

تحلیل عددی و تجربی شکل گیری و نفوذ پرتابه‌های شکل یافته انفجاری

حمیدرضا خلجی^۱ و رضا محسنی^۲

سازمان صنایع هوافضا

حسین خدارحمی^۱

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه امام حسین (ع)

چکیده

با توجه به پیچیدگی تحلیل مسایل انفجار مواد منفجره، انتشار موج شوک و تغییر فرم لاینر در شکل‌گیری پرتابه‌های شکل‌یافته انفجاری (EFP) و نفوذ آن در صفحه هدف، شبیه‌سازی عددی مسأله شکل‌گیری و نفوذ این پرتابه‌ها می‌تواند نقش مؤثری در طراحی سر جنگی‌های ضد زره داشته باشد. در این مقاله، مراحل شکل‌گیری و نفوذ پرتابه‌های EFP به روش اجزاء محدود و به کمک کد LS-DYNA برای دو نوع لاینر کرومی با ضخامت متغیر و لاینر با پروفیل چند جمله‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. به علاوه، با ساخت این دو نوع لاینر و انجام تست‌های تجربی، میزان عمق نفوذ و قطر حفره حاصل از برخورد پرتابه شکل‌یافته در صفحه هدف فولادی اندازه‌گیری شده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی با یافته‌های تجربی مقایسه گردیده و تطابق خوبی را نشان می‌دهد. به علاوه، مقایسه نسبت L/D سرعت و قابلیت نفوذ پرتابه‌های بدست آمده نشان می‌دهد که لاینر با پروفیل چند جمله‌ای نسبت به لاینر کرومی برتری کاملی دارد.

واژه‌های کلیدی: پرتابه شکل‌یافته انفجاری، شکل‌گیری، نفوذ، شبیه‌سازی عددی، تست‌های تجربی، نرم‌افزار LS-DYNA

Forming and Penetration of Explosive Formed Projectiles-Numerical and Experimental Analyses

H. Khodarahmi

Mech. Eng. Group, Eng. Department
Imam Hossein Univ

H.R. Khalaji and R. Mohseni

Aerospace Industry Organization

ABSTRACT

Explosive Formed Projectiles (EFP) are applied extensively in anti-armour missiles. However, due to its complexity in analysis, numerical simulation is widely used. In particular, analysis of EFP forming and penetration can be effectively utilized in anti-armour warhead design. In this paper, the forming and penetration of two types of liner, including spherical with variable thickness and polynomial curve, have been simulated by LS-DYNA Code. For comparison and evaluation, several ballistic tests have also been carried out as experimental work. The results of numerical simulation, such as penetration depth and crater diameter, have been compared with the experimental results and good agreement have been obtained.

Key Words: Explosive Formed Projectile, Forming, Penetration, Numerical Simulation, Ballistic Tests, LS-DYNA Code

۱- استادیار: Hossein_Khodarahmi@yahoo.com

۲- کارشناس ارشد

۳- کارشناس ارشد

مقدمه

حالت می‌باشد. به عبارت دیگر، حتی با جرم بیشتر و سرعت کمتر نسبت به خرج گود ایجاد می‌کند. سیستم‌های خرج گود از سال ۱۹۴۳ در زمینه‌های مختلفی از قبیل حفاری، تخریب سازه‌ها و درسرجنگی‌ها استفاده شده است [۱]. بعد از آن پرتابه شکل‌یافته انفجاری مورد توجه قرار گرفت. این پرتابه‌ها، با استفاده از توانایی ایجاد فاصله توقف (Stand Off) بالا می‌تواند از فاصله زیادی از سطح هدف شکل‌گرفته و آن را مورد اصابت قرار دهد. این مکانیزم، در موشک‌های حمله از بالا می‌تواند نواحی فوقانی تانک‌ها را که ضعیف‌تر هستند، مورد حمله قرار دهد و یا در سرجنگی مین‌های ضد بالگرد از فاصله تا حدود ۱۵۰ متری آن را مورد اصابت قرار دهد.

حفره ایجاد شده در اثر سرجنگی خرج گود، به دلیل شکل جت، دارای عمق بیشتر و قطر کمتری است. درحالی‌که پرتابه‌های EFP حفره‌ای با قطر بزرگ‌تر عمق کمتری ایجاد می‌کند. به علاوه، جت حاصل از خرج گود دارای گرادیان سرعت بوده و برای رسیدن به بیشترین طول جت، بستگی زیادی به فاصله توقف دارد. درحالی‌که، عدم حساسیت پرتابه EFP به فاصله توقف از مزایای بزرگ آن محسوب می‌شود. پارامتر اساسی در طراحی سر جنگی‌های EFP، میزان عمق نفوذ و قطر حفره ایجاد شده در سطح هدف می‌باشد [۲].

