

مطالعه عددی و پارامتری کنترل جریان به طریق مکش بر روی یک سیلندر به منظور کاهش ناپایایی‌های جریان و ریزش گردابه‌ها

سید آرش سید شمس طالقانی*، استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله، 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 مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. اثر بخشی این روش کنترلی به پارامترهای مختلفی وابسته است. برخی از این پارامترها وابسته به هندسه و برخی دیگر وابسته به ویژگی جریان می‌باشند. به همین منظور پارامترهای هندسی عرض و موقعیت شکاف مکش و همچنین سرعت مکش در کار حاضر تحقیق می‌شود. به همین منظور جریان هوا اطراف یک سیلندر در شرایط دوبعدی با عدد رینولدز $10^4 \times 3/3$ و با مدل آشفتگی $K-\epsilon$ (RNG) شبیه‌سازی شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد ریزش گردابه‌ها که سبب ایجاد ارتعاشات مخرب و تحمیل ناپایداری در سیلندر می‌شود، با اعمال مکش کافی بر روی سیلندر از بین می‌رود. مکش باعث ایجاد خلاء نسبی در زیر لایه لزوج و حذف نواحی کم مومنوم به طریق انتقال مومنوم از نواحی دورتر از دیواره می‌شود و در نتیجه از جدایش زود هنگام جریان جلوگیری می‌کند. ضریب پسای فشاری کاهش، پسای لزوج افزایش و به طور کلی پسای کل، در حدود ۵۵ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: کنترل جریان، مکش، ناپایایی، ریزش گردابه.

Numerical and Parametric investigation of Suction over a Cylinder for Reduction of Flow Unsteadiness and vortex

A. Shams Taleghani

Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, flow control ability with suction over a circular cylinder has been numerically investigated in order to drag reduction and elimination of unsteadiness and the resultant vibrations. The efficiency of this flow control method is dependent to different parameters. Some of these parameters are dependent to geometry and the rest are dependent to flow characteristics. For this purpose, the geometric parameters of width and position of suction slat and also the suction flow velocity are studied in this investigation. 2D flow physics around the cylinder have been simulated in $Re=3.3 \times 10^4$ with $K-\epsilon$ (RNG) turbulence model. The obtained results show the elimination of Von Karman vortices under sufficient suction. Suction causes vacuum in viscous sublayer and elimination of low momentum regions via momentum transfer from outer layers, and consequently postpone the separation. The results indicate that pressure drag is decreased, skin friction drag is increased and total drag is decreased about 55%.

Keywords: Flow Control, Suction, Unsteadiness, Vortex Shedding.

گسترده‌ای در زمینه کاهش فرآیند ریزش گردابه‌ای و در نتیجه پدیده ارتعاشات القایی گردابه‌ها انجام شده است. در این سال‌ها برخی از روش‌های کنترلی غیرفعال پیشنهاد شده است که در اکثر آن‌ها با تغییر شکل و اصلاح بدنه سعی شده است فرآیند ریزش گردابه‌ای کاهش یابد. به عنوان مثال روشکو پیشنهاد داد به نصب ورق تقسیم‌کننده در پشت سیلندر دایره‌ای شکل که ساختار ریزش گردابه‌ها را از حالت غیرمستقر به متقارن تبدیل می‌کند [۵ و ۴].

اون و بیرمن با اضافه کردن برآمدگی کره‌ای شکل در پشت سیلندر دایره‌ای، بزرگی دامنه ارتعاشات ناشی از ارتعاشات القایی گردابه‌ها را کنترل کردند.

برخی از روش‌های فعال برای کاهش ریزش گردابه (که منجر به ارتعاشات القایی در دیواره مجاور با سیال می‌شود) پیشنهاد شده است. به عنوان مثال وو و همکارانش [۶] استفاده از دیواره‌های متحرک را به منظور کنترل جدایش جریان روی سطح سیلندر پیشنهاد نمودند. ورق متحرک با ایجاد موج معکوس، از گسترش جدایش جلوگیری می‌کند. نتایج شبیه‌سازی عددی آن‌ها نشان داد، این روش کنترلی فعال به جریان ورودی اجازه می‌دهد تا چسبیده به تمام سطح باقی بماند و باعث کاهش گردابه‌ها در جریان دنباله پشت سیلندر می‌شود [۶].

۱- مقدمه

کنترل جریان توسط مکش سال‌ها یکی از موضوعات مورد بررسی محققان بوده است. در حال حاضر اکثر کاربردهای آن مربوط به تصحیح مشخصات آیرودینامیکی مانند ضرایب برا و پسا می‌باشد. کابل‌های تشکیل دهنده پل‌های معلق یکی از اجزای اصلی آن‌ها می‌باشد که در شرایط هوای طوفانی و بارانی به شدت دچار ارتعاش می‌شوند. این ارتعاشات، ارتعاشات القایی گردابه‌ها نامیده می‌شود [۱ و ۲]. نتایج زو و همکارانش [۲ و ۳] بر روی پل هارتمن در تگزاس آمریکا نشان داد که کابل‌های با مقطع دایره‌ای شکل در سرعت‌های پایین باد به صورت خود به خودی ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه روی کابل را کاهش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داده است که ارتعاشات القایی گردابه‌ها در کابل آسیب‌های جبران ناپذیری بر پل ایجاد کرده و حتی باعث خرابی آن می‌شود. بنابراین کاهش این ارتعاشات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این ارتعاشات باعث ایجاد خستگی و آسیب به کابل می‌شود و کاهش آن باعث افزایش طول عمر کابل و در نتیجه پل می‌شود [۳]. چون پدیده ارتعاشات القایی گردابه‌ها بدلیل ناپایداری ناشی از پدیده ریزش گردابه‌های پشت اجسام غیر خط جریان (مانند کابل‌های دایره‌ای شکل) می‌باشد، در سال‌های اخیر مطالعات

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: arash.taleghani@gmail.com

می‌باشد. با توجه به اهمیت موضوع و عدم مطالعه پارامتری در این زمینه، تحقیق حاضر صورت پذیرفت.

۲- روش حل عددی

برای حل عددی از نرم افزار فلونت^۱ به همراه کد کنترل جریان به شکل UDF استفاده شد. معادلات حاکم بر جریان، معادلات ناویراستوکس نیمه بیضوی برای جریان پایا، تراکم ناپذیر و دوبعدی در حالت آشفته می‌باشند. اگر چه حل دقیقتر نیازمند محاسبات بیشتر در معادلات به شرایط ناپایا حاصل می‌شود، اما حل در حالت پایای تناوبی نیز می‌تواند تاثیر کیفی از نحوه کنترل ریزش گردابه را نشان دهد. معادلات پیوستگی و مومنتوم به شرح زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \theta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \theta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

معادلات در فرم جریان آشفته به فرم زیر در می‌آید که در اثر اضافه شدن جمله نوسانات سرعت به معادلات تنشهای رینولدزی در معادلات ظاهر می‌شوند و برای شبیه‌سازی نیاز به استفاده از مدل‌های آشفته می‌باشد.

$$\rho \left[\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = \rho g_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j$$

گسسته سازی همه معادلات از مرتبه دو، رژیم جریان آشفته و از مدل K-ε به عنوان مدل آشفته‌گی استفاده شد. با توجه به مطالعات قبلی انجام شده جریان آشفته و دقت قابل قبول و هزینه محاسباتی کمتر مدل آشفته‌گی K-ε در مقایسه با مدل‌های پیچیده‌تر و همگرایی بهتر در حل عددی و همچنین توانایی مناسب در جریان‌های همراه با جدایش، این مدل آشفته‌گی انتخاب شد. علاوه بر مرتبه گسسته‌سازی، در نرم‌افزار فلونت، حل کننده دو دفته امکان حل دقیقتر را برای حل عددی فراهم می‌کند [۲۱] و در این حل عددی از آن استفاده شده است. همچنین از الگوریتم چگالی مینا با فرمولبندی ضمنی در حل عددی بهره گرفته شده است.

