

## حذف نرم افزاری سایه های ناشی از موج ضربه ای مافوق صوت برای اندازه گیری سرعت و مختصات بروش غیر تماسی بکمک لیزر

افشین نوایی<sup>\*</sup>، مجتبی خدام<sup>\*\*</sup>

سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران

پژوهشکده ساخت و تولید - تهران صندوق پستی 1314-618

[Khoddam@irost.org](mailto:Khoddam@irost.org)

چکیده - روش های اندازه گیری غیر تماسی امروزه نقش عمده ای در صنایع گوناگون ایفاء می کنند. استفاده از این روش ها در کنترل کیفیت و اندازه گیری های متعدد و تکراری مربوط به آنها منجر به افزایش اتوماسیون، کاهش زمان، افزایش دقت و کاهش هزینه ها خواهد گردید.

در این مقاله ابتدا بطور خلاصه یکی از کاربردهای روش اندازه گیری مختصات و سرعت بصورت غیر تماسی تشریح می گردد. کاربرد یاد شده مربوط به یک هدف اپتیک - الکترونیک - لیزری است که بصورت موفقیت آمیزی در پژوهشکده ساخت و تولید سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران بکار گرفته شده است.

سپس این مقاله به تشریح مشکلات خاص ناشی از ایجاد موج ضربه ای به دلیل محدوده سرعت مافوق صوت دستگاه یاد شده و تاثیر آن بر روی اندازه گیری سرعت و مختصات می پردازد. درخاتمه روش غلبه بر مشکلات یاد شده و اجتناب از بروز خطا در اندازه گیری ها اجمالا ارایه خواهد گردید.

واژه های کلیدی: موج ضربه ای - اندازه گیری غیر تماسی - ضریب شکست نور - سرعت مافوق صوت، پرده لیزری

### 1- مقدمه

کاغذی<sup>1</sup> است که در فاصله 100 متری از محل شلیک قرار دارند. این روش علاوه بر دشواری ذاتی مرتبط با آن، قادر به تعیین سرعت نبوده و حتی در خاتمه با مراجعه به هدف کاغذی، توالی شلیک نیز قابل تشخیص نخواهد بود. با در نظر گرفتن این واقعیت که اندازه گیری مورد نظر باید برای تمامی محصولات تولیدی انجام پذیرد، حجم عظیم کاری مربوط به این فعالیت قابل تصور می باشد. در روش های سنتی از میزان تغییر شکل یک زره فولادی استاندارد پس از اصابت گلوله به آن در فاصله 100 متری برای تخمین انرژی جنبشی (سرعت) گلوله استفاده می شود. این روش در بر دارنده نتایج کمی

یکی از اقلام کنترل کیفیت نهایی سلاح های سبک، سرعت و پراکندگی شلیک گلوله های شلیک شده از آنها می باشد. تغییرات بیش از حد سرعت گلوله برای نمونه های یکسان از یک محصول در مقایسه با سرعت طراحی شده و استاندارد (با فرض یکنواخت بودن شرایط آنها)، نشانگر عیوب خاصی در سلاح مورد نظر می باشد. مقدار سرعت گلوله در یک فاصله مشخص با احتساب جرم و ممان اینرسی گلوله بعنوان معیاری از انرژی جنبشی گلوله در فاصله یاد شده و بالاخره بعنوان برد موثر سلاح در آن فاصله تلقی می گردد. روش سنتی انجام این کنترل، استفاده از هدف های

<sup>1</sup> Paper targets

بصورت سری و در کنار هم قرار دارند. از موارد متمایز کننده لیزر با نور عادی مرئی، تفرق جزیی آن پس از جدایی از منبع تشعشع کننده آن می باشد. در شکل 1، نمای کلی یکی از دروازه های ایجاد پرده لیزری نشان داده شده است. اجزای اصلی این دروازه شرح زیر می باشند:

یکی از مولدهای ایجاد پرتوهای موازی شده لیزری (فرستنده های لیزری)

تکیه گاه پشتی مجموعه های هفت مولد خط لیزری موازی کنار هم

پنجره فضا ساز که برای استحکام بخشیدن به سازه دروازه

پایه های نگه دارنده مدارات الکترونیکی (گیرنده لیزر) پایه مبناء استقرار مدارات الکترونیکی بصورت موازی و در کنار هم

