

3.70e+03

به نام خدا

دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

نام پروژه: شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی CFD و تجزیه و تحلیل آزمایشی جریان هوا در اطراف یک گلوله

استاد: دکتر نکسا

دانشجو: فرزاد خوش خرام

مقطع: کارشناسی ارشد

رشته: مکانیک تبدیل انرژی

0.00e+00



چکیده ▶

مقدمه ▶

آیرودینامیک پرتابه (لیفت/ درگ/ لایه مرزی) ▶

مشخصات تفنگ و گلوله ▶

تحلیل تجربی روی اشکال مختلف گلوله ▶

نتایج ▶

جمع بندی و پیشنهادات ▶

منابع ▶

چکیده

- ▶ یک مطالعه تجربی برای بررسی جریان هوا در اطراف گلوله با توجه به نیروها و عوامل خارجی مؤثر بر گلوله در هنگام شلیک انجام شده است. هدف این پژوهش شبیه‌سازی گلوله با طول $12/7$ میلی‌متر و قطر $5/56$ میلی‌متر است، این گلوله تحت شرایط جریان هوا مختلف مانند سرعت گذر صوتی ($0/8 - 1/2$ ماخ) و سرعت مافوق صوت (بیش از $1/2$ ماخ) مورد بررسی قرار دادیم
- ▶ در نتیجه، تصاویر عددی و تجربی از الگوهای جریان مربوطه به‌دست آمده‌اند، و با استفاده از اصول تصویربرداری جریان، رفتار پرتابه در طول مسیر پروازی گلوله نیمه‌گند نیز تعیین شده است.
- ▶ نتایج نشان داد که در برخی شرایط، گلوله‌های کند پایداری چرخش خود را در طول پرواز حفظ می‌کنند، بدون تغییر قابل‌توجه در مسافت پرواز، و شرایط سرعت را در مقایسه با گلوله با سر نوک‌تیز ثابت نگه می‌دارند. طراحی گلوله در نرم‌افزار **Catia** انجام شده است و بدون تغییر در قاعده و طول، و مازول **CFD** برای شبیه‌سازی استفاده شده است.

۱. مقدمه ▶

- ▶ گلوله: گلوله یک پرتابه فلزی است که توسط سلاح گرم مانند تفنگ شلیک می‌شود. معمولاً مواد منفجره ندارد، اما به دلیل نفوذ و ضربه می‌تواند آسیب‌زا باشد.
- ▶ - گلوله‌ها در سال ۱۵۰۰ میلادی اختراع شدند و در ابتدا از توپ‌های گرد سربی استفاده می‌شد.
- ▶ گلوله **Minié** یک نوع پرتابه با قاعده توخالی است که توسط **Claude-Étienne Minié** در سال ۱۸۴۶ برای تفنگ‌های سرپر با خان‌کشی طراحی شد. این گلوله به دلیل دقت بالا و برد طولانی‌تر در جنگ‌های کریمه و جنگ داخلی آمریکا مورد استفاده گسترده قرار گرفت.
- ▶ با گذشت زمان، در سال ۱۸۸۸، گلوله‌های نوک‌تیز به‌طور گسترده‌تری مورد استفاده قرار گرفتند. این نوع گلوله‌ها توسط برخی از استادان اسلحه‌سازی توسعه یافتند و پس از اثبات عملکرد مؤثرشان، توسط ارتش بریتانیا نیز پذیرفته شدند.

- ▶ مزایای گلوله‌های نوک‌تیز:
- ▶ - افزایش دقت و برد پرتاب نسبت به گلوله‌های گرد
- ▶ - کاهش مقاومت هوا (درگ) که باعث حفظ سرعت بالاتر در مسیر پرواز می‌شود
- ▶ - بهبود قدرت نفوذ در زره و سایر موانع



شکل ۱/۲: گلوله‌های سنگین مدرن

این تصویر گلوله‌های سنگین مدرن را نمایش می‌دهد که برای افزایش دقت، برد و قدرت نفوذ طراحی شده‌اند. این نوع مهمات معمولاً در سلاح‌های نظامی و تیراندازی بلندبرد استفاده می‌شوند و دارای ویژگی‌های آیرودینامیکی بهینه‌شده هستند.

► ۲. آیرودینامیک پرتابه

آیرودینامیک پرتابه به بررسی نیروها و تأثیرات جریان هوا بر حرکت گلوله یا موشک در طول مسیر پرواز می‌پردازد. این نیروها شامل نیروی درگ، نیروی لیفت، نیروی گرانش، و اثرات شوک‌های آیرودینامیکی هستند.

عوامل کلیدی در آیرودینامیک پرتابه:

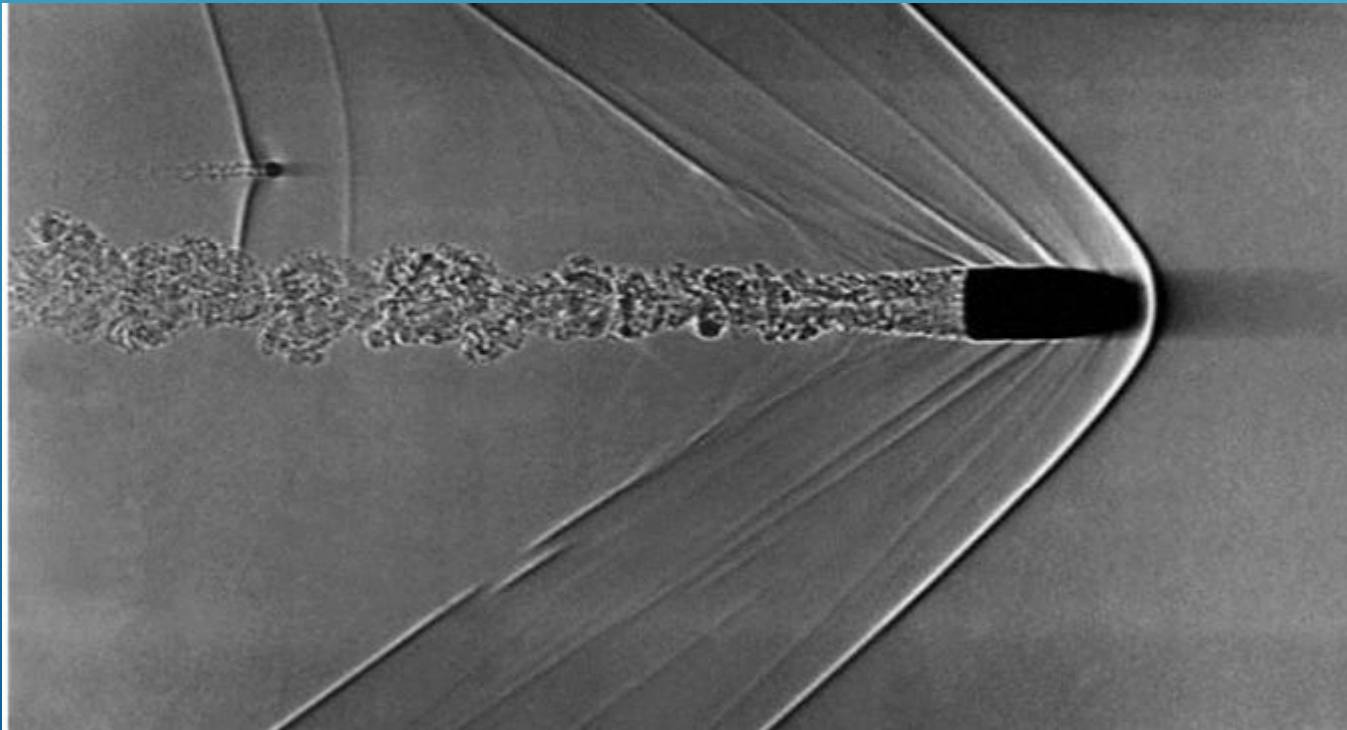
- **نیروی درگ Drag:** نیروی درگ نیروای است که بر خلاف حرکت یک جسم درون یک سیال (مانند هوا یا آب) عمل میکند و باعث کاهش سرعت جسم میشود. این نیرو ناشی از مقاومت سیال در برابر حرکت جسم است و عوامل موثر بر نیروی درگ شامل شکل جسم، سرعت جسم، چکالی سیال، ضریب درگ
- **نیروی لیفت Lift:** نیروی لیفت نیروای است که در جهت عمود بر جریان سیال به جسم وارد می شود و باعث بالا رفتن یا تغییر مسیر آن میشود، نیروی لیفت معمولا به دلیل اختلاف فشار بین سطح بالایی و پایینی جسم ایجاد میشود
- **اثر شوک‌های آیرودینامیکی:** به تغییرات ناگهانی در فشار، دما و سرعت جریان هوا در اطراف یک جسم متحرک در سرعت های بالا اشاره دارد. این پدیده معمولا در جریان های ما فوق صوت رخ میدهد و تاثیر زیادی بر عملکرد هواپیماها، موشک ها، و پرتابه ها دارد
- **اثر مگنوس Magnus Effect:** پدیده ای در دینامیک سیالات است که باعث انحراف مسیر یک جسم چرخان درون یک سیال میشود. این اثر در توپها و پرتابه ها دیده میشود
- **لایه مرزی Boundary Layer:** به ناحیه ای از جریان سیال گفته می‌شود که در مجاورت سطح جامد قرار دارد و در آن اثرات ویسکوزیته به طور قابل توجهی احساس می‌شود.

► ۲/۱ تشکیل موج شوک

از آنجایی که تمامی جریان‌های هوا تراکم‌پذیر هستند (چگالی به‌عنوان مقدار ثابت در نظر گرفته نمی‌شود)، این جریان‌ها دارای انرژی بالاهستند که در آن تغییرات شدید در دما و انرژی رخ می‌دهد. هرگاه سرعت پرتابه بیشتر از سرعت صوت باشد، وارد ناحیه تراکم‌پذیر می‌شود و موج شوک تشکیل می‌گردد.

ویژگی‌های موج شوک:

- موج شوک یک ناحیه بسیار نازک است که در آن خواص جریان به‌طور ناگهانی تغییر می‌کنند.
- ضخامت این موج معمولاً در حد 0.00001 سانتی‌متر است که در آن فرآیند فشرده‌سازی انفجاری رخ می‌دهد.



این تصویر نشان‌دهنده موج شوک قوسی در اطراف یک

پرتابه است که با سرعت مافوق صوت حرکت می‌کند. این

موج شوک زمانی ایجاد می‌شود که جریان هوا نتواند از جسم

پیشی بگیرد و در نتیجه، فشار و دما در ناحیه شوک به‌طور

ناگهانی تغییر کنند.

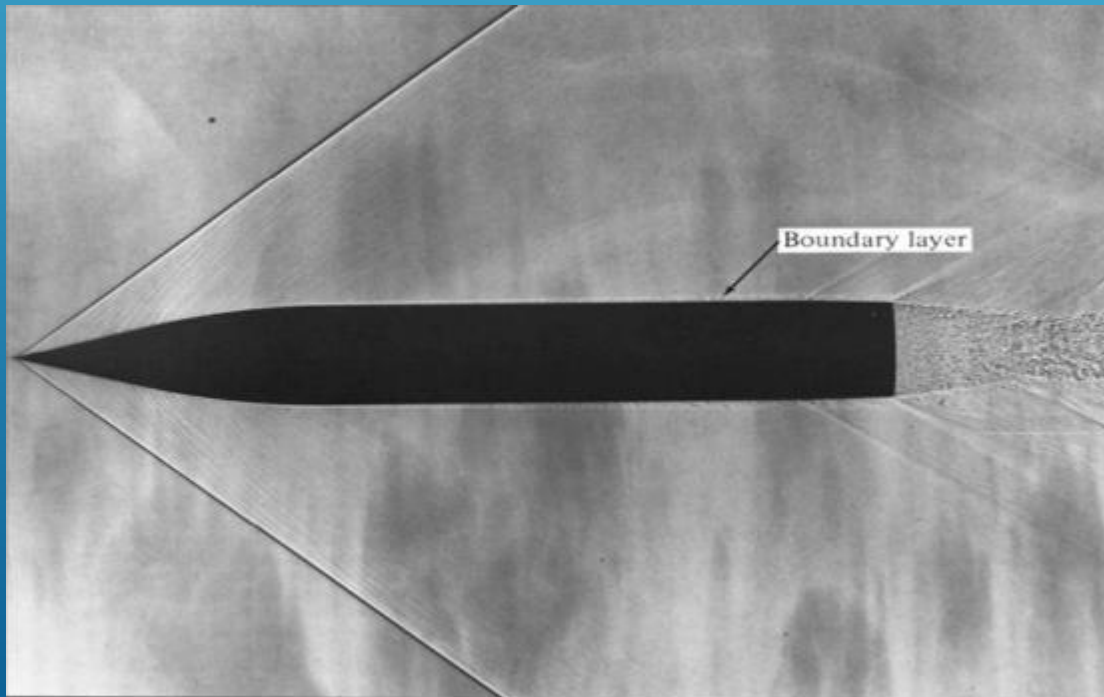
شکل ۲/۱: موج شوک قوسی

► ۲/۲ لایه مرزی

هر نوع پرتابه‌ای که در یک سیال حرکت کند، با لایه‌ای نازک بین سطح پرتابه و جریان آزاد سیال مواجه می‌شود که به آن لایه مرزی گفته می‌شود. در این لایه، جریان سیال به دلیل اصطکاک و ویسکوزیته بین سطح جامد و سیال کاهش می‌یابد.

