



## تحلیل میدان جریان حاصل از برهم‌کنش جت مصنوعی با جریان عرضی: به کارگیری مدل‌های آشفستگی مختلف

فرزاد بازدیدي طهراني<sup>۱\*</sup>، احمد کلاه‌دوز<sup>۲</sup> و محمد حاتمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۳</sup> دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آهایو

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۳/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۵

### چکیده

جت مصنوعی ابزار جدیدی برای کاربردهای متنوع صنعتی به شمار می‌آید که به دلیل اندازه کوچک و نیاز نداشتن به منبع سیال خارجی، مورد توجه محققان قرار گرفته است. پژوهش حاضر، در راستای فهم بهتر از رفتار و مکانیزم جریان جت مصنوعی و برهم‌کنش آن با محیط خارجی به تحلیل میدان جریان جت مصنوعی در حضور جریان عرضی همراه با مدل‌سازی محرک نوسانی و هم‌چنین ارزیابی مدل‌های آشفستگی رینولدز بالا از طریق شبیه‌سازی عددی پرداخته است. برای این منظور، از سه مدل آشفستگی Realizable k-ε (RKE)، RNG k-ε (RNG) و Standard k-ε (SKE) استفاده شده است. نتایج نشان‌گر آن است که مدل آشفستگی RNG k-ε برخلاف دو مدل دیگر، قادر به پیش‌بینی ساختار گردابه تولید شده در میدان جریان است؛ هم‌چنین مقایسه سرعت لحظه‌ای بی‌بعد شده در خروجی اوریفیس نشان داد که برخلاف مدل استاندارد، مدل‌های RNG و RKE در نیم سیکل مکش توانستند، نقاط ماکزیمم و مینیمم نسبی را با تقریب خوبی پیش‌بینی کنند.

**کلمات کلیدی:** جت مصنوعی؛ محیط ساکن؛ جریان عرضی؛ مدل آشفستگی.

## Flow Field Analysis of a Synthetic Jet in the Presence of a Crossflow: Application of Different Turbulence Models

F. Bazdidi Tehrani<sup>1,\*</sup>, A. Kolahdooz<sup>2</sup>, M. Hatami<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Prof., School of Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> M.Sc. Graduate, School of Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Ph.D. Candidate, Mech. Eng. Department, Ohio University, Ohio, USA.

### Abstract

Synthetic jet is a novel means for various industrial applications and has received a lot of attention by researchers because of its small size and zero-net mass flux (ZNM) characteristics. The aim of the present study is to investigate the flow field of the synthetic jet in the presence of the crossflow in order to gain a better understanding of the flow mechanism and also assessing high Reynolds turbulence models. For this purpose, three turbulence models (Realizable k-ε (RKE), RNG k-ε (RNG) and Standard k-ε (SKE)) are applied. The results show that contrary to Standard k-ε and Realizable k-ε turbulence model, RNG k-ε model is capable of capturing the vortical structures generated in the flow field. Furthermore, comparison of the normalized instantaneous velocity magnitude at the orifice exit confirmed that unlike the standard model, RNG and RKE showed a better prediction of relative maximum and minimum peaks in the suction cycle.

**Keywords:** Synthetic Jet; Quiescent Medium; Crossflow; Turbulence Model.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۱۷۷۴۹۱۲۲۸؛ فکس: ۰۲۱۷۷۲۴۰۴۸۸

آدرس پست الکترونیک: [bazdid@iust.ac.ir](mailto:bazdid@iust.ac.ir)

## ۱- مقدمه

کنترل جریان در ایرفویل‌ها و شناورهای کوچک به شیوه‌های مختلفی انجام می‌شود که یکی از این روش‌ها، استفاده از جت مصنوعی است. جت‌های مصنوعی با دبی جرمی صفر هستند که با استفاده از سیال محیطی و بدون نیاز به تزریق سیال از طریق منبع خارجی، قادرند تا قطاری از گردابه‌ها را به سیال محیطی تزریق کنند. این جت از حرکت نوسانی یک محرک ایجاد می‌شود که درون محفظه جت مصنوعی قرار دارد و از طریق اوریفیس یا شکاف، از محفظه خارج می‌شود. با نوسان محرک، در مرحله دمش، سیال به بیرون رانده شده، منجر به بیرون راندن سیال از محفظه می‌شود با ادامه پیدا کردن سیکل نوسان در مرحله مکش، سیال محیطی به داخل محفظه کشیده شده و برهم‌کنش این دو حرکت دمش و مکش، منجر به شکل‌گیری یک جفت گردابه در خروجی اوریفیس می‌شود. این ساختارهای گردابه‌ای در صورت تزریق به درون لایه مرزی به سبب افزایش مومنوم در جریان نزدیک به دیواره، جدایی جریان را به تعویق می‌اندازند. جت مصنوعی در صورت تزریق به داخل جریان عرضی، ساختارهای پیچیده‌ای را تولید می‌کند و از جمله مهم‌ترین این ساختارها، جفت گردابه‌ای است که توسط برهم‌کنش با جریان عرضی ایجاد می‌شود. ساختارهای گردابه‌ای، مومنوم بالای سیال را به نزدیک دیواره انتقال داده، باعث به تأخیر انداختن جدایی لایه مرزی در جریان‌های با گرادیان فشار نامطلوب می‌شود.

گوردن و سربا [۱]، میدان بردار سرعت جت مصنوعی دایروی را با استفاده از اندازه‌گیری PIV در دو میدان نزدیک و دور بررسی کردند. آن‌ها جت مصنوعی دایره‌ای در جریان عرضی را با پارامترهای  $L=20$ ,  $Str=0.016$ ,  $VR=4.6$ ,  $Re_j=1240$  و  $L=30$ ,  $Str=0.014$ ,  $VR=7$ ,  $Re_j=2960$  مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که علی‌رغم وجود عدم تقارن در گردابه‌ها، تشکیل جت مصنوعی در جریان عرضی، مشابه با حلقه گردابه‌هایی با طول کورس  $L/d > 4$  است. به علاوه، آن‌ها دبی جرمی را در میدان نزدیک در فاصله  $y/D_0 \leq 3$  محاسبه کردند و دریافتند که نوسان دبی جرمی زمانی، مشابه نوسان سرعت مرکزی زمانی جت مصنوعی شیاری است که به وسیله  $Re=600$  و  $Str=0.023$  مشخص می‌شود

(همچون اسمیت و گلیزر [۲]). از سوی دیگر، با مشاهده جریان در میدان دوردست مشخص شد که اگرچه سیال تزریق شده از اوریفیس مسافت زیادی را در راستای عمود بر جریان نفوذ می‌کند (نفوذ جت  $15D_0$  و  $18D_0$  برای جت با  $VR=4.6$  و  $VR=7$ )، اما نفوذ متوسط در حدود ۲ الی ۳ برابر قطر اوریفیس از دیواره بوده، سپس در جهت جریان منحرف می‌شود. هم‌چنین سرعت در دوردست، در امتداد مسیر جت فرسایش می‌یابد و مشابه با جت پایا با ۸۵٪ از نرخ مومنوم معادل می‌شود.

به طور مشابه اسپنفلر [۳]، جابه‌جایی خطوط جریان نزدیک دیواره را برای اندازه‌گیری رفتار جت مصنوعی در لایه مرزی آشفته‌گی در سه نسبت سرعت مختلف مطالعه کرد. در بیشترین نسبت سرعت ( $VR=0.95$ )، بر اساس حداکثر سرعت میانگین‌گیری شده زمانی مشاهده شد، نزدیک‌ترین خط جریان به دیوار در فاصله  $x/d=1.5$  تا ارتفاع  $1.75D$  بالا می‌آید و این در حالی است که در نسبت سرعت  $VR=0.36$ ، جابجایی خط جریان در همان فاصله تا  $0.8D$  ضخامت لایه مرزی در همان جهت جریان کاهش می‌یابد.