نبشی های استحکام بخش سازه دروازه

حفاظ مولدهای خط لیزری

جهت قرار گیری مولد ها و حس گر ها در اولین دروازه به گونه ای است که سایه ناشی از عبور گلوله از این دروازه بر روی محوری در امتداد افق تشکیل شود و بتوان از آن برای سنجش مختصات X گلوله نسبت به دستگاه مختصات متصل به دروازه استفاده نمود. به همین ترتیب جهت قرار گیری مولدها و حس گر ها در دومین دروازه به گونه ای است که سایه ناشی از عبور گلوله از این دروازه بر روی محوری در امتداد قائم تشکیل شود و بتوان از آن برای سنجش مختصات Y گلوله نسبت به دستگاه مختصات متصل به دروازه استفاده نمود. همچنین با توجه به فاصله یک متری بین صفحات دو دروازه، سنجش دو مولفه X و Y همزمان نخواهند بود. با فرض عمود بودن کامل مسیر حرکت گلوله نسبت به هر دو دروازه، می توان پذیرفت که تقریباً مختصه اندازه گیری شده مربوط به نقطه ای واقع بر دروازه ای فرضی درست در وسط دو دروازه خواهد بود. از این پس این دو دروازه

نبوده و همچنین انجام آن برای تمامی اقلام کنترل کیفی شونده اقتصادی نیست.

به منظور جایگزینی روش های سنتی مذکور با روش های متداول و پیشرفته، دستگاه ویژه ای با عنوان دستگاه اهداف اپتیک - الکترونیک - لیزری<sup>2</sup> در پژوهشکده ساخت و تولید سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران طراحی و ساخته شده که به نحو موفقیت آمیزی مورد بهره برداری قرار گرفته شده است. این دستگاه مبتنی بر روش های اندازه گیری غیر تماسی<sup>3</sup> می باشد.

محدوده سرعت مورد اندازه گیری در این دستگاه معمولاً سرعت های مافوق صوت می باشد. بنابراین موج ضربه ای<sup>4</sup> ناشی از حرکت گلوله با سرعت مافوق صوت در هوا، تاثیر نامطلوبی بر روی اندازه گیری های غیر تماسی اپتیک مربوط به آن ایجاد می نماید. در این مقاله ابتدا به ماهیت چنین آثاری پرداخته می شود و سپس روش غلبه بر آنها ارائه می گردد.

## 2- تشریح دستگاه اهداف اپتیک - الکترونیک

### - لیزری

این دستگاه از دو دروازه تشکیل شده که در هر کدام از آنها یک پرده لیزری به ابعاد 40 در 40 در 0,3 سانتی متر بصورت عمود بر مسیر عبور گلوله تشکیل می شوند. دو پرده یاد شده با هم موازی بوده و به فاصله یک متر از یکدیگر قرار دارند. هریک از این پرده ها بکمک هفت عدد مولد خط لیزری<sup>5</sup> که کنار هم قرار گرفته اند، ایجاد می گردد. این مولدها بصورت سری و در کنار هم در یک سوی پرده لیزری مربوط به هریک از دروازه ها می باشند. در سوی دیگر هر کدام از پرده ها، شش عدد آرایه حس گر نوری

<sup>2</sup> Optic – electronic – laser targets

<sup>3</sup> Non contact measurement methods

\* کارشناس ارشد الکترونیک - اپتیک

\*\* دانشجوی کارشناسی ارشد الکترونیک - دانشگاه زنجان

<sup>4</sup> Shock wave

<sup>5</sup> Laser line generator

می‌شود. برای هر دو حالت عدد ماخ بزرگتر از واحد می‌باشد. همانگونه که از مقایسه شکل‌های الف) و ب) ملاحظه می‌گردد، در حالت ب) بدلیل کُند بودن پیشانی شیئی مافوق صوت، نوک موج ضربه‌ای دارای فاصله قابل توجهی با پیشانی شیئی مافوق صوت می‌باشد. درحالیکه در شکل ب) تقریباً نوک موج ضربه‌ای و پیشانی شیئی مافوق صوت بر روی هم منطبق هستند.

