

# فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال نهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷، (پیاپی ۳۳): صص ۷۵-۷۷

## شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه با سرعت بالا

### در اهداف چندلایه فلزی

حجت‌الله شریفی سورکی<sup>۱</sup>، حسینعلی محمدی شیرکلایی<sup>۲</sup>، علی مهدی پور عمرانی<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۱۹

#### چکیده

ایجاد سازه‌های امن، استحکامات و مقاوم‌سازی از اصول مهم پدافند غیرعامل و همچنین در راستای اهداف مبحث بیست و یکم مقررات ملی ساختمان (پدافند غیرعامل) می‌باشد. با توجه به افزایش حوادث غیرطبیعی مانند حملات نظامی و تروریستی در سراسر دنیا، اجرای طرح‌های خاص مهندسی مانند ساخت استحکامات و سازه‌های مقاوم در برابر ضربه و نفوذ پرتابه‌ها، می‌تواند مقاومت سازه‌ها (در حوزه‌های مختلف) را افزایش داده و مانع از صدمه رسیدن به نفرات، تجهیزات و تاسیسات گردیده و یا میزان خسارات و تلفات را به حداقل رساند. در این مقاله به کمک نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA، شبیه‌سازی نفوذ پرتابه با دماغه اجابو در هشت سرعت مختلف (۵۰۰ m/s الی ۱۴۰۰) در اهداف فلزی یک‌لایه، دولایه و سه‌لایه به منظور بررسی مقاومت بالستیکی سازه و تعیین سرعت باقیمانده پرتابه انجام شده است. در مجموع، ۳۶۸ فرآیند شبیه‌سازی صورت گرفته است. پرتابه، صلب فرض شده و از مدل مادی جانسون-کوک، برای توصیف رفتار ماده اهداف استفاده شده است. ضخامت کلی اهداف ۱۵ mm و اهداف چندلایه، به هم چسبیده در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی با نتایج مدل تحلیلی چن و لی مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که در بعضی از سرعت‌های تست شده، استفاده از اهداف سه‌لایه به جای اهداف یک‌لایه با ضخامت معادل می‌تواند مقاومت بالستیکی اهداف را در برابر نفوذ پرتابه افزایش دهد. با مقایسه نتایج، همخوانی مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج مدل تحلیلی مشاهده شده است.

**کلید واژه‌ها:** اهداف چندلایه، LS-DYNA، مدل تحلیلی جانسون-کوک، شبیه‌سازی عددی

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه فارابی تهران

۳- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، Email: a.mehdipour@gmail.com - نویسنده مسئول

## ۱- مقدمه

برخورد پرتابه‌های فولادی نوک‌تیز و مخروطی را در زاویه‌های مختلف به هدف‌های تک‌لایه و دولایه فولاد و آلومینیوم، شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که مقاومت بالستیکی اهداف یکپارچه بیشتر از هدف دولایه است. علوی‌نیا و همکارانش [۱۰] اثر پیکربندی‌های مختلف اهداف سه‌لایه‌ای آلومینیوم را در برخورد عمودی با پرتابه‌های سرکروی، بررسی و با هدف تک‌لایه مقایسه کردند. با توجه به این‌که اکثر مطالعات انجام‌شده مربوط به بررسی پدیده نفوذ در اهداف یک‌لایه، دولایه و یا اهداف چندلایه فلزی از یک نوع فلز بوده، در این پژوهش، شبیه‌سازی ضربه و نفوذ پرتابه در اهداف چندلایه فلزی با دو جنس متفاوت، مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- روش تحقیق

در این بخش از پژوهش ضمن ارائه بیان مسئله، اهمیت انجام تحقیق، ضرورت، اهداف، سوالات و فرضیه تحقیق شرح داده شده است و در انتها نتایج و بحث به صورت مجزا ارائه شده است.

### ۲-۱- بیان مسئله

برای بررسی مسائل ضربه و نفوذ پرتابه عمدتاً از روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی استفاده می‌شود. به صورت کلی، دلیل به‌کارگیری این روش‌ها در مباحث مربوط به ضربه و نفوذ پرتابه بر سازه‌ها، طراحی سازه مقاوم در برابر ضربه و نفوذ پرتابه مورد نظر، یا طراحی پرتابه مورد نظر برای نابودی سازه مورد نظر می‌باشد. با توجه به این‌که مناسب‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش مدل‌سازی و تحلیل اثرات ضربه و نفوذ پرتابه‌ها بر اهداف استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی است. در سالیان اخیر گرایش محققین به استفاده از این روش افزایش یافته است. به هر حال، در یک مطالعه همه‌جانبه به منظور صحت‌سنجی بین نتایج، مدل‌سازی تحلیلی همواره در کنار تست‌های تجربی و یا شبیه‌سازی‌های عددی به کار می‌رود. در موضوع ضربه و نفوذ پرتابه در اهداف، به طور کلی حالت‌های مختلف متصور است:

الف) ضربه و نفوذ پرتابه صلب در اهداف ضخیم.

ب) ضربه و نفوذ پرتابه تغییرشکل‌پذیر در اهداف صلب.

ج) ضربه و نفوذ پرتابه صلب در اهداف تغییرشکل‌پذیر.

د) ضربه و نفوذ پرتابه تغییرشکل‌پذیر در اهداف تغییرشکل‌پذیر.

