

(یادداشت فنی)

مطالعه تأثیر مکش جریان هوا بر حباب جدایش در میدان جریان اطراف یک استوانه مستطیلی

در این مقاله میدان جریان اطراف یک استوانه مستطیلی دوبعدی به صورت عددی شبیه‌سازی و اثرات مکش جریان در ناحیه حباب جدایش بررسی شده است. هدف برآورد میزان تأثیر مکش بر ابعاد حباب جدایش است. میدان جریان به صورت دو بعدی، تراکم ناپذیر، مغشوش و پایا تحلیل شده است. برای شبیه‌بندی میدان حل از نرم‌افزار گمبیت و برای تحلیل عددی از نرم‌افزار فلونت استفاده شده است. مسئله در دو حالت بدون مکش و با وجود مکش تحلیل شده و تأثیر مکش بر ابعاد حباب جدایش مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج حاصل شده می‌توان گفت وجود مکش طول حباب جدایش را کوچکتر می‌کند، به طوری که در چندین حالت مختلف این طول حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: حباب جدایش، لایه مرزی، مکش جریان، استوانه مستطیلی، شبیه‌سازی عددی

سعید کاوس فر^{۱*}، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران

امیر رستمی^۲، کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران

*نویسنده مخاطب، آدرس: بناب، کدپستی: ۵۵۵۱۷۸۵۱۷۶

Study of the Effect of Air Suction on Separation Bubble in a Flow Field around a Rectangular Cylinder

In this paper, the flow field around a two-dimensional rectangular cylinder was numerically simulated and the effects of the flow suction on the separation bubble were investigated. The purpose was to estimate the effect of suction on the dimensions of the separation bubble. The flow field was assumed incompressible, turbulent, and two-dimensional. Gambit software was used for grid generation and FLUENT for numerical simulation. The problem was analyzed in two states: with and without suction, and the effect of suction on the separation bubble was investigated. According to the results, it can be said that the suction length of the separation bubble is smaller, so that in several different cases this length is reduced by about 50%.

Keywords: Separation Bubble, Boundary Layer, Flow Suction, Rectangular Cylinder, Numerical Simulation

S. Kavousfar^{1*}, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran

A. Rostami², M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran

*Corresponding Author, Postal Code: 5551785176, Bonab, IRAN
S.Kavousfar@Bonabiau.ac.ir

۱- مقدمه

جریان‌های مورد علاقه در مهندسی باد و آیرودینامیک صنعتی در انواع رژیم‌های آرام و آشفته اغلب با جدایش حباب گونه جریان مواجه هستند که در اصطلاح حباب جدایش گفته می‌شود. مثال‌هایی از قبیل جریان لابه‌لای ساختمان‌ها، روی سطوح طویل کامیون‌های کشنده، پل‌های طویل، ساختارهای تپه‌ای و جریان درون لوله‌های با انبساط و انقباض ناگهانی از این جمله می‌باشد [۱]. جریان سیال حول استوانه‌های مربعی و مستطیلی جزو پدیده‌های شایع در مهندسی است. این نوع از جریان در بسیاری از کاربردهای فنی و به‌خصوص در وسایل حرارتی و هیدرولیکی نیز مشاهده می‌شود [۲].

اجسام با سطح مقطع دایره‌ای، مربعی و مستطیلی که در مسیر جریان واقع می‌شود به اجسام بلاف^۱ معروف هستند. این اجسام برخلاف اجسام خط جریانی^۲ باعث مختل شدن جریان سیال در اطراف آن‌ها می‌شوند [۳]. ساختمان‌ها، پل‌ها و خطوط لوله اقیانوسی همه مثال‌هایی از موانع بلاف هستند که تحت بادهای شدید یا جریان‌های دریایی سهمگین هستند و سازه آن‌ها در معرض تخریب قرار می‌گیرد.

با عبور جریان سیال لزج از روی جسم استوانه‌ای یک لایه مرزی بر روی جسم شکل می‌گیرد. در این حالت توزیع فشار واقعی در اطراف جسم با توزیع متقارن فشار در سیال ایده‌آل بسیار متفاوت و تابعی از عدد رینولدز جریان است. اندازه فشار بر روی تمامی نقاط جسم از مقدار فشار در جریان آزاد اطراف کمتر است و این مسئله باعث وارد شدن نیروی پسا بر جسم می‌شود. جریان سیال حول انواع مختلف استوانه باعث ایجاد جدایش در جریان عبوری بر روی جسم و ایجاد گردابه در پشت و مجاورت جسم می‌شود. جدایش خطوط جریان از روی جسم رابطه نزدیکی با توزیع فشار در لایه مرزی و توزیع فشار در جریان آزاد خارجی دارد. به طوری که یک گردیدان فشار معکوس باعث برگشت جریان در مجاورت جداره شده و پس از جدایش ذرات سیال از سطح استوانه، گردابه در پشت جسم تشکیل می‌شود [۴].

