

بررسی عددی برخورد و نفوذ پرتابه صلب فولادی در اهداف چند لایه متشکل از بتن و فوم

مریم رشیدپور *

۱ - کارشناس ارشد عمران-سازه، دانشگاه غیرانتفاعی لیان .

رئیس اداره برنامه ریزی و حمل و نقل و ترافیک

چکیده

بررسی مکانیزم نفوذ پرتابه ها در اهداف بتنی در علوم نظامی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در پدیده نفوذ، بدلیل عدم دسترسی به برخی خصوصیات مواد برخورد کننده در نرخ کرنش های بسیار بالا، بررسی دقیق این پدیده بسیار پیچیده می باشد. پارامترهایی همچون جنس، خواص مکانیکی، ضخامت کل، سرعت، تعداد لایه ها و نحوه قرارگیری آنها و شرایط تکیه گاهی از جمله پارامترهای مهم هدف در فرآیند نفوذ هستند. در این مقاله فرآیند نفوذ و سوراخ شدن صفحات ساندویچی بتن- فوم تحت اثر برخورد پرتابه های استوانه ای مختلف سر تخت و سر مخروطی به صورت تحلیل عددی و توسط نرم افزار LS-Dyna بررسی شد. در این پژوهش، ۱۷ نمونه شامل هدف های با لایه بتنی با مقاومت های مشخصه ۲۵، ۳۰ و ۳۵ مگاپاسکال، و چگالی های ۲۴۰۰، ۲۴۵۰ و ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و با ضخامت های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتر، تحت نفوذ پرتابه های با قطر ۷.۵ و ۱۲ میلیمتر و نوک مخروطی و تخت متغیرهای، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدلسازی عددی نشان می دهد که با افزایش مقاومت فشاری لایه بتنی، مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش ملموسی همراه است. همچنین با افزایش قطر پرتابه، افزایش ضخامت و چگالی لایه بتنی، میزان جذب انرژی و مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش همراه است. همچنین با تغییر شکل سر پرتابه از سر مخروطی به سر تخت، سطح زیر نمودار میزان جذب انرژی هدف در فرآیند نفوذ، افزایش خواهد یافت و هدف توانایی بیشتری در مستهلک کردن انرژی پرتابه خواهد داشت و میزان نفوذ پرتابه سر مخروطی در هدف چندلایه حدود ۲.۵ برابر هدف مشابه سر تخت می باشد. کلمات کلیدی: شبیه سازی عددی نفوذ پرتابه، اهداف چندلایه بتن و فوم، ضربه، تحلیل غیرخطی.



مقدمه

نفوذ در اهداف بتنی و بتن - فوم از اهمیت ویژه ای برای محققین صنایع دفاعی و غیردفاعی برخوردار می باشد، به علت پیچیده بودن فرآیند نفوذ، اکثر مطالعات انجام گرفته در این زمینه به صورت تجربی می باشد. پرتابه جسمی است که با اعمال نیروی خارجی به حرکت در می آید و سپس تحت تأثیر گرانش و مقاومت هوا آزادانه حرکت می کند. بررسی مکانیزم نفوذ پرتابه ها در اهداف بتنی در علوم نظامی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مطالعه دقیق پدیده برخورد و نفوذ بدلیل عدم دسترسی به برخی خصوصیات مواد برخورد کننده، محدودیت هایی وجود دارد. پارامترهایی همچون جنس و خصوصیات مکانیکی هدف و پرتابه، سرعت پرتابه و شرایط تکیه گاهی از جمله پارامترهای مهم در فرآیند نفوذ هستند.

مکانیک ضربه شامل طیف برخوردهای با سرعت پایین که در بخشهای صنعتی و علمی کاربرد است تا برخوردهای سرعت بالا که در بخشهای نظامی مورد توجه است، می باشد.

نخستین بار، در سال ۱۹۶۷ تیت^۱، و در ۱۹۶۶ آلکسیوسکی^۲ به بررسی مدل یک بعدی نفوذ پرتابه ها در اجسام تخت پرداختند. در مدل اصلی تیت، تقریباً صلب فرض می گردد. [۱] در همین راستا، آزمایشات تجربی وسیعی در خصوص نفوذ پرتابه ها با دماغه های اجابو، کروی و تخت با سرعت های مختلف (از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰۰ متر بر ثانیه) در این آزمایشها مورد ارزیابی قرار گرفته است. از جمله این مطالعات میتوان به پژوهش بولسون در ۱۹۹۲ اشاره نمود. [۲] تاکنون تحقیقات بسیار مناسب و زیادی در زمینه فرآیند نفوذ در اهداف تک لایه انجام شده است؛ اما مطالعه روی اهداف چندلایه فوم-بتن بسیار محدود بوده و نمیتوان یک نتیجه جامع و کامل گرفت؛ پیشینه تحقیقات در زمینه نفوذ پرتابه در هدف به بیش از ۲۵۵ سال گذشته و بخصوص پس از جنگ جهانی دوم می رسد.

بطور کلی در تاریخچه بررسی پدیده برخورد و نفوذ سه نوع رویکرد مشخص وجود دارد که شامل استخراج روابط تجربی آزمایشگاهی، مدل های تحلیلی از فرآیند برخورد و نفوذ و تحلیل عددی.

مروری بر تحقیقات پیشین

شائو^۳ و همکاران در ۲۰۱۹ به تحلیل عددی پاسخ ضربه ای بتن با مقاومت فوق بالا که با مواد کامپوزیتی در برابر نفوذ پرتابه با دماغه گرد فولادی محافظت می شود پرداختند. [۳]

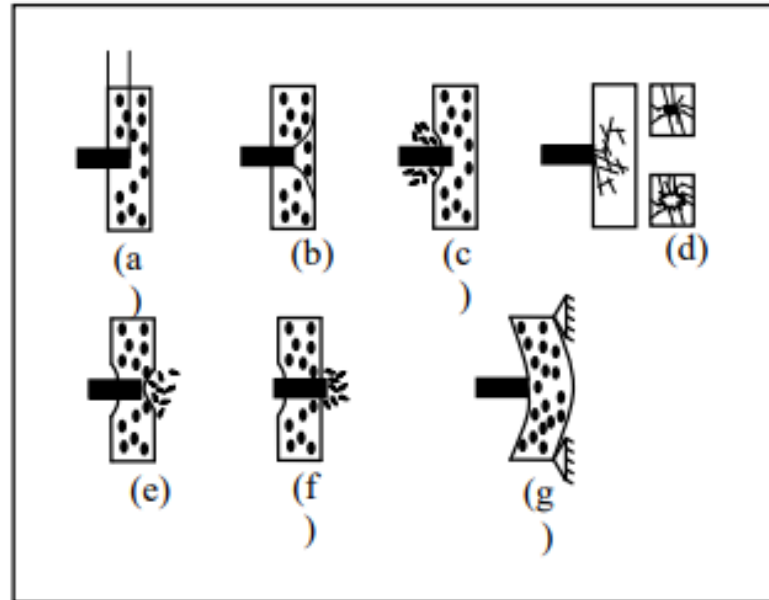
^۱ - Tate

^۲ - Alekseevskii

^۳ - Shao



لی^۴ و همکارانش در اثر برخورد پرتابه ها به اهداف بتنی را بررسی نمودند. این نفوذ در چند دسته (a) نفوذ ناقص، (b) ترک های مخروطی، (c) قلوله کنی از وجه نزدیک (d) ترک شعاعی در وجه نزدیک و دور، (e) قلوله کنی از وجه دور، (f) نفوذ کامل و (g) پاسخ کلی هدف بررسی شده است. (شکل ۱) [۴]



شکل ۱-۱ اثر برخورد پرتابه به اهداف بتنی

در این مقاله، به منظور بررسی رفتار ضربه بتن با مقاومت فوق العاده بالا (U انگلستان) محافظت شده با مواد کامپوزیت جذب انرژی سبک با سختی بالا در برابر نفوذ پرتابه به طور کامل، یک مطالعه عددی با استفاده از نرم افزار ال اس داینا، در سرعت های ضربه بین ۵۴۰ متر بر ثانیه و ۸۱۰ متر بر ثانیه انجام شده است.

ترکیبات اصلی مدل های FE مشابه نمونه های آزمایشی هستند که شامل صفحات بتن مسلح با مش سیمی فولادی (SWMRC)، ورقه های الیاف UHMWPE، ورقه های فوم آلومینیومی و انگلستان محافظت شده هستند. نتایج عددی شامل عمق نفوذ (DOP)، قطر دهانه ضربه (پوسته پوسته شده) صفحات SWMRC، آسیب موضعی و انحراف بالستیکی پرتابه ها به دست آمده و سپس با داده های تجربی مقایسه می شوند، که در آن نتایج عددی انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایش نشان می دهند. براساس مدل های FE معتبر، فرآیند نفوذ پرتابه و تکامل انرژی بین هدف و پرتابه مورد مطالعه قرار گرفته است.

^۴ - Li



علاوه بر این، یک تجزیه و تحلیل پارامتری برای بررسی تاثیر ترتیب چیدمان برای مواد کامپوزیت حاضر در DOP و مقاومت ضربه ای هدف U انگلستان تقویت شده، و همچنین انحراف بالستیک و تغییر شکل پرتابه انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان می دهد که برای هدف U مرکز افق پویی فعلی، اول، انحراف بالستیک و تغییر شکل پرتابه دو عامل مهم تاثیر گذار بر مقاومت ضربه ای هدف هستند؛ دوم، ورقه های رشته ای نقش عمده ای در انحراف بالستیک پرتابه ایفا می کنند و انرژی جنبشی ضربه پرتابه عمدتاً توسط ماتریس بتن، گره های سیمی فولادی چند لایه و چگالی های مختلف ورقه های فومی جذب می شود. شائو^۱ و همکارانش در ۲۰۱۹ به بررسی تجربی و عددی مقاومت نفوذ بتن با مقاومت فوق بالا که با گلوله های سرامیکی در معرض برخورد پرتابه محافظت می شود پرداختند. [۴]

مواد سرامیکی با سختی بالا، استحکام ذاتی بالا، چگالی پایین و پایداری ابعادی عالی به طور گسترده ای در طراحی سازه های محافظ با عملکرد بالا و سبک برای مقاومت در برابر ضربه پرتابه با سرعت بالا مورد استفاده قرار گرفته اند. به منظور بررسی قابلیت ضد نفوذ توپ های سرامیکی محافظت شده از بتن فوق قوی (U - CB انگلستان)، آزمایش های ضربه پرتابه با سرعت بالا در سرعت های برخورد 545 m/s ، 679 m/s بر ثانیه و 809 m/s بر ثانیه برای بررسی تاثیر توپ های سرامیکی، پرتابه ها و U انگلستان محافظت شده انجام شد.

نتایج تجربی نشان دهنده اثربخشی و اقتصاد توپ های سرامیکی در مقاومت در برابر ضربه پرتابه با سرعت بالا می باشد. سپس مطالعات عددی برای تولید مجدد فرآیند نفوذ پرتابه در اهداف U - CB انگلستان با کمک LS - DYNA انجام شد. براساس مدل های عددی معتبر، مقاومت در برابر ضربه و انحراف بالستیک پرتابه ها و همچنین تکامل انرژی بین پرتابه ها و اهداف، برای درک جامع عملکرد ضربه این سازه حفاظتی جدید طراحی شده تحت نفوذ پرتابه، بیشتر مورد بررسی قرار گرفت. فنگ لینگ ژانگ^۲ و همکارانش در ۲۰۲۱ به بررسی بتن با عملکرد فوق بالا در معرض ضربه پرتابه با سرعت بالا: پیاده سازی مدل K. C با در نظر گرفتن سطوح شکست و عوامل افزایش دینامیکی پرداختند.

