

## طراحی گلوله سوپر کاویتاسیون مناسب برای کلت غواصی

اصغر مهدیان<sup>۱\*</sup>، محمد مونسان<sup>۲</sup>، سعید حیدری کبریتی<sup>۳</sup>، بهروز شهرياری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، a.mahdian@mut-es.ac.ir  
<sup>۲</sup> استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی عمران، m.moonesun@gmail.com  
<sup>۳</sup> کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، sa.heydari110@chmail.ir  
<sup>۴</sup> استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، shahriari@mut-es.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

گلوله‌های معمولی در داخل آب با افت شدید سرعت مواجه می‌شوند و برد بسیار کوتاهی دارند. پدیده سوپر کاویتاسیون باعث می‌شود که تقریباً تمام بدنه گلوله توسط یک حباب گاز (یا خلا نسبی) پوشیده شود، لذا مقدار نیروی مقاوم پوسته‌ای در شرایط سوپر کاویتاسیون به شدت کاهش می‌یابد. مهمترین پارامترها در تحلیل یک گلوله سوپر کاویتاسیون شامل قطر پیشانی، شکل و زاویه راس آن، طول و نسبت طول به قطر گلوله و جرم آن، برد نهایی گلوله و انرژی عقب نشینی سلاح است. در این مقاله به دلیل ارتباط کمیت‌های جرم، طول و قطر گلوله باهم، جرم گلوله مستقل لحاظ می‌شود. با توجه به نیروهای وارد و الزامات طول حباب، برای قطر پیشانی نیز چند مقدار مشخص در نظر گرفته می‌شود. لذا پارامترهای طراحی به سه کمیت جرم، برد نهایی گلوله و انرژی عقب نشینی سلاح کاهش می‌یابند. با توجه به هدف گذاری حداکثر برد موثر و قید حداقل تغییر روی پوکه‌های موجود روند طراحی گلوله پایه گذاری می‌شود. با تعدیل بین کاهش انرژی عقب نشینی سلاح و افزایش برد گزینه‌های نهایی محدودتر می‌شوند. در این تحقیق با بررسی اثرات هر یک از این پارامترها و صحت سنجی نتایج، نحوه طراحی و انتخاب گلوله مناسب بیان می‌شود.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله:

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

کلمات کلیدی:

سوپر کاویتاسیون

انتخاب کالیبر

حباب

طراحی گلوله

## Design of Super-Cavitation Bullet for Underwater Handgun

Asghar Mahdian<sup>1\*</sup>, Mohammad Moonesun<sup>2</sup>, Saeed Heydari Kebriti<sup>3</sup>, Behrooz Shahriari<sup>4</sup><sup>1</sup> Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, a.mahdian@mut-es.ac.ir<sup>2</sup> Faculty of Civil engineering, Shahrood University of Technology, m.moonesun@gmail.com<sup>3</sup> Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, sa.heydari110@chmail.ir<sup>4</sup> Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, shahriari@mut-es.ac.ir

## ARTICLE INFO

## Article History:

Received: 28 Jan. 2021

Accepted: 23 Aug. 2021

## Keywords:

Super-cavitation

Calibre selection

Cavity

Bullet design

## ABSTRACT

Ordinary projectiles in the water usually experience a sharp drop in speed and a have a very short range of several meters. Super cavitation causes the entire body of the projectile to be covered by a cavity of gas (relative vacume). For this result the amount of frictional resistance under super cavitation conditions decreases significantly. In fact, the analysis of super-cavitation projectile is strongly dependent on cavitator diameter and its shape, ratio of length to projectile diameter, projectile mass, projectile diameter, final projectile range, recoil energy of the weapon. In this paper, the mass of projectile assumed to be independent parameter. On the other hand because of bubble requirements, for cavitator some diameters are assumed. For this reason, design variables reduces to three quantity: mas and final range of projectile and recoil energy of weapon. According to required maximum range and minimum cost with trade off between recoil energy and range, final options are limited. In this article the effects of each of these parameters and how they are analyzed by analytical relationships and their validation are explained.

## ۱- مقدمه

پدیده کاویتاسیون به تولید حباب‌های کوچک بخار سیال بر روی بدنه یک جسم متحرک در اثر سرعت بالا اطلاق می‌شود. هرچند تحقیقاتی بر روی حذف کاویتاسیون به خصوص برای دوری از خوردگی، ارتعاشات و شوک‌های صوتی انجام گرفته است، با این وجود اثر کاهش نیروی مقاوم توسط ایجاد حفره منظم بر روی بدنه اجسام متحرک در اواسط قرن بیستم مورد توجه قرار گرفت.

تحقیقات در زمینه سوپر کاویتاسیون با اسم رمز اشکوال در سال ۱۹۶۰ در اتحاد جماهیر شوروی آغاز شد. در سال ۱۹۷۲ نخستین تست‌های اژدر فوق سریع اشکوال با طول بیش از ۸ متر و قطر ۵۳۳ میلی‌متر و وزن ۲۷۰۰ کیلوگرم با موفقیت انجام گردید و تا سال ۱۹۷۷ فرایند تکمیل و بهینه سازی آن به طول انجامید. سرعت این اژدر هنگام شلیک ۹۳ کیلومتر بر ساعت بود که در طول مسیر به بیش از ۳۷۰ کیلومتر نیز می‌رسید.

در سال ۱۹۹۴ نیروی دریایی ایالات متحده آمریکا طراحی اژدری را آغاز نمود که محصول آن، امکان شلیک از بالگردهایی چون کبرا را داشت. پس از آن آمریکا برای عملیات ساحلی پروژه‌ای را به منظور جابه‌جایی گروهی از سربازهای ویژه در زیر آب با سرعت بسیار بالا آغاز نمود که در نتیجه آن در سال ۲۰۰۶ یک زیردریایی با سرعت ۵۱ متر بر ثانیه به یکان رزمی این کشور افزوده شد. آلمان نیز در سال ۲۰۰۴ اعلام نمود که اژدری ساخته است که می‌تواند با سرعتی بیش از ۴۰۰ کیلومتر بر ساعت در آب حرکت نماید. در سال ۲۰۰۶ نیز کشور ایران اژدری با نام حوت را معرفی نمود که دارای قابلیت‌های مشابهی با اژدر اشکوال بود.

اولین نمونه گلوله سوپر کاویتاسیون در اواخر دهه ۱۹۶۰ توسط شوروی سابق تست شد و در سال ۱۹۷۵ در سامانه کلت غواصی با لوله بدون خان مورد استفاده قرار گرفت. آلمان نیز یک نمونه کلت راکت انداز با قابلیت شلیک ۵ راکت سوپر کاویتاسیون کوچک به تولید رسانده است که در کلیه نیروهای ناتو مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه سلاح‌های دوحیطه با قابلیت شلیک مهمات در هوا و آب نیز ساخته شده است. این مهمات با طول بلند از لوله‌های خاندار شلیک می‌شود و در هوا به واسطه دوران و در آب به واسطه طول بلند پایدار می‌شود. شرکت DSG نروژ سردمدار طراحی گلوله‌های دوحیطه است. محصولات این شرکت در ناتو مورد استفاده قرار گرفته است.

در زمینه طراحی گلوله‌های سوپر کاویتاسیونی با قابلیت حرکت پایدار در زیر آب، محققان موفق به طراحی گلوله‌های کالیبر پایین یعنی ۴/۴۵، ۵/۴۵، ۷/۶۲ و ۱۲/۷ میلی‌متر شده‌اند. در شکل (۱) دو نمونه از گلوله‌های سوپر کاویتاسیون در کالیبرهای پایین به همراه یک گلوله معمولی نشان داده شده است.



