

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

مدل سازی عددی نفوذ پرتابه نوک تیز در خاک درشت دانه

نگارنده:

سید وحید موسوی

استاد راهنما:

دکتر رضا نادری

تیر ۱۳۹۸

شماره: ۹۸/۶۴
تاریخ: ۹۸/۶/۴

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سید وحید موسوی با شماره دانشجویی ۹۵۱۴۵۰۴ رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک تحت عنوان مدلسازی عددی نفوذ پرتابه نوک تیز در خاک درشت دانه که در تاریخ ۱۳۹۸/۴/۱۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه:) ☒ مردود ☐			
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر رضا نادری	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محسن کرامتی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر حسین قاسم زاده طهرانی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضا نادری
دانشکده مهندسی عمران

آی. ایزدیش، مدیر تحصیلات تکمیلی

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به

یگانه های زندگیم

پدرم، که در کلیه مراحل زندگی درس خودباوری و خودگذشتگی را به من آموخت

مادرم، که انقبای عشق به خالق و مهر به مخلوق را در دلم، همی نمود

برادر بزرگوار و خواهر عزیزم، که وجودشان مایه دلگرمی و صفایشان مایه آرامش من است

و به عزیزانی که نفس خیرشان و دعا روح پرورشان بدرقه راهم بود.

سپاس

سپاس خدای را که به عنایت ازلی این بنده کمترین را موفق به کار نمود.
بر خود واجب می‌دانم به مصداق سخن مشهور، «هر که شکر بنده را نکوید، شکر خالق را نگفته است» مراتب
تقدیر و شکر را از استاد فریخته و ارجمند جناب آقای دکتر رضانادری، که با شکیبایی و دقت فراوان و
مساعده‌های بی‌شائبه، این حقیر را یاری کردند را ابراز دارم، مهر معبود، همواره سایبان زندگی‌شان باد.
خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و هم‌با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران
عزیز، عنایت فرما.

سید وحید موسوی

تعهد نامه

اینجانب سید وحید موسوی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-ژئوتکنیک دانشکده‌ی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مدل‌سازی عددی نفوذ پرتابه در خاک درشت‌دانه تحت راهنمایی جناب آقای دکتر رضا نادری متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا «**Shahrood University of Technology**» به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

سازه‌های مدفون در خاک که از آن می‌توان به‌عنوان سازه امن استفاده کرد نقش غیرقابل‌انکاری در بحث پدافند غیرعامل دارند. یکی از خطراتی که این نوع سازه‌ها را تهدید می‌کند اصابت انواع پرتابه و ترکش و نفوذ آن‌ها می‌باشد. آگاهی و شناخت موضوع پیچیده برخورد پرتابه با اهداف مختلف از مسائل موردعلاقه محققان و مهندسان عمران بوده است. کاربردهای نظامی مانند طراحی سازه‌های مقاوم در مقابل نفوذ پرتابه، طراحی پوشش‌های محافظ از جمله مهم‌ترین کاربردهای این بحث می‌باشد. بررسی پدیده برخورد و نفوذ به دلیل مؤثر بودن پارامترهای مختلفی از قبیل انتقال حرارت و جرم، اصطکاک، تأثیر هندسه اجسام برخوردکننده و موارد بسیار دیگر پیچیده بوده و مسائل و مشکلات فراوانی را به همراه دارد. بررسی اثرات برخورد پرتابه در گذشته با انجام آزمایش‌های گوناگون صورت گرفته است لیکن این آزمایش‌ها به دلیل محدودیت امکانات و فراهم کردن شرایط آزمایش به‌صورت نسبی و تقریبی رفتار پرتابه را مشخص کرده‌اند. بنابراین اهمیت این موضوع موجب شد تا در این پژوهش نفوذ پرتابه در خاک ماسه‌ای به‌صورت عددی موردبررسی قرار گیرد. تحلیل مسائل با مرز-های دارای تغییر شکل مداوم در طول حل مسئله با استفاده از روش مبتنی بر شبکه دارای ضعف می‌باشد. برای حل این مشکل معمولاً از روش‌های بدون شبکه استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها که به‌طور خاص برای مسائل ضربه، نفوذ و شکست قابلیت ویژه‌ای دارد، روش هیدرودینامیک ذرات هموار می‌باشد.