امروزه روش‌های عددی در کنار روش‌های تحلیلی و تجربی کمک زیادی به حل مسایل و شناخت پدیده‌های فیزیکی می‌نماید. پدیده‌هایی که در طی فرآیند نفوذ اتفاق می‌افتد، معمولاً در تست‌های تجربی به سختی قابل مشاهده و ثبت هستند. درحالی‌که، در یک تحلیل عددی معمولاً کل فرآیند را می‌توان شبیه‌سازی نمود.

تحلیل مسائل شکل‌گیری و نفوذ پرتابه‌های EFP و خرج گود دارای پیچیدگی‌های زیادی است که انفجار خرج، انتشار موج شوک درون خرج و اصابت موج به لاینر، تغییر فرم لاینر و شکل‌گیری پرتابه و بعد اصابت آن به سطح هدف و نفوذ در آن تا توقف کامل را شامل می‌شود. بررسی این مراحل مختلف کاری بسیار مشکل است و سعی می‌شود از روش‌های مختلف تحلیلی، تجربی و عددی در این زمینه استفاده شود.

سرجنگی‌ها با توجه به مکانیزم عملکردشان به دو نوع کلی تقسیم می‌شوند. نوع اول که برای تخریب هدف و نفوذ در آن از انرژی جنبشی گلوله استفاده می‌کند، نفوذکننده انرژی جنبشی (Kinetic Energy Penetrator) نامیده می‌شود. نوع دوم سرجنگی‌ها در موقع برخورد به هدف با استفاده از انفجار ایجاد خسارت می‌کنند. این نوع سرجنگی‌ها با نام‌های سرجنگی انرژی شیمیایی (Chemical Energy Warhead) یا سرجنگی‌های شدیدانفجار (High Explosive Warhead) خوانده می‌شوند [۱].

سرجنگی‌های شدیدانفجار بر اساس جهت تأثیرشان به دو گونه: تأثیر در همه جهات و انرژی تمرکز یافته تقسیم می‌شوند. تفاوت این دو نوع در این است که در اولی، انفجار سرجنگی روی همه محیط اطراف خود تأثیر می‌گذارد، در حالی‌که در نوع دوم انرژی در یک جهت خاص متمرکز و تخریب عظیمی در آن راستا بوجود می‌آورد.

در سرجنگی‌های با انرژی تمرکز یافته، انرژی انفجار به واسطه یک فضای خالی در ماده منفجره که با آستری (لاینر) فلزی پوشیده شده، متمرکز می‌شود. در این حالت، آستری در اثر انفجار تغییر شکل‌یافته و بخشی از آن به صورت یک جت شتاب می‌گیرد و در جهت مشخص شده به هدف برخورد می‌نماید. میزان این انرژی بین ۵ تا ۲۰ درصد کل انرژی شیمیایی آزاد شده ماده منفجره است که به دلیل تمرکز، قادر به ایجاد حفره عمیقی در هدف می‌باشد.

بسته به شکل آستری، این نوع سرجنگی‌ها به سه گروه عمده خرج گود یا خرج شکل‌یافته (Shaped Charge)، خرج نیمکره‌ای (Hemispherical Charge) و پرتابه شکل‌یافته انفجاری (Explosive Formed Projectile) تقسیم می‌شود. پرتابه حاصل از خرج گود (SC)، به صورت جت بوده و سرعت نوک آن در حدود ۷ تا ۱۲ کیلومتر بر ثانیه و جرمش در حدود ۲۰ درصد جرم آستری فلزی می‌باشد که سبب نفوذ زیادی در هدف می‌شود. پرتابه شکل‌یافته انفجاری (EFP) دارای جرم زیاد و توده‌ای شکل بوده و سرعت آن به حدود ۱/۵ تا ۳ کیلومتر بر ثانیه می‌رسد. سرجنگی خرج نیم کره‌ای در واقع مابین این دو

هاریسون (Harison) به کمک کد تفاضل محدود لاگرانژی HEMP شکل‌گیری جت حاصل از یک لاینر مسی نیم کروی و خرج استوانه‌ای اکتل را شبیه‌سازی کرده و مراحل شکل‌گیری جت را مورد مطالعه قرار داده است. در این بررسی، به دلیل کرنش‌های خیلی زیاد و تغییر فرم‌های شدید المانها در لحظه ۳۵ میکروثانیه شبکه‌بندی مجدد برای بهبود شبکه انجام شده است [۱۰].

بندر (Bender) با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود لاگرانژی (EPIC-2) شکل‌گیری پرتابه EFP حاصل از لاینر تتالیومی و خرج LX-14 با پوسته فلزی را مدل کرده است. در این تحلیل، پس از ۶۰ میکروثانیه المان‌های خرج و پوسته به دلیل کاهش فشار انفجار و بی‌اثر بودن در حرکت لاینر حذف شده و صرفاً شکل‌گیری پرتابه دنبال شده است [۹].