در شکل 3 تاثیر عدد ماخ بر روی تشکیل و شکل موج ضربه‌ای نشان داده شده است. تمامی پارامترها نظیر شرایط مربوط به سیال از قبیل جنس، دما، غلظت و ... شرایط مربوط به گلوله یکسان نگه داشته شده‌اند و تنها سرعت آنها با هم متفاوت است. ملاحظه می‌شود با افزایش عدد ماخ از 0,98 به 1,3 موج ضربه‌ای ابتدا بدنبال شیئی تشکیل می‌شود. بزاء ماخ حدود 1 موج ضربه‌ای بصورت موج ضربه‌ای اولیه<sup>6</sup> و ثانویه<sup>7</sup> قابل تشخیص می‌باشد. در این حالت که ابتدای تشکیل موج ضربه‌ای اولیه محسوب می‌شود، نوک موج ضربه‌ای بصورت کمائی می‌باشد و فاصله آن از پیشانی شیئی پرسرعت قابل توجه است. با افزایش عدد ماخ، برای حالت  $M=1.3$  تقریباً نوک موج ضربه‌ای و پیشانی شیئی پرسرعت برهم منطبق می‌شوند و زاویه نوک موج ضربه‌ای بسته تر و نوک آن بصورت تیز درمی‌آید. با ادامه افزایش مقدار عدد ماخ، به تیزی نوک موج ضربه‌ای افزوده خواهد شد (شکل 2- ب را ببینید).

#### 4- جابجایی تصویر و سایه شیئی با سرعت

##### مافوق صوت در اثر ایجاد موج ضربه‌ای

هنگامیکه نور از یک محیط به محیط دیگر وارد می‌شود، امتداد اولیه آن تغییر می‌کند. براساس اصل اول قانون شکست نور: پرتو تابیده شده<sup>8</sup>، خط قائم بر

را بترتیب دروازه‌های X و Y می‌نامیم. با سنجش اختلاف زمانی ثبت دو مولفه مختصات بوسیله یک میکرو کنترلر خانواده 8051 و با مشخص بودن فاصله بین این دو دروازه می‌توانیم سرعت عبور گلوله را اندازه گیری نماییم.

#### 3- تشکیل موج ضربه‌ای در حین عبور گلوله با

##### سرعت مافوق صوت از دروازه‌های لیزری X و Y

هنگامیکه یک شیئی با سرعت مافوق صوت در یک سیال تراکم ناپذیر مانند هوا حرکت کند، جبهه‌های موج ضربه‌ای به همراه آن به حرکت در می‌آیند. این موج ضربه‌ای که گاهی اوقات مخروط ماخ نیز نامیده می‌شود، لایه‌ای از سیال تراکم پذیر است که نسبت به لایه‌های مجاور خود از دانسیته بالاتری برخوردار است. همچنین گردان فشار سیال در نزدیکی و در داخل این لایه بیشتر از سایر نقاط دیگر سیال تراکم پذیر خواهد بود. موج ضربه‌ای با سرعتی وابسته به جنس سیال، منتشر می‌شود. جدول 1 سرعت انتشار موج ضربه‌ای را در گازهای مختلف نشان می‌دهد.

برای بررسی حرکت اشیائی که در یک سیال با سرعت بالا حرکت می‌کنند و همچنین بررسی حرکت پرسرعت سیال‌ها در کانال‌های شیپوره‌ای شکل از عدد بدون بعدی بنام عدد ماخ استفاده می‌شود. این پارامتر معمولاً با علامت  $Ma$  نمایش داده شده و بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Ma = \frac{V_b}{V_s} \quad (1)$$

در این رابطه،  $V_b$  سرعت شیئی پرسرعت و  $V_s$  سرعت صوت در همان سیال می‌باشد.

شکل موج ضربه، زاویه مخروط آن و فاصله موج ضربه‌ای از شیئی پرسرعت بوجود آورنده موج بستگی به عدد ماخ و شکل هندسی شیئی پرسرعت خواهد داشت.