بررسی‌ها نشان می‌دهد که جریان اطراف استوانه^۱ مستطیلی شدیداً متأثر از نسبت طول به عرض (L/d) استوانه است. محققین [۵-۷] بیان کردند که توزیع فشار

در اطراف سطح استوانه اطلاعات مناسبی از نیروی وارده به جسم توسط سیال فراهم می‌کند. توزیع فشار در اطراف استوانه^۱ مستطیلی بسته به مقدار L/d مقطع مستطیلی تغییر می‌کند. در سال ۱۹۹۲، اوهایا^۳ و همکاران [۸] جریان اطراف مقاطع استوانه‌ای با نسبت منظرهای بین ۳ تا ۹ را در عدد رینولدز ۱,۰۰۰ به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. با افزایش نسبت منظری استوانه^۱ مستطیلی تا جایی که اتصال مجدد جریان بر روی سطح استوانه اتفاق بیفتد (نسبت منظری بین ۲ تا ۳)، توزیع فشار بر روی سطح استوانه دچار تغییرات می‌شود. به گونه‌ای که در این حالت یک ناحیه پرفشار بلافاصله پس از اتصال مجدد جریان به وجود می‌آید که باعث جابجایی گردابه‌های بیشتری به پایین دست جریان و کاهش سطح مکش (مساحت ناحیه مکش) و نیروی پسا می‌شود [۹]. در سال ۱۹۹۶، یو و کریم^۴ توزیع فشار را بر روی سطح یک استوانه^۱ مستطیلی در نسبت منظرهای بین ۱ تا ۴ بررسی کردند [۱۰]. آن‌ها نتیجه گرفتند که فشار در ناحیه بعد از اتصال مجدد جریان با افزایش نسبت منظری زیاد می‌شود و در نتیجه مکش کمتری در ناحیه ویک استوانه ایجاد می‌شود. در نسبت منظری بین ۱ تا ۲ تغییر محسوسی در فشار جریان حول استوانه ملاحظه نشد که دلیل آن عدم ایجاد اتصال مجدد جریان بر روی سطح استوانه گزارش شد.

نودا و ناکایاما^۵ آزمایش‌هایی را بر روی جریان حول استوانه^۱ مستطیلی در نسبت منظری ۲/۵ انجام دادند و دریافتند که جریان عبوری از روی استوانه با افزایش شدت اغتشاش جریان آزاد باعث تسریع اتصال مجدد جریان می‌شود [۱۱]. در حالی که در مقادیر پایین تر شدت آشفتگی، جریان در نسبت منظری مشابه اتصال مجدد با سطح پیدا نمی‌کند. یاکارینو^۶ و همکاران در سال ۲۰۰۳ دقت مدل توربولانسی ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده به روش رینولدز^۷ را در پیش‌بینی جریان‌های پیچیده همراه با پدیده جدایش بررسی کردند [۱۲]. لئو^۸ جریان حول استوانه^۱ مستطیلی را در مقادیر مختلف نسبت منظری با مدل‌های آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۹ و شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده^{۱۰} شبیه‌سازی نمود و مشخصه‌های اساسی

3. Ohya
4. Yu and Kareem
5. Noda and Nakayama
6. Iaccarino
7. Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)
8. Liaw
9. Large Eddy Simulation (LES)
10. Detached Eddy Simulation (DES)

1. Bluff Body
2. Streamlined Body

یک سیلندر مستطیلی با نسبت ابعاد (طول به عرض) برابر $L/d = 8$ انتخاب می‌شود.

۲- بیان مسئله و توصیف روش کار

در این بخش به توصیف مسئله و روش کار پرداخته خواهد شد. ابتدا معادلات حاکم بر مسئله و روش حل بیان خواهد شد. سپس، دامنه محاسباتی و شرایط مرزی بحث و در انتها استقلال حل از شبکه بررسی خواهد شد.

۲-۱- معادلات حاکم بر مسئله و روش حل

برای حل میدان جریان سیال، لازم است معادلات حاکم بر میدان حل شود. این معادلات عبارت از معادله پیوستگی و معادله مومنوم است که در شرایط تراکم‌ناپذیر داریم:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0, \quad (1)$$

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\nabla P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V}. \quad (2)$$

لازم به ذکر است که با توجه به عدم تغییرات دمایی، از حل معادله انرژی صرف‌نظر می‌شود. برای مدلسازی آشفتگی از مدل یک معادله‌ای اسپالارت-آلماراس^{۱۶} استفاده می‌شود. این مدل برای جریان‌هایی که دچار جدایش شده و دوباره به سطح جسم می‌چسبند، مناسب است [۲۰]. در این مدل تنش رینولدز آشفتگی به صورت رابطه (۳) است.

