



تحلیل عددی تداخل آیرودینامیکی دو جسم سیلندری عبوری از هم در سرعت‌های مافوق صوت

محمدعلی رنجبر^{۱*}، علیرضا پورموید^۱، سینا علیمحمدیان^۲

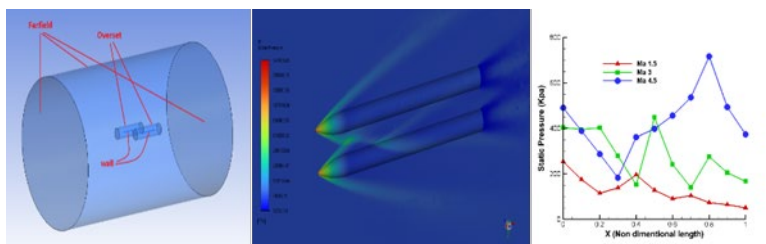
^۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران

برجسته‌ها

- بررسی تداخل آیرودینامیکی به صورت استاتیکی
- تحلیل پدیده نزدیکی به صورت ناپایا و با حرکت یک جسم در مجاورت یک جسم دیگر در سرعت‌های مافوق صوت
- بررسی اثرات تداخل آیرودینامیکی روی توزیع فشار

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵

*نویسنده مسئول:

m_a_ranjbar@hotmail.com

کلیدواژه‌ها:

تداخل آیرودینامیکی

میدان جریان

بدنه باریک

مافوق صوت

چکیده

تداخل آیرودینامیکی یکی از پدیده‌هایی است که هنگام عبور دو جسم پرنده از نزدیکی یکدیگر رخ می‌دهد. در این حالت تغییر توزیع فشار وارد شده بر اجسام عبوری از نزدیکی یکدیگر باعث تغییر در نیروهای آیرودینامیکی می‌شود. در این پژوهش به بررسی عددی میدان جریان بین دوبنده باریک در فاصله نزدیک و تغییرات فشار در طول آن‌ها در سرعت‌های مافوق صوت پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی به صورت دوبعدی و سه‌بعدی انجام شده و برای مدل‌سازی آشفتگی جریان از مدل k-omega sst استفاده شده است. دوبنده باریک در سرعت‌های ۱/۵، ۳ و ۴/۵ ماخ و در فواصل ۲، ۳ و ۴ برابر قطر بدنه یکدیگر در کنار هم قرار گرفته و در دو حالت دارای حرکت نسبی و بدون حرکت نسبی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش سرعت جریان آزاد، موج شوک از کمانی به مایل تغییر شکل می‌یابد و بین دوبنده منعکس می‌شود. همچنین با کاهش عدد ماخ جریان و افزایش فاصله بین دوبنده باریک، موج شوک منعکس شده ضعیف‌تر می‌شود. در ماخ ۱/۵ بازتاب موج شوک بین دوبنده چندان محسوس نیست درحالی‌که در ماخ ۴/۵ موج شوک به‌خوبی بین دوبنده بازتاب دارد. در حالت دارای حرکت نسبی دوبنده باریک، در نقاط بازتاب موج شوک جدایش جریان روی می‌دهد و تعداد انعکاس موج شوک نسبت به حالت بدون حرکت نسبی کمتر می‌شود.

۱- مقدمه

خود باعث تغییر در خصوصیات آیرودینامیکی می‌شود. تداخل آیرودینامیکی به ماخ، زاویه حمله، فاصله بین دو جسم و ابعاد دو جسم بستگی دارد [۱ و ۲].

برای شناخت فیزیکی کامل از پدیده تداخل آیرودینامیکی بین دودنه باریک و نحوه تغییر توزیع فشار حول این اجسام، می‌توان ابتدا آن‌ها را به صورت استاتیکی تحلیل کرد؛ یعنی آن‌ها را در فاصله‌ای معین از یکدیگر قرار داده و با شبیه‌سازی، میدان جریان و سپس توزیع فشار بین آن‌ها و نیروهای آیرودینامیکی را به دست آورد.

مورکوین [۵] به مقایسه اثر تقابلی شوک آیرودینامیکی یک بدنه تنها و یک بدنه در کنار جسمی دیگر در سرعت‌های مافوق صوت پرداخت. او با استفاده از تست‌های تجربی در تونل باد تغییرات ضریب فشار در طول بدنه را در هر دو حالت مقایسه کرد. نتایج کار او نشان می‌دهد در حالتی که دو جسم در کنار یکدیگر قرار دارند، ضریب فشار در نیمه دوم طول بدنه، افزایش ناگهانی دارد. بروش و همکاران [۶] برای بررسی تغییرات توزیع فشار بر روی یک سیلندر سه‌بعدی در مجاورت یک سطح شیب‌دار مشابه دهانه ورودی هوا یک بررسی عددی و تجربی با استفاده از تونل باد انجام دادند. سرعت جریان در این تحقیق ۳ ماخ بوده است. آن‌ها میدان جریان و توزیع فشار بین این دو سطح را بررسی کردند و برای حل عددی از یک کد رایانه‌ای که با روش تخمین لایه‌نازک معادلات ناوبر استوکس کار می‌کند، استفاده کردند. نتایج نشان داد جریان پیچیده شکل‌گرفته بین این دو جسم، باعث شکل‌گیری جدایش‌های سه‌بعدی و جریان‌های متقاطع می‌شود. همچنین دو انعکاس شوک و یک موج انبساطی در تست‌ها مشاهده شد. ولکو و درونو [۷] به بررسی عددی دو جسم بدنه باریک مجاور یکدیگر با سر مخروطی و بدنه استوانه‌ای در جریان آزاد با سرعت ۴ ماخ پرداختند. میدان جریان در فاصله بین دودنه و در طول آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در این پروژه به بررسی تأثیر فاصله بین محورهای دو جسم در میدان جریان بین آن‌ها و مشخصه‌های آیرودینامیکی هرکدام پرداخته شد. موات و اسکویو [۸] به بررسی تجربی و عددی تداخل موج شوک و لایه‌مرزی سه‌بعدی روی دودنه باریک نزدیک به هم پرداختند. سه دماغه نیم‌کره، مخروطی و اجایو برای بدنه باریک استوانه‌ای انتخاب شد. نتایج نشان داد موج شوک

بدنه‌های باریک از نظر آیرودینامیکی ویژگی‌های خاص خود را دارند و به‌طور کلی مشخصه‌های آیرودینامیکی اجسام هوافضایی هنگامی که به‌صورت مجزا قرار دارند نسبت به حالتی که در مجاورت یکدیگر هستند بسیار متفاوت می‌باشد. از دلایل این امر می‌توان به اثرگذاری دو جسم هوافضایی در فاصله نزدیک به هم روی مشخصه‌های آیرودینامیکی یکدیگر اشاره کرد. به این پدیده اصطلاحاً تداخل آیرودینامیکی گفته می‌شود. در این حالت دو جسمی که در مجاورت هم هستند، روی توزیع فشار هم اثر گذاشته و به دنبال آن بر نیروهای آیرودینامیکی وارد شده بر یکدیگر نیز اثر می‌گذارند. تداخل آیرودینامیکی به‌خصوص در جریان‌های مافوق صوت که همراه با امواج شوک و انبساط روی می‌دهد، اثر بیشتری دارد. نمونه‌های بسیاری از مجاورت اجسام هوافضایی با یکدیگر و به دنبال آن تداخل آیرودینامیکی وجود دارد. بمب‌ها و موشک‌هایی که زیر هواپیماهای جنگنده و پهپادها نصب شده‌اند و یا بوسترهای جانبی که در ماهواره‌برها به‌صورت موازی وجود دارند، از این موارد هستند.

هر جسم پرنده به‌صورت مستقل دارای مشخصات آیرودینامیکی خاصی است. یزدانی و همکاران [۱] به بررسی مؤلفه‌های هندسی بالک بر عملکرد آیرودینامیکی موشک پرداختند. آن‌ها تأثیر افزودن بالک در جلوی موشک بر پایداری، ضریب درگ، ضریب نیروی عمودی و ضریب گشتاور پیچشی را در زوایای حمله و سرعت جریان آزاد مختلف مورد بررسی قرار دادند. وانگ و همکاران [۲] نیز به بررسی مشخصه‌های دینامیکی یک موشک پرداختند. آن‌ها عدد ماخ ۰/۶ و یک گستره بزرگ از زوایای حمله را بررسی کردند. جدایش جریان موضوع اصلی پژوهش آن‌ها بود؛ اما تداخل آیرودینامیکی می‌تواند بین دو جسم که در مجاورت یکدیگر قرار گرفته‌اند در جریان مافوق صوت رخ دهد. جریان تحت تأثیر امواج ضربه‌ای و انبساطی قرار دارد که از بدنه مجاور سرچشمه می‌گیرند و متعاقباً بر بدنه مورد نظر وارد می‌شوند. تداخل آیرودینامیکی با بازتاب‌های متعدد شوک، پراش شوک و همچنین تعامل شوک لزج با جریان لایه‌مرزی پیچیده‌تر می‌شود. تمام این پدیده‌های منشأ شده، روی سطح جسم، از مناطق مختلف با فشارهای کم‌وزیاد همراه هستند که به سهم

همچنین تغییر شکل سرجنگی باعث تغییر محل جدایش اولیه جریان از جسم می‌شود. آن‌ها همچنین [۱۳] در پژوهشی دیگر با استفاده از حل عددی و نتایج آزمایشگاهی به بررسی میدان جریان و تداخل آیرودینامیکی بین دوبنده باریک در فاصله نزدیک از یکدیگر پرداختند. در دماغه‌های نیم کروی و مخروطی جدایش لایه مرزی روی بدنه باریک مشاهده شد. همچنین انعکاس موج شوک روی بدنه باریک را دسته‌بندی کرده و به تأثیر لزجت جریان در پدیده‌های فیزیکی میدان جریان در آن ناحیه پرداختند.

با بررسی پژوهش‌های قبلی مشاهده می‌شود که تقریباً در تمامی آن‌ها پدیده تداخل آیرودینامیکی، به صورت استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است؛ اما در پدیده نزدیک شدن دوبنده باریک به یکدیگر در محدوده سرعت مافوق صوت، از آنجایی که دوبنده با سرعت خیلی بالایی از کنار یکدیگر عبور می‌کنند، الگوی جریان حول آن‌ها نیز با زمان در حال تغییر می‌باشد و تحلیل دائم نمی‌تواند پاسخ دقیق و مورد قبولی را در اختیار ما بگذارد. لذا برای انجام تحلیل‌های دقیق‌تر، نیاز به انجام تحلیل‌های ناپایا وجود دارد. در این پژوهش نیز ابتدا موضوع تداخل آیرودینامیکی به صورت استاتیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در ادامه پدیده نزدیکی و عبور دو جسم به صورت ناپایا و با حرکت یک جسم در مجاورت جسم دیگر تحلیل شده و اثرات تداخل آیرودینامیکی روی توزیع فشار حول آن‌ها تحلیل می‌شود. در واقع تحلیل عددی تداخل آیرودینامیکی دو جسم در حالی که یکی از آن‌ها به دیگری نزدیک شده و از کنار آن عبور می‌کند به عنوان نوآوری این تحقیق ارائه شده است. از آنجاکه سنسورهای رادیویی موجود در برخی تسلیحات پدافندی، در سرعت‌های مافوق صوت و هنگام عبور از فاصله نزدیک هدف ضعف عملکرد دارند، تحلیل و بررسی تداخل آیرودینامیکی در این حالت می‌تواند به توسعه و نحوه کاربرد سنسورهای حساس به فشار مجاورتی در آن‌ها کمک کند.