در شکل 2- تشکیل موج ضربه‌ای در حین عبور الف) شیئی با نوک کُند و ب) شیئی با نوک تیز ملاحظه

<sup>6</sup> Primary shock wave

<sup>7</sup> Secondary shock wave

<sup>8</sup> Incident ray

دیده خواهد شد. بروز این پدیده انحراف تصویر یا سایه برای اندازه گیری مختصات یا سرعت ایجاد خطا خواهد نمود و اندازه گیری انجام شده بدین صورت مطلقاً معنی دار نخواهد بود. شکل 5 اثر ایجاد سایه های تاریک و روشن را پس از عبور نور از یک جبهه هوای با تراکم متغیر نشان می دهد. در این شکل دیده میشود که چگونه با افزایش جرم حجمی  $r$  تراکم انرژی نور تابیده بر پرده تغییر میکند. این پدیده موسوم به shadowgraph effect در تصویر برداری از سیالات پر سرعت به کار گرفته میشود.

دستگاه طراحی شده برای اندازه گیری مختصات و سرعت گلوله در محل طراحی و اجراء بکمک شلیک با تفنگ بادی مورد آزمایش قرار گرفت و بدلیل آنکه سرعت گلوله کالیبر 5,5 در حدود 220 متر بر ثانیه بود (ماخ حدود 0,67)، مشکلی در اثر انحراف سایه یا تصویر بروز نکرد. پس از انتقال و نصب دستگاه در محل کارخانه، در اولین آزمایش هایی که با شرایط واقعی (ماخ 2,8 و بالاتر) انجام گرفت مشخص گردید که نتایج اندازه گیری شده معنا دار نیستند. با بررسی هایی که بعداً بعمل آمد، معلوم شد که دلیل این مسئله حضور موج ضربه ای در اطراف گلوله در حین عبور از دروازه های X و Y است.

#### 5- روش حذف سایه های ناخواسته موج ضربه

استراتژی اولیه مورد استفاده در دستگاه (در حین انجام آزمون های مادون صوت با تفنگ بادی) مبتنی بر استفاده از ثبت سایه بوده است. همانگونه که در شکل های (2-الف)، (ب) 3 و 4 ملاحظه می شود، ضخامت سایه موج ضربه در مقایسه با سایه شیئی با سرعت مافوق صوت بسیار ناچیز و تیرگی آن بمراتب کم تر از تیرگی سایه شیئی می باشد.

برای حذف آثار ناخواسته موج ضربه لازم بود تا فیلتر مناسبی بصورت سخت افزاری یا نرم افزاری تعبیه و در دستگاه بکار گرفته شود تا دستگاه قادر به تفکیک

سطوح مشترک دو محیط عبور دهنده نور و پرتو منحرف شده<sup>9</sup>، همگی در یک صفحه قرار می گیرند. ضریب شکست نور  $n$  بصورت زیر تعریف می گردد:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} \quad (2)$$

که در آن  $i$  و  $r$  بترتیب زاویای پرتوهای تابیده و منحرف شده با خط قائم بر محیط های اول و دوم می باشند. معمولاً محیط اول هوا فرض شده و ضریب شکست نسبت به هوا داده میشود. براساس اندازه گیری های انجام شده اگر محیط دوم غلیظ تر از هوا باشد مقدار ضریب  $n$  بزرگتر از واحد خواهد بود. تعبیر فیزیکی این مسئله این است که پرتو نور پس از ورود از هوا به یک محیط ثانویه غلیظ تر، به خط قائم فوق الذکر نزدیکتر می شود. از این امر می توان نتیجه گیری نمود که نور پس از ورود به ناحیه موج ضربه که یک لایه فشرده هوا محسوب می شود، به خط قائم بر فصل مشترک دو محیط نزدیکتر و هنگام خروج از ناحیه موج ضربه به هوای معمولی که رقیق تر از ناحیه موج ضربه است، از خط قائم دور می گردد.