ویژگی‌های لایه مرزی:

- یک لایه نامرئی از گاز یا مایع بسته به سرعت پرتابه روی سطح آن تشکیل می‌شود.
- اثر انتقال جرم، انتقال حرارت، انتقال مومنتوم، اصطکاک، و ویسکوزیته در این لایه کاملاً محسوس است.
- لایه مرزی ایجاد شده باعث افزایش نیروی درگ و مانع حرکت پرتابه می‌شود.



این تصویر نشان‌دهنده تشکیل لایه مرزی در اطراف یک گلوله است که تأثیر مستقیم بر آیرودینامیک، نیروی درگ، و پایداری پرتابه دارد. این لایه نتیجه تعامل بین سطح جامد گلوله و جریان آزاد هوا است که موجب کاهش سرعت سیال در نزدیکی سطح گلوله می‌شود.

شکل ۲/۲: لایه مرزی روی گلوله

► ۳. مشخصات تفنگ و گلوله

گلوله‌ای که در این پروژه مورد بررسی قرار گرفته، متعلق به تفنگ **M16** است.

M16 نامگذاری نظامی ایالات متحده برای تفنگ **AR-15** است. این تفنگ کارتریج $5.56 \times 45 \text{ mm}$ را شلیک می‌کند و به دلیل طراحی سبک، برای کاربردهای نظامی و رزمی بهینه شده است.

مشخصات تفنگ: **M16**

- کالیبر: ۵/۵۶ میلی‌متر

- مواد سازنده: فولاد، آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، پلاستیک‌های کامپوزیت و پلیمرها

- انواع مختلف: شامل **M16A1**، **M16A2/A3**، **M16A4**

این تفنگ به دلیل دقت بالا، وزن سبک و قابلیت شلیک سریع، در بسیاری از نیروهای نظامی جهان مورد استفاده قرار گرفته است.

► ۴. تحلیل آزمایشگاهی روی اشکال مختلف گلوله‌ها

هدف اصلی این پروژه بررسی تأثیر جریان هوا بر گلوله و مزایای شکل آن از نظر برد و نفوذ است. بنابراین، چندین شکل مختلف گلوله انتخاب شده و اثر جریان هوا بر این ساختارها مورد بررسی قرار گرفته است.

اشکال تحلیل شده:

۱. گلوله با نوک تیز **Point Head Bullet**: برای سرعت بالا و نفوذ بیشتر طراحی شده است.

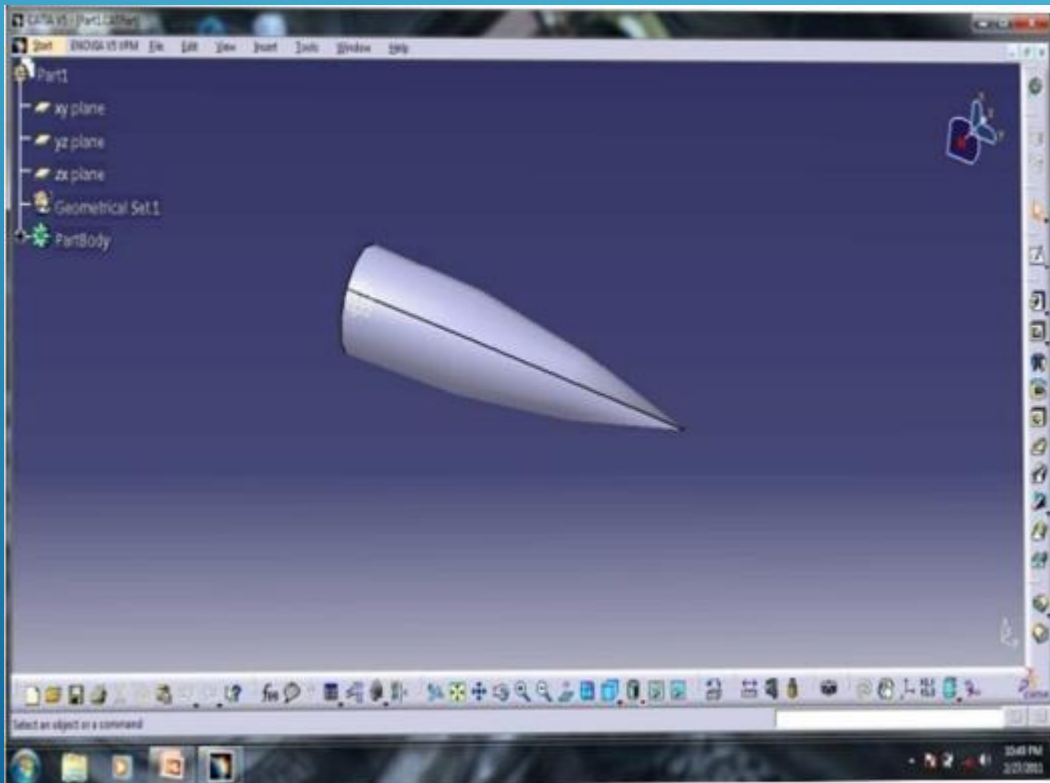
۲. گلوله با نوک کاملاً صاف **Pure Blunt Head Bullet**: مقاومت هوا بیشتر شده، برد کاهش می‌یابد اما نیروی ضربه افزایش پیدا می‌کند.

۳. گلوله با نوک نیمه صاف **Semi Blunt Head**: تعادل بین نفوذ و پایداری، که در کاربردهای نظامی رایج است.

مطالعات مختلف، مانند [تحقیق]، به بررسی دینامیک جریان هوا و تأثیر آن بر عملکرد گلوله پرداخته‌اند. این تحقیقات از شبیه‌سازی **CFD** و آزمایش‌های تجربی برای تحلیل نیروی درگ، نیروی بالابر، و پایداری استفاده کرده‌اند

۴/۱/۱. گلوله با نوک تیز Point Head Bullet

در این طراحی، نوک گلوله از شکل نیمه صاف **Semi Blunt** به نوک تیز **Point Head** تغییر داده شده است. این تغییر باعث بهبود آیرودینامیک گلوله و کاهش نیروی درگ می‌شود.

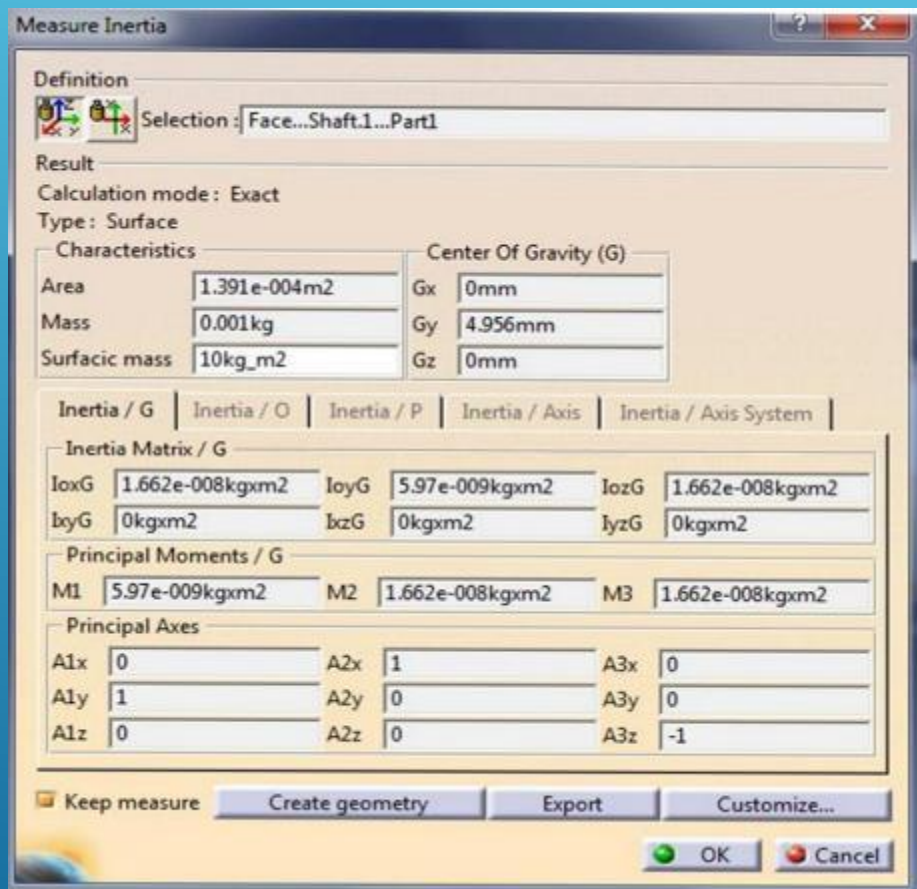


ویژگی‌های طراحی:

- طراحی این گلوله در نرم‌افزار **CATIA** انجام شده است.
- هیچ تغییری در قطر داخلی **Bore** و طول گلوله ایجاد نشده است.
- طول گلوله: ۱۲/۷ میلی‌متر
- قطر گلوله: ۵/۵۶ میلی‌متر

شکل ۴/۱: مدل گلوله در نرم‌افزار CATIA

اندازه‌گیری اولیه پرتابه با نوک تیز نیز در نرم‌افزار **CATIA** انجام شده است. این اندازه‌گیری شامل مرکز ثقل، سطح مقطع، جرم، ممان اینرسی و سایر ویژگی‌های فیزیکی است که در تصویر زیر نمایش داده شده است.

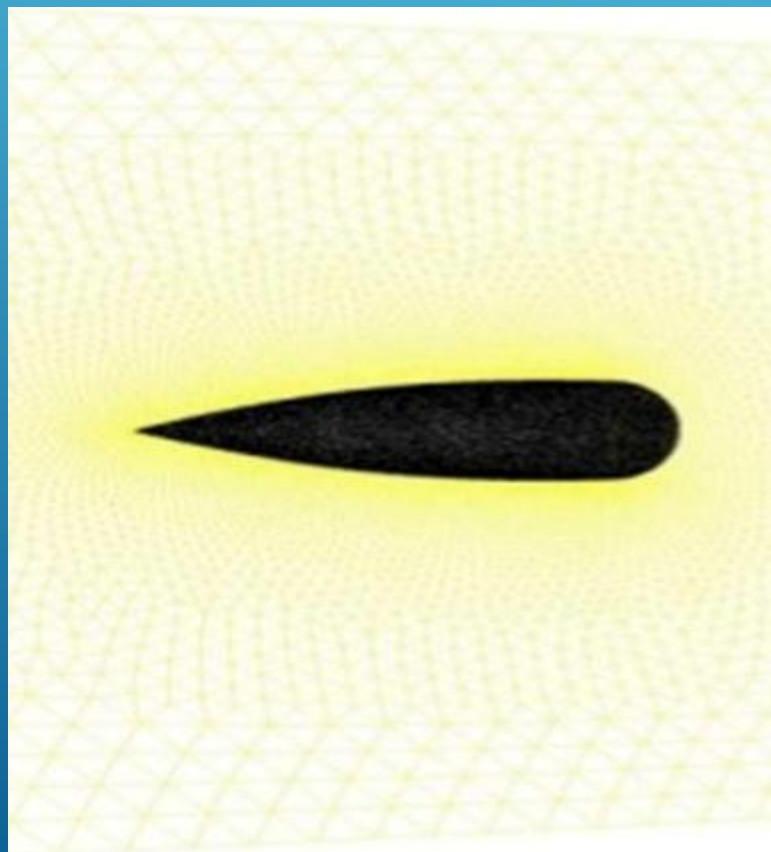


شکل ۴/۲: اندازه‌گیری ممان اینرسی گلوله در CATIA

ویژگی‌های مش‌بندی و تحلیل:

- مش‌بندی انتخابی انجام شده است، به‌طوری که مش دقیق‌تر روی گلوله و اطراف آن اعمال شده است، زیرا تغییرات اصلی در سطح گلوله و نزدیک آن رخ می‌دهد.

