

بررسی اثر تجربی صافی سطح یک نمونه پرتابه بر روی ضرائب آیرودینامیکی

سعید دانشمند^۱، افشین احمدی ندوشن^۲
Saeed_Daneshmand@yahoo.com

پذیرش مقاله: ۸۹/۰۶/۰۸

دریافت مقاله: ۸۹/۰۴/۲۹

چکیده

امروزه در عصری قرار داریم که کیفیت، سرعت، دقت و قیمت مهمترین پارامترها در طراحی و ساخت قطعات می‌باشند. برای ساخت قطعات با توجه به پیچیدگی آن از روش‌های سنتی و غیرسنتی استفاده می‌شود. آزمایش‌های آیرودینامیک معمولاً نیاز به یک یا چند مدل برای تست در تونل باد دارند و این مدل‌ها معمولاً دارای پیچیدگی‌های خاصی می‌باشند که برای ساخت آنها از روش‌های ماشینکاری، ریخته‌گری و یا نمونه‌سازی سریع استفاده می‌کنند و استفاده از هر کدام از این روش‌های ساخت دارای مزایا و معایبی می‌باشد. انتخاب یک روش ساخت بهینه می‌تواند بر روی نتایج و کیفیت ساخت تأثیرگذار باشد. در این تحقیق اثر تجربی صافی سطح یک نمونه پرتابه بر روی ضرائب آیرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور سه پرتابه با سه کیفیت سطح عالی، متوسط و خشن ساخته شد و در زاویه‌های حمله و سرعت‌های مختلف ضرائب آیرودینامیکی و نسبت برا به پسا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان داد که در سرعت‌های بالا و زاویه‌های حمله‌ی بالا بهتر است که از مدل با کیفیت سطح عالی استفاده شود زیرا باعث کاهش دراگ و افزایش نسبت برا به پسا می‌گردد و در نتیجه بر روی ضرائب آیرودینامیکی تأثیرگذار است و با افزایش زبری رینولدز بحرانی نیز کاهش می‌یابد.

کلید واژه:

صافی سطح - ضرائب آیرودینامیکی - تونل باد - زاویه‌ی حمله

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، دانشکده مکانیک، اصفهان، ایران
۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، دانشکده مکانیک، اصفهان، ایران

۱- مقدمه

برای انتخاب روش بهینه در فرآیند ساخت قطعات باید به عوامل مهمی مانند کیفیت سطح و زمان تولید توجه ویژه ای شود. این دو عامل تأثیر به سزایی در هزینه تولید دارند. اعمال پارامترهای ساخت به صورت عملی مستلزم پرداخت هزینه‌های بسیار زیاد می‌باشد و علاوه بر این نتایج منظمی ایجاد نمی‌کند. امروزه برای کاهش زمان و هزینه ساخت روش‌های مختلف ساخت پیشنهاد شده است این روش‌ها شامل، ریخته‌گری، ماشینکاری سنتی، CNC، AC و روش‌های ساخت پیشرفته می‌باشد [۱].

جریان سیال معمولاً نقش مهمی در صنایع پیرامون ما همچون توربو ماشین‌ها، سیستم‌های هیدرو دینامیکی، صنایع هوا و فضا و غیره دارد. برای بررسی جریان سیال نیاز به استفاده از مدل برای گرفتن نتایج و تونل باد می‌باشد. برای بررسی اثرات سیال بر روی مدل‌ها معمولاً از روش‌های عددی یا تجربی استفاده می‌کنند. در روش‌های عددی با استفاده از شبیه‌سازی و حل معادله‌های حاکم بر جریان سیال نظیر معادله‌های پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی، کمیت‌های جریان را در شرایط مختلف بدست آورده و با توجه به نتایج بدست آمده، سیستم‌های مورد نظر طراحی و یا بهینه می‌شوند [۲].

در روش‌های تجربی با استفاده از تجهیزاتی نظیر تونل باد، تونل آب و غیره مدل را در شرایط آزمایش قرار داده و با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری، کمیت‌های مختلف جریان سیال اندازه‌گیری شده و در نتیجه می‌توان پدیده‌های فیزیکی را درک و سیستم‌های سیالاتی را طراحی و بهینه نمود. دو روش فوق دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشند. در روش‌های تجربی نیاز به مدل، تجهیزات آزمایش و دستگاه‌های اندازه‌گیری است و معمولاً پرهزینه‌تر از روش‌های عددی است. در روش‌های عددی، معادله‌های حاکم بر جریان سیال از روش‌های مختلف حل می‌شوند. در این روش‌ها با توجه به ساده‌سازی معادله‌های حاکم بر جریان سیال، خطای ناشی از مدل آشفتگی و یا تأثیر شرایط مرزی، امکان خطا در نتایج بدست آمده وجود دارد که بهتر است صحت نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از روش‌های تجربی مقایسه گردد. اما انتخاب یک مدل بهینه نیز در روش‌های تجربی ممکن است بر روی نتایج حاصله تأثیرگذار باشد. امروزه با توجه به پیچیدگی مدل معمولاً از روش CNC برای ساخت آن استفاده می‌کنند.