مدل ماده K - C به طور گسترده برای پیش بینی عددی پاسخ های سازه های بتنی در برابر ضربه یا بارگذاری انفجار استفاده می شود. در ادبیات موضوع در این پژوهش، بیشتر پارامترهای منحنی تنش - کرنش K برای بتن های با مقاومت نرمال (NSC) کالبره شده اند، و بنابراین به طور مستقیم برای بتن های با عملکرد فوق بالا (UHPC) قابل اجرا نیستند. علاوه بر این، بسیاری از کارهای موجود بر روی UHPC شامل کالیبراسیون تک کاره از پارامترهای $K * C$ است، که ممکن است برای شرایطی فراتر از شرایط کالیبراسیون قابل اجرا نباشد. در این مطالعه با تمرکز بر UHPC ها، کالیبراسیون سیستماتیک سطوح شکست K - C و عوامل افزایش دینامیکی (DIFs) براساس داده های تجربی موجود در مقالات انجام شده است. دستورالعمل های کلی در مورد تعیین دیگر پارامترهای مدل نیز ارائه شده است. با پیروی از این تعیین سیستماتیک پارامترهای ماده، قابلیت پیش بینی مدل K - US C با در نظر گرفتن چندین مجموعه از داده های تجربی در مورد ضربه پرتابه با سرعت بالا (HVPI) در برابر UHPC ها، در محدوده وسیعی از خواص مواد لاشورای عالی صلح و طرح های مخلوط، جزئیات هندسی نمونه و / یا پرتابه و شرایط بارگذاری نشان داده شده است. پیش بینی های عددی خوبی از نظر عمق نفوذ و اندازه حفره به دست آمده است، که نشان می دهد که روش پیاده سازی پیشنهادی را می توان با اطمینان قابل قبولی



اتخاذ کرد، به خصوص در طول مطالعات مقدماتی که در آن داده های تجربی مربوطه محدود هستند / در دسترس نیستند.
[۵]

میرزآبایی و همکارانش در ۲۰۲۱ به بررسی رفتار نفوذ در اهداف تک و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه پرداختند. در این مقاله، به مدل سازی و تحلیل تجربی رفتار نفوذ ورق های تک لایه و چند لایه آلومینیومی، فولادی و یا ترکیبی از فولاد و آلومینیوم بر اثر ضربه پرتابه کروی صلب بصورت انجام ۶۶ آزمایش، مشتمل بر هشت نوع لایه بندی مختلف با پرتابه های در محدوده سرعت ۴۲ تا ۱۵۸ متر بر ثانیه پرداختند. این لایه بندی ها شامل ورق تک لایه آلومینیومی و فولادی با ضخامت ۲ و ۳ میلی متر، ساختار دولایه آلومینیومی و فولادی با ضخامت کلی ۲ میلی متر، ساختار سه لایه هم جنس آلومینیومی و فولادی با ضخامت کلی ۳ میلی متر و ساختارهای سه لایه غیر هم جنس آلومینیوم - فولاد - آلومینیوم و فولاد - آلومینیوم - فولاد با ضخامت کلی ۳ میلی متر بود. [۶]

در تمامی آزمایش ها، سرعت برخورد پرتابه و میزان تغییر شکل پلاستیک نمونه اندازه گیری شد. در بخش مدل سازی عددی، از شبکه عصبی از نوع دسته بندی گروهی داده ها برای ارائه یک مدل ریاضی بر مبنای اعداد بی بعد جهت پیش بینی بیشینه خیز دائمی ساختارهای تک لایه و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه صلب استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد که توافق خوبی بین مدل ارائه شده با مقادیر تجربی برقرار است به طوری که ۹۴٪ از نقاط در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار گرفتند.

سیاح بادخور و همکارانش در ۱۳۹۸ به بررسی مدل های نفوذ پرتابه در اهداف فلزی و سرامیکی پرداختند. آنها پدیده نفوذ پرتابه در اهداف را در سه بخش بررسی کردند که مشتمل بر مدل های نفوذ در فلزها، مدل های نفوذ با اعداد بی بعد و تحلیل نفوذ پرتابه در سرامیک ها می باشد. معادله پانسلت، تئوری هیدرودینامیک ساده و اصلاح شده، تئوری رجت-ایپسون، تیت-الکسویسکی، تئوری انبساط حفره، معادلات راوید-بادنر، والکر-اندرسون، و مدل های شبیه سازی در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند. در بخش دیگر این پژوهش مدل های بی بعد برای نفوذ پرتابه و در بخش سوم، مدل های تحلیلی نفوذ در اهداف ترکیبی سرامیک - فلز مورد بررسی قرار گرفت. [۷]

تعاریف و مفاهیم پایه

- پرتابه: به جسمی گفته میشود که ضمن نفوذ به هدف، باعث تخریب آن میگردد، مانند بمب و خمپاره و گلوله های توپ و غیره.

- پرتابه میله ای بلند: پرتابه ای است با نسبت طول به قطر بیشتر از یک .

- نسبت ظاهری پرتابه: عبارتست از نسبت طول به قطر پرتابه.

- هدف: جسمی که مورد اصابت پرتابه قرار میگیرد.

- هدف نیمه بینهایت: هدفی است که تنها از یک طرف تا بینهایت گسترده شده است.

- حفره: چاله ایجاد شده در هدف بوسیله نفوذ پرتابه.

- عمق نفوذ: طول حفره ناشی از نفوذ پرتابه در راستای حرکت در عمق هدف.



پدیده برخورد و نفوذ

نخستین تحقیقات در زمینه پدیده نفوذ دینامیکی، به قرن هجدهم و نوزدهم میلادی مربوط است. نخستین تئوری نفوذ در سالهای ۱۷۸۸ - ۱۸۶۷ میلادی توسط جی.وی. پونسله ارائه شد. [۲]
مطالعات گسترده ای در زمینه پدیده برخورد و نفوذ صورت گرفته است. در ادامه، مباحثی همچون بارگذاری دینامیکی و ضربه ای شرح داده خواهد شد.

بارگذاری دینامیکی و ضربه ای

تفاوت بارگذاری استاتیکی با بارگذاری دینامیکی و ضربه ای در سرعت اعمال بار می باشد. بارهای دینامیکی به دو صورت گذرا و ضربه ای تقسیم بندی میشود. در بارگذاری دینامیکی گذرا، محدوده زمانی اعمال بار کوتاه است، در حالی که در بارگذاری ضربه ای، زمان اعمال بار بسیار کوتاه تر از بارگذاری دینامیکی گذرا است. به عبارت دیگر میتوان گفت چنانچه زمان اعمال بار از سه برابر پریود طبیعی بیشتر باشد، بار استاتیکی، و اگر کمتر باشد، بارگذاری دینامیکی است.

امواج تنش در اهداف به سه دسته منتقل میشود:

- موج الاستیک

- موج پلاستیک

- موج شک

اگر سطح تنش در جسم از مقاومت تسلیم ماده کمتر باشد، تنها یک موج الاستیک با سرعت C در جسم به وجود می آید

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

(۱)

در رابطه بالا E مدول الاستیسیته و ρ چگالی جسم می باشد.

اگر مقدار تنش وارده بر هدف از مقاومت تسلیم ماده بیشتر باشد، علاوه بر موج الاستیک اولیه، یک موج تنش پلاستیک

(به صورت تغییر فرمهای پلاستیک) با سرعت کمتری در جسم ایجاد می شود. [۱]

انتشار امواج ناشی از تنش ضربه ای در اهداف باعث بروز شکست هایی در آن می شود.

طبقه بندی مسائل نفوذ

مسائل مربوط به برخورد و نفوذ را میتوان بر حسب زاویه برخورد، شکل دماغه، نسبت طول به قطر پرتابه، ضخامت هدف

و سرعت برخورد در دسته های زیر طبقه بندی نمود:

الف: زاویه برخورد: - عمودی - مایل

ب: شکل دماغه: نیمکره - مخروطی - اجایو - تخت

ج: نسبت طول به قطر پرتابه: - بلند ($L/D > 1$) - کوتاه ($L/D \approx 1$)



د: ضخامت هدف :

هدف نیمه بینهایت: هدف خیلی ضخیمی که سطح پشتی آن هیچ تاثیری در فرآیند نفوذ ندارد
 هدف ضخیم : هدفی که سطح پشتی آن فقط پس از نفوذ به المان تاثیر میگذارد
 هدف متوسط : هدفی که سطح پشتی آن در تمام طول فرآیند تاثیر قابل ملاحظه ای دارد
 هدف نازک: هدفی است که تغییرات تنش و گرادیان تغییر شکل در ضخامت وجود نداشته باشد) معمولاً وقتی ضخامت هدف از قطر پرتابه کوچکتر است هدف نازک تلقی میشود .

ه : سرعت برخورد

دسته بندی بر اساس اندازه سرعت برخورد از مهمترین عوامل موثر در نوع رفتار اجسام برخورد کننده بوده و محدوده وسیعی از مسائل نفوذ را تحت پوشش قرار میدهد معمولترین محدوده سرعت، برای را پرتابه هایی است که با اسلحه شلیک میشوند و سرعتی بین ۵۰۰ تا ۱۳۰۰ m/s دارند سرعت ۲۵ m/s تا ۵۰۰ m/s که سرعت های پایین نامیده میشوند بیستر توسط تفنگ های بادی یا سایر تجهیزات آزمایشگاهی ایجاد میگردد. سرعت کمتر از ۲۵ m/s معمولاً با سقوط آزاد اجسام ایجاد میشود و سرعت های ۱۳۰۰ تا ۲۰۰۰ m/s توسط ترکش سر جنگیها و اسلحه های خاص ایجاد میشوند نهایتاً سرعت های بالاتر از ۳۰۰۰ m/s را که مافوق سرعت مینامند توسط تفنگ های گازی یا سلاح های خرج گود یا شهاب سنگ ها ایجاد می شود.