GAMBIT و **FLUENT** دو نرم‌افزار مهم در زمینه شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی **CFD** هستند که برای مش‌بندی و تحلیل جریان سیال استفاده می‌شوند.



FLUENT

FLUENT یکی از پیشرفته‌ترین نرم‌افزارهای **CFD** است که برای تحلیل جریان سیال، انتقال حرارت، واکنش‌های شیمیایی و پدیده‌های چندفازی استفاده می‌شود.

GAMBIT

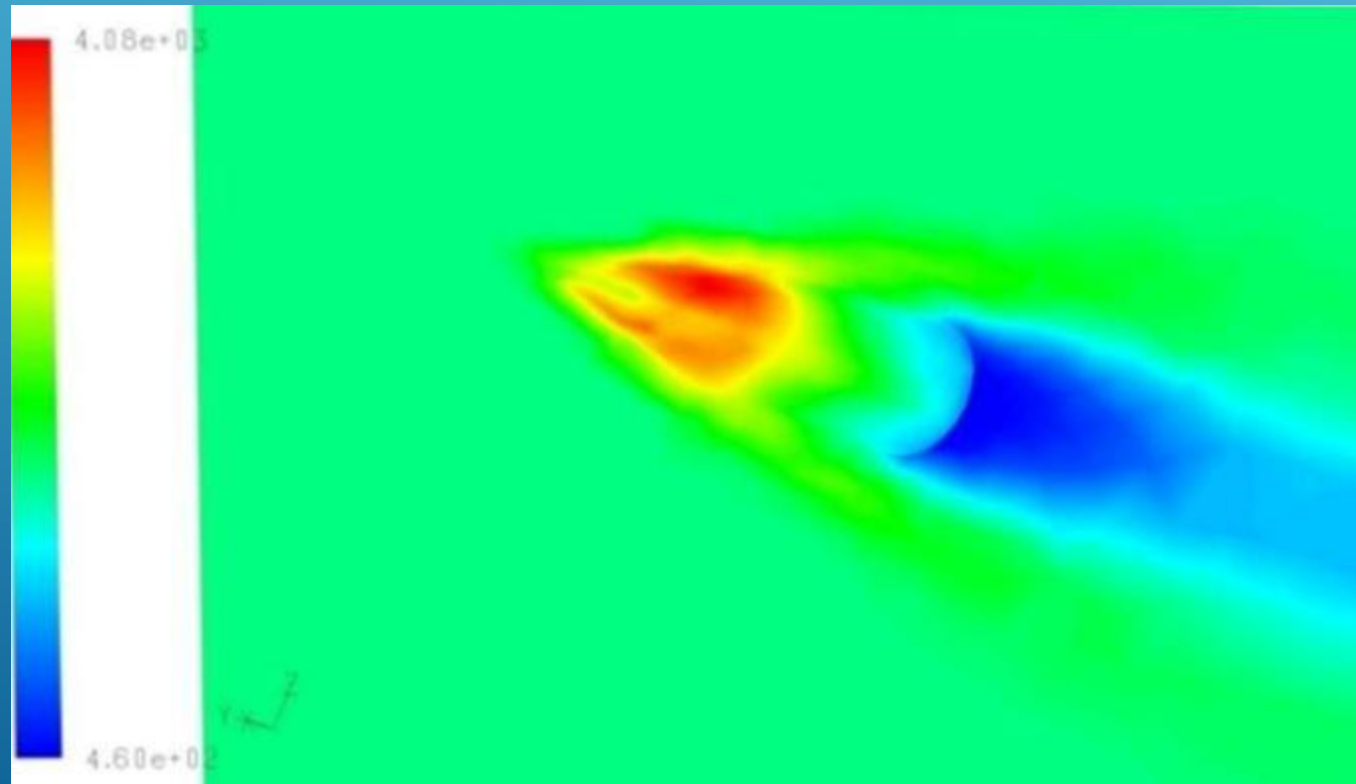
GAMBIT یک نرم‌افزار مش‌بندی **Meshing** است که برای ایجاد شبکه‌های محاسباتی در مدل‌های **CFD** به کار می‌رود. این نرم‌افزار به کاربران اجازه می‌دهد تا هندسه‌های پیچیده را به شبکه‌های مناسب برای تحلیل عددی تبدیل کنند.

شکل ۴/۳: شبکه‌بندی روی گلوله با نوک تیز

این تصویر توزیع فشار دینامیکی در اطراف گلوله با نوک تیز را نشان می‌دهد.

- به دلیل شکل نوک تیز، نقطه رکود حذف شده است، که باعث عدم توزیع یکنواخت فشار در سطح گلوله می‌شود. نقطه رکود **Stagnation Point** در دینامیک سیالات به نقطه‌ای در جریان سیال گفته می‌شود که سرعت سیال در آن صفر است. در جریان مافوق صوت، حذف نقطه رکود می‌تواند باعث توزیع نامناسب فشار و ایجاد امواج ضربه‌ای **Shock Waves** شود.

- امواج ضربه‌ای **Shock Waves** مستقیماً به بدنه گلوله متصل شده‌اند، که تأثیر زیادی بر آیرودینامیک و حرکت پرتابه دارد.



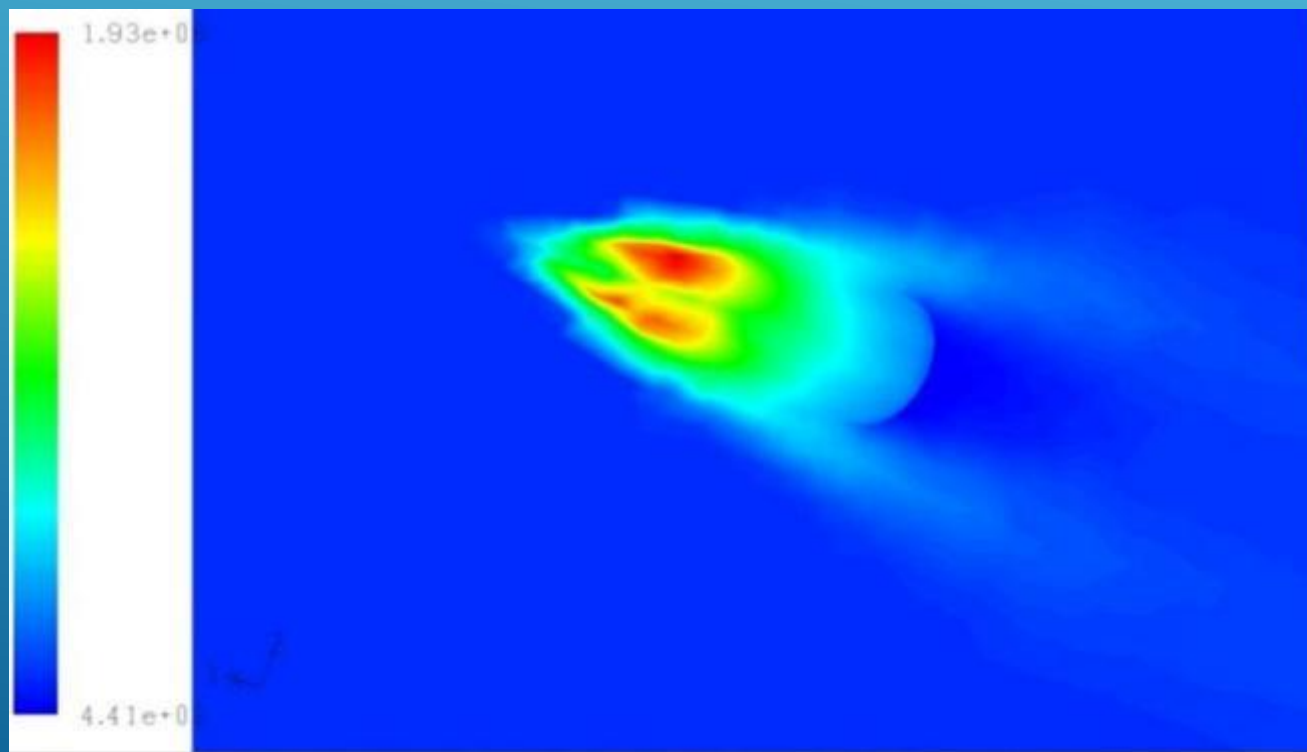
شکل ۴/۴: کانتورهای فشار دینامیکی گلوله با نوک تیز

این تصویر توزیع فشار استاتیک در اطراف گلوله با نوک تیز را نشان می‌دهد.

- حداکثر فشار روی بدنه گلوله اعمال می‌شود، نه روی نوک آن.

- این توزیع فشار به دلیل شکل هندسی گلوله و جریان مافوق صوت اتفاق می‌افتد.

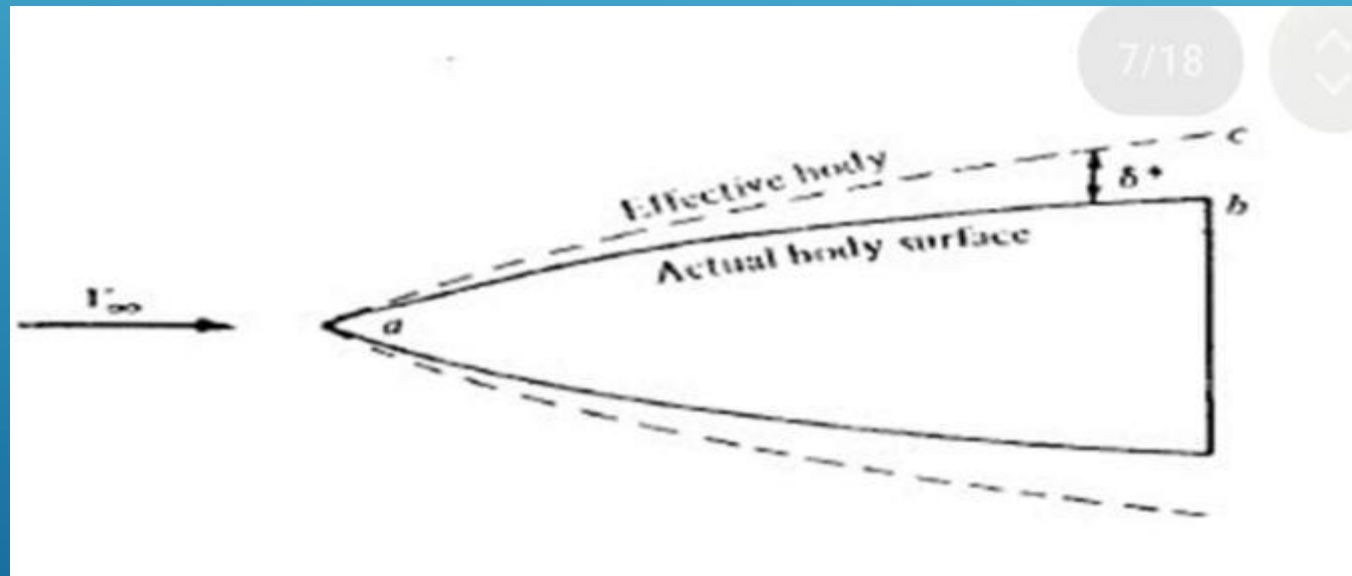
- امواج ضربه‌ای و تغییرات فشار می‌توانند بر پایداری و مسیر حرکت گلوله تأثیر بگذارند.



شکل ۴/۵: کانتورهای فشار استاتیک گلوله با نوک تیز

ضخامت جابجایی نشان‌دهنده میزان جابجایی جریان سیال به دلیل وجود لایه مرزی است. این مقدار تعیین می‌کند که چگونه جریان اصلی به دلیل تأثیر لایه مرزی تغییر مسیر می‌دهد.

این پدیده به دلیل افزایش نیروی برشی و تغییرات فشار در اطراف جسم رخ می‌دهد. در سرعت‌های بالا، لایه مرزی نازک‌تر شده و تأثیر بیشتری بر آیرودینامیک جسم دارد. .

