

بررسی نیروی پسای نیم‌مخروط ناقص توخالی با و بدون پوشش زبری

وحید قاسم‌پور پبله‌رود* (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

منوچهر راد (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف
دوری ۲۸-۳، شماره ۱، ص. ۹۵-۱۰۰ (پادداشت نفتی)

تاکنون اندازه‌گیری تجربی نیروهای آئرو دینامیکی و حل عددی جریان اطراف اجسام برای مدل‌های مختلفی انجام گرفته است، که آزمایشات تجربی در تونل‌های باد و آب صورت می‌گیرند. اندازه‌گیری نیروی پسای و ضریب پسای برای نیم‌مخروط ناقص توخالی نیز می‌تواند برای بسیاری از کاربردها از جمله کشتی‌ها، شناورها و پرتابه‌های خاص دارای نیروی برد، مورد استفاده قرار گیرد. در این نوشتار نیروی پسای نیم‌مخروط ناقص توخالی در دو حالت مختلف ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ و دهانه‌ی کوچک در تونل باد مدار باز مکنده مورد بررسی قرار گرفته است و اثرات جهت ورود جریان روی نیروی پسای و ضریب پسای بررسی شده است. اثر زبری نیز روی سطح نیم‌مخروط آزمایش و نتایج آن با مدل بدون پوشش یا صاف مقایسه شده است و در نهایت نتایج به دست آمده‌ی جدار صاف با حل عددی مقایسه شده و مشخص شده است که در چه حالت‌هایی نیروی پسای و ضریب پسای کم‌تری به مدل وارد می‌شود.

واژگان کلیدی: نیم‌مخروط ناقص توخالی، نیروی پسای، ضریب پسای، دهانه‌ی بزرگ، دهانه‌ی کوچک.

v_ghasempour@yahoo.com
rad@mechanic.sharif.ir

مقدمه

کرد. [۲] بیشتر کارهای صورت گرفته در تحلیل جریان به صورت تجربی و عددی در اطراف استوانه‌هایی با مقاطع دایره‌ای و مستطیلی توپر، کره و ایرفویل است. [۳] مطالعات نسبتاً کم‌تری در هندسه‌های نیم‌مخروطی توخالی صورت گرفته است. بعضی از کارهای انجام شده در هندسه‌های مخروطی یا هندسه‌هایی که دارای تغییر سطح مقطع در جهت جریان هستند در زمینه‌ی قایق‌ها و کشتی‌هاست. [۴] همچنین جریان اطراف یک جسم منشوری و یک استوانه‌ی دوزنقه‌ی بررسی شده‌اند که این دو جسم همانند نیم‌مخروط ناقص توخالی در جهت جریان دارای تغییر سطح مقطع‌اند. [۵] علت استفاده از مدل نیم‌مخروط برخورداری این مدل از نیروی لیفت است که در بسیاری از قایق‌های تندرو و کاتاماران و غیره کاربرد دارد؛ مدل مخروط کامل فاقد این ویژگی است.

نیروی پسای وارد بر مدل

بیشترین پسای وارد به نیم‌مخروط ناقص توخالی^۳ پسای اصطکاکی^۴ و فشاری^۵ است. نتیجه‌ی کاهش سرعت جریان در لایه‌ی مرزی ایجاد نیروی پسای اصطکاکی در اثر تنش برشی است. میزان پسای اصطکاکی به شکل و ضخامت لایه‌ی مرزی بستگی دارد. [۶] پسای اصطکاکی شدیداً تابع گرانروی (ویسکوزیته) است و با افزایش گرانروی افزایش می‌یابد. از آنجا که عدد رینولدز با عکس گرانروی

امروزه مصرف سوخت یکی از مسائل و چالش‌های مطرح در کشورهای مختلف است. در کشور ما نیز با توجه به میزان بالای مصرف سوخت، اتخاذ روش‌ها و راهکارهایی برای کاهش مصرف انرژی اجتناب‌ناپذیر است. یکی از روش‌های کاهش مصرف سوخت کاهش نیروی پسای^۱ وارده است. همچنین این امر می‌تواند منجر به افزایش سرعت وسیله‌های نقلیه شود که این افزایش سرعت می‌تواند در کاربردهای نظامی و دفاعی مفید واقع شود. با کاهش نیروی پسای ممکن است هزینه‌های اولیه‌ی ساخت نیز کاهش یابد، زیرا در این صورت معمولاً سیستم‌های رانش کوچک‌تر و ارزان‌تری مورد نیاز خواهد بود. بر اثر کاهش نیروی پسای، مصرف انرژی نیز کاهش می‌یابد که در درازمدت از لحاظ کاهش آلودگی و اقتصادی مقرون به صرفه است. در اوایل قرن نوزدهم زبری^۲ نیز به‌عنوان پارامتر مهمی در جریان سیال مورد توجه قرار گرفت و آزمایشاتی روی لوله‌ها با زبری مختلف انجام شد.

