

ارزیابی رهیافت URANS در مدلسازی آشفته ناپایای جت عرضی در جریان جانبی

رامین کمالی مقدم

استادیار، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران، rkamali@ari.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۱۶

چکیده

هدف مقاله حاضر توسعه مدلسازی جریان آشفته ناپایا با استفاده از رهیافت آشفته URANS در عین حفظ راندمان عددی و ارزیابی این روش نسبت به رویکرد RANS در شبیه‌سازی عددی یک جت صوتی در جریان جانبی مافوق صوت است. مدل آشفته مورد استفاده در هر دو رهیافت، مدل آشفته اسپالارت آلماراس می‌باشد. برای بهبود دقت محاسبات از شبکه‌بندی چندبندی با سازمان و برای تسریع محاسبات از روش پردازش موازی به روش OMP استفاده شده است. در این مقاله، ابتدا روابط حاکم بر هر دو رهیافت URANS و RANS تشریح می‌شود و سپس کد توسعه‌یافته، برای تحلیل جریان یک جت سه‌بعدی در جریان جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرد و نتایج آنها در تشکیل ساختار جریان و توزیع فشار و سرعت با نتایج تجربی مقایسه می‌شود. نتایج بیانگر دقت مناسب‌تر رهیافت URANS در مدلسازی پدیده جت صوتی در جریان عرضی نسبت به مدلسازی آشفته RANS می‌باشد.

واژگان کلیدی

شبیه‌سازی عددی جریان ناپایا، مدل آشفته URANS و RANS، جت در جریان عرضی، روش چندبندی موازی

۱. مقدمه

است که تغییر متوسط مشخصات آنها تابعی از زمان نیست و یکنواخت است. در این نوع جریان‌ها، که ایستا^۱ نامیده می‌شوند، می‌توان از معادلات متوسط‌گیری شده زمانی (معادلات RANS^۲) برای مدلسازی آشفته استفاده نمود. چنانچه فیزیک جریانی غیرایستا^۳ باشد، حتی متغیرهای متوسط جریان نیز تابعی از زمان خواهند بود؛ بنابراین نمی‌توان از معادلات RANS برای مدلسازی آشفته استفاده نمود. در واقع معادلات RANS با متوسط‌گیری زمانی که انجام می‌دهند تغییرات زمانی ساختارهای اصلی جریان را از بین می‌برند و تنها آثار تغییرات زمانی نوسانات آشفته را

جت در جریان جانبی به‌طور وسیعی در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال در ناحیه قبل از ورود جریان اصلی به محفظه احتراق توربین گاز از جریان جت برای اختلاط پهنه‌گازها استفاده می‌شود و یا در خروجی نازل هواپیماهای جنگنده از یک جت عرضی برای ایجاد انحراف در بردار تراست هواپیما و کنترل آن استفاده می‌شود. شبیه‌سازی عددی دقیق چنین جریانی، علاوه بر استفاده از روش‌های عددی مطمئن، نیازمند مدلسازی آشفته مناسب است. آشفته ذاتاً پدیده‌ای غیردائم و سه‌بعدی است، اما فیزیک برخی جریان‌ها به‌گونه‌ای

توسط مدلسازی آشفتگی مدل می‌کنند. مدل‌های آشفتگی مبتنی بر معادلات RANS قادر به مدلسازی آثار نوسانات منسجم جریان نیستند. از اینرو، معادلات RANS باید به‌گونه‌ای تغییر یابند که بتوانند ساختارهای نوسانات منسجم^۴ را از نوسانات آشفتگی^۵ جدا کند.

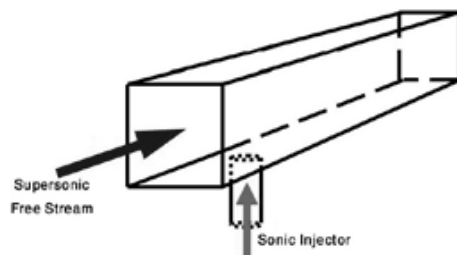
روش‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) و شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) روش‌هایی هستند که مستقیماً تمام نوسانات جریان بزرگتر از ابعاد شبکه را محاسبه می‌کنند. اما رهیافتی که معادلات RANS را قادر به شبیه‌سازی تغییرات زمانی ساختارهای منسجم جریان می‌کند، معادلات URANS^۶ می‌باشد [۱-۳]. شبیه‌سازی جریان‌های آشفتۀ گذرا با مدل‌های پایا (RANS) معمولاً دقت خوبی ندارند و با خطاهایی همراهند [۴-۶] که عمدتاً به‌خاطر ماهیت ناپایای جریان اصلی است [۷]. چون آشفتگی ذاتاً پدیده‌ای غیردائم است، حتی در جریان‌های ایستایی که شدت آشفتگی آنها بالاست، تغییرات زمانی نوسانات و ادی‌های کوچک حائز اهمیت می‌شوند و مدلسازی RANS می‌تواند با خطا مواجه گردد. معادلات URANS با بازه‌های کوچکتر انتگرالگیری و گام زمانی کوچکتر در حل جریان، حتی در جریان‌های آشفتۀ ایستا نیز اجازه شکل‌گیری برخی ساختارهای آشفتۀ را داده و آثار ادی‌های کوچک را بهتر پیش‌بینی می‌کنند. مدل آشفتگی LES همچون مدل URANS نیز برای جریان‌های آشفتۀ ناپایا توسعه داده شده است و قابلیت استخراج ساختارهای وابسته به زمان را دارد. اما از این مدل آشفتگی با اینکه هزینه محاسباتی بالایی دارد، برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفتۀ ایستا نیز استفاده می‌شود.

در دهه اخیر، تحقیقات زیادی به روش LES برای استخراج تغییرات زمانی آشفتگی در شبیه‌سازی جریان جت عرضی صورت گرفته است [۸-۱۱]. در تمام این تحقیقات شبیه‌سازی جریان آشفتۀ جت عرضی به روش LES آورده شده‌اند، اما در مراجع [۱۳-۱۴]، نتایج دو روش مدلسازی آشفتگی RANS و LES با هم مقایسه شده‌اند که هر دو مرجع نشان می‌دهند روش LES دقت بالاتری نسبت به RANS دارد. با اینکه مدلسازی آشفتگی به روش LES دقت مناسبی دارد، اما از دیدگاه مهندسی و طراحی، استفاده از این روش صرفه زمانی ندارد. به‌همین دلیل بهره‌بردن از روش URANS که هم از نظر زمانی دارای راندمان بالایی است و هم دارای دقت مناسبی در حل مسائل آشفتۀ

ناپایاست، انتخاب مناسبی به‌شمار می‌رود. در مراجع [۵، ۶ و ۱۵] نشان داده شده است که استفاده از روش آشفتۀ URANS در مدلسازی جت در جریان عرضی، دقت نتایج را نسبت به روش RANS بهبود داده است. مرجع [۱۶] نیز با مقایسه روش‌های URANS و LES در شبیه‌سازی جریان جت عرضی، مزایا و معایب هر یک را توضیح داده است. چنین مقایسه‌ای در پدیده‌های دیگر نیز توسط محققان انجام شده است [۱۷-۱۹].

۲. تعریف مسئله و مشخصات حل

مسئله مورد بررسی در این مقاله شامل تحلیل عددی برخورد یک جریان جت عرضی صوتی با جریان آزاد فراصوت است که مشخصات جریان مورد نظر در جدول ۱ خلاصه شده است. در این مقاله، مدلسازی آشفتگی ناپایای این جریان با استفاده از رهیافت URANS برای حل جریان ناپایا صورت گرفته و نتایج حاصل با رویکرد پایای جریان در معادلات RANS مقایسه شده است. در شکل ۱ نمایی شماتیک از جریان جت مورد مطالعه نمایش داده شده است.



شکل ۱. نمایی از جریان جت صوتی در جریان فراصوت

مدل آشفتگی مورد استفاده در هر دو رهیافت، مدل آشفتگی تک معادله‌ای اسپالارت آلماراس^۷ است که جزئیات آن در مرجع [۱] آورده شده است. گسسته‌سازی معادلات در تحقیق حاضر به روش حجم محدود و تعیین شارها به روش AUSM صورت گرفته است. برای بهبود دقت محاسبات از شبکه‌بندی چندبُلوکی با سازمان و برای تسریع محاسبات از روش پردازش موازی به روش OMP استفاده شده و همچنین برای افزایش دقت حل از روش مرتبه دو MUSCL استفاده شده است. در این مقاله، ابتدا روابط حاکم بر هر دو رهیافت URANS و RANS و تفاوت‌های آنها تشریح خواهد شد و سپس کد توسعه‌یافته برای تحلیل جریان یک جت سه‌بعدی در جریان جانبی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آنها در تشکیل ساختار جریان و توزیع فشار و سرعت بررسی

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (2)$$

به طوری که در آن بردار سرعت، p فشار، ρ چگالی، μ لزجت دینامیکی، t زمان و x_i مختصات است. برای مدل سازی جریان آشفته هر متغیر میدان η به دو مؤلفه متوسط $\bar{\eta}$ و نوسانی η' تقسیم می‌گردد. مؤلفه‌های متوسط جریان به منظور مدل سازی خصوصیات در مقیاس بزرگ جریان به کار برده می‌شوند.

$$\eta = \bar{\eta} + \eta' \quad (3)$$

کمیت متوسط $\bar{\eta}$ را می‌توان به دو روش متوسط گیری زمانی^۱ و متوسط گیری جمعی^۲ محاسبه نمود. هریک از این متوسط گیری‌ها به رویکردی در مدل سازی جریان آشفته منجر می‌شود که نهایتاً متوسط گیری زمانی، معادلات RANS و متوسط گیری جمعی، معادلات URANS را نتیجه می‌دهند.