جدول ۱- دسته بندی پدیده برخورد بر اساس محدوده های سرعت

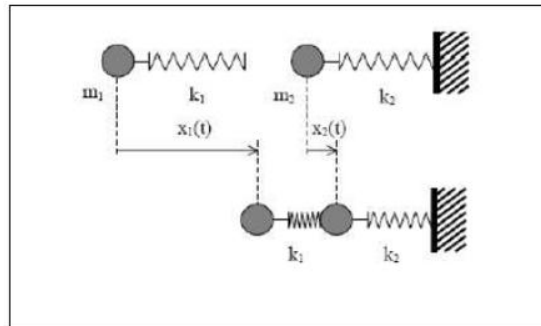
نوع رفتار	محدوده سرعت (m/s)	نوع سرعت
انتشار امواج الاستیک	۰ - ۱۰۰	سرعت های پایین (Low velocity)
انتشار امواج الاستوپلاستیک	۱۰۰ - ۱۰۰۰	سرعت های متوسط (Medium velocity)
انتشار امواج الاستوپلاستیک یا رفتار هیدرودینامیک	۱۰۰۰ - ۳۰۰۰	سرعت های بالا (High velocity)
رفتار هیدرودینامیک	بیشتر از ۳۰۰۰	سرعت های بسیار بالا (Hyper velocity)

برخورد نرم و برخورد سخت

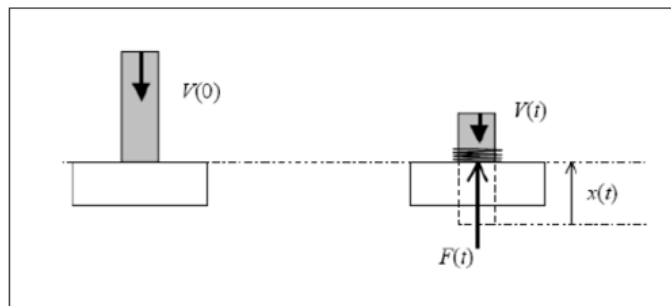
دادویل^۵ و مالکوت^۶ [۴] پدیده برخورد دو جرم را، زمانی که یکی دارای سرعت اولیه است و دیگری در حال سکون، به کمک یک سیستم شامل دو جرم و دو فنر (شکل ۲-۱) به دو حالت نرم و سخت شبیه سازی و تعریف نمودند. این حالت برخورد در مورد هدف ثابتی که تحت اصابت یک پرتابه قرار میگیرد صدق می کند.

^۵ - Daudeville

^۶ - Malecot

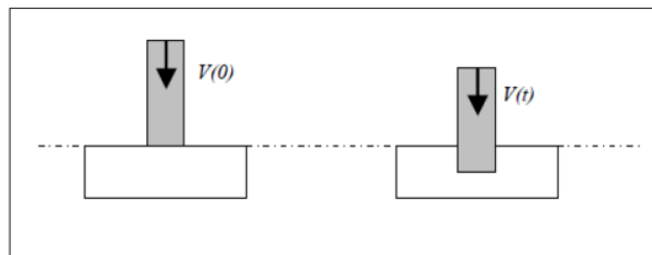


شکل ۱- سیستم دوجرم و دو فنر برای شبیه سازی برخورد نرم و سخت [۴]
 اگر مطابق شکل ۲-، تغییر شکل فنر k_1 بیش از k_2 باشد تغییر شکل پرتابه بیش از تغییر شکل هدف خواهد بود و برخورد نرم نامیده میشود.



شکل ۲ برخورد نرم [۴]

اگر مطابق شکل ۲-، تغییر شکل فنر k_1 کمتر از k_2 باشد پرتابه صلب بوده و انرژی جنبشی آن بصورت کلی یا جزئی از طریق تغییر شکل هدف جذب میشود که برخورد سخت نامیده میشود.



شکل ۳- برخورد سخت [۴]

یافته های پژوهش



هدف اصلی این پژوهش مطالعه بررسی عددی برخورد و نفوذ پرتابه صلب فولادی در اهداف چند لایه متشکل از بتن و فوم می باشد. جهت سنجی نتایج از پژوهش خداحمی و همکارانش با موضوع مطالعه آزمایشگاهی نفوذ پرتابه ها در اهداف بتن پرمقاومت الیافی استفاده خواهیم نمود. [۲۰]

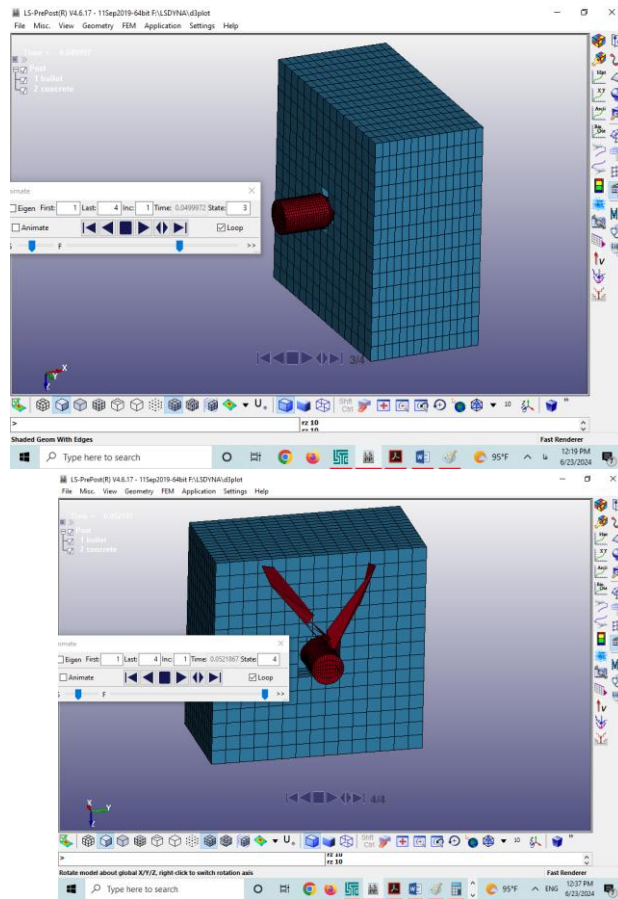
گلوله بکارگیری شده در این مدلسازی با دماغه اجایو، قطر ۷.۶۲ میلیمتر، دارای مرمی با هسته فولادی با وزن مخصوص ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سرعت برخورد ۸۳۰ متر بر ثانیه می باشد.

در شکل ۴-۱ مشخصات پرتابه مورد استفاده در نمونه آزمایشگاهی ارائه شده است.



شکل ۴- مشخصات پرتابه مورد استفاده در نمونه آزمایشگاهی

نمونه بتنی مورد استفاده در تست آزمایشگاهی نیز مکعب ۱۵ در ۱۵ سانتیمتری با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۴۵۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع (نمونه NF) می باشد. نمونه مدلسازی در نرم افزار LS-DYNA نیز در شکل ۴-۲ ارائه شده است.



شکل ۵- نمونه مدل سازی در نرم افزار LS-DYNA

نتایج مقایسه تحلیل عددی و نمونه آزمایشگاهی مقاله مرجع [۲۰] در جدول زیر خلاصه شده است. در این جدول، پارامترهای عمق نفوذ (P_d)، کمینه و بیشینه قطر حفره (d_1, d_2)، قطر حفره معادل (D_{eq}) مورد مقایسه قرار گرفته است. عمق نفوذ عبارتست از فاصله بین سطح نمونه تا عمیق ترین نقطه ایجادشده به وسیله ی پرتابه و قطر حفره معادل از رابطه زیر بدست می آید: [۲۰]

$$D_{eq} = \sqrt{(d_1 \cdot d_2)}$$

جدول ۲-مقایسه نتایج تحلیل عددی و نمونه آزمایشگاهی مقاله مرجع [۲۰]

Model	P_d (mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	D_{eq} (mm)
Analysis (LS-DYNA)	۶۰	۱۱۰	۱۲۰	۱۱۵
Experimental Result[Ref.۲۰]	۶۷	۱۱۶	۱۳۲	۱۲۴
Error %	۱۰.۴٪	۵.۱٪	۹٪	۷.۳٪



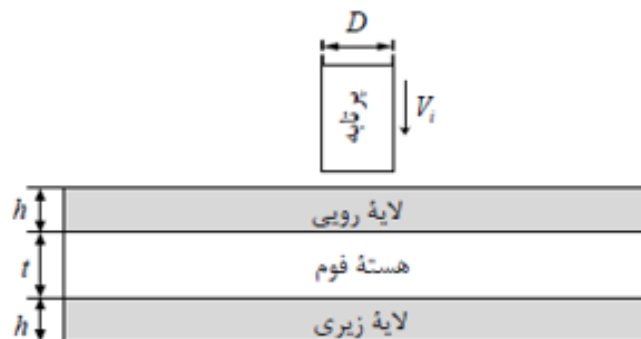
بررسی جدول مقایسه نتایج تحلیل عددی و نمونه آزمایشگاهی مقاله مرجع [۲۰] نشان از قابل قبول بودن روش عددی بکارگیری شده در این پژوهش دارد.

نتایج تحلیل

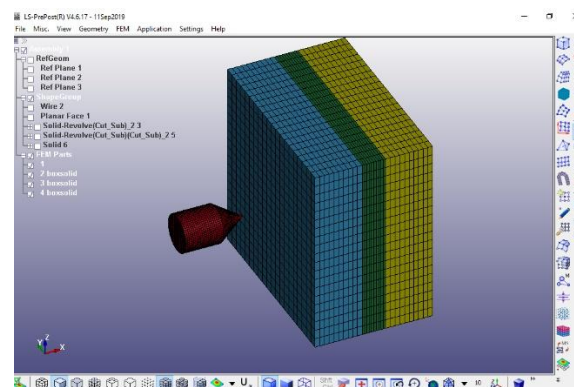
در این مقاله فرآیند نفوذ و سوراخ شدن صفحات ساندویچی بتن- فوم تحت اثر برخورد پرتابه های استوانه ای مختلف سر تخت سر و سر مخروطی به صورت تحلیل عددی و توسط نرم افزار LS-Dyna بررسی شده است. در نرم افزار LS-Dyna مدل های جانسون هلمکویست و جیکن روپرت برای شبیه سازی بتن استفاده می شود. در ادامه مفاهیم نفوذ پرتابه در اهداف بررسی خواهد شد. از پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش، مقایسه سرعت ورودی و خروجی پرتابه نسبت به هدف تحت اثر برخورد پرتابه می باشد.

مدلسازی

شکل شماتیک پانل بتن-فوم مورد استفاده در این پژوهش در زیر نشان داده شده است. (شکل های ۴-۳ و ۴-۴). در این شکل، لایه رویی و زیرین از جنس بتن و هسته از جنس فوم می باشد. پرتابه نیز استوانه ای با قطر D و سرعت اولیه برخورد V_i و همچنین سرعت خروج پرتابه از هدف بصورت V_{ro} در نظر گرفته شده است.