۲- معادلات حاکم بر مسئله

اصل بقای جرم در مکانیک سیالات با معادله پیوستگی و اصل بقای اندازه حرکت در قالب معادله مومنتم بیان می‌شود. معادله انرژی نیز برای بیان پایستگی انرژی به کار می‌رود. معادلات حاکم بر جریان سیال، این سه معادله یعنی همان

حاصل از دماغه نیم کروی و مخروطی به جدایش لایه مرزی از بدنه می‌انجامد ولی در حالت دماغه اجایو جدایش در لایه مرزی کمتر اتفاق می‌افتد.

چاپلین و همکارانش [۹] به بررسی تجربی و آزمایشگاهی تداخل آیرودینامیکی دوبنده باریک در فاصله نزدیک از هم پرداختند. آن‌ها با تست‌های تونل باد متعدد در حالت‌های مختلف قرارگیری دوبنده باریک نسبت به یکدیگر در زوایای حمله مختلف و موقعیت قرارگیری نسبی در راستای طولی به بررسی نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی پرداختند. آن‌ها در پژوهشی دیگر [۱۰] آزمون‌های تونل باد را با ماخ ۳ انجام دادند و علاوه بر روش تجربی نتایج خود را به صورت تحلیلی نیز بررسی نمودند. در تست‌های تجربی اثرات شوک تداخلی روی آیرودینامیک کلی جریان بررسی شد. در این پژوهش با تغییر فاصله بین دو جسم گیرنده و تولیدکننده اغتشاش و همچنین بررسی یک بازه از زوایای حمله نسبت به یکدیگر میزان تأثیر شوک‌های تعاملی وارده مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها [۱۱] همچنین به بررسی تداخل آیرودینامیکی دوبنده باریک که یکی از آن‌ها دارای بالک می‌باشد، در فاصله نزدیک یکدیگر پرداختند. علاوه بر تست‌های تونل باد با شبیه‌سازی عددی نیز به بررسی میدان جریان در این حالت پرداختند. نتایج نشان داد در نزدیکی بالک‌ها بار آیرودینامیکی زیادی وارد می‌شود. این نیروی زیاد در برخی پیکربندی‌های بالک‌ها به قدری است که به راحتی می‌تواند باعث ناپایداری استاتیکی بدنه باریک شود.

هوسریا و اسکيو [۱۲] به صورت جامع‌تری روی این موضوع کار کردند. آن‌ها به بررسی تداخل آیرودینامیکی در بدنه‌های استوانه‌ای با دماغه مخروطی، کروی و اجایو پرداختند که می‌توان نتایج آن را به حالت Near Miss (حالتی که موشک پدافندی بدون انهدام هدف، از فاصله کمی از آن عبور می‌کند) تعمیم داد و یک راهکار جهت حل مشکل موجود ارائه نمود. آن‌ها مدل‌های مورد نظر را در تونل باد با سرعت جریان ۳ ماخ تست کرده و همچنین به شبیه‌سازی عددی مدل‌ها پرداختند. در این پروژه تغییر زاویه حمله و شکل سرجنگی بدنه‌های باریک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد شکل سرجنگی بدنه‌ها در میزان قدرت شوک‌های تشکیل شده بین دوبنده و میدان جریان در آن ناحیه تأثیر زیادی دارد.

که در رابطه ۶ و ۷، انرژی توربولانس سینماتیکی با k و نرخ مخصوص پراکندگی اغتشاشی با ω نمایش داده شده است. برای مدل‌سازی هندسه از نرم‌افزار دیزاین مدلر و برای شبکه‌بندی از نرم‌افزار انسیس مش استفاده شده است. برای تحلیل عددی نیز از نرم‌افزار انسیس فلونت نسخه ۲۰۲۱ استفاده شده است.

۳- اعتبارسنجی

برای دستیابی به تنظیمات قابل اعتماد به منظور شبیه‌سازی مدل، ابتدا به شبیه‌سازی مدل مورد اشاره در تحقیق هوسریا [۱۳] پرداخته شد و نتایج به دست آمده با نتایج ارائه شده در آن مقاله مقایسه شد. شکل ۱ نمایی از وضعیت قرارگیری دو جسم با بدنه باریک و دماغه نیم‌کره در نزدیکی یکدیگر و توزیع سرعت در آن ناحیه در سرعت جریان آزاد با ماخ ۳ را نشان می‌دهد. همچنین نتایج ضریب فشار در راستای طولی در شکل ۲ با نتایج ارائه شده در مقاله مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است نتایج تطابق خوبی دارند. حداکثر اختلاف کمتر از ۳ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج اعتبارسنجی، تنظیمات اعمال شده در نرم‌افزار فلونت برای ادامه شبیه‌سازی‌ها نیز به کار می‌رود.

۴- هندسه، شبکه‌بندی و تنظیمات حل عددی

هندسه مورد نظر دوبنده باریک استوانه‌ای با دماغه اجایو در حالت دوبندی و سه‌بعدی می‌باشد که در فاصله نزدیک به هم قرار گرفته‌اند. شکل ۳ نمایی شماتیک از هندسه مورد نظر را در حالت دو و سه‌بعدی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳ فاصله بین دو محور بدنه‌های باریک به صورت بی‌بعد و ضریبی از قطر هر کدام از بدنه‌ها در نظر گرفته می‌شود. همچنین طول بدنه باریک استوانه‌ای ۵ برابر طول دماغه اجایو می‌باشد.

۴-۱- استقلال از شبکه و گام زمانی

تولید شبکه در نرم‌افزار انسیس مش انجام شده است. برای دستیابی به شبکه مستقل ۴ مرحله شبکه ریز شده و نتایج ضریب درگ یکی از بدنه‌های باریک در سرعت ۳ ماخ مورد بررسی قرار گرفت.

معادلات معروف ناویر استوکس هستند که بر میدان جریان سیال حاکم‌اند. در سرعت‌های مافوق صوت جریان تراکم پذیر است یعنی چگالی آن تغییر می‌کند. رابطه ۱ معادله پیوستگی جریان تراکم‌پذیر و رابطه ۲ معادله مومنتم آن می‌باشد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

که در آن S_m ترم منبع، \vec{F} بیانگر نیروهای خارجی وارد بر سیستم و $\bar{\tau}$ تانسور تنش می‌باشد که مطابق رابطه ۳ تعریف می‌شود.

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \right] \quad (3)$$

رابطه ۴ همان معادله انرژی است که بیانگر تغییرات دما در سیستم می‌باشد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + P)) \\ = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T \\ - \sum_j h_j J_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \end{aligned} \quad (4)$$

در این رابطه S_h منبع حرارتی حجمی است که در سیستم وجود دارد. همچنین h_j آنتالپی محسوس و k_{eff} هدایت گرمایی مؤثر می‌باشد.

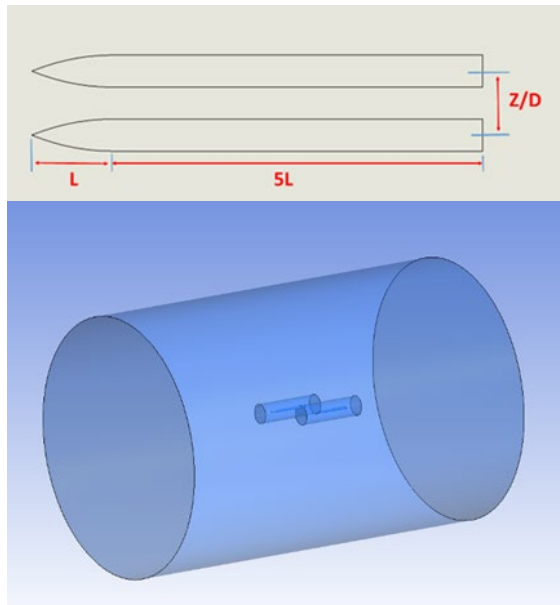
برای تکمیل دستگاه معادلات لازم است معادله گاز ایده‌آل برای محاسبه چگالی وارد شود. رابطه ۵ معادله گاز ایده‌آل را نشان می‌دهد.

$$P = \rho RT \quad (5)$$

که در آن R ثابت جهانی گازها می‌باشد. برای حل جریان مغشوش از روش RANS و مدل kw sst استفاده شده است. رابطه ۶ و ۷ معادلات حاکم بر اغتشاش جریان در این روش را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta \rho \omega k \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma \omega}{k} P - \beta \rho \omega^2 \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ + \frac{\rho \sigma_a}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (7)$$



شکل (۳): نمایی شماتیک از هندسه دوبنده باریک در کنار یکدیگر در دو حالت دو و سه بعدی.

جدول (۱): نتایج ضریب درگ در فرآیند استقلال از شبکه دوبعدی.

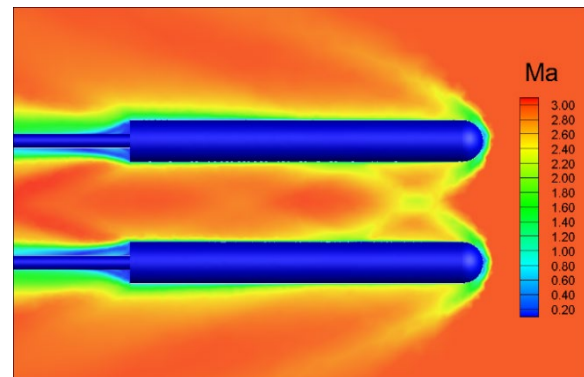
ردیف	تعداد المان (هزار)	ضریب درگ	درصد تغییر
۱	۱۵	۰/۳۲۲	-
۲	۲۲	۰/۴۱۲	۲۷/۹
۳	۳۰	۰/۴۷۹	۱۳/۸
۴	۴۴	۰/۴۸۳	۰/۸۲

جدول (۲): نتایج ضریب درگ در فرآیند استقلال از شبکه سه بعدی.