۳-۱. متوسط گیری زمانی (معادلات RANS)

رویکرد معمول در استفاده از معادلات ناویر استوکس برای تحلیل جریان آشفته، متوسط گیری زمانی از معادلات حاکم است. این رویکرد با نام متوسط گیری رینولدز معادلات ناویر استوکس شناخته می‌شود. با اینکه آشفتگی ذاتاً یک پدیده غیردائم و سه بعدی است، اما فیزیک برخی جریانات به گونه‌ای است که تغییر متوسط مشخصات آنها، تابعی از زمان نیست و یکنواخت است. در این نوع جریان‌ها، که ایستا نامیده می‌شوند، می‌توان از معادلات متوسط گیری شده زمانی RANS برای مدل سازی آشفتگی استفاده نمود. در متوسط گیری RANS، برای یک آزمایش، مقادیر میدان η را در لحظات مختلف آزمایش اندازه گیری نموده و از آنها نسبت به زمان متوسط گیری می‌شود:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \eta dt \quad (4)$$

در تعریف فوق، دامنه زمانی T در مقایسه با زمان حرکت آشفته و یا به عبارتی در مقایسه با مقیاس زمانی آرامترین تغییرات در خاصیت η که به واسطه حضور بزرگترین ادی‌ها می‌باشد، بسیار بزرگتر است. در حقیقت دامنه متوسط گیری زمانی باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا مطمئن شد که مقادیر متوسط در این بازه زمانی، تغییر نمی‌یابند (شکل ۲). با توجه به به کارگیری رابطه

خواهد شد. با وجود تحقیقات گسترده‌ای در خصوص ارزیابی مدل آشفتگی گذرا در پدیده‌های مختلف، مطالعات نشان می‌دهد که اکثراً محققان از مدل آشفتگی LES برای شبیه سازی پدیده‌های ناپایا استفاده کرده‌اند و در معیار مقایسه خود از روش RANS با مدل‌های دومعادله‌ای مانند K- ϵ و K- ω بهره برده‌اند. همچنین اکثراً تحلیل‌های خود را با استفاده از شبکه بندی بی‌سازمان و تک‌بلوکی انجام داده‌اند. در حالی که در تحقیق حاضر از شبکه چندبلوکی با سازمان و مدل آشفتگی تک‌معادله‌ای SP برای شبیه سازی جت در جریان عرضی استفاده شده است. با توجه به اینکه آشفتگی و تشکیل ادی‌ها از مرزهای جسم ایجاد می‌شود، کیفیت شبکه نزدیک دیواره در دقت نتایج و مدل سازی حائز اهمیت است. استفاده از شبکه با سازمان برای کاربر این امکان را فراهم می‌کند که تا حد کفایت، شبکه را نزدیک مرز دیواره ریز کرده و نتایج مناسب را به دست آورد. چندبلوکی کردن میدان حل در شبکه با سازمان نیز امکان استفاده از پردازش موازی را آسان کرده و زمان محاسبات را کاهش می‌دهد. همچنین یکی از برتری‌های تحقیق حاضر نسبت به مطالعات مشابه مربوط به راندمان محاسباتی است. این موضوع را می‌توان در دو روش جستجو کرد، یکی استفاده از مدل آشفتگی تک‌معادله‌ای SP که در مقابل با مدل‌های دو معادله به شدت زمان محاسبات را کاهش می‌دهد و دیگری، بهره بردن از رهیافت URANS برای تحلیل جریان‌های ناپایا در زمان‌های واقعی که در مقابل روش‌هایی مانند LES، چندین برابر زمان محاسبات کمتری دارد. با اینکه استفاده از این روش‌ها دقت محاسبات را نسبت به روش LES کاهش می‌دهد، اما نتایج مقاله حاضر و مقایسه با نتایج حاصل از روش LES نشان می‌دهد که در مقابل صرفه جویی زمانی که روش URANS دارد، دقت‌های مناسبی استخراج می‌گردد. در واقع نوآوری مقاله حاضر به استفاده ترکیبی از روش URANS در شبکه بندی با سازمان و چندبلوکی و بهره بردن از سیستم پردازش موازی و ارزیابی ساختار جریان در مقایسه با رویکرد RANS، در کنار راندمان بالای محاسباتی می‌باشد که در مقاله مشابهی گزارش نشده است.

۳. معادلات حاکم

معادلات ناویر - استوکس برای جریان تراکم پذیر آرام به شکل زیر می‌باشند:

شده و مقادیر میدان جریان η در لحظه t برای هر آزمایش اندازه‌گیری شود، متوسط جمعی (η) از رابطه ۷ تعیین می‌گردد:

$$\langle \eta \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (7)$$

این نوع متوسط‌گیری عملاً در آزمایش‌های تجربی استفاده می‌شود، اما برای استفاده آن در شبیه‌سازی عددی فرض می‌شود که ساختارهای ناپایایی منسجم^{۱۱} به شکل پریودیک با زمان تغییر کنند (شکل ۲). در این صورت مجموع داده‌هایی که در هر سیکل نوسانی تکرار می‌شوند برای این نوع متوسط‌گیری قابل استفاده هستند (متوسط‌گیری فازی^{۱۲}). در واقع در این‌گونه جریان، متوسط‌گیری فازی، نوع خاصی از متوسط‌گیری جمعی می‌شود. اثبات می‌شود که به‌طور کلی برای متوسط‌گیری جمعی مقادیر جریان، آن مقادیر باید از همان ابتدا تکرارپذیر باشند و لزومی ندارد که حتماً پریودیک باشند [۱]. با این تعاریف هر متغیر لحظه‌ای از جریان (مانند η) را می‌توان بصورت مجموع متوسط جمعی آن ($\langle \eta \rangle$) و مقدار نوسان آشفتگی آن (η') نوشت.

$$\eta(x_i, t) = \langle \eta \rangle(x_i, t) + \eta'(x_i, t) \quad (8)$$

به‌عنوان مثال در شکل ۳، سرعت لحظه‌ای u برای یک نقطه در یک دوره زمانی، سرعت متوسط جمعی $\langle u \rangle$ و سرعت نوسانات آشفتگی u' مشاهده می‌گردد. با به‌کارگیری تجزیه متغیرهای جریان (رابطه ۸) و پس از ساده‌سازی، معادلات متوسط‌گیری شده جمعی ناویر-استوکس به فرم معادلات ۹ و ۱۰ درمی‌آیند:

$$\frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \rho \rangle \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \langle \rho \rangle \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \rho \rangle \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \rho \langle u_i u_j \rangle \right) \quad (10)$$

در رابطه فوق نیز مقدار $\rho \langle u_i u_j \rangle$ تانسور تنش رینولدز نامیده شده که تابعی از زمان است و توسط مدل‌های آشفتگی مدلسازی می‌شود. تفاوت رابطه ۳ در متوسط‌گیری زمانی و رابطه ۸ در متوسط‌گیری جمعی مقدار متوسط آنهاست که در اولی تابعی از زمان نبوده و در دومی تابع زمان می‌باشد. با رابطه زیر می‌توان مقادیر متوسط جمعی را به یک ترم متوسط غیروابسته به زمان و ترم وابسته به زمان تجزیه نمود:

$$\langle \eta \rangle(x_i, t) = \eta(x_i) + \tilde{\eta}(x_i, t) \quad (11)$$

۳ برای متغیرهای جریان و پس از ساده‌سازی معادلات متوسط‌گیری شده زمانی ناویراستوکس (معادلات RANS) به فرم زیر درمی‌آیند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right) \quad (6)$$

ترم زمانی در سمت چپ معادلات در جریانات ایستا صفر است، اما چون می‌توان از آن به‌عنوان زمان مجازی و برای همگرایی حل استفاده نمود، در معادلات حفظ شده‌است. ترم $\rho \overline{u_i u_j}$ که به نام ترم تنش رینولدز شناخته می‌شود، به دلیل ماهیت نفوذی^{۱۱} آن به سمت راست معادله منتقل می‌گردد. این ترم برای حل معادلات RANS باید توسط مدل‌های آشفتگی مدلسازی شود که در این تحقیق از روش یک معادله‌ای اسپالارت آلماراس استفاده شده است.