چنانچه هدف از به‌کارگیری مدل نفوذ طراحی هدف مقاوم باشد، فرض صلب‌بودن پرتابه در جهت طراحی ایمن بوده و به همین دلیل، مدل‌های نفوذ صلب کاربرد زیادی دارند. چنانچه صفحه مقاوم برای

موضوع پدافند غیرعامل یا همان دفاع غیرعامل با مفهوم کلی دفاع در برابر تهاجم، بدون استفاده از سلاح و درگیرشدن مستقیم، سابقه‌ای بس طولانی در تاریخ بشری به قدمت خلقت انسان دارد. انجام اقدامات پدافند غیرعامل در جنگ‌های امروزی در جهت مقابله با تهاجمات دشمن و تقلیل خسارات ناشی از حملات، موضوع بنیادی است که وسعت و گستره آن، تمامی زیرساخت‌های کلیدی نظامی و غیرنظامی کشور را در بر می‌گیرد. تجارب حاصله از جنگ‌های گذشته به‌خصوص هشت سال دفاع مقدس نشان می‌دهد که دشمن توجه خود را صرف بمباران و انهدام مراکز حیاتی، حساس و مهم می‌نماید. لذا عنایت به این موضوع اهمیت توجه به بحث مقاوم‌سازی سازه‌های مهم در برابر ضربه و نفوذ و انفجار را بیش از پیش آشکار می‌سازد [۱]. ایده طراحی و ساخت سپرهای مقاوم پس از ساخت اولین سلاح‌های آتشین یعنی حدود اوائل قرن هجدهم که نیاز به ساخت سپرهای مقاوم در مقابل نفوذ گلوله شدیداً احساس می‌شد، در اذهان شکل گرفت. ابتدا سپرهای یک‌لایه مورد بررسی‌های تجربی و تحلیلی قرار گرفت. بعد از آن، کاربردهای بسیاری، ارجحیت زره‌های چندلایه بر یک‌لایه را به اثبات رساند. بارویک<sup>۱</sup> و همکاران [۲-۳] و دی<sup>۲</sup> و همکاران [۴-۵] مطالعات عددی گوناگونی در مورد نفوذ گلوله با سرچنگی‌های مختلف در هدف‌های فولادی با استحکام بالا در حالت یک‌لایه و چندلایه انجام دادند. در مدل‌های عددی، گلوله تغییر فرم‌پذیر و هدف‌ها نازک یا نسبتاً ضخیم بودند. با توجه به دایره‌ای بودن اهداف، شرایط تقارن محوری حاکم بوده و از مدل‌های دوبعدی استفاده کردند. تحلیل‌های عددی با استفاده از کد اجزاء محدود

LS-DYNA انجام گرفته و اثر نرخ کرنش با تحقیقات مشابهی نیز توسط آریاس<sup>۳</sup> و همکاران [۶] و چن<sup>۴</sup> و همکاران [۷] انجام گرفته است. زوکاس<sup>۵</sup> و همکاران [۸] نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزارهای عددی در برخورد پرتابه‌ها به اهداف یک یا چندلایه‌ای را ارائه نمودند. کاهش جرم و فرسایش پرتابه طی نفوذ، در نظر گرفته شده و مشاهده گردید که با افزایش تعداد لایه‌های هدف، جرم باقی‌مانده پرتابه بعد از برخورد افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، چندلایه‌ای نمودن هدف یک‌لایه و افزایش تعداد لایه‌ها، باعث کاهش کمتری از جرم پرتابه حین نفوذ می‌گردد. اقبال و همکارانش [۹]

1- Borvik

2- Dey

3- Arias

4- Chen

5- Zukas

با چیدمان مختلف به ندرت انجام شده و همچنین با توجه به این‌که، شکل دماغه پرتابه، محدوده سرعت و ترتیب قرارگرفتن لایه‌ها از عوامل مهم در بررسی فرآیند نفوذ پرتابه محسوب می‌شود و از بین آن‌ها، سرعت برخورد مهمترین عامل می‌باشد، در این تحقیق، در ۸ سرعت به صورت جداگانه فرآیند شبه‌سازی ضربه و نفوذ پرتابه مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۲-۴- اهداف، سوالات و فرضیه تحقیق

در این قسمت از تحقیق هدف از ارائه تحقیق و سوالات و فرضیه های مد نظر ارائه شده است. مثلاً اینکه چرا جنس اهداف فلزی یا دلیل چند لایه بودن و ... پاسخ داده شده است.

##### ۲-۴-۱- هدف تحقیق

هدف از این تحقیق، طراحی و انتخاب اهداف فلزی مقاوم در برابر نفوذ پرتابه از نوع انرژی جنبشی و مقایسه عملکرد بالستیکی اهداف تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه بوده است. از نرم‌افزار اجزای محدود LS-DYNA برای انجام فرآیند شبه‌سازی و محاسبه سرعت باقیمانده پرتابه صلب (اجایو) در اهداف فلزی (آلومینیوم و فولاد) برای مقایسه عملکرد بالستیکی اهداف مورد نظر در تحقیق استفاده شده است.

##### ۲-۴-۲- سوال تحقیق

سوال اصلی پژوهش؛ دلیل استفاده از اهداف چندلایه فلزی و چندلایه‌بودن در برابر نفوذ پرتابه چیست؟

اهداف فلزی به صورت کلی از نظر مقاومت ماده در بین ماده‌های موجود در طبیعت جزء اهداف بسیار مقاوم محسوب می‌شوند به‌خصوص فولاد که از سختی مناسب و شکل‌پذیری بالایی برخوردار می‌باشد و به عنوان گزینه اصلی در ساخت استحکامات و سپرهای دفاعی کاربرد دارد.

اما دلیل چندلایه‌بودن این است که با توجه به این‌که هیچ ماده‌ای در طبیعت ویژگی‌های لازم و کامل برای مقاومت و تامین معیارهای مورد نظر برای طراحی بهینه را ندارد محققان را به سمت استفاده از اهداف چندلایه سوق داده است. در این تحقیق از لایه آلومینیومی برای کاهش وزن هدف و استفاده بهینه از مواد استفاده شده است.

##### ۲-۴-۳- فرضیه تحقیق

از آن‌جا که تحقیق حاضر در پی روابط بین متغیر نبوده و صرفاً در پی شناسایی نفوذ پرتابه در اهداف فلزی می‌باشد. بنابراین، این تحقیق از نظر روش تحقیق از نوع اکتشافی- توصیفی بوده و تنها دارای سوالات تحقیق بوده و فرضیه ندارد.