ز جمله پارامترهای مهمی که برای انتخاب روش بهینه در ساخت یک قطعه و آماده‌سازی آن برای عملیات پرداخت کاری باید مد نظر قرار داد، مدت زمان عملیات ماشینکاری و کیفیت سطح می‌باشد. مدت زمان عملیات براده برداری با تأثیر مستقیم خود بر روی قیمت محصول، بسیار قابل توجه است و هر چه این زمان کمتر باشد قیمت

تمام شده مدل یا محصول نهایی کمتر خواهد بود. از طرفی در برخی موارد با توجه به هزینه بالا، کیفیت مطلوب تر سطح مد نظر می‌باشد [۳]. معمولاً صافی سطح پارامتر مهمی در تست مدل‌های تونل باد می‌باشد. در ماشینکاری به وسیله‌ی ماشین‌های ابزار، شرایط برش و نوع ابزار می‌تواند بر صافی سطح قطعات تأثیرگذار باشد. سرعت برش، سرعت پیشروی، عمق برش، نوع ابزار، زاویه ی برش مهمترین پارامترها می‌باشند که می‌توانند بر صافی سطح و در نتیجه زمان و هزینه تأثیرگذار باشند [۴]. با توجه به تأثیر صافی سطح در تست مدل‌ها در تونل باد تحقیقات مختلفی انجام شده است. ووربرگر و همکارانش [۵] در سال ۱۹۸۶ مطالعاتی را بر روی صافی سطح مدل‌های تست تونل باد در رینولدزهای بالا انجام دادند و اهمیت صافی سطح در مدل‌های تست تونل باد را نشان دادند. ماروتا و همکارانش [۶] در سال ۱۹۸۸ در دانشگاه توکیو ژاپن اثر صافی سطح را بر روی فشار اعمالی از طرف باد با پوشش‌دهی‌های مختلف بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که با پوشش‌دهی و کیفیت سطح عالی می‌توان اثر قابل توجهی بر روی فشار اعمالی از طرف باد بر روی مدل داشت. مارک [۷] در رساله دکترا خود اثر صافی سطح بر میزان Drag و Lift را مورد بررسی قرار داد. مارک در رساله‌ی خود مشخص نموده که با تغییرات صافی سطح می‌توان مقدار Drag و Lift را تغییر داد. المار و همکارانش [۸] در سال ۲۰۰۶ اثر صافی سطح روی جریان‌های کروی در رینولدزهای بین 5×10^4 تا 6×10^6 را روی پنج نمونه صافی سطح مختلف مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش زبری از عدد رینولدز بحرانی کاسته می‌شود. برگ [۹] در رساله‌ی دکترا خود اثر صافی سطح روی لایه‌ی مرزی متلاطم را مورد بررسی قرار داده است. برای این منظور یک مدل زبر و یک مدل صیقلی انتخاب گردیدند و مورد آزمایش قرار گرفتند و مشخص گردید که صافی سطح بر روی پروفیل سرعت و اصطکاک در سرعت‌های بالا اثر بیشتری دارند.

در تحقیق حاضر، اثر صافی سطح بر روی ضرائب آبرودینامیکی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. برای این منظور مدل در سه صافی سطح مختلف در تونل باد مورد آزمایش قرار گرفت. زبری سطح برای هر مدل $16 Ra$ ، $0.832 Ra$ و $0.410 Ra$ بود و تست‌ها در ماخ‌های 0.1 تا 0.3 انجام گردید. مدل‌ها در زاویه‌ی حمله از 2° تا 14° درجه در زاویه‌ی جانبی صفر مورد آزمایش قرار گرفتند و ضرائب آبرودینامیکی نیروی نرمال، نیروی محوری، گشتاور پیچش و نسبت Drag به Lift در این مدل‌ها بدست آمدند و نتایج با همدیگر مورد بحث و مقایسه قرار گرفتند.



شکل (۱): اجزاء تشکیل دهنده‌ی مدل تست تونل باد (نوک، بدنه و دنباله)



شکل (۲): مدل مونتاژ شده‌ی پرتابه

۲- طراحی و ساخت مدل‌های تست تونل باد

امروزه با توجه به پیچیدگی ایرفویل‌ها و مدل‌های تست تونل باد روش‌های مختلفی برای ساخت آنها پیشنهاد می‌گردد. روش‌های ساخت که معمولاً در حال حاضر از آنها با توجه به پیچیدگی مدل‌ها استفاده می‌کنند روش‌های ماشینکاری، ریخته‌گری و استفاده از روش‌های ساخت سریع می‌باشد [۱۰]. با توجه به اینکه برای تست در تونل باد ممکن است به چندین نمونه مدل نیاز باشد و به نتایج قابل توجهی نیز برسیم و زمان و هزینه تولید را نیز کاهش دهیم یکی از روش‌های ساخت انتخاب می‌گردد. مدل انتخابی برای تست در تونل باد یک پرتابه به ابعاد $8 \times 8 \times 52$ سانتیمتر بود. این مدل از قسمت‌های نوک، بدنه و دنباله تشکیل شده است. قسمت‌های نوک و بدنه‌ی این مدل با فرآیند تراشکاری از فولاد خام و قسمت دنباله با فرآیند ریخته‌گری ساخته و در نهایت ماشینکاری شده است. برای این که صافی سطوح مختلفی داشته باشیم سه مدل ساخته شد. قسمت بدنه‌ی مدل از یک استوانه از جنس CK45 به طول ۳۰ سانتیمتر با قطر خارجی ۸ سانتیمتر و قطر داخلی ۷ سانتیمتر انتخاب گردید. قطر داخلی استوانه جهت اتصال به نوک و دنباله پرتابه رزوه گردید. قسمت نوک و دنباله مدل نیز به وسیله رزوه شدن به قسمت استوانه یا همان بدنه متصل گردیده است. صافی سطح هر یک از این مدل‌ها $Ra 16$ ، 0.410 و 0.832 بود که به وسیله‌ی دستگاه زبری‌سنج اندازه‌گیری شده است. شکل (۱) نشان‌دهنده‌ی اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی مدل تست تونل باد و شکل (۲) مدل مونتاژ شده‌ی پرتابه برای تست در تونل باد را نشان می‌دهند.