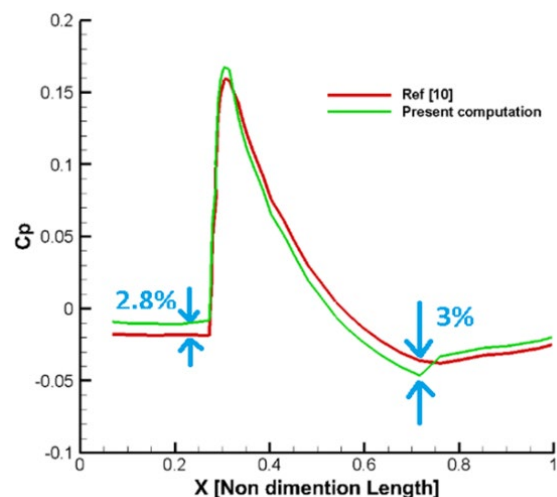
ردیف	تعداد المان	ضریب درگ	درصد تغییر
۱	۷۷۰ هزار	۰/۴۹۵	-
۲	۱/۲۴ میلیون	۰/۶۵۸	۲۴/۸
۳	۲/۱ میلیون	۰/۷۲۶	۱۰/۷
۴	۲/۹ میلیون	۰/۷۳۲	۰/۷۹

این حالت شامل یک شبکه زمینه با مش سازمان یافته و دو شبکه در ناحیه اطراف بدنه باریک، با مش بی سازمان می باشد. بیشینه خوابیدگی شبکه ۰/۹۲ و تعداد لایه های لایه مرزی ۹ با ضریب رشد ۱/۲ می باشد. با توجه به جدول در حالت سه بعدی نیز شبکه ردیف سوم با درصد خطای کمتر از ۰/۸ درصد نسبت به ردیف چهارم، به عنوان شبکه مستقل

جدول ۱ مراحل استقلال از شبکه را در حالت دوبعدی و جدول ۲ مراحل استقلال از شبکه را در حالت سه بعدی نشان می دهد. با توجه به جدول ۱، در حالت دوبعدی شبکه ردیف سوم با درصد تغییرات کمتر از ۱٪ نسبت به شبکه چهارم، می تواند به عنوان شبکه مستقل انتخاب شود. شبکه مستقل دوبعدی یک شبکه با المان های مثلثی است. میزان کشیدگی شبکه در نوع بی سازمان یکی از معیارهای کیفیت شبکه می باشد. بیشینه کشیدگی شبکه مستقل ۰/۸۷ و دارای لایه مرزی است. ارتفاع اولین لایه این لایه مرزی ۰/۰۰۰۱ و تعداد لایه ها ۷ با ضریب رشد ۱/۲ می باشد. شکل ۴ نمای دور و نزدیک شبکه مستقل دوبعدی را نشان می دهد. شکل ۵ چند نمای مختلف از شبکه مستقل سه بعدی را نشان می دهد.



شکل (۱): کانتور سرعت شبیه سازی انجام شده برای مقایسه با نتایج مرجع [۱۳].



شکل (۲): مقایسه نتایج ضریب فشار شبیه سازی انجام شده و مرجع [۱۳].

به همین منظور در یک بازه زمانی در حدود ۰/۰۷ ثانیه، ضریب درگ بدنه باریک بالایی با سه گام زمانی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۰۱ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد گام زمانی ۰/۰۰۰۱ ثانیه اختلاف بسیار کمی با ۰/۰۰۰۱ دارد؛ بنابراین می‌توان آن را به‌عنوان گام زمانی مستقل انتخاب کرد.

جدول (۳): ریز جزئیات تعداد المان در مراحل استقلال از شبکه سه‌بعدی.

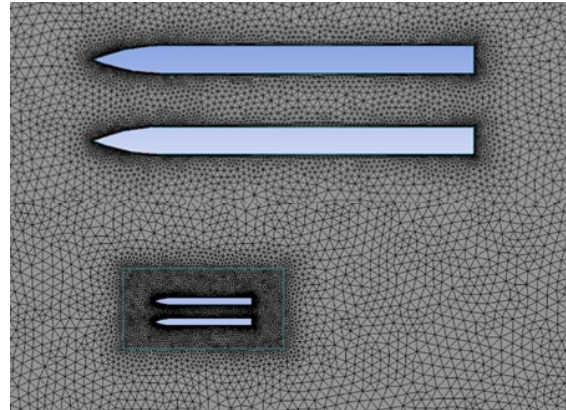
تعداد المان مش	تعداد المان مش زمینه	تعداد المان کل	ردیف
۱۳۵ هزار	۵۰۰ هزار	۷۷۰ هزار	۱
۲۴۵ هزار	۷۵۰ هزار	۱/۲۴ میلیون	۲
۴۵۰ هزار	۱/۲ میلیون	۲/۱ میلیون	۳
۹۰۰ هزار	۱/۸ میلیون	۲/۹ میلیون	۴

۴-۲- حالت‌های مورد بررسی و شرایط مرزی

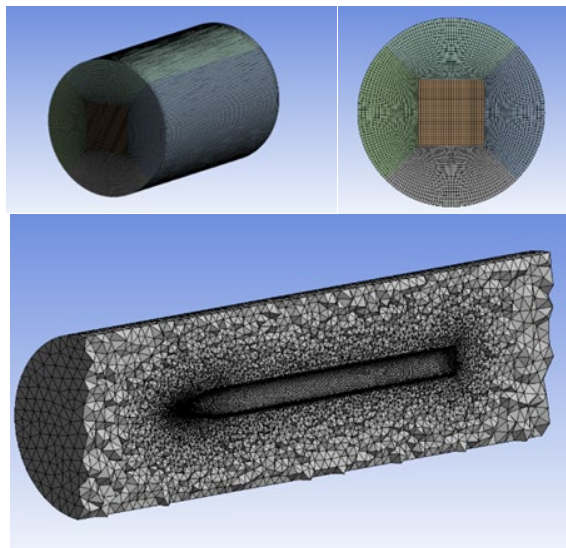
حل عددی در دو بخش انجام شده است. بخش اول حالتی است که دوبنده باریک بدون حرکت نسبی در کنار یکدیگر قرار دارند. در بخش دوم بدنه باریک پایینی، در موقعیتی عقب‌تر از بدنه باریک بالایی قرار داشته و با یک سرعت نسبی ثابت حرکت کرده و از کنار بدنه بالایی عبور می‌کند. سرعت جریان آزاد در هر دو حالت بدون حرکت نسبی و با حرکت نسبی دوبنده باریک، ۱/۵، ۳ و ۴/۵ ماخ و فاصله بین محورهای دوبنده باریک ۲، ۳ و ۴ برابر قطر هرکدام از آن‌ها در نظر گرفته شده است. در حالت با حرکت نسبی، بدنه باریک پایینی با سرعت نسبی ۰/۱ ماخ از کنار بدنه باریک بالایی عبور می‌کند.

شرایط مرزی مورد استفاده در حالت بدون حرکت نسبی و حالت دارای حرکت نسبی دوبنده باریک یکسان است با این تفاوت که در حالت دارای حرکت نسبی از شرط مرزی *overset* نیز استفاده می‌شود. شکل ۷ شرایط مرزی انتخاب شده برای شبیه‌سازی‌های حالت دارای حرکت نسبی دوبنده باریک را نشان می‌دهد. برای مرزهای استوانه بزرگ از شرط مرزی *pressure far field*، برای دیواره بدنه‌های باریک از شرط مرزی *wall* و برای مرز ناحیه اطراف بدنه‌های باریک

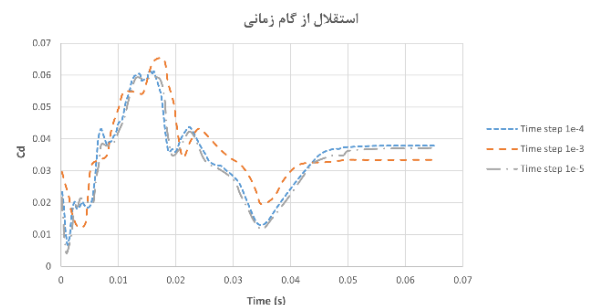
انتخاب شد. شبیه‌سازی در حالت دارای حرکت نسبی به‌صورت ناپایا انجام شده است، لذا بررسی استقلال از گام زمانی ضرورت دارد. شکل ۶ روند استقلال از گام زمانی را نشان می‌دهد.



شکل (۴): شبکه دوبعدی مستقل نمای نزدیک و نمای دور.



شکل (۵): شبکه مستقل سه‌بعدی، شامل مش زمینه (سازمان‌یافته) و مش اطراف بدنه باریک (بی‌سازمان).

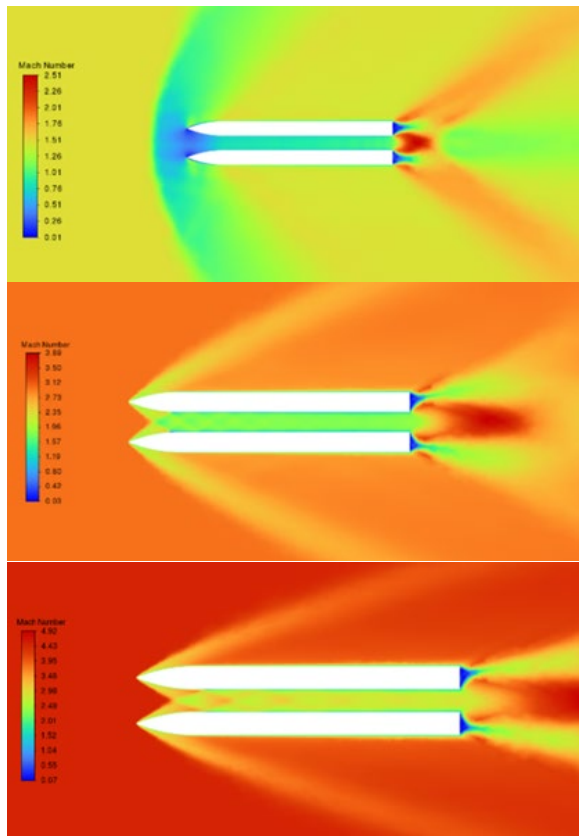


شکل (۶): روند استقلال از گام زمانی با در نظر گرفتن ضریب درگ در بازه زمانی ۰/۰۷ ثانیه.

قطر هرکدام از بدنه‌های باریک در ماخ‌های جریان آزاد ۱/۵، ۳ و ۴/۵ پرداخته می‌شود.

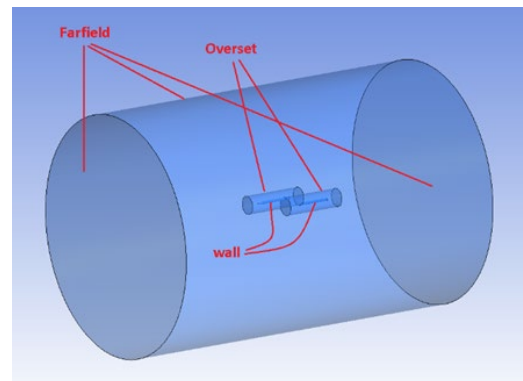
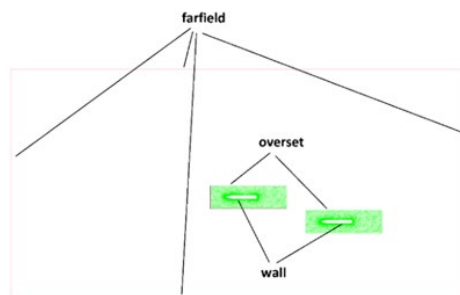
۵-۱- فاصله بین محورها ۲ برابر قطر

شکل ۸ کانتور سرعت (ماخ) را در حالت بدون حرکت نسبی دوبنده در سرعت‌های جریان آزاد ۱/۵، ۳ و ۴/۵ ماخ و شکل ۹ کانتور سرعت را در حالت دارای حرکت نسبی در همان اعداد ماخ جریان آزاد در حالت دوبعدی نشان می‌دهد.