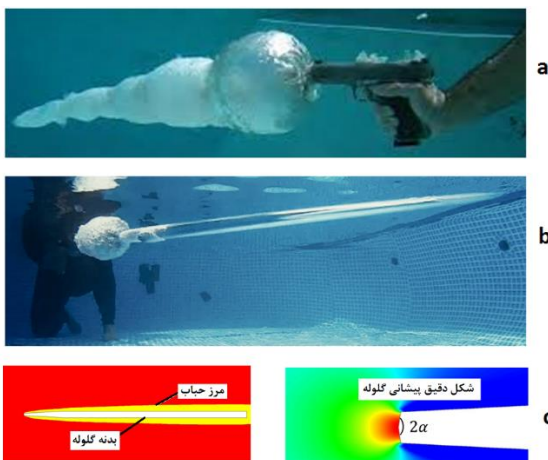
شکل (۱) (a,b) گلوله‌های سوپر کاویتاسیون (با قطر ۴/۴۵ و ۵/۴۵ میلی‌متر) و (c) گلوله معمولی سلاح کلاشنیکف (با قطر ۷/۶۲ میلی‌متر) [۱]

ایجاد حباب مصنوعی (یا طبیعی) گاز در اطراف گلوله، تحت عنوان پدیده سوپر کاویتاسیون مصنوعی (یا طبیعی) شناخته می‌شود. پدیده سوپر کاویتاسیون می‌تواند به صورت طبیعی و به علت سرعت بسیار بالای گلوله ایجاد شود. در این صورت فشار بخار داخل حباب تقریباً برابر صفر است. مانند اژدرها، اگر حباب به طور مصنوعی و با تزریق گاز از یک مخزن جداگانه بر روی بدنه آن ایجاد گردد، فشار حباب برابر صفر نخواهد بود.

طی دو دهه اخیر در کشور مطالعه در خصوص پرتابه‌های سوپر کاویتاسیون مورد توجه قرار گرفته است [۲]، [۳]. از مهمترین نمونه‌های ساخته شده، میتوان به اژدر حوت اشاره کرد که میتواند در زیر آب به سرعت حدود ۱۰۰ متر بر ثانیه برسد.

در پرتابه‌های بدون پیشران با قابلیت ایجاد شرایط سوپر کاویتاسیون طبیعی (مانند گلوله‌های شکل a, b-۱) برد موثر بسیار بالاتر از گلوله‌های معمولی است. در این نوع پرتابه‌ها حبابی با ابعاد مطلوب تنها در محدوده سرعت مشخصی تشکیل می‌شود که می‌تواند برد گلوله را تا حد بسیار خوبی افزایش دهد.

در گلوله‌های معمولی بدون خاصیت سوپر کاویتاسیون، تشکیل نامنظم حباب<sup>۱</sup> در اطراف گلوله عملاً هیچ کمکی به بهبود برد آن نمی‌کند. حباب ایجاد شده در اطراف گلوله معمولی کلت در هنگام شلیک زیر آب شکل (a-۲) نشان داده شده است. در این شرایط برد



شکل ۲: (a) ایجاد حباب‌های نامنظم در اطراف یک گلوله معمولی، (b,c) حباب منظم اطراف یک گلوله سوپر کاویتاسیون و پیشانی آن [۲]

در شرایط سوپر کاویتاسیون تمام بدنه گلوله توسط یک لایه از گاز (یا خلا نسبی) پوشیده می‌شود و از آنجا که مقدار چگالی و ضریب لزجت فاز گاز (یا خلا نسبی) به شدت از فاز مایع پایین‌تر است، مقدار نیروی مقاوم پوسته‌ای در شرایط سوپر کاویتاسیون به شدت کاهش می‌یابد. به این ترتیب اگر گلوله و همچنین شکل پیشانی<sup>۲</sup> آن به گونه‌ای طراحی گردد که مقدار نیروی مقاوم فشاری به حداقل خود برسد، مقدار نیروی مقاوم کل به شدت کاهش خواهد یافت. در شکل (۳) مقاومت آب در مقابل حرکت جسم مغروق در شرایط معمولی و سوپر کاویتاسیون نشان داده شده است.

استفاده از خواص پدیده سوپر کاویتاسیون در کاهش نیروی مقاوم اجسام متحرک در زیر آب قدمت زیادی ندارد. طبیعی است توصیف نیروی مقاوم اجسام سوپر کاویتاسیون اعم از اژدرهای بزرگ با قابلیت کنترل مسیر یا گلوله‌های کالیبر کوچک توسط روابط یکسانی انجام می‌شود [۴] و [۵]. بر این اساس یافتن روش قابل اعتماد برای طراحی و پیش‌بینی رفتارهای یک پرتابه یا متحرک در زیر آب تحت شرایط سوپر کاویتاسیون باید با توجه به تست و آزمون انجام گیرد [۶]. نتایج استخراج شده در این مقاله با توجه به روابط به دست آمده از مراجع و شبیه‌سازی عددی و کدهای نوشته شده بر اساس روابط فوق به دست آمده‌اند. در نهایت گلوله پیشنهاد شده تحت آزمون‌های عملی شلیک در زیر آب قرار گرفته است. همچنین از نتایج شبیه‌سازی عددی در شرایط سرعت ثابت نیز استفاده شده که در اینجا از توضیح مدل در شبیه‌سازی‌های عددی صرف نظر می‌شود.

در این مقاله ضمن استفاده از نتایج پژوهش‌های فوق به پیش‌بینی رفتار گلوله سوپر کاویتاسیون پرداخته شده است. با این کار ضمن انتخاب کالیبر، طراحی اولیه گلوله مناسب برای یک سلاح غواصی، انجام شده است. لذا با توجه به نوع پروژه تا حد امکان به نکات مهم و تا حدی هندسه نهایی که منجر به ساخت نمونه و تست آن گردیده است پرداخته می‌شود.

### ۳- پارامترهای لازم برای بررسی حرکت گلوله سوپر کاویتاسیون در زیر آب

طراحی مناسب شکل بدنه گلوله با لحاظ نمودن نحوه پایداری آن از مهمترین مسائل در طراحی گلوله‌های سوپر کاویتاسیون می‌باشد. در اینجا ابتدا پارامترهای لازم برای بررسی این پدیده تعریف می‌شوند. مهمترین این پارامترها عدد کاویتاسیون، سرعت پرتاب دهانه، طول حباب و مرز ناپایداری و نیروی مقاوم هستند [۷].

بهترین ملاک برای بیان شرایط سوپر کاویتاسیون، عدد کاویتاسیون (ضریب فشار) است. عدد کاویتاسیون گلوله در حرکت زیر آب ( $\sigma$ ) تابع عمق آب، فشار بخار در حباب، سرعت جسم و چگالی سیال است. هرچه عدد کاویتاسیون پایین‌تر باشد شدت پدیده کاویتاسیون بیشتر است (جدول (۱)).

مفید به یک متر هم نمی‌رسد. ولی در یک گلوله سوپر کاویتاسیون به دلیل ایجاد حباب منظم در اطراف گلوله عملکرد گلوله به طور قابل توجهی ارتقا می‌یابد (شکل (C, b-۲)).

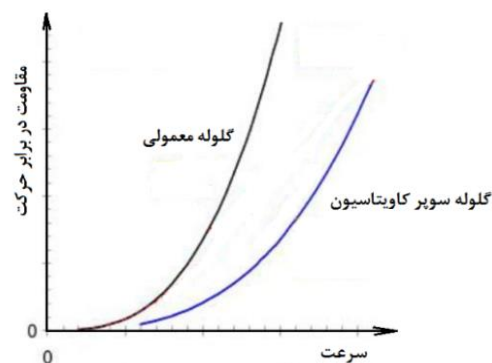
در این مقاله با توجه به تحقیقات انجام شده در خصوص حرکت اژدرهای زیرآبی تحت شرایط سوپر کاویتاسیون مصنوعی به بررسی الزامات یک سامانه گلوله و کلت غواصی و نهایتاً انتخاب کالیبر مناسب پرداخته می‌شود.

### ۲- تاریخچه پژوهش‌های انجام شده

در خصوص طراحی گلوله‌های سوپر کاویتاسیون برای سلاح غواصی مرجع خاصی منتشر نشده است. با این حال می‌توان با استفاده از پژوهش‌های انجام شده در خصوص طراحی اژدرهای سوپر کاویتاسیون به نکات جالبی در مورد طراحی گلوله‌های مورد نظر دست یافت.

طی پژوهش انجام شده در مرجع [۲] ابتدا رفتار بالستیک داخلی یک گلوله سوپر کاویتاسیون مورد بررسی قرار گرفته و سپس با توجه به معادلات حاکم بر ضریب درگ به بررسی رفتار آن در زیر آب پرداخته شده است. لازم به ذکر است در بررسی رفتار بالستیک داخلی ضریب درگ ناشی از رفتار سوپر کاویتاسیون از اهمیت ویژه برخوردار است.