میلانوویچ و زمان [۴] از فاصله  $y_{max}$  برای نشان دادن محل پیک در توزیع شدت میانگین‌گیری شده زمانی، به منظور اندازه‌گیری نفوذ جت مصنوعی استفاده کردند. آن‌ها متوجه شدند که در محلی از جریان،  $y_{max}$  فقط وابسته به نسبت سرعت است. هم‌چنین، برای جریان عرضی داده شده، ویژگی‌های کلی جت‌های مصنوعی با نسبت سرعت یکسان (بر اساس حداکثر سرعت)، از نظر نفوذ جت و توزیع سرعت متوسط عرضی، خطوط ورتیستی و شدت آشفته‌گی مشابه جت پایا هستند. گردون و همکاران [۵]، از اشعه نوری PLIF برای اندازه‌گیری مطالعه خواص جت مصنوعی در جریان عرضی برای محدوده وسیعی از عدد استروهال، عدد رینولدز و نسبت سرعت استفاده کردند. دو الگوی متفاوت جریان مشاهده شد، جت‌های تک مسیره، الگوی جریانی مشابه با جت‌های پایا دارند که نشان‌دهنده اختلاط توده‌ای از سیال بیرون آمده از لایه مرزی است.

ژانگ و همکاران [۶]، از تجسم رنگی جریان برای مطالعه ساختار گردابه‌های تولید شده به وسیله جت مصنوعی دایره‌ای با محدوده رینولدز ۱۶ تا ۲۴۵، نسبت سرعت از  $0.06$  تا  $0.7$ ، عدد استروهال  $0.1$  تا  $0.5$  و طول کورس از

مطالعه کردند. آن‌ها دو حالت را بررسی کردند که نسبت سرعت یکسان  $VR=1.25$  داشته است که در یک حالت نسبت ممنوم جت و لایه مرزی آشفته برابر با  $C_0=0(10^{-1})$  و در حالت دیگر برابر با  $C_0=0(10^{-2})$  است. برای حالت جت با ممنوم بالا  $(C_0=0(10^{-1}))$  گزارش شد که گردابه‌های گسسته در کل ضخامت لایه مرزی نفوذ می‌کنند و تأثیرشان تا فاصله‌ای بیشتر از 48 در جهت جریان ادامه می‌یابد که ناشی از ممنوم بالای جت است، درحالی‌که برای جت با ممنوم پایین  $(C_0=0(10^{-2}))$ ، نفوذ کمتر تا 0.28 در جریان عرضی نفوذ می‌یابد و فاصله تأثیرشان در حدود 0.88 در جهت جریان است.

بازدید طهرانی و جهرمی [۱۰]، جت مصنوعی دو بعدی را با استفاده از مدل‌های توربولانسی مرتبه اول و دوم، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند، مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد پیش‌بینی ضعیفی نسبت به میدان توربولانسی جریان همراه با تخمین بسیار بیشتر از مقدار واقعی توزیع انرژی جنبشی توربولانس و تنش‌های رینولدز ارائه می‌دهد. در مقابل مدل‌های مرتبه‌ی دوم، پیش‌بینی به مراتب منطقی‌تری نسبت به رفتار متوسط‌گیری شده فازی جریان و میدان‌های توربولانسی را به دست می‌دهند.

یو و لی [۱۱]، شبیه‌سازی سه بعدی جت مصنوعی با استفاده از مرز متحرک به وسیله مدل آشفتگی RANS را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی جت مصنوعی با استفاده از روش دیواره متحرک، تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

دندیوس و گارنر [۱۲]، به شبیه‌سازی جت مصنوعی در حضور جریان عرضی با استفاده از مدل Spalart Allmaras (SA) و همچنین مدل LES پرداختند. آن‌ها تأثیر گام زمانی، اندازه شبکه و شرط مرزی دیواره متحرک را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که سرعت متوسط و سرعت فازی متوسط برای همه شبکه‌های تولید شده برای هر دو مدل آشفتگی با تقریب خوبی با داده‌های آزمایشگاهی تطابق دارد، درحالی‌که تنش‌های رینولدز برای مدل آشفتگی SA، از دقت کافی برخوردار نیست و در مقابل در رهیافت LES همراه با شرط مرزی جریان ورودی با شبکه خیلی کوچک، رفتار تنش رینولدز به خوبی پیش‌بینی شد.

۰/۵۶ تا ۱/۴ استفاده کردند. انواع مختلف ساختارهای گردابه‌ای در رینولدز و نسبت سرعت‌های متفاوت مشخص شد. در رینولدز و نسبت سرعت پایین، ساختار گردابه‌ای شبیه به گردابه سنجاق سری نزدیک به دیواره ظاهر می‌شود. در رینولدز و نسبت سرعت متوسط، ساختارها دارای انباشتگی بیشتر در حلقه گردابه می‌باشند که یک مقدار قابل توجه کشیدگی داشته و به حالت مورب وارد لایه مرزی جریان عرضی می‌شوند؛ در نتیجه نوعی از ساختار حلقه کشیده با شاخه‌هایی در بالادست به وجود می‌آید. در رینولدز و نسبت سرعت بالا، حلقه گردابه بزرگ‌تر و با انباشتگی بیشتری ظاهر می‌شود که در مدت زمان کوتاهی از لبه لایه مرزی عبور می‌کند.

جبال و ژانگ [۷]، برهمکنش جت مصنوعی در ناحیه نزدیک دیواره و ساختارهای تشکیل شده جت مصنوعی با جریان عرضی (گردابه سنجاق سری، حلقه گردابه کشیده و حلقه گردابه مورب) را مورد مطالعه قرار دادند که مشابه با یافته‌های پیشین بود. تأثیر این سه نوع ساختار، در لایه مرزی آرام اندازه‌گیری شد و پتانسیل آن‌ها در عملکرد کنترل جدایی جریان با استفاده از تنش برشی دیواره مقایسه شد. آن‌ها برای مطالعه خود، از تجسم جریان همراه با تجسم کریستال مایع برای بررسی برهمکنش جت با لایه مرزی استفاده کردند. تجسم کریستال مایع نشان داد که هر کدام از گردابه‌های سنجاق سری و حلقه کشیده، ویژگی‌های مشابهی نسبت به یکدیگر دارند؛ به طوری که هر دوی آن‌ها دو ردپا روی صفحه بر جای می‌گذارند؛ درحالی‌که حلقه گردابه آشفته تنها یک رد از خود برجای می‌گذارد.

راوی و همکاران [۸]، یک شبیه‌سازی کاملاً عددی از جت مصنوعی با شیار مستطیلی در جریان عرضی را با استفاده از روش DNS انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که جت‌های سه بعدی با نسبت ابعاد محدود، تکانه بیشتری را نسبت به همتای دو بعدی خود با نسبت ابعاد نامحدود از نظر تشکیل حلقه گردابه‌ها برای نفوذ به داخل لایه مرزی دارند، اما توزیع سرعت در خط مرکزی شیار، مطابق با همتای دو بعدی نمی‌باشد.

سوی و همکاران [۹]، جت مصنوعی دوبعدی در لایه مرزی آشفته را با استفاده از روش URANS با بکارگیری مدل آشفتگی تک معادله‌ای (SA) Spalart-Allmaras،