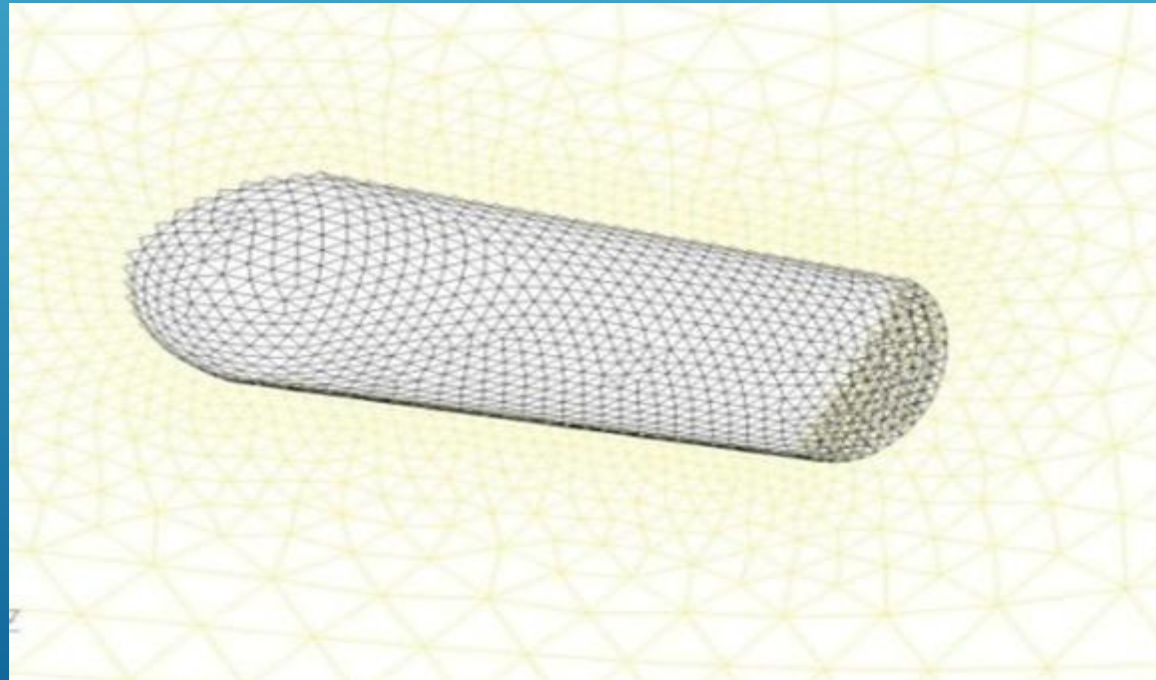


شکل ۴/۶: ضخامت جابجایی Displacement Thickness

۴/۱/۲. برای بدنه استوانه‌ای خالص

در این طراحی، سر گلوله تغییر کرده و به شکل کاملاً تخت تبدیل شده است، اما قطر و طول گلوله بدون تغییر باقی مانده‌اند. همچنین، جنس گلوله نیز تغییر نکرده است.

تصویر زیر شبکه‌بندی گلوله و محیط اطراف آن را نمایش می‌دهد، که برای تحلیل عددی و بررسی رفتار آیرودینامیکی گلوله در جریان‌های مختلف استفاده می‌شود.

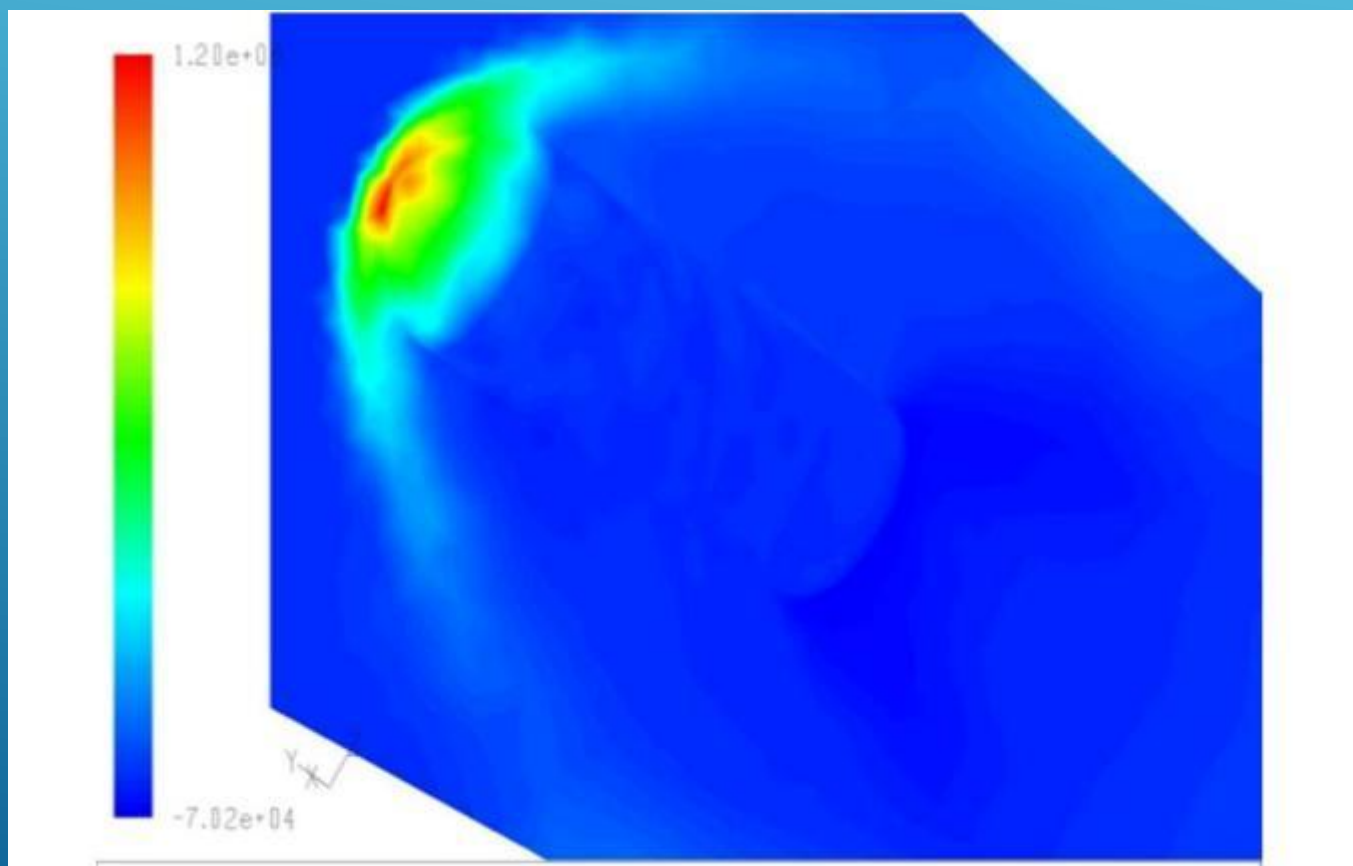


شکل شماره ۴/۷: شبکه‌بندی گلوله با سر تخت کامل

تصویر زیر فشار استاتیک را نمایش می‌دهد، که در نقطه رکود به حداکثر مقدار خود می‌رسد و دما نیز در این نقطه به اوج خود می‌رسد.

- به دلیل شکل گنبدی، فشار به طور یکنواخت روی سطح پرتابه توزیع می‌شود.

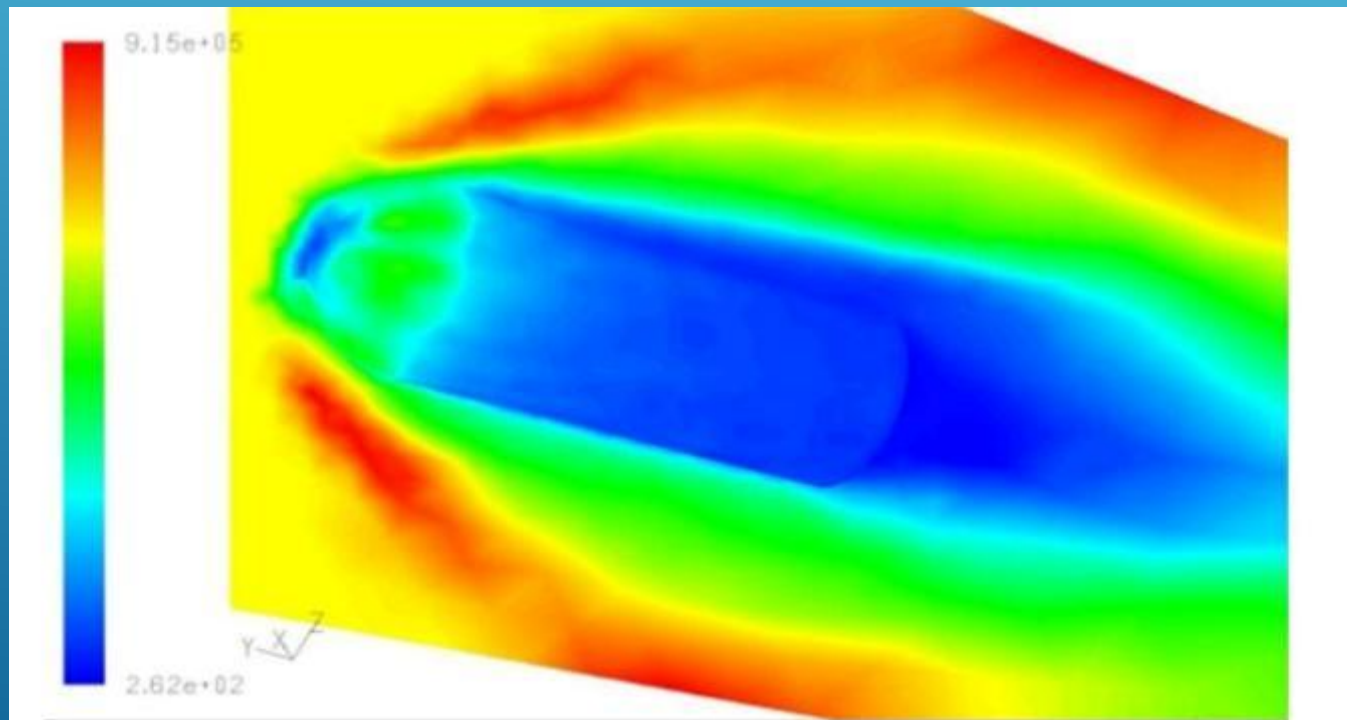
- این توزیع فشار باعث کاهش تدریجی فشار در امتداد سطح پرتابه می‌شود.



شکل شماره ۴/۸: کانتورهای فشار استاتیک گلوله با سر تخت کامل

تحلیل فشار دینامیکی در سرعت‌های مافوق صوت

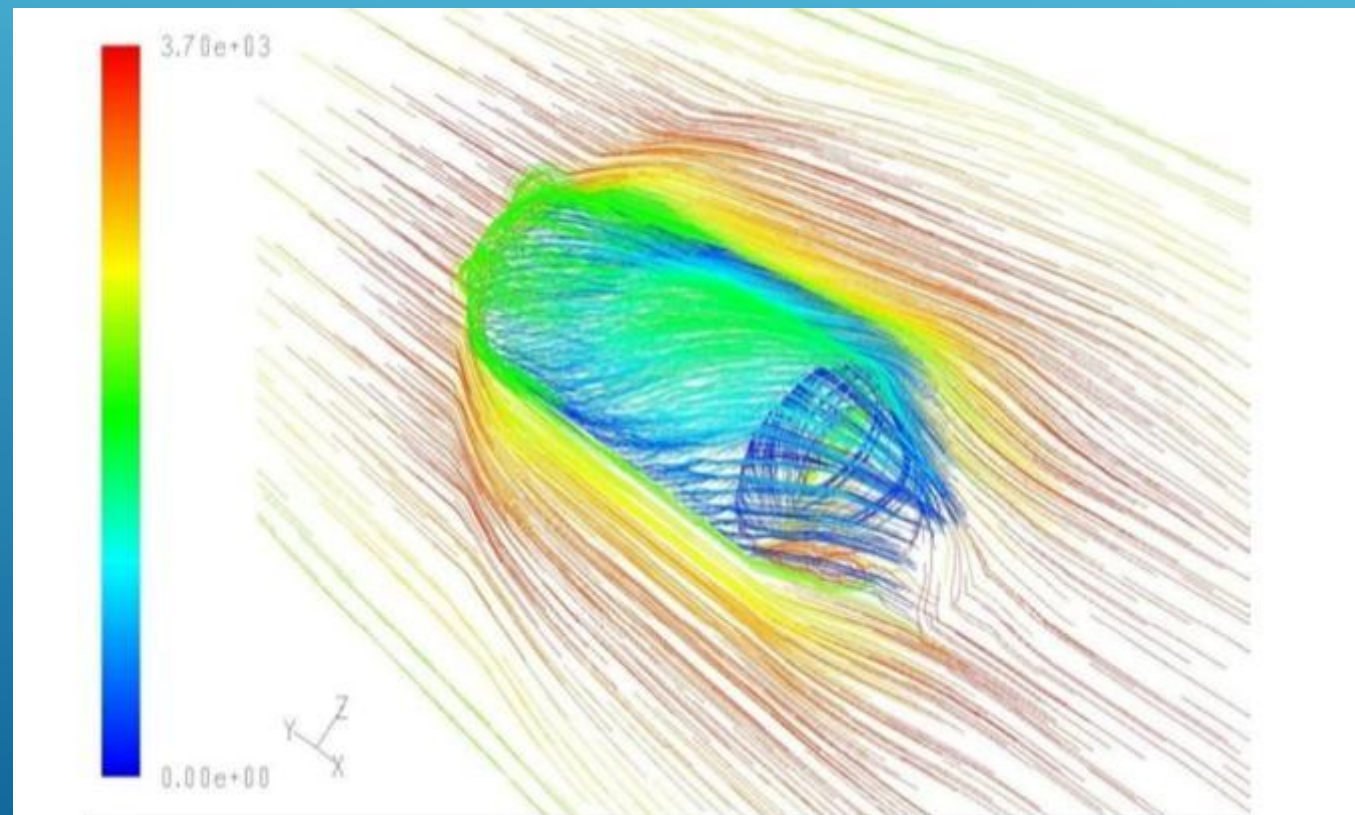
- در نقطه رکود، فشار دینامیکی کمترین مقدار را دارد، که از نظر تئوری صحیح است.
- منطقه قرمز اطراف گلوله نشان‌دهنده تشکیل موج ضربه‌ای است، که در آن افزایش ناگهانی فشار رخ می‌دهد.
- فشار دینامیکی در نقطه‌ای که فشار استاتیک بالا است، باید کم باشد.