پرتابه صلب طراحی شود، هر مقدار تغییر فرم پرتابه سبب افزایش ضریب اطمینان خواهد بود و لذا صرف‌نظر از تغییر فرم‌های پرتابه در موضوع طراحی سازه‌های مقاوم منطقی بوده و مدل‌های تحلیلی نفوذ پرتابه صلب قابل استفاده می‌باشند. در این تحقیق به دلیل توانایی و دقت بالای روش‌های عددی در چنین مدل‌سازی‌هایی، ضمن بررسی دقیق الگوهای مورد استفاده و معادلات حاکم بر حل آن‌ها به کمک نرم‌افزار LS-DYNA شبه‌سازی عددی تحت اثر ضربه و نفوذ پرتابه صورت گرفته است. پرتابه از نوع صلب و اهداف فلزی مورد استفاده، از جنس فولاد و آلومینیوم و به شکل دایره به قطر ۲۰۰ mm با ضخامت کلی ۱۵ mm برای تمامی نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی برای نفوذ پرتابه در اهداف فلزی (فولاد و آلومینیوم)، در هشت سرعت متفاوت و در مجموع ۳۶۸ فرآیند شبه‌سازی انجام شده است. در ادامه مقایسه‌ای بین نتایج خروجی از شبه‌سازی‌ها با نتایج خروجی از مدل تحلیلی چن و لی<sup>۱</sup> صورت گرفته است.

#### ۲-۲- اهمیت انجام تحقیق

جهان امروز، عرصه تقابل و رقابت ملل و فرهنگ‌های مختلف در تمامی زمینه‌ها، اعم از سیاسی، اقتصادی، تکنولوژی و ... می‌باشد. در این صحنه، کشورهایی مستقل و آباد می‌شوند و توسعه می‌یابند که ابزارها و اهرم‌های قوی و لازم، در هریک از این زمینه‌ها را شناخته و به آن دست پیدا کنند. برای دستیابی به قله‌های رفیع اقتدار و استقلال، بایستی با مسائل و مشکلات به صورت صحیح و منطقی برخورد کرده و با تحقیق و پژوهش عمیق و مداوم به سرمنزل مقصود رسید. با رشد سریع و روزافزون علم و تکنولوژی در تمامی ابعاد، خصوصاً در مسائل نظامی و دفاعی، شاهد آن هستیم که کشورهای دارای آن به اعمال قدرت و القاء نظرات خود به ملت‌های دیگر می‌پردازند. لذا برای اجتناب از این امر و حفظ هویت دینی و ملی، لازم است تا قدم‌های موثری در این حوزه برداریم.

#### ۲-۳- ضرورت انجام تحقیق

ضرورت دستیابی به نتایج مطالعات و تحقیقات علمی انجام‌شده در جهان، از اهم نیازهای گسترش پدافند غیرعامل و فرهنگ علمی آن در سطح جامعه است. از جمله مسائلی که مورد توجه بسیار واقع شده است، مسئله ضربه و آثار ناشی از آن است. امروزه با توجه به پیشرفت علوم و تکنولوژی، اهمیت پدیده ضربه و نفوذ بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به این‌که در گذشته شبه‌سازی عددی برخورد پرتابه با اهداف چندلایه، به خصوص با اهداف سه‌لایه

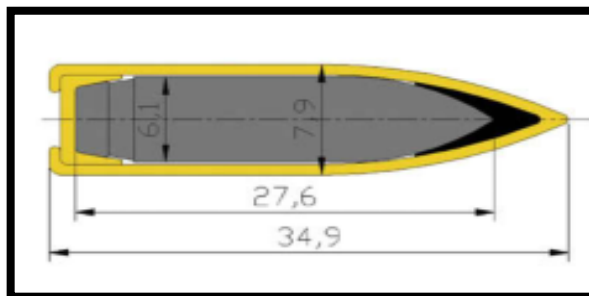
## ۵-۲- نتایج و بحث

در بخش نتایج و بحث، ابتدا روند مدل‌سازی و معرفی نوع مصالح و چیدمان لایه‌ها ارائه شده و در مرحله بعد روند انجام شبیه‌سازی نفوذ پرتابه در اهداف معرفی شده به طور دقیق ارائه شده است.

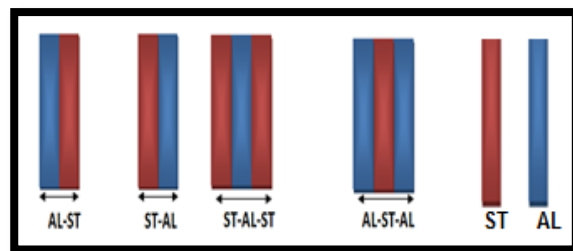
## ۵-۲-۱- مدل‌سازی و مصالح

در جداول (۱-۲) ضخامت لایه‌ها بر حسب میلی‌متر و نحوه چیدمان لایه‌ها در اهداف سه‌لایه (AL-ST-AL, ST-AL-ST) و دو لایه در دو چیدمان مختلف (ST-AL, AL-ST) ارائه شده است. برای مثال هدف (ST13AL2)، حالتی از اهداف دو لایه را مشخص کرده که لایه فولادی با ضخامت ۱۳ mm را لایه اول و آلومینیوم با ضخامت ۲ mm را لایه دوم در نظر گرفته است. هدف (AL11ST2AL2) حالتی را از اهداف سه‌لایه مشخص می‌کند که آلومینیوم با ضخامت ۱۱ mm، لایه اول و فولاد با ضخامت ۲ mm لایه دوم و آلومینیوم با ضخامت ۲ mm را لایه سوم در نظر گرفته است. پارامترها و داده‌های مورد نیاز مکانیکی و... هدف آلومینیومی و فولادی در جداول (۴-۵) ارائه شده است.

همچنین، هندسه و ابعاد پرتابه اجایو (بر حسب mm) در شکل (۱) ارائه شده است. پرتابه صلب و از نوع انرژی جنبشی در نظر گرفته شده است. در مجموع برای ۸ سرعت در محدوده ۵۰۰ الی ۱۴۰۰ m/s، ۳۶۸ نمونه فرآیند شبیه‌سازی انجام شده است. (جدول ۳).