$$-\overline{u'u'} = \nu_t(\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u})^T \quad (3)$$

برای لزجت گردابه‌ای داریم:

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}, \quad (4)$$

که در آن، f_{v1} تابع تعدیل لزجت بوده و عبارت است از:

$$f_{v1} = \frac{x^3}{x^3 + c_{v1}^3}, \quad x = \frac{\tilde{\nu}}{\nu}. \quad (5)$$

برای حل میدان جریان مورد نظر از روش شبیه‌سازی عددی استفاده شده، بنابراین تولید شبکه محاسباتی به کمک نرم‌افزار گمبیت^{۱۷} انجام می‌شود. این نرم‌افزار قابلیت مناسبی در تولید انواع شبکه باسازمان و بی‌سازمان دارد که در مسئله حاضر هر دو نوع شبکه بصورت ترکیبی به کار می‌رود. همچنین، برای تحلیل میدان جریان از نرم‌افزار فلوئنت^{۱۸} استفاده می‌شود که یک نرم‌افزار شناخته شده در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است.

جریان را در مقادیر مختلف نسبت منظری به دست آورد [۳]. کائو^{۱۱} و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) جریان برشی سرعت را حول استوانه مستطیلی در نسبت منظرهای ۱، ۵ و ۸ بررسی کردند [۱۳].

دانیلز^{۱۲} و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی LES اثرات آشفتگی جریان آزاد را بر روی ارتعاشات ایجاد شده توسط گردابه‌ها جریان بر روی یک استوانه مستطیلی الاستیک با نسبت منظری ۴ بررسی کردند [۱۴]. نودا و ناکایاما^{۱۳} ارتعاش آیروالاستیکی یک استوانه مستطیلی را درون یک جریان یکنواخت از طریق روش LES فرمول شده در یک سیستم مختصات متحرک غیر اینرسی بررسی کردند [۱۵]. ارنگا^{۱۴} با استفاده از روش عددی LES شروع ریزش گردابه را از یک استوانه مستطیلی محصور شده در یک کانال با نسبت انسداد ثابت ۰/۲ در مقادیر مختلف نسبت منظرهای مختلف استوانه بررسی کردند [۱۶]. مانینی^{۱۵} و همکاران تأثیر آشفتگی جریان آزاد و زاویه حمله را بر آیرودینامیک جریان حول یک استوانه مستطیلی با نسبت منظری ۵ بررسی کردند [۱۷].

کنترل جریان سیال اطراف اجسام صلب، به خصوص کنترل جدایش لایه مرزی و نیروهای وارد بر جسم از مسائل مورد توجه در مباحث مهندسی است. یکی از روش‌های کنترل جریان سیال استفاده از مکش سطحی بوده که تحقیقات متنوعی در این راستا انجام شده است. طالش بهرامی و همکاران برای کاهش نویز آکوستیک حاصل از جریان هوای پرسرعت حول یک استوانه، شیارهایی موازی محور روی سطح استوانه ایجاد کردند که از آنجا جریان سیال به داخل استوانه مکش شده است [۱۸]. سید شمس طالقانی توانایی کنترل جریان به وسیله مکش بر روی یک سیلندر استوانه‌ای به منظور کاهش نیروی پسا و حذف عوامل ناپایایی و ارتعاشات ناشی از آن را مورد مطالعه عددی قرار داد [۱۹]. کبیری سامانی و گل محمدی مکش جریان در سطح استوانه بیضوی را به روش تحلیلی مطالعه نمودند و روابطی را برای محاسبه پارامترهای جریان از جمله توزیع سرعت، تنش برشی، تابع جریان و ضریب پسا به دست آوردند [۴].

در تحقیق حاضر، میدان جریان اطراف یک سیلندر مستطیلی تحلیل و تأثیر مکش جریان بر حباب جدایش بررسی می‌شود. مکش جریان از سطوح جانبی دو طرف سیلندر در نزدیکی لبه حمله انجام می‌شود. برای این منظور