شکل شماره ۴/۹: کانتورهای فشار دینامیک گلوله با سر تخت کامل

کانتور بعدی مسیر خطوط جریان را نشان می‌دهد.

مسیر خطوط جریان نشان‌دهنده چگونگی حرکت سیال در اطراف جسم است. این خطوط به تحلیل الگوی جریان، گردابه‌ها و تغییرات سرعت کمک می‌کنند.



شکل شماره ۴/۱۰: مسیر خطوط جریان گلوله با سر تخت کامل

۵. نتایج:

تحلیل گلوله با سر نیمه تخت در زوایای حمله و اعداد ماخ مختلف

برای بررسی گلوله واقعی، تحلیل در محدوده مافوق صوت با اعداد ماخ و زوایای حمله متفاوت انجام شده است.

۵/۱/۱. عدد ماخ ۳/۵

الف) زاویه حمله ۰ درجه

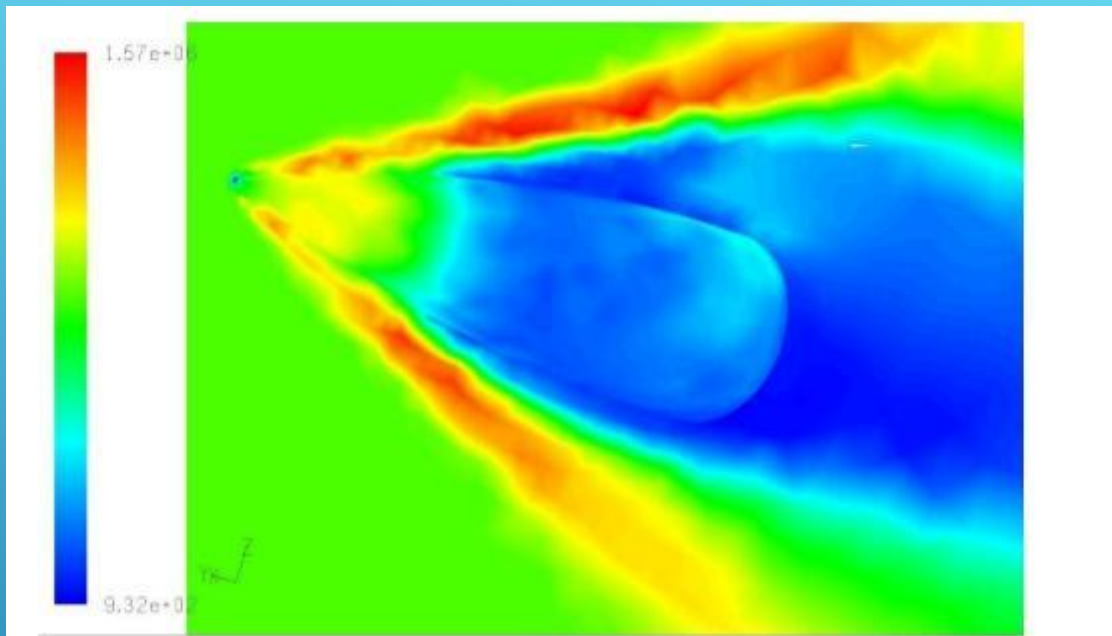
ب) زاویه حمله ۲ درجه

ج) زاویه حمله ۲/۵ درجه

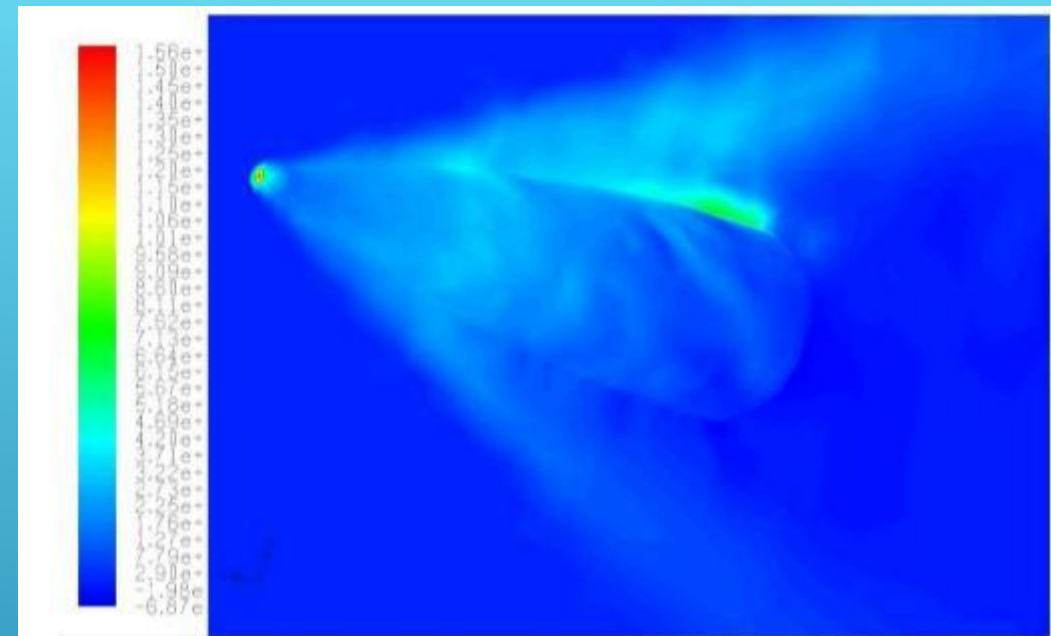
۵/۱/۲. عدد ماخ ۳

الف) زاویه حمله ۰ درجه

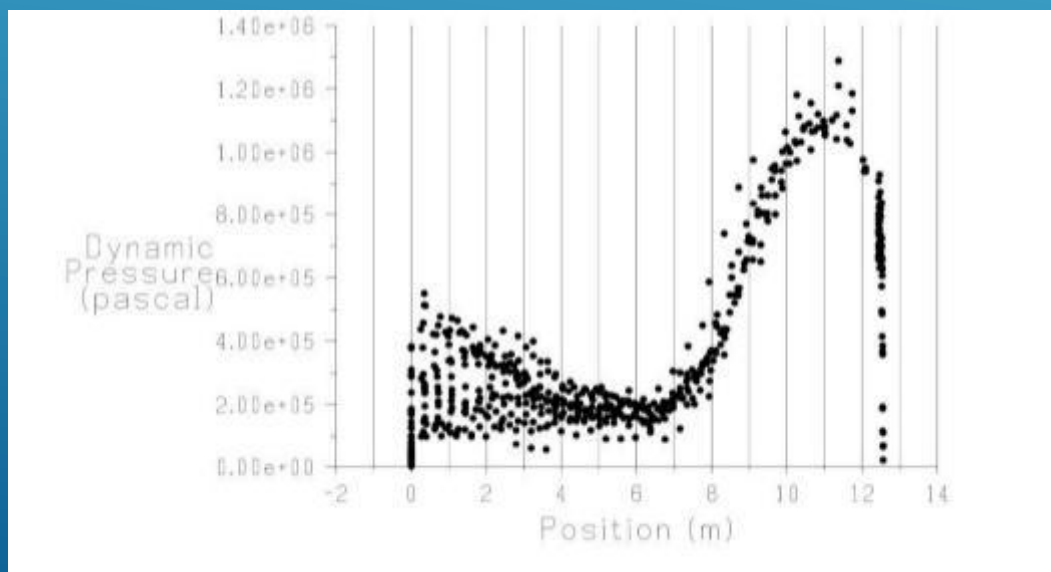
ب) زاویه حمله ۲ درجه



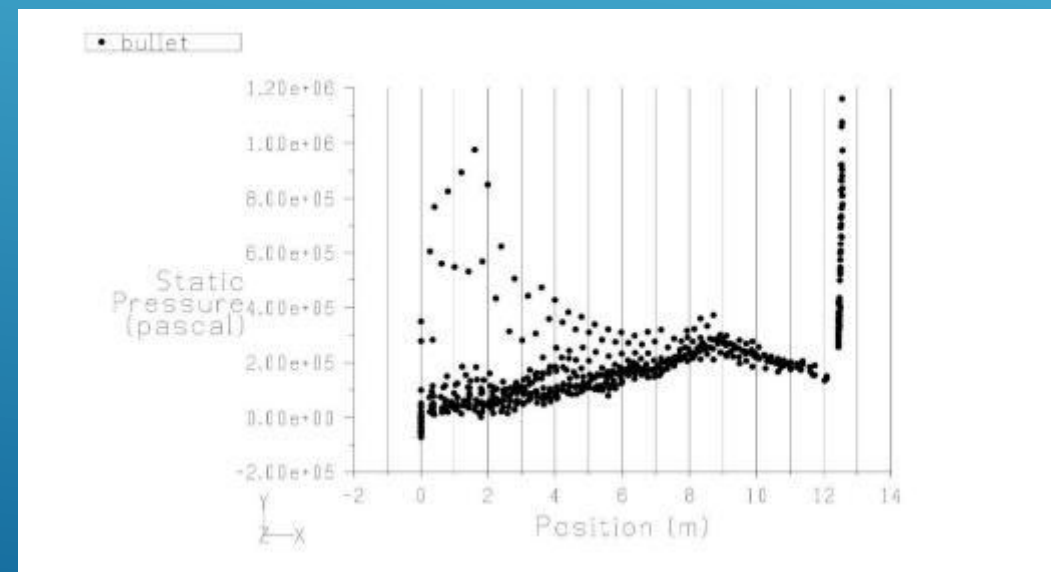
شکل شماره ۵/۲: کانتورهای فشار دینامیکی گلوله با سر نیمه تخت در عدد ماخ ۳/۵ و زاویه حمله صفر درجه



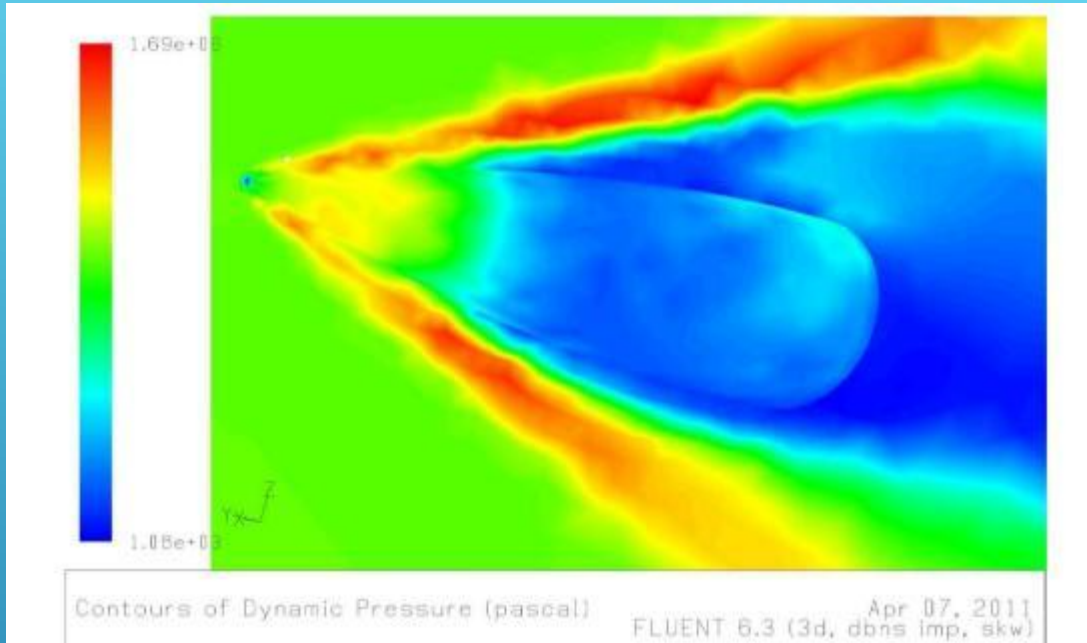
شکل شماره ۵/۱: کانتورهای فشار استاتیک گلوله با سر نیمه تخت در عدد ماخ ۳/۵ و زاویه حمله صفر درجه