اولین کارهای انجام گرفته برای تأثیر زبری در لوله‌ها توسط نیکورازی صورت گرفت. بعدها کالبروک آزمایشات را تکمیل کرد و در نهایت مودی نتایج به دست آمده برای لوله‌های تجاری را در نموداری برحسب ضریب اصطکاک و زبری نسبی و عدد رینولدز رسم کرد. [۷]

زاسو در مطالعاتش یک جسم نیم‌مخروط توپر را با و بدون پوشش زبری در تونل باد در رینولدزهای مختلف، که در آن جهت ورود جریان متفاوت است، آزمایش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۶/۶، اصلاحیه ۱۳۹۰/۲/۱۱، پذیرش ۱۳۹۰/۳/۲۲

سیال متناسب است، در رینولدزهای بالا خصوصاً برای اجسام با لبه‌ی ضخیم، سهم پسیال اصطکاکی از پسیال کل کم‌تر می‌شود. پسیال اصطکاکی تابع مساحت سطح نیز است و بنابراین سطوح با مساحت بیشتر از پسیال اصطکاکی بزرگ‌تری برخوردارند.^[۱۰]

نیروی پسیال فشاری با سطح روبه‌روی جریان جسم و اختلاف فشار جلو و عقب جسم متناسب است. پسیال فشاری معمولاً برای اجسام با لبه‌ی ضخیم بیشترین سهم را از پسیال کل دارد و برای اجسام خط جریانی مانند آئروفویل معمولاً مقدار کمی است و برای صفحات تخت نازک صفر است. پسیال فشاری زمانی که سرعت سیال به قدری بالا باشد که سیال نتواند انحناء جسم را دنبال کند و از جسم جدا شود و ناحیه‌ی بسیار کم‌فشار ایجاد کند، بیشترین اهمیت را می‌یابد.^[۱۰]

تحلیل ابعادی

می‌دانیم نیروی پسیال اندازه‌گیری شده در مورد دو جسمی که از نظر هندسی با هم متشابه‌اند، تنها در صورتی به یکدیگر مربوط می‌شود که بین مدل و جسم اصلی تشابه دینامیکی وجود داشته باشد. تشابه دینامیکی به این معناست که در نقاط نظیر، نسبت تمام نیروهای موجود در مسئله با یکدیگر برابر باشند. در مورد سیالات نیوتنی غیرقابل تراکم، با توجه به اهمیت نیروی اینرسی و لزجت، عدد رینولدز به عنوان تنها عدد بی‌بعد حاکم بر جریان (البته به شرطی که جریان عاری از خلاءسازی باشد) مطرح می‌شود. در چنین مواردی شرط برقراری تشابه دینامیکی این است که عدد رینولدز مدل برابر با عدد رینولدز جسم اصلی قرار داده شود. در این صورت می‌توان قبول کرد که ضریب پسیال C_D مدل و جسم اصلی برابرند:

$$(Re)_m = (Re)_p \rightarrow (C_D)_m = (C_D)_p \quad (1)$$

در این رابطه، اندیس m مربوط به مدل و اندیس p مربوط به جسم اصلی است.^[۱۱] یادآور می‌شود این نتایج مهم که از اصل تشابه براساس عدد رینولدز به دست آمده‌اند، تنها در حالتی معتبرند که از نیروی جاذبه و کشسانی (در سیالات تراکم‌پذیر) صرف نظر کرده باشیم. در غیر این صورت، اعداد بی‌بعد دیگری نیز در روابط وارد می‌شوند. مثلاً، در سیالات دارای سطح آزاد اگر بخواهیم نیروی جاذبه را نیز به حساب آوریم، عدد بی‌بعد فرود ظاهر خواهد شد. بنابراین عدد فرود در این آزمایش مطرح نیست زیرا نیروی جاذبه را در نظر نمی‌گیریم. عدد فرود مطابق رابطه‌ی ۲ تعیین می‌شود:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (2)$$

که در آن Fr عدد فرود، U سرعت جریان آزاد و L نیز طول است. در سیالات دارای سرعت بالا نیز، اگر به علت تراکم‌پذیری سیال نیروهای کشسان اضافی را در نظر بگیریم، عدد ماخ ظاهر خواهد شد. عدد ماخ در سرعت‌های بالاتر از 100 m/s مطرح است و برابر خواهد بود با:

$$M = \frac{U}{c} \quad (3)$$

که در آن M عدد ماخ و c سرعت صوت در سیال است. در آب -- حتی در سرعت‌های کم‌تر از 400 m/s -- عدد ماخ کم‌تر از 0.3 است، اما ممکن است به علت کاهش فشار حتی در سرعت‌های بیش‌تر از 13 m/s نیز نتوان جریان را تراکم‌ناپذیر فرض کرد.^[۱۲]