شکل (۱): پرتابه از نوع انرژی جنبشی [۱۴]



شکل (۲): نحوه چیدمان اهداف یک‌لایه، دو لایه و سه‌لایه

جدول (۱): اهداف سه‌لایه با ضخامت مختلف (میلی‌متر)

ترتیب لایه‌ها	ضخامت لایه اول	ضخامت لایه دوم	ضخامت لایه سوم
ST-AL-ST AL-ST-AL	۱۱	۲	۲
	۹	۲	۴
	۹	۴	۲
	۷	۲	۶
	۷	۴	۴
	۷	۶	۲
	۵	۲	۸
	۵	۴	۶
	۵	۶	۴
	۵	۸	۲
	۳	۲	۱۰
	۳	۴	۸
	۳	۶	۶
	۳	۸	۴
۳	۱۰	۲	

جدول (۲): اهداف دو لایه با ضخامت مختلف

چیدمان قرارگیری لایه‌ها	لایه اول	لایه دوم
ST-AL AL-ST	۱۳	۲
	۱۱	۴
	۹	۶
	۷	۸
	۵	۱۰
	۳	۱۲
	۱	۱۴

جدول (۳): تعداد کل نمونه‌های مورد بررسی

اهداف	۸ سرعت	کل
اهداف یک‌لایه	۲	۳۶۸
اهداف دو لایه	۱۴	
اهداف سه‌لایه	۳۰	

## ۵-۲-۲- روند شبیه‌سازی عددی

روند فرآیند شبیه‌سازی از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول (پیش‌پردازش) از نرم‌افزار ترورگرید برای مدل‌سازی و مش‌بندی پرتابه و اهداف فلزی (یک‌لایه و چندلایه) و در مرحله دوم (پردازش و فرا پردازش) برای تحلیل نهایی و کسب خروجی نتایج مورد نظر، مدل اولیه به نرم‌افزار LS-DYNA انتقال داده شده است. به واسطه متقارن بودن سیستم مذکور در برخورد عمودی و همچنین، برای صرفه‌جویی در زمان حل مسئله و اعمال آسان‌تر تغییرات مورد نیاز، مدل شبیه‌سازی شده به صورت دوبعدی، تقارن محوری با محور تقارن Y و در صفحه XY در نظر گرفته شده است. برای امان‌بندی هر

### ۳- نتایج

در این بخش نتایج خروجی از روش شبیه‌سازی عددی و نتایج حاصل از مدل تحلیلی به صورت مجزا ارائه و بررسی شده است. در ادامه مقایسه‌ای بین نتایج حاصله از روش شبیه‌سازی و مدل تحلیلی به صورت نمودار ارائه شده که نتایج قابل قبولی کسب شده است.

#### ۳-۱- نتایج بررسی

نتایج کسب شده در سه مرحله ارائه شده است که شامل نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج حاصل از مدل تحلیلی و مقایسه بین نتایج می‌باشد.

#### ۳-۱-۱- نتایج حاصله از شبیه‌سازی

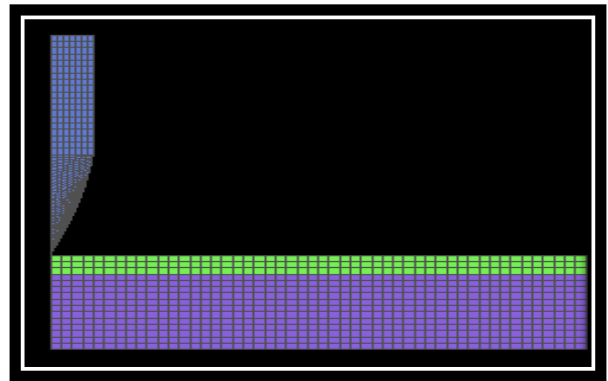
بعد از اتمام فرآیند شبیه‌سازی‌ها، کانتورهای مختلف و نمودارهای بسیاری را می‌توان مشاهده نمود. اما به علت فضای اندک و قالب خاص نگارش مقالات نمی‌توان خیلی از خروجی‌ها را نمایش داد. لذا در این قسمت فقط به بعضی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی اشاره می‌کنیم. نمودارهای مربوط به نفوذ پرتابه اجایو در ۸ سرعت (۵۰۰-۶۰۰-۷۰۰-۸۰۰-۹۰۰-۱۰۰۰-۱۲۰۰-۱۴۰۰) m/s در اهداف فلزی یک لایه، دولایه و سه‌لایه در اشکال (۸-۴) ارائه شده است که نشان‌دهنده تغییرات سرعت باقی‌مانده در مقابل سرعت اولیه در سرعت‌های منتخب می‌باشد. برای مثال، سرعت خروج پرتابه اجایو با سرعت اولیه ۱۴۰۰ m/s، پس از نفوذ در هدف سه‌لایه (St5Al2St8) به سرعت ۱۰۵۰ m/s رسیده است. پس از بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش نتایج حاصل از این تحقیق به طور اجمالی به شرح ذیل می‌باشد:

(۱) برتری عملکرد بالستیکی اهداف فولادی یک‌لایه نسبت به اهداف یک‌لایه آلومینیومی تحت نفوذ پرتابه اجایو، در سرعت‌های کمتر از ۱۰۰۰، ۱۰۰٪ و با افزایش سرعت این درصد برتری، کاهش یافته است.

(۲) با بررسی نتایج بین اهداف یک‌لایه و دولایه فلزی فولاد و آلومینیوم در ۸ سرعت تست‌شده ۱۴۰۰-۵۰۰ m/s، اهداف یک‌لایه فولادی نسبت به اهداف دولایه در تمامی نمونه‌ها تحت نفوذ پرتابه اجایو عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. برای نمونه، برتری این اهداف، تحت نفوذ پرتابه اجایو با سرعت ۱۴۰۰ m/s، در محدوده ۱۰ الی ۳۰٪ بوده که این برتری با کاهش ضخامت لایه فولادی و افزایش ضخامت لایه آلومینیومی، کاهش یافته است.

(۳) عملکرد بالستیکی اهداف سه‌لایه نسبت به تک‌لایه با ضخامت و چیدمان‌های مختلف (با لایه میانی آلومینیوم یا لایه میانی فولاد) که در جدول (۲)، جزئیات آن ارائه شده است. در حدود ۵ تا ۷۰٪، در

جزء سیستم از المان‌های چهارضلعی (shell) تقارن محوری و اندازه هر المان، یک میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تعداد المان‌های پرتابه و هدف برای اهداف یک‌لایه و سه‌لایه ۱۸۵۰ المان و برای اهداف دولایه ۱۷۵۰ المان می‌باشد (شکل ۳). مدل تقارن محوری دویبعی از الگوریتم سطح تماس Contact-2D-Automatic-Surface to Surface، استفاده می‌کند. برای هدف از مدل ماده جانسون-کوک همراه با معادله حالت متناسب با آن استفاده شده است. این مدل برای مسائلی که دارای نرخ کرنش بزرگ، همراه با تاثیرات دمایی مناسب است. در تمامی شبیه‌سازی‌ها پرتابه صلب فرض شده است. سرعت‌های پرتابه در فرآیند شبیه‌سازی ۵۰۰ الی ۱۴۰۰ در نظر گرفته شده است.