نتایج مدل‌سازی عددی بالاگانشکی با استفاده از نرم‌افزار ODVAX نشان داده که پارامترهای اصلی فرآیند تشکیل جت به روشنی با سیال تراکم‌پذیر ایده‌آل و مدل دتونیشن چاپمن-جوگوئت (Chapman-Jouguet) قابل توصیف است، اما ناپایداری فرآیند تشکیل جت در این حالت قابل مدل‌سازی نمی‌باشد [۱۱].

رژن برگ و دکل با استفاده از نرم‌افزار PISCES 2DELK برخورد یک جت خرج گود را با یک لایه خرج TNT دارای انسداد با صفحات فولادی شبیه‌سازی کرده‌اند، که در آن از مدل جانسون - کوک برای صفحات فولادی و معادله حالت JWL برای خرج استفاده شده است. در این مدل‌سازی، اثرات ضخامت خرج، ضخامت صفحات و اثرات شکل خرج، مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۶].

کاتایاما و کایپ (Katayama & Kibe) برای تحلیل شکل‌گیری جت خرج گود، یک روش عددی پیشنهاد داده‌اند که در آن ترکیب روش کاملاً عددی به کمک نرم افزار اتوداین (Autodyn) و یک روش نیمه عددی با استفاده از نرم‌افزار CSC ارائه شده است [۱۳].

مولی ناری (Molinari) به کمک نرم افزار اجزاء محدود لاگرانژی که در آن پلاستیسیته با نرخ کرنش و کار سختی در نظر گرفته شده و تغییر فرم‌های شدید در المان‌های لاینر مخروطی با شبکه بندی انطباقی (Adaptive) اصلاح شده، شکل‌گیری و نفوذ جت در صفحه زرهی RHA را

برای تحلیل نفوذ جت خرج گود، تئوری هیدرودینامیکی بر مبنای معادله برنولی از گذشته مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه، وجود گرایان سرعت و اندازه گیری طول جت از مشکلات آن می‌باشد.

در تحلیل نفوذ پرتابه‌های EFP، با توجه به اینکه سرعت آن تقریباً یکنواخت می‌باشد، چنانچه پرتابه ایجاد شده به شکل یک میله باشد، مدل‌های تئوری نفوذ میله‌های بلند می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

در چند دهه گذشته، نفوذ میله‌های بلند مورد توجه بسیاری از محققین و متخصصین مکانیک ضربه قرار گرفته است. کاربرد تئوری هیدرودینامیکی بهبود یافته، مروری بر سیر تحولات آن و تعمیم آن در هدف‌های چند لایه توسط جمعی از محققین ارائه شده است [۳ - ۷].

از طرفی، با توجه به اینکه شکل پرتابه‌های EFP ممکن است کاملاً میله‌ای نباشد، کاربرد تئوری‌های نفوذ پرتابه‌های میله‌ای بلند می‌تواند با مشکلاتی روبرو شود. لذا، امروزه روش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی به کمک هیدروکدها کاربرد مؤثری دارد. اگرچه، انجام تست‌های تجربی نیازمند امکانات و تجهیزات خاص و صرف هزینه می‌باشد، برای استفاده از هیدروکدها نیز باید تجربه مفید کار با آنها وجود داشته باشد.

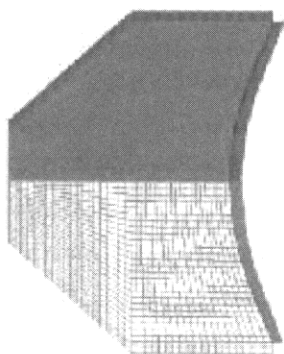
با توسعه نرم‌افزارها و امکانات کامپیوتری، در زمینه شبیه‌سازی عددی شکل‌گیری پرتابه‌ها و نفوذ آنها کارهای جالبی توسط محققان در دو دهه گذشته صورت گرفته است. زاکاس، کارلتون و مایر مرور بسیار خوبی بر کاربردها، مدل‌های تحلیلی و عددی در این زمینه ارائه داده‌اند [۸، ۱۰، ۹].

با توجه به سیلان مواد و تغییر فرم‌های شدید ایجاد شده، در تحلیل‌های اولیه منتشر شده در مورد شکل‌گیری و نفوذ پرتابه‌های خرج گود و EFP، از روش اویلری استفاده شده است. ولی در سال‌های اخیر با توسعه قابلیت نرم افزارها و ایجاد توان شبکه‌بندی مجدد (Remeshing)، روش لاگرانژی نیز به کار رفته است. اخیراً روش بهینه اویلری - لاگرانژی اختیاری که به نام ALE (Arbitrary Eulerian-Lagrangian) معروف شده، کاربرد خوبی در مسائل غیرخطی شدید و همچنین، در تحلیل تعامل سیال و سازه پیدا کرده است.