براساس استدلال ذکر شده می توان چگونگی جابجایی تصویر و سایه یک شیئی با سرعت مافوق صوت در اثر تشکیل موج ضربه را درک نمود. این موضوع در شکل 4 بصورت ساده نمایش داده شده است. پرتو نور AC پس از اصابت به موج ضربه (قبل از رسیدن به بدنه هواپیمای جتی که با سرعت مافوق صوت در حال حرکت است)، در اثر نزدیکتر شدن به خط قائم فصل مشترک دو محیط، به نقطه D منحرف می شود و در حین خروج از موج ضربه و ورود به هوای رقیق، از خط عمود بر فصل مشترک دو محیط دور شده و بنابراین به نقطه E منحرف خواهد شد. در نتیجه تصویر یا سایه ناشی از پرتو AC بجای آنکه در نقطه B ملاحظه شود، در نقطه E

<sup>9</sup> Refracted ray

اپتیک الکترونیک انجام گرفت، ابتدا مرکز هدف کاغذی به وسیله نوارهای شب‌نما به شکل یک بعلاوه علامت‌گذاری گردید تا بوضوح از فاصله 100 متری قابل نشانه‌گیری باشد. سپس این هدف کاغذی با دقت در مرکز مختصات دستگاه اهداف - اپتیک الکترونیک نصب گردید. بدین ترتیب بطور همزمان قادر به نمایش نتایج با استفاده از هدف کاغذی و اندازه‌گیری نتایج بصورت مستقل توسط دستگاه اهداف - اپتیک الکترونیک بوده‌ایم. شکل 7- ب) نمایش گرافیک اصابت هر 9 گلوله به پرده‌های لیزری را نشان می‌دهد. همانگونه که از مقایسه شکل 7- الف) و ب) آشکار می‌باشد، نتایج ثبت شده با مقادیر متناظر آنها بر روی هدف کاغذی کاملاً تطابق دارند. همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه که مربوط به مختصات و سرعت این گلوله‌ها هستند در جدول 2- ارایه شده‌اند. سرعت‌های ثبت شده توسط دستگاه اهداف - اپتیک الکترونیک با اندازه‌گیری‌های مستقل بوسیله دستگاه آزمایشگاهی ثبت سرعت AVL از تطابق خوبی برخوردار هستند.

#### 7- نتیجه‌گیری

اصول کلی مربوط به استفاده از اندازه‌گیری غیر تماسی مختصات و سرعت گلوله بروش الکترونیک - اپتیک - لیزری تشریح گردید. چگونگی بروز تاثیرات نامطلوب موج ضربه‌ای بر روی اندازه‌گیری اپتیک سرعت مافوق صوت گلوله و خطاهای ناشی از آن ارایه شد. همچنین تغییرات مورد نیاز در طراحی اولیه دستگاه که بدون احتساب اثر موج ضربه‌ای بود و نتایج حاصل از انجام تغییرات بر روی دستگاه اهداف اپتیک - الکترونیک مرور شد. مقایسه نتایج مختصات اصابت گلوله به هدف کاغذی و نتایج ثبت شده توسط دستگاه اهداف - اپتیک الکترونیک حاکی از انطباق خوب نتایج و موفقیت حذف آثار ناشی از موج ضربه‌ای می‌باشد.

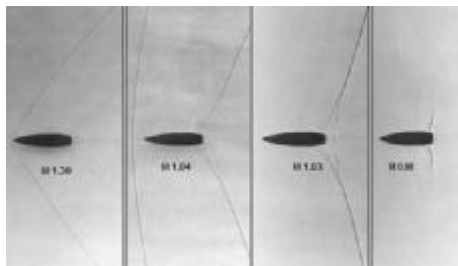
سایه ناشی از موج ضربه با تصویر شیئی پرسرعت گردد. در شکل 6 نمونه‌ای از مدارات SMD<sup>10</sup> بکار رفته در حس‌گرهای (گیرنده‌های) پرده لیزری نمایش داده شده‌اند. نرم‌افزارهای فیلتر کننده موج ضربه‌ای بصورت خاص طراحی و تدوین و بر روی المان‌های FPGA<sup>11</sup> مورد استفاده در مدارات فوق ذخیره شده‌اند. وظیفه این نرم افزار ثبت تغییرات شدت سیگنال دریافت شده از حس‌گرهای لیزری است. با توجه به اندازه‌گیری شدت تغییرات سیگنال در یک زمان مشخص، مدار حس گر قادر به تشخیص سرعت تغییرات سایه خواهد بود. از آنجاییکه ضخامت سایه مربوط به موج ضربه در مقایسه با ضخامت سایه شیئی پرسرعت کوچک می‌باشد، با استفاده از یک الگوریتم مناسب در مدار گیرنده، قادر به فیلتر نمودن اثر نامطلوب موج ضربه‌ای خواهیم بود. پارامترهای مورد نیاز الگوریتم یاد شده با انجام آزمون‌های میدانی تعیین گردیدند.