در پژوهش حاضر به بررسی نفوذ پرتابه نوک‌تیز و ترکش در خاک ماسه‌ای پرداخته شد. که در آن اثرات زاویه نوک پرتابه، چگالی خاک، ضخامت و شکل ترکش موردبررسی قرار گرفته است. برای مدل-سازی از روش بدون شبکه SPH استفاده شده است و نمودار سرعت و جابه‌جایی پرتابه‌ها و ترکش‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از مقایسه این نمودارها بیان‌کننده این موضوع است که با افزایش چگالی خاک و زاویه نوک پرتابه کاهش نفوذ پرتابه اتفاق می‌افتد. همچنین با کاهش ضخامت و افزایش ابعاد ترکش نفوذ در خاک افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: پرتابه، نفوذ، خاک درشت‌دانه، آب‌کوس، روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

عنوان	صفحه
فصل اول مقدمه	۱
۱- مقدمه.....	۲
۱-۱ ضرورت انجام تحقیق.....	۵
۱-۲ معرفی پژوهش.....	۵
۱-۲-۱ بیان مسئله.....	۵
۱-۲-۲ هدف از پژوهش.....	۶
۱-۲-۳ فصل‌بندی پژوهش.....	۶
فصل دوم نفوذ پرتابه در خاک	۹
۲- مقدمه.....	۱۰
۲-۱ بارگذاری دینامیکی و ضربه‌ای.....	۱۰
۲-۲ عوامل مؤثر بر فرآیند نفوذ.....	۱۲
۲-۲-۱ پرتابه.....	۱۳
۲-۲-۲ اهداف.....	۱۵
۲-۲-۲-۱ ضخامت هدف.....	۱۵
۲-۲-۲-۲ جنس هدف.....	۱۵
۲-۲-۲-۳ تعداد لایه‌های هدف.....	۱۶
۲-۲-۳ سرعت برخورد.....	۱۶
۲-۲-۴ زاویه برخورد.....	۱۸
۲-۳ مکانیزم‌های شکست هدف.....	۱۸
۲-۳-۱ ایجاد حفره.....	۱۹
۲-۳-۲ پلاگینگ (ترک مخروطی).....	۱۹
۲-۳-۳ پتالینگ یا گلبرگی شدن.....	۱۹

۲۰	۴-۳-۲ اسکبینگ (پوسته پوسته شدن هدف)
۲۰	۵-۳-۲ اسپالینگ (تکه تکه شدن)
۲۰	۶-۳-۲ خردشدگی
۲۰	۷-۳-۲ شکست نرم یا گسترش حفره نرم
۲۱	۴-۲ انواع دماغه‌ی مخروطی شکل نوک پرتابه
۲۱	۱-۴-۲ دماغه‌ی مخروطی نوک تیز
۲۲	۲-۴-۲ دماغه‌ی مخروطی با نوک کروی
۲۲	۳-۴-۲ دماغه‌ی دومخروطی
۲۳	۴-۴-۲ دماغه‌ی نوک تیز
۲۴	۵-۴-۲ دماغه‌ی نوک تیز با نوک کروی
۲۴	۶-۴-۲ دماغه‌ی نوک تیز قطاعی
۲۵	۷-۴-۲ دماغه‌ی بیضوی
۲۶	۵-۲ فرآیند نفوذ
۲۶	۱-۵-۲ مرحله گذرا
۲۶	۲-۵-۲ مرحله نفوذ پایدار
۲۷	۳-۵-۲ مرحله تعریض حفره نفوذ
۲۸	۴-۵-۲ مرحله بازیافت
۲۸	۶-۲ کارهای انجام شده در زمینه نفوذ پرتابه
۳۵	فصل سوم روش‌های عددی
۳۶	۳-مقدمه ای بر روش‌های عددی
۳۶	۱-۳ مراحل شبیه‌سازی عددی
۳۸	۲-۳ روش‌های عددی مبتنی بر شبکه
۴۱	۳-۳ روش‌های عددی بدون شبکه
۴۱	۱-۳-۳ تاریخچه روش‌های عددی بدون شبکه