شرایط مرزی استفاده شده در حل جریان حول استوانه در شکل ۱ نشان داده شده است که شامل شرایط مرزی سرعت ورودی، فشار خروجی، شرایط مرزی دیواره و شرط مرزی تناوبی می‌باشند.

مودی و پاتنایک از روش تزریق مومنتوم به منظور کنترل جدایش در اطراف ایرفویل، صفحه تخت، منشور مستطیلی شکل و سیلندر استوانه‌ای استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند تزریق مومنتوم به طور موثر پدیده ارتعاشات القایی گردابه‌ها را کاهش می‌دهد و ناپایداری‌ها را با کنترل جدایش کنترل می‌کند [۸ و ۷].

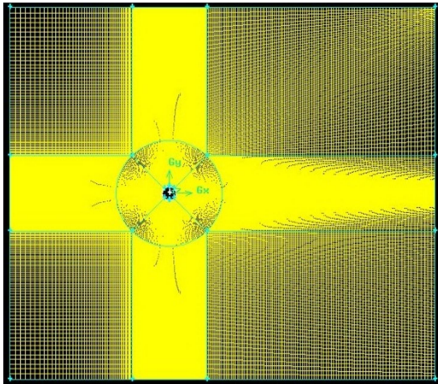
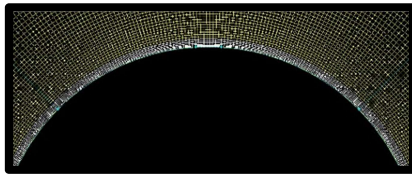
گراگر و همکارانش [۸] نشان دادند که با استفاده از یک ورق کنترلی شکافنده در لبه حمله ایرفویل، حباب ناشی از جدایش و پدیده واماندگی در اعداد رینولدز پایین کاهش می‌یابد. در این سال‌ها جت‌های ترکیبی نیز برای کنترل اثرات جدایش و ریزش گردابه‌ای پیشنهاد شده است [۹-۱۲]. گلزر و آمینای تداخل جت‌های ترکیبی و جریان عرضی را بررسی کرده و نشان دادند که این جت‌ها جدایش را به تعویق انداخته و ضریب پسا را بر روی سطح استوانه‌ای شکل کاهش می‌دهند [۱۳]. فنگ و وانگ نشان دادند که به میزانی که جت‌های هوا به نقطه سکون سطح استوانه نزدیکتر باشند، اثر آن‌ها بیشتر بوده و اثرات جدایش و به تبع آن ریزش گردابه کاهش می‌یابد [۱۴].

روش مکش جریان همچنین برای کاهش جدایش جریان بر روی ایرفویل پیشنهاد شده است [۱۵]. پاتیل و انجی [۱۶] با استفاده از سطح متخلخل همراه با مکش بر روی سطح سیلندر سعی در کاهش اثرات جدایش بر روی سیلندر داشته‌اند. آنها دریافتند که سطح متخلخل همراه با مکش، با القا تعدادی گردابه پایا در پشت سیلندر، به کاهش ضریب پسا، کاهش دامنه ارتعاشات و کاهش نیروهای آیرودینامیکی تحمیل شده کمک می‌کند.

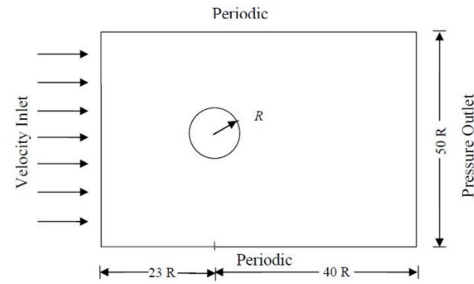
فرانسون و همکارانش [۱۷] به بررسی میدان جریان در اطراف سیلندر متخلخل همراه با مکش در برخی از حفره‌ها پرداختند. مطالعات آنها نشان داد که یک مکش متوسط از سطح، تاثیر زیادی بر میدان جریان در اطراف سیلندر می‌گذارد. همچنین آنها نشان دادند که مکش جریان باعث باریکتر و کوچکتر شدن گردابه‌ها و کاهش ضریب پسا می‌شود. لالیت کومار و دینش کومار [۱۸] روشهای کنترل بر روی یک سیلندر را مرور نموده و تاثیر آن روشهای کنترلی را در اصلاح ساختار جریان دنباله بررسی نمودند.

در سال‌های اخیر چن و همکارانش [۱۹ و ۲۰] با بررسی و مطالعات تجربی به بررسی اثر روش کنترلی مکش با تعداد محدودی حفره در کاهش فرآیند ارتعاشات القایی گردابه‌ها بر روی مدل کابل سیلندری پرداختند. آنها دریافتند حتی با تعداد محدودی حفره مکش جریان، اثرات ارتعاشات القایی گردابه‌ها کاهش محسوسی خواهد داشت. کارهای تجربی چن ویژگی‌ها و پدیده‌های جالبی از فرآیند ارتعاشات القایی گردابه‌ها در شرایط استفاده از کنترل جریان و بدون روش کنترلی آشکار کرد. به هر حال با توجه به اینکه هدف اصلی چن و همکارانش اندازه‌گیری مشخصه‌های پدیده ارتعاشات القایی گردابه‌ها با اندازه‌گیری پاسخ ارتعاشی سیستم جرم-فنر بود، مشخصه‌های میدان جریان اطراف مدل آزمایشی، در حالت کنترل با مکش و بدون مکش به خوبی بررسی نشده است. بدست آوردن اطلاعات کمی میدان جریان حول سیلندر با اعمال مکش، برای توسعه و فهم بهتر کاربرد این روش در کاهش اثرات ارتعاشات القایی گردابه‌ها و مکانیزم عملکردی این روش کنترلی، بسیار موثر خواهد بود. نمونه کاربردی کنترل جریان حاضر بر روی سیلندر مربوط به بخش سیلندری سیستم ارابه فرود و بخش نگهدارنده چرخ یک هواپیما است که در حال پرواز در فاز فرود

¹ Fluent



شکل ۲- دامنه حل و شبکه استفاده شده حول استوانه



شکل ۱- شرایط مرزی به کار رفته برای حل جریان حول استوانه

در فلوننت شرط مرزی ورودی سرعت برای تعریف سرعت جریان با تمام خاصیت‌های اسکالر جریان در ورودی‌های جریان به کار می‌رود. در شرط مرزی فشار خروجی، فشار استاتیک به صورت نسبی در مرز خروجی وارد می‌شود. شرط مرزی تناوبی در جایی به کار می‌رود که شرایط جریان در این مرز به صورت متناوب تکرار شود. در مورد شرایط مرزی دیواره در فلوننت به صورت پیش‌فرض شرایط عدم لغزش دیواره در نظر گرفته می‌شود.