16. Spalart-Allmaras

17. Gambit

18. FLUENT

11. Cao

12. Daniels

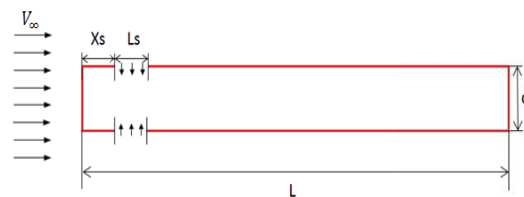
13. Noda and Nakayama

14. Ortega

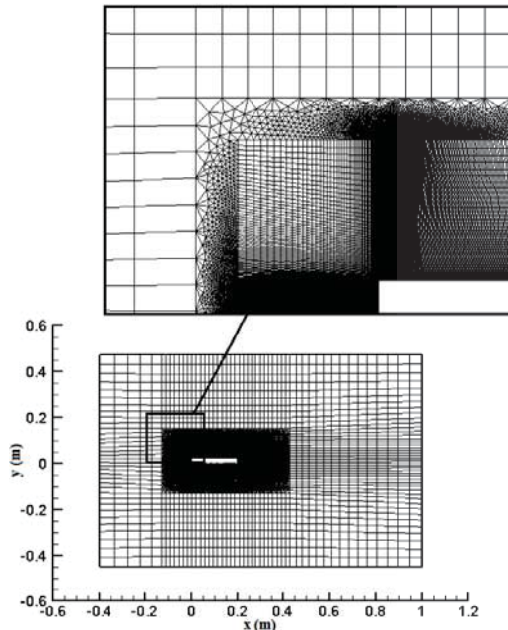
15. Mannini

۲-۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

هندسه مورد نظر یک سیلندر مستطیلی است که در سطوح جانبی دارای سوراخ‌هایی برای مکش جریان وجود دارد. این سوراخ‌ها در نزدیکی لبه حمله یعنی جایی که حباب جدایش در آن ناحیه تشکیل می‌شود، قرار دارد. سیلندر مستطیلی با طول برابر با $L = 200 \text{ mm}$ و عرض برابر با $d = 25 \text{ mm}$ (نسبت طول به عرض برابر با $L/d = 8$) انتخاب شده است. سیلندر مستطیلی و پارامترهای هندسی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. L_s پهنای سوراخ مکش و X_s فاصله لبه سوراخ از لبه حمله جسم است.



شکل (۱): هندسه استوانه مستطیلی.



شکل (۲): دامنه میدان حل و شبکه‌بندی انجام شده.

۲-۳- بررسی استقلال حل از شبکه

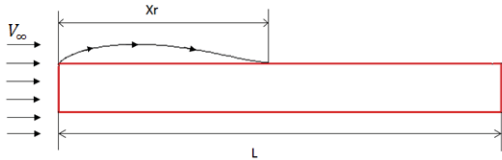
یکی از مباحث مهم در روش‌های عددی، تأثیر اندازه شبکه بر نتایج حاصل است. همچنین، به دست آوردن نتایج مستقل از شبکه از اهداف هر تحقیق عددی است. شبکه تولید شده و تعداد المان‌های به وجود آمده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج به دست آمده و مدت زمان اجرای برنامه کامپیوتری دارند. بنابراین، تأثیر شبکه بر نتایج به دست آمده در این تحقیق بررسی شده است. با افزایش تعداد سلول‌های شبکه در جهت‌های x و y و کوچک‌تر نمودن ابعاد سلول‌ها به خصوص در نزدیکی مرزهای جامد، می‌توان رفتار جریان را به‌طور دقیق‌تر و به همراه جزئیات بیشتر مطالعه نمود. از طرفی، افزایش غیرضروری تعداد شبکه منجر به افزایش زمان تحلیل می‌شود. بنابراین، به منظور دستیابی به تعداد شبکه بهینه، دامنه حل با تعداد شبکه‌های مختلف تحلیل شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. برای این منظور از توزیع ضریب فشار و توزیع ضریب تنش برشی در شرایط بدون مکش استفاده شده است که به ازای مقادیر مختلف تعداد سلول‌های شبکه، توزیع ضریب فشار روی سطح جانبی استوانه مستطیلی در شکل ۳ و توزیع ضریب تنش برشی در شکل ۴ ترسیم شده است. مطابق این نتایج ملاحظه می‌شود که به ازای تعداد سلول‌های شبکه (N) برابر با $160,000$ تا $170,000$ شرایط استقلال حل از شبکه حاصل می‌شود و به همین دلیل این تعداد به عنوان شبکه بهینه انتخاب شده است.

میدان جریان مورد نظر به صورت دو بعدی تحلیل می‌شود. دامنه محاسباتی اطراف جسم و شبکه‌بندی ایجاد شده در شکل ۲ نشان داده شده است. مرزهای دور دست میدان از نوع جریان آزاد انتخاب شده است و به همین منظور این مرزها به اندازه کافی در فاصله دور از جسم قرار داده شده است. همچنین، جریان در مرز ورودی سمت چپ میدان نیز با شرایط جریان آزاد وارد میدان می‌شود. مرز سمت راست میدان نیز خروجی جریان با فشار محیط در نظر گرفته شده است. در قسمت مکش جریان از روی سطح جسم، شرایط مرزی از نوع خروجی فشار معلوم است که فشار آن کمتر از فشار محلی بوده و ایجاد مکش می‌نماید.