#### 6- بحث و بررسی بر روی نتایج

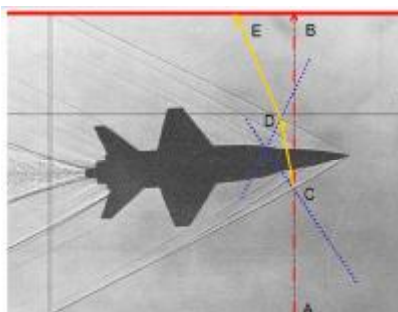
سیستم طراحی شده اولیه بدلیل در نظر نگرفتن اثرات موج ضربه‌ای، در محیط کار با گلوله‌های مافوق صوت بدرستی عمل نکرد. با بررسی دقیق علل نارسایی نتایج اولیه، مدارات گیرنده لیزری که برای کار با گلوله‌های با سرعت مادون صوت طراحی شده بودند، مورد بازنگری اساسی قرار گرفتند. پس از طراحی مدارات جدید و طراحی نرم افزار فیلتر کننده مناسب، با پیاده سازی آن بر روی مدارات، اثرات نامطلوب موج ضربه‌ای به نحو رضایت‌بخشی حذف گردید. در شکل 7 الف) محل اصابت 10 عدد گلوله کالیبر 7,76 از سلاح دراگانوف (SVD) ملاحظه می‌شود. در این آزمایش که به منظور مقایسه نتایج حاصل از یک هدف کاغذی با نتایج دستگاه اهداف -

<sup>10</sup> Surface mounting device

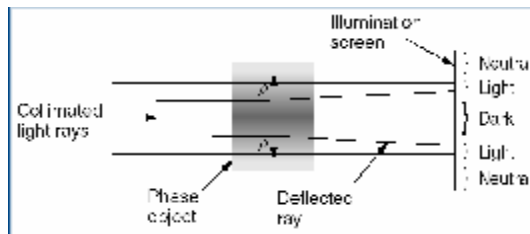
<sup>11</sup> Field Programmable Gate Array



شکل 3- تغییرات شکل و نوع موج ضربه‌ای Shock wave ایجاد شده بازای تغییرات در عدد ماخ. برای چهار حالت نشان داده شده است



شکل 4- نمایش چگونگی انحراف یک پرتو نوری به هنگام عبور از موج ضربه



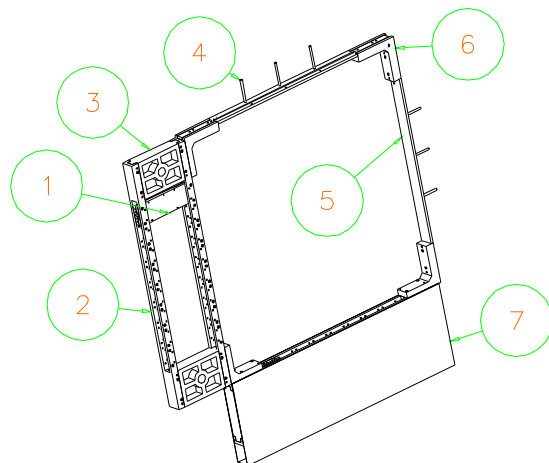
شکل 5 - پدیده Shadowgraph Effect و نحوه ایجاد نواحی تیره و روشن