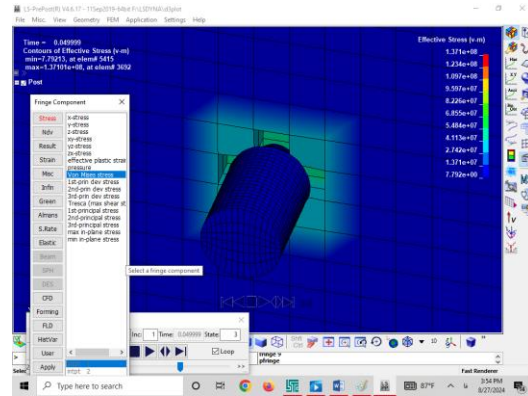
شکل ۶- برخورد پرتابه به پانل ساندویچی



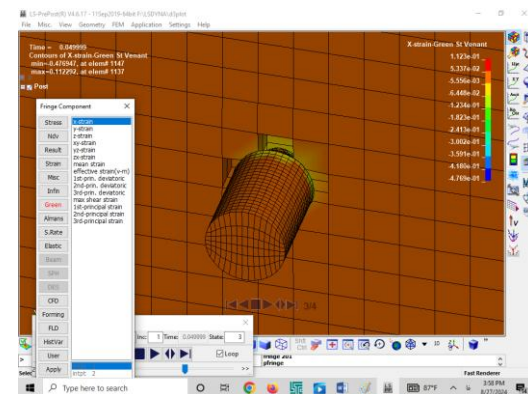
شکل ۷- نمونه مدل برخورد پرتابه به هدف ساندویچی بتن-فوم-بتن



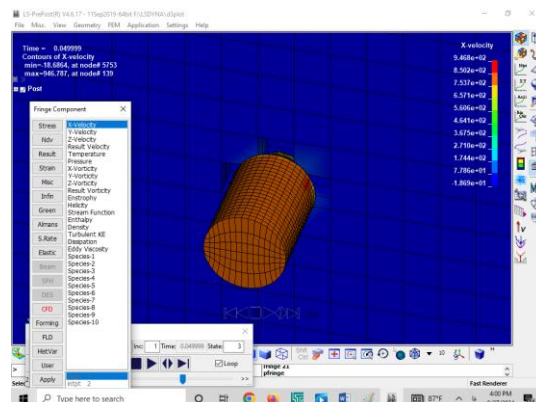
با تعیین انرژیهای جذب شده توسط پانل ساندویچی طی فرآیند نفوذ پرتابه و استفاده از موازنه انرژی سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده پرتابه محاسبه میگردد از ویژگیهای مدل، تحلیلی بررسی اثرات شکل پرتابه و سادگی معادلات حاکم و روش حل مسئله میباشد به نحوی که با سادگی معادلات نتایج مدل هم خوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد.



(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۸- وضعیت توزیع تنش فون-میسز(الف) توزیع کرنش محوری(ب) تغییر سرعت محوری (ج) حین

برخورد پرتابه به هدف ساندویچی بتن-فوم-بتن

در طی فرآیند نفوذ پرتابه درهدف، با توجه به جنس هدف و پارامترهای هندسی پرتابه، قسمتی از انرژی جنبشی اولیه پرتابه توسط هدف جذب میشود در واقع کاهش انرژی جنبشی پرتابه (با فرض صلب بودن پرتابه) صرف تغییر شکل هدف و افزایش انرژی کرنشی آن می شود.

فرضیات در نظر گرفته شده برای ارائه مدل تحلیلی در این پژوهش عبارتند از:

- صلب بودن پرتابه در طی فرآیند نفوذ

- نفوذ کامل دماغه ی سر مخروطی در هدف

مشخصات اهداف مورد استفاده در مدلسازی

در جدول زیر مشخصات اهداف مورد استفاده (فوم و بتن های با ضخامت و مقاومت متفاوت) در مدل عددی ارائه شده است. منظور از رده بتن، مقاومت مشخصه بتن بر حسب مگاپاسکال می باشد. پرتابه مورد استفاده در این بخش از پژوهش بصورت سرمخروطی و سرتخت می باشد.

جدول ۳- مشخصات مدل های پژوهش

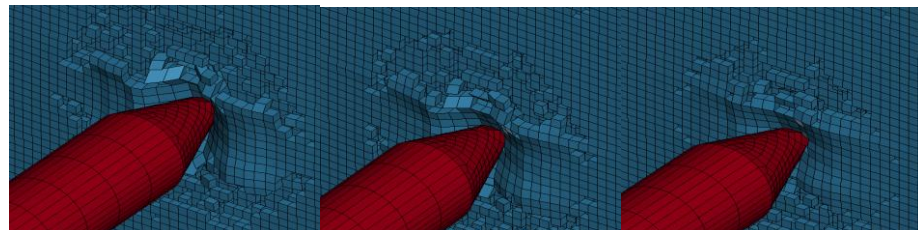
مدل	لایه ها	جنس لایه	چگالی هدف (Kg/m ^۳)	ضخامت لایه هدف (mm)	قطر پرتابه (mm)	نوع پرتابه
M۱	لایه فوقانی و تحتانی	بتن رده C۳۰	۲۴۰۰	۳۰	۷.۵	سرمخروطی
	لایه میانی	فوم PVC	۱۳۰	۲۵		
M۲	لایه فوقانی و تحتانی	بتن رده C۲۵	۲۴۰۰	۳۰	۷.۵	سرمخروطی
	لایه میانی	فوم PVC	۱۳۰	۲۵		
M۳	لایه فوقانی و تحتانی	بتن رده C۳۰	۲۴۰۰	۲۰	۷.۵	سرمخروطی
	لایه میانی	فوم PVC	۱۳۰	۲۵		
M۴	لایه فوقانی و تحتانی	بتن رده C۳۰	۲۴۰۰	۱۰	۷.۵	سرمخروطی
	لایه میانی	فوم PVC	۱۳۰	۲۵		
M۵	لایه فوقانی و تحتانی	بتن رده C۳۰	۲۵۰۰	۳۰	۷.۵	سرمخروطی
	لایه میانی	فوم PVC	۱۳۰	۲۵		
M۶	لایه فوقانی و تحتانی	بتن رده C۲۵	۲۵۰۰	۳۰	۷.۵	سرمخروطی
	لایه میانی	فوم PVC	۱۳۰	۲۵		
M۷	لایه فوقانی و تحتانی	بتن رده C۳۰	۲۴۵۰	۳۰	۷.۵	سرمخروطی

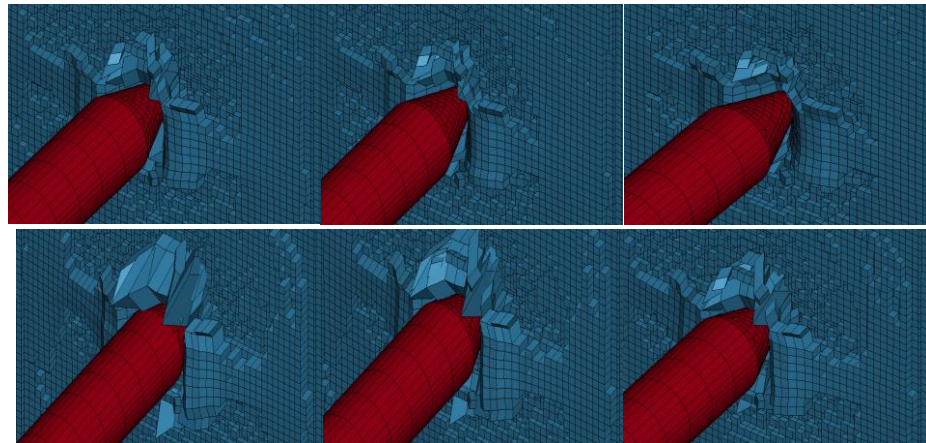


		۲۵	۱۳۰	فوم PVC	لایه میانی	
سرمخروطی	۷.۵	۳۰	۲۴۰۰	بتن رده C۳۵	لایه فوقانی و تحتانی	M۸
		۲۵	۱۳۰	فوم PVC	لایه میانی	
سرمخروطی	۱۲	۳۰	۲۴۰۰	بتن رده C۳۰	لایه فوقانی و تحتانی	M۹
		۲۵	۱۳۰	فوم PVC	لایه میانی	
سرتخت	۷.۵	۳۰	۲۴۰۰	بتن رده C۳۰	لایه فوقانی و تحتانی	M۱۰
		۲۵	۱۳۰	فوم PVC	لایه میانی	
سرتخت	۱۰	۳۰	۲۴۰۰	بتن رده C۳۰	لایه فوقانی و تحتانی	M۱۱
		۲۵	۱۳۰	فوم PVC	لایه میانی	
سرتخت	۱۵	۳۰	۲۴۰۰	بتن رده C۳۰	لایه فوقانی و تحتانی	M۱۲
		۲۵	۱۳۰	فوم PVC	لایه میانی	
سرتخت	۱۵	۶۰	۲۴۰۰	بتن رده C۳۰	لایه فوقانی و تحتانی	M۱۳
		۲۵	۱۳۰	فوم PVC	لایه میانی	
سرمخروطی	۱۵	۶۰	۲۴۰۰	بتن رده C۳۰	لایه فوقانی و تحتانی	M۱۴
		۲۵	۱۳۰	فوم PVC	لایه میانی	
سرمخروطی	۷.۵	۲۵	۱۳۰	فوم PVC	لایه فوقانی و تحتانی	M۱۵
		۴۰	۲۴۰۰	بتن رده C۳۰	لایه میانی	
سرمخروطی	۷.۵	۲۵	۱۳۰	فوم PVC	لایه فوقانی و تحتانی	M۱۶
		۶۰	۲۴۰۰	بتن رده C۳۰	لایه میانی	
سرمخروطی	۷.۵	۲۵	۱۳۰	فوم PVC	لایه فوقانی و تحتانی	M۱۷
		۸۰	۲۴۰۰	بتن رده C۳۰	لایه میانی	

تحلیل نتایج نفوذ و گسترش ترک و کرنش در فرآیند نفوذ پرتابه در لایه بتنی

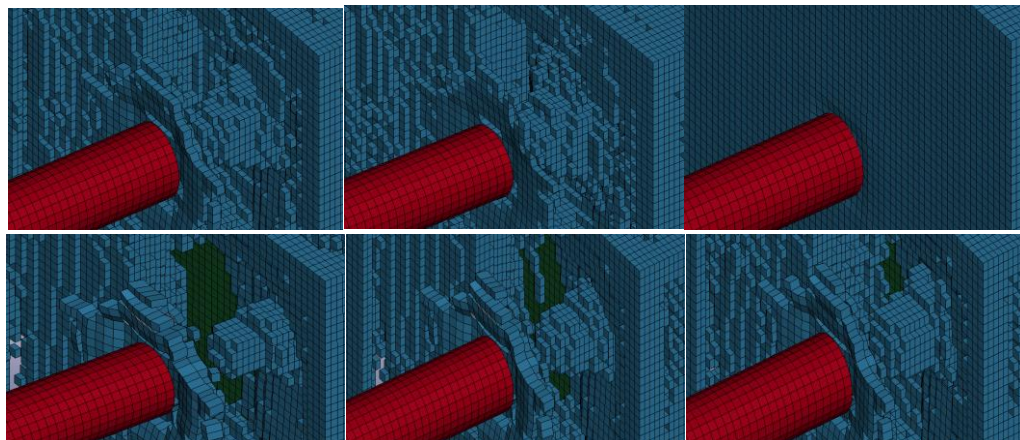
نتایج گسترش ترک در اطراف ناحیه نفوذ را در شکل ۹ (برای مدل M۱) میتوان مشاهده نمود

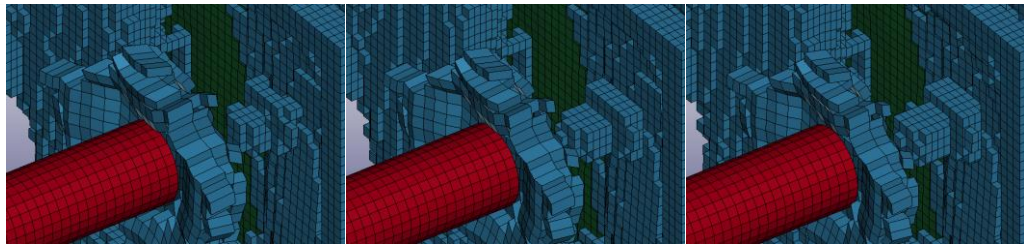




شکل ۹ مراحل گسترش ترک در لایه بتنی رویه در فرآیند نفوذ پرتابه سرمخروطی (مدل M_1)

همچنین از این شکل پیداست که شکست شعاعی در لایه بتنی رخ می دهد. شکست شعاعی معمولا در اجسام تردی مثل بتن که استحکام کششی آنها از استحکام فشاری کمتر است، اتفاق می افتد. همچنین در این وضعیت پدیده خردشدگی رخ می دهد. این شکست در اثر برخورد پرتابه ها با اهداف بتنی ایجاد میشود و ترکشهای ایجاد شده در اثر شکست هدف، خود میتواند مانند پرتابه عمل کرده و در هدفهای دیگری نفوذ کند. همانطور که از شکل ۹ قابل مشاهده می باشد، حین فرآیند نفوذ پرتابه سرمخروطی در رویه بتنی، ابتدا ترک بصورت دایره ای در اطراف ناحیه نفوذ (با قطری تقریبا معادل ۲ برابر قطر پرتابه) گسترش یافته، سپس نواحی مجاور ناحیه نفوذ دچار تخریب کلی میگردد. در ادامه با تداوم روند نفوذ، شعاع ناحیه ترک خوردگی بزرگتر شده و تنها نواحی نزدیک مرکز تخریب بصورت کلی قلوه کن می شود و نواحی دورتر از مرکز فقط بصورت سطحی ترک میخورد. همچنین در بررسی فرآیند نفوذ پرتابه سرتخت در رویه بتنی، مطابق شکل ۱۰، گسترش ترک بصورت نامنظم در ناحیه ای گسترده تر در اطراف ناحیه نفوذ رخ داده، با تداوم روند نفوذ، شعاع ناحیه ترک خوردگی بزرگتر شده و کل ناحیه ترک خورده قلوه کن می شود.