مطابق شکل ۲ برای داشتن شبکه بهینه، هر دو شبکه باسازمان و بی‌سازمان بصورت ترکیبی به کار گرفته شده است. با توجه به وجود گرادیان‌های شدید جریان در نزدیکی‌های لبه حمله جسم، در این نواحی شبکه ریزتر به کار رفته است. از طرفی، برای جلوگیری از افزایش بی‌رویه تعداد المان‌های شبکه در نزدیکی‌های جسم از شبکه باسازمان استفاده شده است. در ادامه، با استفاده از شبکه بی‌سازمان در نواحی میانی دامنه حل تراکم شبکه کاهش یافته و سپس در نواحی دورتر باز هم از شبکه باسازمان درشت‌تر استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی انجام شده در دو بخش ارائه می‌شود. ابتدا با قرار دادن مکش در یک موقعیت دلخواه، تأثیر وجود مکش بر ساختار میدان جریان بررسی می‌شود. سپس، محل مکش جریان را در موقعیت‌های مختلف قرار داده و موقعیت بهینه مکش تعیین می‌شود، طوری که بیشترین تأثیر را بر میدان جریان و به خصوص حباب جدایش داشته باشد. از پارامترهای مهم میدان جریان مورد بررسی، طول حباب جدایش به عنوان یک پارامتر شاخص انتخاب و بررسی می‌شود. مطابق شکل ۵ که بصورت شماتیک نشان داده شده است، حباب جدایش از محل جدایش جریان در لبه حمله جسم شروع شده و تا نقطه‌ای که جریان مجدداً به سطح جسم می‌چسبد، ادامه دارد. فاصله این دو نقطه به عنوان طول حباب جدایش است. از طرفی، در نقطه باز چسبیدن جریان به سطح تنش برشی دیوار صفر می‌شود. بنابراین، از این معیار برای تشخیص موقعیت نقطه باز چسبیدن و به عبارتی طول حباب جدایش استفاده می‌شود.



شکل (۵): نمایش محل باز چسبیدن جریان به سطح و طول حباب جدایش.

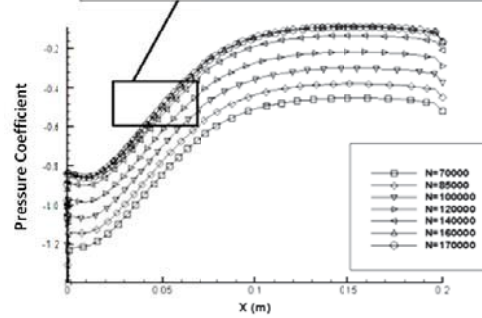
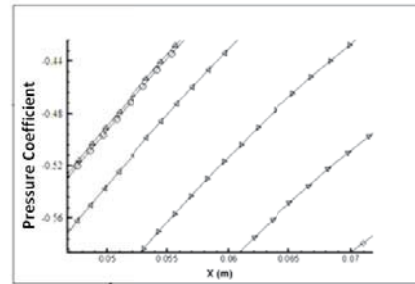
۳-۱- اعتبارسنجی روش کار

به منظور اعتبارسنجی و اطمینان از درستی روش تحلیل لازم است قسمتی از نتایج با مراجع موجود مقایسه شود. هندسه مورد نظر در شرایط بدون مکش در برخی از مراجع مورد مطالعه قرار گرفته است. طول حباب جدایش از پارامترهای مهم این جریان بوده و در مراجع نیز استخراج شده است. بنابراین، این پارامتر در جدول ۱ با برخی از مراجع مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود نتیجه تحقیق حاضر تطابق قابل قبولی با مراجع داشته و درستی روش کار مورد استفاده را تأیید می‌نماید.

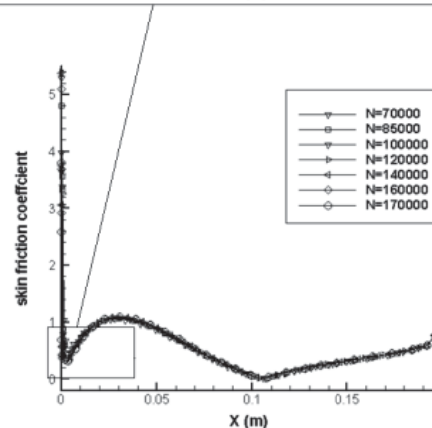
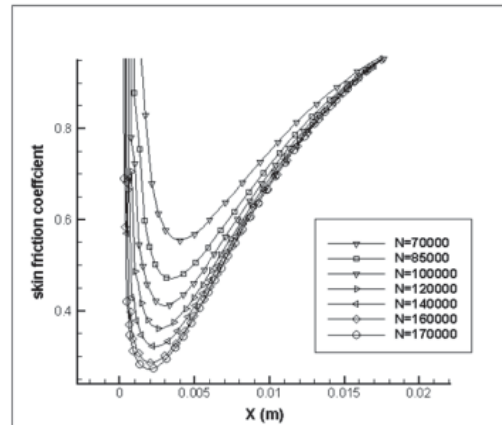
جدول (۱): مقایسه مقادیر طول حباب جدایش حاصل از تحقیق حاضر با

برخی از مراجع.