شکل ۸): کانتور سرعت در حالت بدون حرکت نسبی دوبنده باریک دوبعدی در سرعت جریان آزاد ۱/۵ (بالا)، ۳ (وسط) و ۴/۵ (پایین) ماخ بافاصله محورهای دو برابر قطر بدنه باریک. همان‌طور که در دو شکل ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، در هر دو حالت دارای حرکت نسبی و بدون حرکت نسبی در جریان آزاد با سرعت ۱/۵ ماخ یک موج شوک کمانی در جلوی بدنه‌های باریک شکل می‌گیرد؛ اما در حالت دارای حرکت نسبی موج شوک کمانی تقارن ندارد. در جریان آزاد با سرعت ۳ و ۴/۵ ماخ موج شوک مایل چسبیده به دماغه ایجاد می‌شود. این موج شوک در فاصله بین دوبنده باریک شروع به منعکس

در حالت دارای حرکت نسبی، از شرط مرزی *overset* استفاده شده است. در حالت بدون حرکت نسبی این شرط مرزی وجود ندارد.



شکل (۷): شرایط مرزی در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی.

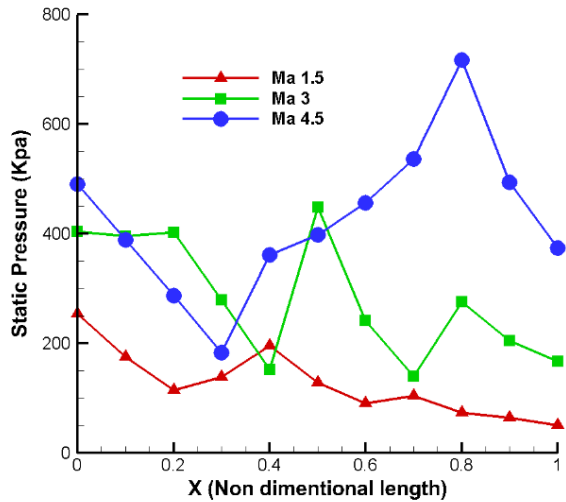
۴-۳- تنظیمات حل عددی

همان‌طور که اشاره شد شبیه‌سازی در سرعت‌های مافوق صوت انجام می‌شود؛ بنابراین جریان تراکم‌پذیر است و برای چگالی باید از مدل گاز ایده‌آل استفاده شود. لزجت و گرمای ویژه هوا ثابت فرض شده است. برای مدل‌سازی اغتشاش جریان از مدل *k-omega SST* استفاده شده و نتایج پارامتر بی بعد γ^+ برای شبکه مستقل کمتر از ۱ شده است. نوع حلگر چگالی پایه انتخاب و از روش حل ضمنی استفاده شده است. برای حالت بدون حرکت نسبی از حل پایا و در حالت دارای حرکت نسبی از حل ناپایا با گام زمانی 0.0001 ثانیه استفاده شده است. تمامی شبیه‌سازی‌ها در شرایط اتمسفر با ارتفاع ۱ کیلومتری و فشار محیطی ۹۰ کیلو پاسکال انجام شده‌اند.

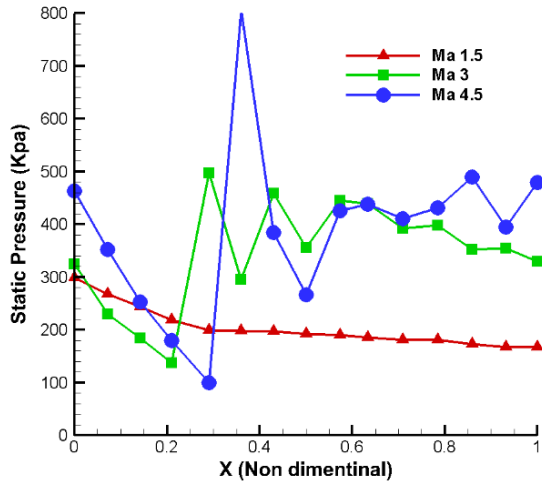
۵- بحث و بررسی

در این بخش به تحلیل و تفسیر کانتورهای سرعت در حالت دوبعدی و سه‌بعدی و در فواصل بین محوره‌های ۲، ۳ و ۴ برابر

دارای بدون حرکت نسبی، به دماغه نزدیک‌تر است. سرعت نسبی بین دوبنده باعث می‌شود محل برخورد انعکاس موج شوک به تأخیر بیافتد. این امر با افزایش عدد ماخ جریان آزاد و شکل‌گیری موج شوک با زاویه کمتر، نمود بیشتری دارد.



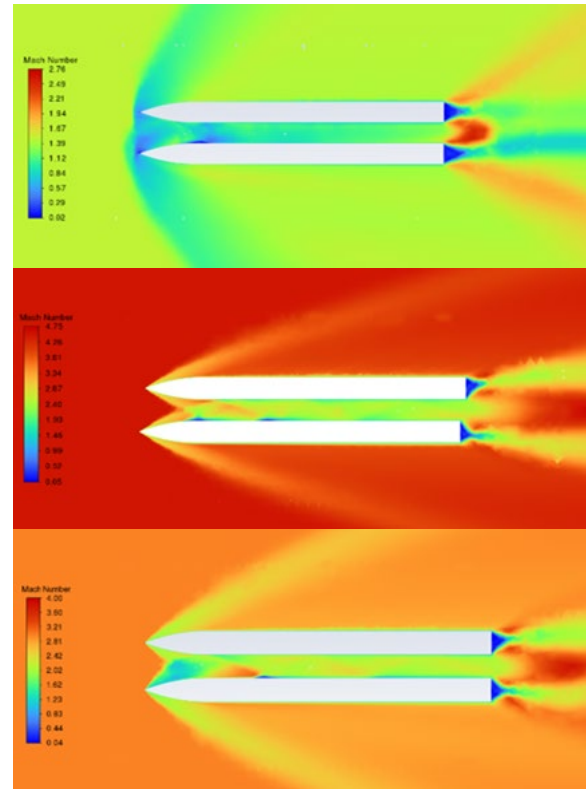
شکل (۱۰): تغییرات فشار استاتیکی در طول بدنه باریک پایینی در حالت دوبعدی و دارای حرکت نسبی و فاصله بین محوره‌های ۲ برابر قطر بدنه باریک.



شکل (۱۱): تغییرات فشار استاتیکی در طول بدنه باریک پایینی در حالت دوبعدی و بدون حرکت نسبی و فاصله بین محوره‌های ۲ برابر قطر بدنه.

شکل ۱۲ نیز کانتور فشار استاتیکی را در حالت سه‌بعدی و فاصله بین محوره‌های دوبنده باریک دو برابر قطر در سرعت‌های جریان آزاد ۱/۵، ۳ و ۴/۵ ماخ نشان می‌دهد.

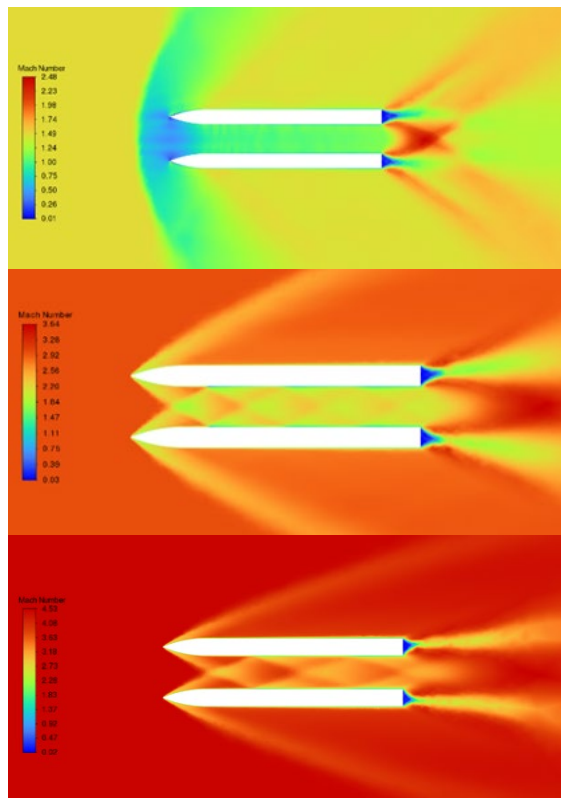
شدن بین بدنه‌ها می‌کند. در حالت بدون حرکت نسبی تعداد انعکاس شوک‌ها بیشتر است. در حالت دارای حرکت نسبی، بدنه باریک پایینی دارای سرعت بیشتری نسبت به بدنه باریک بالایی است. به همین دلیل در محل برخورد انعکاس موج شوک بر بدنه باریک پایینی، چرخش و جدایش جریان در فضای بین دوبنده باریک مشاهده می‌شود. با افزایش عدد ماخ جدایش جریان در محل برخورد انعکاس موج شوک با قدرت بیشتری رخ می‌دهد.



شکل (۹): کانتور سرعت در حالت دارای حرکت نسبی دوبنده باریک دوبعدی در سرعت جریان آزاد ۱/۵ (بالا)، ۳ (وسط) و ۴/۵ (پایین) ماخ بافاصله محوره‌های دو برابر قطر بدنه باریک.

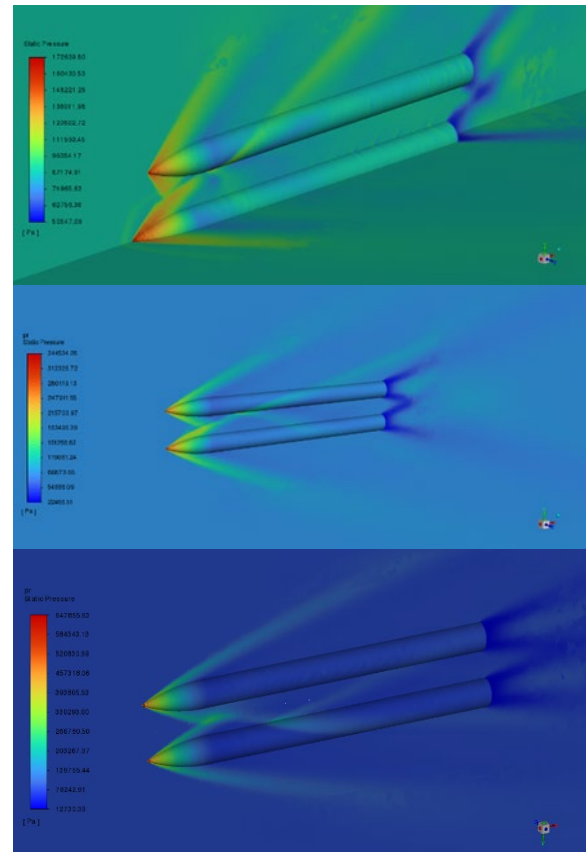
شکل ۱۰ تغییرات فشار استاتیکی روی بدنه باریک پایینی را در حالت دارای حرکت نسبی و شکل ۱۱ در حالت بدون حرکت نسبی دوبنده باریک نشان می‌دهد. این تغییرات فشار مربوط به لبه بالایی جسم پایینی است. شکل ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهند که در حالت بدون حرکت نسبی، تعداد انعکاس موج شوک بین دوبنده بیشتر است. بیشینه فشار استاتیکی روی لبه بدنه باریک پایینی در حالت دارای حرکت نسبی و بدون حرکت نسبی تفاوت زیادی ندارد اما مکان رخداد آن در حالت

نسبی، موج شوک کمانی بافاصله از دماغه دوبدنه باریک تشکیل می‌شود اما در حالت دارای حرکت نسبی، موج شوک کمانی چسبیده به دماغه دوبدنه باریک مشاهده می‌شود. در سرعت جریان آزاد ۳ ماخ، سه برخورد انعکاس موج شوک بر روی بدنه باریک پایینی مشاهده می‌شود. در سرعت ۴/۵ ماخ این تعداد به دو می‌رسد. دلیل آن کم‌تر شدن زاویه موج شوک مایل به دلیل افزایش سرعت جریان آزاد است.