شبکه استفاده شده در کار حاضر شبکه باسازمان است و با ریز شدن شبکه در نزدیکی دیواره و با استفاده از تکنیک بلوک‌بندی ایجاد شده است. با توجه به اینکه در ادامه، روش کنترلی با استفاده از این شبکه بررسی و تحلیل می‌شود و با توجه به اهمیت بالای جریان در نزدیک دیواره، در این شبیه‌سازی از قابلیت تولید شبکه لایه‌مرزی در نزدیک دیواره استفاده می‌شود. شبکه لایه مرزی باعث بهبود نتایج در این بخش می‌شود. در تحقیق حاضر برای حل جریان از شبکه‌ای با تعداد ۹۵۳۹۰ سلول استفاده شده است (شکل ۲). این تعداد سلول نیز با بررسی استقلال حل از شبکه و با بررسی Y^+ متناسب با مدل آشفتگی (کمتر از ۵/۰) انتخاب شده است.

در این بخش، نتایج حاصل از مدلسازی عددی جریان ناپایا حول استوانه ابتدا بدون در نظر گرفتن مکش و سپس با مکش جریان در لایه مرزی ارائه می‌شود. در نهایت با مقایسه نتایج حل عددی با نتایج تجربی، سعی شده است که روشی مناسب با انعطاف‌پذیری بالا برای مدل‌سازی جریان حول استوانه با مکش ارائه گردد.

بررسی جریان حول استوانه با استفاده از دو مدل شناخته شده آشفتگی $K - \omega$ (SST) و $K - \epsilon$ (RNG) مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور اعتبارسنجی نتایج حاضر با نتایج تجربی، در این تحقیق ضرایب فشار و پسا محاسبه شده سیلندر واقع در جریان توسط کار عددی با نتایج تجربی و عددی مقاله [۲۲] مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در جدول ۱ ارائه شده است.

مطابق جدول بالا، انطباق خوبی بین نتایج کار عددی و کار تجربی و نتایج کار عددی مشابه وجود دارد و از مقایسه نتایج عددی با دو مدل آشفتگی مشاهده می‌شود که مدل $K - \epsilon$ (RNG) نتایج دقیق‌تری ارائه می‌نماید.

برای مقایسه نتایج جریان اطراف سیلندر در حالت کنترل با مکش، مشخصات سیلندر و سرعت جریان ورودی مطابق با مقاله تجربی [۲۳] در نظر گرفته شده است. به منظور مقایسه با نمونه تجربی، سرعت مکش ۶ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. جریان حول این استوانه در حالت ناپایا با استفاده از مدل شناخته شده آشفتگی $K - \epsilon$ (RNG) مورد مطالعه قرار گرفته است. مشخصات این حالت در جدول ۲ مشخص شده است.

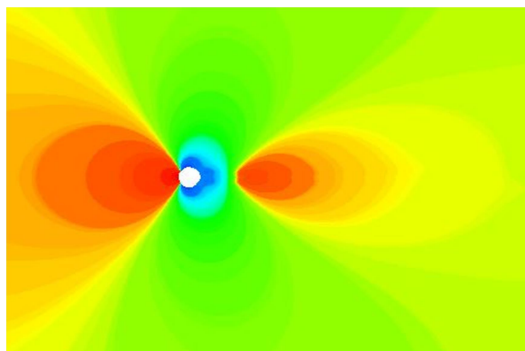
جدول ۲- مشخصات حل و جریان حول سیلندر

مشخصات	مقدار
شعاع استوانه	۲۵ سانتی‌متر
سرعت جریان ورودی	Am/s
سرعت مکش	fm/s
Re	$2/2 \times 10^4$

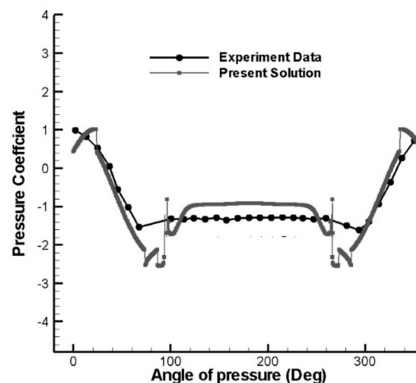
نتایج بدست آمده در این بخش مطابق شکل ۳ انطباق مناسب نتایج تجربی مرجع [۲۳] و حل عددی را برای جریان همراه با مکش نشان می‌دهد. اختلاف توزیع فشار در نواحی میانی با داده‌های تجربی مطابق مطالب گفته شده به دو دلیل می‌باشد؛ یکی به دلیل زودتر پیش‌بینی کردن نقطه جدایش و دیگری ناتوانی مدل‌های آشفتگی در مدل‌سازی گردابه‌های کوچک در این ناحیه می‌باشد. در شکل ۴، خطوط جریان و گردابه‌های تشکیل شده برای دو حالت بدون کنترل و با مکش، در ناحیه دنباله سیلندر نشان داده شده است. با توجه به مقایسه گردابه‌های این دو حالت در شکل ۴، می‌توان مشاهده نمود که در حالت بدون کنترل، گردابه‌ها و خطوط جریان به شکل موج و کاملاً نامتقارن هستند؛ ولی در حالت اعمال مکش، نوسانات دنباله کاهش یافته و خطوط جریان از حالت موج به خطوط صاف تبدیل شده و گردابه‌ها تقارن بیشتری پیدا کرده‌اند.

جدول ۱- نتایج کار عددی حاضر و نتایج تجربی و نتایج عددی مشابه

نمونه حل	مدل $K - \epsilon$ (RNG)		مدل $K - \omega$ (SST)	
	ضریب فشاری C_p	ضریب پسی کل C_D	ضریب فشاری C_p	ضریب پسی کل C_D
نتایج عددی پژوهش حاضر	۰/۸۱	۰/۸۵	۰/۷۸	۰/۸۱
نتایج عددی مشابه [۲۱]	۰/۸۸	۰/۹۹	۰/۸۸	۰/۹۹
نتایج تجربی [۲۱]	-	۰/۹۳	--	۰/۹۳
درصد خطای مقایسه با کار تجربی	-	٪ ۸	-	٪ ۱۲



شکل ۵- کانتور فشار در اطراف سیلندر در حالت بدون مکش (الف) و همراه با مکش (ب)



شکل ۳- توزیع فشار در نمونه همراه با مکش و نمونه تجربی [۲۳]

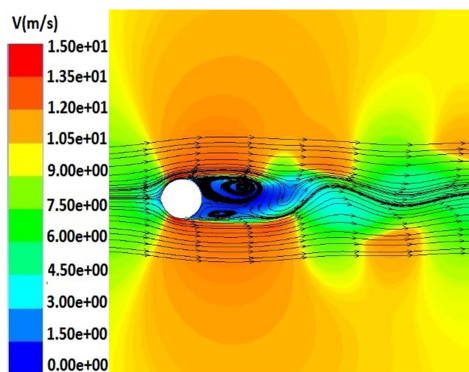
در شکل ۵، کانتورهای فشار در حالت‌های کنترل شده با مکش و بدون کنترل دیده می‌شود. ریزش گردابه که در حالت بدون مکش دیده شده و سبب ایجاد ارتعاشات و نوسانات در سیلندر می‌شود، در حالت سیلندر همراه با مکش از بین رفته است. همچنین فشار دنباله در حالت با اعمال مکش در شکل ۵ افزایش یافته است. در ادامه تغییرات ضریب پسا مطابق جدول جدول ۳ ارائه شده است. نتایج بدست آمده در این بخش نشان می‌دهد، با مکش جریان از سطح، ضریب پسای لزج افزایش می‌یابد. این افزایش پسا با توجه به افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی سطح و مکش لایه‌های با مومنتوم کمتر سطح و جایگزینی لایه‌های با مومنتوم بیشتر و در نتیجه افزایش تنش برشی می‌باشد.