برای افزایش برد گلوله در آب، بهترین راه، کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت است. یکی از اولین و متداول‌ترین روش‌های کاهش نیروی مقاوم، استفاده از شکل بهینه گلوله با عدم جدایش سیال بر روی بدنه آن است. این روش مقدار نیروی مقاوم را حداکثر ۱۰ الی ۲۰ درصد کاهش می‌دهد. ولی بهترین روش برای افزایش برد گلوله‌های زیر آبی ایجاد یک لایه گازی در اطراف بدنه به منظور حذف نیروی مقاوم پوسته‌ای بین متحرک و سیال (مقاومت ناشی از لزجت سیال) است (شکل (۲)). [۳].



شکل ۳: تاثیر شرایط سوپر کاویتاسیون بر نیروی مقاوم [۳]

حرکت پایدار گلوله کمتر از  $0.15$  است. البته به ازای مقادیر بسیار بیشتر عدد کاویتاسیون (مثلاً حدود  $14$ )، رژیم جریان، سوپر کاویتاسیون خواهد بود ولی منجر به حرکت پایدار گلوله نمی‌شود. چراکه شرط اصلی پایداری حرکت گلوله، این است که طول حباب از طول گلوله بیشتر باشد. از این نکته در تعیین برد موثر استفاده خواهد شد. لازم به ذکر است گلوله با برخورد به بدنه حباب به حرکت خود در مسیر مستقیم ادامه می‌دهد. با کاهش طول حباب احتمال درگیری انتهای گلوله با آب و ناپایداری حرکت گلوله وجود دارد.

در شرایط سوپر کاویتاسیون طبیعی به علت سرعت بالای سیال، عدد فرود مقادیری بیش از  $1000$  به خود می‌گیرد ( $Fr > 1000$ ). این یعنی نسبت نیروهای اینرسی به نیروی جاذبه بسیار زیاد است لذا از نیروهای جاذبه صرف نظر می‌گردد.

در یک گلوله سوپر کاویتاسیون عدد وبر که نشان دهنده نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ناشی از کشش سطحی است در حدود  $We > 300000$  خواهد شد بنابراین از نیروهای کشش سطحی نیز می‌توان صرف نظر نمود. البته باید گفت با کاهش سرعت نسبی گلوله، شکل حباب به مرور از حالت متقارن خارج می‌شود.

عدد رینولدز (نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزجت) نیز برای شرایط سوپر کاویتاسیون مقادیری در حدود  $200$  هزار به خود می‌گیرد.

بر اساس استدلال گفته شده، شتاب گرانش و همچنین کشش سطحی و حتی لزجت تاثیر چندانی بر روی حرکت پرتابه سوپر کاویتاسیون، ندارند و در این شرایط مقدار نیروی اینرسی بر سایر نیروها از جمله نیروهای لزجت غالب است.

از بین این چهار عدد بدون بعد در شرایط سوپر کاویتاسیون، عدد بدون بعد  $\sigma$  مقادیری از حدود  $3$  هزارم در لحظه خروج گلوله از لوله تا حدود  $15$  هزارم در لحظه ناپایداری به خود می‌گیرد. لذا مهمترین کمیتی که در بررسی پدیده سوپر کاویتاسیون مد نظر قرار می‌گیرد عدد بدون بعد کاویتاسیون خواهد بود [۸].

در لحظه خروج گلوله از لوله سلاح، طول حباب بیشترین مقدار خود را داراست. اگر سرعت خروج گلوله بیش از مقدار معینی شود، با زیاد شدن طول حباب و سرگردانی گلوله در آن دقت گلوله پایین خواهد آمد. بر اساس تستهای انجام شده بهترین نسبت طول حباب به طول گلوله در حدود  $6$  است تا ضمن ایجاد شرایط حرکت پایدار برد موثر گلوله نیز تا حد امکان بالا برود. در اینجا از این عدد به عنوان ملاک تعیین سرعت مناسب گلوله در لحظه خروج از لوله استفاده شده است.

سرعت دهانه، به جرم گلوله، نوع و میزان باروت و طول لوله سلاح بستگی دارد. به طور کلی به ازای مقدار باروت مشخص، با کاهش جرم گلوله و افزایش طول لوله، سرعت دهانه بیشتر می‌گردد. پس از انفجار باروت و انتقال بخشی از انرژی آن به گلوله، انرژی جنبشی اولیه گلوله تامین می‌شود.

در مورد طول حباب و مرز ناپایداری باید گفت در ابتدای خروج گلوله از لوله، به واسطه شکل پیشانی، حبابی در اطراف گلوله تشکیل می‌شود و به مرور با کاهش سرعت، طول آن کاهش می‌یابد. لحظه‌ای که طول حباب با طول گلوله یکسان شد لحظه ناپایداری نامیده می‌شود. در این لحظه سرعت گلوله به شدت افت کرده و عملاً گلوله ناپایدار می‌گردد. سرعت بیش از حد نیز باعث می‌شود قطر حباب بسیار بیشتر از قطر گلوله شده و عملاً گلوله ناپایدار گردد. بر این اساس در لحظه ناپایداری گلوله سوپر کاویتاسیون، کمیت‌های سرعت نهایی گلوله ( $V_F$ )، بردنهایی گلوله ( $X_F$ )، انرژی نهایی گلوله ( $E_F$ ) تعریف می‌شوند.

با توجه به رابطه برنولی با افزایش سرعت گلوله مقدار فشار سیال در اطراف آن کاهش می‌یابد. در شرایط سوپر کاویتاسیون این فشار به قدری کم می‌شود که مقدار آن از مقدار فشار بخار سیال در دمای محیط کمتر شده و لذا شرایط جوشش سیال بر روی بدنه گلوله مهیا می‌شود.

در شرایط سوپر کاویتاسیون نیز مقدار نیروی مقاوم با توجه به رابطه (۱) تعیین می‌شود [۸]:

$$F_c = C_D \frac{\rho U_\infty^2}{2} A_c, \quad C_D = C_D(\sigma) \quad (1)$$

در شرایط سوپر کاویتاسیون مقدار نیروی مقاوم  $F_c$ ، مستقل از مقدار لزجت محیط و تابعی از عدد کاویتاسیون  $\sigma$  و چگالی  $\rho$  و سرعت و سطح پیشانی  $A_c$  است. به طور کلی در پدیده سوپر کاویتاسیون به علت عدم تماس سیال با گلوله، عملاً مقدار نیروی مقاوم پوسته‌ای بر روی بدنه حذف می‌گردد. اگر چه کاهش مقدار نیروی مقاوم با ایجاد حباب در اطراف بدنه می‌تواند کمک زیادی در بهبود عملکرد این گلوله‌ها در زیر آب داشته باشد، ولی به علت حذف نیروی شناوری، ممکن است وزن گلوله بر روی مسیر تاثیرگذار باشد.

از طرف دیگر باید نیروهای کشش سطحی و تاثیر آنها بر جمع شدن حباب و همچنین تاثیر نیروی لزجت نیز بررسی شود. لذا برای بررسی رفتار دینامیکی گلوله‌های سوپر کاویتاسیون لازم است موضوعات مختلف مورد بررسی قرار بگیرند.

پارامترهای بی بعد مهم در بررسی این پدیده، عدد کاویتاسیون (ضریب فشار)، عدد فرود، عدد رینولدز و عدد وبر هستند که به صورت جدول (۱) تعریف می‌شوند. مهمترین عدد بی بعد در بررسی جریان‌های سوپر کاویتاسیون عدد کاویتاسیون است که در محدوده

استوانه‌ای، رابطه بین جرم  $m$ ، طول گلوله  $L$  و قطر آن  $d$  مطابق رابطه‌ی (۳) است:

$$m = \frac{\pi d^2 L \rho}{4} \quad (3)$$

با فرض جرم کم برای باروت اگر جرم سلاح  $M$  و سرعت عقب‌نشینی آن  $V$ ، و جرم گلوله  $m$  و سرعت خروج آن از دهانه لوله  $v$  فرض شود، رابطه  $MV = mv$  برقرار است. از طرف دیگر انرژی آزاد عقب‌نشینی سلاح نیز از رابطه  $E = \frac{M}{2} V^2$  محاسبه می‌شود. از آنجا که دقت تیراندازی به اندازه زیادی به انرژی آزاد عقب‌نشینی وابسته است، به عنوان یکی از قیود طراحی گلوله، در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است هرچه جرم سلاح بیشتر باشد انرژی عقب‌نشینی آزاد آن کاهش می‌یابد. ولی تجربه ثابت کرده است که جرم قابل قبول برای یک کلت غواصی در حدود یک کیلوگرم است و بیشتر از آن عملکرد غواص را با خدشه روبرو می‌کند.