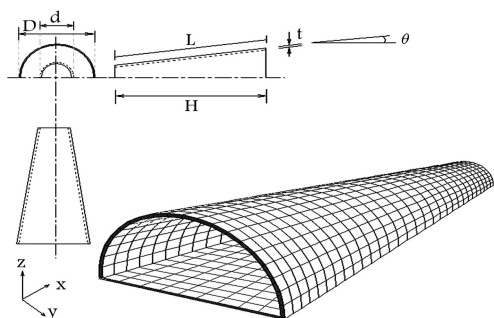
مشخصات مدل و شرح آزمایش‌ها

در شکل ۱ و جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده برای ساخت نیم‌مخروط ناقص توخالی آورده شده است. قطعه‌ی ساخته‌شده از ورق نازک برنجی است که با استفاده از عملیات خم‌کاری و پرسکاری ساخته شده، و شیب ۵ درجه در آن رعایت شده تا باعث جدایی جریان نشود. همچنین برای دقت بالای مدل‌های ساخته‌شده ورق مورد نظر با برش CNC تهیه شده و برای پرسکاری نیز قالب مورد نظر ساخته شده است. پس از ساخت نیم‌مخروط ناقص توخالی برای تکمیل مدل ساخته‌شده یک ورق برنجی دوزنقه‌ی بی به کف آن متصل می‌شود. این ورق در چند نقطه با جوش برنجی به قطعه وصل می‌شود و تمام قسمت‌هایی که بین این ورق و نیم‌مخروط است با چسب مخصوص پر می‌شود تا مانع عبور هوا شود. در انتها برای کاهش اغتشاش در تونل باد سطح جوش‌های ایجادشده سمباده‌کاری، و قطعه کاملاً یکپارچه می‌شود. یک میله نیز برای اتصال به دینامومتر به قطعه متصل می‌شود که محل اتصال این میله‌ی باریک روی مرکز ثقل مدل ساخته شده است.

طبق داده‌های ارائه شده در جدول ۱، نسبت قطر دهانه‌ی بزرگ به کوچک 2.5 و ضخامت ورق 1 mm است. نسبت سطح مقطع بزرگ بر کوچک نیز برابر 6.25 است. در شکل‌های ۲ و ۳ مدل‌های بدون پوشش و زبرشده نشان داده شده است. پوشش زبری با استفاده از پودر سنگ روی سطح مدل ایجاد شده که ارتفاع متوسط آن تقریباً 1.2 میلی‌متر است و حتی‌الامکان سعی شده زبری ایجادشده بر سطح یکپارچه باشد. آزمایش‌ها برای شرایط مختلف (از نظر عدد رینولدز و جهت ورود جریان) روی مدل‌های صاف^۷ و زبر^۸ انجام شده و دمای محیط آزمایش 25 درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. حالت‌های انجام آزمایش عبارت‌اند از:

حالت اول: ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ^۹ نیم‌مخروط توخالی در سرعت‌های مختلف. حالت دوم: ورود جریان از دهانه‌ی کوچک^{۱۰} نیم‌مخروط توخالی در سرعت‌های مختلف.

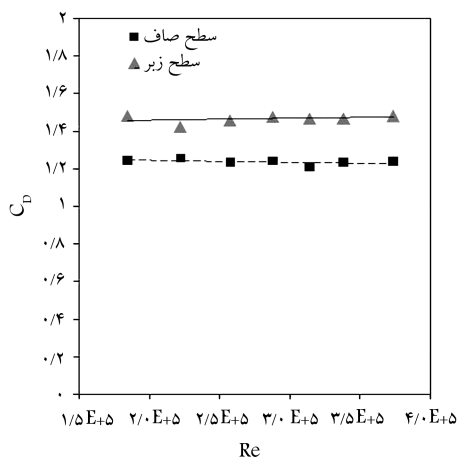
شکل ۴ نمای کلی تونل باد مکنده‌ی مورد آزمایش را نشان می‌دهد. این تونل باد دارای اتاق آزمون^{۱۱} و لانه‌زنبوری^{۱۲} هشت ضلعی است و برای اندازه‌گیری نیروی پسا از دینامومتر استفاده شده است. این تونل باد در آزمایشگاه هوافضا و مکانیک دانشگاه آزاد (واحد علوم و تحقیقات) قرار دارد. تمامی آزمایش‌های انجام‌شده برای حالتی است که نیم‌مخروط به صورت کاملاً افقی در جهت جریان قرار داشته باشد. محدوده‌ی سرعت‌های مورد آزمایش نیز بین 8.4 m/s تا 17 m/s بوده است.



شکل ۱. پارامترهای ساخت نیم‌مخروط ناقص توخالی.

جدول ۱. ابعاد نیم‌مخروط ناقص توخالی.

L (cm)	H (cm)	θ (deg)	D (cm)	d (cm)
34.421	34.290	5	10	4

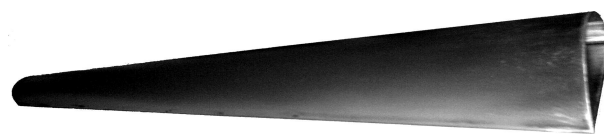


شکل ۶. ضریب پسای مدل‌های صاف و زبر هنگام ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ.