جدول ۳- تغییرات ضریب پسا با استفاده از روش کنترلی

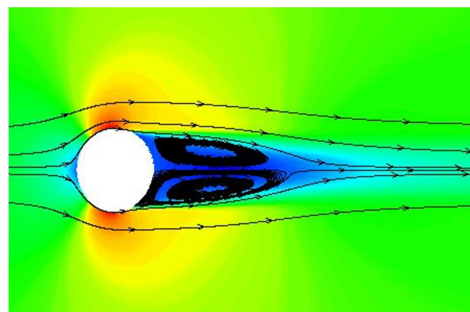
نمونه حل	ضریب پسای لزج	ضریب پسای فشاری	ضریب پسای کل	درصد کاهش پسای کل
سرعت مکش ۸/۰۶ متر بر ثانیه	۰/۰۴۴	۰/۲۴۰	۰/۲۸۵	٪۵۵
بدون مکش	۰/۰۲۸	۰/۶۱۲	۰/۶۴۰	-

جدایش جریان نتیجه شیب نامطلوب فشار در نواحی پشت سیلندر می‌باشد. با جدایش جریان از روی سطح، پسای فشاری به شدت افزایش می‌یابد. از طرف دیگر مکش لایه‌های با مومنتوم ضعیف نزدیک سطح، با اصلاح منحنی سرعت در نزدیکی لایه مرزی، باعث تعویق جدایش می‌شود. در نتیجه با مکش جریان از سطح، جدایش به نواحی پایین‌تر تعویق پیدا کرده و ضریب پسای فشاری کاهش می‌یابد. این کاهش پسای فشاری مطابق شکل، ناشی از کاهش ناحیه کم فشار ناشی از گردابه‌ها در ناحیه پشت سیلندر می‌باشد. در نهایت از جمع این دو پسا، با استفاده از این روش کنترلی، ضریب پسای کل تا حدود ۵۵ درصد کاهش می‌یابد.

اثر بخشی این روش کنترلی به پارامترهای مختلفی وابسته است. برخی از این پارامترها وابسته به هندسه و برخی دیگر وابسته به ویژگی جریان می‌باشد. از جمله این پارامترها می‌توان به محل قرارگیری حفره

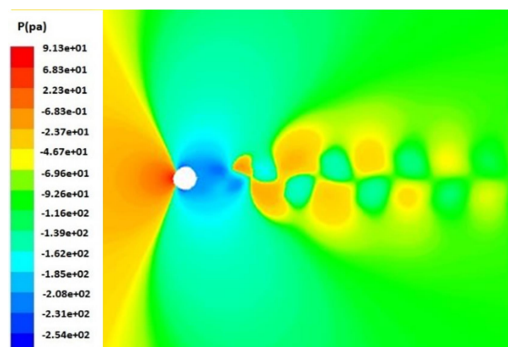


الف



ب

شکل ۴- خطوط جریان در اطراف سیلندر در حالت بدون مکش (الف) و همراه با مکش (ب)

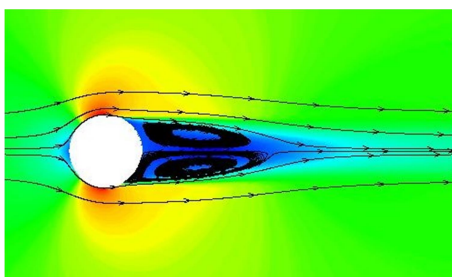


الف

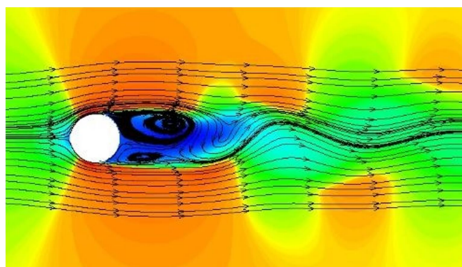
نتایج بدست آمده حاصل از تغییرات ضریب پسا در سرعت‌های مختلف مکش در جدول ۵ نشان می‌دهد با افزایش شدت مکش، ضریب پسای لزج افزایش می‌یابد، این افزایش پسا با توجه به افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی سطح و مکش لایه‌های با مومنوم کمتر سطح و جایگزینی لایه‌های با مومنوم بیشتر می‌باشد.

جدایش جریان نتیجه شیب نامطلوب فشار در نواحی پشت سیلندر می‌باشد. با جدایش جریان از روی سطح پسای فشاری به شدت افزایش می‌یابد. از طرف دیگر مکش لایه‌های با مومنوم ضعیف نزدیک سطح، با اصلاح منحنی سرعت در نزدیکی لایه مرزی باعث تعویق جدایش می‌شود. در نتیجه با مکش بیشتر جریان از سطح، جدایش به نواحی پایین‌تر تعویق پیدا کرده و ضریب پسای فشاری بیشتر کاهش می‌یابد. این کاهش پسای فشاری، ناشی از کاهش ناحیه کم فشار ناشی از گردابه‌ها در ناحیه پشت سیلندر می‌باشد که در شکل ۵ نیز مشاهده شد. در نهایت از جمع این دو پسا، با استفاده از این روش کنترلی ضریب پسای کل تا حدود ۸۷ درصد کاهش می‌یابد.

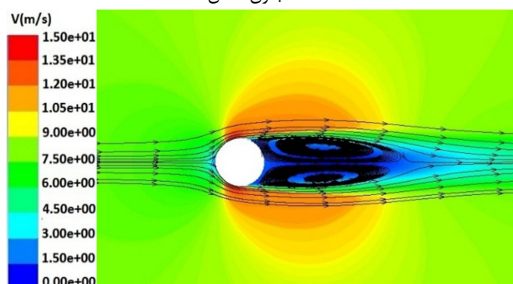
کانتور سرعت و خطوط جریان برای سرعت‌های مکش مختلف مطابق شکل ۷ می‌باشد. مکش سبب شده است تا خطوط جریان از حالت موج در حالت بدون مکش خارج شود و به صورت هموارتری درآیند. افزایش سرعت مکش نقش زیادی در کاهش ناپایایی دنباله و اندازه گردابه‌های دنباله و افزایش فشار دنباله دارد.