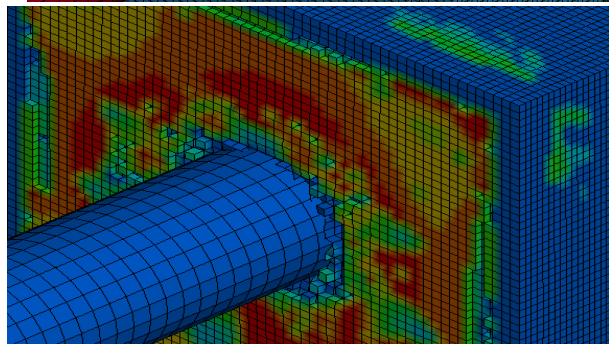
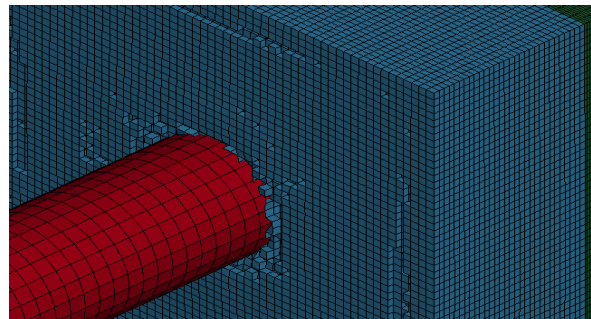




شکل ۱۰- مراحل گسترش ترک در لایه بتنی رویه در فرآیند نفوذ پرتابه سرتخت (مدل M۱۰)

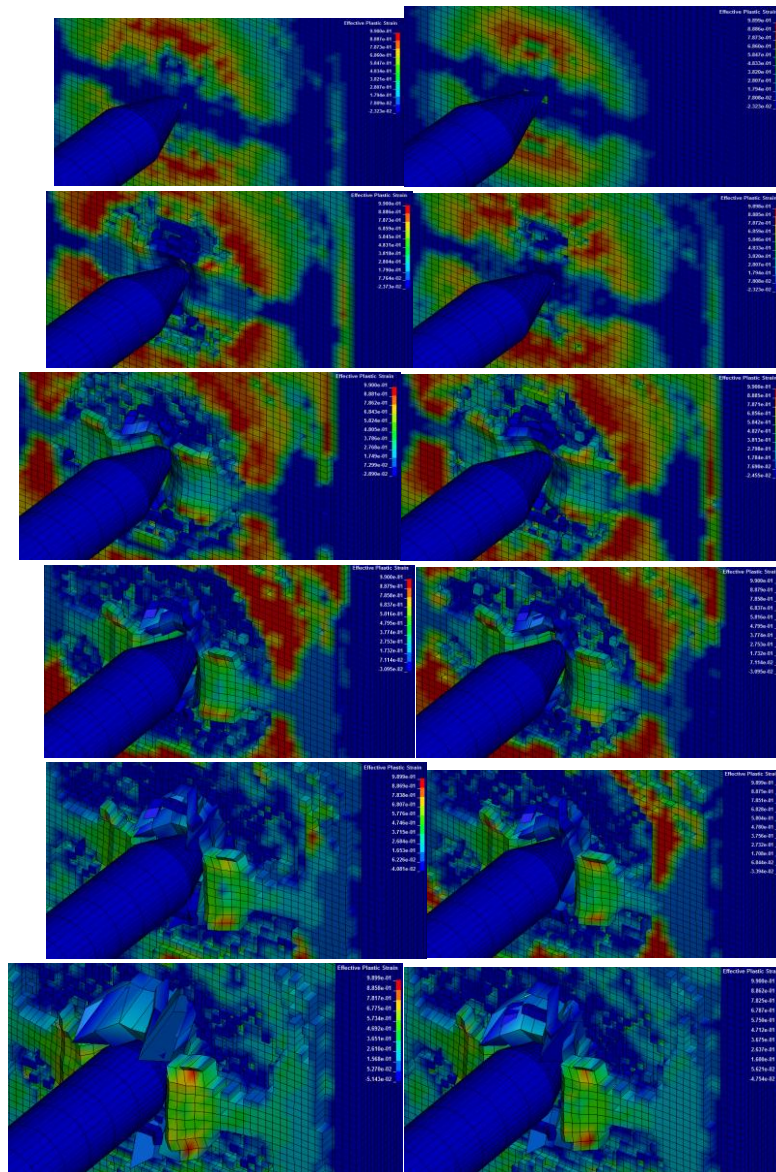
حین برخورد پرتابه سرتخت به رویه بتنی هدف، پدیده پلاگینگ در حین نفوذ رخ می دهد. در این وضعیت، در اثر برخورد پرتابه با دماغه تخت با هدف نسبتاً سخت و ضخامت در حدود قطر پرتابه، قسمتی از هدف به نام پالگ، تحت تنشهای برشی جدا شده و همراه پرتابه به سمت جلو پرتاب میگردد.

تحلیل مراحل گسترش ترک در لایه بتنی رویه در فرآیند نفوذ پرتابه سرتخت (مدل M۱۲) نشان می دهد که با دوبرابر شدن قطر پرتابه (از ۷.۵ به ۱۵ میلیمتر) مطابق شکل ۴-۱۱، محدوده ترک محدودتر شده و عمق ترک کاهش ملموسی خواهد داشت. همچنین کرنش پلاستیک نیز کاهش چشمگیری از خود نشان میدهد.

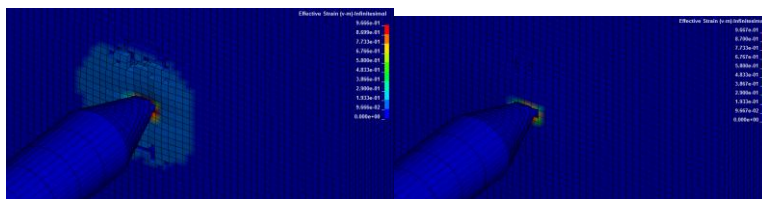


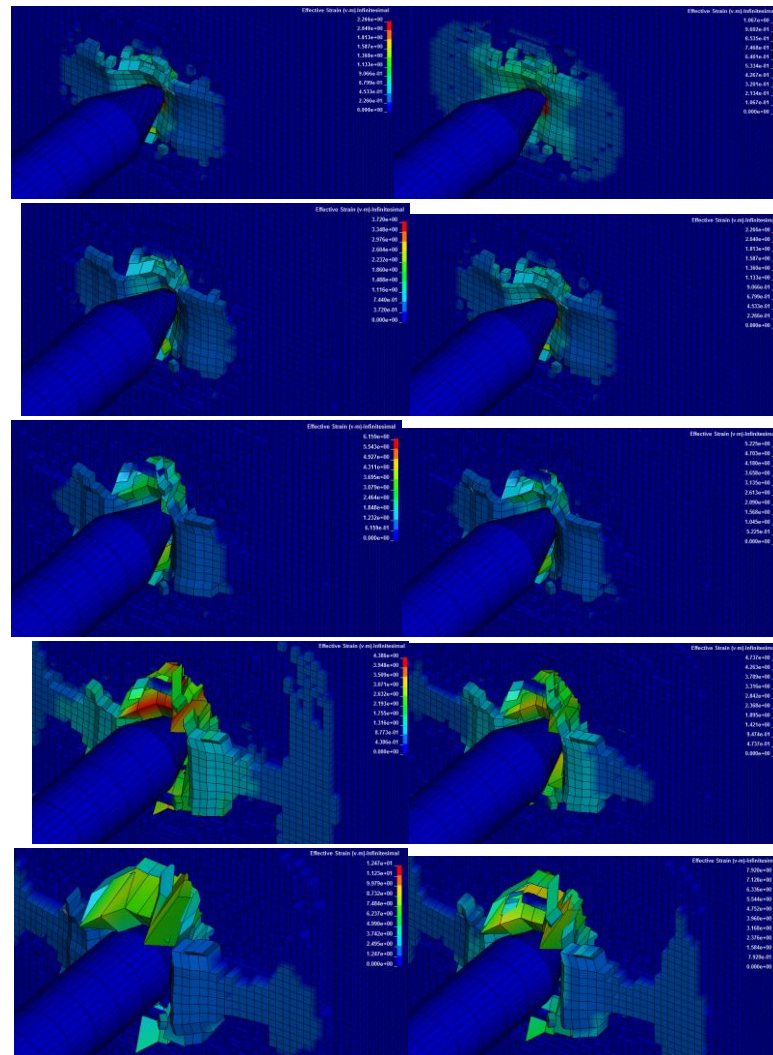
شکل ۱۱ مراحل گسترش ترک در لایه بتنی رویه و کانتور گسترش کرنش پلاستیک در فرآیند نفوذ پرتابه سرتخت (مدل M۱۲)

همچنین نتایج کانتور گسترش کرنش پلاستیک و کانتور گسترش کرنش موثر در رویه بتنی (effective strain) در فرآیند نفوذ پرتابه را میتوان در شکلهای ۱۲ و ۱۳ مشاهده نمود.