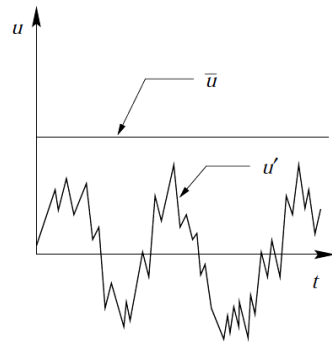
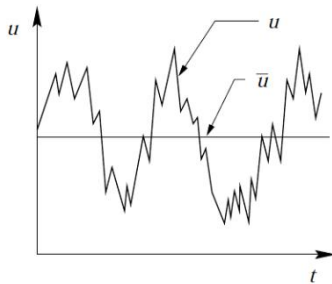
۲-۳. متوسط‌گیری جمعی (معادلات URANS)

همان‌گونه که بیان شد، آشفتگی ذاتاً یک پدیده ناپایا و سه‌بعدی است. چنانچه فیزیک جریانی غیرایستا باشد، متغیرهای متوسط جریان نیز تابعی از زمان خواهند بود، بنابراین نمی‌توان از معادلات متوسط‌گیری شده زمانی (معادلات RANS) برای مدلسازی آشفتگی استفاده نمود. در واقع معادلات RANS با متوسط‌گیری زمانی که انجام می‌دهند تغییرات زمانی ساختارهای اصلی جریان را از بین می‌برند و تنها آثار تغییرات زمانی نوسانات آشفتگی را توسط مدلسازی آشفتگی مدل می‌کنند. مدل‌های آشفتگی مبتنی بر معادلات RANS قادر به مدلسازی آثار نوسانات منسجم جریان نیستند. از اینرو این معادلات باید طوری تغییر یابند که بتوانند ساختارهای نوسانات منسجم را از نوسانات آشفتگی جدا کند. علاوه بر مدل‌های آشفتگی LES و DNS، که مستقیماً تمام نوسانات جریان بزرگتر از ابعاد شبکه را محاسبه می‌کنند، رهیافتی که معادلات RANS را قادر به شبیه‌سازی تغییرات زمانی ساختارهای منسجم جریان می‌کند، معادلات URANS می‌باشد. برای استخراج معادلات URANS، باید به‌جای متوسط‌گیری زمانی از متوسط‌گیری جمعی استفاده نمود. چنانچه یک آزمایش جریان آشفتگی که شرایط آن کاملاً تکرارپذیر است، N بار انجام

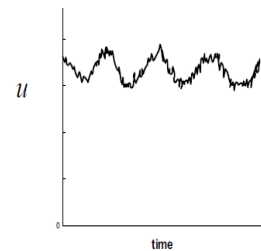
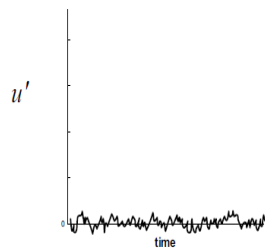
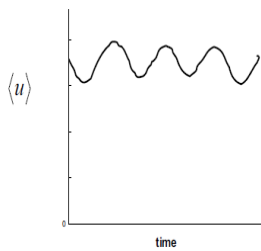
ترکیب کرد. با به کارگیری تجزیه دوم متغیرها و متوسط گیری زمانی، معادلات ناویراستوکس به شکل زیر درمی آیند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (13)$$



شکل ۲. مقدار لحظه‌ای، متوسط و نوسانات آشفتگی



شکل ۳. نمایی از الف) سرعت لحظه‌ای u برای یک نقطه در یک دوره زمانی، ب) سرعت متوسط جمعی (u) و ج) سرعت نوسانات آشفتگی u'

ترم اول در سمت راست این معادله را می توان از رهیافت URANS به دست آورد و ترم دوم (تنش رینولدز) را می توان از مدل های مختلف آشفتگی محاسبه نمود. با جایگزینی ۱۴ در روابط ۱۲ و ۱۳ همان معادلات RANS (روابط ۵ و ۶) حاصل می گردد. با این تفاوت که برای استخراج ساختارهای نوسانات منسجم، بازه زمانی انتگرال گیری در URANS باید بسیار کوچکتر از مقیاس زمانی ساختارهای نوسانی منسجم انتخاب گردد. بنابراین چنانچه جریان تراکم پذیر باشد، معادلات URANS به فرم زیر درمی آیند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (16)$$

در این رابطه η مقدار متغیر نوسانات منسجم جریان است که ساختار آشفته ندارد. دامنه زمان متوسط گیری η باید به اندازه کافی باشد تا تمام نوسانات ساختار منسجم آشفته در متوسط گیری دخیل باشند. تفاوت معادلات RANS و URANS در متوسط گیری زمانی رابطه ۱۱، مقدار دامنه زمانی متوسط گیری T است. در حقیقت در روش URANS این بازه باید به مقدار کافی باشد تا بتوان ساختارهای نوسانات آشفته را با نوسانات منسجم

در این روابط، $\rho \overline{u_i' u_j'}$ متوسط زمانی نوسانات منسجم و $\rho \langle \overline{u_i' u_j'} \rangle$ متوسط زمانی تنسور تنش رینولدز است. چنانچه از معادلات اصلی ناویراستوکس (روابط ۱ و ۲) در یک بازه زمانی زیاد متوسط گیری شود، به طوری که تمامی نوسانات استخراج شود، معادلات ۵ و ۶ به دست می آیند که ترم اصلاحی آن مربوط به هر دو ساختارهای منسجم و آشفته می باشد. بنابراین اگر تمام نوسانات جریان شامل نوسانات ساختارهای منسجم و نوسانات ساختار آشفته سرعت را u_i'' u_j'' بنامیم می توان رابطه زیر را نوشت:

$$\rho \overline{u_i'' u_j''} = \rho \overline{u_i' u_j'} - \rho \langle \overline{u_i' u_j'} \rangle \quad (14)$$

$$\vec{Q}^0 = \vec{Q}^n \quad (18)$$

$$\vec{Q}^k = \vec{Q}^0 + a_k \Delta t \text{Res}(\vec{Q}^{k-1}), \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

$$\vec{Q}^{n+1} = \vec{Q}^m \quad (20)$$

در این روابط \vec{Q} معرف بردار حل و a_k ثوابت دلخواهی هستند که مقادیر بهینه آنها با توجه به مرتبه رانگ کوتای مورد استفاده تغییر می‌کند. همچنین Δt معرف گام زمانی است. چون در مدلسازی آشفتگی RANS حل حالت دائم مورد نظر بوده، برای تسریع در همگرایی حل از روش گام زمانی محلی استفاده شده است. در هر حجم کنترل Δt گام زمانی به‌طور جداگانه محاسبه می‌شود:

$$\Delta t = CFL \frac{\Omega_i}{(\Lambda_c^t + \Lambda_c^j + \Lambda_c^k)_i + C(\Lambda_v^t + \Lambda_v^j + \Lambda_v^k)_i} \quad (21)$$

شعاع طیفی شارهای غیرلزج در سه بعد به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\Lambda_c^t = |\vec{V} \cdot \vec{n}^t| + c \Delta S^t \quad (22)$$

$$\Lambda_c^j = |\vec{V} \cdot \vec{n}^j| + c \Delta S^j \quad (23)$$

$$\Lambda_c^k = |\vec{V} \cdot \vec{n}^k| + c \Delta S^k \quad (24)$$

که در آن V بردار سرعت، S سطح هر سلول، n بردارهای عمود بر هر سطح سلول بوده و c مقدار ثابتی است که در این تحقیق مقدار ۴ در نظر گرفته شده است. چون برای استخراج ساختارهای نوسانات منسجم در روش URANS، بازه زمانی انتگرالگیری باید کوچکتر از مقیاس زمانی ساختارهای نوسانی باشد، گام زمانی در حل عددی حداقل از مرتبه مقیاس زمانی کوچکترین ساختار منسجم آشفته در جریان انتخاب می‌گردد. با توجه به اینکه در مدلسازی جریان گذرا گام زمانی بیانگر گام برداشتن حل در زمان واقعی است و نه مجازی، بنابراین گام زمانی انتخاب‌شده برای هر سلول محاسباتی یکسان و برابر با کوچکترین گام زمان محاسبه‌شده در کل میدان حل تعیین می‌شود:

$$\Delta t = \min(\Delta t_i) \quad (25)$$

۳-۴. متوسط گیری نتایج

در تبدیل رهیافت RANS به URANS نحوه خروجی نتایج نیز بسیار مهم است. با توجه به اینکه در شبیه‌سازی به روش URANS با برداشتن هر گام، زمان فیزیک واقعی سپری میشود، نتایج شامل دو بخش می‌گردد: نتایج جریان لحظه‌ای^{۱۴} و نتایج جریان متوسط^{۱۵}. چون در حالت دائم جریان، تنها نتایج همگرا

$$\begin{aligned} & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j'' \right) \\ & \frac{\partial \rho H}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho H u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \bar{H} \bar{u}_j'' \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(u_i \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j'' \right) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

که در آن H آنتالپی کل و λ ضریب هدایت حرارتی است. معادلاتی که روش مدلسازی آماری را توصیف می‌کنند، بر مبنای متوسط‌گیری جمعی بیان شده‌اند، اما در عمل از کمیت‌های متوسط زمانی استفاده می‌شود. برای جریاناتی که از لحاظ آماری ایستا هستند، متوسط‌گیری جمعی و زمانی نتایج یکسانی را ارائه می‌کند. بنابراین چنانچه نیاز باشد، آثار زمان در جریان‌های گذرا مشاهده شود، باید از معادلات URANS استفاده گردد.