سرعت مکش = ۸/۰۶ متر بر ثانیه



بدون مکش



سرعت مکش = ۴/۳۵ متر بر ثانیه

مکش، عرض حفره مکش و شدت مکش اشاره کرد. در این بخش، با بررسی این پارامترها، حالت‌های بهینه برای کنترل جریان و میزان تاثیر این نوع روش کنترل بررسی می‌شود.

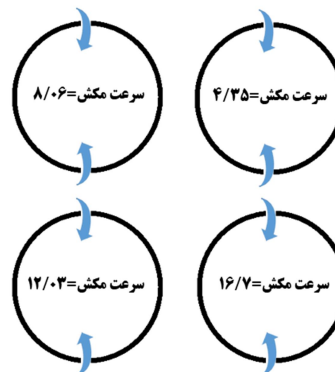
۳- مطالعه پارامتری سرعت مکش

به منظور مطالعه پارامتری سرعت مکش، پارامترهای حل با توجه به ۴ نمونه حل عددی انجام شده، مطابق جدول ۴ می‌باشد. در این بخش با ثابت در نظر گرفتن عرض حفره و محل حفره، تاثیر تغییر سرعت و فشار مکش بر کارایی روش کنترلی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۴- پارامترهای هندسی در مطالعه پارامتری سرعت مکش

نمونه حل	فشار مکش (پاسکال)	سرعت مکش (متر بر ثانیه)	عرض حفره (میلیمتر)	محل حفره (درجه)
۱	۵۰	۴/۳۵	۳	۹۰
۲	۱۰۰	۸/۰۶	۳	۹۰
۳	۱۵۰	۱۲/۰۳	۳	۹۰
۴	۲۰۰	۱۶/۷	۳	۹۰
۵	بدون مکش			

در شکل ۶، محل قرارگیری حفره مکش و سرعت مکش هر حفره نشان داده شده است. نتایج تغییرات ضریب پسا در این حالت مطابق جدول ۵ می‌باشد



شکل ۶- نمونه‌های مورد بررسی در مطالعه پارامتری سرعت مکش (بر حسب m/s)

جدول ۵- تغییرات ضریب پسا در مطالعه پارامتری سرعت مکش

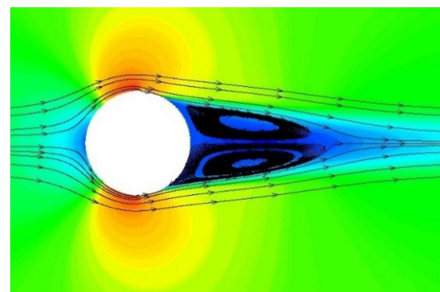
نمونه حل	سرعت مکش (متر بر ثانیه)	ضریب پسای لزج	ضریب پسای فشاری	ضریب پسای کل	درصد کاهش پسای کل
۱	۴/۳۵	۰/۰۲۹	۰/۴۶۶	۰/۴۹۵	٪۲۹
۲	۸/۰۶	۰/۰۴۴	۰/۲۴۰	۰/۲۸۵	٪۵۵
۳	۱۲/۰۳	۰/۰۵	۰/۲۲۰	۰/۱۲۰	٪۸۱
۴	۱۶/۷	۰/۰۵۶	۰/۲۱۰	۰/۰۷۷	٪۸۷
۵	بدون مکش	۰/۰۲۸	۰/۶۱۲	۰/۶۴۰	-

نتایج تغییرات ضریب پسا در این حالت برای عرض حفره‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عرض مکش، ضرایب پسا افزایش می‌یابد. این افزایش در عرض مکش ۶ میلی‌متر، حتی باعث افزایش ضریب پسا نسبت به نمونه بدون مکش می‌شود و عملاً اثربخشی این روش کنترلی را زیر سوال می‌برد. در عرض مکش ۱/۵ میلی‌متر، کاهش ۹۷ درصدی ضریب پسا، با وجود اینکه ظاهراً اثر خوبی داشته است اما با توجه به کانتورهای فشار در این عرض مکش، ریزش گردابه‌ها به طور کامل از بین نرفته است و همانطور که در شکل ۹ دیده می‌شود، ناحیه گردابه‌ای شکل کم فشار در پشت سیلندر همچنان باقی مانده است. بنابراین در این حل پارامتری بهترین حالت در عرض مکش ۳ میلی‌متر است که تا حدود ۵۵ درصد پسا را کاهش داده و در کنار آن ریزش گردابه‌ها نیز به طور کامل از بین رفته است. در مورد ضریب پسای لزوج، با افزایش عرض و سطح مکش روی سیلندر، ضریب پسای لزوج افزایش می‌یابد.

جدول ۷- تغییرات ضریب پسا در مطالعه پارامتری عرض مکش

درصد کاهش پسای کل	ضریب پسای کل	ضریب پسای فشاری	ضریب پسای لزوج	عرض مکش (میلی متر)	نمونه حل
۹۷٪	۰/۰۱۶	۰/۰۱۴۵	۰/۰۰۲۴	۱/۵	۱
۵۵٪	۰/۲۸۵	۰/۲۴۰	۰/۰۴۴	۳	۲
۱۳۸٪-	۱/۰۴۲	۰/۹۱۸	۰/۱۲۳	۶	۳
-	۰/۶۴۰	۰/۶۱۲	۰/۰۲۸	بدون مکش	۴

به دلیل وجود نقطه سکون در ناحیه جلوی سیلندر، ناحیه پرفشاری در جلوی سیلندر (در شکل ۹ با رنگ قرمز مشخص است) ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه پسای فشاری از اختلاف فشار در دو طرف سیلندر ایجاد می‌شود، بنابراین پسای فشاری با افزایش فشار در ناحیه پشت سیلندر کاهش می‌یابد. در حالت عرض مکش ۱/۵mm با کاهش ناحیه کم فشار در ناحیه پشت سیلندر (در شکل ۹ شکل با رنگ آبی پررنگ مشخص است) نسبت به عرضهای دیگر مکش، پسای فشاری بیشتر کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل ۹، ریزش گردابه‌های فون کارمن (که باعث اثرات نامطلوبی چون تحمیل ناپایداری به سیستم می‌باشد) نیز با این روش کنترلی از بین می‌رود.



سرعت مکش = ۱۶/۷ متر بر ثانیه

شکل ۷- خطوط جریان و کانتور سرعت (مطالعه پارامتری شدت مکش)

با توجه به شکل ۷، ریزش گردابه‌ها (که باعث اثرات نامطلوبی چون تحمیل ناپایداری به سیستم می‌باشد) با افزایش شدت مکش از بین رفته و ناحیه جدایش کوچکتر می‌شود و به ناحیه پشت سیلندر می‌چسبد. این کوچکتر شدن ناحیه ناپایدار جدایش، باعث کاهش ضریب پسا می‌شود که در نتایج نشان داده شد.

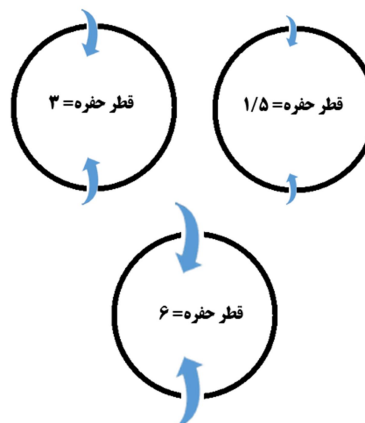
۴- مطالعه پارامتری عرض حفره مکش

به منظور مطالعه پارامتری عرض حفره مکش، تغییر پارامترهای حل با توجه به ۳ نمونه حل عددی مطابق با جدول ۶ انجام شد.