تحلیل عددی شکل گیری پرتابه EFP

مشخصات و هندسه مدل‌های تحلیل شده

در این تحقیق، شکل‌گیری دو نوع لاینر شامل لاینر با پروفیل منحنی کروی و با ضخامت غیریکنواخت و لاینر با پروفیل منحنی چندجمله‌ای مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. در این تحلیل، تمامی مشخصات پوسته و خرج در هر دو مورد یکسان در نظر گرفته شده و تنها هندسه لاینر تغییر کرده است. در شکل (۱) المان‌بندی اولیه قسمت‌های مختلف سرچنگی (شامل خرج، پوسته و لاینر) آورده شده است. برای المان‌بندی اجزا مختلف، از المان‌های چهار وجهی (Quadratic) و متقارن محوری (Axisymmetric) استفاده شده است.



شکل ۱- شکل و المان‌بندی اولیه خرج، پوسته و لاینر.

لاینر کروی با ضخامت غیریکنواخت از ۱ تا ۴ میلی‌متر و قطر ۱۲۰ mm است و لاینر چند جمله‌ای نیز شامل دو منحنی چند جمله‌ای درجه ۶ با ضخامت متغیر و قطر ۱۲۰ mm می‌باشد. پوسته هر دو سرچنگی نیز با ضخامت ۴ mm انتخاب شده است.

مدل‌های مواد استفاده شده برای خرج، لاینر و پوسته

جنس خرج به کار رفته در سرچنگی Octol 75/25 می‌باشد که مدل ماده آن در تحلیل از نوع مت با قابلیت انفجار بالا (Mat_High_Explosive_Burn) و معادله حالت آن JWL در نظر گرفته شده است. جنس لاینر نیز مس OHFC است که برای مدل‌سازی آن از مدل ماده مت جانسون-کوک (Mat-Johnson-Cook) و معادله

مدل‌سازی نموده و به علاوه برای شکست جت یک معیار شکست ارائه نموده است [۱۴].

لیو (Liu) و همکارانش اخیراً به روش SPH دتونیشن خرج و شکل‌گیری جت خرج گود را با استفاده از معادله حالت JWL برای خرج TNT بدون پوسته شبیه‌سازی کرده و توانسته‌اند فیزیک پدیده را مدل‌سازی کنند [۱۵]. (Chant) یک فرم بسته از حل تحلیلی برای شکل‌گیری یک جت غیرویسکوز ناپایدار ارائه داده و شکل جت ایجاد شده را با نتایج شبیه‌سازی به کمک هیدروکد CTH مقایسه نموده است [۱۶].

در حل مسائل به روش لاگرانژی، به دلیل اینکه المان‌های پرتابه پس از شکل‌گیری، تغییر فرم‌های شدیدی می‌دهد، امکان ادامه حل یعنی نفوذ آن در هدف وجود نداشته و لذا در اغلب کارهای صورت گرفته در این زمینه، مراحل شکل‌گیری و نفوذ کاملاً به صورت متمایز از هم انجام شده است. به عنوان نمونه، ویکرت و گالاقر (Gallagher & Weickert) برای تحلیل نفوذ پرتابه‌های EFP، ابتدا هندسه پرتابه را از تست‌های تجربی بدست آورده، همان هندسه را وارد مدل‌سازی کرده، شبکه زنده‌اند، و با اعمال سرعت اندازه‌گیری شده از تست، پرتابه را به صفحه هدف اصابت داده و نفوذ را مطالعه کرده‌اند [۲].

در این مقاله، ابتدا نحوه شکل‌گیری دو نوع پرتابه EFP به کمک نرم افزار LS-DYNA شبیه‌سازی شده و نحوه نفوذ آن در هدف مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، جهت بررسی صحت نتایج، تست‌های تجربی برای این دو نوع سرچنگی انجام شده است. در انتها، با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تست‌های تجربی، می‌توان برای طراحی سرچنگی مناسب با عمق نفوذ و قطر حفره بالا جهت تخریب اهداف، تصمیم‌گیری نمود.

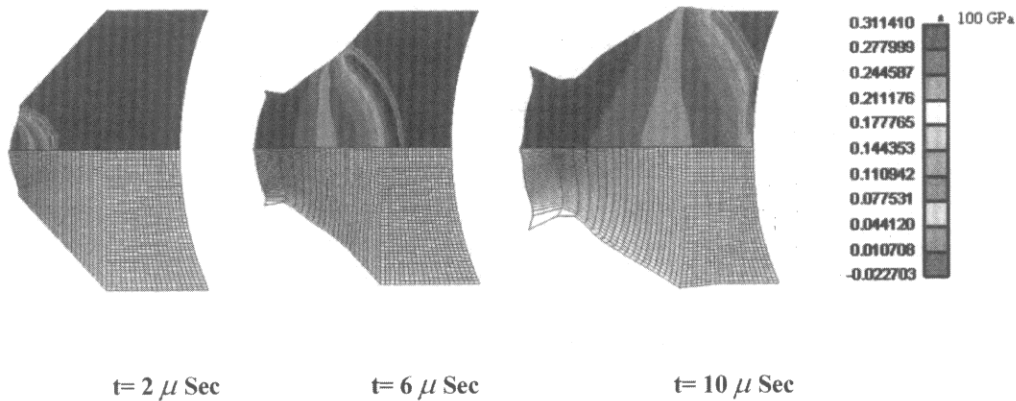
همانطور که اشاره شد، اندازه‌گیری تجربی برخی پارامترها در دو پدیده شکل‌گیری و نفوذ پرتابه نیاز به تجهیزات بسیار پیشرفته و دقیق و در نتیجه پر هزینه دارد که به کمک این شبیه‌سازی‌ها می‌توان، این پدیده‌ها را به طور کمی مورد بررسی قرار داده و تا حد زیادی در هزینه‌ها صرفه‌جویی نمود.