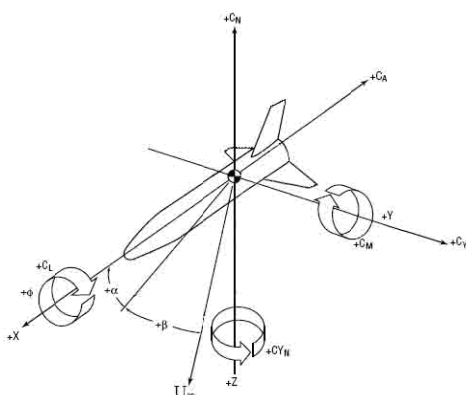
۳- تونل باد و ضرائب آیرودینامیکی

روشن‌ترین هدف استفاده از تونل باد، اندازه‌گیری نیروها و گشتاورها می‌باشد. در تونل‌های باد همچنین می‌توان فشارها و الگوهای جریان هوا را بر روی قسمت‌های مختلف مدل محاسبه کرد. تونل‌های باد معمولاً به تونل‌های باد زیر صوت و گذر صوتی و فراصوتی تقسیم‌بندی می‌شوند که عملکرد آنها با همدیگر متفاوت می‌باشد. در این تحقیق از یک تونل باد سرعت پایین برای انجام آزمایشات استفاده گردیده است. این تونل باد دارای ابعاد کاری $16 \times 16 \times 0.1$ متر و ماکزیمم سرعت ۱۵۰ متر بر ثانیه بود. مدل قابلیت زاویه‌ی حمله از ۵- تا $25+$ درجه در ماخ‌های 0.1 تا 0.3 را داشت. یک تونل باد زیرصوتی مانند یک ونتوری کار می‌کند. زمانی که هوا به تنگنای درون لوله می‌رسد، سرعت افزایش می‌یابد و افزایش سرعت باعث کاهش فشار استاتیکی می‌شود که این فشار عمود بر جهت جریان اندازه‌گیری می‌شود. چون نیروها کوچک هستند، چگالی و دمای هوا الزاماً ثابت باقی می‌ماند [۱۱].

در روش‌های تجربی، تعیین سرعت جریان سیال به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود. در روش غیرمستقیم، سرعت جریان سیال به وسیله‌ی اندازه‌گیری فشار و با استفاده از قوانین مکانیک سیالات و در روش مستقیم با استفاده از دستگاه‌هایی نظیر جریان سنج لیزری، جریان سنج سیم داغ اندازه‌گیری می‌شود. در روش مستقیم، خروجی دستگاه جریان سیم داغ که معمولاً به صورت ولتاژ می‌باشد باید در ابتدا کالیبره شده، سپس با استفاده از ولتاژ خروجی و معادله‌های کالیبراسیون، سرعت جریان سیال اندازه‌گیری شود. در روش غیرمستقیم با استفاده از لوله‌ی استاتیکی پیتوت، فشار دینامیکی جریان سیال اندازه‌گیری و با استفاده از قوانین مکانیک سیالات، سرعت متوسط جریان سیال تعیین می‌شود. در این روش اغتشاش‌های جریان سیال را نمی‌توان اندازه‌گیری کرد. از طرف دیگر، پاسخ فرکانسی دستگاه‌های اندازه‌گیر فشار، بالا نبوده و با استفاده از این روش، فقط می‌توان سرعت لحظه‌ای را با فرکانس چند صد سیکل در ثانیه اندازه‌گیری نمود. برای اندازه‌گیری سرعت‌های لحظه‌ای با فرکانس بالا و همچنین هنگامی که پاسخ سریع وسیله‌ی اندازه‌گیر در مقابل تغییرات جریان سیال مدنظر باشد از دستگاه جریان سنج سیم داغ و یا جریان سنج لیزری استفاده می‌کنند. در این آزمایشات از روش غیرمستقیم برای بدست آوردن

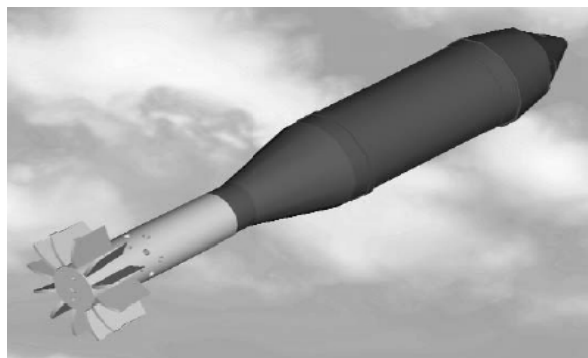
۴- دقت و سیستم محورهای آیرودینامیکی

محورهای مرجع آیرودینامیکی و پارامترهای مرجع برای این آزمایشات در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به محورهای مختصات انتخاب شده آزمایشات در ماخهای ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ در زوایای حمله از ۲- تا ۱۴+ درجه و زاویه‌ی جانبی صفر انجام شد. ضرائب گشتاور پیچشی، نیروی نرمال، نیروی محوری و نسبت برا به پسا در این سرعت‌ها با صافی سطوح مختلف نشان داده شده است.