در شرایط سوپر کاویتاسیون، حداکثر قطر حباب  $d_{\max}$  و حداکثر طول آن  $L_{\max}$  بر حسب قطر پیشانی گلوله  $d_c$  و عدد کاویتاسیون  $\sigma$  و ضریب نیروی مقاوم  $C_D$ ، از روابط (۴) و (۵) به دست می‌آیند [10]:

$$\frac{d_{\max}}{d_c} = \sqrt{\frac{C_D}{\sigma}} \quad (4)$$

$$\frac{L_{\max}}{d_c} = \sqrt{\frac{C_D}{\sigma^2} \ln \frac{1}{\sigma}} \quad (5)$$

در عمل  $C_D$  ضریب نیروی مقاوم تابعی خطی از عدد کاویتاسیون  $\sigma$  است و از رابطه (۶) به دست می‌آید [۱۰]:

$$C_D = K_1 + K_2 \sigma \quad (6)$$

پیشانی گلوله، بخشی از بدنه گلوله است که بیشترین نیروهای مقاوم را تحمل می‌کند و لذا حرکت کلی گلوله متأثر از طراحی این بخش می‌باشد. در شکل (۲) نیز یک نمونه پیشانی گلوله سوپر کاویتاسیون با زاویه راس پیشانی  $2\alpha$  کمتر از  $180^\circ$  درجه نمایش داده شده است.

از معادلات ۱ تا ۶ در تحلیل بالستیک خارجی گلوله استفاده شده و با استفاده از نتایج به دست آمده، انتخاب کالیبر و طراحی هندسه گلوله انجام شده است.

#### جدول ۱- پارامترهای بی‌بعد قابل تعریف در جریان سوپر کاویتاسیون [۲]

مقدار در محدوده حرکت پایدار گلوله	تعریف	کمیت
$\frac{\rho U_\infty^2 d_c}{\xi} \geq 30000$	نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی	عدد وبر
$\frac{\rho U_\infty d_c}{\mu} > 20000$	نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزجت	عدد رینولدز
$\frac{U_\infty}{\sqrt{gd_c}} \geq 1000$	نسبت نیروی اینرسی به نیروی جاذبه	عدد فرود
$\frac{2(p_\infty - p_c)}{\rho U_\infty^2} \leq 0.15$	نسبت تفاوت فشار استاتیکی سیال و فشار بخار آن به فشار دینامیکی	عدد کاویتاسیون

#### ۴- روابط حاکم بر پدیده سوپر کاویتاسیون برای پیش بینی

##### رفتار بالستیک خارجی گلوله

برای توصیف نحوه انتخاب کالیبر مناسب باید کمیت‌های مهم و تاثیر گذار را بررسی نمود. برد نهایی  $X_F$ ، انرژی عقب‌نشینی سلاح  $E$  و انرژی گلوله در هنگام رسیدن به برد نهایی، در انتخاب کالیبر و همچنین طراحی هندسی گلوله موثر هستند [۷] و [۸].

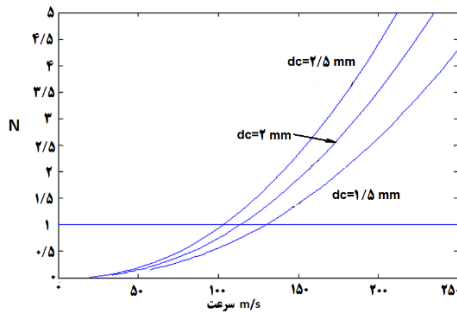
از آنجا که پیش‌بینی شکل حباب، قیود شکل گلوله را مشخص می‌کند از کلیدی‌ترین جنبه‌های طراحی گلوله سوپر کاویتاسیون است. به عنوان یک تقریب با استفاده از جریان پتانسیل، توزیع شعاع حباب در طول آن قابل دستیابی است. رابطه (۲) شعاع حباب  $r(x)$  را به صورت تابعی از قطر پیشانی  $d_c$  و طول حباب  $L_{\max}$  بیان می‌کند [۹]:

$$r(x) = \frac{d_c}{2} \left( 1 - \left( \frac{x}{L_{\max}} \right)^2 \right)^{1.24} \quad (2)$$

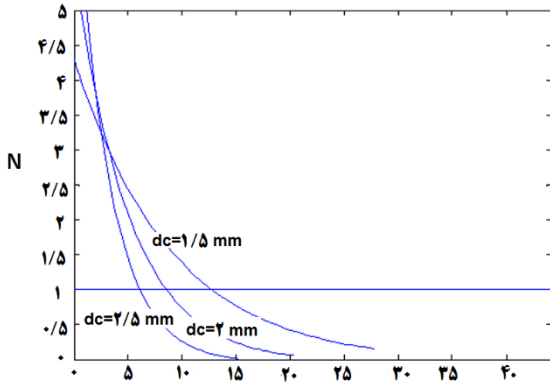
لازم است طراحی گلوله به گونه‌ای انجام گیرد که میزان نیروی مقاوم اعمال شده به حداقل خود برسد. لازمه این امر طراحی شکل پیشانی گلوله و قطر آن است. هرچه قطر پیشانی بیشتر باشد احتمال ناپایداری گلوله در ابتدای مسیر کمتر می‌شود. از طرفی دیگر با افزایش قطر پیشانی ضریب نیروی مقاوم به شدت افزایش و برد موثر کاهش می‌یابد.

با توجه به محدودیت‌ها در تولید انبوه نیز، حتی الامکان نباید تغییرات زیادی بر روی پوک‌های موجود اعمال گردد.

در طراحی گلوله هرچه بتوان، جرم آن را کمتر در نظر گرفت، انرژی عقب‌نشینی سلاح کمتر می‌شود که این یک مزیت است. از طرف دیگر هرچه جرم گلوله بیشتر باشد، برد نهایی گلوله بیشتر می‌شود. بنابراین بایستی تعادلی بین این دو بوجود آید. با فرض شکل



شکل ۵: نمودار N بر حسب سرعت گلوله کالیبر ۴/۴۵ میلیمتر به ازای قطرهای مختلف پیشانی



شکل ۶: نمودار N بر حسب موقعیت گلوله با کالیبر ۴/۴۵ میلیمتر و قطرهای مختلف پیشانی

در شکل‌های ۴ تا ۶ رفتار گلوله به طور کامل قابل توصیف است. خلاصه نتایج استخراج شده از این شکل‌ها در جدول (۲) آورده شده است. کلیه تحلیل‌های بالا برای سه قطر پیشانی انجام شده است. در شکل ۶ محل تلاقی سه منحنی با خط  $N=1$  سرعت در برد موثر (لحظه ناپایداری) را نشان می‌دهد.

جدول ۲- پارامترهای گلوله در بردنهایی برای کالیبر ۴/۴۵ میلیمتر و قطرهای مختلف پیشانی

قطر پیشانی: $d_c$ (mm)		
۱/۵	۲	۲/۵
طول گلوله: L (cm)		
۱۲	۱۲	۱۲
سرعت در برد نهایی: $V_F$ (m/sec)		
۱۳۰	۱۱۵	۱۰۵
برد نهایی: $X_F$ (m)		
۱۳	۸/۵	۶/۵
انرژی گلوله در برد نهایی: $E_F$ (J)		
۱۲۵/۶	۹۷/۹	۸۱/۶

### ۵-۱-۲- بررسی چند گلوله ۴/۴۵ میلیمتری با قطر پیشانی مشخص و طول متفاوت

در مرحله دوم یک گلوله کالیبر ۴/۴۵ میلیمتر با سرعت اولیه ۲۵۰ متر بر ثانیه، قطر پیشانی ۲ میلیمتر، زاویه راس پیشانی ۱۸۰ درجه، و در عمق عملیاتی ۲۰ متر از سطح آب در نظر گرفته می‌شود. حرکت گلوله از لحظه خروج تا مرز ناپایداری بررسی می‌شود. در جدول (۳) نتایج این تحلیل‌ها نشان داده شده‌اند.