جدول ۶- مطالعه پارامتری عرض حفره

محل حفره (درجه)	عرض حفره (میلی‌متر)	سرعت مکش (متر بر ثانیه)	فشار مکش (پاسکال)	نمونه حل
۹۰	۱/۵	۸/۰۶	۱۰۰	۱
۹۰	۳	۸/۰۶	۱۰۰	۲
۹۰	۶	۸/۰۶	۱۰۰	۳
-	بدون مکش	-	-	۴

در شکل ۸ محل قرارگیری حفره مکش و عرض هر حفره نشان داده شده است.



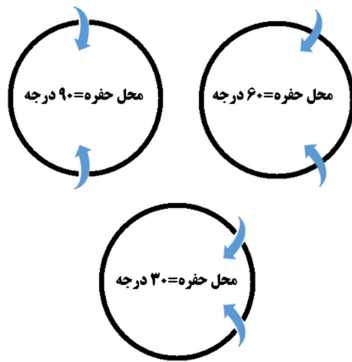
شکل ۸- نمونه های مورد بررسی در مطالعه پارامتری عرض حفره مکش

۵- مطالعه پارامتری موقعیت حفره مکش

به منظور مطالعه پارامتری موقعیت حفره مکش، تاثیر ۳ موقعیت قرارگیری حفره مطابق با مشخصات ذکر شده در جدول ۸ جدول مورد مطالعه عددی قرار گرفت. در شکل ۱۰ محل قرارگیری حفره مکش با توجه به جهت جریان آزاد از چپ به راست، نشان داده شده است.

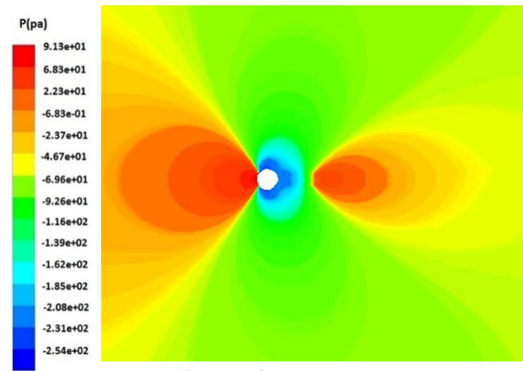
جدول ۸- پارامترهای هندسی در مطالعه پارامتری محل حفره

محل حفره (درجه)	عرض حفره (میلیمتر)	سرعت مکش (متر بر ثانیه)	فشار مکش (پاسکال)	نمونه حل
۳۰	۳	۸/۰۶	۱۰۰	۱
۶۰	۳	۸/۰۶	۱۰۰	۲
۹۰	۳	۸/۰۶	۱۰۰	۳
بدون مکش				

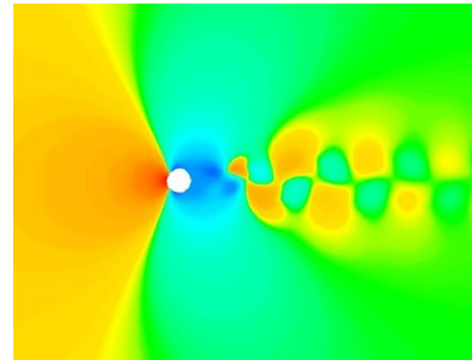


شکل ۱۰- نمونه های مورد بررسی در مطالعه پارامتری محل حفره مکش

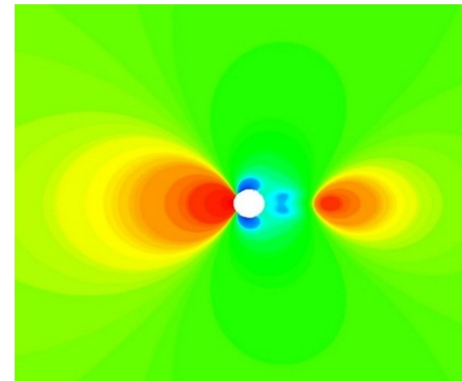
نتایج تغییرات ضریب پسا در این حالت مطابق جدول ۹ می باشد. نتایج بدست آمده در این بخش نشان می دهد، با تغییر محل مکش از زاویه ۹۰ درجه تا زوایای ۳۰ درجه، با توجه به اینکه شروع ریزش گردابه ها از نواحی پایین تر است، این دنباله ها و به طبع اثرات ناپایداری ناشی از آن به شدت کاهش می یابد. از طرف دیگر با توجه به اینکه جدایش شدید در نواحی پایین و حوالی زوایای ۳۰ درجه اتفاق افتاده و منجر به افزایش شدید ضریب فشار می شود، مکش جریان در حوالی این زاویه، اثرات جدایش را بیشتر کاهش داده و ضریب پسای فشاری را به شدت کاهش می دهد. بنابراین در بررسی نتایج شبیه سازی جریان اطراف استوانه در شرایط موقعیتهای مکش مختلف، بهترین حالت کنترل جریان در زاویه ۳۰ درجه اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است در زوایای کمتر از ۳۰ درجه و بیشتر از ۹۰ درجه با توجه به اینکه این زوایا در خارج از محدوده شروع ریزش گردابه ها و ناحیه شروع جدایش جریان قرار دارند، هیچگونه اثر مثبتی مشاهده نشد.



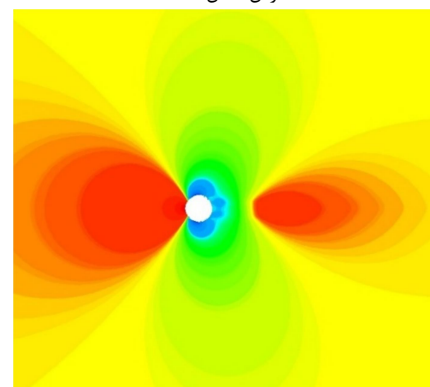
عرض مکش = ۳mm



بدون مکش



عرض مکش = ۱/۵mm

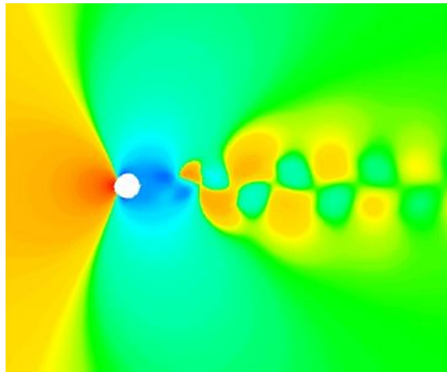


عرض مکش = ۶mm

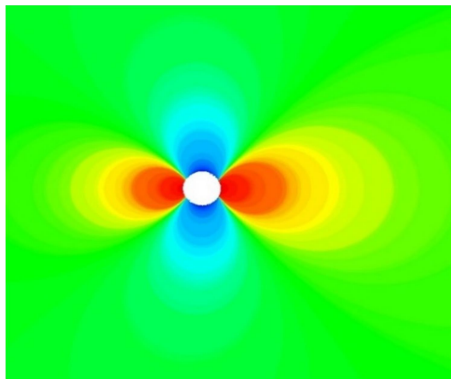
شکل ۹- کانتور فشار (مطالعه پارامتری عرض مکش)