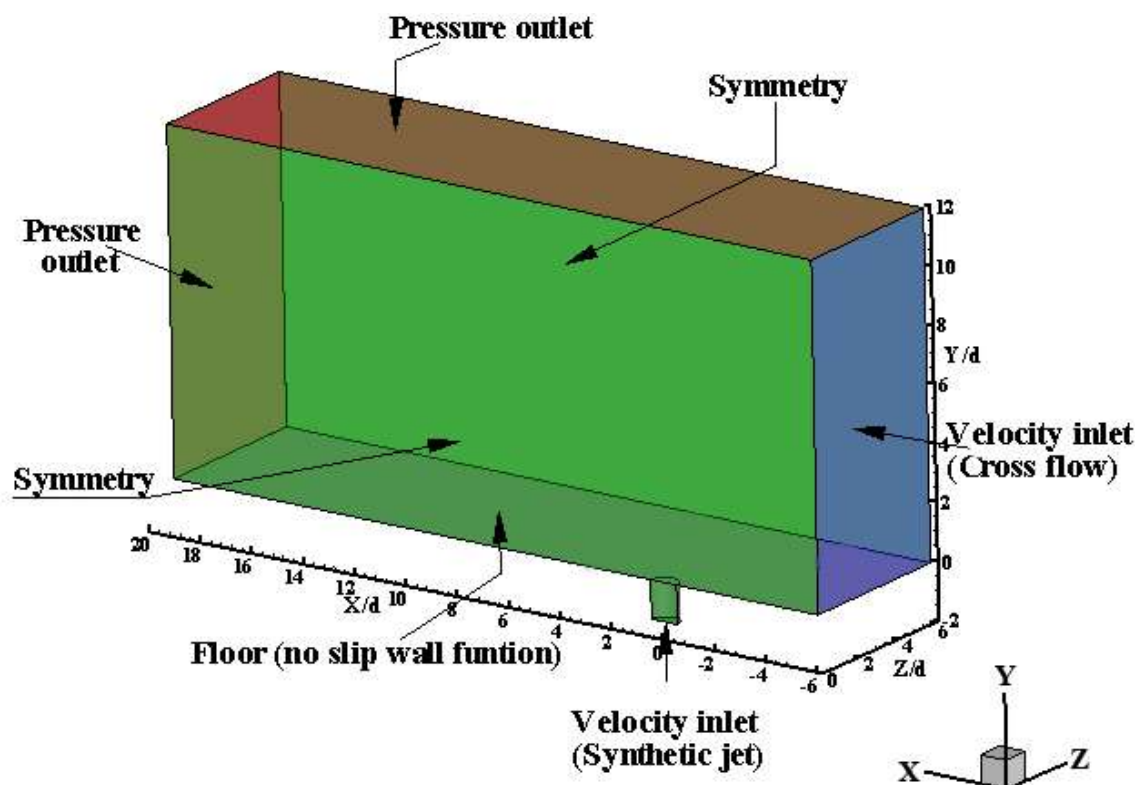
معادلات حاکم بر جریان را نشان می‌دهد. هندسه به‌کار رفته در این مدل‌سازی با توجه به کار عددی پیشین روی این هندسه است که توسط همین گروه صورت گرفته است و آن‌ها طی مطالعات عددی خود به علت آنکه نسبت قطر اوریفیس به قطر محفظه بسیار کوچک است، از مدل‌سازی محفظه صرف‌نظر کردند. این هندسه شامل، اوریفیس با سطح مقطع دایروی با قطر برابر با  $19/05$  میلی‌متر که با  $d$  نشان داده می‌شود و طول اوریفیس، معادل با  $1/5d$  است. هندسه در سه راستای  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  برابر با  $12d$  و  $6d$  شبیه‌سازی شده است و سایر جزئیات توسط قطر  $d$  بی بعد گشته‌اند؛ همچنین، آزمایشات تحت شرایط جریانی  $M=0.0175$ ،  $Re=395275$ ،  $f=24Hz$ ،  $VR=1$  مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

در ورودی جت مصنوعی پس از حذف حرکت محرک نوسانی، یک پروفیل سرعت سینوسی با متوسط سرعت صفر به صورت زیر، به جای آن قرار می‌گیرد، به طوری که سرعت تنها با زمان تغییر می‌کند و نسبت به مکان ثابت است.

عدم سهولت در استفاده از روش‌های با دقت‌های بالا هم‌چون DNS و LES، به دلیل هزینه‌های محاسباتی زیاد و در نتیجه کاربردی نبودن آن‌ها در کاربری‌های صنعتی، این نیاز را ایجاد می‌کند تا علی‌رغم مطالعات زیاد انجام شده، تلاش برای ارزیابی و توسعه مدل‌های URANS در شرایط جریانی و کاربردهای مختلف صورت گیرد. پژوهش حاضر در همین راستا، سعی بر آن دارد تا با به‌کارگیری مدل‌های رینولدز بالا و هم‌چنین مقایسه آن با کارهای آزمایشگاهی و تجربی انجام شده، فهم بهتری را نسبت به عملکرد این مدل‌ها در شرایط جریانی خاص حاکم بر این مسأله ارائه دهد.

## ۲- شرایط مرزی و ساختار جریان

هندسه به‌کاررفته در پژوهش جاری، بر مبنای کار تجربی گروه میلانوویچ و همکاران [۱۳] تعریف شده است. بر آن اساس شکل ۱، هندسه سه بعدی مدل شده به عنوان ناحیه محاسباتی و به بیان دیگر، هندسه استفاده شده جهت حل



شکل ۱- هندسه و شرایط مرزی جت مصنوعی در حضور جریان عرضی بر مبنای مدل آزمایشگاهی میلانوویچ و همکاران [۱۳]

جریان‌های آرام برسند که شامل، تانسور تنش رینولدز آشفته  $\rho \overline{u_i' u_j'}$  نمی‌باشد. این معادلات را معادلات لزجت گردابه‌ای می‌نامند.

مدل k-ε استاندارد، معادلات انتقال زیر را استفاده می‌کند که برای k و ε بکار برده می‌شود:

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{s1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{s2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

معادلات انتقال در مدل Realizable k-ε، به وسیله شیخ و همکاران [۱۵] ارائه شده است. معادله انتقال k در این مدل، همانند مدل استاندارد است. معادله انتقال ε نیز، به صورت رابطه (۸) ارائه می‌شود:

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{s1} S \varepsilon - C_{s2} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (8)$$

مدل k-ε RNG برگرفته از روش ریاضی Renormalization Group است. معادلات انتقال در این مدل، شبیه به مدل k-ε استاندارد است؛ اما همانند مدل Realizable k-ε، از یک ترم اضافی در معادله ε خود بهره می‌برد. جزئیات بیشتر در مورد

تشریح این مدل و کاربردهای آن در جریان آشفته را می‌توان در مقاله یاخوت و همکاران یافت [۱۶].

در معادلات RNG و RKE، ترم‌هایی در نظر گرفته شده است تا قادر باشند در جریان‌های دارای جدایی، نرخ کرنش بالا و چرخش زیاد، تحلیل دقیق‌تری را نسبت به مدل SKE ارائه دهند؛ اما در مقایسه بین این دو مدل، اگرچه مدل RKE مدل جدیدتری نسبت به RNG است و همان‌طور که از نام آن (Realizable) پیداست، سعی بر آن دارد تا قیود ریاضی مشخص در تنش‌های رینولدز را با ماهیت فیزیکی جریان‌های آشفته تطابق دهد.

### ۵- حل عددی

نمای جانبی، نما از بالا و همچنین شبکه محاسباتی اطراف اوریفیس، در شکل ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تراکم سلول‌های به کار رفته در بالای دیواره بیشتر بوده، با دور شدن از دیواره سطح تراکم سلول‌ها کاهش می‌یابد؛

$$V(t) = V_{\max} \cos(2\pi f t) \quad (1)$$

در این رابطه  $V_{\max}$  حداکثر سرعت ورودی در راستای x، y، f فرکانس حرکت پیستون و t بیانگر زمان است.

برای شبیه‌سازی مدل‌های k-ε، پروفیل‌های سرعت متوسط و شدت آشفتگی جریان عرضی نیز در ورودی دامنه محاسباتی مورد نیاز است. با توجه به آنکه مقادیر تجربی سرعت و شدت آشفتگی در نقاط مختلف لایه مرزی در راستای عمودی گزارش شده است [۱۳]، همین مقادیر به عنوان شرایط مرزی سرعت ورودی برای جریان عرضی در نظر گرفته می‌شود.

### ۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان جت مصنوعی، معادلات پیوستگی و ممنتوم هستند که شکل متوسط‌گیری شده آن‌ها به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \bar{B}_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u_i' u_j'}) \quad (3)$$

که  $\overline{u_i' u_j'}$  مؤلفه تنش رینولدز نامیده می‌شود. برای بستن معادلاتی که در بالا مطرح شد، تنش‌های رینولدز باید بر حسب متغیرهای معلوم بیان شوند که از روش مدل لزجت گردابه‌ای برای بسط دادن آن استفاده شده است. مدل‌های لزجت گردابه‌ای، بر اساس رابطه خطی ایزوتروپیک بین تنش و نرخ کرنش توسط بوزینسک [۱۴] ارائه گردیدند که فرض می‌کند شارهای آشفته مجهول  $\overline{u_i' u_j'}$  متناسب با نرخ کرنش هستند یعنی:

$$\overline{u_i' u_j'} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

### ۴- مدل آشفتگی جریان

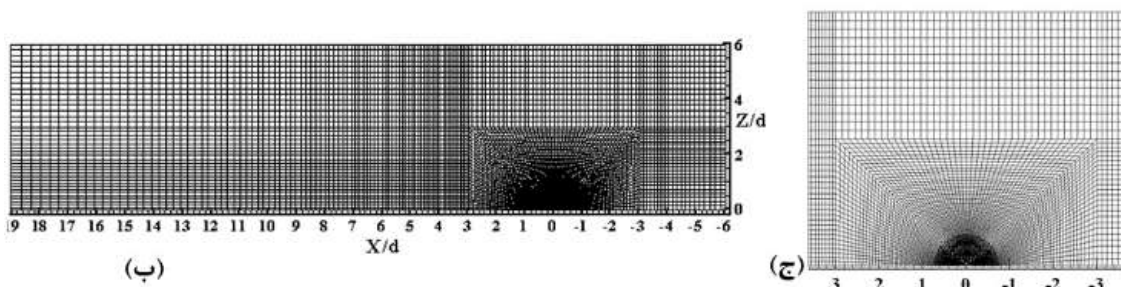
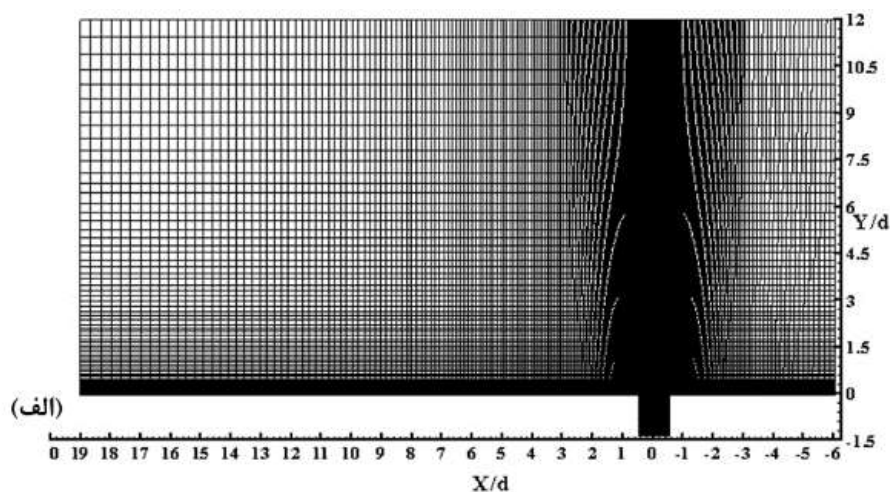
بسیاری از مدل‌های آشفتگی سعی در ارائه روابطی دارند که به وسیله آن بتوانند با حذف تنش‌های رینولدز و جایگزینی ترم ویسکوزیته با ویسکوزیته معادل جریان‌های آشفته  $(\mu = \mu_0 + \mu_t)$ ، به شکلی شبیه معادلات ناویر استوکس

همچنین تراکم سلول در اطراف اوریفیس نیز بالا است و با فاصله گرفتن از آن تراکم سلول‌ها کاهش می‌یابد. جهت بررسی استقلال از شبکه، از سه شبکه محاسباتی استفاده شده است که شامل، ۶۳۲۴۰۰، ۸۳۳۵۰۰ و ۹۶۶۲۰۰ سلول است که به ترتیب با نام‌های Grid A، Grid B و Grid C در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. شکل ۳ بزرگی سرعت لحظه‌ای را در طول یک سیکل که از طریق حل معادلات از طریق مدل آشفتگی Standard k-ε (SKE) تحت شرایط جریانی (M=0.0175, Re=395275, f=24Hz, VR=1) به دست آمده است، نشان می‌دهد و از آنجایی که تغییرات دو شبکه Grid C و Grid B نزدیک به یکدیگر است، از شبکه با تعداد سلول کمتر برای محاسبات بعدی استفاده شده است؛ همچنین، استقلال از گام زمانی نیز در دو حالت T/250،

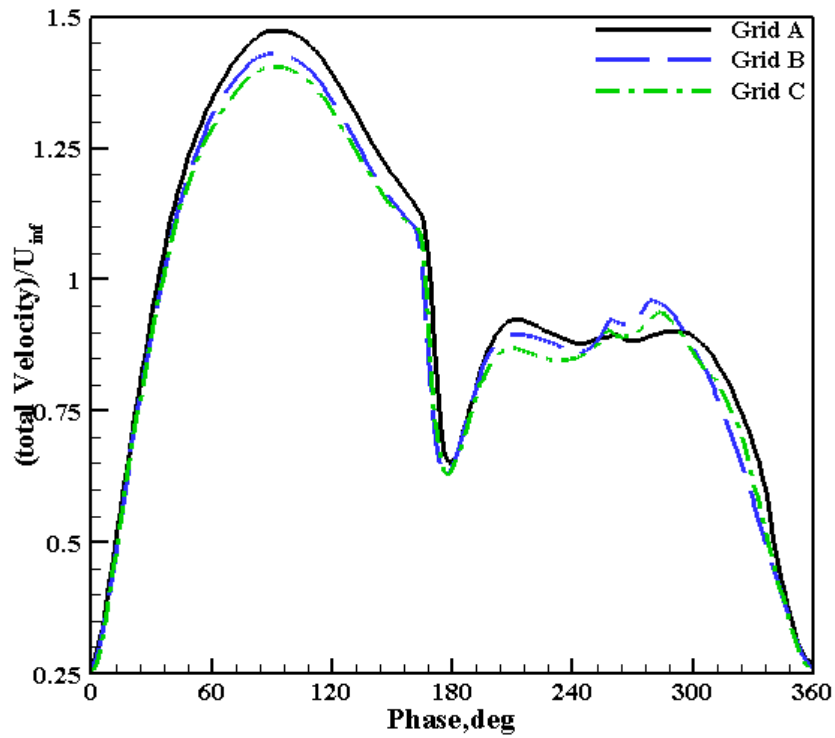
همچنین تراکم سلول در اطراف اوریفیس نیز بالا است و با فاصله گرفتن از آن تراکم سلول‌ها کاهش می‌یابد. جهت بررسی استقلال از شبکه، از سه شبکه محاسباتی استفاده شده است که شامل، ۶۳۲۴۰۰، ۸۳۳۵۰۰ و ۹۶۶۲۰۰ سلول است که به ترتیب با نام‌های Grid A، Grid B و Grid C در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. شکل ۳ بزرگی سرعت لحظه‌ای را در طول یک سیکل که از طریق حل معادلات از طریق مدل آشفتگی Standard k-ε (SKE) تحت شرایط جریانی (M=0.0175, Re=395275, f=24Hz, VR=1) به دست آمده است، نشان می‌دهد و از آنجایی که تغییرات دو شبکه Grid C و Grid B نزدیک به یکدیگر است، از شبکه با تعداد سلول کمتر برای محاسبات بعدی استفاده شده است؛ همچنین، استقلال از گام زمانی نیز در دو حالت T/250،