### ۵- شبیه‌سازی بالستیک خارجی

#### ۵-۱- شبیه‌سازی بالستیک خارجی گلوله ۴/۴۵ میلیمتری

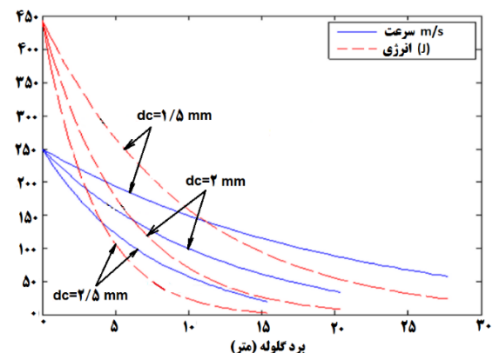
#### ۵-۱-۱- بررسی چند گلوله ۴/۴۵ میلیمتری با طول مشخص

#### و قطر پیشانی متفاوت

با استفاده از روابط مربوط به هندسه حباب می‌توان از آنها در بررسی بالستیک خارجی گلوله استفاده نمود. در ابتدا حرکت یک گلوله کالیبر ۴/۴۵ میلیمتر، با سرعت اولیه ۲۵۰ متر بر ثانیه، طول ۱۲ سانتیمتر، زاویه راس پیشانی ۱۸۰ درجه، در عمق عملیاتی ۲۰ متر از سطح آب، با جرم ۱۴/۱۸ گرم، و انرژی اولیه ۴۴۳ ژول از لحظه خروج گلوله از دهانه لوله تا مرز ناپایداری گلوله بررسی می‌شود. برای این گلوله ۳ قطر پیشانی در نظر گرفته شده و تاثیر آن روی حرکت بررسی می‌گردد. شکل (۴)، نمودار انرژی و سرعت گلوله را بر حسب موقعیت رو به جلوی (برد) گلوله نشان می‌دهد. بدیهی است با افزایش برد سرعت و انرژی گلوله کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر پیشانی در یک برد مشخص، انرژی گلوله سریعتر افت می‌کند.

شکل (۵) نیز، نمودار N (نسبت طول حباب به طول گلوله) را بر حسب سرعت گلوله نشان می‌دهد.

با استفاده از رابطه (۵) طول حباب به صورت تابعی از عدد کاویتاسیون قابل دستیابی است. این رابطه طول حباب را به صورت لحظه‌ای نتیجه می‌دهد. شکل‌های (۵) و (۶) یعنی نمودار N (نسبت طول حباب به طول گلوله) را می‌توان به صورت تابعی از برد و سرعت نیز ترسیم نمود. مطابق شکل ۵ گلوله‌ای که پیشانی بزرگتری دارد، در لحظه ناپایداری، سرعت کمتری خواهد داشت و ماندگاری سرعت در آن کاهش می‌یابد. شکل (۶)، نمودار N را بر حسب برد گلوله نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش قطر پیشانی برد مفید کم می‌شود. خلاصه نتایج در جدول (۲) نشان داده شده است.



شکل ۴: نمودار انرژی و سرعت گلوله بر حسب موقعیت با کالیبر ۴/۴۵ میلیمتر و قطرهای مختلف پیشانی

### ۶- تاثیر حداکثر انرژی عقب نشینی و اصلاح هندسه گلوله

در اینجا یک گلوله کالیبر ۴/۴۵ میلیمتر با سرعت اولیه ۲۵۰ میلیمتر، طول ۱۰/۵ سانتیمتر، زاویه راس پیشانی ۱۸۰ درجه، عمق عملیاتی ۲۰ متر، جرم ۱۲/۴۱ گرم، کالیبر ۴/۴۵ میلیمتر، با انرژی اولیه ۳۸۸ ژول بررسی می‌شود.

در ابتدا با توجه به مطالعات فوق در خصوص مشخصات کالیبر مناسب، طول  $L$  و جرم  $m$  برای گلوله انتخاب می‌شود.

جرم تقریبی سلاح، در حدود استانداردها و نمونه سلاح‌های موجود، بین ۱ تا ۱/۲ کیلوگرم (وابسته به کالیبر انتخابی) تعیین می‌شود. برای مثال در کلت غواصی ساخت روسیه با وزن ۰/۹۸ کیلوگرم (SPP1) که در آن جرم گلوله ۱۳ گرم و سرعت دهانه ۲۴۰ متر بر ثانیه است، انرژی عقب نشینی سلاح برابر با ۴/۹۶ ژول به دست می‌آید.

لذا به عنوان یک قید، انرژی وارد شده بر تیر انداز کمتر از ۵ ژول در نظر گرفته شده است. در این بررسی طول گلوله کمتر از قبل انتخاب می‌شود تا قید مورد نظر ارضا گردد. قطر پیشانی نیز کمتر از قبل فرض می‌گردد. خلاصه نتایج نیز در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ۶- پارامترهای گلوله در بردنهایی برای کالیبر ۴/۴۵ میلیمتر بر

اساس حداکثر انرژی عقب نشینی ۵ ژول			
۱/۲	۱/۳	۱/۵	قطر پیشانی: $d_c(mm)$
۱۰/۵	۱۰/۵	۱۰/۵	طول گلوله: $L(cm)$
۱۳۵	۱۳۰	۱۲۵	سرعت نهایی: $V_F(m/sec)$
۱۶/۵	۱۵	۱۲/۵	برد نهایی: $X_F(m)$
۱۱۳/۱	۱۰۴/۹	۹۷	انرژی گلوله در برد نهایی: $E_F(j)$

### ۷- معیار طراحی ابعاد مناسب

#### ۷-۱- بحث و بررسی

طراحی گلوله مناسب با توجه به ۲ کمیت انجام می‌شود. یکی انرژی عقب نشینی سلاح و دیگری برد گلوله. برای دستیابی به برد گلوله نیز از روابطی که بیان شد استفاده می‌شود.

تاثیر طول ( $L$ ) بر روی برد گلوله به مراتب کمتر از تاثیر قطر پیشانی  $d_c$  است. هر چه قطر پیشانی کمتر باشد، برد نهایی بیشتر خواهد شد. به همین منظور با سعی و خطا به قطر پیشانی مناسب بین ۱/۵ تا ۱/۲ میلیمتر می‌توان رسید.

پارامترهای موثر در انتخاب و طراحی گلوله (قیود انتخاب گلوله) عبارتند از: قطر پیشانی، طول گلوله، قطر گلوله، نسبت طول به قطر گلوله، برد نهایی گلوله، انرژی عقب نشینی سلاح و جرم گلوله و زاویه راس پیشانی. از آنجاکه جرم، طول و قطر گلوله باهم رابطه دارند، از بین آنها، جرم گلوله به طور مستقل در شبیه‌سازی لحاظ می‌شود و با سعی و خطا، دو قطر پیشانی مناسب ۱/۵ تا ۱/۲

### جدول ۳- پارامترهای گلوله در بردنهایی با قطر پیشانی مشخص و

طول‌های متفاوت			
۱۵/۳۶	۱۴/۱۸	۱۳	جرم گلوله: $m(gr)$
۱۳	۱۲	۱۱	طول گلوله: $L(cm)$
۱۲۰	۱۱۵	۱۱۰	سرعت در برد نهایی: $V_F(m/sec)$
۹	۸/۵	۸	برد نهایی: $X_F(m)$
۱۱۰/۶	۹۷/۹	۷۸/۷	انرژی گلوله در برد نهایی: $E_F(j)$

### ۵-۲- شبیه‌سازی بالستیک خارجی گلوله ۵/۵۶ میلیمتری:

#### ۵-۲-۱- بررسی چند گلوله ۵/۵۶ با طول مشخص و قطر

##### پیشانی متفاوت

از آنجا که پوکه گلوله ۴/۴۵ میلیمتری در کشور تولید نمی‌شود، گزینه بعدی استفاده از پوکه گلوله ۵/۵۶ است. لذا در مرحله بعد رفتار یک گلوله ۵/۵۶ میلیمتری، با سرعت اولیه ۲۵۰ متر بر ثانیه، طول ۱۲ سانتیمتر و زاویه راس پیشانی ۱۸۰ درجه، در عمق عملیاتی ۲۰ متر از سطح آب دریا و جرم گلوله ۱۶/۲۲ گرم و انرژی اولیه ۵۰۷ ژول از لحظه خروج گلوله از دهانه لوله تا مرز ناپایداری بررسی می‌شود. در جدول (۴) نتایج این تحلیل‌ها نشان داده شده‌اند.