شکل(۳): محورهای مرجع آیرودینامیکی

چندین عامل در دقت محاسبات مؤثر است. مهمترین آنها عبارتند از دقت ابعادی مدل‌ها، صافی سطوح در نقاط مختلف و اثر دیوارهای تونل باد. از نظر ابعادی مدل‌ها در چند نقطه با همدیگر و با مدل CAD (شکل(۴)) مقایسه شده‌اند و در جدول (۱) آمده است.



شکل(۴): مدل CAD

جدول (۱): مقایسه ابعاد با مدل CAD

ابعاد	ابعاد CAD (mm)	مدل با صافی سطح Ra=16	مدل با صافی سطح Ra=0.810	مدل با صافی سطح Ra=0.410
قطر بدنه	۸۰	۰/۰۹۱	۰/۰۵۳	۰/۰۳۲
قطر نوک	۸۱	۰/۰۹۵	۰/۰۶۱	۰/۰۴۲
قطر دنباله	۲۹	۰/۰۸۲	۰/۰۴۹	۰/۰۲۸

سرعت‌ها استفاده شده است. تونل باد از نوع دمیدنی متناوب بود که هوای فشرده بعد از عبور از مقطع تست وارد اتمسفر می‌گردد. از پروب‌ها برای اندازه‌گیری سرعت‌ها و محاسبه‌ی Drag استفاده شده است. Lift و Drag در زوایای حمله مختلف در سرعت‌های پایین اندازه‌گیری شد. این سرعت‌ها در محدوده‌ی ۳۴ تا ۱۵۰ متر بر ثانیه بود. برای محاسبه Lift و Drag با استفاده از سرعت‌ها و روابط (۱) و (۲) نیروها محاسبه گردیدند:

$$Force_N = \frac{velocity_{N\ Air\ On} - velocity_{N\ Air\ Off}}{sensitivity_N} \quad (1)$$

$$Force_A = \frac{velocity_{A\ Air\ On} - velocity_{A\ Air\ Off}}{sensitivity_A} + \frac{velocity_{N\ Air\ On}}{Crossover_{NA}} \quad (2)$$

از روابط (۳) و (۴) برای محاسبه‌ی Lift و Drag استفاده گردید و برای محاسبه‌ی ضرائب Lift و Drag و در نهایت نسبت بین آنها از رابطه‌ی (۵) و (۶) استفاده گردید.

$$Lift = F_N \cos(AOA) - F_A \sin(AOA) \quad (3)$$

$$Drag = F_A \cos(AOA) - F_N \sin(AOA) \quad (4)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 \rho s v^2} \quad (5)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \rho s v^2} \quad (6)$$

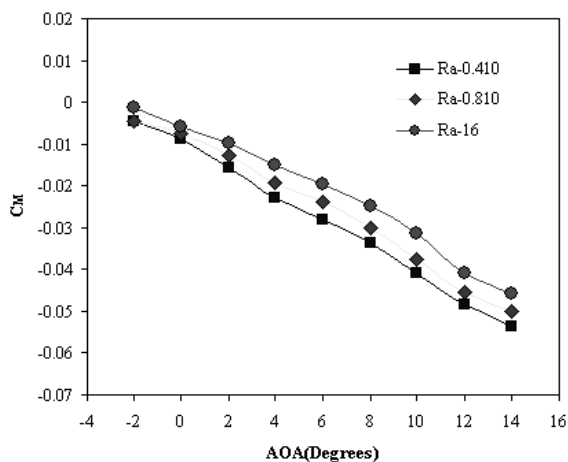
در این رابطه مقدار Lift یا Drag و Sref مقدار سطح مرجع و ρ مقدار دانسیته و v مقدار سرعت می‌باشد. برای محاسبه‌ی ضریب نیروی محوری، نرمال و ضریب گشتاور از روابط (۷)، (۸) و (۹) استفاده می‌شود [۱۲].

$$C_A = \frac{\text{Axial force}}{0.5 \rho v^2 S} \quad (7)$$

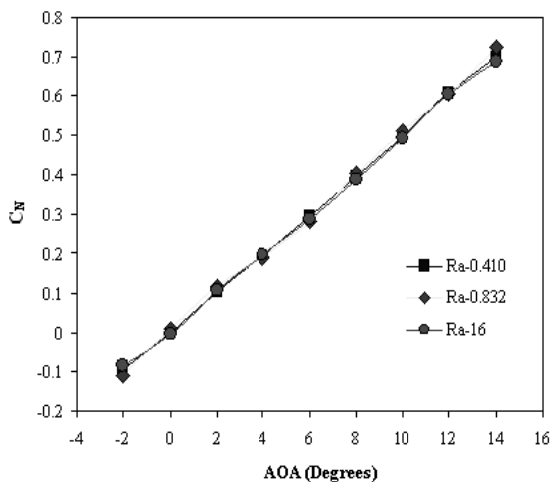
$$C_N = \frac{\text{Normal force}}{0.5 \rho v^2 S} \quad (8)$$