۴۵	۴-۳ روش بدون شبکه ذره‌ای
۴۷	۵-۳ مدل‌های رفتاری خاک
۴۸	۳-۵-۱ معیار گسیختگی موهر-کولمب
۵۳	فصل چهارم روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)
۵۴	۴-مقدمه
۵۸	۴-۱ تاریخچه روش هیدرودینامیک ذرات هموار
۶۱	۴-۲ روش عددی SPH
۶۱	۴-۲-۱ گسسته سازی معادلات در روش SPH
۶۳	۴-۲-۲ دامنه پوشش
۶۴	۴-۲-۳ طول هموار کننده h
۶۵	۴-۲-۴ طول هموار کننده متغیر
۶۵	۴-۲-۵ ذرات همسایه
۶۶	۴-۳ تقریب ذره‌ای در روش هیدرودینامیک ذرات هموار
۶۷	۴-۳-۱ تقریب انتگرالی مشتق تابع
۶۸	۴-۳-۲ تقریب ذره‌ای مشتق تابع
۶۸	۴-۴ توابع هموار ساز
۶۹	۴-۴-۱ کرنل زنگوله‌ای
۷۰	۴-۴-۲ کرنل گوسی
۷۱	۴-۴-۳ کرنل مرتبه سه (B.Spline)
۷۳	۴-۴-۴ کرنل مرتبه دو
۷۵	۴-۵ روابط SPH مسائل ضربه با سرعت بالا
۷۵	۴-۵-۱ پیوستگی
۷۷	۴-۵-۲ مومنتوم
۷۹	۴-۵-۳ انرژی

فصل پنجم مدل سازی عددی نفوذ پرتابه.....	۸۱
۵-مقدمه.....	۸۲
۵-۱ صحت سنجی	۸۲
۵-۲ فیزیک مسئله	۸۵
۵-۳ پارامترهای مدل سازی	۸۸
۵-۴ شبیه سازی.....	۸۹
۵-۵ نتایج شبیه سازی	۹۱
۵-۵-۱ نتایج حاصل از پرتابه نوک تیز	۹۱
۵-۵-۱-۱ پرتابه با زاویه نوک دماغه ۳۰ درجه	۹۱
۵-۵-۱-۲ پرتابه با زاویه نوک دماغه ۴۵ درجه	۹۷
۵-۵-۱-۳ پرتابه با زاویه نوک دماغه ۶۰ درجه	۱۰۳
۵-۵-۲ نتایج حاصل از ترکش ۲ سانتی متر	۱۰۵
۵-۵-۲-۱ ترکش متساوی الاضلاع ۲ سانتی متر به ضخامت ۲ میلی متر.....	۱۰۵
۵-۵-۲-۲ ترکش متساوی الاضلاع ۲ سانتی متر به ضخامت ۴ میلی متر.....	۱۰۹
۵-۵-۲-۳ ترکش متساوی الاضلاع ۲ سانتی متر به ضخامت ۸ میلی متر.....	۱۱۳
۵-۵-۳ نتایج حاصل از ترکش ۳ سانتی متر	۱۱۸
۵-۵-۴ نتایج حاصل از ترکش ۴ سانتی متر	۱۲۱
۵-۵-۵ نتایج حاصل از ترکش با قاعده ۲ سانتی متر	۱۲۵
۵-۵-۶ نتایج حاصل از ترکش با قاعده ۱ سانتی متر	۱۲۶
فصل ششم نتایج و پیشنهادات	۱۳۱
۶-۱ نتایج کلی	۱۳۲
۶-۲ پیشنهادات	۱۳۳
منابع و مآخذ	۱۳۴

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲ هندسه برخورد پرتابه	۱۳
شکل ۲-۲ مکانیزم‌های شکست	۱۸
شکل ۳-۲ ابعاد کلی دماغه	۲۱
شکل ۴-۲ دماغه مخروطی ساده	۲۲
شکل ۵-۲ دماغه مخروطی با نوک کروی	۲۲
شکل ۶-۲ دماغه دو مخروطی	۲۳
شکل ۷-۲ دماغه نوک تیز	۲۳
شکل ۸-۲ دماغه نوک تیز با نوک کروی	۲۴
شکل ۹-۲ دماغه نوک تیز قطاعی	۲۵
شکل ۱۰-۲ دماغه بیضوی	۲۵
شکل ۱۱-۲ منحنی فشار - زمان مراحل مختلف فرآیند نفوذ	۲۸
شکل ۱-۳ نمونه‌ای از اعوجاج بیش از حد المان‌ها در مسائل برخورد با سرعت بالا	۴۰
شکل ۲-۳ گسسته سازی دامنه حل به کمک ذرات	۴۵
شکل ۳-۳ معیار گسیختگی موهر-کولمب در شرایط دو و سه بعدی	۴۹
شکل ۱-۴ مدل جریان آب در ظرف به کمک روش SPH	۵۵
شکل ۲-۴ نمایش تابع کرنل و شعاع تأثیر ذره در موقعیت X	۶۳
شکل ۳-۴ انواع نواحی پوشش	۶۳
شکل ۴-۴ توزیع ذرات همسایه در دامنه پوشش	۶۵
شکل ۶-۴ تابع هموارساز Lucy و مشتق اول آن	۷۰
شکل ۷-۴ تابع هموارساز مناقان با هسته گوسی و مشتق اول آن	۷۱
شکل ۸-۴ تابع هموارساز Spline و مشتق اول آن	۷۲
شکل ۴-۴-۴ کرنل مرتبه دو	۷۳
شکل ۹-۴ تابع مرتبه دوم و مشتق آن	۷۳
شکل ۱-۵ نمایی از گلوله کروی و هدف	۸۳
شکل ۲-۵ مدل سازی صورت گرفته توسط Moxnes	۸۳
شکل ۳-۵ مدل سازی صورت گرفته در ABAQUS	۸۴