نام تحقیق	$Re \times 10^{-4}$	$\frac{L}{d}$	$\frac{x_r}{d}$
مرجع [۲۱]	5	11	4.7
مرجع [۲۲]	5	12	4.57
مرجع [۲۳]	3.6	5	4.23
	3.6	6	4.5
تحلیل حاضر	2.5	8	4.22



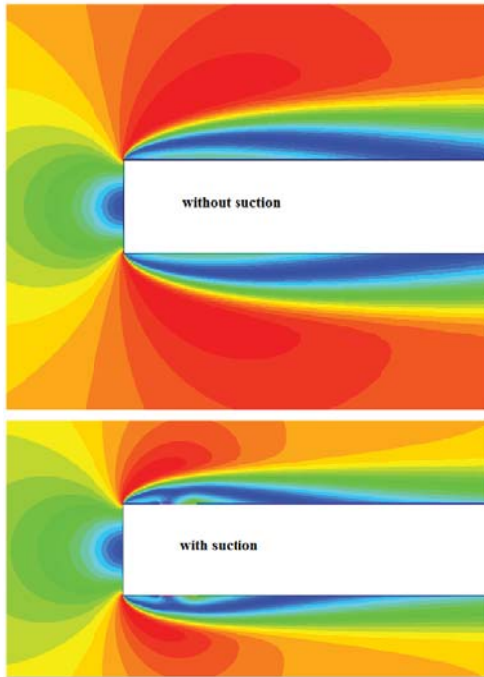
شکل (۳): توزیع ضریب فشار روی سطح جانبی جسم همراه با بزرگ‌نمایی به ازای تعداد شبکه‌های مختلف.



شکل (۴): توزیع ضریب تنش برشی روی سطح جانبی جسم همراه با بزرگ‌نمایی به ازای تعداد شبکه‌های مختلف.

۳-۲- بررسی تأثیر وجود مکش

ایجاد مکش بر ساختار میدان جریان و به خصوص بر ابعاد حباب جدایش تأثیرگذار است. این موضوع را می‌توان با بررسی طول حباب جدایش در دو حالت بدون وجود مکش و با وجود مکش نشان داد. برای مشخص نمودن طول حباب جدایش از معیار صفر بودن تنش برشی در نقطه باز چسبیدن جریان به سطح استفاده می‌شود. در شکل ۶ نمودار توزیع ضریب تنش برشی روی سطح جانبی استوانه در دو حالت بدون مکش و با مکش ترسیم شده است. براساس این نمودار، نقطه باز چسبیدن جریان به سطح در شرایط بدون مکش در موقعیت $X_r = 0.105, 576 \text{ m}$ ($\frac{X_r}{d} = 4.22$) و در شرایط با مکش در موقعیت $X_r = 0.055, 4551 \text{ m}$ ($\frac{X_r}{d} = 2.21$) قرار دارد. بنابراین، طول حباب جدایش حدود ۴۸ درصد کوچکتر شده است. تأثیر ایجاد مکش بر ساختار میدان جریان با نمایش خطوط جریان در شکل ۷ و کانتورهای سرعت در شکل ۸ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که خطوط جریان به سمت محل مکش کشیده شده و ابعاد حباب جدایش کوچکتر شده است.



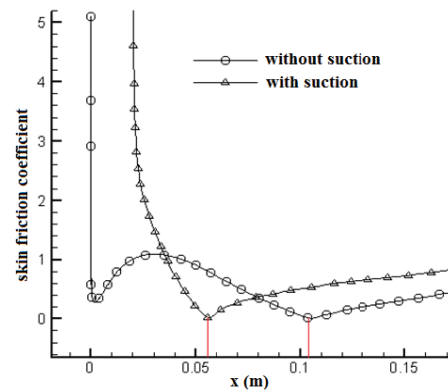
شکل (۸): نمایش کانتورهای سرعت در دو حالت بدون مکش و با مکش.