زمان‌های ۲، ۶ و ۱۰ میکروثانیه نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، انتشار امواج به صورت کروی بوده و با پیشروی موج در خرج مقدار فشار ماکزیمم نیز بیشتر می‌شود. می‌توان مشاهده نمود که فشار امواج انفجاری در لحظه برخورد به لاینر حدود ۳۱ GPa می‌باشد که این فشار در مقایسه با مقاومت تسلیم لاینر مسی حدود ۲۰۰ برابر بیشتر است. بنابراین، فشار بالا باعث می‌شود که لاینر مسی به راحتی سیلان کرده و تغییر شکل دهد و در نهایت، به صورت یک پرتابه با شکل پایدار درآید.

حالت گرانیسین (Gruneisen) استفاده شده است. برای پوسته آلومینیومی نیز مدل ماده مت پلاستیم سینما تیک (Mat_Plastic_Kinematic) در نظر گرفته شده است. [۱۷ و ۱۸].

انفجار خرج

پس از شروع انفجار در خرج، امواج فشاری ناشی از انفجار به صورت کروی در خرج منتشر شده و پس از برخورد به لاینر باعث حرکت و تغییر شکل آن می‌شود. در شکل (۲) کانتورهای فشار (خطوط هم فشار) درون خرج پس از

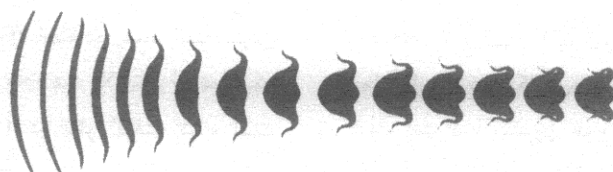


شکل ۲- کانتورهای فشار برای مراحل مختلف انفجار خرج درون محفظه در زمان‌های ۲، ۶ و ۱۰ میکروثانیه.

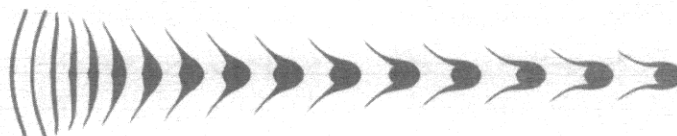
بوده است، ولی صرفاً با تغییر هندسه لاینر تغییرات کلی در شکل نهایی پرتابه حاصل می‌گردد. مشخصات شکل نهایی پرتابه‌های EFP، از قبیل سرعت، قطر، طول و نسبت طول به قطر (L/D) پرتابه‌ها، در جدول (۱) ارائه شده است. اختلاف زیاد در شکل پرتابه‌ها در اثر تغییر هندسه لاینر، اهمیت شبیه‌سازی شکل‌گیری پرتابه در مسیر طراحی را به روشنی نشان می‌دهد.

مراحل شکل‌گیری لاینر

پس از انفجار خرج درون محفظه و عبور موج انفجار در خرج و برخورد آن به لاینر، به علت فشار بسیار بالایی که موج انفجار در هنگام برخورد به لاینر مسی وارد می‌کند، لاینر مسی شروع به حرکت و تغییر شکل می‌کند. در شکل‌های (۳) و (۴) مراحل شکل‌گیری دو لاینر فوق‌الذکر آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، شکل پرتابه نهایی ایجاد شده کاملاً تحت تاثیر هندسه اولیه لاینر می‌باشد و در حالی که سایر مشخصات لاینر از قبیل خواص مواد، ضرایب مختلف برای لاینر و خرج و پوسته یکسان



شکل ۳- مراحل شکل‌گیری لاینر کروی با ضخامت متغیر.



شکل ۴- مراحل شکل‌گیری لاینر چندجمله‌ای درجه ۶.

جدول ۱- مشخصات شکل‌نهایی لاینرهای مختلف.