### ۶-ارایه نتایج و بحث

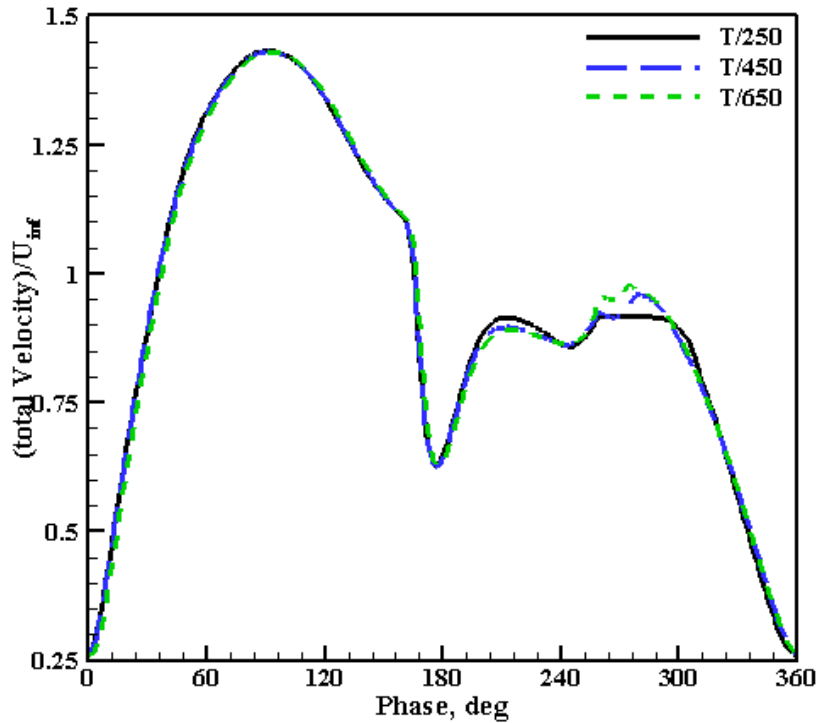
در پژوهش حاضر، برای حل جت مصنوعی در حضور جریان عرضی در حالت سه بعدی، از سه مدل آشفتگی که عبارت‌اند از: Realizable k-ε (RKE)، RNG k-ε (RNG) و Standard k-ε (SKE) استفاده شده است. همچنین، برای تحلیل میدان جریان از طریق هر سه مدل آشفتگی، توابع دیواره به کار گرفته شده است.



شکل ۲- نمای شبکه محاسباتی استفاده شده (الف) نمای جانبی، (ب) نما از بالا و (ج) نما از بالا شبکه‌بندی حول اوریفیس



شکل ۳- سرعت لحظه‌ای بی‌بعد شده در خروجی جت مصنوعی در طول یک سیکل برای شبکه‌بندی‌های متفاوت

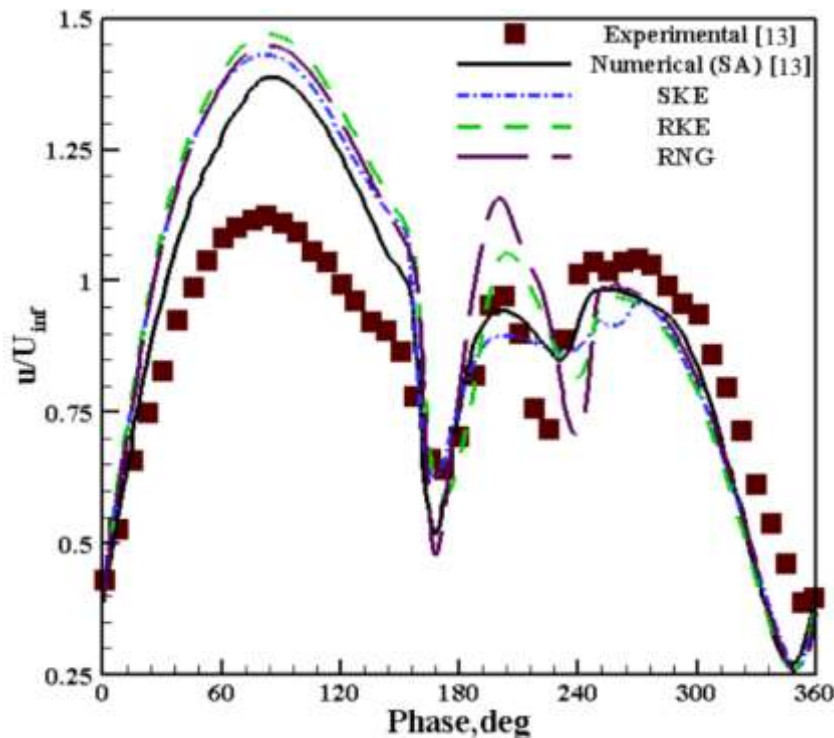


شکل ۴- سرعت لحظه‌ای بی‌بعد شده در خروجی جت مصنوعی در طول یک سیکل برای گام‌های زمانی متفاوت

ماکزیمم محلی را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده‌اند؛ همچنین، در مقدار ماکزیمم محلی بعدی در مرحله مکش، هر سه مدل RNG، RKE و حل عددی [۱۳]، پیش‌بینی قابل قبولی با داده‌های تجربی دارند؛ درحالی‌که مقدار پیش‌بینی مدل آشفتگی SKE، نسبت به باقی مدل‌ها کمتر است.

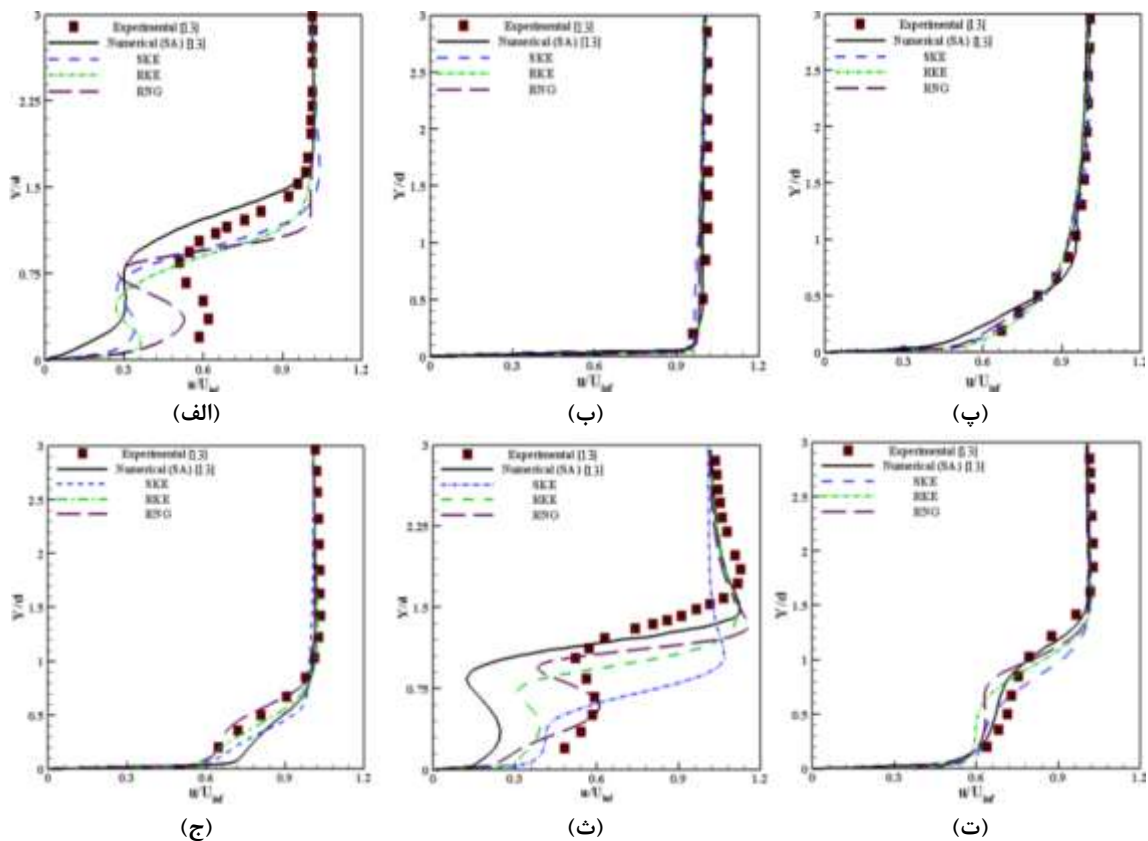
پروفیل‌های سرعت بی‌بعد  $u/U_{inf}$ ، در راستای جریان روی خطی در فاصله  $2/235d$  در پایین‌دست جریان در ناحیه جریان خروجی از اوریفیس برای چهار فاز متفاوت،  $0, 80, 160, 240, 320$  و همچنین برای سرعت متوسط میانگین‌گیری شده زمانی برای سه مدل آشفتگی، Standard k- $\epsilon$  (SKE)، Realizable k- $\epsilon$  (RKE) و RNG k- $\epsilon$  (RNG) همراه با داده‌های بدست آمده بادنچ سیم داغ و حل عددی Spalart-Allmaras (SA) [۱۳]، در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل (۶-الف)، مربوط به فاز صفر درجه است که با توجه به تابع پروفیل کسینوسی استفاده