شکل ۱۲ کانتور گسترش کرنش پلاستیک در رویه بتنی (مدل M^2)





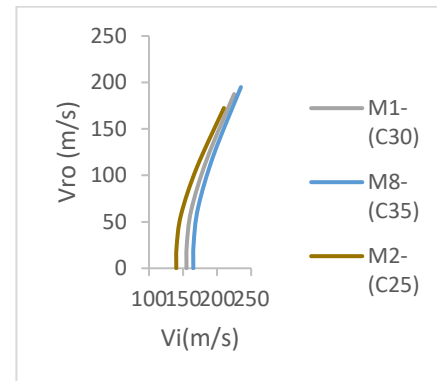
شکل ۱۳ کانتور گسترش کرنش موثر در رویه بتنی (effective strain) (مدل M^o)

همانطور که از بررسی شکل های کانتور گسترش کرنش در رویه بتنی قابل مشاهده است، وضعیت کرنش بحرانی بصورت شعاعی در لایه بتنی گسترش می یابد. به تدریج با افزایش عمق نفوذ پرتابه در هدف بتنی، کرنش در نواحی کناری ناحیه نفوذ نیز روند بحرانی خواهد داشت که منجر به بروز پدیده خردشدگی در اطراف ناحیه نفوذ میگردد. پدیده خردشدگی در ناحیه ای به شعاع تقریبی دوبرابر شعاع پرتابه در هدف بروز می کند و در نواحی اطراف، تنها پدیده گسترش کرنش قابل رویت است.



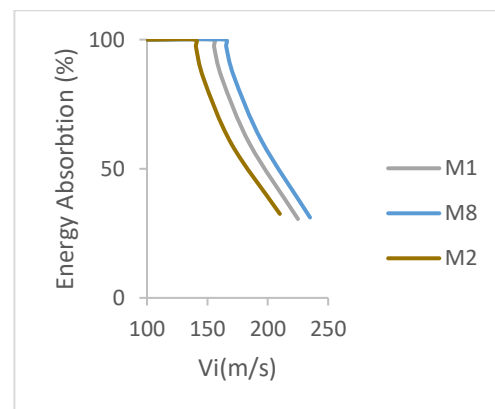
نتایج تحلیل عددی

در این مدل سازی، تاثیر پارامترهای مختلف از جمله، مقاومت، کیفیت، چگالی و ضخامت لایه بتنی و قطر و شکل سر پرتابه بر ارتباط بین سرعت ورودی پرتابه به هدف (V_i) در مقابل سرعت باقیمانده خروجی پرتابه از هدف (V_{ro}) مورد ارزیابی قرار گرفته است. ابتدا به مطالعه تاثیر مقاومت لایه بتنی، در فرآیند نفوذ پرتابه در هدف ساندویچی خواهیم پرداخت.



شکل ۱۴- تاثیر مقاومت لایه بتن، در فرآیند نفوذ پرتابه در هدف ساندویچی

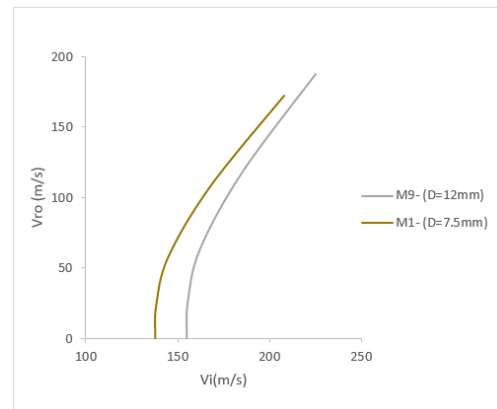
بررسی نمودار تاثیر مقاومت لایه بتن، در فرآیند نفوذ پرتابه در هدف ساندویچی نشان می دهد که با افزایش مقاومت فشاری لایه بتنی، مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش ملموسی همراه است. بطور مثال، در پرتابه ای با سرعت برخورد اولیه ۲۰۰ متر بر ثانیه، با افزایش مقاومت فشاری لایه بتنی از ۲۵ تا ۳۵ مگاپاسکال، سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش ۲۰ درصدی مواجه می باشد. همین روند در نمودار درصد جذب انرژی پرتابه توسط هدف نسبت به سرعت ورودی پرتابه، در مطالعه تاثیر مقاومت لایه بتنی در فرآیند نفوذ، قابل مشاهده می باشد. به نحوی که با افزایش مقاومت فشاری لایه بتنی هدف، سطح زیر نمودار میزان جذب انرژی هدف در فرآیند نفوذ پرتابه، افزایش خواهد یافت.





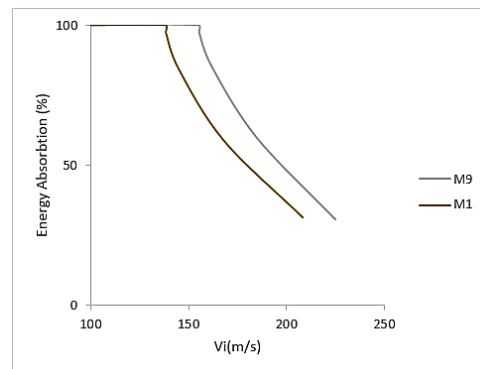
شکل ۱۵- نمودار درصد جذب انرژی پرتابه توسط هدف نسبت به سرعت ورودی پرتابه، در مطالعه تاثیر مقاومت لایه بتنی در فرآیند نفوذ

در ادامه به مطالعه تاثیر قطر پرتابه، در فرآیند نفوذ آن در هدف ساندویچی خواهیم پرداخت.



شکل ۱۶- تاثیر قطر پرتابه، در فرآیند نفوذ آن در هدف ساندویچی

بررسی نمودار تاثیر قطر پرتابه، در فرآیند نفوذ آن در هدف ساندویچی نشان می دهد که با افزایش قطر پرتابه، مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش همراه است. بطور مثال، در پرتابه ای با سرعت برخورد اولیه ۲۰۰ متر بر ثانیه، با افزایش قطر پرتابه از ۷.۵ به ۱۲ میلیمتر، سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش حدود ۸ درصدی مواجه می باشد. همین روند در نمودار درصد جذب انرژی پرتابه توسط هدف نسبت به سرعت ورودی پرتابه، در مطالعه تاثیر قطر پرتابه در فرآیند نفوذ در هدف چندلایه، قابل مشاهده می باشد. به نحوی که با افزایش قطر پرتابه، سطح زیر نمودار میزان جذب انرژی هدف در فرآیند نفوذ پرتابه، افزایش خواهد یافت و هدف توانایی بیشتری در مستهلک کردن انرژی پرتابه خواهد داشت.

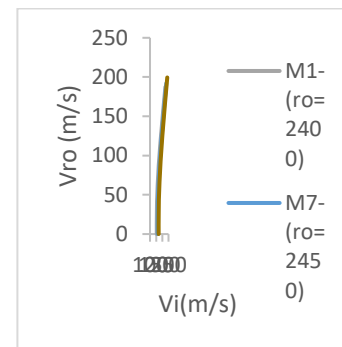




شکل ۱۷- نمودار درصد جذب انرژی پرتابه توسط هدف نسبت به سرعت ورودی پرتابه، در مطالعه تاثیر قطر

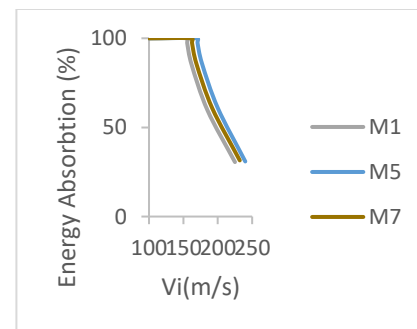
پرتابه در فرآیند نفوذ در هدف چندلایه

در ادامه به مطالعه تاثیر چگالی لایه بتنی، در فرآیند نفوذ پرتابه در هدف ساندویچی خواهیم پرداخت.



شکل ۱۸- تاثیر چگالی لایه بتنی، در فرآیند نفوذ پرتابه در هدف ساندویچی

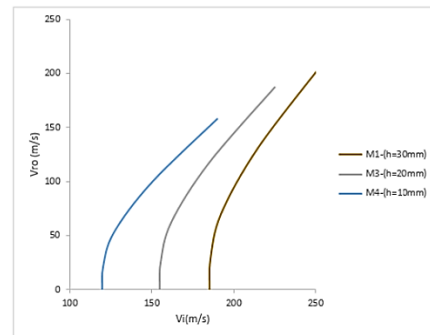
بررسی نمودار چگالی لایه بتنی، در فرآیند نفوذ پرتابه در هدف ساندویچی نشان می دهد که با افزایش چگالی لایه بتنی، مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش همراه است. بطور مثال، در پرتابه ای با سرعت برخورد اولیه ۲۰۰ متر بر ثانیه، با افزایش چگالی لایه بتنی از ۲۴۰۰ به ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش حدود ۵ درصدی مواجه می باشد. همین روند در نمودار درصد جذب انرژی پرتابه توسط هدف نسبت به سرعت ورودی پرتابه، در مطالعه تاثیر چگالی لایه بتنی در فرآیند نفوذ پرتابه در هدف چندلایه، قابل مشاهده می باشد. به نحوی که با افزایش چگالی لایه بتنی، سطح زیر نمودار میزان جذب انرژی هدف در فرآیند نفوذ پرتابه، افزایش خواهد یافت و هدف توانایی بیشتری در مستهلک کردن انرژی پرتابه خواهد داشت.



شکل ۱۹- نمودار درصد جذب انرژی پرتابه توسط هدف نسبت به سرعت ورودی پرتابه، در مطالعه تاثیر شکل چگالی لایه

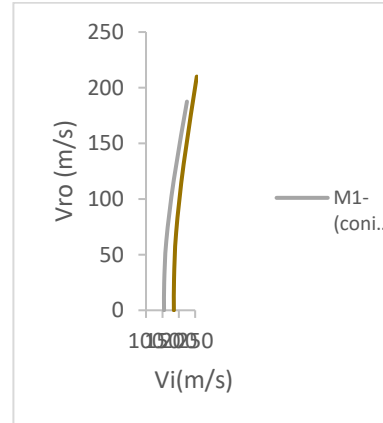
بتنی در فرآیند نفوذ

در ادامه به مطالعه تاثیر ضخامت لایه بتنی، در فرآیند نفوذ پرتابه در هدف ساندویچی خواهیم پرداخت.

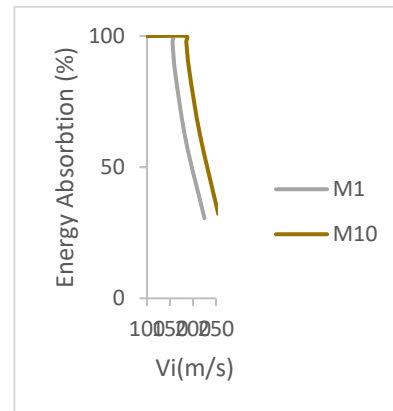


شکل ۲۰- تاثیر ضخامت لایه بتنی، در فرآیند نفوذ پرتابه در هدف ساندویچی

بررسی نمودار ضخامت لایه بتنی، در فرآیند نفوذ پرتابه در هدف ساندویچی نشان می دهد که با افزایش ضخامت لایه بتنی، مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش قابل توجهی همراه است. بطور مثال، در پرتابه ای با سرعت برخورد اولیه ۱۸۰ متر بر ثانیه، با افزایش ضخامت لایه بتنی از ۱۰ به ۳۰ میلیمتر، سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش حدود ۴۵ درصدی مواجه می باشد. در ادامه به مطالعه تاثیر شکل سرپرتابه، در فرآیند نفوذ آن در هدف ساندویچی خواهیم پرداخت.