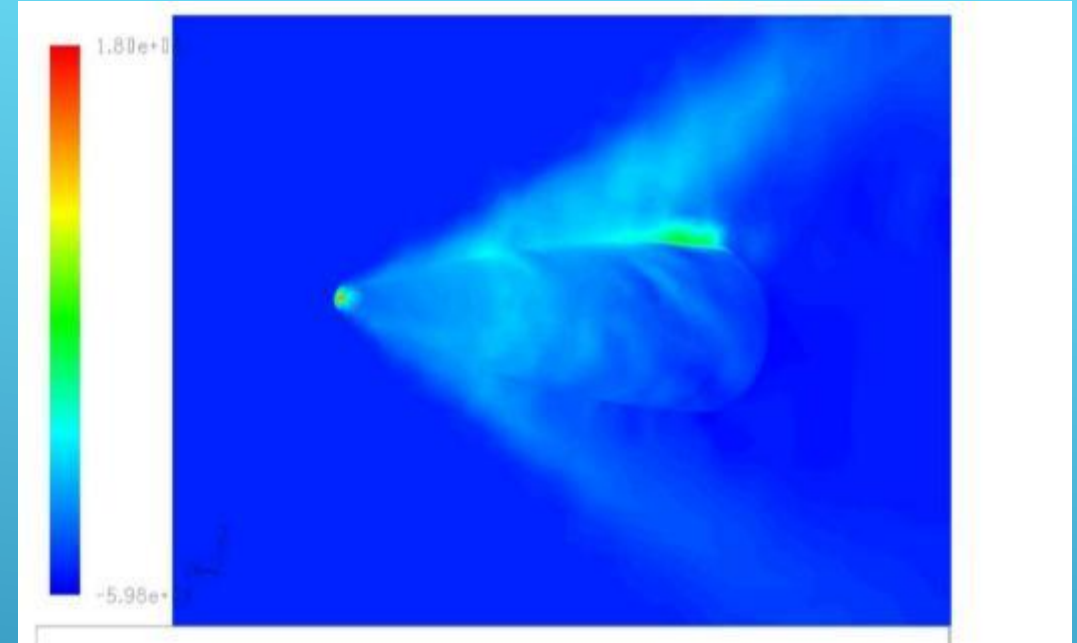
نمودار شماره ۵/۲: نمودار فشار دینامیکی



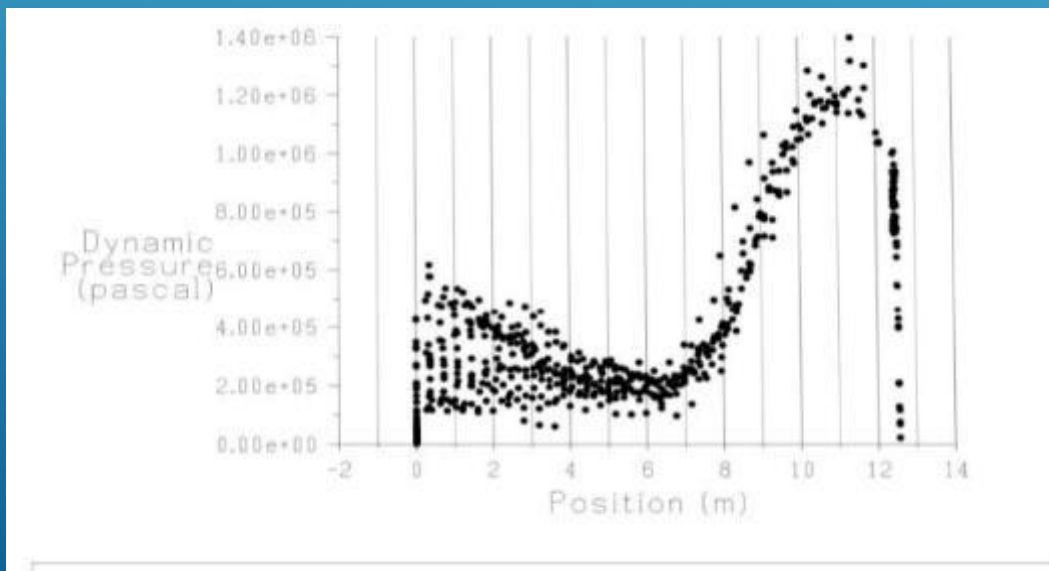
نمودار شماره ۵/۱: نمودار فشار استاتیک



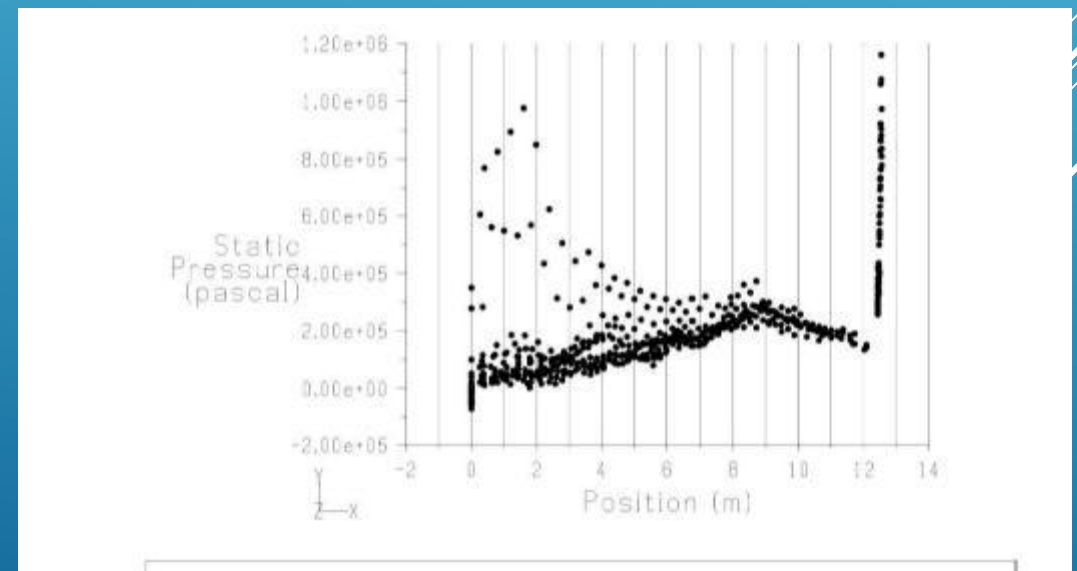
شکل شماره ۵/۴: کانتورهای فشار دینامیکی گلوله با سر نیمه تخت در عدد ماخ ۳/۵ و زاویه حمله ۲ درجه



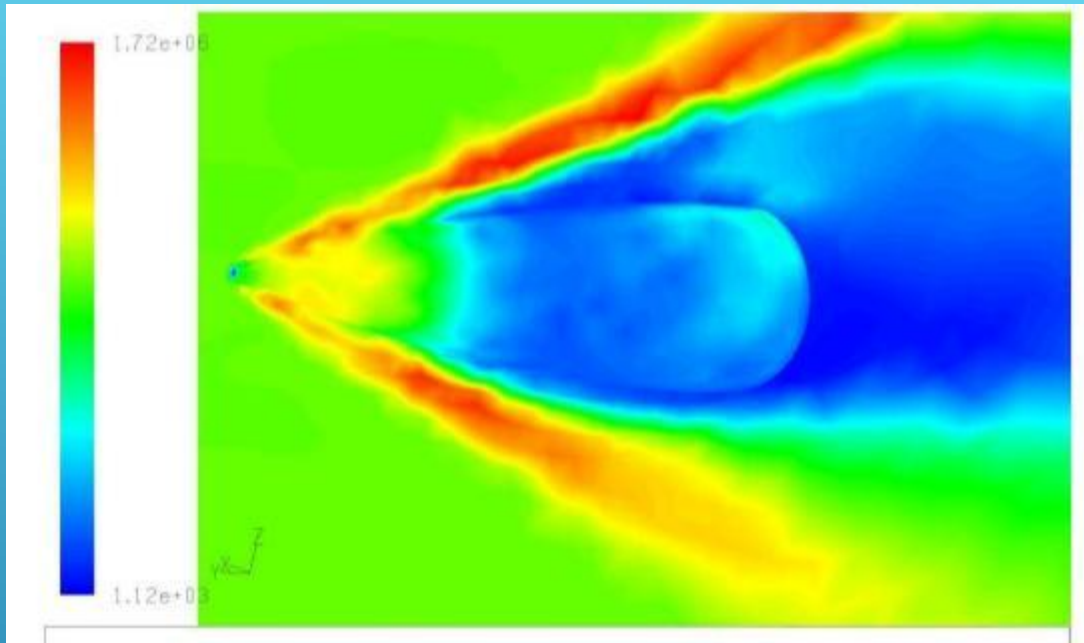
شکل شماره ۵/۳: کانتورهای فشار استاتیک گلوله با سر نیمه تخت در عدد ماخ ۳/۵ و زاویه حمله ۲ درجه