جدول ۴- پارامترهای گلوله در بردنهایی برای کالیبر ۵/۵۶ میلیمتر و

قطرهای مختلف پیشانی			
۱/۵	۲	۲/۵	قطر پیشانی: $d_c(mm)$
۱۲	۱۲	۱۲	طول گلوله: $L(cm)$
۱۳۰	۱۱۵	۱۰۰	سرعت در برد نهایی: $V_F(m/sec)$
۱۴/۵	۱۰	۷/۵	برد نهایی: $X_F(m)$
۱۳۷/۱	۱۰۷/۳	۹۸/۴	انرژی گلوله در برد نهایی: $E_F(j)$

### ۵-۲-۲- بررسی چند گلوله ۵/۵۶ با قطر پیشانی مشخص و

#### طول‌های متفاوت

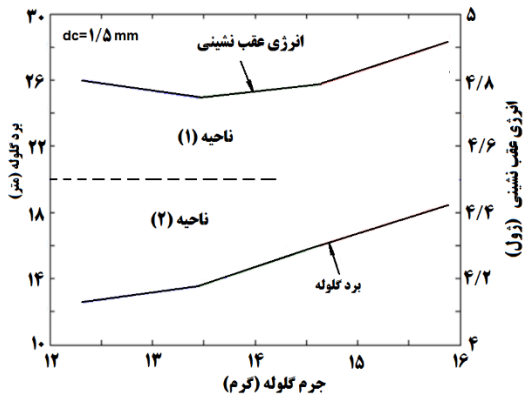
رفتار گلوله کالیبر ۵/۵۶ با سرعت اولیه ۲۵۰ متر بر ثانیه، قطر پیشانی ۲ میلیمتر، کالیبر ۵/۵۶ میلیمتر، زاویه راس پیشانی ۱۸۰ درجه، عمق عملیاتی ۲۰ متر از سطح آب دریا با سه طول ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ سانتیمتر، از لحظه خروج گلوله تا مرز ناپایداری بررسی می‌شود. خلاصه نتایج نیز در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵- پارامترهای گلوله در بردنهایی برای کالیبر ۵/۵۶ میلیمتر با قطر پیشانی مشخص و طول‌های متفاوت

۱۵/۰۴	۱۶/۲۲	۱۷/۴	جرم گلوله: $m(gr)$
۱۱	۱۲	۱۳	طول گلوله: $L(cm)$
۱۱۰	۱۱۵	۱۲۰	سرعت در برد نهایی: $V_F(m/sec)$
۹	۹/۵	۱۰	برد نهایی: $X_F(m)$
۹۱	۱۰۷/۳	۱۲۵/۳	انرژی گلوله در برد نهایی: $E_F(j)$

### ۷-۲- انتخاب ابعاد مناسب برای گلوله

در این مرحله از بین چند گلوله با کالیبرهای ۴/۴۵، ۵/۵۶، ۷/۶۲ و ۹ میلیمتری چند پیشنهاد ارائه می‌شود. ابعاد مناسب گلوله با استفاده از نمودارهایی انتخاب می‌گردد که شامل چهار حالت برای قطرهای مختلف است ولی در اینجا صرفاً نتایج ۴/۴۵ و ۵/۵۶ میلیمتری بیان می‌گردند.



شکل ۸: تغییرات انرژی عقب نشینی و برد بر حسب جرم گلوله (به ازای  $d_c = 1/5 \text{ mm}$ )

### ۷-۲-۱- گلوله ۴/۴۵ میلیمتری

یک گلوله با سرعت اولیه ۲۵۰ متر بر ثانیه، زاویه راس پیشانی ۱۸۰ درجه، عمق عملیاتی ۲۰ متر از سطح آب دریا، کالیبر ۴/۴۵ میلیمتر از لحظه خروج گلوله از دهانه لوله تا مرز ناپایداری گلوله بررسی می‌شود. شکل (۹) نمودار انرژی عقب نشینی سلاح را بر حسب جرم گلوله با طول‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش جرم گلوله، انرژی عقب نشینی سلاح افزایش می‌یابد.

شکل (۱۰) نمودار برد نهایی گلوله را بر حسب جرم گلوله برای طول‌های مختلف و قطرهای پیشانی متفاوت، بر اساس رابطه (۵) نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش جرم گلوله و همچنین با کاهش قطر پیشانی (به ازای طول ثابت گلوله)، برد گلوله افزایش می‌یابد. در این شکل مشخص است که به ازای یک طول مشخص برای گلوله از پایین به بالا قطر پیشانی کاهش می‌یابد.

شکل (۱۱) نمودار انرژی عقب نشینی سلاح بر اساس رابطه انرژی عقب نشینی، بر حسب قطر پیشانی، برای طول‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش قطر پیشانی، در یک طول ثابت، برد گلوله ثابت می‌ماند. به عبارت دیگر نمودار انرژی عقب نشینی سلاح مستقل از قطر پیشانی می‌باشد. خلاصه اطلاعات نمودارهای فوق به ازای دو طول ۹ و ۱۰ سانتیمتر برای گلوله در جدول (۸) آورده شده است.

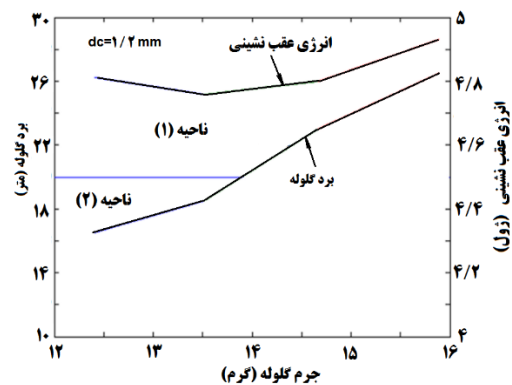
میلیمتری انتخاب می‌شود. در نتیجه پارامترهای طراحی به جرم گلوله، بردنهایی گلوله و انرژی عقب نشینی سلاح کاهش پیدا می‌کنند. جهت تعیین محدوده مناسب این کمیت‌ها، رفتار گلوله با سرعت اولیه ۲۵۰ متر بر ثانیه، زاویه راس پیشانی ۱۸۰ درجه، عمق عملیاتی ۲۰ متر از سطح آب دریا، برد نهایی ۲۰ متر، قطربیشانی ۱/۲ میلیمتر و کالیبرهای مختلف بررسی می‌شود. در این راستا دو شکل (۷) و (۸) اطلاعات لازم را در اختیار طراح قرار می‌دهد. این دو شکل با استفاده از رابطه (۳) مربوط به جرم گلوله و رابطه انرژی عقب نشینی و رابطه (۵) مربوط به برد گلوله ترسیم شده‌اند.

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود برای برد نهایی بیشتر از ۲۰ متر، ناحیه (۱)، محدوده مناسبی است. جدول (۷) مشخصات گلوله‌های مختلف استفاده شده، در ترسیم شکل (۷) را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود برای برد نهایی بیشتر از ۲۰ متر، ناحیه (۱) محدوده مناسبی است.

همین تحلیل برای قطرهای مختلف و با قطر پیشانی ۱/۵ میلیمتر نیز انجام می‌شود. این بار گلوله با سرعت اولیه  $250 \text{ m/s}$ ، زاویه راس پیشانی  $180 \text{ deg}$ ، عمق عملیاتی ۲۰ متر، برد نهایی ۱۴ m، قطربیشانی ۱/۵ mm و کالیبرهای مختلف انجام می‌شود (شکل (۸)). همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، برای برد نهایی ۲۰ متر هیچ انتخابی برای گلوله وجود ندارد (چرا که خط افقی گذرنده از برد ۲۰ متر با هیچکدام از مرزهای ناحیه ۱ در نمودار تلاقی ندارد) ولی در شکل (۷) این طور نیست. به عبارت دیگر محدوده انتخاب گلوله برای بردهای بالاتر، نیازمند قطر پیشانی کمتر است.