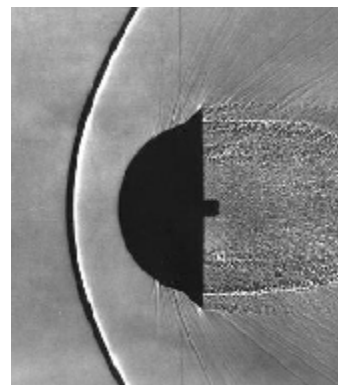
شکل 6- نمای مدارات SMD طراحی و ساخته شده برای دریافت پرده‌های لیزری و سایه ناشی از عبور گلوله

## مآخذ و منابع

1. Tim Fairfield, "Laser-based position measurement systems", Applications weekly, No.104, April 1997.
2. Noel T. Clements, "Flow Imaging", John Wiley & Sons, p143, 2002.
3. E. Hecht, "Optics", Addison Wesley, p73, 2002.



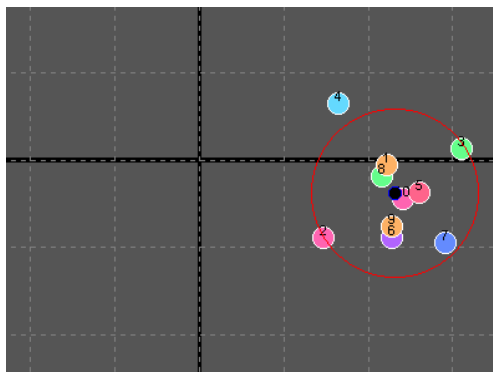
شکل 1- شمای سه بعدی یکی از دروازه‌های ایجاد پرده لیزری



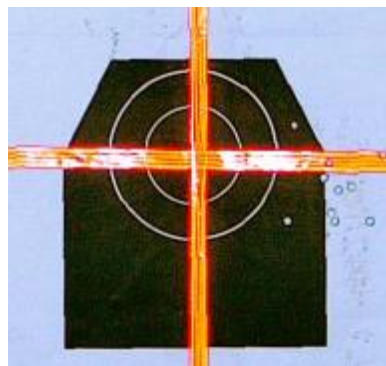
شکل 2- الف) تشکیل موج ضربه به هنگام عبور شیئی با پیشانی گند (غیر تیز) و سرعت سونیک



شکل 2- ب) نمایش موج ضربه‌ای اولیه و ثانویه بازای عدد ماخ حدود 2,35 به هنگام عبور شیئی با پیشانی تیز (سرعت سوپر سونیک)



شکل 7- ب) نتایج اندازه گیری محل اصابت توسط دستگاه EOT



شکل 7- الف) محل اصابت 10 عدد گلوله سلاح SVD به سیل واقعی

جدول 1 - سرعت انتشار موج ضربه ای در مواد مختلف

Gas	R (Gas constant J/kgK)	K (Specific heat ratio)	Temperature (K)	Speed of sound(m/s)	Speed/Speed in Air
Air	287	1.4	300	347.1887095	1.000000027
Ar	208	1.667	300	322.5225574	0.92895465
C4H10	143.04	1.091	300	216.3723457	0.623212523
CO2	188.92	1.289	300	270.287558	0.778503327
CO	296.82	1.4	300	353.0784615	1.016964151
C2H6	276	1.186	300	313.3700688	0.902592938
C2H4	296	1.237	300	331.4296305	0.954609498
He	2077	1.667	300	1019.170104	2.935493303
H2O	4124	1.409	300	1320.3086	3.802855912
CH4	518	1.299	300	449.2934453	1.294090059
Ne	411	1.667	300	453.3664081	1.305821325
N2	296	1.4	300	352.5904139	1.015558438
C8H18	72	1.044	300	150.167906	0.432525327
O2	259	1.393	300	328.9925531	0.947590037
C3H8	188	1.126	300	252.0047619	0.72584379
H2O	461	1.327	300	428.3971288	1.233902857

جدول 2- مقادیر مختصات و سرعت ثبت شده مربوط به شکل 7

X, mm	Y, mm	V, m/s	X, mm	Y, mm	V, m/s
411.3	296.6	782.34	414.4	255.5	760.4
373.4	255.5	762.91	446	252.4	757.89
455.5	306.1	769.28	408.1	290.3	785.01
382.8	331.6	779.7	414.4	261.8	760.4
430.2	280.8	771.86	420.7	277.6	766.72