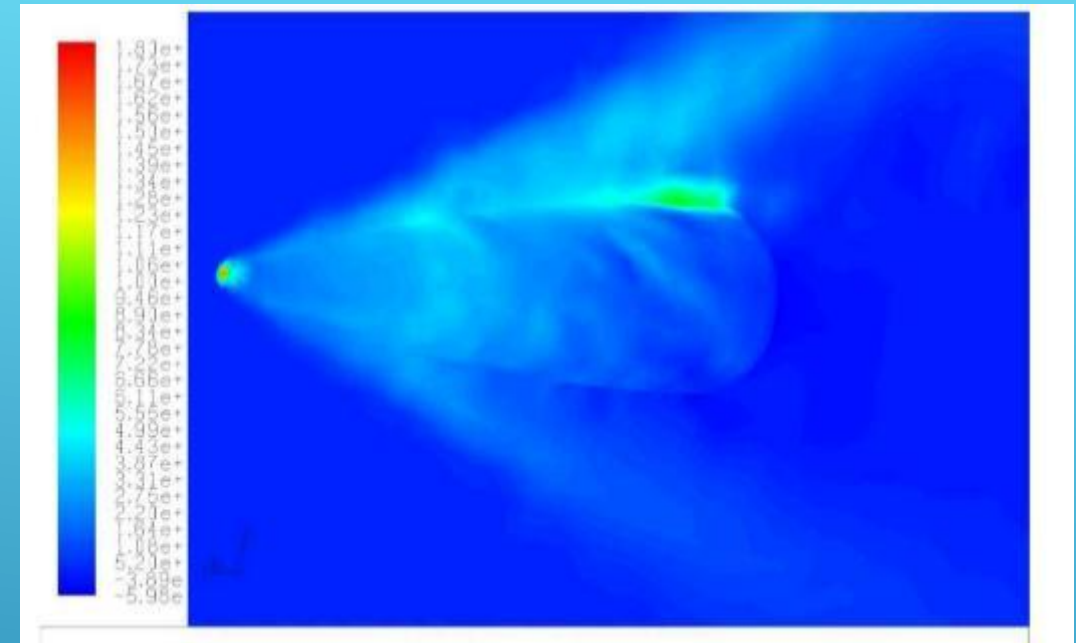
نمودار شماره ۵/۴: نمودار فشار دینامیکی



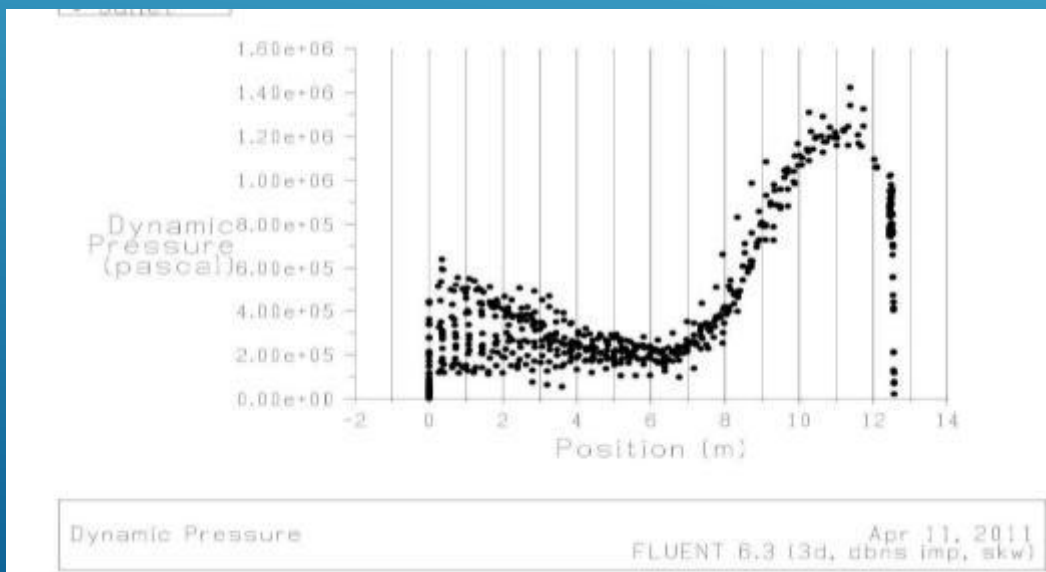
نمودار شماره ۵/۳: نمودار فشار استاتیک



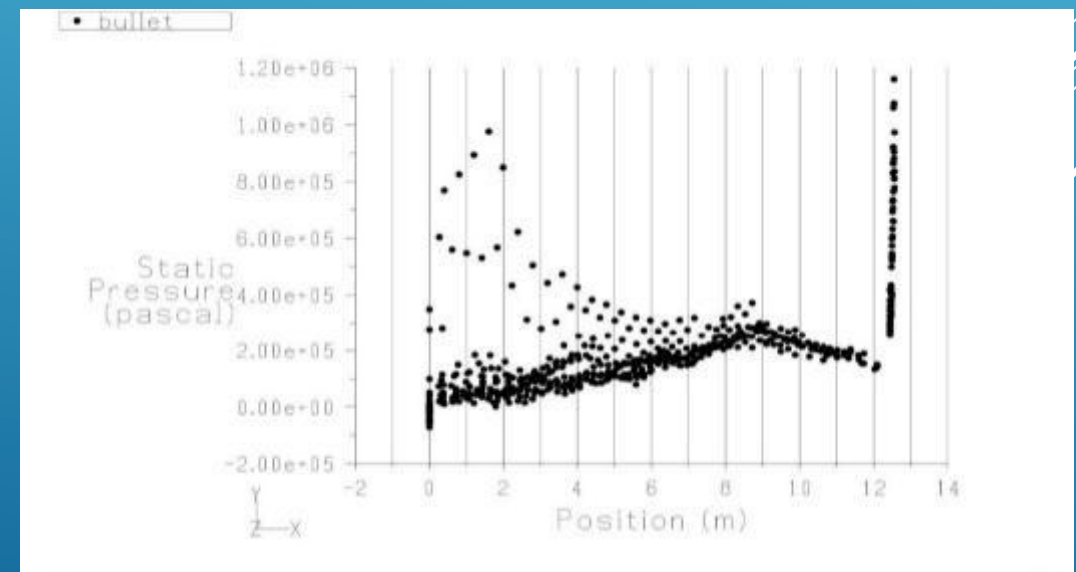
شکل شماره ۵/۶: کانتورهای فشار دینامیکی گلوله با سر نیمه تخت در عدد ماخ ۳/۵ و زاویه حمله ۲/۵ درجه



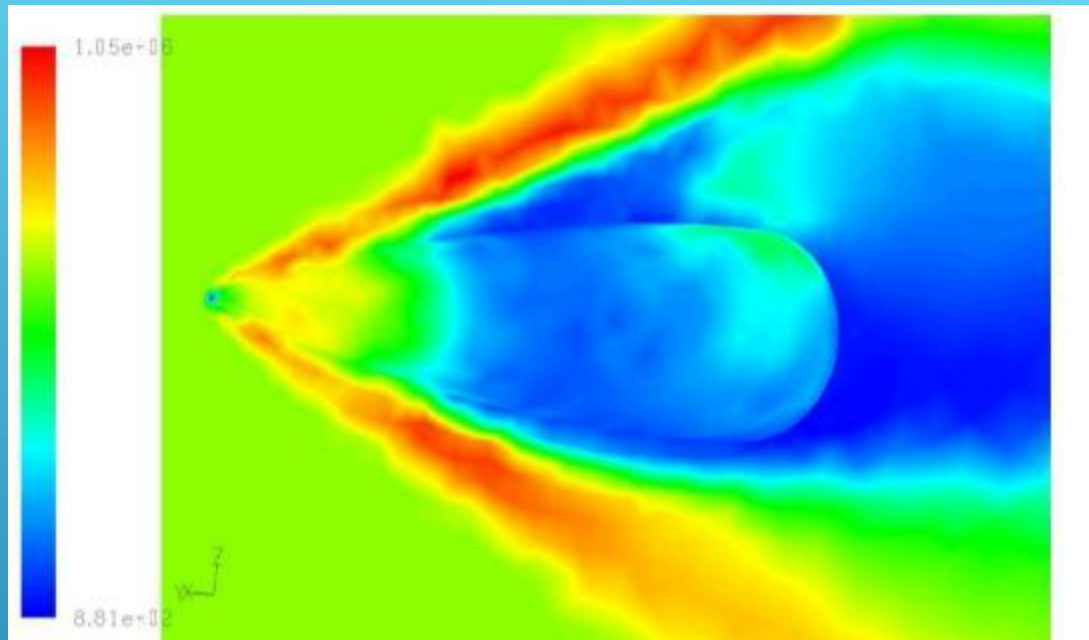
شکل شماره ۵/۵: کانتورهای فشار استاتیکی گلوله با سر نیمه تخت در عدد ماخ ۳/۵ و زاویه حمله ۲/۵ درجه



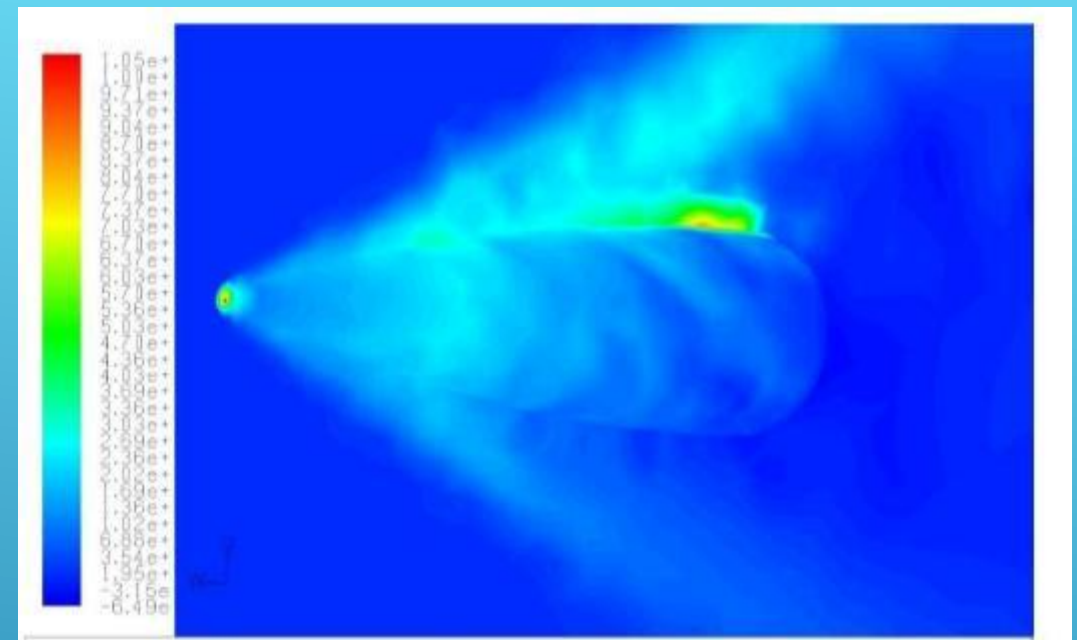
نمودار شماره ۵/۶: نمودار فشار دینامیکی



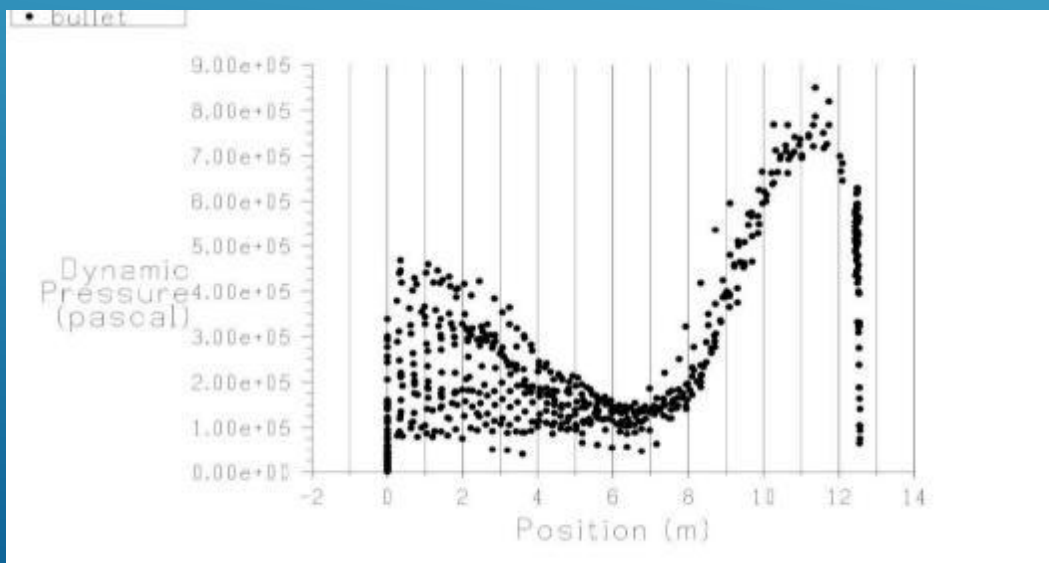
نمودار شماره ۵/۵: نمودار فشار استاتیکی



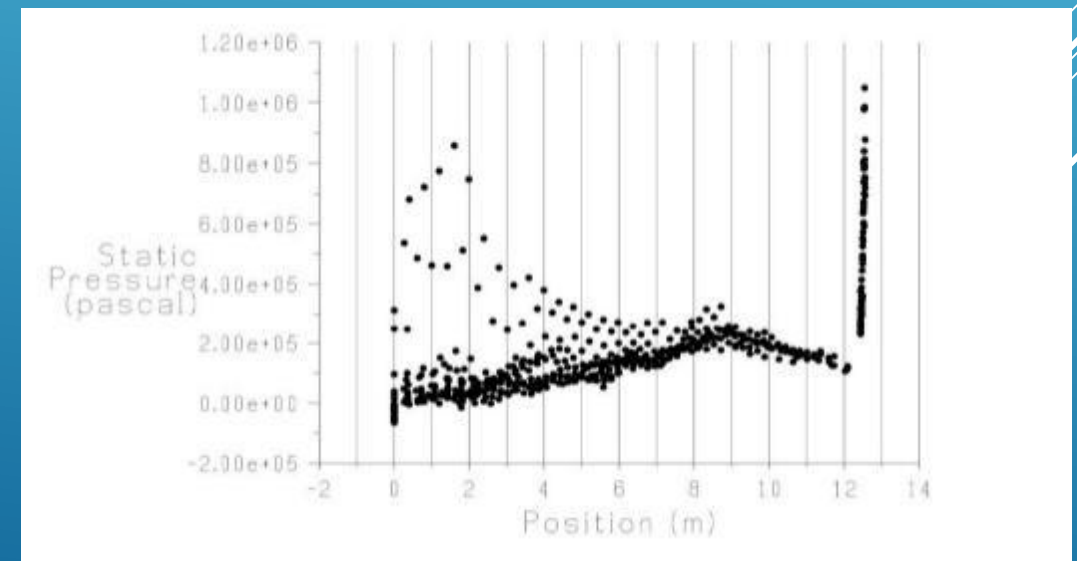
شکل شماره ۵/۸: کانتورهای فشار دینامیکی گلوله با سر نیمه تخت در عدد ماخ ۳ و زاویه حمله صفر درجه