لاینر چندجمله‌ای درجه ۶	لاینر کروی با ضخامت متغیر	
۳۵۰۰	۲۵۰۰	سرعت پرتابه (m/s)
۳/۲۳	۳/۸۵	قطر پرتابه (cm)
۸/۹	۳/۲۳	طول پرتابه (cm)
۲/۷۶	۰/۸۴	L/D پرتابه

تحلیل نفوذ پرتابه EFP

شکل‌گیری پرتابه مدل‌سازی و حل می‌شود و در مرحله دوم نفوذ آن شبیه‌سازی می‌گردد. در این روش، نتایج تحلیل مرحله اول که شامل شکل هندسی پرتابه و سرعت آن می‌باشد، به عنوان ورودی به مرحله دوم، مورد استفاده قرار می‌گیرد و هر مرحله به طور مجزا مدل‌سازی و حل می‌شود. در اینجا می‌توانیم مدل‌های مواد را نیز در فایل ورودی تغییر دهیم. در این روش، شکل هندسی نهایی پرتابه که از مرحله اول بدست آمده، با استخراج مشخصات نقاط روی مرز خارجی آن در نرم‌افزار ANSYS بازسازی شده و مجدداً شبکه بندی شده است. توان بالای این نرم‌افزار در مدل‌سازی، این کمک را به ما می‌کند که شکل نامنظم بدست آمده از مرحله اول به راحتی المان‌بندی شود و نتایج آن به صورت یک فایل ورودی برای کد اصلی مورد استفاده در (LS-DYNA) باشد. همچنین، با اندازه‌گیری سرعت پرتابه شکل‌یافته از مرحله اول، در مرحله دوم به

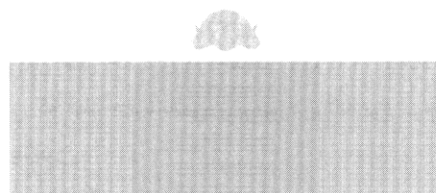
براساس شکل‌گیری پرتابه‌های قسمت قبل، شبیه‌سازی و تحلیل نفوذ این پرتابه‌ها (با دو لاینر متفاوت) در اهداف فلزی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است، در تحلیل شکل‌گیری پرتابه EFP مدل مادی پرتابه بدون قابلیت شکست المان‌ها در نظر گرفته شده است تا مراحل شکل‌گیری بتواند به طور کامل صورت گیرد. در حالی که برای تحلیل و شبیه‌سازی نفوذ باید مدل مواد مورد استفاده دارای خاصیت پاره‌شدن یا حذف المان‌ها باشد. به همین منظور، مدل مواد برای پرتابه و صفحه هدف از نوع الاستیک - پلاستیک با کار سختی و قابلیت شکست المان‌ها (Mat-Plastic-Kinematic) انتخاب شده است. صفحه هدف، از جنس فولاد St37 و ابعاد $30 \times 30 \times 10$ cm انتخاب است. با توجه به مشکلات فوق‌الذکر، شبیه‌سازی نفوذ پرتابه در دو مرحله صورت گرفته است. در مرحله اول،

آمده است. اما، برای پرتابه حاصل از لاینر چند جمله‌ای عمق نفوذ بیش از ضخامت صفحه هدف (بیشتر از ۱۰ cm) است و در حقیقت، صفحه هدف را سوراخ کرده که قطر حفره حاصل حدود ۷ cm می‌باشد.

کلیه نقاط پرتابه بازسازی شده سرعت اولیه داده شده و برخورد آن به صفحه هدف مورد بررسی قرار گرفته است. نحوه نفوذ دو نوع پرتابه در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج تحلیل، عمق نفوذ پرتابه حاصل از لاینر کروی حدود ۸ cm و قطر حفره حدود ۱۱ cm بدست



ب : پس از برخورد و نفوذ

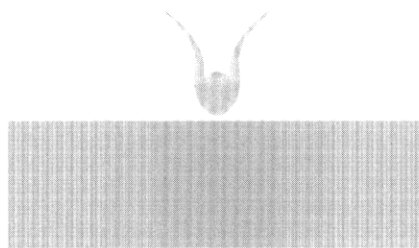


الف : قبل از برخورد

شکل ۵ - نفوذ پرتابه حاصل از لاینر کروی.



ب : پس از برخورد و نفوذ



الف : قبل از برخورد

شکل ۶ - نحوه نفوذ پرتابه حاصل از لاینر با پروفیل چند جمله‌ای.

در تست اول با لاینر کروی، پرتابه شکل‌یافته در صفحه هدف نفوذ کرده و عمق نفوذ معادل ۸/۵ cm و قطر حفره حدود ۱۱/۵ cm بدست آمده است (شکل ۷).



شکل ۷ - نحوه نفوذ پرتابه با لاینر کروی.