جدول ۹- تغییرات ضریب پسا در مطالعه پارامتری محل حفره

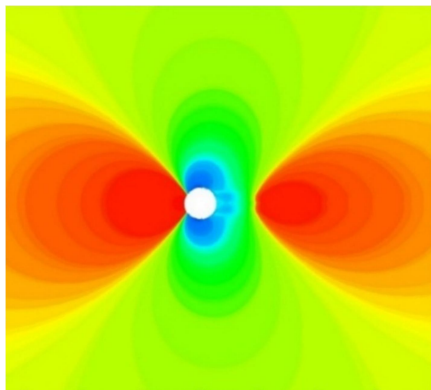
درصد کاهش پسای کل	ضریب پسای کل	ضریب پسای فشاری	ضریب پسای لزج	محل حفره (درجه)	نمونه حل
۷۸٪	۰/۱۳۷	۰/۱۰۰	۰/۰۰۳۷	۳۰	۱
۶۵٪	۰/۲۲۰	۰/۲۰۴	۰/۰۱۶	۶۰	۲
۵۵٪	۰/۲۸۵	۰/۲۴۰	۰/۰۴۴	۹۰	۳
-	۰/۶۴۰	۰/۶۱۲	۰/۰۲۸	بدون مکش	۴



بدون مکش

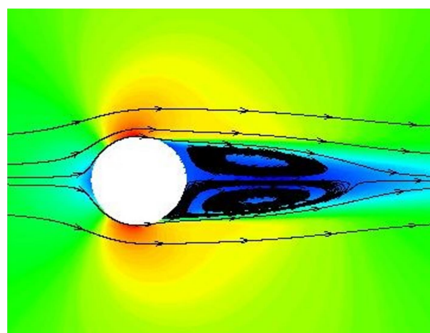


محل مکش = زاویه ۳۰ درجه



محل مکش = زاویه ۶۰ درجه

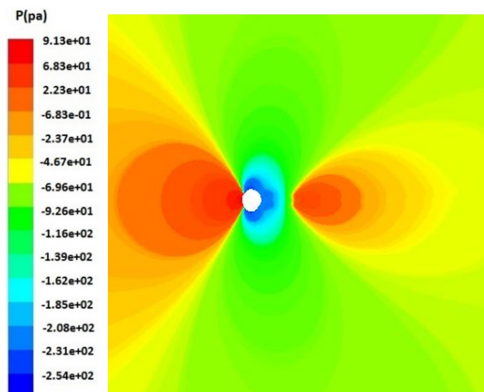
شکل ۱۱- کانتور فشار (مطالعه پارامتری محل مکش)



محل مکش = زاویه ۹۰ درجه

جدایش جریان نتیجه شیب نامطلوب فشار در نواحی پشت سیلندر می‌باشد. با جدایش جریان از روی سطح، پسای فشاری به شدت افزایش می‌یابد. از طرف دیگر مکش لایه‌های با مومنتوم ضعیف نزدیک سطح، با اصلاح منحنی سرعت در نزدیکی لایه مرزی باعث تعویق جدایش می‌شود. در نتیجه با مکش بیشتر جریان از سطح، جدایش به نواحی پایین‌تر تعویق پیدا کرده و ضریب پسای فشاری بیشتر کاهش می‌یابد. این کاهش پسای فشاری مطابق شکل ۱۱، ناشی از کاهش ناحیه کم فشار ناشی از گردابه‌ها در ناحیه پشت سیلندر می‌باشد.

تاثیر محل‌های مختلف مکش بر کانتور سرعت و خطوط جریان، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، در حالت مکش خطوط جریان که حالت شکل یک موج است و عامل ایجاد ناحیه نوسانی در دنباله است، از بین رفته و همچنین ناحیه دنباله و حباب آن در زوایای مکش ۹۰ و ۶۰ درجه کوچکتر شده و در زاویه مکش ۳۰ درجه حباب دنباله تقریباً از بین رفته است.



محل مکش = زاویه ۹۰ درجه

لایه‌های با مومنوم ضعیف نزدیک سطح، با اصلاح منحنی سرعت در نزدیکی لایه مرزی باعث تعویق جدایش می‌شود. در نتیجه با مکش جریان از سطح، جدایش به نواحی پایین‌تر تعویق پیدا کرده و ضریب پسای فشاری کاهش می‌یابد.

بررسی‌ها در این کار پژوهشی نشان داد، اثر بخشی این روش کنترلی به پارامترهای مختلفی وابسته است. برخی از این پارامترها وابسته به هندسه و برخی دیگر وابسته به ویژگی جریان می‌باشند. در بخش مطالعه پارامتری این کار پژوهشی با بررسی این پارامترها حالت‌های بهینه برای کنترل جریان و میزان تاثیر این نوع روش کنترل بررسی شد. از جمله این پارامترها می‌توان به محل قرارگیری حفره مکش، عرض حفره مکش و شدت مکش اشاره کرد. با ثابت قراردادن تمام متغیرهای کنترلی، تاثیر سرعت مکش در چهار سرعت ۴/۳۵، ۸/۰۶، ۱۲/۰۳ و ۱۶/۷ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی کاهش پسا و اثرات ناپایایی ناشی از ریزش گردابه‌ها، بهینه‌ترین حالت سرعت مکش ۱۶/۷ متر بر ثانیه می‌باشد که با کاهش پسای ۸۷ درصد همراه است.

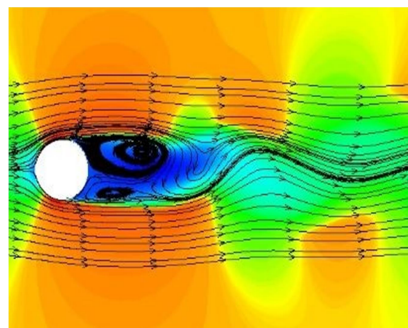
در بخش مطالعه پارامتری موقعیت عرض حفره مکش، با ثابت قراردادن تمام متغیرهای کنترلی، کنترل جریان توسط سه حفره با عرض‌های ۱/۵، ۳ و ۶ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش بهینه‌ترین حالت با بررسی کاهش پسا و اثرات ناپایایی ناشی از ریزش گردابه‌ها، حالت عرض ۳ میلی‌متر با کاهش پسای ۵۵ درصد بود.

در بخش مطالعه پارامتری موقعیت حفره مکش، با ثابت قراردادن تمام متغیرهای کنترلی، سه محل با زاویه ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش بهینه‌ترین حالت با بررسی کاهش پسا و اثرات ناپایایی ناشی از ریزش گردابه‌ها، حالت زاویه مکش ۳۰ درجه با کاهش پسای ۷۸ درصد بود.