شکل (۱۳): کانتور سرعت در حالت بدون حرکت نسبی دوبدنه باریک دوبعدی در سرعت جریان آزاد ۱/۵ (بالا)، ۳ (وسط) و ۴/۵ (پایین) ماخ در حالت سه‌بعدی بافاصله محورهای سه برابر قطر بدنه باریک.

شکل ۱۵: تغییرات فشار استاتیکی روی بدنه باریک پایینی را در حالت دارای حرکت نسبی و شکل ۱۶ در حالت بدون حرکت نسبی دوبدنه را در حالت دوبعدی و فاصله بین محورهای سه برابر قطر نشان می‌دهد. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمودارهای تغییر فشار نوسانی است. این نوسان‌ها به علت بازتاب یا انعکاس موج شوک برگشتی از بدنه باریک بالایی بر روی بدنه باریک پایینی است.

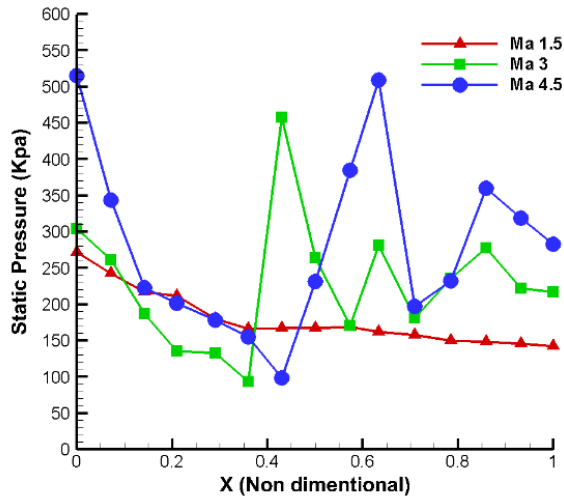


شکل (۱۲): کانتور سه‌بعدی تغییرات فشار استاتیکی در حالت دارای حرکت نسبی دوبدنه باریک در سرعت جریان آزاد ۱/۵ (بالا)، ۳ (وسط) و ۴/۵ (پایین) ماخ بافاصله محورهای دو برابر قطر بدنه باریک.

در حالت سه‌بعدی در هر سه ماخ جریان آزاد ۱/۵، ۳ و ۴/۵ موج شوک مایل مخروطی شکل می‌گیرد. در جریان آزاد با ماخ ۱/۵ زاویه موج شوک بارزتر و تداخل موج شوک‌ها بیشتر است و در جریان آزاد با ماخ ۴/۵، موج شوک خوابیده‌تر است و انعکاس موج شوک روی بدنه پایینی به‌خوبی مشاهده می‌شود.

۵-۲- فاصله بین محورها ۳ برابر قطر

در حالتی که فاصله محورهای دوبدنه باریک ۳ برابر قطر هرکدام از آنها باشد نیز میدان سرعت موردبررسی قرار گرفت. شکل ۱۳ کانتور سرعت (ماخ) را در حالت بدون حرکت نسبی دوبدنه در سرعت‌های جریان آزاد ۱/۵، ۳ و ۴/۵ ماخ و شکل ۱۴ در حالت با حرکت نسبی نشان می‌دهد. در این حالت نیز در سرعت جریان آزاد ۱/۵ ماخ و بدون حرکت



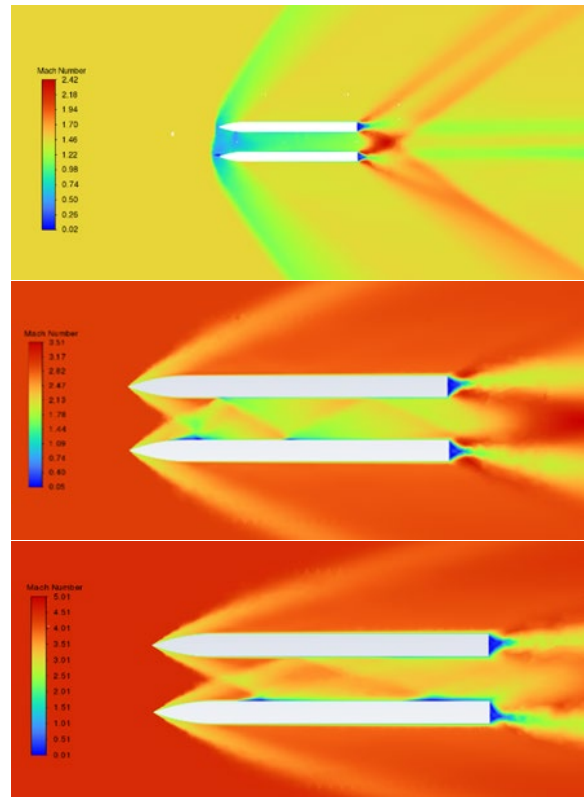
شکل (۱۶): تغییرات فشار استاتیکی در طول بدنه باریک پایینی در حالت بدون حرکت نسبی و دوبعدی در فاصله بین محورهای ۳ برابر قطر بدنه باریک.

در مقایسه دو شکل ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود که تعداد نوسانات فشار در طول بدنه در حالت بدون حرکت نسبی در سرعت ۳ ماخ بیشتر است و در سرعت ۴/۵ ماخ موج شوک انعکاسی در حالت بدون حرکت نسبی قدرت بیشتری دارد. شکل ۱۷ نیز کانتور فشار استاتیکی را در حالت سه‌بعدی و فاصله بین محورهای دوبدنه باریک سه برابر قطر در سرعت‌های جریان آزاد ۱/۵، ۳ و ۴/۵ ماخ نشان می‌دهد. در حالت سه‌بعدی موج شوک مخروطی است؛ بنابراین تداخل دو موج شوک حاصل از دوبدنه باریک مجاور هم مانند تداخل دو مخروط می‌باشد.

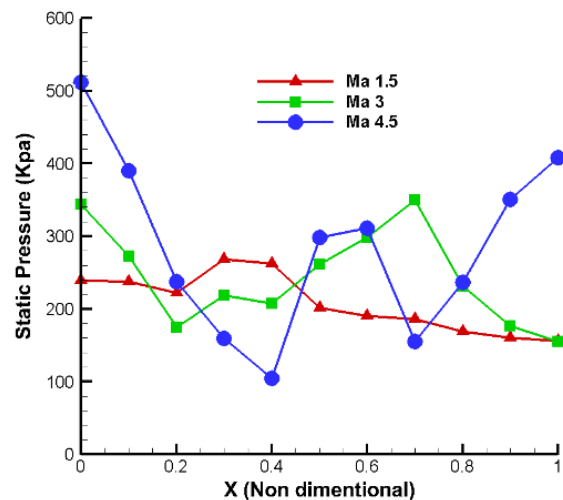
۵-۳- فاصله بین محورها ۴ برابر قطر

در این مرحله به بررسی میدان سرعت در حالتی که فاصله بین محورهای دوبدنه باریک ۴ برابر قطر هر کدام از آنها است، پرداخته می‌شود. شکل ۱۷ کانتور سرعت (ماخ) را در حالتی که دوبدنه باریک بدون حرکت نسبی هستند نشان می‌دهد. سرعت جریان آزاد ۱/۵، ۳ و ۴/۵ ماخ می‌باشد.

در شکل ۱۸ در سرعت جریان آزاد ۱/۵ ماخ، تشکیل موج شوک مایل و متقارن که به هر دو دماغه چسبیده است، مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت جریان آزاد به ۳ و ۴/۵ ماخ زاویه موج شوک مایل کم‌تر شده و موج شوک بین دوبدنه

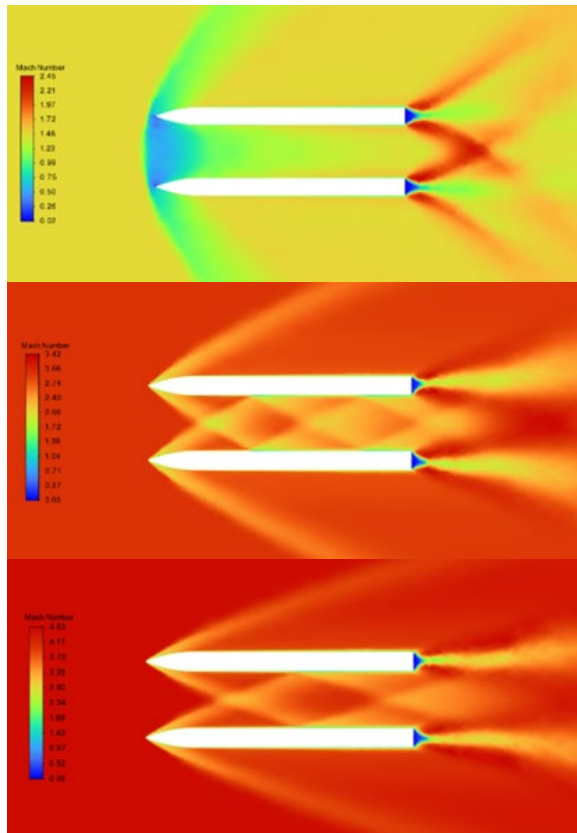


شکل (۱۴): کانتور سرعت در حالت دارای حرکت نسبی دوبدنه باریک دوبعدی در سرعت جریان آزاد ۱/۵ (بالا)، ۳ (وسط) و ۴/۵ (پایین) ماخ در حالت سه‌بعدی با فاصله محورهای سه برابر قطر بدنه باریک.



شکل (۱۵): تغییرات فشار استاتیکی در طول بدنه باریک پایینی در حالت دارای حرکت نسبی و حالت دوبعدی در فاصله بین محورهای ۳ برابر قطر بدنه باریک.