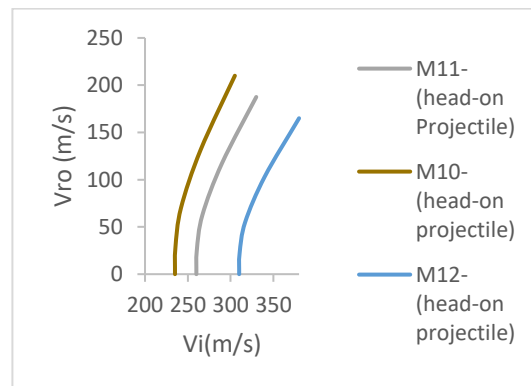
شکل ۲۱- تاثیر شکل سر پرتابه، در فرآیند نفوذ آن در هدف ساندویچی



شکل ۲۲- نمودار درصد جذب انرژی پرتابه توسط هدف نسبت به سرعت ورودی پرتابه، در مطالعه تاثیر شکل سر پرتابه در فرآیند نفوذ

بررسی نمودار شکل سر پرتابه، در فرآیند نفوذ آن در هدف ساندویچی نشان می دهد که با تغییر سر پرتابه از مخروطی به سرتخت، مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش قابل توجهی همراه است. بطور مثال، در پرتابه ای با سرعت برخورد اولیه ۲۰۰ متر بر ثانیه، با تغییر سر پرتابه از حالت سرمخروطی به سرتخت در پرتابه ای با قطر ۷.۵ میلیمتر، سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش حدود ۵۰ درصدی مواجه می باشد. در نمودار درصد جذب انرژی پرتابه توسط هدف نسبت به سرعت ورودی پرتابه، در مطالعه تاثیر تاثیر شکل سر پرتابه در فرآیند نفوذ آن در هدف چندلایه، می توان روند مشابهی را مشاهده نمود. به نحوی که با تغییر شکل سر پرتابه از سرمخروطی به سرتخت، سطح زیر نمودار میزان جذب انرژی هدف در فرآیند نفوذ، افزایش خواهد یافت و هدف توانایی بیشتری در مستهلک کردن انرژی پرتابه خواهد داشت.

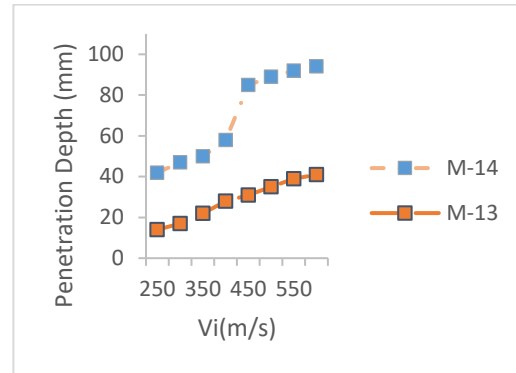
در بررسی تاثیر قطر پرتابه، در فرآیند نفوذ پرتابه سرتخت در هدف ساندویچی (نمودار ۲۳) می بینیم که با افزایش قطر پرتابه، به میزان قابل توجهی از میزان سرعت خروجی پرتابه از هدف کاسته می شود.





شکل ۲۳- تاثیر قطر پرتابه، درفرآیند نفوذ پرتابه سرتخت در هدف ساندویچی

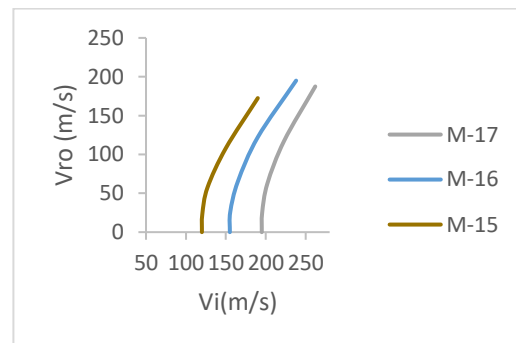
در انتها به بررسی تاثیر سرعت اولیه پرتابه و شکل سر پرتابه بر میزان نفوذ آن در اهداف نمونه های M۱۳ و M۱۴ (اهدافی که در آن به ترتیب پرتابه های سرتخت و سرمخروطی در هدف ۳ لایه شامل دولایه فوقانی و تحتانی بتن رده C۳۰ به ضخامت ۶۰ میلیمتر و لایه میانی از فوم PVC می باشد) می پردازیم.



شکل ۲۴- تاثیر سرعت ورودی و شکل سر پرتابه، درفرآیند نفوذ پرتابه در هدف ساندویچی

همانطور که در نمودار شکل ۲۴ دیده می شود، در مدل M۱۴ با پرتابه سرمخروطی، با افزایش سرعت پرتابه، بصورت ملایم میزان نفوذ آن در هدف افزایش می یابد. بین سرعت های ۴۰۰ تا ۴۵۰ متر بر ثانیه، پرتابه از لایه فوقانی بتنی عبور کرده و ضمن عبور از لایه فوم میانی، به لایه بتنی تحتانی می رسد. در مدل M۱۳ با پرتابه سرتخت، پرتابه تا سرعت ۶۰۰ متر بر ثانیه نمیتواند از لایه فوقانی عبور نماید. در کل می توان از نمودار چنین استنباط نمود که میزان نفوذ پرتابه سرمخروطی حدود ۲.۵ برابر پرتابه سرتخت می باشد.

در انتها، با در نظر گرفتن لایه های فوقانی و تحتانی فوم و لایه میانی بتن، به تاثیر ضخامت هسته بتنی، بر فرآیند نفوذ را بررسی می کنیم.





شکل ۲۵- تاثیر ضخامت هسته بتنی، در فرآیند نفوذ پرتابه سرمخروطی در هدف ساندویچی با دولایه فوم و یک لایه بتن

بررسی نمودار تاثیر ضخامت هسته بتنی، در فرآیند نفوذ پرتابه سرمخروطی در هدف ساندویچی با دولایه فوم و یک لایه بتن نشان می دهد که با افزایش ضخامت هسته بتنی، مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش قابل توجهی همراه است، به نحوی که در پرتابه ای با سرعت برخورد اولیه ۲۲۰ متر بر ثانیه، با افزایش ضخامت لایه بتنی از ۴۰ به ۸۰ میلیمتر، سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش حدود ۶۰ درصدی مواجه می باشد.

همچنین در بخش انتهایی پژوهش، مقایسه ای بر فرآیند نفوذ پرتابه های مورد بررسی در اهداف ساندویچی خواهیم داشت.

چنانچه حداقل سرعت اولیه جهت خروج پرتابه از هدف را برابر V_{io} و پارامتر β (پارامتری از جنس زمان) را برابر با حاصل تقسیم ضخامت کل بتن در هدف (C.t.) بر V_{io} تعریف نماییم ($\beta = C.t./V_{io}$) جدول ۴-۶ را میتوان برحسب پارامتر β در نمونه های مورد بررسی ارائه نماییم. این پارامتر میتواند معرف مقاومت هدف در برابر نفوذ یک پرتابه خاص باشد که تابع مقاومت هدف در برابر نفوذ پرتابه و تابع هندسه پرتابه می باشد. مقدار این پارامتر با مقاومت هدف در برابر نفوذ پرتابه رابطه عکس دارد. به عبارت دیگر، هر چقدر این پارامتر عدد بزرگتری داشته باشد، مقاومت آن هدف در برابر نفوذ پرتابه خاص، کمتر خواهد بود.

جدول ۴-مقاومت هدف در برابر نفوذ پرتابه

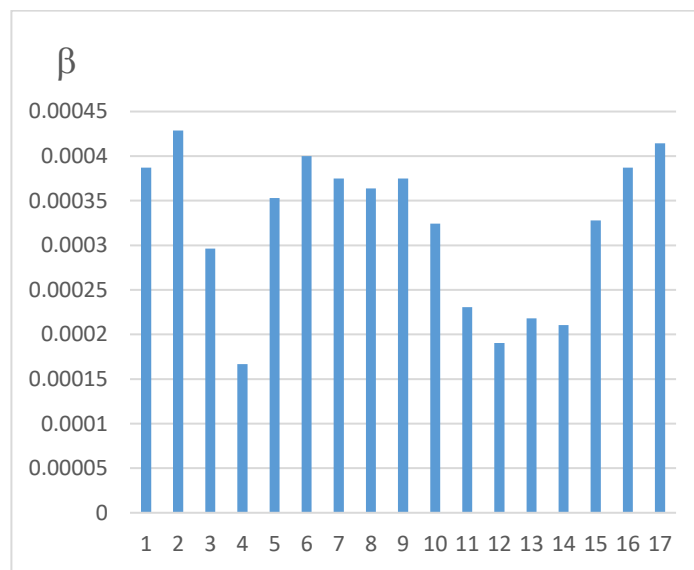
sample	total tick. (mm)	concrete tick.(C.t.)(mm)	Vio (mm/s)	C.t./Vio (s)
M۱	۸۵	۶۰	۱۵۵۰۰۰	۰.۰۰۰۳۸۷۰۹۷
M۲	۸۵	۶۰	۱۴۰۰۰۰	۰.۰۰۰۴۲۸۵۷۱
M۳	۶۵	۴۰	۱۳۵۰۰۰	۰.۰۰۰۲۹۶۲۹۶
M۴	۴۵	۲۰	۱۲۰۰۰۰	۰.۰۰۰۱۶۶۶۶۷
M۵	۸۵	۶۰	۱۷۰۰۰۰	۰.۰۰۰۳۵۲۹۴۱
M۶	۸۵	۶۰	۱۵۰۰۰۰	۰.۰۰۰۴
M۷	۸۵	۶۰	۱۶۰۰۰۰	۰.۰۰۰۳۷۵
M۸	۸۵	۶۰	۱۶۵۰۰۰	۰.۰۰۰۳۶۳۶۳۶
M۹	۸۵	۶۰	۱۶۰۰۰۰	۰.۰۰۰۳۷۵
M۱۰	۸۵	۶۰	۱۸۵۰۰۰	۰.۰۰۰۳۲۴۳۲۴
M۱۱	۸۵	۶۰	۲۶۰۰۰۰	۰.۰۰۰۲۳۰۷۶۹



M12	۸۵	۶۰	۳۱۵۰۰۰	۰.۰۰۰۱۹۰۴۷۶
M13	۱۴۵	۱۲۰	۵۵۰۰۰۰	۰.۰۰۰۲۱۸۱۸۲
M14	۱۴۵	۱۲۰	۵۷۰۰۰۰	۰.۰۰۰۲۱۰۵۲۶
M15	۹۰	۴۰	۱۲۲۰۰۰	۰.۰۰۰۳۲۷۸۶۹
M16	۱۱۰	۶۰	۱۵۵۰۰۰	۰.۰۰۰۳۸۷۰۹۷
M17	۱۳۰	۸۰	۱۹۳۰۰۰	۰.۰۰۰۴۱۴۵۰۸

از نتایج جدول ۴- میتوان نکات زیر را برداشت نمود:

- ۱- با افزایش ضخامت لایه بتنی در هدف، مقاومت آن در برابر نفوذ پرتابه افزایش خواهد یافت.
 - ۲- با افزایش چگالی لایه بتنی در هدف، مقاومت آن در برابر نفوذ پرتابه افزایش خواهد یافت.
 - ۳- با تغییر شکل سر پرتابه از سرمخروطی به سرتخت، مقاومت هدف در برابر نفوذ پرتابه افزایش خواهد یافت.
- خلاصه جدول مقاومت هدف در برابر نفوذ پرتابه در شکل ۲۶ قابل مشاهده می باشد.