اعداد به دست آمده در رابطه‌ی ۴، ضریب پسا برای هر سرعت محاسبه می‌شود:

$$C_D = \frac{2F}{\rho AU^2} \quad (4)$$

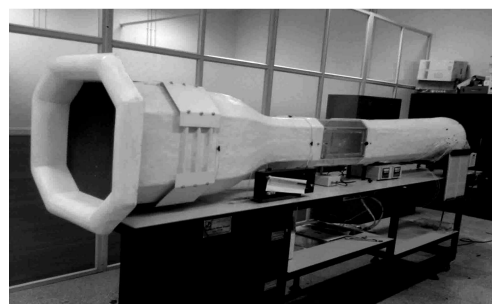
A مساحت فشاری و ρ چگالی هوا در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد است. نتایج حاصله برای ضریب پسا در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۲. مدل بدون پوشش مورد آزمایش.



شکل ۳. مدل زیرشده‌ی مورد آزمایش.



شکل ۴. نمای کلی تونل باد مورد استفاده.

نتایج ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ

شکل ۵ نیروی پسای وارد بر نیم‌مخروط ناقص توخالی را در حالت ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ نشان می‌دهد.

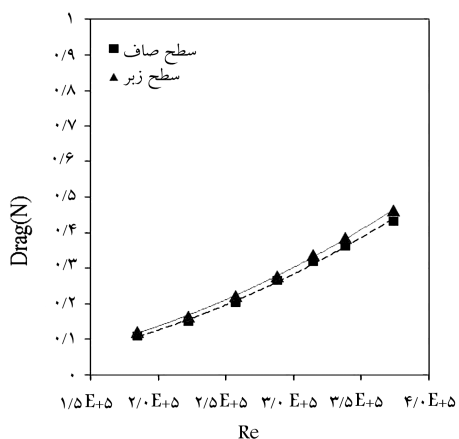
چنان‌که مشخص است نیروی پسای وارد به سطح زبر بیشتر از سطح صاف است و دلیل آن افزایش پسای اصطکاکی در سطوح زبر است.

با توجه به محدوده‌ی اعداد رینولدز آزمایش شده بیشتر پسای وارد به نیم‌مخروط ناقص توخالی، پسای فشاری است. بنابراین برای محاسبه‌ی ضریب پسا باید مساحت فشاری را در رابطه‌ی مربوطه قرار دهیم. مساحت فشاری مدل آزمایش شده نیز برابر تفاضل مساحت نیم‌دایره‌ی بزرگ و کوچک است، البته باید مساحت روبه‌روی ورق یک میلی‌متری را نیز در نظر بگیریم. پس از محاسبه‌ی مساحت فشاری، با قراردادن

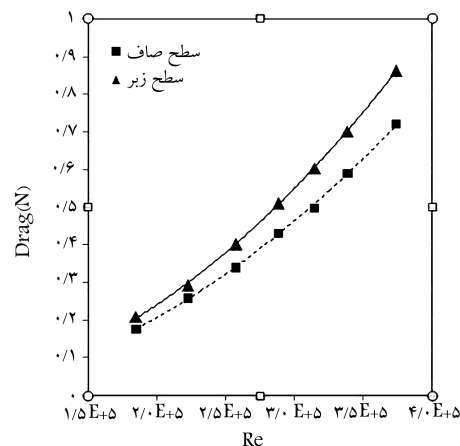
نتایج ورود جریان از دهانه‌ی کوچک

در شکل ۷ نیروهای پسا برای حالتی که جریان از دهانه‌ی کوچک وارد می‌شود نشان داده شده است. در این حالت نیز نیروی پسای وارد به سطح زبر به دلیل افزایش پسای اصطکاکی بیشتر از سطح صاف است. همچنین مشاهده می‌شود که اعداد به دست آمده برای نیروی پسا و ضریب پسا کم‌تر از حالتی است که جریان از دهانه‌ی بزرگ وارد می‌شود.

در شکل ۸ نیز ضریب پسای وارد بر نیم‌مخروط ناقص توخالی برای حالت ورود جریان از دهانه‌ی کوچک رسم شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، ضریب پسا نسبت به حالت ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ کم‌تر است. در این حالت علاوه



شکل ۷. نیروی پسای وارد بر مدل‌های صاف و زبر هنگام ورود جریان از دهانه‌ی کوچک.



شکل ۵. نیروی پسای وارد بر مدل‌های صاف و زبر هنگام ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ.