شکل ۵-۴ نمودار نفوذ-زمان پرتابه کروی	۸۴
شکل ۵-۵ نمودار سرعت-زمان پرتابه کروی	۸۵
شکل ۵-۶ هدف ماسه‌ای	۸۵
شکل ۵-۷ پرتابه با زاویه نوک ۳۰ درجه شکل ۵-۸ پرتابه با زاویه نوک ۴۵ درجه	۸۶
شکل ۵-۹ پرتابه با زاویه نوک ۶۰ درجه	۸۶
شکل ۵-۱۰ ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر شکل ۵-۱۱ ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر	۸۷
شکل ۵-۱۲ ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۸ میلی‌متر شکل ۵-۱۳ ترکش ۳ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر	۸۷
شکل ۵-۱۴ ترکش ۳ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر شکل ۵-۱۵ ترکش ۳ سانتی‌متر و ضخامت ۸ میلی‌متر	۸۷
شکل ۵-۱۶ ترکش ۴ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر شکل ۵-۱۷ ترکش ۴ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر	۸۸
شکل ۵-۱۸ ترکش ۴ سانتی‌متر و ضخامت ۸ میلی‌متر شکل ۵-۱۹ ترکش باقاعده ۱ سانتی‌متر	۸۸
شکل ۵-۲۰ ترکش باقاعده ۲ سانتی‌متر	۸۸
شکل ۵-۲۱ المان بندی پرتابه ۳۰ درجه شکل ۵-۲۲ شکل نفوذ پرتابه ۳۰ درجه	۹۱
شکل ۵-۲۳ نمودار نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۱	۹۲
شکل ۵-۲۴ نمودار سرعت پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۱	۹۲
شکل ۵-۲۵ نمودار سرعت - نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۱	۹۳
شکل ۵-۲۶ نمودار نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۲	۹۴
شکل ۵-۲۷ نمودار سرعت پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۲	۹۴
شکل ۵-۲۸ نمودار سرعت - نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۲	۹۴
شکل ۵-۲۹ نمودار نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۳	۹۵
شکل ۵-۳۰ نمودار سرعت پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۳	۹۵
شکل ۵-۳۱ نمودار سرعت - نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۳	۹۶
شکل ۵-۳۲ مقایسه نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در اهداف مختلف	۹۶
شکل ۵-۳۳ مقایسه سرعت - نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در اهداف مختلف	۹۷