۳-۳. روش حل عددی و گام زمانی

در مقاله حاضر، برای شبیه‌سازی جریان از شبکه‌بندی با سازمان در میدان حل چندبُلُکی استفاده شده است. گسسته‌سازی معادلات به روش حجم محدود و تعیین شارها به روش AUSM صورت گرفته است. همچنین برای افزایش دقت حل، از روش مرتبه دو MUSCL استفاده شده است. جزئیات روش‌های به‌کار رفته در این خصوص در مرجع [۲۰] ذکر شده است. در انتخاب گام زمانی دو رویکرد کلی وجود دارد: گام زمانی ثابت و محلی^{۱۳}. در مسائل دائم که جواب نهایی مورد نظر بوده و حل‌های میانی حائز اهمیت نیستند، برای تسریع در همگرایی حل از روش گام زمانی محلی استفاده می‌شود. بدین‌صورت که برای هر سلول محاسباتی، گام زمانی مربوط به همان سلول محاسبه شده و در معادلات به‌کار برده می‌شود. با این روش جواب‌های به‌دست آمده در مراحل میانی فاقد ارزش می‌باشند؛ زیرا گام‌های زمانی مجازی بوده و تطابقی با فیزیک مسئله ندارند. مزیت این روش این است که سلول‌هایی که حجم بزرگتر دارند، گام زمانی بزرگتری داشته و میدان سریع‌تر همگرا می‌شود. اما در مسائل غیردائم هدف این است که در هر لحظه جواب صحیحی از میدان جریان در دست باشد، بنابراین لازم است که تمام گام‌های حل عددی مطابق با فیزیک و زمان واقعی پیش بروند. در تحقیق حاضر، برای انتگرالگیری زمانی از روش تکراری صریح چندمرحله‌ای رانگ کوتا به فرم زیر استفاده می‌شود.

تولیدشده در هر بلوک با سازمان است. تعداد شبکه‌های باسازمان برای هر بلوک در جدول ۲ خلاصه شده است. تعداد کل سلول به‌کار رفته ۱۱۷۲۵۰۰ سلول بوده و فاصلهٔ اولین شبکه از دیواره ۷/۶ میکرومتر می‌باشد (شکل ۵). بحث اعتبارسنجی و استقلال حل از شبکه به تفصیل در مرجع [۲۰] آورده شده‌است و شبکهٔ انتخابی مناسبترین شبکه در تحلیل جریان حاضر می‌باشد. همچنین مقدار Y^+ به‌دست آمده در حل‌های حاضر (شکل ۸) بیانگر این است که شبکه به‌کار رفته برای تحلیل حاضر مناسب می‌باشد. در شکل ۶ شرایط مرزی به‌کار رفته در حل حاضر آورده شده‌است. مرز بین بلوک‌ها با استفاده از انتقال داده‌ها و مرز دوردست با استفاده از خطوط مشخصه به‌صورت غیرانعکاسی اعمال می‌گردد. برای مرز ورودی جریان، شرط ورودی فراصوت و روی دیواره، شرط مرزی بدون لغزش در نظر گرفته شده است. نرخ همگرایی حل برای مدلسازی RANS در شکل ۷ آورده شده که در ۳۳۰۰۰ تعداد تکرار رخ داده است. چون در رهیافت URANS، معادلات به‌صورت ناپایا حل می‌شوند، لذا نرخ همگرایی حل معنایی ندارد و معادلات در زمان واقعی گام برمی‌دارند. در حل جریان ناپایا، مقادیر اولیه در میدان حل همان شرایط جریان فراصوت ورودی بوده و جریان جت صوتی از لحظهٔ اول به جریان ورود پیدا می‌کند. گام زمانی استفاده‌شده در این تحلیل، گام زمانی ثابت در هر تکرار است که در تکرارهای مختلف، متغیر است. کمترین مقدار محاسبه‌شده آن در تحلیل حاضر، 10^{-7} ثانیه و بیشترین مقدار آن 5×10^{-7} ثانیه می‌باشد. این محدودهٔ گام زمانی بیانگر زمان طولانی برای اجرای برنامه تا شکل‌گیری ساختار نهایی جریان است. نتایجی که در این مقاله ارائه شده، بعد از گذشت ۲۷۰ میلی‌ثانیه می‌باشد. با اینکه همگرایی حل در روش URANS معنایی ندارد، اما چون فیزیک مورد بررسی یک فیزیک ایستا می‌باشد، تغییرات متوسط باقیمانده‌ها بعد از گذشت زمان مذکور به 10^{-5} رسیده است، بنابراین تا این زمان ساختار مناسبی از جت شکل گرفته که قابل مقایسه با نتایج حاصل از روش RANS می‌باشد. در حل حاضر، زمان لازم برای هر گام زمانی توسط یک کامپیوتر با پردازنده Intel(R) core i5, CPU 3.4 GHz و استفاده از الگوریتم پردازش موازی به روش OpenMp و ۳ هسته حدود ۵ ثانیه است. چون معیار مهمی در صحت استفاده از مدلسازی‌های آشفتگی می‌باشد، در شکل ۸، مقایسه مقدار Y^+ برای دو رهیافت RANS

شده جریان قابل قبول است، در روش RANS، نتایج پس از تکرار مشخص و رسیدن به معیار همگرایی، به‌عنوان خروجی نهایی جریان ثبت می‌شوند. اما در شرایط غیردائم نیاز به ثبت داده‌های جریان در هر لحظه می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه آنچه در فیزیک واقعی ثبت می‌گردد، جریان متوسط است و نه جریان لحظه‌ای، بنابراین علاوه بر خروجی لحظه‌ای، برای مقایسه جریان متوسط با نتایج تجربی و نتایج روش RANS نیاز به متوسط‌گیری داده‌ها در یک بازهٔ زمانی مناسب می‌باشد. چون مبنای روش URANS، متوسط‌گیری جمعی است، در این مقاله نیز برای خروجی نتایج نیز از متوسط‌گیری جمعی استفاده شده است. برای این منظور، در کد توسعه‌یافته، متغیری به منظور تعداد داده ذخیره شده تعریف شده که متعاقباً از آنها برای متوسط‌گیری جمعی استفاده می‌شود. این مقدار در نتایج ارائه‌شده ۳۰۰ است. بنابراین برای استخراج نتایج، همواره ۳۰۰ داده آخر برای متوسط‌گیری جمعی طبق رابطهٔ ۲۶ استفاده می‌شود:

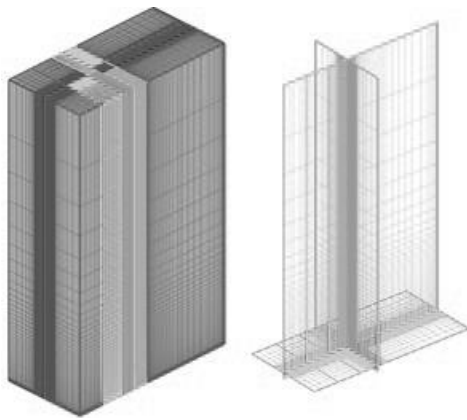
$$\langle \eta \rangle = \frac{1}{300} \sum_{i=1}^{300} \eta_i \quad (26)$$

۴. نتایج

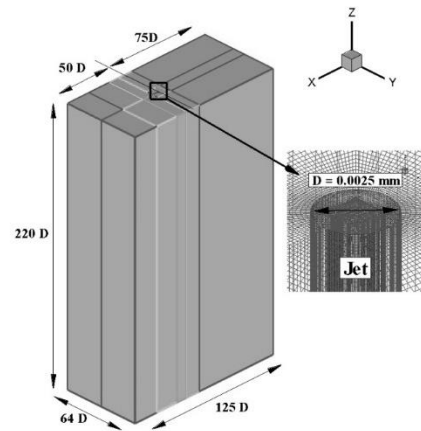
برای ارزیابی مدل آشفتگی URANS نسبت به روش RANS، برخورد یک جریان جت عرضی صوتی با جریان آزاد فراصوت بررسی می‌گردد. جریان انتخاب‌شده در این تحقیق، نتیجهٔ آزمایش تجربی سانتیاگو و داتون [۲۱] است. مشخصات جریان مورد نظر در جدول ۱ خلاصه شده است. با اینکه فیزیک جریان متوسط جت عرضی یک مسئله ایستا به‌شمار می‌رود، اما ساختار اختلاط دو جریان عمود بر هم به‌شدت آشفتنه است و در عین ایستا بودن جریان متوسط، تشکیل و اضمحلال ادیبا شدیداً وابسته به زمان است. از اینرو با توجه به آشفتگی شدید و ناپایایی ذاتی جریان مذکور، این مسئله با هدف بررسی اثر مدلسازی آشفتگی URANS در استخراج ساختارهای چنین جریانی در مقایسه با رهیافت RANS مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این بخش انتظار می‌رود که معادلات URANS با بازه‌های کوچکتر انتگرالگیری و گام زمانی کوچکتر در حل جریان، اجازهٔ شکل‌گیری برخی ساختارهای آشفتنه را داده و آثار ادی‌های کوچک را بهتر پیش‌بینی کنند. دامنهٔ حل و تعداد بلوک به‌کار رفته در حل حاضر در شکل ۴ مشاهده می‌گردد. دامنهٔ حل از ۱۵ بلوک تشکیل شده که شبکهٔ

و URANS در نزدیکی دیواره آورده شده است. همانگونه که در منابع مدلسازی آشفتگی اشاره شده است [۱]، شبکه‌بندی که شرط $Y^+ < 25$ را بدون استفاده از توابع اصلاح دیواره ارضا کند، برای حل جریان آشفته مناسب است.