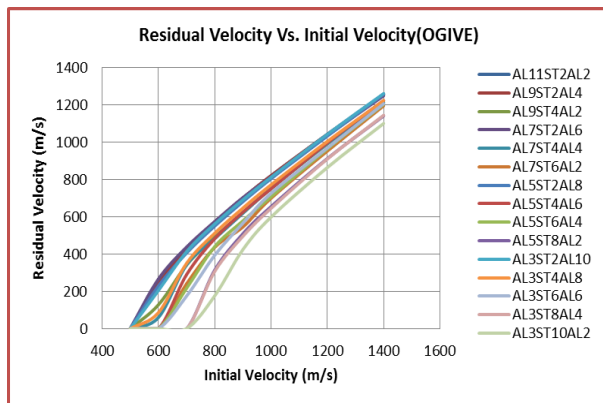
شکل (۳): مدل المان محدود هدف دولایه

جدول (۴): مشخصات فولاد [۱۱]

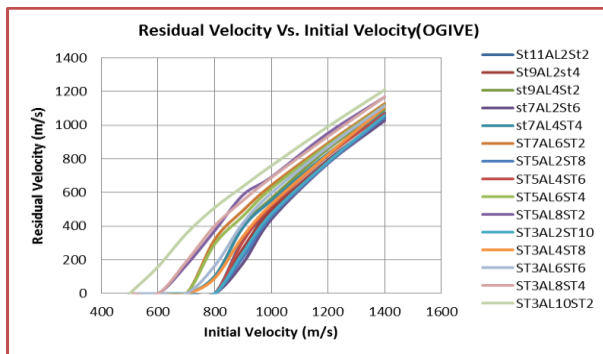
فولاد S-۷ (سیستم SI)			
پارامترهای مورد نیاز و ضرایب ثابت در معادله جانسون-کوک (خواص مکانیکی، حرارتی و ..)			
Material properties	Temperature softening	Strain hardening	Strain rate hardening
$\rho=7750$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$CP(J/Kg.k)=47$	$A=1539$ (M Pa)	C=0.012
$E=210$ (G Pa)	$T_m(k^{\circ})=1763$	$B=477$ (M Pa)	
$G=80$ (G Pa)	$T_R(k^{\circ})=298$	N=0.18	
$\nu=0.33$	M=1		

جدول (۵): مشخصات فولاد [۱۱]

آلومینیوم AL7039 (سیستم SI)			
پارامترهای مورد نیاز و ضرایب ثابت در معادله جانسون-کوک (خواص مکانیکی، حرارتی و ..)			
Material properties	Temperature softening	Strain hardening	Strain rate hardening
$\rho=2770$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$CP(J/Kg.k)=877$	$A=337$ (M Pa)	C=0.01
$E=73$ (G Pa)	$T_m(k^{\circ})=875$	$B=343$ (M Pa)	
$G=27.6$ (G Pa)	$T_R(k^{\circ})=298$	N=0.41	
$\nu=0.33$	M=1		



شکل (۷): نمودار سرعت باقیمانده در مقابل سرعت برخورد برای پرتابه اجایو در هدف سه لایه (AL-ST-AL)



شکل (۸): نمودار سرعت باقیمانده در مقابل سرعت برخورد برای پرتابه اجایو در هدف سه لایه (ST-AL-ST)

### ۳-۱-۲- نتایج حاصله از مدل تحلیلی

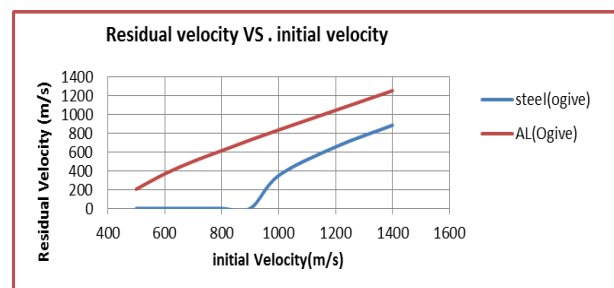
در این تحقیق برای حل تحلیلی از معادلات تحلیلی چن و لی [۱۲] استفاده شده است. این مدل بر مبنای تئوری انبساط حفره کروی، روابطی را برای محاسبه نیروی محوری، عمق نفوذ، سرعت باقی مانده و سرعت حد بالستیک و... برای نفوذ پرتابه صلب در اهداف فلزی ارائه داده است. روابط (۱ و ۲) برای محاسبه سرعت باقی مانده و سرعت حد بالستیک ارائه شده است. در روابط بالا، ثابت (A) برای ماده تراکم ناپذیر الاستیک-پلاستیک کامل، (E) مدول الاستیسیته، (Y) مقاومت تسلیم و (v) ضریب پواسن هدف به صورت زیر بیان شده است.

M جرم پرتابه، d قطر پرتابه و  $\rho_t$  چگالی هدف می باشد. مقادیر  $N_1$  و  $N_2$  که به هندسه دماغه و ضریب اصطکاک مربوط بوده و برای پرتابه های اجایو و نیم کروی از روابط زیر تعیین می شود. پارامتر  $\mu$ ، ضریب اصطکاک عنوان شده است که برای پرتابه اجایو ۰/۰۲ و برای پرتابه نیم کروی ۰/۱ در نظر گرفته شده است [۱۳].

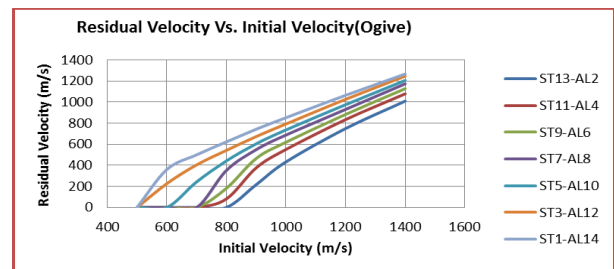
تمامی سرعت های مورد بررسی رفتار بهتری را از خود نشان داده اند.