- شکل ۳۴-۵ المان بندی پرتابه ۴۵ درجه شکل ۳۵-۵ شکل نفوذ پرتابه ۴۵ درجه ۹۷
- شکل ۳۶-۵ نمودار نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۱ ۹۸
- شکل ۳۷-۵ نمودار سرعت پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۱ ۹۸
- شکل ۳۸-۵ نمودار سرعت - نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۱ ۹۹
- شکل ۳۹-۵ نمودار نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۲ ۹۹
- شکل ۴۰-۵ نمودار سرعت پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۲ ۱۰۰
- شکل ۴۱-۵ نمودار سرعت - نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۲ ۱۰۰
- شکل ۴۲-۵ نمودار نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۳ ۱۰۱
- شکل ۴۳-۵ نمودار سرعت پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۳ ۱۰۱
- شکل ۴۴-۵ نمودار سرعت - نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۳ ۱۰۱
- شکل ۴۵-۵ مقایسه نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در اهداف با چگالی مختلف ۱۰۲
- شکل ۴۶-۵ المان بندی پرتابه ۶۰ درجه شکل ۴۷-۵ شکل نفوذ پرتابه ۶۰ درجه ۱۰۳
- شکل ۴۸-۵ مقایسه نفوذ پرتابه ۶۰ درجه در اهداف مختلف ۱۰۳
- شکل ۴۹-۵ مقایسه نفوذ پرتابه با زاویه دماغه مختلف در خاک نوع ۲ ۱۰۴
- شکل ۵۰-۵ مقایسه سرعت- نفوذ پرتابه با زاویه دماغه مختلف در هدف ماسه‌ای نوع ۲ ۱۰۴
- شکل ۵۱-۵ المان بندی ترکش ۲ به ضخامت ۲ شکل ۵۲-۵ شکل نفوذ ترکش ۲ به ضخامت ۲ .. ۱۰۵
- شکل ۵۳-۵ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر در خاک نوع ۱ ۱۰۶
- شکل ۵۴-۵ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر در خاک نوع ۱ ۱۰۶
- شکل ۵۵-۵ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر در خاک نوع ۲ ۱۰۷
- شکل ۵۶-۵ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر در خاک نوع ۲ ۱۰۷
- شکل ۵۷-۵ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر در خاک نوع ۳ ۱۰۸
- شکل ۵۸-۵ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر در خاک نوع ۳ ۱۰۸
- شکل ۵۹-۵ مقایسه نفوذ ترکش ۲ سانتی‌متر با ضخامت ۲ میلی‌متر در اهداف مختلف ۱۰۹
- شکل ۶۰-۵ المان بندی ترکش ۲ به ضخامت ۴ شکل ۶۱-۵ شکل نفوذ ترکش ۲ به ضخامت ۴ .. ۱۱۰
- شکل ۶۲-۵ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر در خاک نوع ۱ ۱۱۰
- شکل ۶۳-۵ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر در خاک نوع ۱ ۱۱۰
- شکل ۶۴-۵ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر در خاک نوع ۲ ۱۱۱
- شکل ۶۵-۵ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر در خاک نوع ۲ ۱۱۱

- شکل ۵-۶۶ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۴ میلی متر در خاک نوع ۳ ۱۱۲
- شکل ۵-۶۷ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۴ میلی متر در خاک نوع ۳ ۱۱۲
- شکل ۵-۶۸ مقایسه نفوذ ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت ۴ میلی متر در اهداف مختلف ۱۱۳
- شکل ۵-۶۹ المان بندی ترکش ۲ به ضخامت ۸ شکل ۵-۷۰ شکل نفوذ ترکش ۲ به ضخامت ۸ ۱۱۴
- شکل ۵-۷۱ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر در خاک نوع ۱ ۱۱۴
- شکل ۵-۷۲ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر در خاک نوع ۱ ۱۱۵
- شکل ۵-۷۳ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر در خاک نوع ۲ ۱۱۵
- شکل ۵-۷۴ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر در خاک نوع ۲ ۱۱۶
- شکل ۵-۷۵ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر در خاک نوع ۳ ۱۱۶
- شکل ۵-۷۶ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر در خاک نوع ۳ ۱۱۷
- شکل ۵-۷۷ مقایسه نفوذ ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت ۸ میلی متر در اهداف مختلف ۱۱۷
- شکل ۵-۷۸ مقایسه نفوذ ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت مختلف خاک نوع ۲ ۱۱۸
- شکل ۵-۷۹ المان بندی ترکش ۳ به ضخامت ۲ شکل ۵-۸۰ شکل نفوذ ترکش ۳ به ضخامت ۲ ۱۱۸
- شکل ۵-۸۱ شکل نفوذ ترکش ۳ به ضخامت ۴ شکل ۵-۸۲ شکل نفوذ ترکش ۳ به ضخامت ۸ ۱۱۹
- شکل ۵-۸۳ مقایسه نفوذ ترکش ۳ سانتی متر با ضخامت ۲ میلی متر در اهداف مختلف ۱۱۹
- شکل ۵-۸۴ مقایسه نفوذ ترکش ۳ سانتی متر با ضخامت ۴ میلی متر در اهداف مختلف ۱۲۰
- شکل ۵-۸۵ مقایسه نفوذ ترکش ۳ سانتی متر با ضخامت ۸ میلی متر در اهداف مختلف ۱۲۰
- شکل ۵-۸۶ مقایسه نفوذ ترکش ۳ سانتی متر با ضخامت مختلف در هدف نوع ۲ ۱۲۱
- شکل ۵-۸۷ المان بندی ترکش ۴ به ضخامت ۲ شکل ۵-۸۸ شکل نفوذ ترکش ۴ به ضخامت ۲ .. ۱۲۱
- شکل ۵-۸۹ شکل نفوذ ترکش ۴ به ضخامت ۴ شکل ۵-۹۰ شکل نفوذ ترکش ۴ به ضخامت ۸ .. ۱۲۲
- شکل ۵-۹۱ مقایسه نفوذ ترکش ۴ سانتی متر با ضخامت ۲ میلی متر در اهداف مختلف ۱۲۲
- شکل ۵-۹۲ مقایسه نفوذ ترکش ۴ سانتی متر با ضخامت ۴ میلی متر در اهداف مختلف ۱۲۳
- شکل ۵-۹۳ مقایسه نفوذ ترکش ۴ سانتی متر با ضخامت ۸ میلی متر در اهداف مختلف ۱۲۳
- شکل ۵-۹۴ مقایسه نفوذ ترکش ۴ سانتی متر با ضخامت مختلف در خاک نوع ۲ ۱۲۴
- شکل ۵-۹۵ مقایسه نفوذ ترکش با ابعاد مختلف و ضخامت ۲ میلی متر در خاک نوع ۱ ۱۲۴
- شکل ۵-۹۶ المان بندی ترکش باقاعده ۲ سانتی متر شکل ۵-۹۷ شکل نفوذ ترکش باقاعده ۲ سانتی متر ۱۲۵
- شکل ۵-۹۸ مقایسه نفوذ ترکش باقاعده ۲ سانتی متر با ضخامت ۲ میلی متر در اهداف مختلف ۱۲۵