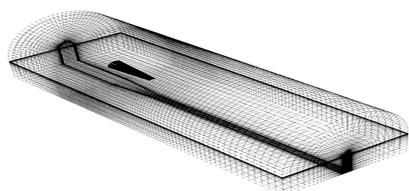
سرعت خروجی با توجه به رابطه‌ی برنولی با سرعت جریان دوردست برابر می‌شود، لذا با توجه به رابطه‌ی پیوستگی متوجه می‌شویم که سرعت ورود جریان به داخل نیم‌مخروط ناقص توخالی کم‌تر از سرعت خروج از دهانه‌ی کوچک است و در نتیجه فشار در دهانه‌ی ورودی خیلی بیشتر از فشار در دهانه‌ی خروجی و بیشتر از فشار اتمسفر خواهد شد.

در حالت ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ در نزدیکی دهانه‌ی ورودی جریان واگرا می‌شود و دبی کم‌تری وارد نیم‌مخروط می‌شود و تعدادی از خطوط جریان نمی‌توانند وارد نیم‌مخروط شوند. در نتیجه این خطوط جریان از روی سطح بیرونی و از زیر صفحه‌ی پایینی مدل عبور می‌کنند؛ در این دو نقطه گردابه‌ی^{۱۳} تشکیل می‌شود و شاهد جدایی^{۱۴} جریان خواهیم بود. بنابراین در هنگام ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ احتمال جدایی بسیار بالاست و پسای بیشتری نیز به مدل وارد می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به محدوده‌ی اعداد رینولدز آزمایش شده و به علت افزایش فشار در دهانه‌ی ورودی یقیناً بیشترین نیروی پسای وارده به مدل در این حالت، نیروی پسای فشاری است. برای حالتی که جریان از دهانه‌ی کوچک وارد می‌شود نیز با توجه به رابطه‌ی برنولی و پیوستگی سرعت در خروج برابر سرعت دوردست است و سرعت در ورود به داخل نیم‌مخروط ناقص توخالی بالاتر از سرعت جریان دوردست است و لذا دبی بیشتری وارد مدل می‌شود. بنابراین فشار در دهانه‌ی ورودی کم‌تر از دهانه‌ی خروجی است. در این حالت خطوط جریان در ورود به دهانه‌ی کوچک متقارب می‌شوند و احتمال جدایی روی سطوح بیرونی نیم‌مخروط بسیار کم‌تر است. اما در سطح داخلی بعد از تقارب اولیه احتمال جدایی وجود دارد. البته در سطح داخلی نیز به‌جز نزدیک دهانه‌ی ورودی احتمال جدایی کم است زیرا در این حالت افزایش سطح مقطع بسیار تدریجی است.

با توجه به این که در هنگام ورود جریان از دهانه‌ی کوچک احتمال جدایی کم‌تر است انتظار می‌رود در این حالت نیروی پسای کم‌تری به مدل وارد شود. البته در این حالت نیز مؤلفه‌ی پسای فشاری بیشتر از مؤلفه‌ی پسای اصطکاکی است، اما انتظار می‌رود که مؤلفه‌ی پسای اصطکاکی نسبت به حالتی که جریان از دهانه‌ی بزرگ وارد می‌شود بیشتر باشد.

مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی

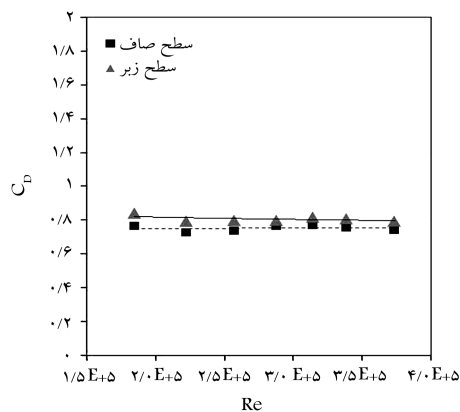
این مسئله به صورت عددی با استفاده از نرم افزار فلونت نیز تحلیل شده است. روش حل با استفاده از مدل $k - \epsilon$ استاندارد انجام گرفته و تمام دامنه‌ی محاسباتی^{۱۵} دارای شبکه‌بندی سازمان‌یافته^{۱۶} است. به دلیل حجیم بودن کارهای صورت‌گرفته در حل عددی تنها به ذکر نتایجی از آن برای مقایسه با نتایج تجربی می‌پردازیم. در شکل ۱۱ شبکه‌بندی سازمان‌یافته‌ی کل دامنه‌ی محاسباتی برای حالت ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ، و در شکل ۱۲ شبکه‌بندی برای حالت ورود جریان از دهانه‌ی کوچک نمایش داده شده است.



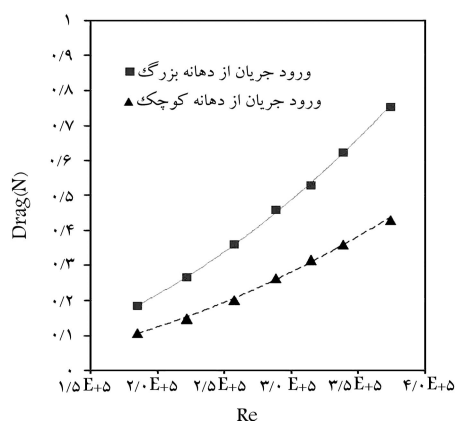
شکل ۱۱. شبکه‌بندی اطراف نیم‌مخروط ناقص توخالی برای حالت ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ.