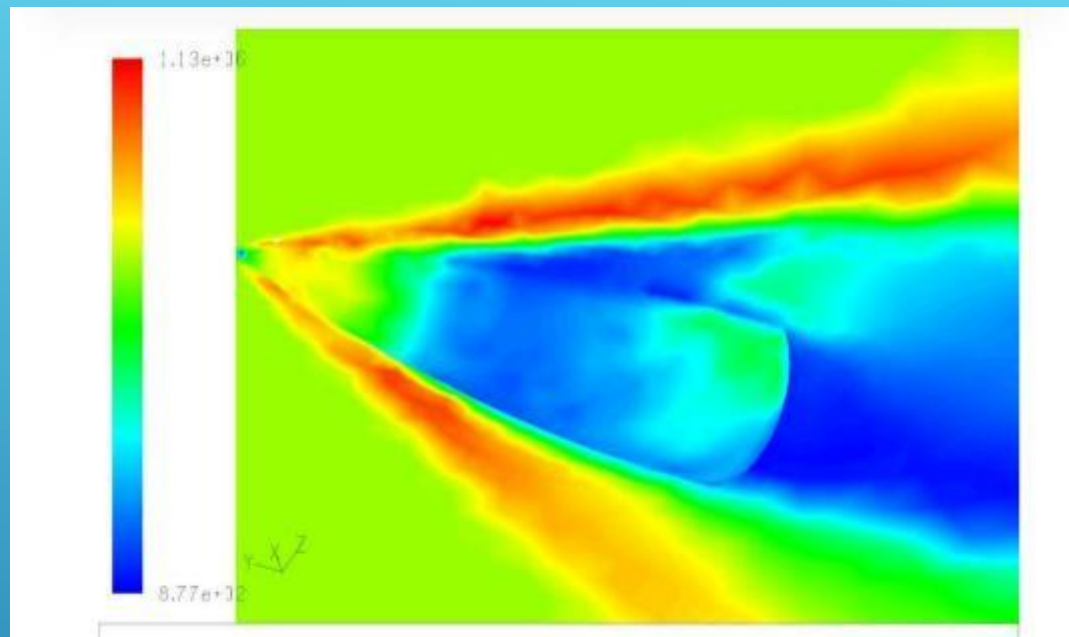
شکل شماره ۵/۷: کانتورهای فشار استاتیک گلوله با سر نیمه تخت در عدد ماخ ۳ و زاویه حمله صفر درجه



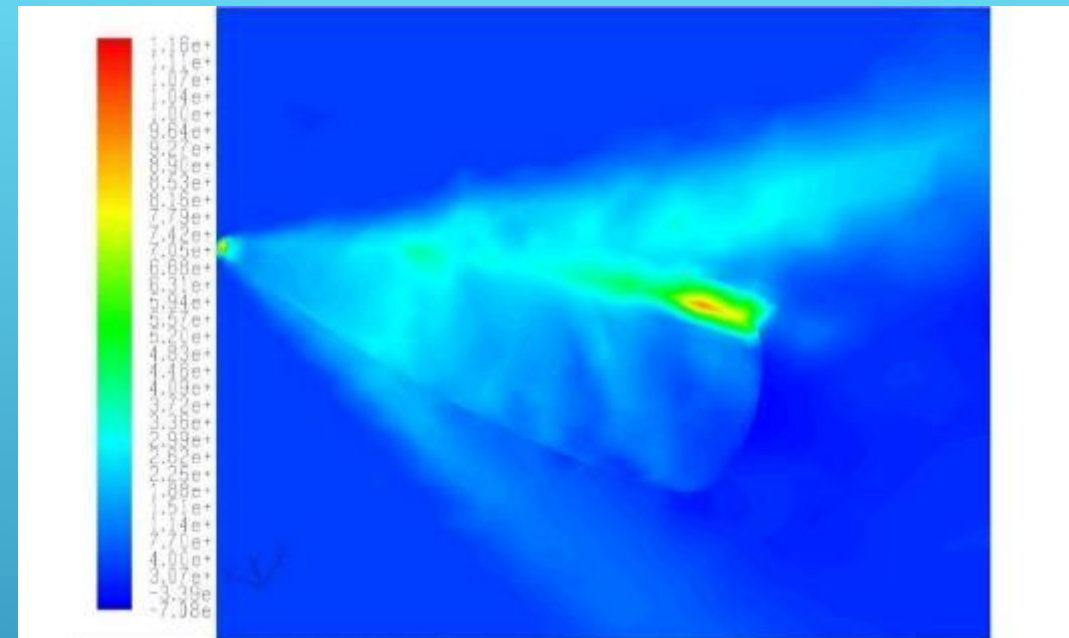
نمودار شماره ۵/۸: نمودار فشار دینامیکی



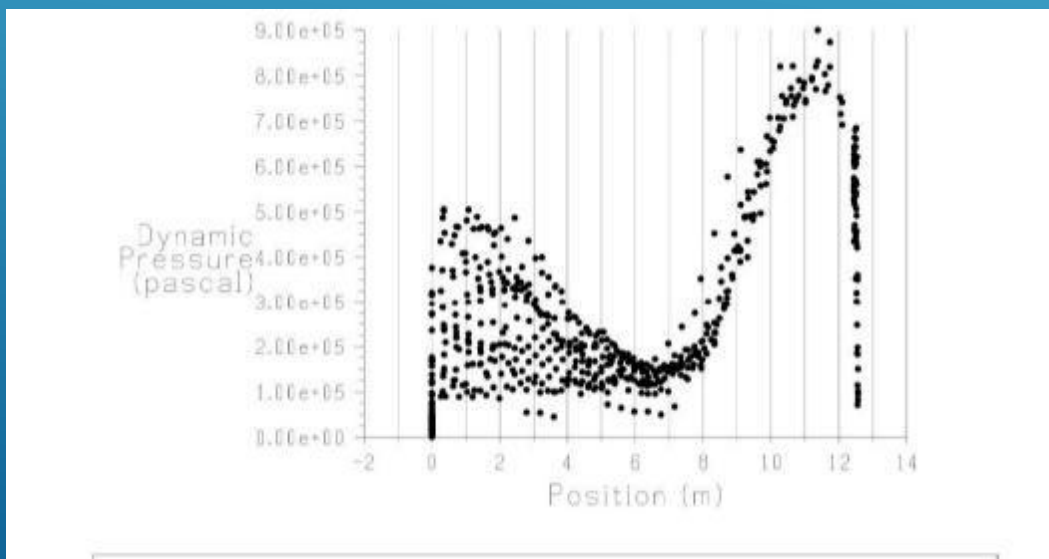
نمودار شماره ۵/۷: نمودار فشار استاتیک



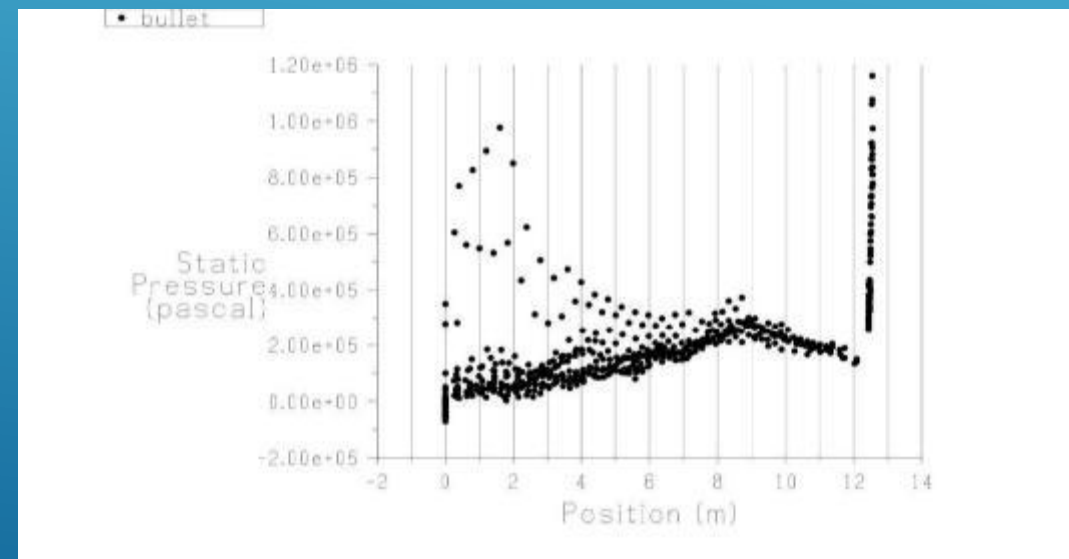
شکل شماره ۵/۱۰: کانتورهای فشار دینامیکی گلوله با سر نیمه تخت در عدد ماخ ۳ و زاویه حمله ۲ درجه



شکل شماره ۵/۹: کانتورهای فشار استاتیک گلوله با سر نیمه تخت در عدد ماخ ۳ و زاویه حمله ۲ درجه



نمودار شماره ۵/۱۰: نمودار فشار دینامیکی



نمودار شماره ۵/۹: نمودار فشار استاتیک

۶. نتیجه‌گیری

- ▶ در این مطالعه، گلوله‌های نوکتیز، کاملاً تخت و نیمه تخت مورد بررسی قرار گرفتند.
- ▶ نتایج کانتورهای فشار و تحلیل دینامیک سیالات نشان می‌دهد که هیچ‌کدام از شکل‌های کاملاً تخت یا نوکتیز به تنهایی برای برد بلند مناسب نیستند.
- ▶ - گلوله‌های کاملاً تخت به دلیل ایجاد موج ضربه‌ای قوی در جلوی پرتابه، تغییرات شدید فشار، دما، چگالی و سرعت جریان را تجربه می‌کنند که باعث افزایش درگ و ایجاد مقاومت در حرکت پرتابه می‌شود. با این حال، توزیع فشار در سطح گنبدی شکل از تمرکز دما در یک نقطه جلوگیری کرده و باعث حفظ خواص ماده می‌شود.
- ▶ - گلوله‌های نوکتیز به جای موج ضربه‌ای قوی، امواج ضربه‌ای مایل را تولید می‌کنند که ضعیف‌تر هستند، اما تشکیل لایه مرزی موجب افزایش سطح مؤثر پرتابه می‌شود. این ضخامت جابه‌جایی لایه مرزی باعث افزایش درگ اصطکاکی سطح می‌شود که برای گلوله‌های برد بلند یک چالش محسوب می‌شود.
- ▶ با توجه به این نتایج، یک طراحی بهینه که تعادل بین این ویژگی‌ها را ایجاد کند، ضروری است.
- ▶ گلوله‌های نیمه تخت این تعادل را فراهم می‌کنند و مزایای هر دو مدل قبلی را ترکیب می‌کنند تا نفوذپذیری و عملکرد پرتابه در برد بلند بهینه شود.

[1] J. Kokes; M. Costello and J. Sahu ایجاد مدل آیرودینامیکی برای شبیه‌سازی پرواز پرتابه با استفاده از نتایج عددی دینامیک سیالات محاسباتی، **ARL-CR-577**، آزمایشگاه تحقیقاتی ارتش، ۲۰۰۶.

[2] J. Sahu پیش‌بینی عددی دقیق ویژگی‌های آیرودینامیکی پرتابه‌های بالدار، **ARL-TR-3603**، آزمایشگاه تحقیقاتی ارتش، ۲۰۰۵.

[3] A. N. Incorvaia; D. M. Poulos; R. N. Jones and J. M. Tschirhart ، آیا یک گلوله سقوط کرده می‌تواند در سرعت نهایی کشنده باشد؟ بررسی آسیب قلبی ناشی از شلیک‌های جشن، مجله جراحی قفسه سینه، ۲۰۰۷

[4] F. G. Moore ، روش‌های تقریبی برای آیرودینامیک تسلیحات، سری پیشرفت در هوافضا، جلد ۱۸۶، **AIAA**، 2000.

[5] S. Doraiswamy and G.V. Candler ، شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده و محاسبات ناویر-استوکس برای پرتابه‌های چرخان، مجله **AIAA**، جلد ۴۵، شماره ۵، سپتامبر-اکتبر ۲۰۰۸.

[6] S. I. Siltan ، محاسبات ناویر-استوکس برای یک پرتابه چرخان از سرعت زیرصوت تا مافوق صوت، مجله **AIAA**، جلد ۴۲، شماره ۲، مارس-آوریل ۲۰۰۵.

[7] T. Yoshinaga; K. Inoue and A. Tate ، تعیین ویژگی‌های پیچشی اجسام متلاطم با استفاده از روش چرخش آزاد، مجله هوافضا، جلد ۲۱، شماره ۱، ژانویه-فوریه ۱۹۸۴، صفحات ۲۸-۲۱.

[8] K. G. Guderley ، الگوهای جریان محوری متقارن در عدد ماخ ۱، گزارش فنی نیروی هوایی آمریکا ۶۲۸۵

منابع وب:

Url 1: [Wikipedia - JPEG](<http://www.wikipedia.com/jpeg.pic>)

Url 2:** [انجمن بین المللی هوافضا](<http://www.iaa.org>)

Url 3:** [وبسایت VirtualDub](<http://www.virtualdub.org>)

Url 4:** [وبسایت ادوارد دیبونو - تفکر خلاق](<http://www.edwdebono.com/debono/selfi.htm>)

Url 5:** [مستند NOVA - سد صوتی](<http://www.pbs.org/wgbh/nova/barrier.html>)

بالتشکر