شکل ۵-۹۹ المان بندی ترکش باقاعده ۱ سانتی متر شکل ۵-۱۰۰ شکل نفوذ ترکش باقاعده ۱
 سانتی متر ۱۲۶
 شکل ۵-۱۰۱ مقایسه نفوذ ترکش باقاعده ۱ سانتی متر با ضخامت ۲ میلی متر در اهداف مختلف ۱۲۷
 شکل ۵-۱۰۲ مقایسه نفوذ ترکش باقاعده مختلف به ضخامت ۲ میلی متر در خاک نوع ۱ ۱۲۷
 شکل ۵-۱۰۳ قبل از نفوذ شکل ۵-۱۰۴ نفوذ در زمان ۰/۰۰۰۳۶ ثانیه ۱۲۸
 شکل ۵-۱۰۵ نفوذ در زمان ۰/۰۰۰۵۴ ثانیه شکل ۵-۱۰۶ نفوذ در زمان ۰/۰۰۰۷۲ ثانیه ۱۲۸
 شکل ۵-۱۰۷ نفوذ در زمان ۰/۰۰۱ ثانیه شکل ۵-۱۰۸ نفوذ در زمان ۰/۰۰۲ ثانیه ۱۲۸
 شکل ۵-۱۰۹ نفوذ در زمان ۰/۰۰۳ ثانیه شکل ۵-۱۱۰ نفوذ در زمان ۰/۰۰۴ ثانیه ۱۲۹
 شکل ۵-۱۱۱ نفوذ در زمان ۰/۰۰۵ ثانیه شکل ۵-۱۱۲ نفوذ در زمان ۰/۰۰۶ ثانیه ۱۲۹
 شکل ۵-۱۱۳ نفوذ در زمان ۰/۰۰۷ ثانیه شکل ۵-۱۱۴ نفوذ در زمان ۰/۰۰۸ ثانیه ۱۲۹
 شکل ۵-۱۱۵ نفوذ در زمان ۰/۰۰۹ ثانیه ۱۲۹

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲ دسته‌بندی انواع برخورد بر اساس عدد آسیب	۱۷
جدول ۲-۲ دسته‌بندی انواع برخورد بر اساس اندازه سرعت برخورد	۱۷
جدول ۱-۳ روش‌های عددی بدون شبکه و نحوه تقریب آن‌ها	۴۴
جدول ۲-۳ متداول‌ترین روش‌های عددی بدون شبکه ذره‌ای	۴۶
جدول ۱-۴ برخی از توابع هموارساز در روش SPH	۷۴
جدول ۱-۵ پارامترهای مدلسازی پرتابه فولادی	۸۹
جدول ۲-۵ پارامترهای مدلسازی خاک ماسه ای	۸۹