$$C_M = \frac{M}{0.5 \rho v^2 S b} \quad (9)$$

و ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که نسبت Drag و Lift در مدل‌هایی که دارای صافی سطح بیشتری می‌باشند کمی بیشتر از مدل‌هایی است که دارای زبری بیشتری می‌باشند و این اثر در تمام زوایای حمله مشهود است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدلی که دارای کیفیت سطح بهتری است دارای مقدار Lift بهتری می‌باشد. با بررسی شکل‌های ۵، ۹ و ۱۳ بر روی ضرائب گشتاور پیچش می‌بینیم که با افزایش زاویه‌ی حمله واگرایی نمودارها بیشتر می‌گردد. البته این تأثیر به اندازه‌ی ضرائب نیروی محوری نیست و نسبت به آن ناچیز می‌باشد. با بررسی نمودارها می‌توان به این نتیجه رسید که صافی سطح بر روی داده‌های آیرودینامیکی طولی تأثیر دارد و این تأثیر بیشتر بر روی ضریب نیروی محوری می‌باشد و بر روی سایر ضرائب آیرودینامیکی این اثر ناچیز است و می‌توان براساس شرایط کاری برای پرتابه‌ها صافی سطح مناسب را در نظر گرفت.



شکل (۵): ضریب گشتاور پیچشی در ماخ ۰.۱

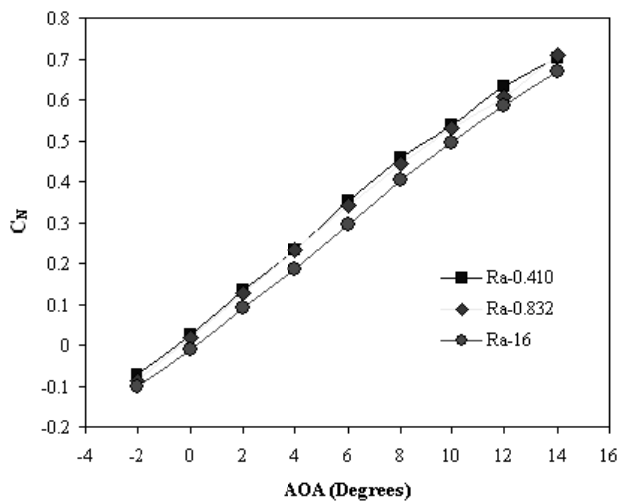


شکل (۶): ضریب نیروی نرمال در ماخ ۰.۱

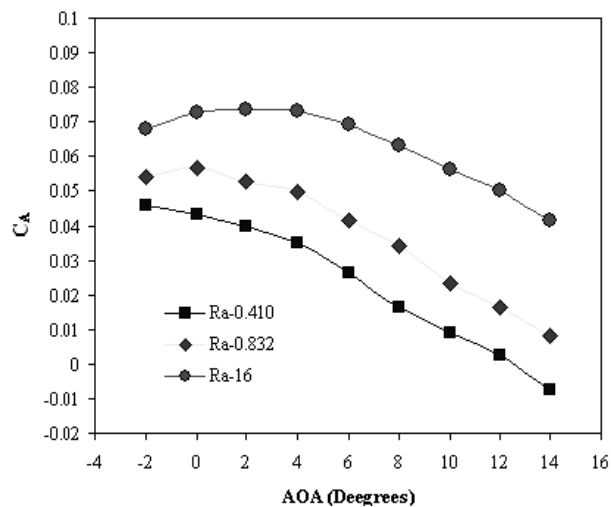
ابعاد نشان داده شده در جدول با ابعاد نقشه مقایسه شده است و اختلافات اندازه‌ها در جدول آورده شده است. ابعاد اندازه‌گیری شده شامل قطرهای بدنه، طول مدل، و ابعادی از قسمت انتهایی مدل می‌باشد. صافی سطوح بر روی هر ۳ مدل سعی گردیده است در قسمت نوک و بدنه به صورت یکسان باشد اما صافی سطح‌های بدست آمده از ۵ نقطه‌ی مختلف مدل گرفته شده است و میانگین آنها بیان گردیده است بنابراین صافی سطح بدست آمده دارای تلرانس ۰.۱/۰ میکرون است. دیوارهای تونل باد به عنوان یک محدودیت مصنوعی به حساب می‌آیند. دیوارها دارای دو اثر هستند. اول اینکه با مقداری از هوا که می‌تواند از بالای مدل به طرف پایین رانده شود تداخل پیدا می‌کند و جریان هوای روبه پایین را مسدود می‌کنند. این پدیده تأثیرات دیوار (Wall Effects) نام دارد. مشکل دیگر تونل باد کم سرعت آن است که سرعت هوا با عبور از یک تنگنا افزایش می‌یابد و مدل در ونتوری به عنوان یک تنگنا عمل می‌کند. به عبارت دیگر هوا به خاطر عبور از اطراف مدل که به عنوان یک سد عمل می‌کند، شتاب می‌گیرد. به همین دلیل به آن اثر مسدودکنندگی (Blockage Effect) می‌گویند [۱۳]. بنابراین خطاهای ناشی از تأثیرات دیوار و اثر مسدودکنندگی نیز می‌باشد و تصحیحات معمولی تونل باد فقط تا چند درصد به وسیله‌ی کارهای تئوری قابل انجام هستند.