جدول ۷- کمیت‌های مختلف مربوط به ۴ گلوله اصلاح شده مورد نظر

جرم (gr)	۱۲/۴۱	۱۳/۵۲	۱۴/۶۷	۱۵/۸۹
کالیبر (mm)	۴/۴۵	۵/۵۶	۷/۶۲	۹
طول (cm)	۱۰/۵	۱۰	۸/۳	۵/۷
برد موثر (m)	۱۶/۵	۱۸/۵	۲۳	۲۶/۵
انرژی عقب نشینی (j)	۴/۸۱	۴/۷۶	۴/۸	۴/۹۳



شکل ۷: تغییرات انرژی عقب نشینی و برد بر حسب جرم گلوله (به ازای  $d_c = 1/2 \text{ mm}$ )

### ۷-۲-۲- گلوله ۵/۵۶ میلیمتری

باتوجه به معیارهای طراحی انتخاب گلوله که قبلا ذکر گردید و با استفاده از جداول و نمودارهای قبل، گلوله‌های زیر مطابق جدول (۹) قید انرژی عقب نشینی را ارضا نمی‌کنند. ولی با کاهش جرم گلوله بدون کاهش طول یا قطر می‌توان به طرح نهایی رسید. این کار را می‌توان با تغییر جنس یا هندسه گلوله انجام داد. نتایج در جدول (۱۰) آمده‌اند.

جدول ۹- مشخصات دسته گلوله پیشنهادی دوم

انرژی عقب نشینی J	برد m	جرم gr	قطر پیشانی گلوله mm	طول گلوله cm	قطر گلوله mm
۷/۶	۳۱/۶	۱۷	۱	۹	۵/۵۶
۷/۶	۲۸	۱۷	۱/۱	۹	۵/۵۶
۷/۶	۲۴/۹	۱۷	۱/۲	۹	۵/۵۶

جدول ۱۰- مشخصات گلوله نهایی با جرم ۱۳ گرم و کالیبر ۵/۵۶

انرژی عقب نشینی گلوله اصلاح شده	اصلاح شده	برد گلوله	قطر پیشانی گلوله mm	طول گلوله cm
۴/۳۷	۲۴/۱	۱	۱	۹
۴/۳۷	۲۱/۳	۱/۱	۱/۱	۹
۴/۳۷	۱۸/۹	۱/۲	۱/۲	۹

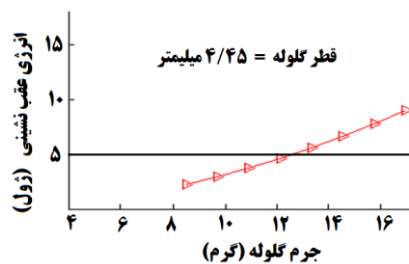
### ۸- صحت سنجی کدهای نوشته شده و توصیف فرایند تست

بر اساس داده های منتشر شده [۱۱] برد گلوله ۴/۴۵ میلیمتری روسی با طول ۱۱۵ میلیمتر در عمق ۵ متر برابر ۱۷ متر است. کدهای طراحی پیش بینی می‌کنند همین گلوله (با طول ۱۰۵ میلیمتر) بردی در حدود ۱۵ متر داشته باشد.

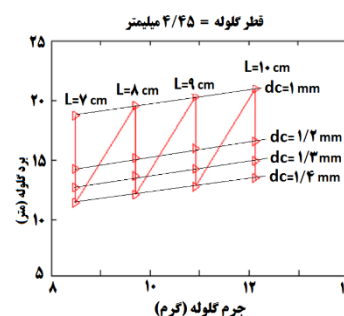
همین کدها نشان میدهند گلوله روسی بردی در حدود ۱۶/۵ متر را از خود نشان می‌دهد. این امر بیان کننده دقت خوب روش مورد استفاده است.

نکات مهم تست به صورت زیر قابل بیان هستند:

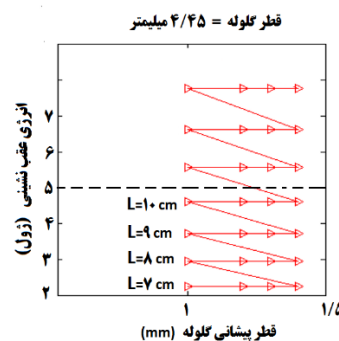
- ۱- مراحل تست با دوربین‌های سرعت بالا ضبط گردند.
- ۲- تمامی تست‌های اولیه مهمات برای نهایی شدن طراحی توسط لوله بالستیک که روی یک میز محکم می‌شود انجام می‌گردد (شکل (۱۲)). این میز در عمق استخر به دلیل کاهش وزن ظاهری باید توسط وزنه‌هایی مستقر گردد.
- ۳- برای تعیین برد موثر میتوان از صفحات ملاک در زیر آب استفاده نمود.



شکل ۹: نمودار انرژی عقب نشینی سلاح بر حسب جرم گلوله با کالیبر ۴/۴۵ میلیمتر



شکل ۱۰: نمودار برد نهایی گلوله بر حسب جرم گلوله با کالیبر ۴/۴۵ میلیمتر



شکل ۱۱: نمودار انرژی عقب نشینی سلاح بر حسب قطر پیشانی با کالیبر ۴/۴۵ میلیمتر

جدول ۸- مشخصات دسته گلوله پیشنهادی اول (۴/۴۵ میلیمتر)

انرژی عقب نشینی (ژول)	برد (متر)	جرم (gr)	قطر نوک (mm)	طول (cm)	کالیبر (mm)
۳/۷	۲۰/۲	۱۰/۹	۱	۹	۴/۴۵
۳/۷	۱۷/۹	۱۰/۹	۱/۱	۹	۴/۴۵
۳/۷	۱۵/۹	۱۰/۹	۱/۲	۹	۴/۴۵
۴/۶	۲۰/۹	۱۲/۱	۱	۱۰	۴/۴۵
۴/۶	۱۸/۶	۱۲/۱	۱/۱	۱۰	۴/۴۵
۴/۶	۱۶/۵	۱۲/۱	۱/۲	۱۰	۴/۴۵

با توجه به جدول (۸) همه گزینه‌ها، الزامات و قیود را ارضا می‌کنند. ولی پوکه این گلوله در کشور تولید نمی‌شود. لذا علیرغم این که این دسته گلوله‌ها گزینه اول پیشنهادی هستند عملا از دایره انتخاب خارج می‌گردند.

به واسطه لزوم سهولت حمل و نقل سلاح در زیر آب، یکی از گزینه ها این است که طراحی گلوله کلت غواصی به عنوان مسئله اصلی انتخاب شود.

ساخت مهمات دو محیطه برای سلاحهای انفرادی کاملا انجام شدنی است ولی کلت با مهمات دو محیطه عملا وجود ندارد، چرا که طول گلوله های سوپر کاویتاسیون بلند است. از طرف دیگر از همین مهمات میتوان در سلاحهای انفرادی (با تغییراتی در مکانیزم سلاح) استفاده نمود.

عامل پایداری گلوله های سوپر کاویتاسیون در زیر آب، هندسه حباب است. بر اساس تجارب به دست آمده حداکثر طول حباب چیزی در حدود ۵ تا ۶ برابر طول گلوله در نظر گرفته میشود. چرا که در بیش از این مقدار امکان خارج شدن گلوله از مسیر وجود دارد. حرکت پایدار گلوله تا زمانی ادامه پیدا میکند که طول حباب برابر با طول گلوله شود.