فصل اول

مقدمه

۱- مقدمه

پدافند غیرعامل به مجموعه اقدامات غیرمسلحانه‌ای که موجب افزایش بازدارندگی، کاهش آسیب‌پذیری، تداوم فعالیت‌های ضروری، ارتقا پایداری ملی و تسهیل مدیریت بحران در مقابل تهدید-ها و اقدامات نظامی دشمن می‌شود. تهدیدها به دو دسته تهدیدهای طبیعی و انسان‌ساز تقسیم می‌گردند، تهدیدهای انسان‌ساز خود به سه دسته زیر تقسیم می‌گردند:

۱- تهدیدهای نظامی

۲- تهدیدهای امنیتی

۳- تهدیدهای اتفاقی

تهدیدهای نظامی تهاجم هوایی، زمینی و دریایی را در برمی‌گیرد، تهدیدهای امنیتی شامل خرابکاری، بمب‌گذاری و ... می‌گردد و تهدیدات اتفاقی شامل آتش‌سوزی، انفجار مخازن و یا نشست مواد خطرناک می‌باشد [۱].

پدافند غیرعامل خود به دو بخش پدافند سخت و پدافند نرم تقسیم می‌شود؛ در پدافند سخت اقدامات سخت‌افزاری مثل اقدامات مهندسی، پیشگیری، پیش‌بینی و کاهش مخاطرات و در پدافند نرم استفاده از تاکتیک‌هایی است که مشتمل بر برنامه‌ریزی و آماده‌سازی سیستم و سازمان‌ها است. با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران و واقع شدن در منطقه پرتنش خاورمیانه این نیاز ایجاد می‌گردد که توجه جدی به سیستم پدافند غیرعامل شود. سازه‌های ژئوتکنیکی از قبیل خاک‌ریزها، دیوار حائل، تونل‌ها، شالوده‌ها و سازه‌های مدفون در خاک که از آن می‌توان به‌عنوان سازه امن استفاده کرد، نقش غیرقابل‌انکاری در بحث پدافند غیرعامل دارند. خاک یکی از دست‌رس‌ترین و عمومی‌ترین مصالح در ساختارهای مختلف عمرانی و نظامی همواره مورد توجه مهندسان بوده است. علت تمایل به استفاده از این نوع مصالح به دلیل ارزان‌تر بودن و نداشتن محدودیت‌های دیگر مصالح برای انتقال بوده است. همین امر موجب شده تا با استفاده از پوشش‌های حفاظتی از جنس خاک ضمن کاهش هزینه امکان

استتار هر چه بیشتر سازه فراهم شود. یکی از خطراتی که انسان و سازه‌های امن را تهدید می‌کند اصابت انواع پرتابه^۱ و نفوذ^۲ آن می‌باشد. برای مقابله با این نوع از مخاطرات باید شناخت کاملی از فرآیند نفوذ داشته باشیم. یک مشخصه‌ی مهم ضربه تولید نیروی به نسبت زیاد در نقطه برخورد بوده که همین امر سبب ایجاد یک پدیده‌ی پیچیده و غیرخطی و گذرا شده است. پرتابه و هدف دو جزء اصلی فرآیند نفوذ بوده است. موضوعی که مورد توجه طراحان در سازه‌های امن می‌باشد تخمین میزان ضخامت خاک برای جلوگیری از آسیب و نفوذ پرتابه در خاک می‌باشد. این موضوع برای محققین و مهندسين از مدت‌ها قبل جذاب بوده است. مطالعه نفوذ پرتابه در خاک درشت‌دانه به سال ۱۷۴۲ با فرمول عمق نفوذ رابین- اوپلر برمی‌گردد [۲]. محققان در آزمایش‌های خود با تغییر پارامترهای تأثیرگذار در پدیده نفوذ از جمله سرعت برخورد پرتابه به هدف، شکل پرتابه، جنس گلوله و اهداف تلاش کردند تا بتوانند مدل‌های تحلیلی دقیقی را ارائه دهند. از جمله مواردی که کمتر در زمینه‌ی نفوذ مورد بحث و بررسی قرار گرفته، خاک می‌باشد. جانسون^۳ و همکاران [۳] در سال ۱۹۷۸ هدف‌های فولادی، برنجی و مسی را مورد اصابت پرتابه‌های سر مخروطی قرار دادند، آن‌ها در نهایت به این نتیجه رسیدند که با کاهش زاویه نوک مخروط مکانیزم شکست هدف از پلاگینگ به پتالینگ تغییر می‌یابد یعنی تنش‌های شعاعی و محیطی زیاد شده و سرعت برخورد گلوله به حداقل سرعت لازم، جهت ایجاد نفوذ کامل و عبور پرتابه از هدف نزدیک می‌شود. لوی و گلداسمیت^۴ [۴] در سال ۱۹۸۴ برخورد پرتابه‌های استوانه‌ای سر نیم کروی دارای جرم ۱۲/۷ گرمی با اهداف آلومینیومی به ضخامت ۱/۲۷ میلی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از این آزمایش دریافتند مکانیزم شکست برای این نوع از برخوردها ترکیبی از خرد شدن و پوسته‌پوسته شدن می‌باشد. اندرسون^۵ و همکاران [۵] در سال ۱۹۹۹ قابلیت بالیستیکی ۱۷ نوع پرتابه فولادی با سختی‌های متفاوت را مورد بررسی قرار دادند و طول باقی-