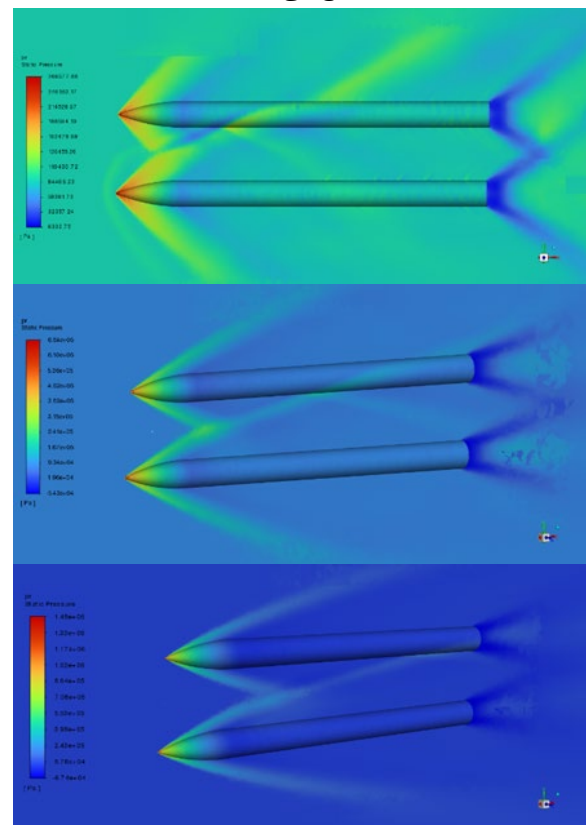
حرکت نسبی در جریان آزاد با سرعت ماخ ۳ تعداد انعکاس موج شوکها بیشتر است. همچنین در حالت دارای حرکت نسبی در موقعیت‌های برگشت انعکاس موج شوک روی بدنه باریک پایینی جدایش موضعی لایه مرزی و جریان به‌طور مشخص مشاهده می‌شود.



شکل (۱۸): کانتور سرعت در حالت بدون حرکت نسبی دوبدنه باریک دوبردی در سرعت جریان آزاد ۱/۵ (بالا)، ۳ (وسط) و ۴/۵ (پایین) ماخ بافاصله محورهای چهار برابر قطر بدنه باریک.

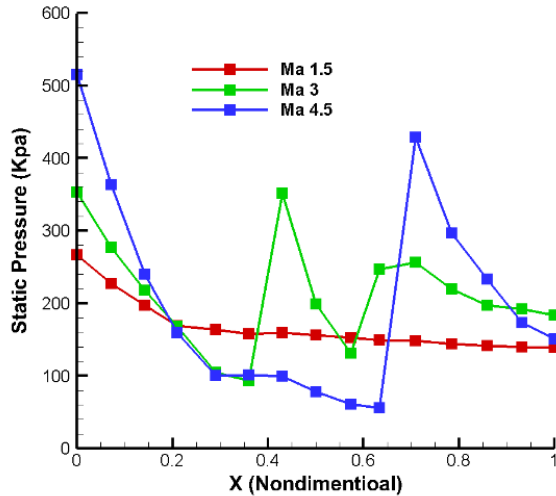
شکل ۲۰: تغییرات فشار استاتیکی روی بدنه باریک پایینی را در حالت دارای حرکت نسبی و **شکل ۲۱:** در حالت بدون حرکت نسبی دوبدنه باریک در حالت فاصله بین محورهای ۴ برابر قطر هرکدام از بدنه‌های باریک نشان می‌دهد. همانند دو حالت قبلی در این موقعیت قرارگیری دوبدنه باریک نسبت به هم نیز نمودارهای تغییرات فشار نوسانی هستند، با این تفاوت که در این حالت با افزایش فاصله بین دوبدنه نسبت به حالت قبلی تعداد موج شوک‌های منعکس شده تقریباً در هر دو حالت دارای حرکت نسبی و بدون حرکت نسبی برابر است.

منعکس می‌شود. در این فاصله بین دوبدنه، در سرعت‌های جریان آزاد ۳ و ۴/۵ ماخ، انعکاس موج شوک به بدنه پایینی به ترتیب دو و یک مرتبه رخ می‌دهد.



شکل (۱۷): کانتور تغییرات فشار استاتیکی در طول بدنه باریک پایینی در حالت سه‌بعدی دارای حرکت نسبی در فاصله بین محورهای ۳ برابر قطر بدنه باریک در ماخ جریان آزاد ۱/۵ (بالا)، ۳ (وسط) و ۴/۵ (پایین).

شکل ۱۹: کانتور سرعت را در حالت دارای حرکت نسبی دوبدنه باریک دوبردی نشان می‌دهد. سرعت جریان آزاد مانند حالت قبلی ۱/۵، ۳ و ۴/۵ ماخ و فاصله بین محورهای دوبدنه باریک ۴ برابر قطر هرکدام از بدنه‌ها می‌باشد. در این موقعیت قرارگیری دوبدنه نسبت به یکدیگر در حالت بدون حرکت نسبی موج شوک کمانی در جلوی دماغه اجایو شکل می‌گیرد ولی در حالت دارای حرکت نسبی، موج شوک کمانی مقداری تداخل دارد. این تداخل باعث می‌شود در فاصله بین دوبدنه، میدان جریانی پیچیده تشکیل شود. در سرعت ۳ و ۴/۵ ماخ، موج شوک مایل در هر دو حالت بدون حرکت نسبی و دارای حرکت نسبی دوبدنه، ایجاد می‌شود ولی در حالت بدون

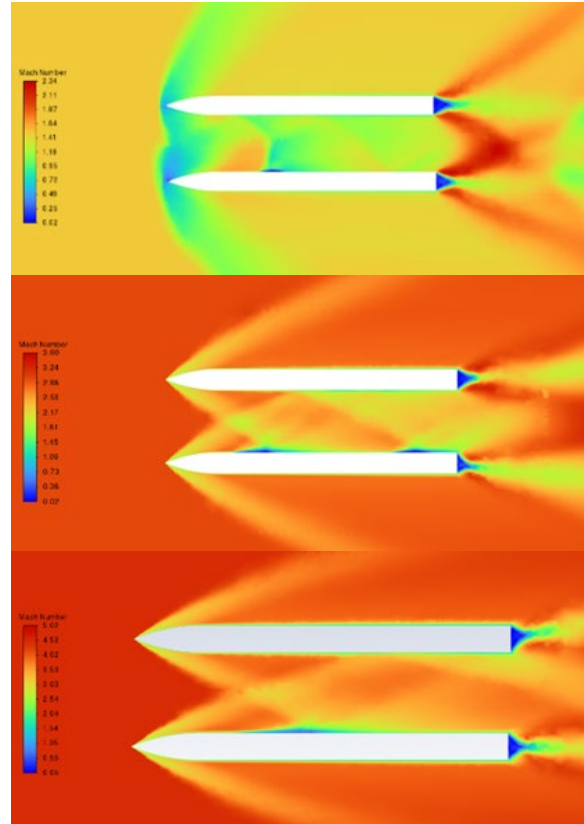


شکل (۲۱): تغییرات فشار استاتیکی در طول بدنه باریک پایینی در حالت دوبعدی بدون حرکت نسبی و فاصله بین محورهای ۴ برابر قطر بدنه.

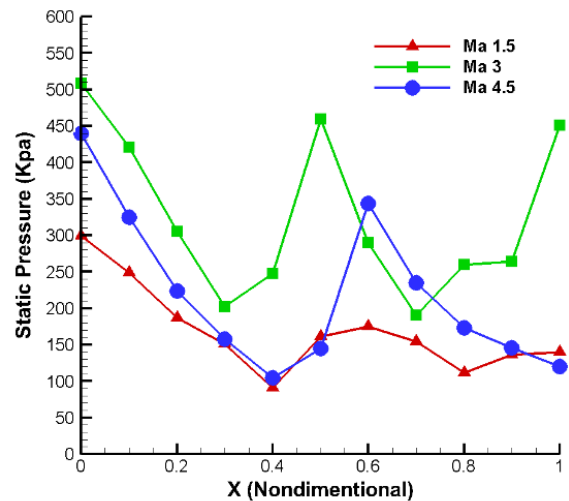
شکل ۲۲ نیز کانتور فشار استاتیکی را در حالت سه‌بعدی و فاصله بین محورهای دوبنده باریک چهار برابر قطر در سرعت‌های جریان آزاد ۱/۵، ۳ و ۴/۵ و حالت دارای حرکت نسبی نشان می‌دهد. در فاصله بین محورهای ۴ برابر قطر سه‌بعدی نیز دو موج شوک مخروطی باهم تداخل دارند. در این حالت در ماخ جریان آزاد ۱/۵ بازتاب انعکاس موج شوک روی بدنه باریک پایینی مشاهده می‌شود ولی در ماخ جریان آزاد ۳ و ۴/۵ به علت خوابیده‌تر شدن زاویه موج شوک قوی‌تر بودن موج شوک بدنه باریک پایینی (به علت سرعت نسبی بیشتر) بازتاب موج شوک به بدنه باریک پایینی نمی‌رسد ولی اثر مستقیم موج شوک بدنه باریک بالایی تا حدودی بر بدنه باریک پایینی وارد می‌شود. شکل ۲۳ تداخل شوک بین دوبنده باریک را از نمای روبرو نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است دو ناحیه حلقوی ناشی از موج شوک با یکدیگر برخورد می‌کنند.

۵-۴- توزیع فشار در طول بدنه در حالت سه‌بعدی

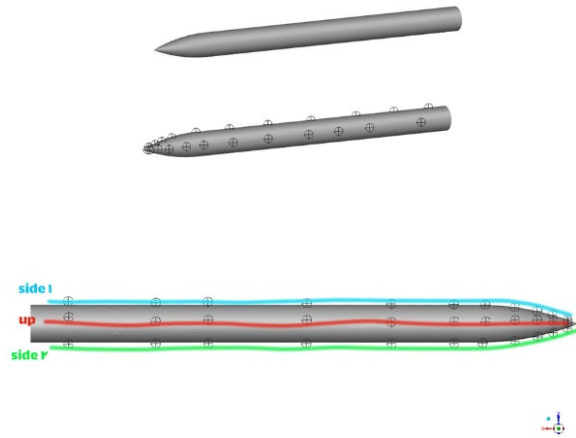
علاوه بر بررسی کانتور فشار، میزان تغییرات فشار استاتیکی در طول بدنه نیز مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان در مورد نوسانات فشار روی بدنه بیشتر دقیق شد. شکل ۲۴ نقاطی را نشان می‌دهد که مقادیر فشار استاتیکی در طول بدنه باریک پایینی به‌طور دقیق از شبیه‌سازی به‌دست‌آمده است.