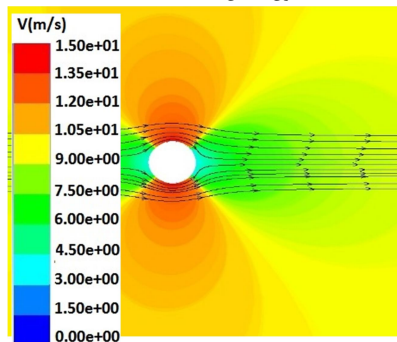
در نهایت لازم به ذکر است، اصل جمع آثار با توجه به غیرخطی بودن معادلات جریان سیال، حاکم نبوده و نمی‌توان با قاطعیت گفت که با ترکیب این پارامترهای بهینه، بهینه‌ترین حالت در این روش کنترلی بدست می‌آید، بنابراین با بررسی کاربرد مورد نظر از این روش کنترلی، می‌توان در مطالعات آتی بهینه‌سازی چند متغیره را برای کاهش ناپایایی مورد مطالعه قرار داد.

۷- مراجع

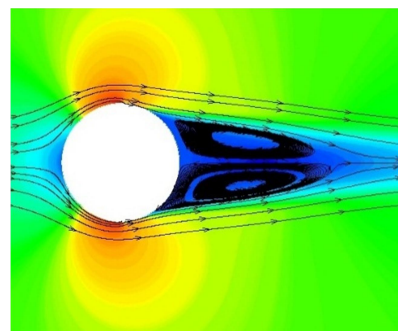
- [1] Main J. A., and Jones N. P., Full-scale measurements of stay cable vibration. In *10th International conference on wind engineering* (10ICWE), pp. 963-970, Copenhagen, Denmark, 1999 .
- [2] Zuo D., and Jones N. P., Interpretation of field observations of wind and rain-wind-induced stay cable vibrations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 98, No.2, pp. 73-87, 2010.
- [3] Zuo D., Jones N. P., and Main J. A., Field observation of vortex- and rain-wind-induced stay-cable vibrations in a three-dimensional environment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No.6-7, pp. 1124-1133, 2008 .
- [4] Roshko A., On the wake and drag of bluff bodies, *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 22, No.2, pp. 124-132, 1955.
- [5] Roshko A., Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 10, No.3, pp. 345-356, 1961 .
- [6] Wu C. J., Wang L., and Wu J. Z., Suppression of the von Karman vortex street behind a circular cylinder by a traveling



بدون مکش



محل مکش = زاویه ۳۰ درجه



محل مکش = زاویه ۶۰ درجه

شکل ۱۲- خطوط جریان (مطالعه پارامتری محل مکش)

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر مکش جریان بر روی یک سیلندر استوانه‌ای در جریان مادون صوت بررسی شد و پس از مقایسه با حالت بدون مکش، نتایج زیر حاصل شد.

در بررسی جریان ناپایا حول سیلندر با در نظر گرفتن مکش، نتایج بدست آمده انطباق مناسب نتایج تجربی و حل عددی را برای جریان همراه با مکش نشان داد و مشاهده کانتورها نشان داد ریزش گردابه‌ها که سبب ایجاد ارتعاشات مخرب و تحمیل ناپایداری در سیلندر می‌شود، با اعمال مکش از بین رفته است. در این حالت همچنین ضریب پسای فشاری کاهش، پسای لزج افزایش و به طور کلی پسای کل، در حدود ۵۵ درصد کاهش یافت. با مکش جریان از سطح، ضریب پسای لزج افزایش می‌یابد. این افزایش پسا با توجه به افزایش گردایان سرعت در نزدیکی سطح و مکش لایه‌های با مومنوم کمتر سطح و جایگزینی لایه‌های با مومنوم بیشتر می‌باشد. با جدایش جریان از روی سطح، پسای فشاری به شدت افزایش می‌یابد. از طرف دیگر مکش

- wave generated by a flexible surface. *Journal of Fluid Mech.*, Vol. 574, pp. 365–391, 2007.
- [7] Patnaik B. S., and Wei G. W., Controlling wake turbulence. *Phys Rev Lett*, Vol. 88, No.5, pp. 35–40, 2002 .
- [8] Grager T., Rothmayer A., and Hu H., Stall suppression of a low- Reynolds-number airfoil with a dynamic burst control plate. In *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, AIAA 2011–1180, Orlando, Florida, USA, 2011.
- [9] Ma L., and Feng L., Experimental investigation on control of vortex shedding mode of a circular cylinder using synthetic jets placed at stagnation points. *Science China Technological Sciences*, Vol. 56, No.1, pp. 158–170, 2013.
- [10] Cuia W., Zhua H., Xiaa C., and Yang Z., Comparison of steady blowing and synthetic jets for aerodynamic drag reduction of a simplified vehicle. *Procedia Engineering*, Vol. 126, pp. 388–392, 2015
- [11] DeMauro E. P., Leong C. M., and Amitay M., Interaction of a synthetic jet with the flow over a low aspect ratio cylinder. *Physics of Fluids*, Vol. 25, No.6, 2013.
- [12] FENG L., and WANG J. J., Circular cylinder vortex-synchronization control with a synthetic jet positioned at the rear stagnation point. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 662, pp. 232–259, 2010.
- [13] Glezer A., and Amitay M., Synthetic jets. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 34, pp. 503–529, 2002 .
- [14] Feng L. H., Wang J. J., and Pan C., Proper orthogonal decomposition analysis of vortex dynamics of a circular cylinder under synthetic jet control. *Physics of Fluids*, Vol. 23, No.1, 014106, 2011 .
- [15] Qin N., Zhu Y., and Poll D. I. A., Surface suction on aerofoil aerodynamic characteristics at transonic speeds. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 212, No.5, pp. 339–351, 1998 .
- [16] Patil S. K. R., and Ng T. T., Control of separation using spanwise periodic porosity. *AIAA J.*, Vol. 48, No.1, pp. 174–187, 2010 .
- [17] Fransson J. H. M., Konieczny P., and Alfredsson P. H., Flow around a porous cylinder subject to continuous suction or blowing. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 19, No.8, pp. 1031–1048, 2004.
- [18] Lalith Kumar D., and Dineshkumar L., Control techniques in flow past a cylinder. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 377, 2018.
- [19] Chen W. L., Tang S. R.; Li H., ASCE M.; and Hu H., Influence of dynamic properties and position of rivulet on rain-wind-induced vibration of stay cables. *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 18, No.10, 2013.
- [20] Chen W. L., Xin D. B., Xu F., Li H., Ou J. P., and Hu H., Suppression of vortex-induced vibration of a circular cylinder using suction based flow control. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 42, No.10, pp. 25–39, 2013.
- [۲۱] کاظمی لاری م.ع.، خواجه پور س.، کیانی ف.، و اکبری م.، مدل سازی و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی به کمک نرم افزار Ansys. تهران، نشر عابد، ۱۳۹۰.
- [22] Rahman M., Karim M., and Alim A., Numerical Investigation of Unsteady flow Past the circular cylinder using 2D finite Volume Method. *Journal of Naval Architecture and Marine engineering*, Vol. 4, No.1, pp. 27–42, 2007.
- [23] Chen W. L., Li H., and Hu H., An experimental study on a suction flow control method to reduce the unsteadiness of the wind loads acting on a circular cylinder. *Experiments in Fluids*, Vol. 55, No.4, 1707, 2014.