۵- نتایج

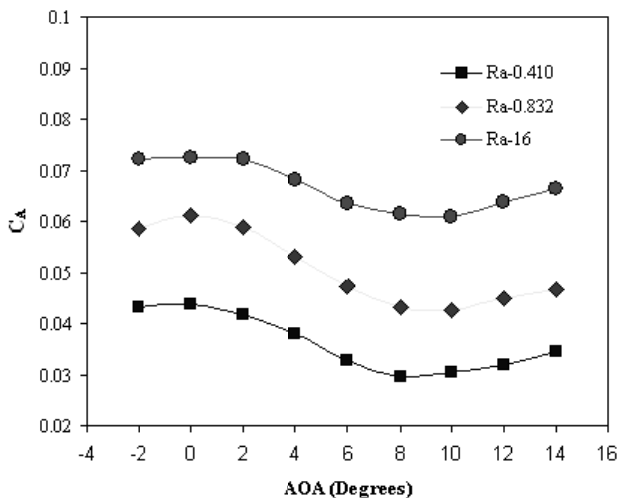
اثر صافی سطح بر روی ضرائب آیرودینامیکی در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل‌های ۵ تا ۱۶ نتایج حاصل از این آزمایشات را نشان می‌دهد. ضرائب آیرودینامیکی نیروی محوری، نیروی نرمال، گشتاور پیچش و نسبت برا به پسا در ماخ‌های ۰.۱، ۰.۲، و ۰.۳ نشان داده شده است. شکل‌های ۶، ۱۰ و ۱۴ ضریب نیروی نرمال را در زوایای حمله‌ی مختلف برای ۳ مدل در صافی سطح‌های مختلف را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های ضرائب نیروی نرمال در ۳ صافی سطح مختلف و ماخ‌های مختلف می‌بینیم که اختلاف در داده‌ها به صورت خطی می‌باشد و ضریب نیروی نرمال در مدلی که دارای صافی سطح بهتری می‌باشد خیلی کم از سایر مدل‌ها بیشتر است. بنابراین صافی سطح بر روی ضریب نیروی نرمال آنچنان اثر ندارد و بیشترین اثر آن در زوایای حمله‌ی بالا است. شکل‌های ۷، ۱۱ و ۱۵ ضریب نیروی محوری را برحسب زاویه‌ی حمله در ماخ‌های مختلف را نشان می‌دهد با توجه به شکل‌ها می‌بینیم که ضرائب نیروی محوری در مدل‌هایی که دارای صافی سطح بیشتری هستند و این اثر در زوایای حمله‌ی مختلف نشان داده شده است. ارزیابی از نسبت Drag و Lift در زوایای حمله و ماخ‌های مختلف در شکل‌های ۸، ۱۲