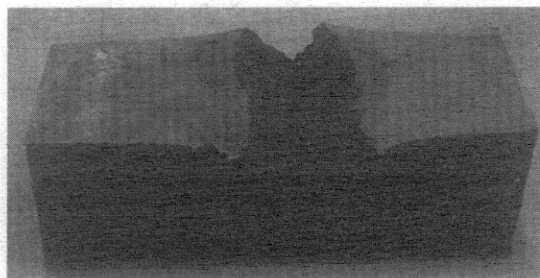
تست‌های تجربی نفوذ EFP

جهت مقایسه نتایج و بررسی جواب‌های عددی بدست آمده، دو سری تست تجربی نفوذ پرتابه‌های EFP انجام گردید. این تست‌ها در شرایط استاتیکی و با قرار گرفتن سرجنگی‌ها بر روی پایه‌ای روی زمین به فاصله‌ای نزدیک به ۰/۵ متر (فاصله توقف) از صفحه هدف فولادی از نوع St37 به ضخامت ۱۰ cm انجام شده است. صفحات هدف پس از انجام تست برش زده شده و عمق نفوذ و قطر حفره اندازه‌گیری شده است. در شکل‌های (۷) و (۸) حفره برش خورده در صفحات هدف نمایش داده شده است.

تقریبی $2/23 \text{ cm}$ ($L/D = 2/76$) و سرعت 3500 m/s تبدیل می‌شود. نسبت L/D پرتابه ایجاد شده نشان می‌دهد که لاینر چند جمله‌ای برتری کاملی دارد. عمق نفوذ پرتابه حاصل از لاینر کروی به دلیل شکل توده‌ای حاصل شده، در حدود $8/5$ سانتی‌متر است. درحالی‌که پرتابه بدست آمده از لاینر چند جمله‌ای به دلیل شکل میله‌ای‌تر، نفوذ بیش از 10 cm دارد. شکل هندسی پرتابه‌ها سبب شده که پرتابه نوع اول قطر حفره‌ای در حدود $11/5 \text{ cm}$ ایجاد کند، در حالی که قطر حفره ناشی از برخورد پرتابه نوع دوم $7/5 \text{ cm}$ می‌باشد.

در جدول (۲)، مقادیر عمق نفوذ و قطر حفره بدست آمده از شبیه‌سازی عددی به کمک کد LS-DYNA و تست‌های تجربی برای دو نوع لاینر کروی و چند جمله‌ای ارائه و مقایسه شده و نشان می‌دهد که برای هر دو لاینر کروی و چند جمله‌ای مقادیر عمق نفوذ و قطر حفره بدست آمده از دو روش، بسیار به هم نزدیک بوده و پیش‌بینی شبیه‌سازی عددی در هر دو حالت با پدیده اتفاق افتاده تطابق بسیار خوبی دارد.

در تست دوم با لاینر چند جمله‌ای، پرتابه صفحه هدف را سوراخ کرده، از آن عبور کرده که قطر حفره ایجاد شده در حدود $7/5$ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۸).



شکل ۸- نحوه نفوذ پرتابه با لاینر چند جمله‌ای.

مقایسه نتایج و بحث

در مراحل شکل‌گیری پرتابه‌های ایجاد شده از لاینر کروی و چند جمله‌ای، مشاهده می‌شود که لاینر کروی پرتابه‌ای با طول $3/23 \text{ cm}$ و قطر $3/85 \text{ cm}$ ($0/84 = L/D$) و سرعت 2500 m/s ایجاد می‌کند. در حالی‌که، لاینر چند جمله‌ای به پرتابه‌ای با طول $8/9 \text{ cm}$ و قطر

جدول ۲- مقایسه عمق نفوذ و قطر حفره از روش‌های عددی و تجربی.

قطر حفره (cm)		عمق نفوذ (cm)		پارامتر نوع لاینر
تجربی	عددی	تجربی	عددی	
۱۱/۵	۱۱	۸/۵	۸	لاینر کروی
۷/۵	۷	بیش از ۱۰	بیش از ۱۰	لاینر چند جمله‌ای

ب - تحلیل شکل‌گیری دو نوع لاینر کروی با ضخامت متغیر و چند جمله‌ای نشان می‌دهد که لاینر کروی پرتابه‌ای تویی شکل با نسبت L/D کمتر از یک و سرعت حدود 2500 m/s ایجاد می‌کند. درحالی‌که لاینر چندجمله‌ای موردنظر می‌تواند پرتابه‌ای با L/D بالاتر از ۲ و سرعت بیش از 3500 m/s ایجاد نماید که به دلیل L/D و سرعت بالاتر، برتری عملکرد لاینر چند جمله‌ای را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

الف - تحلیل انفجار خرج سرچنگی‌های EFP نشان می‌دهد که فشار ایجاد شده ناشی از انفجار که به پشت لاینر می‌رسد در حدود 30 GPa است. این فشار بسیار بالا (در مقایسه با مقاومت تسلیم لاینر مسی که حدود 64 MPa است) می‌تواند سبب سیلان لاینر گردد در حقیقت، استحکام مواد فلزی در مقابل جبهه موج انفجار قابل صرف‌نظر کردن است و می‌تواند بدون تأثیر باشد.