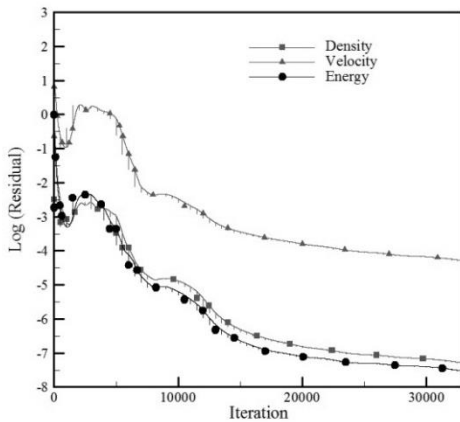
شکل ۴. دامنه حل برای حل جریان جت عرضی



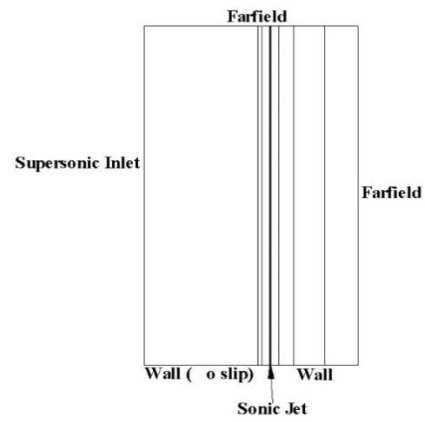
شکل ۵. شبکه سه‌بعدی به کار رفته برای حل جریان جت عرضی



شکل ۴. دامنه حل برای حل جریان جت عرضی



شکل ۷. نرخ همگرایی حل در مدلسازی RANS



شکل ۶. شرایط مرزی به کار رفته در حل جریان حول جت عرضی

جدول ۱. مشخصات جریان جت صوتی در جریان فراصوت

مقدار	پارامتر
۱/۶	ماخ جریان آزاد
$2/4 \times 10^5$	رینولدز جریان آزاد بر مبنای قطر جت
۵/۵	نسبت چگالی محفظه نازل به چگالی جریان آزاد
۸/۴	نسبت فشار محفظه نازل به فشار جریان آزاد
۱/۷	نسبت شار مومنتوم جت به جریان آزاد

شکل ۸ نشان می‌دهد برای هر دو رهیافت این شرط ارضا می‌شود، اما با استفاده از روش URANS مقدار Y^+ کمتری نسبت به روش RANS محاسبه می‌شود و انتظار می‌رود ساختارهای آشفتگی تولیدشده از دیواره را بهتر مدلسازی کند. محاسبه مقدار Y^+ پایین‌تر با استفاده از روش URANS نسبت به روش RANS بیانگر اهمیت استفاده از رهیافت‌های آشفته دقیق‌تر حتی

در جریان‌های آشفته ایستا است. بردار سرعت به‌دست آمده از روش URANS در شکل ۹ نیز بیانگر مناسب بودن شبکه استفاده‌شده نزدیکی دیواره است. برای مقایسه ساختار جریان حاصل از هر دو رهیافت، کانتور و خطوط جریان در مقاطع مختلف رسم شده‌اند. در شکل ۱۰، مقایسه کانتور عدد ماخ حاصل از حل‌های حاضر در صفحه $y=0$ آورده شده است. ساختار جت و

گردابه‌های ثانویه توسط روش URANS در تشکیل شوک λ در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

جریان برخوردی با آن، شوک کمائی و شوک λ به‌خوبی در نتایج حاصل از هر دو حل دیده می‌شوند. همچنین اثر استخراج

جدول ۲. تعداد شبکه هر بلوک در تحلیل حاضر

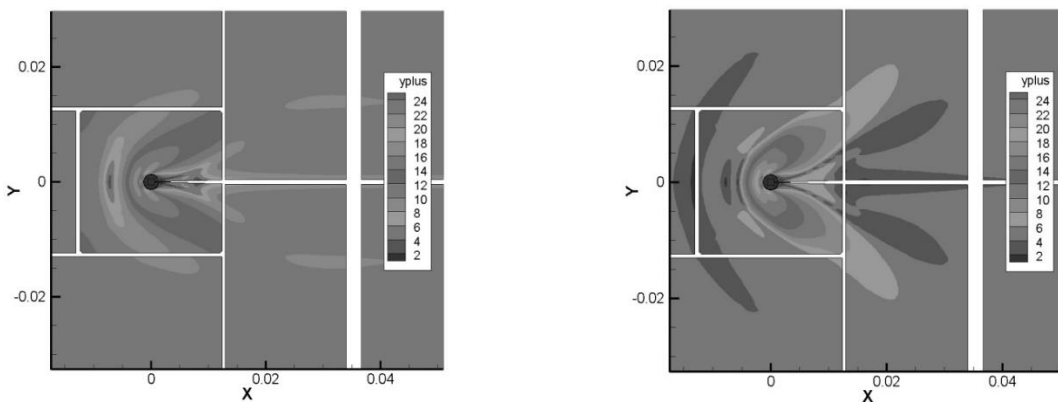
شماره بلوک	تعداد المان‌ها در راستای X	تعداد المان‌ها در راستای Y	تعداد المان‌ها در راستای Z	تعداد کل المان‌ها
۱	۳۱	۳۷	۶۷	۷۶۸۴۹
۲	۳۱	۲۳	۶۷	۴۷۷۷۱
۳	۳۱	۲۳	۶۷	۴۷۷۷۱
۴	۶	۳۷	۶۷	۱۴۸۷۴
۵	۴۶	۲۳	۶۷	۷۰۸۸۶
۶	۴۶	۲۳	۶۷	۷۰۸۸۶
۷	۱۵۳	۴۱	۶۷	۴۲۰۲۹۱
۸	۱۵۳	۱۱	۶۷	۱۱۲۷۶۱
۹	۴۱	۳۷	۶۷	۱۰۱۶۳۹
۱۰	۲۱	۴۱	۶۷	۵۷۶۸۷
۱۱	۲۱	۴۱	۶۷	۵۷۶۸۷
۱۲	۱۱	۴۱	۶۷	۳۰۲۱۷
۱۳	۱۱	۴۱	۶۷	۳۰۲۱۷
۱۴	۶	۴۱	۶۷	۱۶۴۸۲
۱۵	۶	۴۱	۶۷	۱۶۴۸۲

در شکل ۱۴ آورده شده است. تعیین دقیق‌تر این پارامتر توسط مدل URANS در نزدیکی دیواره پایین دست و بالادست جریان جت به خوبی مشهود است. برای مقایسه بهتر، این پارامترها در محل تقاطع صفحه $y=0$ و $x/D=2$ در شکل ۱۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که روش URANS مقدار لزجت آشفتگی بالاتری از روش RANS تخمین می‌زند. به‌منظور اطمینان از صحت و میزان دقت حل، پروفیل سرعت U حاصل از حل‌های حاضر در محل تقاطع صفحه $y=0$ با صفحات مختلف X با نتایج تجربی [۲۱] و نتایج حل عددی مدل آشفتگی LES [۲۲] در شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ مقایسه شده‌اند. گفتنی است تعداد شبکه به‌کار رفته در حل LES که نتایج دقیق‌تری نسبت به حل حاضر دارد، ۱۲ میلیون سلول می‌باشد. با توجه به اینکه در مقاطع $x/D=3$ و $x/D=5$ ، نتایج دو تست تجربی باهم مغایرت داشته، لذا برای آگاهی از عدم قطعیت نتایج تجربی، هر دو نتیجه تجربی آورده شده است [۲۱]. نتایج نشان می‌دهند که روند نتایج حل حاصل از دو رهیافت URANS و RANS تقریباً مشابه است و حل‌های حاضر دارای دقت مناسبی می‌باشند. اگرچه دقت مدل‌های آشفتگی DNS و LES در تسخیر توزیع پارامترهای جریان نسبت به رهیافت URANS بیشتر است، اما باید دقت شود که رسیدن به چنین نتایجی، نیازمند تعداد شبکه بالا و زمان محاسباتی بالا

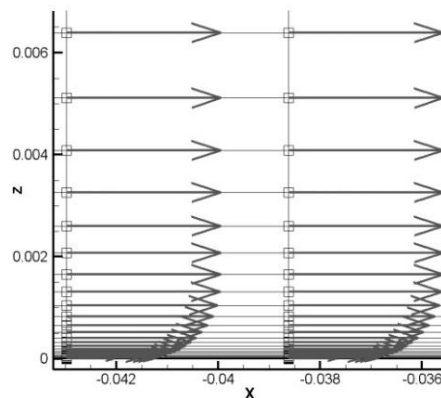
برای وضوح در ساختار جریان، خطوط جریان در مقاطع مختلف رسم شده است. این خطوط جریان به‌صورت جداگانه در صفحات مختلف X, Y و Z در شکل ۱۱ تا ۱۳ برای هر دو رهیافت مقایسه شده‌اند. چگونگی ساختار گردابه‌ها در سه راستای X, Y و Z به‌وضوح دیده می‌شود. مقایسه ساختار گردابه‌ها در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که هر دو رهیافت، گردابه‌های اصلی تشکیل شده در جلو جت را استخراج نموده‌اند، اما همان‌گونه که انتظار می‌رفت، معادلات URANS در تعیین گردابه‌های ثانویه، که نقش مهمی در توزیع فشار نزدیک جت و دیواره دارند، نسبت به معادلات RANS دقت بالاتری دارند. در شکل ۱۲ همین روند در مقاطع مختلف صفحات X مشاهده می‌شود و حتی در مقاطعی (مانند صفحه $X=4D, 6D$)، مشاهده می‌شود که رهیافت RANS قادر به استخراج گردابه‌های ثانویه نمی‌باشد، حال آنکه مدل URANS به این منظور دست یافته است. مقدار پایین‌تر Y^+ محاسبه شده نزدیک دیواره در روش URANS علت عمده این اختلاف‌ها به‌شمار می‌رود. در مسائل آشفتگی، تعیین مقدار صحیح لزجت آشفتگی که تأثیر مستقیم در محاسبه تنش‌های رینولدز را دارد بسیار حائز اهمیت می‌باشد. برای مشخص شدن تأثیر مدل آشفتگی در این پارامتر، مقایسه خطوط همتراز لزجت آشفتگی محاسبه شده توسط مدل URANS و RANS در صفحه $y=0$