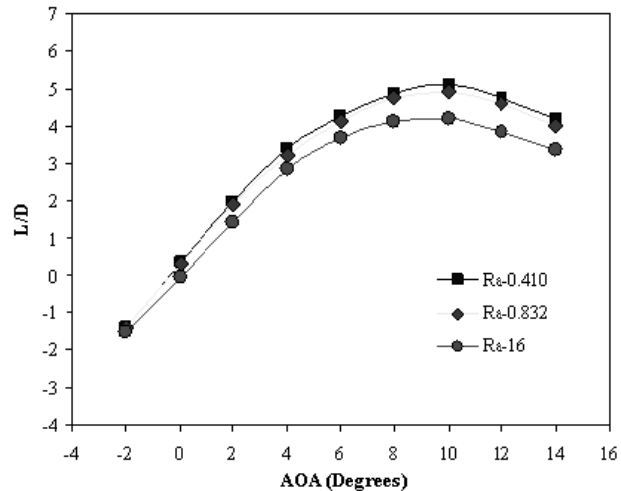
شکل (۱۰): ضریب نیروی نرمال در ماخ ۰.۲



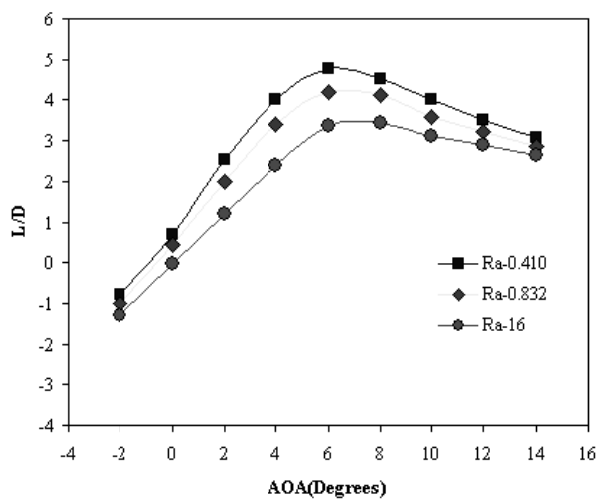
شکل (۷): ضریب نیروی محوری در ماخ ۰.۱



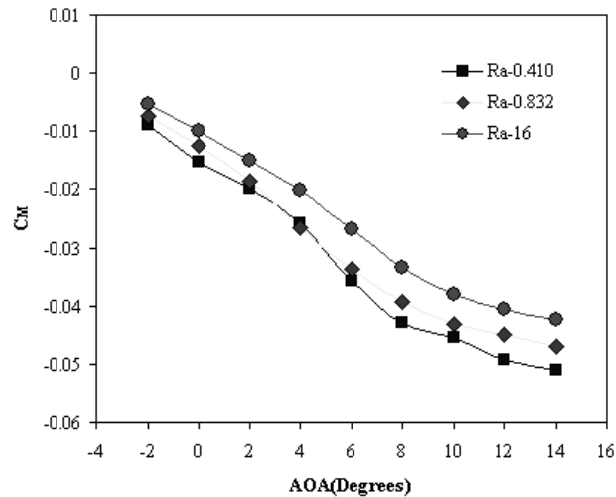
شکل (۱۱): ضریب نیروی محوری در ماخ ۰.۲



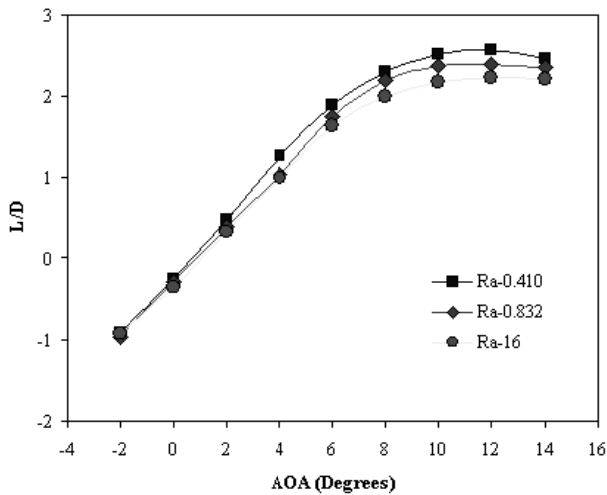
شکل (۸): نسبت برا به پسا در ماخ ۰.۱



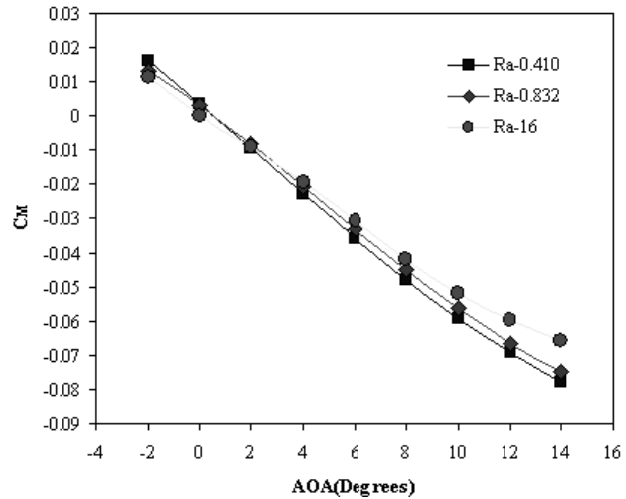
شکل (۱۲): نسبت برا به پسا در ماخ ۰.۲



شکل (۹): ضریب گشتاور پیچشی در ماخ ۰.۲



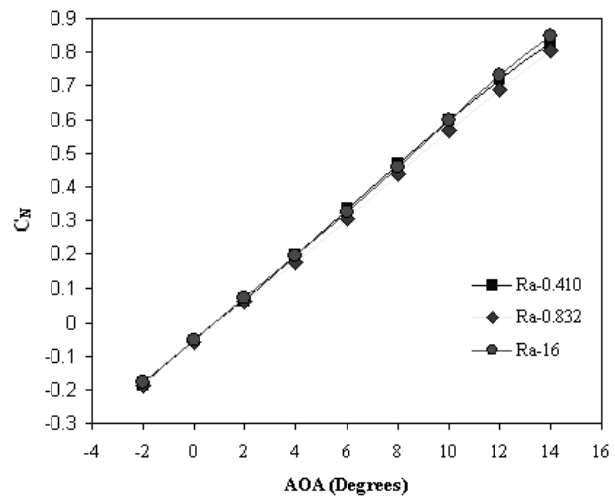
شکل (۱۶): نسبت برا به پسا در ماخ ۰.۳.



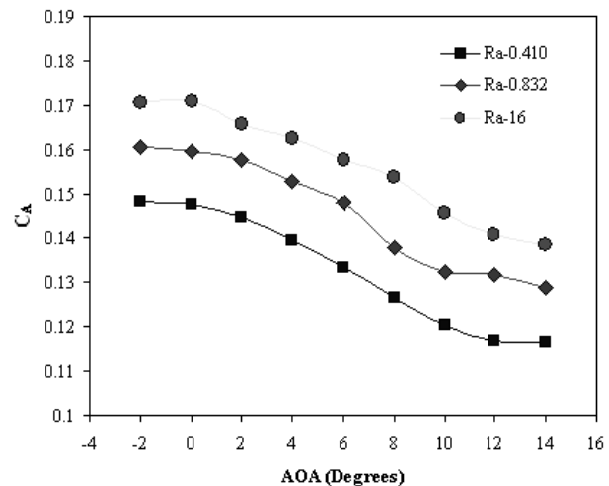
شکل (۱۳): ضریب گشتاور پیچشی در ماخ ۰.۳.