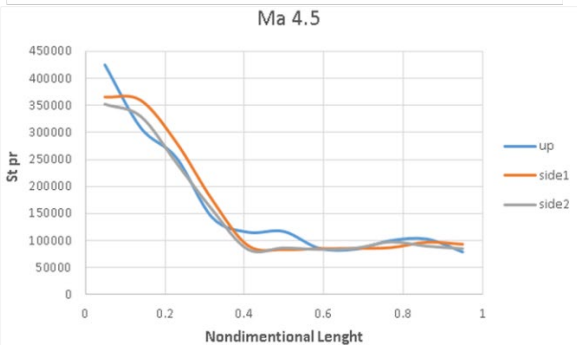
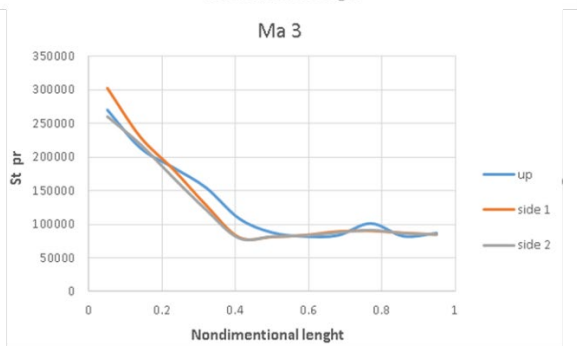
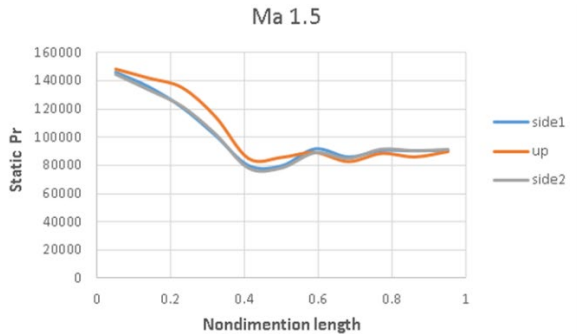
شکل (۱۹): کانتور سرعت در حالت دارای حرکت نسبی دوبنده باریک دوبعدی در سرعت جریان آزاد ۱/۵ (بالا)، ۳ (وسط) و ۴/۵ (پایین) ماخ بافاصله محورهای چهار برابر قطر بدنه باریک.



شکل (۲۰): تغییرات فشار استاتیکی در طول بدنه باریک پایینی در حالت دارای دوبعدی دارای حرکت نسبی و فاصله بین محورهای ۴ برابر قطر بدنه باریک.

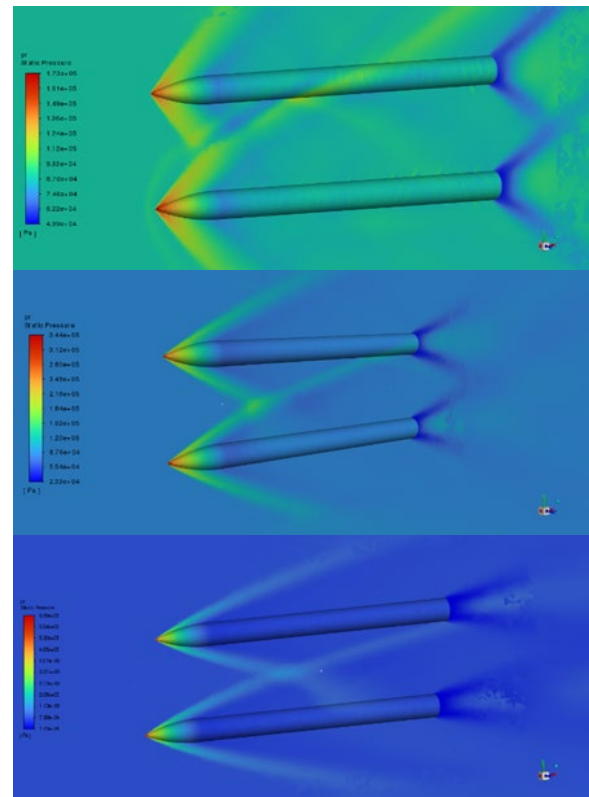


شکل (۲۴): نمای سه‌بعدی (تصویر بالا) و نما از بالا (تصویر پایین) بدنه باریک پایینی، نقاط بالایی با up و نقاط طرفین بدنه با side 1 و side 2 مشخص شده‌اند.

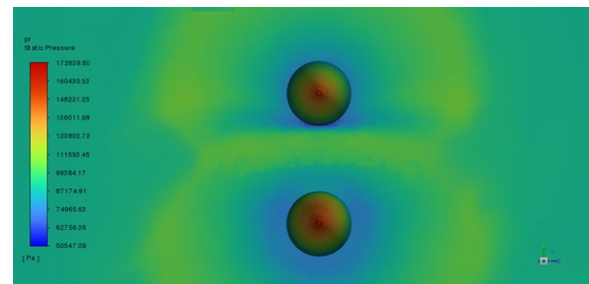


شکل (۲۵): تغییرات فشار در طول بدنه باریک پایینی در فاصله بین محورهای ۲ برابر قطر بدنه در حالت سه‌بعدی.

به‌عنوان مثال، شکل ۲۵ نمودار تغییرات فشار استاتیکی در نقاط ذکر شده در طول بدنه باریک پایینی در فاصله بین محورهای ۲ برابر قطر در حالت سه‌بعدی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در هر سه سرعت، نوسانات فشاری ناشی از بازتاب موج شوک بر روی بدنه پایینی در طول نیمه دوم بدنه رخ می‌دهد.

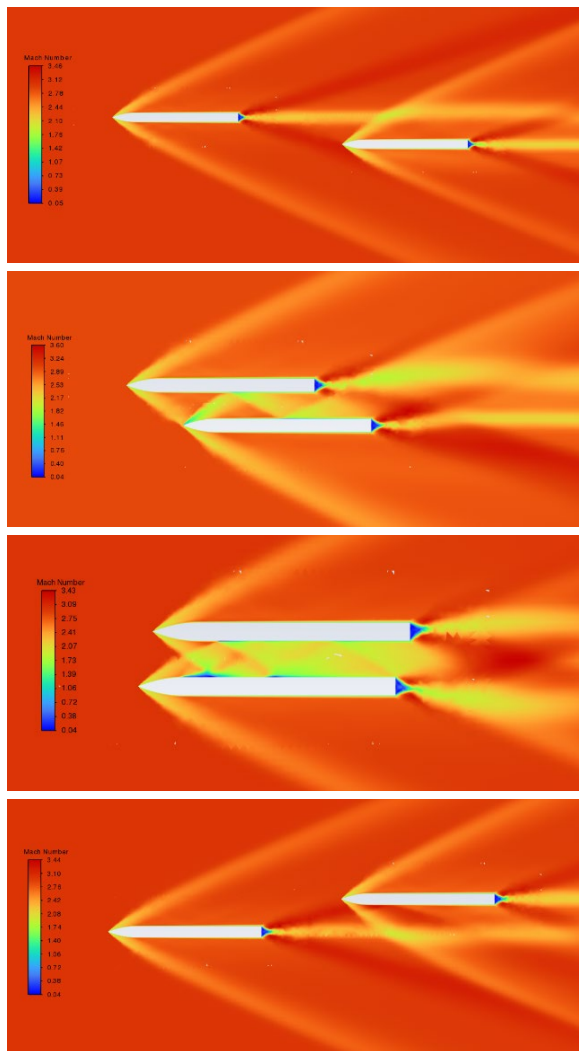


شکل (۲۲): کانتور تغییرات فشار استاتیکی در طول بدنه باریک پایینی در حالت سه‌بعدی دارای حرکت نسبی در فاصله بین محورهای ۳ برابر قطر بدنه باریک در ماخ جریان آزاد ۱/۵ (بالا)، ۳ (وسط) و ۴/۵ (پایین).



شکل (۲۳): کانتور تغییرات فشار استاتیکی در حالت سه‌بعدی دارای حرکت نسبی در فاصله بین محورهای ۲ برابر قطر بدنه باریک در ماخ جریان آزاد ۱/۵.

فشار در جهت عمودی تغییر کرده و یک نیروی رو به پایین (لیفت منفی) تولید می‌شود. در سرعت جریان آزاد $1/5$ ماخ این مورد شدت کمتری دارد. در سرعت جریان آزاد 3 ماخ انعکاس موج شوک نسبت به سرعت جریان آزاد $4/5$ ماخ قدرت کمتری دارد ولی سه مرتبه بر بدنه باریک پایینی بازتاب می‌شود درحالی‌که در سرعت $4/5$ به دلیل کمتر شدن زاویه موج شوک، بازتاب موج شوک دو مرتبه رخ می‌دهد. به همین دلیل بیشینه میزان تولید نیروی رو به پایین در دو سرعت جریان آزاد 3 و $4/5$ ماخ تقریباً یکسان است.



شکل (۲۶): موقعیت قرارگیری دوبدنه باریک نسبت به هم در هنگام عبور از نزدیکی یکدیگر در فاصله بین محورهای 3 برابر قطر هر کدام.

در این قسمت در سرعت ماخ $1/5$ تعداد نوسانات بیشتر است و دلیل آن کمتر بودن زاویه موج شوک نسبت به سرعت 3 و $4/5$ ماخ است. به همین ترتیب با افزایش فاصله بین دوبدنه به 3 و 4 برابر قطر نیز مشاهده می‌شود که نوسانات فشاری ناشی از بازتاب موج شوک بر روی بدنه پایینی در طول نیمه دوم بدنه رخ می‌دهد.

۵-۵- بررسی نیروهای آیرودینامیکی

همان‌طور که اشاره شد، در این تحقیق به بررسی عبور دوبدنه باریک از نزدیکی یکدیگر در محدوده سرعت مافوق صوت پرداخته شده است. بررسی نیروهای آیرودینامیکی در حین عبور بدنه باریک پایینی از فاصله نزدیک بدنه باریک بالایی می‌تواند به فهم چگونگی میدان جریان در این بازه زمانی کوتاه، کمک کند. شکل ۲۶ موقعیت بدنه باریک پایینی را از ابتدا تا انتهای زمان شبیه‌سازی آن برای عبور از نزدیکی بدنه باریک بالایی را نشان می‌دهد.

برای درک بهتر میدان جریان در ادامه نیروهای لیفت و درگ در بدنه باریک پایینی در این بازه زمانی بررسی می‌شوند. شکل ۲۷ نیروی درگ و شکل ۲۸ نیروی لیفت بدنه باریک پایینی را در بازه زمانی عبور دوبدنه باریک از نزدیکی یکدیگر نشان می‌دهند. این مورد برای فاصله بین محورهای دوبدنه باریک 3 برابر قطر هر کدام در نظر گرفته شده است.

با توجه به شکل ۲۷ در هر سه سرعت جریان آزاد $1/5$ ، 3 و $4/5$ ماخ، نیروی درگ وارد شده بر بدنه باریک پایینی در موقعیتی که به موازات بدنه باریک بالایی قرار دارد، افزایش ناگهانی نسبت به قبل و بعد از آن خواهد داشت. این مورد برای جریان آزاد با ماخ $1/5$ شدت کمتری دارد. وقتی انعکاس موج شوک از بدنه باریک بالایی با بدنه باریک پایینی برخورد می‌کند، نیرویی بر بدنه باریک پایینی وارد می‌شود که می‌توان آن را به دو راستای جریان آزاد و راستای عمود بر جریان آزاد تجزیه کرد. مؤلفه نیروی در راستای جریان این برخورد، باعث افزایش نیروی درگ وارد شده بر بدنه باریک پایینی می‌شود.