پس از شکل‌گیری ساختار جت، ناچیز است، بنابراین اختلاف زیادی بین نتایج دو رهیافت انتظار نمی‌رود. اما چون رهیافت RANS بطور کامل از آثار ادی‌های کوچک به‌وجود آمده در پشت جت چشم‌پوشی کرده و رهیافت URANS اثر برخی از آنها را می‌بیند، نتایج حل، بهبود در ساختارهای شکل‌گرفته را نشان می‌دهند. برای مقایسه بهتر بین مدل‌های RANS و URANS، پارامتر نسبت فشار روی سطح دیواره در صفحه $y=0$ حاصل از بکارگیری دو رهیافت با نتایج تجربی [۲۰] در شکل ۲۰ مقایسه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد، حل حاصل از رهیافت URANS در برخی نقاط خصوصاً جلو جت دارای دقت بیشتری نسبت به رهیافت RANS و معادل با روش LES می‌باشد. علت آن نیز به قابلیت بیشتر روش URANS در استخراج گردابه‌های ثانویه جلو جت مربوط می‌شود (شکل ۱۱).

می‌باشد. در حالی‌که در روش حاضر با تعداد شبکه کمتر و زمان حل بسیار پایین‌تر، نتایج مناسبی در تحلیل جریانهای ناپایا بدست می‌آیند. در واقع یکی از برتری‌های روش URANS، نسبت به مدلسازی‌های LES، بالا بودن راندمان محاسباتی حل معادلات آشفته در جریان‌های ناپایا در عین دقت مناسب می‌باشد. چون معادلات RANS انتگرالگیری مقادیر را در بازه زمانی بزرگتری نسبت به معادلات URANS انجام می‌دهند، در مسائل ناپایا برخی ساختارهای جریان را از بین می‌برند و قادر نیستند که فیزیک آن را استخراج کنند. به همین دلیل اصولاً استفاده از معادلات URANS در مسائلی آثار خود را لحاظ می‌کند که از نظر فیزیکی ناپایا باشند و در مسائل پایا و یا ایستا اختلاف چندانی با رهیافت RANS ندارد. چون فیزیک جریان جت در جریان عرضی، یک مسئله ایستا به‌شمار می‌رود و تغییرات آن با زمان



شکل ۸. مقایسه خطوط جریان Y^+ در نزدیکی دیواره



شکل ۹. بردار سرعت نزدیک دیواره

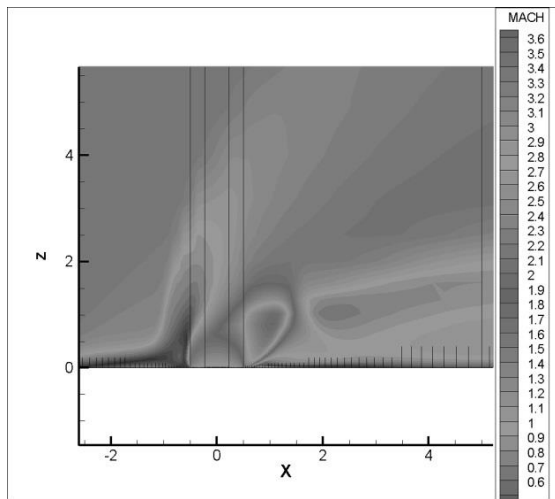
۵. جمع‌بندی

و نتایج حاصل با رویکرد پایای جریان در معادلات RANS مقایسه و آثار استفاده از این مدل آشفتگی در الگوی جریان و

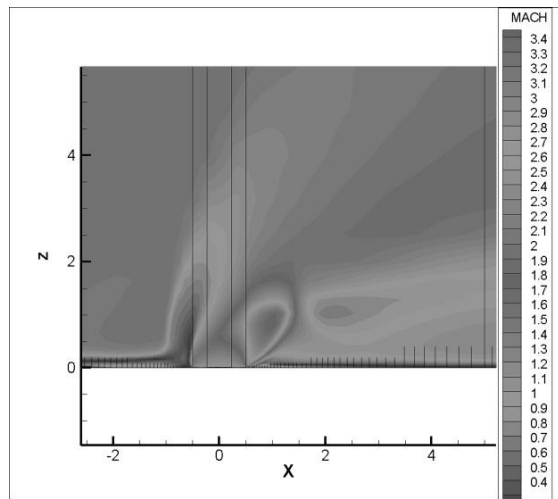
در این مقاله، شبیه‌سازی عددی جت صوتی در جریان جانبی فراصوت با استفاده از مدلسازی آشفتگی URANS صورت گرفته

تشکیل ساختار جریان، توزیع فشار و سرعت بررسی شده است. با اینکه استفاده از معادلات URANS در مسائلی آثار خود را لحاظ می‌کند که از نظر فیزیکی ناپایا باشند و در مسائل پایا یا ایستا اختلاف چندانی با رهیافت RANS ندارد، اما به‌واسطه آثار ادی‌های کوچک به‌وجود آمده در جلو و پشت جت، که رهیافت RANS از آنها چشم‌پوشی می‌کند، رویکرد URANS بهبود نسبی در نتایج خصوصاً در استخراج گردابه‌های نزدیک دیواره ایجاد می‌کند.

توزیع پارامترهای مهم جریان آورده شده است. در این تحقیق از شبکه چندبُلوکی با سازمان برای بهبود دقت محاسبات و مدل آشفتگی تک‌معادله‌ای SP برای شبیه‌سازی جت در جریان عرضی استفاده شده است. برای تسریع در روند محاسبات از روش پردازش موازی به روش OMP استفاده شده است. به این منظور، ابتدا روابط حاکم بر هر دو رهیافت URANS و RANS و تفاوت آنها تشریح و کد توسعه‌یافته برای تحلیل جریان یک جت سه‌بعدی در جریان جانبی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آنها در