شکل ۵ توزیع اندازه سرعت لحظه‌ای بی‌بعد شده را در طول یک سیکل در خروجی اوریفیس برای سه مدل آشفتگی و همچنین نتایج عددی مدل آشفتگی و آزمایشگاهی میلانوویچ و همکاران [۱۳] را نشان می‌دهد. هر سه مدل آشفتگی، برآورد تقریباً قابل قبولی را با داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده با بادنچ سیم داغ [۱۳] نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در پیک اول که مربوط به مرحله دمش سرعت است، هر سه مدل آشفتگی پیش‌بینی تقریباً یکسانی را نشان می‌دهند، درحالی‌که در پیک دوم سرعت که مربوط به مرحله مکش است، پیش‌بینی سرعت در مدل‌های آشفتگی متفاوت است. مدل‌های آشفتگی RNG و RKE به ترتیب، بهتر از مدل آشفتگی SKE و SA [۱۳] مینیمم محلی مربوط به مرحله مکش را پیش‌بینی کرده‌اند. علاوه بر آن، مدل‌های آشفتگی RNG و RKE، ماکزیمم اول مرحله مکش را بیش از مقدار آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده، درحالی‌که که حل عددی [۱۳] و مدل آشفتگی SKE، مقدار



شکل ۵- مقایسه مدل‌های آشفتگی مختلف با داده‌های آزمایشگاهی [۱۳] برای سرعت لحظه‌ای بی‌بعد شده در خروجی جت مصنوعی





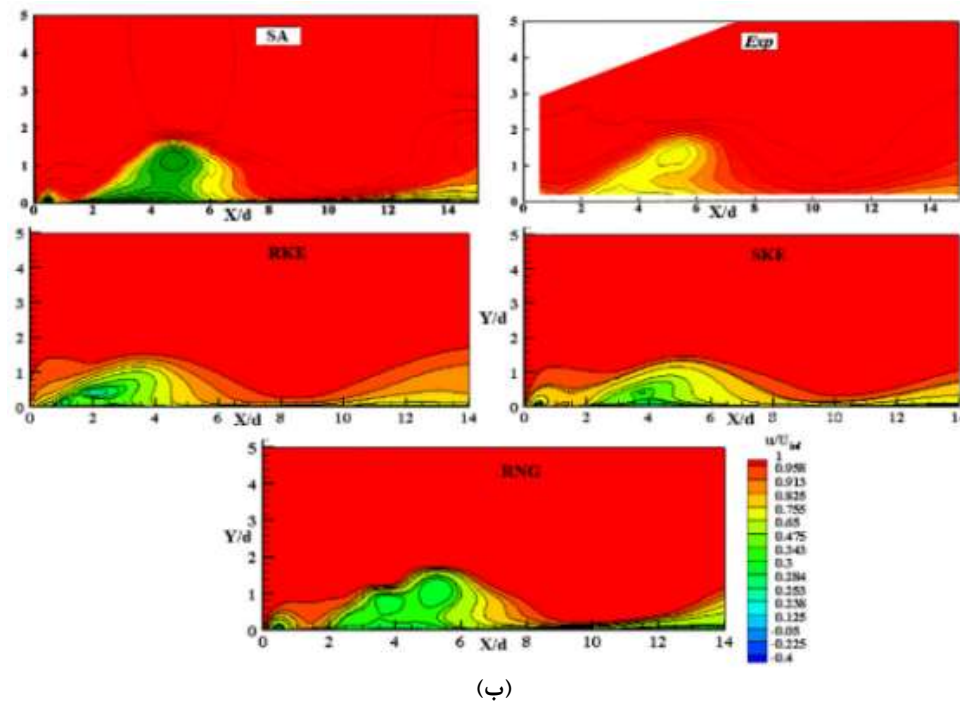
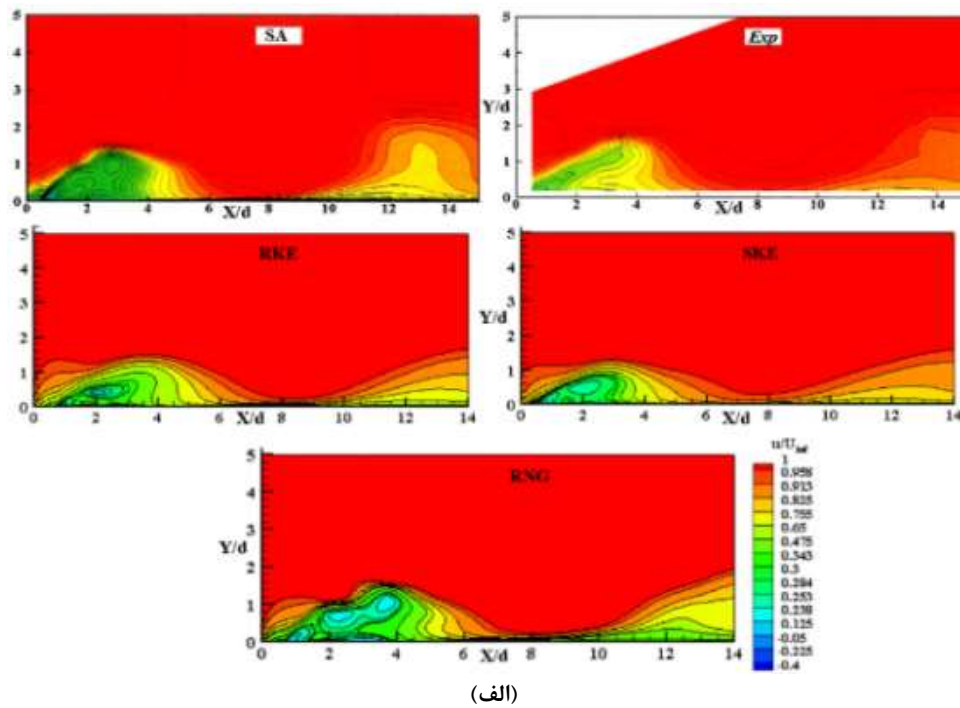
شکل ۶- مقایسه‌ی سرعت جریان عرضی با داده‌های آزمایشگاهی [۱۳] برای مدل‌های مختلف آشفتگی در فاصله  $x=2.235d$  تحت فازهای الف) صفر درجه، ب)  $80^\circ$ ، پ)  $160^\circ$ ، ت)  $40^\circ$ ، ث)  $320^\circ$  و ج) سرعت متوسط جریان عرضی در طول یک سیکل