(۴) عملکرد اهداف سه لایه (با لایه میانی آلومینیوم AL و دوطرف فولاد) نسبت به اهداف سه لایه (با لایه میانی فولاد ST و دوطرف آلومینیوم)، در محدوده بین ۶ تا ۱۰۰٪، در ۸ سرعت رفتار بهتری را از خود نشان داده اند.

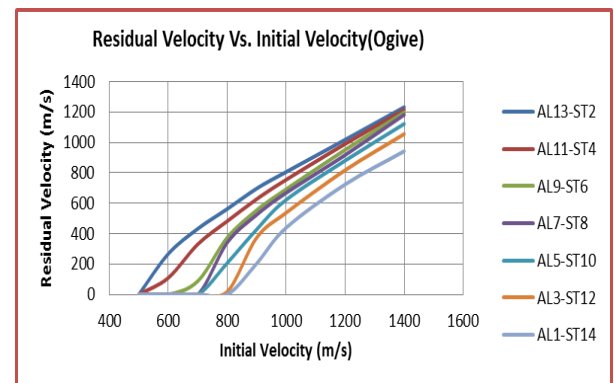
(۵) از بررسی نتایج نمودارهای دیگر مانند نمودار انرژی جنبشی- زمان معلوم گردیده است که انرژی جنبشی پرتابه با گذشت زمان پس از شروع برخورد کاهش یافته و به طور نمونه در فرآیند نفوذ پرتابه با سرعت اولیه ۱۴۰۰ m/s در هدف دولایه (ST13AL2) انرژی جنبشی در پایان فرآیند نفوذ به مقدار صفر رسیده است.



شکل (۴): نمودار سرعت باقی مانده در مقابل سرعت برخورد برای پرتابه اجایو در اهداف فولاد و آلومینیوم



شکل (۵): نمودار سرعت باقی مانده در مقابل سرعت برخورد برای پرتابه اجایو در اهداف دولایه (AL-ST)



شکل (۶): نمودار سرعت باقیمانده در مقابل سرعت برخورد برای پرتابه اجایو در اهداف دولایه (AL-ST)

جدول (۶): محاسبه درصد خطای محاسباتی بین نتایج شبیه‌سازی و تحلیلی با پرتابه اجایو

هدف	سرعت باقیمانده پرتابه از نتایج شبیه‌سازی (متر بر ثانیه)	سرعت باقیمانده پرتابه از مدل تحلیلی (چن-لی)	درصد خطای محاسباتی
Al	1044	1019	2.394636
Al11st4	990	836	15.555556
Al7St2Al6	1036	933	9.9420849
Al9St2Al4	1042	932	10.556622

جدول (۷): روند محاسبه سرعت باقی‌مانده پرتابه پس از نفوذ در هدف یک‌لایه آلومینیومی از معادله تحلیلی

پارامترهای اولیه				ثابت		سرعت باقیمانده (متر بر ثانیه)
پرتابه اجایو		هدف (آلومینیوم)		$\lambda$	$N_1$	1019.08
S	0.06	$\sigma_c$	4.00E+08			
$\psi$	7.874016	$\sigma_v$	3.37E+08			
$\phi_0$	1.212512	E	7.30E+10			
$\mu$	0.02 (اجایو)	$\nu$	0.35	$V_{بل}$	633.62	
$V_i$	1200	$N^*$	0.5			

در جدول (۷)، s شعاع انحناء،  $\psi$  نسبت شعاع انحناء به قطر پرتابه،  $\phi_0$  زاویه دماغه پرتابه،  $\mu$  ضریب اصطکاک،  $\sigma_c$  تنش فشاری،  $V_i$  سرعت اولیه پرتابه،  $V_B$  سرعت حد بالستیک،  $V_r$  سرعت باقی‌مانده می‌باشند.

در نمونه دوم برای محاسبه سرعت باقی‌مانده هدف دولایه Al11st4 (لایه آلومینیومی به ضخامت ۱۱ m/s و لایه فولادی به ضخامت ۴ m/s)، ابتدا سرعت باقی‌مانده پرتابه پس از برخورد به لایه اول را محاسبه نموده و سپس این سرعت را به‌عنوان سرعت اولیه پرتابه در هنگام نفوذ به لایه دوم در نظر گرفته و سرعت باقی‌مانده نهایی ۸۳۶ m/s از معادله مربوطه مشخص شد و اختلافی در حدود ۱۵٪ با نتیجه مشخص شده از روش شبیه‌سازی شده داشته است.

برای محاسبه سرعت باقی‌مانده در اهداف سه‌لایه، به‌طور نمونه (Al7St2Al6 یا Al9St2Al4) که در جدول (۶) ارائه شده است. ابتدا سرعت باقی‌مانده پرتابه پس از برخورد به لایه اول (آلومینیوم) را از روابط موجود محاسبه نموده، سپس این سرعت را به‌عنوان سرعت اولیه پرتابه در برخورد به هدف دوم (فولاد) در نظر گرفته و پس از محاسبه سرعت باقی‌مانده پرتابه در برخورد با هدف دوم، سرعت تعیین شده را به‌عنوان سرعت اولیه در برخورد به لایه سوم (آلومینیوم) در نظر می‌گیریم و با استفاده از معادله تحلیلی سرعت

$$V_r = \sqrt{(V_i^2 - V_{BL}^2)} \quad (1)$$

$$V_{BL} = \sqrt{\frac{\pi AN_1 \sigma_y \chi}{2 \rho_t \lambda}} \quad (2)$$

$$A = \frac{2}{3} \left[ 1 + \ln \left( \frac{E}{3(1-\nu)Y} \right) \right] \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{M}{\rho_t d^3} \quad (4)$$