همچنین با توجه به شکل ۲۸ به دلیل برخورد موج شوک و انعکاس آن از بدنه باریک بالایی به بدنه باریک پایینی در موقعیتی که دوبدنه باریک به موازات یکدیگر قرار دارند، توزیع

(۲) در حالت سه‌بعدی، موج شوک مخروطی در هر سه سرعت جریان آزاد $1/5$ ، 3 و $4/5$ ماخ شکل می‌گیرد و تداخل موج شوک بدنه باریک بالایی و پایینی به مانند تداخل دو مخروط می‌باشد. در حالت سه‌بعدی، در ماخ جریان آزاد $1/5$ بازتاب موج شوک بر بدنه باریک پایینی مشاهده می‌شود ولی در ماخ 3 و $4/5$ به دلیل کم شدن زاویه موج شوک مخروطی (اصطلاحاً خوابیده‌تر شدن موج شوک) بازتاب موج شوک بر بدنه باریک پایینی مشاهده نمی‌شود ولی اثر مستقیم موج شوک بدنه باریک بالایی بر بدنه باریک پایینی وارد می‌شود.

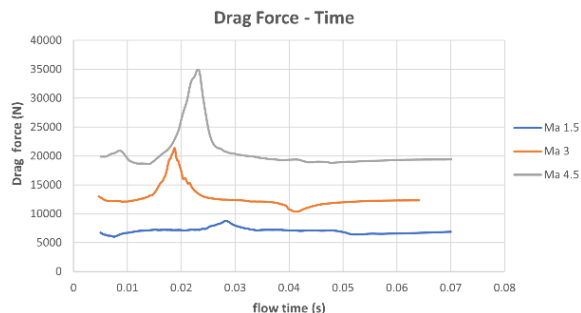
(۳) با افزایش فاصله بین محورهای دوبدنه باریک تعداد انعکاس موج شوک بین دوبدنه کاهش می‌یابد. در حالت بدون حرکت نسبی دوبدنه باریک، در فاصله بین محورهای دو و سه برابر قطر هر بدنه باریک، تعداد انعکاس موج شوک‌ها بیشتر از حالت دارای حرکت نسبی است و در فاصله بین محورهای چهار برابر قطر بدنه باریک، تعداد انعکاس موج شوک‌ها بین دوبدنه در هر دو حالت یکسان است.

(۴) در هر سه موقعیت قرارگیری دوبدنه نسبت به یکدیگر، در حالت دارای حرکت نسبی بین دوبدنه جدایش جریان به‌خصوص در سرعت‌های 3 و $4/5$ ماخ بر روی بدنه باریک پایینی مشاهده می‌شود. سرعت نسبی دوبدنه و انعکاس موج شوک عامل مؤثر هستند.

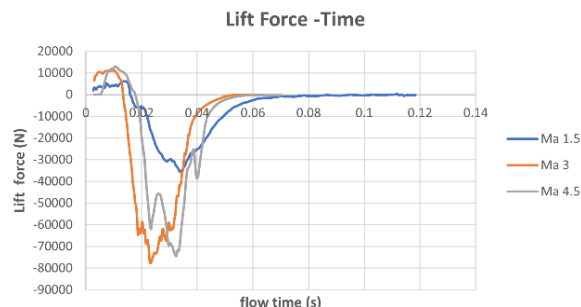
(۵) با افزایش فاصله بین دوبدنه باریک، موج شوک منعکس شده بین دوبدنه قدرت کمتری دارد و دامنه تغییرات فشار در طول بدنه باریک پایینی کوچک‌تر می‌شود.

(۶) بیشترین نوسانات فشاری ناشی از بازتاب موج شوک بر روی بدنه پایینی در طول نیمه دوم بدنه رخ می‌دهد؛ بنابراین محل مناسب برای نصب سنسورهای حساس به فشار مجاورتی در نیمه دوم بدنه باریک است.

(۷) بزرگی نیروهای آیرودینامیکی وارد شده بر بدنه باریک پایینی در بازه زمانی عبور از نزدیکی بدنه



شکل (۲۷): نیروی درگ بر روی بدنه باریک پایینی در حین عبور از نزدیکی بدنه باریک بالایی در فاصله بین محورهای 3 برابر قطر هر کدام و سرعت جریان آزاد $1/5$ ، 3 و $4/5$ ماخ.



شکل (۲۸): نیروی لیفت بر روی بدنه باریک پایینی در حین عبور از نزدیکی بدنه باریک بالایی در فاصله بین محورهای 3 برابر قطر هر کدام و سرعت جریان آزاد $1/5$ ، 3 و $4/5$ ماخ.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی میدان جریان در پدیده تداخل آیرودینامیکی دوبدنه باریک در سرعت‌های مافوق صوت پرداخته شد. دوبدنه باریک دوبعدی و سه‌بعدی با دماغه اجابو و قطر یکسان در نزدیکی یکدیگر در دو حالت دارای حرکت نسبی و بدون حرکت نسبی، نسبت به هم مورد بررسی قرار گرفتند. سرعت جریان آزاد $1/5$ ، 3 و $4/5$ ماخ و فاصله بین محورهای دوبدنه باریک 2 ، 3 و 4 برابر قطر هر کدام از بدنه‌ها در نظر گرفته شد. بعد از انجام شبیه‌سازی‌ها و بررسی آن‌ها نتایج زیر به دست آمد:

(۱) با افزایش سرعت جریان آزاد از $1/5$ به 3 ماخ و در مرحله بعد به $4/5$ ماخ، موج شوک جلوی دوبدنه باریک در حالت دوبعدی، از کمانی به مایل تغییر شکل می‌یابد و در هر سه فاصله بین محورهای دوبدنه باریک، بین دوبدنه منعکس می‌شود.

[10] Chaplin R, MacManus D, Leopold F, Martinez B, Gauthier T, Birch T. Computational and experimental investigation into aerodynamic interference between slender bodies in supersonic flow. *Computers & fluids*. 2011;50(1):155-74..

[11] Chaplin R, MacManus D, Leopold F, Martinez B, Gauthier T, Birch T. Aerodynamic interference on finned slender body. *AIAA Journal*. 2016;54(7):2017-33.

[12] Hooseria SJ, Skews BW. Three-dimensional, curved shock wave interactions with slender bodies at incidence. In 29th International Symposium on Shock Waves 2. 2015; 2: 1291-1296.

[13] Hooseria SJ, Skews BW. Shock wave interactions between slender bodies: Some aspects of three-dimensional shock wave diffraction. *Shock Waves*. 2017;27:109-26.

باریک بالایی، در هر دو راستای جریان آزاد و عمود بر جریان آزاد یک افزایش ناگهانی را نشان می‌دهد. این مورد به علت بازتاب موج شوک بین دودنه باریک رخ می‌دهد. با افزایش سرعت جریان آزاد میزان بیشینه نیروی درگ که بر بدنه باریک پایینی وارد می‌شود، افزایش می‌یابد. بیشینه نیروی لیفت که بر بدنه باریک پایینی وارد می‌شود در سرعت جریان آزاد ماخ ۳ و ۴/۵ تقریباً برابر است. علت آن تعداد کمتر برخورد های انعکاس موج شوک در سرعت جریان آزاد با ماخ ۴/۵ است.

۷- مراجع

[1] Yazdani K, Naderi A. The Effect of the Geometric Parameters of the Fin on Aerodynamic Performance of Missile. *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*. 2020;8(2):141-51.

[2] Wang F, Liu J, Qin H, Song Y, Chen L, Hu J. Unsteady aerodynamic characteristics of slender body at extra-wide angle-of-attack range. *Aerospace Science and Technology*. 2021;110:106477.

[3] Hung CM. Computation of three-dimensional shock wave and boundary-layer interactions. 1985.

[4] Wilcox Jr FJ. Separation characteristics of generic stores from Lee side of an inclined Flat Plate at Mach 6. 1995.

[5] Morkovin MV, Migotsky E, Bailey HE, Phinney RE. Experiments on interaction of shock waves and cylindrical bodies at supersonic speeds. *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1952;19(4):237-48.

[6] Brosh A, Kussoy MI, Hung CM. Experimental and numerical investigation of a shock wave impingement on a cylinder. *AIAA journal*. 1985;23(6):840-6.

[7] Volkov VF, Derunov EK. Interaction of a combination of bodies in supersonic flow. Interference and diffraction of shock waves in flow over two bodies of revolution. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2006;79(4):712-21.

[8] Mowatt S, Skews B. Three dimensional shock wave/boundary layer interactions. *Shock Waves*. 2011;21(5):467.

[9] Chaplin RA, MacManus DG, Birch TJ. Aerodynamic interference between high-speed slender bodies. *Shock Waves*. 2010;20:89-101.



Numerical Analysis of Aerodynamic Interference of Two Passing Cylindrical Bodies at Supersonic Speeds

Mohammad Ali Ranjbar^{1*}, Alireza Pourmoayed¹, Sina Alimohammadian²

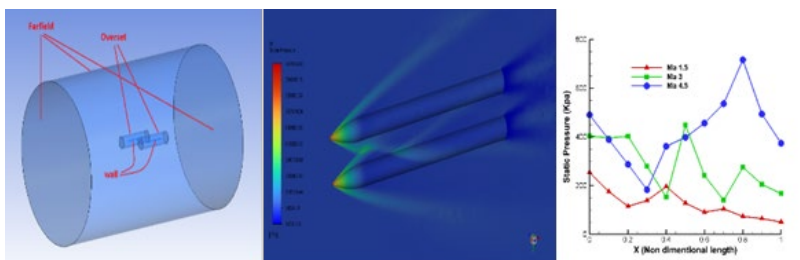
¹ Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Khatam Al-Anbiya Air Defense University, Tehran, Iran

² M.Sc., Faculty of Mechanical Engineering, Khatam Al-Anbiya Air Defense University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Analyzing aerodynamic interference statically
- Analyzing the proximity phenomenon in unsteady form and with the movement of one object in the vicinity of another object at supersonic speeds
- Investigating the effects of aerodynamic interference on pressure distribution

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 2 January 2023

Received in revised form: 9 January 2023

Accepted: 7 March 2023

Available online: 16 March 2023

*Correspondence:

m_a_ranjbar@hotmail.com

How to cite this article:

M.A. Ranjbar, A. Pourmoayed, S. Alimohammadian. Numerical analysis of aerodynamic interference of two passing cylindrical bodies at supersonic speeds. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2023; 19(3):79-95.

Keywords:

Aerodynamic interference

Flow field

Slender body

Supersonic

ABSTRACT

Aerodynamic interference is one of the phenomena that occurs when two flying objects pass near each other. In this case, the change in the pressure distribution on objects passing near each other causes a change in the aerodynamic forces. In this research, the numerical investigation of the flow field between two narrow bodies at a close distance and the pressure changes along them at supersonic speeds is done. The simulation was done in two-dimensional and three-dimensional form, and the k-omega sst was used to model the flow turbulence. The two slender bodies were placed next to each other at speeds of Mach 1.5, 3, and 4.5 and at intervals of 2, 3, and 4 times the diameter of the body. they were examined in two modes with relative motion and without relative motion. The results show that as the free flow velocity increases, the shock wave deforms from bow to oblique and is reflected between the two bodies. Also, as the flow Mach number decreases and the distance between two slender bodies increases, the reflected shock wave becomes weaker. At Mach 1.5 the shock wave reflection between two bodies is not very noticeable, while at Mach 4.5 the shock wave is well reflected between two bodies. In the state of relative motion of two slender bodies, separation occurs at the shock wave reflection points and the number of shock wave reflections decreases compared to the state without relative movement.