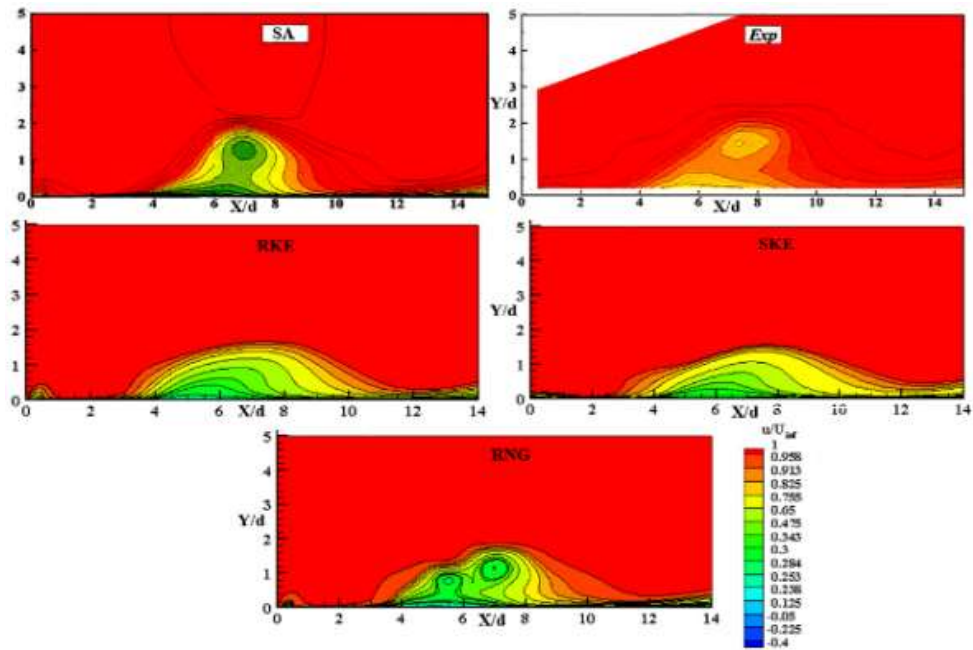
تجربی هستند؛ این درحالی‌که است که بعد از فاصله گرفتن از ناحیه نزدیک دیوار، شیب پروفیل سرعت را به خوبی پیش‌بینی کرده‌اند. در فازهای  $80^\circ$  و  $160^\circ$  درجه که مربوط به مرحله مکش است، هر چهار مدل آشفتگی، پیش‌بینی بسیار خوبی را با داده‌های آزمایشگاهی از خود نشان می‌دهند. در فاز  $240^\circ$  درجه مربوط به مرحله دمش جت مصنوعی است که سه مدل آشفتگی RNG، RKE و SKE، به خوبی پروفیل سرعت حاصل‌شده از نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی کرده‌اند، به طوری که مقادیر بدست آمده برای مدل‌های آشفتگی RKE و SKE، از مقادیر آزمایشگاهی بیشتر، اما با همان شیب سرعت داده‌های آزمایشگاهی را دنبال می‌کنند؛ درحالی‌که مقادیر بدست آمده توسط مدل RNG، کمتر از مقادیر تجربی است. فاز  $320^\circ$  درجه مربوط به مرحله دمش سیال در جریان عرضی است که پروفیل سرعت تقریباً نزدیک به پروفیل سرعت در فاز صفر درجه است و مدل آشفتگی RNG، از سایر

شده برای محرک نوسانی، جت مصنوعی را در حداکثر دمش خود نشان می‌دهد. به علت دمش سیال از اورفیس، در ناحیه نزدیک دیواره مومنتوم به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که در ناحیه نزدیک دیواره، اثرات لزجت غالب بر میدان جریان می‌باشند. از مقایسه میان مدل‌های آشفتگی مورد بررسی می‌توان متوجه شد که مدل آشفتگی RNG، از دقت قابل قبولی نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی در پیش‌بینی پروفیل سرعت برخوردار است. مدل آشفتگی RNG، به علت تصحیح در معادلات اضمحلال و انرژی آشفتگی و لزجت آشفتگی توانسته سرعت ناحیه نزدیک به دیواره را به خوبی پیش‌بینی کند. مدل‌های دیگر، شکل پروفیل سرعت در جریان عرضی را با نسبت قابل قبولی مانند داده‌ها آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده‌اند. مدل آشفتگی RKE و SKE، شکل پروفیل در ناحیه نزدیک دیواره را به خوبی بدست آورده‌اند؛ اما دارای انحراف زیادی با داده‌های

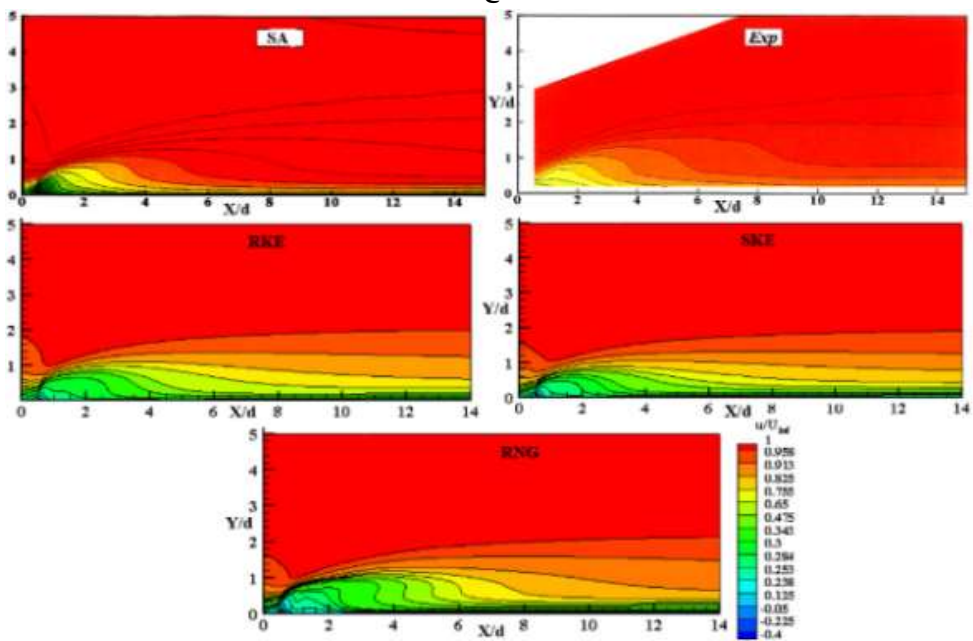
کانتورهای مولفه سرعت در راستای جریان  $u$  برای مدل های آشفتگی گوناگون، همراه با داده های آزمایشگاهی و نتایج عددی [۱۳] در فازهای صفر، ۸۰ و ۱۶۰ و همچنین کانتور سرعت متوسط میانگین گیری زمانی، در شکل ۷ رسم

مدل ها پیش بینی مناسب تری دارد. شکل (۶-ج) که سرعت متوسط میانگین گیری شده در طول یک سیکل را نشان می دهد، تقریباً هر چهار مدل آشفتگی، پیش بینی قابل قبولی از نتایج تجربی دارند.





(ج)



(د)

شکل ۷- کانتورهای سرعت جریان برای مدل‌های مختلف آشفتگی تحت فازهای الف) صفر درجه، ب)  $80^\circ$ ، ج)  $160^\circ$ ، و د) کانتور سرعت متوسط جریان در طول یک سیکل

شده است. با توجه به شکل، کانتور سرعت در فاز صفر درجه، مرحله ماکزیمم دمش سیال از اوریفیس را نشان می‌دهد، همچنین نتایج تجربی نشان می‌دهد که سیال تقریباً تا ارتفاع  $1/5d$  از دهانه اوریفیس بیرون آمده است که مدل‌های آشفتگی SA و RNG، مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند، درحالی‌که در مدل‌های آشفتگی RKE و SKE سیال

شده است. با توجه به شکل، کانتور سرعت در فاز صفر درجه، مرحله ماکزیمم دمش سیال از اوریفیس را نشان می‌دهد، همچنین نتایج تجربی نشان می‌دهد که سیال تقریباً تا ارتفاع  $1/5d$  از دهانه اوریفیس بیرون آمده است که مدل‌های آشفتگی SA و RNG، مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند، درحالی‌که در مدل‌های آشفتگی RKE و SKE سیال

۲- مقایسه کانتور و پروفیل سرعت متوسط میانگین‌گیری شده در طول یک سیکل نشان می‌دهد که هر سه مدل، برآورد مناسب و پیش‌بینی یکسانی از میدان جریان دارند.

۳- هر سه مدل آشفتگی، تخمین قابل قبولی از شکل پروفیل سرعت در طی مراحل دمش و مکش نسبت به داده‌های تجربی ارائه می‌کنند.

۴- از مقایسه مدل‌های مختلف آشفتگی از پروفیل سرعت در مرحله مکش می‌توان متوجه شد که هر سه مدل، پیش‌بینی قابل قبولی از داده‌های تجربی دارند؛ این درحالی است که با شروع مرحله دمش تنها مدل آشفتگی RNG، پیش‌بینی قابل قبولی با داده‌های تجربی دارد و مدل‌های آشفتگی RKE و SKE، خطای قابل توجهی با داده‌های آزمایشگاهی دارند.