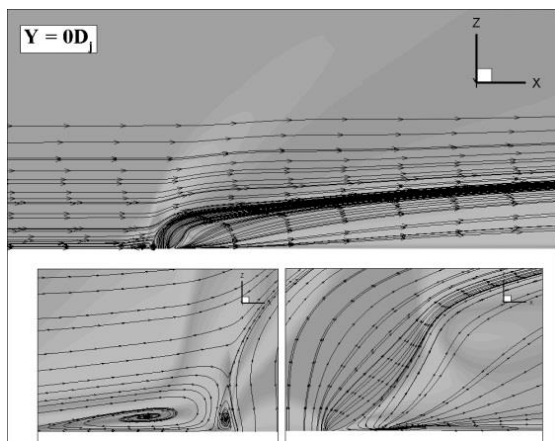


RANS

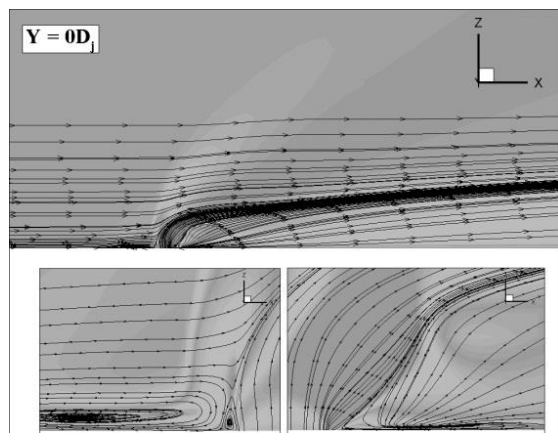


RANS

شکل ۱۰. مقایسه کانتور عدد ماخ جریان حول جت در صفحه $y=0$



RANS

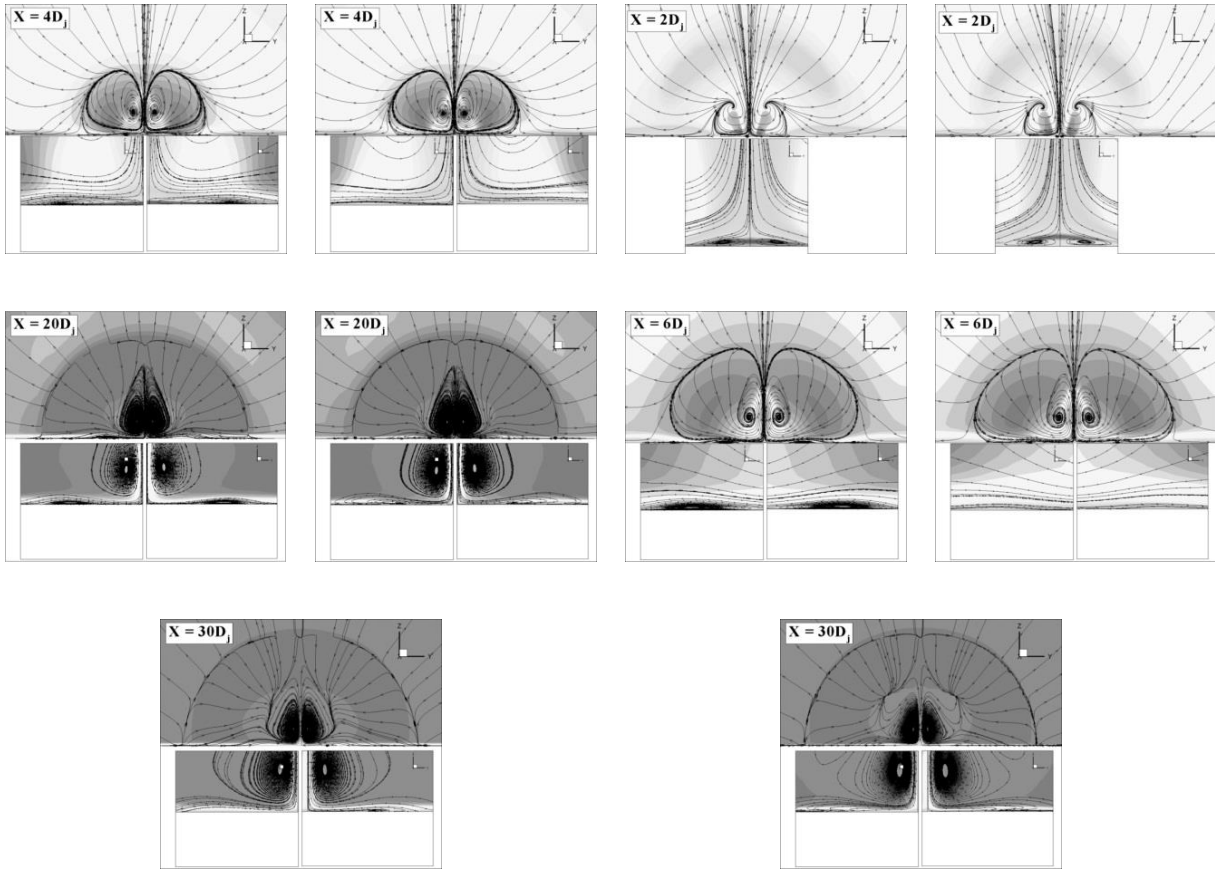


RANS

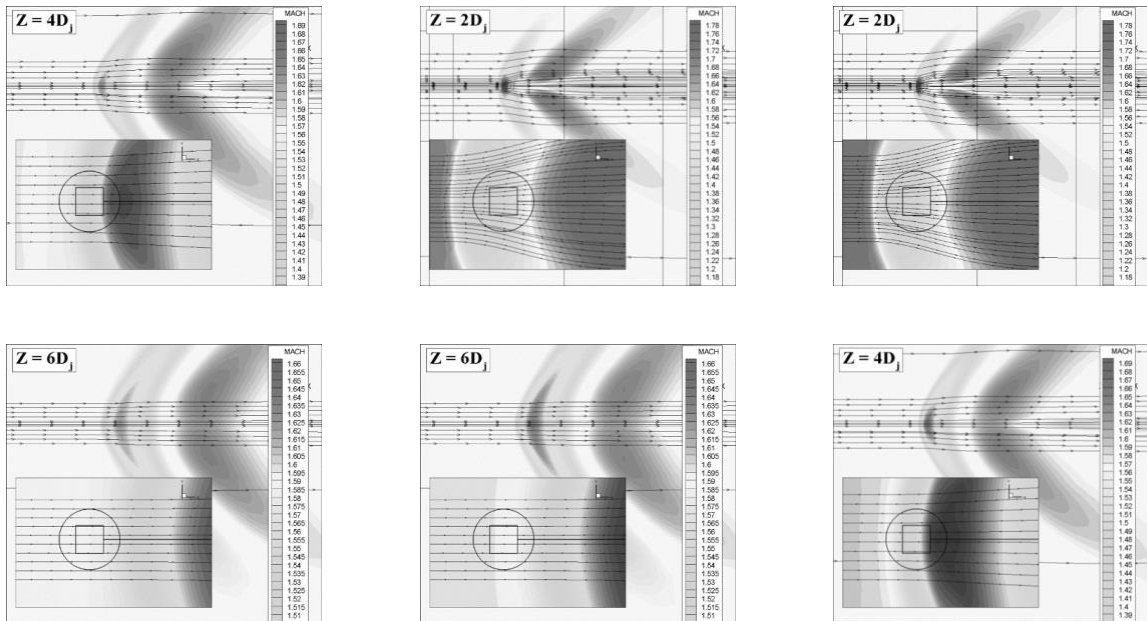
شکل ۱۱. مقایسه خطوط جریان حول جت در صفحه $y=0$

آشفتگی رویکرد RANS می‌باشد. همچنین روش URANS در عین تسخیر نتایج مناسب، راندمان محاسباتی بالاتری نسبت به مدلسازی آشفتگی LES در حل عددی جریان‌های آشفتگی ناپایا دارد.

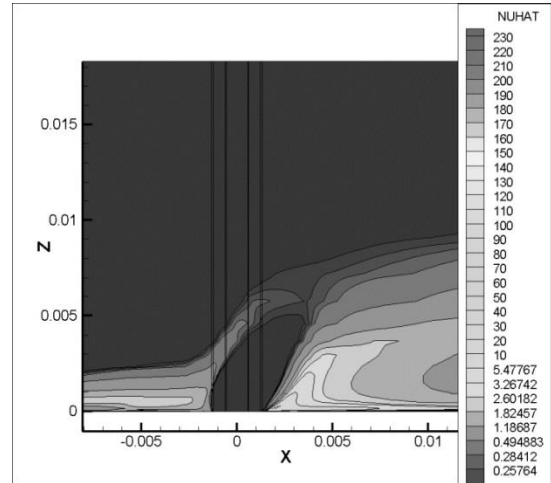
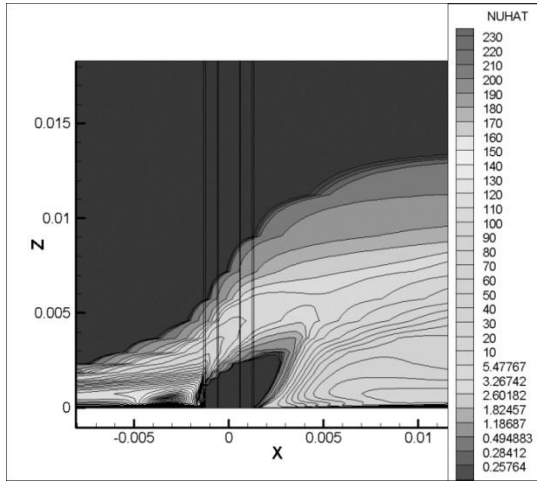
همچنین مقدار محاسبه‌شده Y^+ در رهیافت URANS پایین‌تر از RANS می‌باشد. به‌همین دلائل، همان‌گونه که انتظار می‌رفت، نتایج، بیانگر دقت مناسب‌تر رهیافت URANS در مدلسازی پدیده جت صوتی در جریان عرضی نسبت به مدلسازی



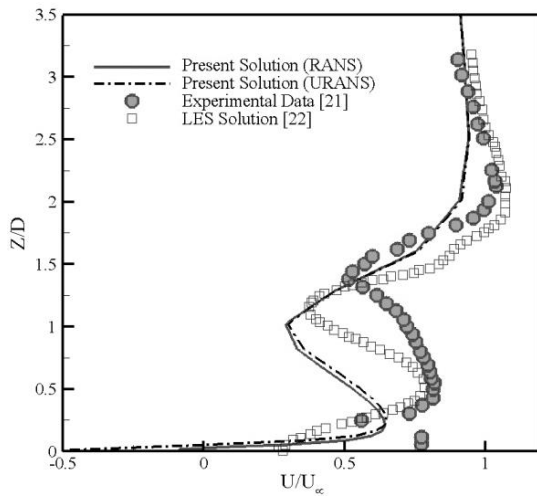
شکل ۱۲. مقایسه خطوط جریان حول جت در چند صفحه X



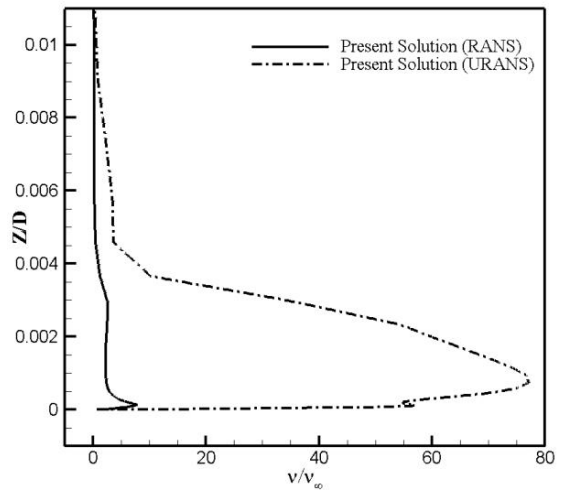
شکل ۱۳. مقایسه خطوط جریان حول جت در چند صفحه Z