دماغه اجایو:

$$\chi = \frac{H}{d} \quad (5)$$

$$N_1 = 1 + 4\mu\psi^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} - \phi_0 \right) - \frac{\sin 2\phi_0}{2} \right] \quad (6)$$

$$N_2 = N^* + \mu\psi^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} - \phi_0 \right) - \frac{1}{3} (2\sin 2\phi_0 + \frac{\sin 4\phi_0}{4}) \right] \quad (7)$$

$$N^* = \frac{1}{3\psi} - \frac{1}{24\psi^2} \quad 0 < N^* \leq \frac{1}{2} \quad (8)$$

### ۳-۱-۳- صحت‌سنجی و مقایسه بین نتایج

پس از بررسی کامل مدل‌های تحلیلی نفوذ پرتابه در اهداف، از مدل تحلیلی چن-لی به منظور نفوذ پرتابه در اهداف فلزی و به علت تطابق داشتن با شرایط این پژوهش از جمله، صلب‌بودن پرتابه و ... استفاده شده است. این‌گونه معادلات با تمرکز بر روی یک یا چند مکانیزم تغییر فرم و نفوذ از قبیل (حفره، Scabbing، Spalling و ...) و فرضیات ساده‌کننده، معادلات فیزیکی حاکم بر جسم به معادلات جبری یا دیفرانسیل یک‌بعدی یا دوبعدی تبدیل شده و حل می‌گردند. اغلب مدل‌های تحلیلی نیاز به داده‌های تجربی از قبیل خواص مواد و ... دارد.

در ادامه، به‌منظور اطمینان از صحت روش مدل‌سازی شده، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج خروجی از مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله، از بین چند نمونه اهداف منتخب (یک‌لایه، دولایه و سه‌لایه) تحت نفوذ پرتابه اجایو با سرعت برخورد اولیه ۱۲۰۰ m/s مطابق جدول (۶) انجام شده است. در مرحله اول سرعت باقی‌مانده پرتابه پس از برخورد پرتابه به اهداف را از نتایج خروجی از روش شبیه‌سازی عددی به دست آورده‌ایم. در ادامه با استفاده از پارامترهای مورد نیاز و واردکردن داده‌ها به معادله تحلیلی مربوطه، سرعت باقی‌مانده محاسبه شده و با سرعت باقی‌مانده از شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است. برای نمونه در جدول (۷) روند محاسبه سرعت باقی‌مانده پرتابه در هدف یک‌لایه آلومینیومی ارائه شده است. سرعت باقی‌مانده از رابطه موجود، ۱۰۱۹ m/s به دست آمد و اختلافی در حدود ۲/۵٪ مشاهده شده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

- ۱- شبیه‌سازی‌های عددی به منظور بررسی مقاومت (عملکرد) بالستیک (Ballistic resistance) اهداف یک‌لایه و چندلایه از جنس فولاد، آلومینیوم و یا ترکیب آن‌ها با ضخامت مختلف در برابر ضربه و نفوذ پرتابه اجابو با سرعت‌های متفاوت (۵۰۰ الی ۱۲۰۰ m/s) به صورت دقیق و با ویژگی‌های فنی، مدل-سازی شده تا نتایج حاصله، جهت رفع برخی مشکلات صنایع مختلف و تقویت ساختار امنیتی و دفاعی سازه‌های حساس و فیروال‌ها (Fire Wall) در مراکز حیاتی، حساس و مهم کشور که از فنآوری فلز ساخت پوشش در برابر سلاح‌های متعارف استفاده نمایند مورد کاربرد قرار گیرد.
- ۲- استفاده از اهداف چندلایه با جنس فولاد و آلومینیوم با مقاومت زیاد از گزینه‌های جالب توجه برای ایجاد سازه‌های امن به دلیل سختی مناسب و شکل‌پذیری قابل قبول فولاد و همچنین نسبت مقاومت به چگالی مناسب آلومینیوم برای تامین معیار کاهش وزن کلی سازه و بهبود عملکرد بالستیک سازه می‌شود.
- ۳- با اعمال دقیق پارامترهای فیزیکی و ... مورد نیاز در روند پردازش شبیه‌سازی‌های عددی، توانایی مدل برای پیش‌بینی رفتار بالستیک اهداف، اثبات شده است.
- ۴- به‌طور کلی در بعضی از سرعت‌ها و اهداف با ضخامت‌های مختلف، عملکرد اهداف یک‌لایه بهتر از چندلایه و در بعضی دیگر از سرعت‌ها و اهداف با ضخامت‌های مختلف دیگر، عملکرد اهداف چندلایه بهتر از اهداف یک‌لایه بوده است.
- ۵- از مدل تحلیلی چن-لی برای تایید نتایج شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده است که نتایج خروجی دقت قابل قبولی را نشان داده است.
- ۶- با ایجاد سازه‌های امن و استحکامات می‌توان از واردشدن خسارات مالی، تجهیزاتی، تاسیساتی، نظامی، غیرنظامی و تلفات انسانی جلوگیری نموده و یا میزان این خسارات و تلفات را به حداقل رساند.

در پایان می‌توان به این نکته اشاره کرد که تفاوت فرآیند نفوذ پرتابه در اهداف یک‌لایه و چندلایه، در قابلیت آن‌ها برای جذب و اتلاف انرژی پرتابه می‌باشد. از آن‌جا که مکانیزم نفوذ پرتابه در اهداف، یک مبحث کاملاً پیچیده و بسته به پارامترهای مختلف مانند ضخامت، جنس هدف و نوع دماغه پرتابه می‌باشد لذا پیشنهاد می‌شود؛ حسب نیاز صنایع مختلف مطالعات تخصصی بیشتری در این زمینه صورت پذیرد.

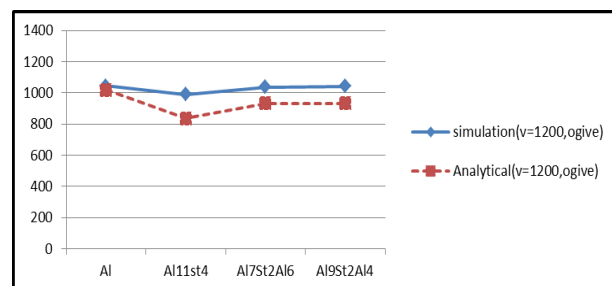
باقی‌مانده نهایی  $932 \text{ m/s}$  تعیین شده و برای هر دو نوع اهداف سه‌لایه اختلاف نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی‌شده در حدود ۱۰٪ به دست آمد.