۶. خدارحمی، ح.، فلاحی آرزودار، ع. و لیاقت، غ. "تحلیل نفوذ در هدف‌های با ضخامت محدود"، نهمین کنفرانس مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ۱۳۸۰.

۷. خدارحمی، ح.، فلاحی آرزودار، ع. و لیاقت، غ. "عملکرد بالستیکی سرامیک‌ها در برابر نفوذ پرتابه‌های میله‌ای بلند"، نشریه علمی و پژوهشی پیام باور، دانشگاه امام حسین(ع)، شماره ۱۸، ۱۳۸۲.

8. Zukas, J.A. "High Velocity Impact Dynamics", Wiley-Interscience Pub., 1990.
9. Carleone, J. "Tactical Missile Warheads" Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 155, 1993.
10. Meyers, M.A. "Dynamic Behavior of Materials", John Wiley, New York, 1994.
11. Balagansky, I.A., Agureikin, V.A., Kobilkin, I.F., Nosenko, N.I., Naumov, V.V., Vinogradov, A.V., and Balagansky, A.I. "Acceleration Device Based on High Explosive Charge Which Contains High Modular Ceramic Tube" Int. J. Impact Eng., Vol. 22, pp. 813-823, 1999.
12. Rosenberg, Z. and Dekel, E. "On the Interaction Between Shaped Charge Jets and Confined Explosives at Normal Incidence", Int. J. Impact Eng., Vol. 23, pp. 795-802, 1999.
13. Katayama, M. and Kibe, S. "Numerical Study of the Conical Shaped Charge for Space Debris Impact", Int. J. Impact Eng., Vol. 26, pp. 357-368, 2001.
14. Molinari, J.F. "Finite Element Simulation of Shaped Charge", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 38, pp. 921-936, 2002.
15. Liu, M.B., Liu, G.R., Zong, Z., and Lam, K.Y. "Computer Simulation of High Explosive Explosion Using Smooth Particle Hydrodynamics Methodology", Computers and Fluids, Vol. 32, pp. 305-322, 2003.
16. De Chant, L.J. "An Analytical Solution for Unsteady, Inviscid Jet Formation due to Symmetric 2-D Ring Collapse", Int. J. Impact Eng., Vol. 30, pp. 685-698, 2004.
17. LSTC, LS-DYNA User Manual, Livermore Software Tech. Co., 1999.
18. LSTC, LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Tech. Co., 1999.

ج - مقایسه عمق نفوذ و قطر حفره بدست آمده از شبیه‌سازی عددی برای لاینر کروی و مقدار تجربی بدست آمده از تست تطابق بسیار خوبی نشان می‌دهد.

د - نتایج شبیه‌سازی نفوذ لاینر چند جمله‌ای و همچنین، تست تجربی پرتابه‌های حاصل از این لاینر نشان می‌دهد که پرتابه صفحه هدف را کاملاً سوراخ کرده و از آن عبور می‌کند. مقادیر عددی و تجربی بدست آمده برای قطر حفره ایجاد شده در هدف اختلاف کمی نشان می‌دهد.

ه - مقایسه عملکرد دو نوع پرتابه حاصل از لاینر کروی با ضخامت متغیر و چند جمله‌ای نشان می‌دهد که در طراحی پرتابه‌های EFP استفاده از لاینر چند جمله‌ای کارایی بالاتری دارد.

ز - مدل‌سازی و تحلیل انجام گرفته و نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی سرچنگی‌های EFP و تطابق خوب آن با نتایج تجربی اولاً بیانگر قابلیت بالای نرم افزار LS-DYNA در حل مسایل پیچیده است. ثانیاً، نشان‌دهنده توان ایجاد شده در زمینه‌های عددی و کاربرد مؤثر آن در طراحی می‌باشد.

مراجع

1. Zukas, J.A. "Fundamental of Shaped Charge", John Wiley, London, 1989.
2. Weickert, C.A. and Gallagher, P. "Penetration of Explosively Formed Projectiles", Int. J. Impact Eng., Vol. 14, pp. 809-818, 1993.
۳. خدارحمی، ح.، لیاقت، غ. و فلاحی آرزودار، ع. "کاربرد تئوری هیدرودینامیکی در طراحی موشک‌های ضد زره K.E. و زره‌های مقاوم در برابر آنها"، اولین همایش موشک‌های هدایت‌شونده ضد زره در رزم زمینی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ۱۳۷۹.
۴. خدارحمی، ح.، فلاحی آرزودار، ع. و لیاقت، غ. "تحلیل نفوذ پرتابه‌های میله‌ای بلند در هدف‌های نیمه بی‌نهایت و تعمیر آن در هدف‌های چند لایه"، نشریه فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، شماره ۶، ۱۳۸۰.
۵. خدارحمی، ح.، لیاقت، غ. و فلاحی آرزودار، ع. "بررسی تئوری هیدرودینامیکی نفوذ پرتابه‌های انرژی جنبشی بلند"، هفتمین کنفرانس مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ۱۳۷۸.