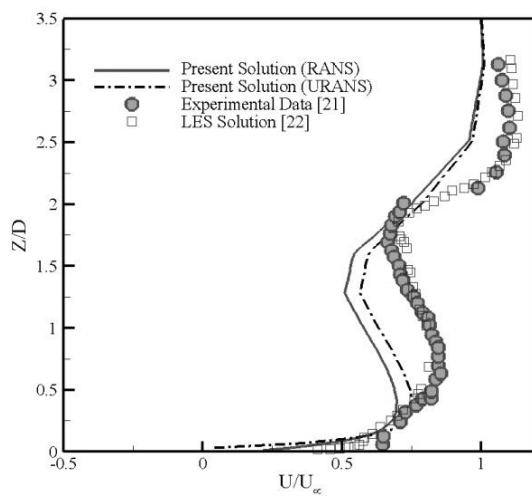
شکل ۱۴. مقایسه خطوط همتراز لزجت آشفتگی در صفحه $y=0$



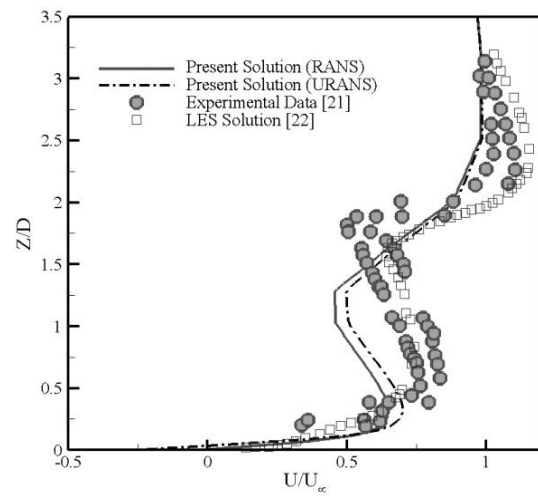
شکل ۱۶. مقایسه توزیع بردار سرعت در $X/D = 2$



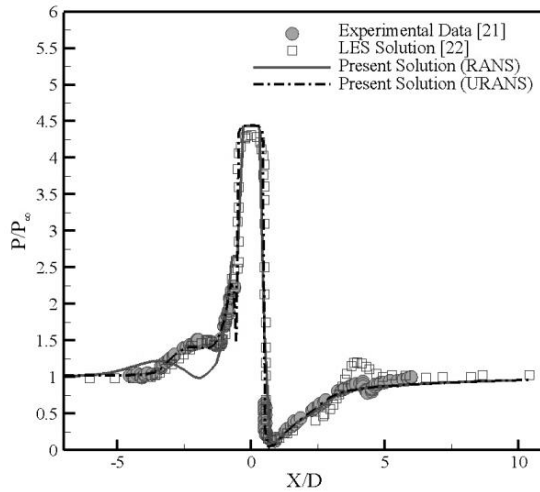
شکل ۱۵. مقایسه لزجت آشفتگی حول جت در $X/D = 2$



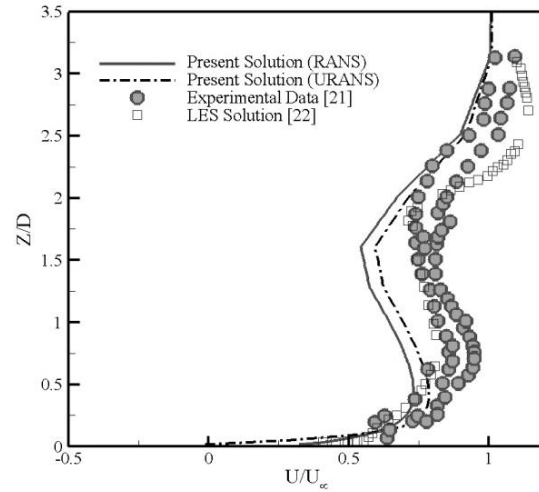
شکل ۱۸. مقایسه توزیع بردار سرعت در $X/D = 4$



شکل ۱۷. مقایسه توزیع بردار سرعت در $X/D = 3$



شکل ۲۰. مقایسه توزیع فشار روی سطح دیواره



شکل ۱۹. مقایسه توزیع بردار سرعت در $X/D = 5$

۶. مأخذ

- [1] D. C. Wilcox, *Turbulence modeling for CFD*, DCW industries, Second edition, 2004.
- [2] W. J. Richard, *Modeling strategies for unsteady turbulent flows in the lower plenum of the VHTR*, OECD/NEA/IAEA, Workshop on the Benchmarking of CFD Codes for Application to Nuclear Reactor Safety (CFD4NRS), Sep. 2006.
- [3] L. Ge, F. Sotiropoulos, 3D unsteady RANS modeling of complex hydraulic engineering flows. Part I: Numerical model, *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 131, no.9, pp. 800-808, 2005.
- [4] J. Alvarez, W. P. Jones, R. Seoud, Predictions of momentum and scalar fields in a jet in cross-flow using first and second order turbulence closures, AGARD Conf. Proc. Computational and Experiment Assessment of Jets in Cross Flow, pp. 24-10, April 1993.
- [5] A. T. Hsu, G. He, Y. Guo, Unsteady simulation of jet in crossflow, *Int. Journal of Computational Fluid Dynamics*, vol. 14, pp. 41 - 53, 2000.
- [6] E. Ivanova, B. Noll, M. Aigner, Computational modelling of turbulent mixing of a transverse jet, Proc. ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, Glasgow, UK, GT2010-22764, June 2010.
- [7] T. Fric, A. Roshko, Vortical structure in the wake of a transverse jet, *J. Fluid Mech.*, vol. 279, pp. 1-47, 1994.
- [8] L. L. Yuan, R. L. Street, J. H. Ferziger, Large-eddy simulations of a round jet in crossflow, *J. Fluid Mech*, vol. 379, pp. 71-104, 1999.
- [9] J. U. Schluter, T. Schonfeld, LES of jets in cross flow and its application to a gas turbine burner, *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 65, pp. 177-203, 2000.
- [10] P. Majander, T. Siikonen, Large-eddy simulation of a round jet in a crossflow, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, vol. 27, pp. 402-415, 2006.
- [11] M. Salewski, D. Stankovic, L. Fuchs, mixing in circular and non-circular jets in crossflow, *Flow Turbulence Combust*, vol. 80, pp. 255-283, 2008.
- [12] B. Wegner, Y. Huai, A. Sadiki, Comparative study of turbulent mixing in jet in cross-flow configurations using LES, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 25, pp. 767-775, 2004.
- [13] F. C. C. Galeazzo, G. Donnert, P. Habisreuther, N. Zarzalis, R. J. Valdes, W. Krebs, Measurement and simulation of turbulent mixing in a jet in crossflow, Proc. ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, Glasgow, UK, GT2010-22709, 2010.
- [14] J. C. Jouhaud, L. Y. M. Gicquel, B. Enaux, Large-eddy-simulation modeling for aerothermal predictions behind a jet in crossflow, *AIAA Journal*, vol. 45, no. 10, pp. 2438-2447, 2007.
- [15] E. Ivanova, B. Noll, M. D. Domenico, M. Aigner, Unsteady simulations of flow field and

- scalar mixing in transverse jets, Proc. ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air, Orlando, Florida, USA, GT2009-59147, June 2009.
- [16] E. Ivanova, B. Noll, M. Aigner, Unsteady simulations of turbulent mixing in jet in crossflow, *AIAA*, 2010-4724, 2010.
- [17] S. M. Salim, K. C. Ong, S. C. Cheah, Comparison of RANS, URANS and LES in the prediction of airflow and pollutant dispersion, World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS), San Francisco, USA, 2011.
- [18] L. A. Schiavetta, K. J. Badcock, R. M. Cummings, Comparison of DES and URANS for unsteady vortical flows over delta wings, *AIAA* 2007-1085, 2007.
- [19] S. E. Kim, D. Cokljat, Evaluation of an URANS-LES Hybrid approach for turbulent free surface flows around surface-piercing bodies, 9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Michigan, USA, August 5-8, 2007.
- [20] M. Sheida, Numerical simulation of a sonic jet in supersonic cross flow using parallel processing, MSc thesis, Sharif University of Technology, Aerospace Department, 2009 (in Persian فارسی).
- [21] J. G. Santiago, J. C. Dutton, Velocity measurements of a jet injected into a supersonic crossbow, *Journal of Propulsion Power*, vol. 13, no.2, pp. 264-273. 1997.
- [22] S. Kawai, S. K. Lele, *Mechanisms of jet mixing in a supersonic crossow: a study using large-eddy simulation*, Technical report, Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs, 2007.

پی نوشت

-
1. stationary
 2. Reynolds averaged Navier Stokes
 3. nonstationary
 4. coherent fluctuation
 5. turbulent fluctuation
 6. unsteady Reynolds averaged Navier Stokes
 7. Spalart almaras
 8. time averaging
 9. ensemble averaging
 10. diffusive
 11. coherent unsteadiness
 12. phase average
 13. local time step
 14. instantaneous flow
 15. mean flow