لازم به ذکر است که در تمامی نمونه‌ها برای محاسبه سرعت باقی‌مانده، سرعت حد بالستیک (حداقل سرعت پرتابه برای نفوذ کامل در هدف را سرعت حد بالستیک گویند) را به دست آورده و سپس با استفاده از آن سرعت باقی‌مانده محاسبه شده است. البته در این‌جا فقط ۴ نمونه از روند انجام محاسبات ارائه شده و برای محاسبه سایر نمونه از این روش استفاده نموده‌ایم.

در ادامه، در شکل (۹) مقایسه بین نتایج، به صورت نمودار هم‌ارائه گردیده است. در نمودار (۹) محور افقی، نام اهداف مورد بررسی و محور قائم، سرعت پرتابه برحسب  $\text{m/s}$  نشان داده شده است.

از ۴ نمونه مورد بررسی، کمترین اختلاف بین نتایج مربوط به هدف یک‌لایه و بیشترین اختلاف مربوط به هدف دو‌لایه بوده است. نتایج حاصله نشان داده که میزان اختلاف بین نتایج در محدوده تقریب مهندسی بوده و می‌توان آن را پذیرفت.

در پایان باید به این نکته اشاره کرد که در شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود، پارامترهای فراوانی در دقت نتایج تاثیرگذار هستند. به‌طور مثال مدل ماده به کار برده شده، انتخاب مش، نوع المان و بسیاری موارد دیگر مورد استفاده باید تقریباً رفتار فیزیکی یک ماده واقعی را تحت همان شرایط بارگذاری داشته باشد تا بتوان به نتایج دقیق‌تر رسید. از دلایل دیگر اختلاف بین نتایج می‌توان به استفاده از فرضیات ساده شونده و برخی محدودیت‌هایی که در کلیه مدل‌های تحلیلی وجود دارد، اشاره نمود و در روش شبیه‌سازی هم به پیچیده‌بودن و وابسته‌بودن به پارامترهای زیاد اشاره کرد. در این پژوهش با رعایت موارد اشاره‌شده، تا حد امکان نتایج به نحو مطلوب و قابل قبول کسب شده است.



شکل (۹): مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و تحلیلی برای نوع ۴ هدف، تحت نفوذ پرتابه اجابو با سرعت اولیه  $1200 \text{ m/s}$



## ۵- مراجع

- 1- A. Asadi, S. Amireddin, A saedi, and Bahrapour, "The study of blast effect on reinforced concrete structures," *Passive Defense Quarterly*, vol. 1, no. 2, Spring 2010. (in Persian)
- 2- T. Borvik, O. S. Hopperstad, T. Berstad, and M. Langseth, "Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: Part II: numerical simulations," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 27, no. 1, pp. 37-64, 2002.
- 3- T. Børvik, O. Hopperstad, and K. Pedersen, "Quasi-brittle fracture during structural impact of AA7075-T651 aluminium plates," *Int. J. Impact Eng.*, 2010.
- 4- S. Dey, T. Borvik, X. Teng, T. Wierzbicki, and O. S. Hopperstad, "On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, no. 20, pp. 6701-6723, 2008.
- 5- S. Dey, T. Borvik, O. S. Hopperstad, J. R. Leinum, and M. Langseth, "The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 30, no. 8-9, pp. 1005-1038, 2004.
- 6- A. Arias, J. A. Rodriguez-Martinez, and A. Rusinek, "Numerical simulations of impact behaviour of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical nondeformable projectiles," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, no. 6, pp. 1635-1656, 2008.
- 7- X. W. Chen, X. Q. Zhou, and X. L. Li, "On perforation of ductile metallic plates by blunt rigid projectile," *European Journal of Mechanics - A/Solids*, vol. 28, no. 2, pp. 273-283, 2009.
- 8- "Int J. Solids Struct.," vol. 38, pp. 3321-3328, 2001.
- 9- M. A. Iqbal, A. Chakrabarti, S. Beniwal, and N. K. Gupta, "3D numerical simulations of sharp nosed projectile impact on ductile targets," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, pp. 185-195, 2010.
- 10- A. AlaviNia and G. R. Hoseini, "Experimental study of perforation of multi-layered targets," *Materials and Design*, vol. 32, pp. 1057-1065, 2011.
- 11- J. A. Zukas, "high velocity impact Dynamics," *Computational Mechanic Associates Towson, Maryland*, 1990.
- 12- X. W. Chena, X. L. Huangb, and G. J. Liang, "Comparative analysis of perforation models of metallic plates by rigid sharp-nosed projectiles,".
- 13- X. W. Chen and Q. M. Li, "Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 27, pp. 619-637, 2002.
- 14- E. A. Flores-Johnson, M. Saleh, and L. Edwards, "Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 38, pp. 1022-1032, 2011.

---

# Numerical Simulation of High Velocity Projectile Penetration into Multi-Layer Metal Targets

H. Sharifi Soreki, H. Mohammadi Shirkolay, A. Mehdipur Omrani\*

## Abstract

The creation of protective structures and retrofitting are the important principles of passive defense. Also, they are in line with twenty-first section of national building regulations. Due to the increase in the unnatural incidents such as military and terrorist attacks around the world, implementation of special engineering projects including protective structures and shields against projectiles impact and penetration can improve the structure resistance. In this paper, by finite element software (LS-DYNA), the Ogive projectile penetration is simulated in eight speeds (500 to 1400 m/s) and one/two/three layers metal targets to determine ballistic resistance and projectile residual velocity. Overall, 368 procedures are simulated. The projectile is assumed to be solid and targets material behavior is based on Johnson-cook material model. The overall thickness of targets is 15mm and multilayer targets are connected together. On the following, simulation results are compared with Chen-Li analytical results. The simulation results show that in some supposed velocities, using three-layer targets instead of single layer ones can increase penetration resistance with equivalent thickness. By comparing the results, there is appropriate compatibility between this simulation outcomes and analytical results.

**Key Words:** *Multilayered Targets, LS DYNA, Analytical Model, Johnson-Cook, Numerical Simulations*