بر این که نیروهای پسای کم‌تری به نیم‌مخروط ناقص توخالی وارد می‌شود، اختلاف نیروی پسای وارده شده به سطح زبر و صاف نیز کم‌تر است.

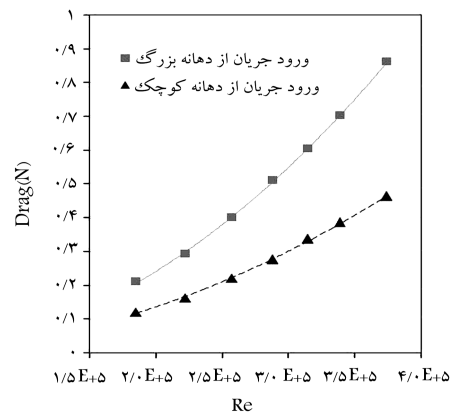
چنان‌که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، نیروهای پسای وارده به مدل برای حالتی که جریان از دهانه‌ی بزرگ وارد می‌شود خیلی بیشتر از حالتی است که جریان از دهانه‌ی کوچک وارد می‌شود. در حالتی که جریان از دهانه‌ی بزرگ وارد مدل می‌شود اگر خارج از قشر مرزی نازک جریان را غیرچرخشی فرض کنیم،



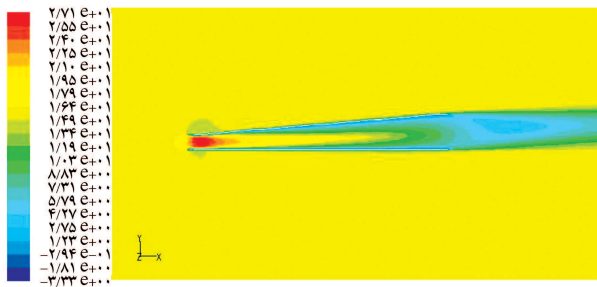
شکل ۸. ضریب پسای مدل‌های صاف و زبر هنگام ورود جریان از دهانه‌ی کوچک.



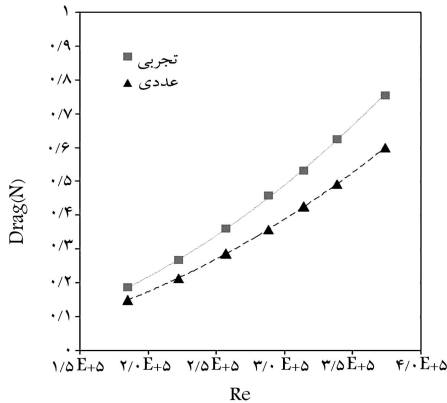
شکل ۹. نیروی پسای وارد بر مدل صاف در حالت‌های ورود جریان از دهانه‌ی کوچک و بزرگ.



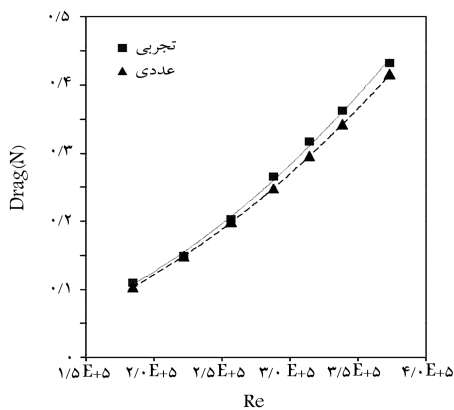
شکل ۱۰. نیروی پسای وارد بر مدل زبر شده در حالت‌های ورود جریان از دهانه‌ی کوچک و بزرگ.



شکل ۱۴. کانتور سرعت در جهت x برای حالت ورود جریان از دهانه‌ی کوچک.

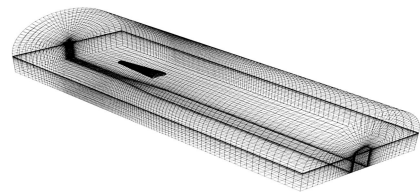


شکل ۱۵. مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی برای حالت ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ.

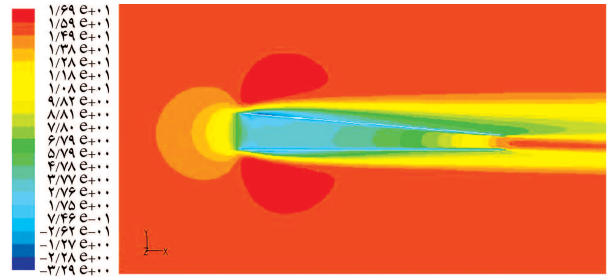


شکل ۱۶. مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی برای حالت ورود جریان از دهانه‌ی کوچک.