۳-۳- بررسی تأثیر موقعیت مکش

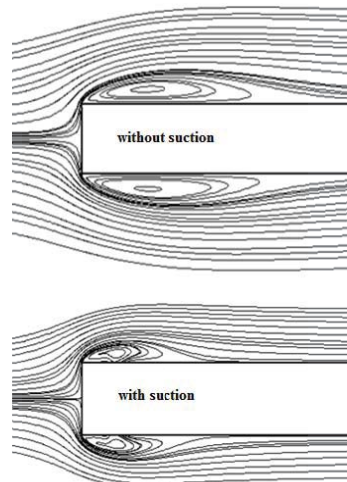
در بخش قبل ملاحظه شد که مکش، ساختار میدان جریان و ابعاد حباب جدایش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در ادامه، تأثیر موقعیت قرارگیری سوراخ مکش و همچنین اندازه خود سوراخ مکش بر ابعاد حباب جدایش بررسی می‌شود. برای این منظور سوراخ مکش در اندازه‌های سه‌گانه $\frac{L_s}{d} = 0.2, 0.4, 0.6$ تحلیل می‌شود که هر کدام از سوراخ‌ها در موقعیت‌های مختلف قرار می‌گیرد. نتایج حاصله به ازای حالت‌های مختلف در جدول ۲ و نمودار مربوطه نیز در شکل ۹ ارائه شده است. مطابق این نتایج، با بزرگ شدن عرض سوراخ مکش، موقعیت نقطه باز چسبیدن جریان به سطح به لبه حمله استوانه نزدیکتر شده و طول حباب جدایش کوچکتر می‌شود. همچنین، با دور شدن محل مکش جریان از لبه حمله نیز طول حباب جدایش کاهش می‌یابد.

جدول (۲): مقادیر طول حباب جدایش به ازای ابعاد و موقعیت‌های مختلف سوراخ مکش.

$\frac{L_s}{d} = 0.2$		$\frac{L_s}{d} = 0.4$		$\frac{L_s}{d} = 0.6$	
$\frac{X_s}{d}$	$\frac{X_r}{d}$	$\frac{X_s}{d}$	$\frac{X_r}{d}$	$\frac{X_s}{d}$	$\frac{X_r}{d}$
0.80	3.30	0.80	2.97	0.80	2.69
0.12	3.21	0.12	2.80	0.12	2.64
0.20	3.19	0.20	2.72	0.20	2.30
0.28	3.08	0.28	2.52	0.28	2.24
0.40	3.07	0.40	2.21	0.40	2.00



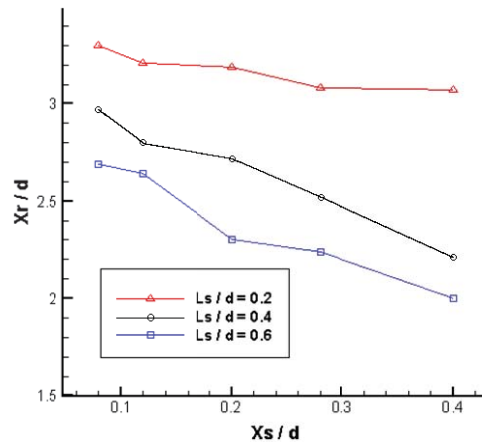
شکل (۶): توزیع ضریب تنش برشی روی سطح جانبی استوانه.



شکل (۷): نمایش خطوط جریان در دو حالت بدون مکش و با مکش.

۵- مراجع

- [1] Yeung, W., "Similarities of Pressure Induced by Separation Bubble in Grid-generated Turbulent Flow", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93, pp. 293-309, 2005.
- [2] Almeida, O., Mansur, S., and Silveira-Neto, A., "On the Flow Past Rectangular Cylinders: Physical Aspects and Numerical Simulation", *Therm. Eng.*, Vol. 7, pp. 55-64, 2008.
- [3] Liaw, K., "Simulation of Flow Around Bluff Bodies and Bridge Deck Sections, Using CFD", Ph.D. Dissertation, School of Civil Engineering, University of Nottingham, England, 2005.
- [4] Kabiri-Samani, A.R. and Golmohammadi, M.H., "Analytical Approach for Boundary Layer Control around Elliptical Cylinders by Suction", *Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)*, Vol. 48, No. 1, pp. 1-12, 2016 (In Persian).
- [5] Nishioka, M. and Sato, H., "Measurements of Velocity Distributions in the Wake of a Circular Cylinder at Low Reynold Numbers", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 65, pp. 97-112, 1974.
- [6] Okajima, A., "Strouhal Numbers of Rectangular Cylinders", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 123, pp. 379-398, 1982.
- [7] Courchesne, J. and Laneville, A., "A Comparison of Correction Methods Used in the Evaluation of Drag Coefficient Measurements for Two-dimensional Rectangular Cylinders", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 101, pp. 506-510, 1979.
- [8] Ohya, Y., Nakamura, Y., Ozono, S., Tsuruta, H., and Nakayama, R., "A Numerical Study of Vortex Shedding from Flat Plates with Square Leading and Trailing Edges", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 236, pp. 445-460, 1992.
- [9] Norberg, C., "Flow around Rectangular Cylinders: Pressure Forces and Wake Frequencies", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 49, pp. 187-196, 1993.
- [10] Yu, D.h. and Kareem, A., "Two-dimensional Simulation of Flow around Rectangular Prisms", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 62, pp. 131-161, 1996.
- [11] Noda, H. and Nakayama, A., "Free-stream Turbulence Effects on the Instantaneous Pressure and Forces on Cylinders of Rectangular Cross Section", *Experiments in fluids*, Vol. 34, pp. 332-344, 2003.
- [12] Iaccarino, G., Ooi, A., Durbin, P., and Behnia, M., "Reynolds Averaged Simulation of Unsteady Separated Flow", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 24, pp. 147-156, 2003.
- [13] Cao, S., Zhou, Q., and Zhou, Z., "Velocity Shear Flow over Rectangular Cylinders with Different Side Ratios", *Computers & Fluids*, Vol. 96, pp. 35-46, 2014.
- [14] Daniels, S.J., Castro, I.P., and Xie, Z.T., "Numerical Analysis of Freestream Turbulence Effects on the Vortex-induced Vibrations of a