در طراحی و انتخاب گلوله یک سلاح غواصی نکات زیر باید مورد توجه قرار گیرند:

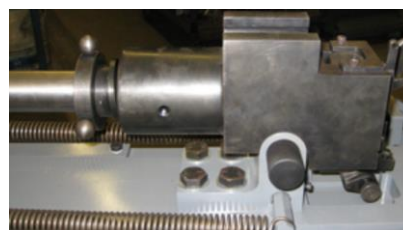
(۱) مجموعا پارامترهای هندسی و غیرهندسی موثر در انتخاب و طراحی گلوله (قیودانتخاب گلوله) عبارتند از: طول گلوله، نسبت طول به قطر گلوله، برد نهایی گلوله، قطر پیشانی، انرژی عقب نشینی سلاح و جرم گلوله و زاویه راس پیشانی. از آنجاکه جرم، طول و قطر گلوله باهم رابطه دارند، از بین آنها، جرم گلوله به طور مستقل در تحلیلها لحاظ می شود. در نتیجه پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده، جرم گلوله، برد نهایی گلوله و انرژی عقب نشینی سلاح می باشند.

(۲) هدف اصلی از طراحی گلوله های سوپر کاویتاسیون رسیدن به حداکثر برد موثر در آب با حداقل انرژی عقب نشینی سلاح است.

(۳) با توجه به محدودیت و حساسیت های تولید، نباید تغییرات زیادی بر روی پوکه های موجود انجام گیرد. هرچه بتوان در طراحی، جرم گلوله را کمتر کرد، انرژی عقب نشینی سلاح کمتر می شود. از طرف دیگر هرچه جرم گلوله بیشتر باشد، انرژی اولیه گلوله و در نتیجه برد نهایی گلوله بیشتر می شود. بنابراین باید تعدیلی بین این دو به وجود آید.

(۴) از آنجا که شخص تیرانداز نمی تواند انرژی زیاد حاصل از تکانه را تحمل کند، در نتیجه یکی از قیود انتخاب گلوله، انرژی عقب نشینی سلاح است. انرژی عقب نشینی مناسب سلاح حدود ۵ ژول تخمین زده می شود.

(۵) بواسطه تفاوت کالیبر گلوله پیشنهاد شده با گلوله های موجود دنیا رفتار بالستیک خارجی آن هم کاملا متفاوت است. گلوله های مشلبه در دنیا با دو کالیبر ۴/۴۵ و ۵/۴۵ ساخته شده اند. در کشورمان به دلیل عدم وجود پوکه دو گلوله فوق، کالیبر ۵/۵۶ انتخاب شد و مشخصات آن استخراج گردید.



شکل ۱۲: لوله بالستیک که روی یک میز ثابت شده است و قابلیت ثبت انرژی عقب نشینی و تغییر زاویه شلیک و هدف گیری به سمت یک نقطه را دارد.



شکل ۱۳: نمونه گلوله های ساخته شده با کالیبر ۴/۴۵

- ۴- لازم است با خاموش کردن سامانه چرخش آب جریانهای ناخواسته در جهات جانبی یا قائم به حداقل برسند.
  - ۵- بواسطه امواج صوتی ایجاد شده در زیر آب وجود عینک برای محافظت از چشم ها کاملا ضروری است. علاوه بر این فشار امواج صوتی نیز کاملا بر روی قفسه سینه کاربر قابل احساس است.
  - ۶- برای طراحی سلاح نیاز به تعیین سرعت عقب نشینی است. مقدار عقب نشینی پس از شلیک گلوله، با استفاده از یک فنر و ثبت مقدار فشردگی آن قابل تعیین است. (شکل ۱۲)
  - ۷- تستهای مربوط به انرژی عقب نشینی در بیرون از آب انجام میشود.
  - ۸- از آنجا که به هر دلیل احتمال خروج گلوله از آب وجود دارد، باید شرایط ایمنی در این خصوص کاملا رعایت شود.
  - ۹- سرعت دهانه با استفاده از دوربینهای ورزشی سرعت بالا و مقایسه با شاخصهای مکانی در محل شلیک به راحتی قابل تعیین است.
- در شکل (۱۳) چند نمونه گلوله ساخته شده با کالیبر ۴/۴۵ با طول ۱۱۵ میلیمتر به نمایش درآمده که صحت سنجی معادلات نوشته شده بر اساس آن انجام شده است.

#### ۹- نتیجه گیری

بر اساس نیاز به سامانه سلاح غواصی لازم است در کشور طراحی یک گلوله سوپر کاویتاسیون در دستور کار قرار گیرد. در اینجا بر اساس دانش فنی به دست آمده از پژوهشهای منتشر شده نمونه گلوله طراحی گردید.

- 2- H. Moallem, (2012), *Internal Ballistics of Underwater Pistol*, Master Thesis, Malek Ashtar University of Technology. (In Persian)
- 3- M. Masaeli, (2013) *Motion Simulation with Underwater Supercavitation Characteristics*, Master Thesis, Malek Ashtar University of Technology. (In Persian)
- 4- Zhenyu Jiang, (2012) *Research on Hydrodynamic Properties of Annular Cavitators*, Polish Maritime Research.
- 5- R. Rand, R. Pratap, D. Ramani, J. Cipolla and I. Kirschner, (1997), *Impact Dynamics of a Supercavitating Underwater Projectile*, Third International Symp. On Performance Enhancement for Marine Applications, Newport, RI, pp. 215-223.
- 6- Seong Sik Ahn, (2007), *An Integrated Approach to the Design of supercavitating Underwater Vehicles*, Doctoral Thesis, Georgia Inst. of Tech
- 7- N. Fine, (2000), *Six Degree of freedom Fin Forces for the ONR Supercavitating Test Bed Vehicle*, Anteon Corporation.
- 8- Kiceniuk T., (1957), *Experimental Study of the Hydrodynamic Forces acting on a Family of Cavity Producing Conical Bodies of Revolution*, CIT Hydrodynamic, California Inst. Of Tech. Pasadena.
- 9- Munzer, H, and Reichard H., (1957), *Rotational Symmetric Source-Sink Bodies with Predominantly Constant Pressure Distributions*, ARE Translation 1/50, Aerospace Reserch Establishment, England.
- 10- Garabedian P. R. , (1956), *Calculation of axially Symmetric Cavities and jets*, Pacic J. of Mathematics , Vol. 4 , pp. 611-684.
- 11- *4.5 mm SPP-1M Underwater Pistol Archived* , TsNIITochMash, Retrieved 2010-04-05

## ۱۰- کلید واژگان

- 1- Cavity
- 2- Cavitator
- 3- Muzzle velocity

## ۱۱- فهرست علائم

$A_c$	سطح پیشانی گلوله ( $m^2$ )
$C_D$	ضریب نیروی مقاوم
$E$	انرژی عقب نشینی آزاد سلاح (J)
$E_F$	انرژی گلوله در لحظه ناپایداری (انرژی نهایی گلوله) (J)
$Fr$	عدد فرود (بدون بعد)
$F_c$	نیروی مقاوم (N)
$K_1, K_2$	مقادیر ثابت
$L$	طول گلوله (m)
$L_{max}$	طول حباب (m)
$M$	جرم سلاح (kg)
$N$	نسبت طول حباب به طول گلوله
$Re$	عدد رینولدز (بدون بعد)
$U_o$	سرعت لحظه‌ای گلوله (m/s)
$v$	سرعت عقب نشینی آزاد سلاح (m/s)
$V_F$	سرعت ناپایداری گلوله (سرعت نهایی گلوله) (m/s)
$We$	عدد وبر (بدون بعد)
$X_F$	برد گلوله در لحظه ناپایداری (بردهایی گلوله) (m)
$d$	قطر گلوله یا کالیبر (mm) یا (m)
$d_c$	قطر پیشانی گلوله (mm) یا (m)
$d_{max}$	حداکثر قطر حباب (mm) یا (m)
$g$	شتاب گرانش ( $m/s^2$ )
$p_c$	فشار بخار درون حباب (Pa)
$p_\infty$	فشار سیال اطراف درون حباب (Pa)
$r(x)$	شعاع حباب به صورت تابعی از مختصات طولی آن (m)
$v$	سرعت خروج گلوله از دهانه لوله (m/s)
$2\alpha$	زاویه راس پیشانی (deg)
$\mu$	لزجت سیال (Pa.s)
$\sigma$	عدد کاپیتاسیون (بدون بعد)
$\rho$	چگالی سیال و چگالی گلوله ( $kg/m^3$ )
$\xi$	کشش سطحی سیال (N/m)

## ۱۰- مراجع:

- 1- <http://world.guns.ru>