شدن نتایج کمک کند. در ادامه، تأثیر تغییر نسبت تزریق در شکل‌گیری ساختارهای اطراف جت با استفاده از نتایج رهیافت ترکیبی نشان داده شد. مواردی که می‌توان با افزایش نسبت تزریق به آن‌ها اشاره نمود عبارتند از:

- (۱) بزرگ‌تر شدن گردابه‌های خلاف‌گرد،
- (۲) فاصله گرفتن سریع‌تر مرکز گردابه‌های خلاف‌گرد از سطح،
- (۳) تشکیل گردابه‌های کوچک در زیر گردابه‌های خلاف‌گرد،
- (۴) از بین رفتن جریان برگشتی به داخل جت و
- (۵) کوچک شدن جریان برگشتی در بالادست جت.

6. Zhang, W. and Chen, Q. "Large Eddy Simulation of Indoor Airflow with a Filtered Dynamic Subgrid Scale Model", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 17, pp. 3219-3231, 2006.
7. Menter, F.R. "Two-equation Eddy Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", *AIAA J.*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
8. Narasimhamurthy, V.D. "Unsteady RANS Simulation of Turbulent Trailing-Edge Flow", M.Sc. Thesis, Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers Univ. of Tech., Sweden, 2004.
9. Hussain, A.K.M.F. and Reynolds, W.C. "The Mechanics of an Organized Wave in Turbulent Shear Flow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 41, No. 2, pp. 241-258, 1970.