۶- نتیجه گیری

با بررسی‌های انجام شده بر روی صافی سطوح مختلف و تأثیر آن بر مدت زمان ماشینکاری و ضرائب آیرودینامیکی به نتایج قابل توجهی دست یافته شد. سه مدل با ۳ صافی سطح مختلف در تونل باد مورد آنالیز و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. از آنجا که مقاطع پیچیده و ایر فویل‌ها برای ساخت آنها نیاز به زمان و هزینه‌ی زیاد می‌باشد و ممکن است برای آزمایشات نیاز به چندین مدل باشد انتخاب روش ساخت‌های سنتی و غیرسنتی و در نتیجه پارامترهای بهینه ساخت می‌تواند بر روی هزینه‌ی ساخت مدل‌ها و در نتیجه کیفیت ساخت و صافی سطوح مدل‌ها تأثیرگذار باشد. اثرات صافی سطح بر روی ضرائب آیرودینامیکی در سرعت‌های بالا مشهودتر است تا سرعت‌های پایین. بنابراین برای تست‌ها در سرعت‌های پایین می‌توان از اثرات صافی سطح صرف نظر نمود. بیشترین اثر را صافی سطح بر روی ضریب نیروی محوری دارد و روی دیگر ضرائب اثرات کمتری دارد بنابراین در قسمت‌های سرعت پایین می‌توان از مدل‌های با ساخت کیفیت سطح پایین استفاده نمود و زمان و هزینه‌ی ساخت را کاهش نمود. خطا در داده‌های بدست آمده در ضرائب آیرودینامیکی کمتر از ۳ درصد می‌باشد که این درصد از خطا نیز ممکن است در اثر خطای ابعادی در مدل‌ها و اندازه‌گیری در صافی سطح مدل‌ها در نقاط مختلف باشد. بنابراین این تحقیق نشان داد که افزایش زبری می‌تواند بیشترین اثر را در زاویه‌های حمله‌ی بالا و سرعت‌های بالا به ترتیب بر روی ضریب نیروی محوری، ضریب گشتاور پیچش و ضریب نیروی نرمال داشته باشد که بیشترین اثر بر روی ضریب نیروی محوری است و با افزایش زبری رینولدز بحرانی و نسبت بین برا به پسا نیز کاهش می‌یابد.



شکل (۱۴): ضریب نیروی نرمال در ماخ ۰.۳.



شکل (۱۵): ضریب نیروی محوری در ماخ ۰.۳.

- [6] E. Maruta, M. Kandaand. J Sato , "Effects on Surface Roughness for Wind Pressure on Glass and Cladding of Buildings", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 74-76, 1 April 1998, pp. 651-663.
- [7] Beierle, Mark T, "Investigation of Effects of Surface Roughness on Symmetric Airfoil Lift and Lift-to-Drag Ratio", Doctoral thesis, 08 FEB 1999, Accession Number: ADA360065.
- [8] Elmar Achenbach, "The Effects of Surface Roughness and Tunnel Blockage on The Flow Past Spheres", Journal of Fluid Mechanics Published online by Cambridge University Press 29 Mar 2006, pp. 113-125.
- [9] Berg, Dale Evan, "Surface Roughness Effects on The Hypersonic Turbulent Boundary Layer", Doctoral thesis, <http://resolver.caltech.edu/CaltechETD:etd-11142006-154140>
- [10] Ahmadi Nadooshan, A. Daneshmand, S. Aghanajafi, C., "Evaluation of Surface Finish Affect on Aerodynamic Coefficients of Wind Tunnel RP Models Production with ABSi Material", Materials Science Forum Journal, Vols. 594, ISSN: 0255-5476, PP 255-260, 2008.
- [11] Vander Velden, A., and Kroo, I., "Aerodynamic Design of the Oblique Flying Wing Supersonic Transport", NASA CR-177552, 1998.
- [12] Katz, J., Allen, P., "Low Speed Aerodynamics from Wing Theory to Panel Method," McGraw-Hill book co, 1991.
- [13] Jones, R., and Pandey, T., "The Oblique Wing Craft Design for Transonic and Low Supersonic Speeds", Acta Astronautic, Vol. 4, Pergammon, New York, 1999.

۷- تشکر و قدردانی

این مقاله منتج از طرح پژوهشی با همین موضوع می‌باشد. هزینه طرح پژوهشی، از اعتبارات پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی تهیه گردیده است که جای تشکر و قدردانی ویژه دارد.

۸- مراجع

- [1] Adelnia, R., Daneshmand, S., and Aghanajafi, C., "Evaluation of Surface Finish Effect on Aerodynamic Coefficients of Wind Tunnel Testing Models", International Conference on Manufacturing Science and Technology, Melaka, Malaysia, 2006.
- [2] Gibson, T. M., U.S. Patent Application for "Wind Tunnel Testing", Docket No. P- 7127942, led 31 Oct. 2006.
- [3] Koster, W. P., and Field, M., "Effects of Machining Variables on the Surface and Structural Metals", Proceedings of the North American Manufacturing Research Conference, SME, 2001, pp. 67-87.
- [4] Mike S. Lou, Joseph C. Chen, Caleb M. Li. "Surface Roughness Prediction Technique for CNC End-Milling", Journal of Industrial Technology, Vol. 15, No.1, pp. 1-6, January 1999.
- [5] Vorburger, T. V, McLay, M. J, Scire, F. E., Gilsinn, D. E. , Giauque, C. H. W , "Surface Roughness Studies for Wind Tunnel Models used in High Reynolds Number Testing", Journal of Aircraft ,ISSN 0021-8669, vol. 23, Jan. 1986, pp. 56-61.