مختلف ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ و کوچک با هم مقایسه شده‌اند. چنان‌که مشاهده می‌شود نتایج با هم اختلاف کمی دارند. در سرعت‌های کم نتایج تجربی و عددی به هم نزدیک‌ترند ولی با افزایش عدد رینولدز نتایج تجربی و عددی اختلاف بیشتری دارند. علت این موضوع را می‌توان به دلایل مختلف -- از جمله استفاده از مدل $k-\epsilon$ استاندارد در داخل و خارج مجرا و همچنین پیش‌فرض‌های رعایت شده برای ساده‌سازی در نرم‌افزار فلونت -- نسبت داد. در شکل ۱۵ نیز مشاهده می‌شود که اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در حالتی که جریان از دهانه‌ی بزرگ وارد می‌شود بیشتر است. دلیل این امر آن است که در حالت ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ نیروهای بیشتری به مدل وارد می‌شود و نوسانات جریان هم بالاتر است. در نرم‌افزار فلونت برای حل معادلات از بعضی عبارات معادلات صرف‌نظر می‌شود و معادلات مسئله ساده‌سازی می‌شود، بنابراین انتظار می‌رود که نتایج حاصل از حل عددی نیز با خطای ناچیزی همراه باشند.



شکل ۱۷. شبکه‌بندی اطراف نیم‌مخروط ناقص توخالی برای حالت ورود جریان از دهانه‌ی کوچک.



شکل ۱۸. کانتور سرعت در جهت x برای حالت ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ.

شرط مرزی ورودی را شرط مرزی سرعت ورودی^{۱۷} که سرعت جریان دوردست است در نظر می‌گیریم. شرط مرزی خروجی را نیز شرط مرزی فشار خروجی^{۱۸} که فشار اتمسفر است در نظر گرفته‌ایم. سطوح مختلف نیم‌مخروط ناقص توخالی نیز به‌عنوان شرط دیواره^{۱۹} در نظر گرفته شده‌اند.

در شکل ۱۳ کانتور سرعت^{۲۰} نیم‌مخروط ناقص توخالی برای ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ رسم شده است. این شکل مقطع روبه‌روی نیم‌مخروط ناقص را نشان می‌دهد که به شکل دوزنقه است. چنان‌که پیش‌تر اشاره شد، در این حالت فشار دهانه‌ی ورودی بالاست. بنابراین تعدادی از خطوط جریان در ورود به داخل نیم‌مخروط دچار انحنای می‌شوند و از هم فاصله می‌گیرند؛ چنان‌که از شکل مشخص است. سرعت در دهانه‌ی ورودی پایین‌تر از سرعت خروج از دهانه‌ی کوچک است. همچنین مشاهده می‌شود که روی سطح بیرونی نیم‌مخروط -- که دارای شیب ملایم ۵ درجه است -- گردابه‌هایی ایجاد شده است. این وضعیت برای سطح بیرونی صفحه‌ی تخت در دهانه‌ی ورودی نیز مشهود است. گردابه‌های ایجادشده در این حالت بسیار بزرگ‌تر از حالت ورود جریان از دهانه‌ی کوچک‌اند. در واقع خطوط جریانی که نمی‌تواند به‌دلیل فشار بالای دهانه‌ی ورودی وارد نیم‌مخروط ناقص توخالی شود انحناء پیدا می‌کند و گردابه‌ها را به وجود می‌آورد.

چنان‌که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در این کانتور دارای سرعت‌های منفی در جهت محور xها هستیم که این سرعت‌های منفی با رنگ آبی مشخص شده‌اند و بر سطح بیرونی و زیرصفحه‌ی تخت پایینی در ابتدای دهانه‌ی ورودی نمایان‌اند. همین امر نشان می‌دهد که در این دو قسمت تغییر سرعت عوض شده و جدایی رخ داده است. در شکل ۱۴ کانتور سرعت برای حالتی که جریان از دهانه‌ی کوچک نیم‌مخروط ناقص توخالی وارد می‌شود نشان داده شده است. در حالت ورود جریان از دهانه‌ی کوچک شاهد گردابه‌های بسیار کوچک در نزدیکی جدار داخلی بودیم که نشان‌گر آن است که در حالت ورود جریان از دهانه‌ی کوچک نیروی پسای کم‌تری به نیم‌مخروط ناقص توخالی وارد شود. همچنین در این حالت به‌دلیل گردابه‌های ریزتر و جدایی کم‌تر جریان پسای اصطکاکی بیشتری نسبت به حالت قبل به مدل وارد می‌شود. در شکل ۱۴ شاهد بالاتر بودن سرعت دهانه‌ی ورودی به نیم‌مخروط ناقص توخالی هستیم که این نکته را می‌توان با استفاده از روابط برنولی و پیوستگی نیز نشان داد. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نتایج حاصل از حل عددی و تجربی برای حالت‌های

نتیجه‌گیری

با توجه به بحث‌های ارائه شده می‌توان نتایج زیر را استنباط کرد:

۱. نیروی پسای وارد به نیم‌مخروط ناقص توخالی هنگام ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ بیشتر است. بنابراین برای کاهش مصرف سوخت و هزینه‌های اولیه -- از جمله انتخاب سیستم رانش اقتصادی -- جهت قرارگیری جسم باید به‌گونه‌ی باشد که جریان از دهانه‌ی کوچک وارد شود.
 ۲. هنگام استفاده از پوشش زبری روی مدل، نیروی پسای وارده به مدل افزایش می‌یابد، که علت آن افزایش پسای اصطکاکی روی سطح زبر است؛ در این حالت نیروی وارده هنگام ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ نیز بالاتر است.
 ۳. با افزایش سرعت در تونل باد نتایج عددی و تجربی فاصله بیشتری می‌گیرند؛ علت آن ارتعاشات تونل باد و همچنین فرض‌هایی است که برای ساده‌سازی حل مسئله در نرم‌افزار فلونت در نظر گرفتیم.
 ۴. در حالتی که جریان از دهانه‌ی بزرگ وارد می‌شود روی سطح بیرونی نیم‌مخروط
۵. در حالتی که جریان از دهانه‌ی کوچک نیم‌مخروط وارد می‌شود پسای اصطکاکی بیشتر از حالتی است که جریان از دهانه‌ی بزرگ وارد می‌شود.
 ۶. در حالت ورود جریان از دهانه‌ی کوچک خطای نتایج عددی نسبت به تجربی تقریباً ۵٪ است ولی در حالت ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ خطای نتایج عددی نسبت به تجربی در حدود ۱۵٪ است. در این حالت نیروهای بیشتری به مدل وارد می‌شود و گردابه‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌شود که خود دلیل بر افزایش خطاست.
 ۷. در حالت ورود جریان از دهانه‌ی بزرگ فشار دهانه‌ی ورودی بالاست و سرعت دهانه‌ی ورودی نیز پایین است. اما در حالت ورود جریان از دهانه‌ی کوچک سرعت در دهانه‌ی ورودی بالاست که می‌توان از این سرعت بالا استفاده کرد.
 ۸. از نتایج این آزمایش می‌توان در طراحی بهتر کشتی‌های کاتاماران و قایق‌های تندرو و پرتابه‌ها و حتی در افزایش کارایی توربین‌های بادی و اتومبیل‌های با نیروی باد استفاده کرد.

پانویس

1. drag reduction
2. roughness
3. half tubular frustum
4. viscous drag
5. pressure drag
6. drag coefficient
7. smooth
8. rough
9. big diameter in front
10. small diameter in front
11. test section
12. honeycomb
13. wake
14. separation
15. computational domain
16. structured
17. velocity inlet
18. pressure outlet
19. wall
20. contour of velocity

منابع (References)

3. Bearman, P.W. and Trueman, D.M. "An investigation of the flow around rectangular cylinders", *Journal Fluid Mech*, **116**, pp. 475-506 (1982).
4. Lee, T.S. "Early stages of an impulsively started unsteady flow past non-rectangular prisms", *Comput. Fluids*, **27**, pp. 435-454 (1998).
5. Manoj Kumar, V. and Anantha, S. "A numerical and experimental study on tank wall influences in drag estimation", *Ocean Engineering*, **34**, pp. 192-205 (2007).
6. Siqueira, C.L.R.; Spogis, N.; Damian, R. and Reis, M., *Overview of CFD Modelling for Ship Hull Interactions with Waves and Propellers*, 3rd International Workshop on Offshore Hydrodynamics, Rio de Janeiro, Brazil (17-19 October 2007).
7. Cheng, M. and Liu, G.R. "Effects of after body shape on flow around prismatic cylinders", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **84**, pp. 181-196 (2000).
8. Kyoji, K.; Yoshifumi, Y. and Eiji, T., *Observation of the Flow Around a Circular Cylinder and a Trapezoidal Cylinder in a Circular Pipe by a Dye Injection Method*, 11th Fluid Mechanics Conference, University of Tasmania (14-18 December 1992).
9. Hubert, C. and Skip, S., *The Illustrated Guide to Aerodynamics*, 2nd Edition, TAB Books Publishion (1992).
10. Cengel, Y.A. and Cimbala, J.M., *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 2nd Edition, McGraw Hill Higher Education Publishion (2006).
11. Gerhart, P.M.; Gross, R.J. and Hochstein, J.I., *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 3th Edition, Addison-Wesley Publishing Co (1992).
12. H.Schlichting, "Boundary-Layer Theory", 7th Edition, McGraw Hill New York (1979).
1. James, B.T.; Andres L.C. and Satish, G.K. "Characterization of effect of surface roughness and texture on fluid flow-past, present, and future", *International Journal of Thermal Science*, **45**, pp. 962-968 (2006).
2. Zasso, A.; Giappino, S. and Muggiasca, S. "Wind tunnel study of a cone-like shaped roof: Reynolds number effects", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **94**, pp. 431-444 (2006).