شکل (۹): تغییرات طول حباب جدایش نسبت به موقعیت مکش.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر مکش جریان بر ساختار میدان جریان اطراف سیلندر مستطیلی و ابعاد حباب جدایش به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزارهای گمبیت و فلوئنت استفاده شد. ابتدا به کمک تعداد شبکه‌های مختلف و مقایسه نتایج، شبکه بهینه مورد نظر به دست آمد که ترکیبی از شبکه باسازمان و بی‌سازمان بود. در ادامه برای شرایط بدون مکش، طول حباب جدایش محاسبه شده و با برخی از مراجع موجود مقایسه شد تا اعتبارسنجی لازم حاصل شود. سپس با قرار دادن سوراخ مکش با اندازه‌های مختلف و در موقعیت‌های مختلف، تغییرات ایجاد شده در میدان جریان و طول حباب جدایش مشخص شد. طبق نتایج حاصل شده با بزرگ شدن عرض سوراخ مکش و ثابت ماندن فشار مکش، حجم جریان مکش شده بیشتر شده و تأثیر آن هم افزایش یافته است. از طرفی، با افزایش فاصله محل مکش از لبه حمله استوانه، در واقع محل مکش به نقطه باز چسبیدن جریان نزدیکتر شده و باز هم تأثیر مکش بر طول حباب جدایش بیشتر می‌شود. می‌توان گفت در داخل حباب جدایش، جریان گردابی ثانویه تشکیل می‌شود که به صورت مستقیم با محل مکش در تماس است. بنابراین، محل مکش با جریان اصلی به صورت مستقیم ارتباط ندارد. از طرفی، در نزدیکی لبه حمله استوانه جریان اصلی انرژی بیشتری داشته و مکش از این ناحیه تأثیر چندانی بر جریان اصلی ندارد. با دور شدن محل مکش از لبه حمله و نزدیکتر شدن آن به نقطه باز چسبیدن جریان، مکش از قسمت انتهایی حباب انجام گرفته و جریان اصلی را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد.

- Due to the Flow on a Three-dimensional Cylinder”, *Moades Mechanical Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 1049-1059, 2019 (In Persian).
- [19] Shams Taleghani, A., “Numerical and Parametric Investigation of Suction over a Cylinder for Reduction of Flow Unsteadiness and Vortex”, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 49, No. 3, pp. 183-192, 2019 (In Persian).
- [20] Miranda, W.R. and Rezende, A.L.T., “Rans Models Applied In a Flow over A Rounded Edge”, *The 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*, Ribeirão Preto, SP, Brazil, 2013.
- [21] Djilali, N. and Gartshore, I.S., “Turbulent Flow around a Bluff Rectangular Plate. Part I: Experimental Investigation”, *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 113, pp. 51-59, 1991.
- [22] Suksangpanomrung, A., Djilali, N., and Moinat, P., “Large Eddy Simulation of Separated Flow over a Bluff Rectangular Plate”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 55-663, 2000.
- [23] Yaghoubi, M. and Mahmoodi, S., “Experimental Study of Turbulent Separated and Reattached Flow over a Finite Blunt Plate”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 29, pp. 105-112, 2004.
- Rectangular Cylinder”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 153, pp. 13-25, 2016.
- [15] Noda, H. and Nakayama, A., “Analysis of Aeroelastic Vibration of Rectangular Cylinder in a Uniform Flow by a Large Eddy Simulation Formulated in a Non-inertial Moving Coordinate System”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 166, pp. 29-36, 2017.
- [16] Ortega-Casanova, J., “On the Onset of Vortex Shedding from 2D Confined Rectangular Cylinders Having Different Aspect Ratios: Application to Promote Mixing Fluids”, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 120, pp. 81-92, 2017.
- [17] Mannini, C., Marra, A.M., Pigolotti, L., and Bartoli, G., “The Effects of Free-stream Turbulence and Angle of Attack on the Aerodynamics of a Cylinder with Rectangular 5:1 Cross Section”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 161, pp. 42-58, 2017.
- [18] Talesh Bahrami, H., Parhizkar H., and Ghasemlooy, S., “Numerical Study of the Effect of Flow Suction on the Reduction of Acoustic Noise