۵- از مقایسه میان کانتورهای حاصل از سرعت لحظه‌ای بدست آمده مشهود است که تنها مدل آشفتگی RNG، قادر به نشان دادن گردابه ایجاد شده در طول سیکل است. در حالی که مدل‌های آشفتگی RKE و SKE، تنها در شروع دمش این گردابه‌ها را تخمین می‌زنند و در ادامه این گردابه‌ها داخل جریان عرضی فرسایش می‌یابند.

۶- در معادلات RNG و RKE، ترم‌هایی در نظر گرفته شده است تا قادر باشند، در جریان‌های دارای جدایی، نرخ کرنش بالا و چرخش زیاد، تحلیل دقیق‌تری را نسبت به مدل SKE ارائه دهند؛ اما در مقایسه بین این دو مدل، اگرچه مدل RKE مدل جدیدتری نسبت به RNG است و همان‌طور که از نام آن (Realizable) پیدا است، سعی بر آن دارد تا قیود ریاضی مشخص در تنش‌های رینولدز را با ماهیت فیزیکی جریان‌های آشفتخته تطابق دهد، در اینجا مشاهده می‌شود که مدل RNG، پیش‌بینی بهتری نسبت به رفتار گردابه‌های خروجی از اوریفیس ارائه می‌دهد. این نکته بیان‌گر آن است کارهای بیشتری روی این مدل تازه توسعه داده شده انجام شود تا محاسن و معایب آن در کاربردهای مختلف مشخص شود.

تا ارتفاع  $1d$  از دهانه اوریفیس بیرون آمده است. همان‌طور که از مقایسه این شکل با شکل ۷ در فاز صفر درج در فاصله  $x/d=2.325$  پیداست، افزایش ممنوم در ناحیه نزدیک دیوار در همه کانتور سرعت دیده می‌شود و سپس کاهش و به دنبال آن افزایش و رسیدن سرعت به جریان عرضی دیده می‌شود؛ همچنین، دو مدل آشفتگی RKE و SKE، شباهت زیادی در پیش‌بینی سرعت به یکدیگر دارند. در فاز  $80^\circ$  درجه که مربوط به مرحله مکش است، مشاهده می‌شود که سیال خارج شده از مرحله قبل توسط جریان عرضی در حال حمل شدن است، همچنین یک جریان چرخشی در هسته سرعت در نتایج آزمایشگاهی دیده می‌شود که مدل‌های آشفتگی RNG و SA، به خوبی آن را نشان می‌دهند، نکته جالب‌توجه دیگر آن است که مدل RNG نسبت به مدل SA، زاویه تمایل گردابه در جهت جریان را نزدیک‌تر به کانتور آزمایشگاهی نشان داده است. مدل‌های RKE و SKE، گردابه در هسته جریان را در  $x/d$  کوچک‌تر و نزدیک دیواره با اندازه کوچک‌تری پیش‌بینی کرده‌اند. در فاز  $160^\circ$  درجه در مدل‌های آشفتگی RKE و SKE، اثری از گردابه دیده نمی‌شود؛ درحالی‌که در مدل‌های آشفتگی RNG و SA گردابه وجود دارد و توسط میدان جریان حمل می‌شود. در شکل (۷-د) که مربوط به سرعت متوسط میانگین‌گیری زمانی در طول یک سیکل است، هر چهار مدل آشفتگی تطابق نزدیکی با کانتور حاصل‌شده توسط داده‌های آزمایشگاهی دارند. همین نکته در شکل (۶-ج) نیز مشاهده شد.

## ۷- نتیجه‌گیری

۱- برای مدل‌سازی آشفتگی در رهیافت URANS برای تزریق جت مصنوعی در حضور جریان عرضی از سه مدل آشفتگی، SKE، RKE و RNG استفاده شده است. نتایج بدست آمده از سرعت خروجی لحظه‌ای در جت مصنوعی نشان می‌دهند که سه مدل آشفتگی، پیش‌بینی یکسانی در نیم سیکل دمش دارند؛ این درحالی است که در نیم سیکل مکش دو مدل آشفتگی RNG و RKE توانسته‌اند، نقاط مینیمم و ماکزیمم نسبی حاصل شده را با تقریب خوبی نشان دهند.

		۸- علايم، نشانه‌ها و ارقام	
ویسکوزیته‌ی جریان آرام، $\mu_0$	kg/m.s		
ویسکوزیته‌ی توربولانسی	$\mu_t$	نسبت مومنتوم جت و لایه‌مرزی آشفته	$C_\theta$
چگالی، $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	قطر اوریفیس	d, D, D <sub>0</sub>
		Direct Numerical Simulation	DNS
		فرکانس، Hz	f
		طول کورس، m	L
		Large Eddy Simulation	LES
		عدد ماخ جریان آزاد	M
		Particle Image Velocimetry	PIV
		Planar Laser-Induced Fluorescence	PLIF
		عدد رینولدز جت	Re <sub>j</sub>
		Realizable k- $\epsilon$	RKE
		RNG (Renormalization Group) k- $\epsilon$	RNG
		Spalart-Allmaras	SA
		Standard k- $\epsilon$	SKE
		عدد استروهل	Sr
		دوره‌ی تناوب، s	T
		Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes	URANS
		نسبت سرعت جت به جریان عرضی، Velocity Ratio	VR
		Zero-Net Mass Flux	ZNMF
		ارتفاع لایه مرزی، m	$\delta$

۹- مراجع

- [1] Gordon M, Soria J (2002) PIV measurements of a zero-net-mass-flux jet in cross flow. *Exp Fluids* 33(6): 863-872.
- [2] Smith BL, Glezer A (1998) The formation and evolution of synthetic jets. *Phys Fluids* 10(9): 2281-2297.
- [3] Schaeffler N (2003) The interaction of a synthetic jet and a turbulent boundary layer. In 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (p. 643).
- [4] Milanovic IM, Zaman KB (2005) Synthetic jets in cross-flow. *AIAA J* 43(5): 929-940.
- [5] Gordon M, Cater JE, Soria J (2004) Investigation of the mean passive scalar field in zero-net-mass-flux jets in cross-flow using planar-laser-induced fluorescence. *Phys Fluids* 16(3): 794-808.
- [6] Zhong S, Millet F, Wood NJ (2005) The behaviour of circular synthetic jets in a laminar boundary layer. *Aeronaut J* 109(1100): 461-470.
- [7] Jabbar M, Zhong S (2008) The near wall effect of synthetic jets in a boundary layer. *Int J Heat Fluid Fl* 29(1): 119-130.
- [8] Byrganhalli R, Mittal R, Najjar F (2004) Study of three-dimensional synthetic jet flowfields using direct-numerical simulation. In 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (p. 91).
- [9] Cui J, Agarwal R, Cary A (2003) Numerical simulation of the interaction of a synthetic jet with a turbulent boundary layer. In 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit (p. 3458).
- [10] Bazdidi-Tehrani F, Jahromi M (2011) Analysis of synthetic jet flow field: application of URANS approach. *T Can Soc Mech Eng* 35(3): 337-353.
- [11] Yoo I, Lee S (2011) Three dimensional RANS computation using deforming mesh for synthetic jet simulation. In 49th AIAA aerospace sciences meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition (p. 942).
- [12] Dandois J, Garnier E, Sagaut P (2006) Unsteady simulation of synthetic jet in a crossflow. *AIAA J* 44(2): 225-238.
- [13] Milanovic I, Zaman K, Rumsey C (2005) An isolated circular synthetic jet in cross-flow at low momentum-flux ratio. In 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (p. 1110).

- reynolds number turbulent flows. *Comput Fluids* 24(3): 227-238.
- [16] Yakhot VS, ASTBCG, Orszag SA, Thangam S, Gatski TB, Speziale CG (1992) Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Phys Fluids A-Fluid* 4(7): 1510-1520.
- [14] Boussinesq J (1897) *Théorie de l'écoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides dans les lits rectilignes à grande section* (Vol. 1). Gauthier-Villars.
- [15] Shih TH, Liou WW, Shabbir A, Yang Z, Zhu J (1995) A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high