شکل ۲۶ مقاومت هدف در برابر نفوذ پرتابه

بحث و نتیجه گیری

از جمله نتایج این تحلیل می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- با افزایش مقاومت فشاری لایه بتنی، مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش ملموسی همراه است. بطور مثال، در پرتابه ای با سرعت برخورد اولیه ۲۰۰ متر بر ثانیه، با افزایش مقاومت فشاری لایه بتنی از ۲۵ تا ۳۵ مگاپاسکال، سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش ۲۰ درصدی مواجه می باشد.



- با افزایش قطر پرتابه، مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش همراه است. بطور مثال، در پرتابه ای با سرعت برخورد اولیه ۲۰۰ متر بر ثانیه، با افزایش قطر پرتابه از ۷.۵ به ۱۲ میلیمتر، سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش حدود ۸ درصدی مواجه می باشد.
- با افزایش چگالی لایه بتنی، مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش همراه است. بطور مثال، در پرتابه ای با سرعت برخورد اولیه ۲۰۰ متر بر ثانیه، با افزایش چگالی لایه بتنی از ۲۴۰۰ به ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش حدود ۵ درصدی مواجه می باشد.
- با افزایش ضخامت لایه بتنی، مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش قابل توجهی همراه است. بطور مثال، در پرتابه ای با سرعت برخورد اولیه ۱۷۵ متر بر ثانیه، با افزایش ضخامت لایه بتنی از ۱۰ به ۳۰ میلیمتر، سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش حدود ۴۵ درصدی مواجه می باشد.
- با تغییر سرپرتابه از مخروطی به سرتخت، مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش قابل توجهی همراه است. بطور مثال، در پرتابه ای با سرعت برخورد اولیه ۲۰۰ متر بر ثانیه، با تغییر سرپرتابه از حالت سرمخروطی به سرتخت در پرتابه ای با قطر ۷.۵ میلیمتر، سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش حدود ۵۰ درصدی مواجه می باشد.
- با افزایش مقاومت فشاری لایه بتنی هدف، سطح زیر نمودار میزان جذب انرژی هدف در فرآیند نفوذ پرتابه، افزایش خواهد یافت.
- با افزایش قطر پرتابه، سطح زیر نمودار میزان جذب انرژی هدف در فرآیند نفوذ پرتابه، افزایش خواهد یافت و هدف توانایی بیشتری در مستهلک کردن انرژی پرتابه خواهد داشت.
- با افزایش چگالی لایه بتنی، سطح زیر نمودار میزان جذب انرژی هدف در فرآیند نفوذ پرتابه، افزایش خواهد یافت و هدف توانایی بیشتری در مستهلک کردن انرژی پرتابه خواهد داشت.
- با تغییر شکل سر پرتابه از سرمخروطی به سرتخت، سطح زیر نمودار میزان جذب انرژی هدف در فرآیند نفوذ، افزایش خواهد یافت و هدف توانایی بیشتری در مستهلک کردن انرژی پرتابه خواهد داشت.
- میزان نفوذ پرتابه سرمخروطی در هدف با دولایه بتنی فوقانی و تحتانی و یک لایه فوم میانی، حدود ۲.۵ برابر پرتابه سرتخت مشابه می باشد.
- با افزایش قطر پرتابه، به میزان قابل توجهی از میزان سرعت خروجی پرتابه از هدف کاسته می شود.
- در فرآیند نفوذ پرتابه سرمخروطی در هدف ساندویچی با دولایه فوم و یک لایه بتن، با افزایش ضخامت هسته بتنی، مقاومت هدف نسبت به نفوذ پرتابه افزایش یافته و سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش قابل توجهی همراه است، به نحوی که در پرتابه ای با سرعت برخورد اولیه ۲۲۰ متر بر ثانیه، با افزایش ضخامت لایه بتنی از ۴۰ به ۸۰ میلیمتر، سرعت خروجی پرتابه از هدف، با کاهش حدود ۶۰ درصدی مواجه می باشد. با توجه به نتایج پژوهش این پیشنهادات ارائه می شود:



- ۱- بررسی تاثیر مدل های رفتاری پیشرفته بتن و فوم در نرم افزار Ls Dyna مانند مدل های آسیب پلاستیک
۲- بررسی اثر متغیرهای دیگر مانند تاثیر زاویه برخورد پرتابه در میزان نفوذ و تخریب

منابع

- [۱]. پطروودی، محمد، کامیاب، محمد حسین، (۱۳۹۹) بررسی عددی و تحلیل نفوذ پرتابه میله بلند صلب در اهداف فولادی. مجله مهندسی مکانیک، سال ۲۹، شماره ۱۳۵، ص ۱۲-۲۵
- [۲]. Bulson, P.S., (۱۹۹۲) "Explosive loading of engineering structures" Chapman & Hall, pp. ۱۶۱-۱۶۸.
- [۳]. Shao R., Wu C., Su Y., Liu Z., (۲۰۱۹) Numerical analysis on impact response of ultra-high strength concrete protected with composite materials against steel ogive-nosed projectile penetration. Composite Structures, Volume ۲۲۰, Pages ۸۷۱-۸۷۴.
- [۴]. Shao R., Wu C., Su Y., Liu Z., (۲۰۱۹) Experimental and Numerical Investigations of Penetration Resistance of Ultra-High Strength Concrete Protected with Ceramic Balls Subjected to Projectile Impact. Ceramics International Volume ۴۵, Issue ۶, Pages ۷۹۱۱-۷۹۷۵.
- [۵]. Fengling Zhang, A. S. Shedbale, Min-hong Zhang. (۲۰۲۱) Ultra-high performance concrete subjected to high-velocity projectile impact: implementation of K&C model with consideration of failure surfaces and dynamic increase factors. International Journal of Impact Engineering Volume ۱۵۵, ۱۰۳۹۰۷
- [۶]. Mirzababaie Mostofi T., Sayah Badkhor M., Babaei H., (۲۰۲۱) Investigation of penetration behavior of Amirkabir Journal of monolithic and multi-layered metallic targets subjected to projectile impact Mechanical Engineering is licensed under a "Creative Commons Attribution-NonCommercial ۲,۰ Generic (CC BY-NC ۲,۰)"
- [۷]. سیاح بادخور، مصطفی، نداف اسکوئی، علیرضا، واحدی، خداداد، (۱۳۹۸) بررسی مدل های نفوذ پرتابه در اهداف فلزی و سرامیکی. نشریه مکانیک سازه ها و شاره ها. دوره ۹، شماره ۴.
- [۸]. خواجه ارزانی، حمید، کبیری عطاءآبادی، عبدالرضا، و چیریان، یوسف. (۱۳۹۸). بررسی اثر پارامترهای ساختاری بر مقاومت به ضربه سرعت بالای چندلایه های الیافی-فلزی. مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۹، شماره ۶.
- [۹]. طماسبی آبدر، مهدی، لیاقت، غلام حسین، شانظری، هادی، خدادادی، امین، هادوی نیا، همایون، ابوترابی، اکبر. (۱۳۹۴) بررسی تحلیلی و عددی نفوذ پرتابه در اهداف سرامیک- فلز و ارائه یک مدل اصلاحی. نشریه مهندسی مکانیک مدرس، شماره ۹
- [۱۰]. زارعی، حمیدرضا، داودی نیک، علیرضا، دل آرا، علیرضا. (۱۳۹۳) بررسی تجربی نفوذ پرتابه در صفحات چند لایه فلز - الیاف (Glaire). نشریه مکانیک هوافضا، (پیاپی ۳۸)، شماره ۴
- [۱۱]. شفیعی، محمد، واحدی، خداداد. (۱۳۹۲) بررسی تحلیلی و عددی نفوذ پرتابه میله های بلند در اهداف بتنی و بتن- فولادی. نشریه مواد پر انرژی (پیاپی ۱۸)، شماره ۱
- [۱۲]. مسعودی، محمد حسین، دهقانی اشکذری، قاسم، مقیمی، پرویز. (۱۳۹۱) بررسی نفوذ پرتابه ها در دیوارهای پرکننده از جنس مصالح بتن سبک و مصالح بنایی. نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران.



- [۱۳]. واحدی، خداداد ، خدارحمی، حسین.، دهدشتی اخوان، حسین. (۱۳۹۱) بررسی و تحلیل نفوذ مایل پرتابه صلب در هدف فلزی ضخیم. نشریه مواد پر انرژی (پیاپی ۱۶)، شماره ۳
- [۱۴]. محدث صدیق، محمدعلی. ، واحدی، خداداد. ، خوگر، احمدرضا. (۱۳۹۱) بررسی پارامترهای موثر در نفوذ کامل پرتابه در اهداف بتنی، نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران.
- [۱۵]. مسعودی، محمدحسین.، دهقانی اشکذری، قاسم.، مقیمی، پرویز. (۱۳۹۰) مقایسه نفوذ پرتابه ها در بتنهای سبک از نوع بتن سبکدانه و بتن هوادمیده اتوکلاوشده. اولین کنفرانس ملی بتن سبک .
- [۱۶]. رادمهر، داود. ، لیاقت، غلامحسین. ، فعلی، سعید. (۱۳۹۰) تحلیل فرآیند نفوذ مایل پرتابه های تغییر شکل پذیر تخت در اهداف فلزی چند لایه. نشریه مواد پر انرژی (پیاپی ۱۱)، شماره ۱
- [۱۷]. مشتاقیان، محمد. ، واحدی، خداداد. (۱۳۸۹) بررسی و تحلیل نفوذ پرتابه در یک هدف سرامیک/کامپوزیت. نشریه مکانیک هوافضا (پیاپی ۲۲)، شماره ۴
- [۱۸]. واحدی، خداداد. ، لطیفی، محمد.، خدارحمی، حسین.، خسروی، فریدون. (۱۳۸۷) مقایسه عمق نفوذ پرتابه ها در اهداف بتنی پوشش دار. نشریه مواد پر انرژی (پیاپی ۵)، شماره ۱
- [۱۹]. حسین پل، محمد.، لیاقت، غلامحسین.، حسینی، سید عبدالوهاب. (۱۳۸۸) تحلیل نفوذ مایل پرتابه های مخروطی در صفحات نازک فلزی. نشریه مکانیک هوافضا (پیاپی ۱۶)، شماره ۲
- [۲۰]. خدارحمی، حسین.، عزیزیان، علی.، امینی مزرعه نو، مصطفی. (۱۳۹۴). مطالعه آزمایشگاهی نفوذ پرتابهها در اهداف بتن پرمقاومت الیافی. نشریه علمی پژوهش عمران مدرس. دوره پانزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۴
- [۲۱]. جعفری، سیدسجاد.، فعلی، سعید. (۱۳۹۴) بررسی تحلیلی برخورد پرتابه استوانه ای با دماغه های مختلف به ورق های ساندویچی. نشریه مجله مدل سازی در مهندسی. سال سیزدهم، شماره ۴۲ ، پاییز ۱۳۹۴
- [۲۲]. Markovich N. , Kochavi E., Ben-Dor G. Calibration of a Concrete Damage Material Model in LS-Dyna RG. ۲, ۱, ۳۵۰۳ for a Wide Range of Concrete Strengths. Conference Paper · November ۲۰۰۹ DOI: ۱۰.۱۳۱۴۰/۴۷۲۳