1-Projectile

2-Penetration

³ johnson

⁴ Levi and goldsmith

⁵ Anderson

مانده پرتابه، سرعت باقی‌مانده^۱ و حداقل سرعت لازم جهت ایجاد نفوذ کامل را برای هر ترکیبی از پرتابه و هدف به دست آوردند. در این آزمایش‌ها نسبت طول به قطر پرتابه (L/D) برابر ۱۰ و نسبت ضخامت هدف به قطر پرتابه (T/D) برابر ۳/۵۵ در نظر گرفته شد. در این بررسی مشخص گردید وقتی سختی پرتابه از هدف بیشتر باشد سرعت حد بالیستیک کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین با استفاده از شبیه‌سازی عددی نشان دادند طول باقی‌مانده پرتابه به شدت وابسته به سختی آن است.

به‌طور کلی تحقیقات انجام‌شده در این زمینه را می‌توان به سه بخش مطالعات آزمایشگاهی، روش‌های تحلیلی و عددی تقسیم کرد. مطالعات آزمایشگاهی به دلیل هزینه‌های زیاد و اثرات زیست‌محیطی و نیاز به امکانات پیشرفته به‌طور محدودی صورت می‌گیرد. روش‌های تحلیلی با توجه به پیچیدگی موجود در این زمینه نیاز به حل معادلات دیفرانسیل پیچیده و گاهی غیرقابل حل دارد. با توجه به توسعه روش‌های عددی و دسترسی به رایانه‌های قوی محاسباتی و نیاز به هزینه کمتر استفاده از این روش مورد استقبال قرار گرفته است. روش‌های عددی حل معادلات را می‌توان به دودسته مبتنی بر مش^۲ و بدون مش^۳ طبقه‌بندی کرد. روش عددی مبتنی بر مش مانند روش المان محدود^۴ (FEM) حجم محدود^۵ (FVM) و تفاضل محدود^۶ (FDM) ابزاری مفید برای تحلیل هستند اما این روش در مسائل با تغییر شکل‌های بزرگ دچار مشکلاتی از قبیل چرخش و اعوجاج می‌شوند که باعث دور شدن از جواب اصلی مسئله می‌شود. به‌منظور جلوگیری از این مشکلات عددی روش‌های بدون شبکه در سال‌های اخیر گسترش یافته است یکی از این روش‌های عددی بدون شبکه روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)^۷ می‌باشد، که در این پایان‌نامه با بهره‌گیری از روش هیدرودینامیک ذرات هموار و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به بررسی نفوذ پرتابه نوک‌تیز در خاک درشت‌دانه پرداخته شده است.

Residual velocity ^۱
 Mesh-based Numerical Method ^۲
 Meshless Method ^۳
 Finit Element Method ^۴
 Finit Volume Method ^۵
 Finit Difference Method ^۶
 Smoothed Particle Hydrodynamics ^۷

۱-۱ ضرورت انجام تحقیق

در سازه‌های بزرگی مانند سازه‌های ژئوتکنیکی به علت شرایط خاص آن‌ها وقوع هرگونه آسیبی می‌تواند منجر به اثرات به شدت زیان‌بار شود به همین دلیل امروزه با توجه به تهدیدات تروریستی موجود، در طراحی سازه‌های ایمن علاوه بر در نظر گرفتن بارگذاری‌های معمول در سایر سازه‌ها انواع دیگری از آن نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد که نقطه تمایز این سازه‌ها نسبت به سازه‌های متداول است. بار ناشی از برخورد و نفوذ پرتابه از این قبیل بارگذاری‌ها بوده است. با توجه به نقش بسیار مهم سازه‌های ایمن حفاظت‌شده با خاک در حفظ جان و مال و تأمین زیرساخت‌های اساسی این ضرورت ایجاد می‌گردد که این سازه‌ها در برابر نفوذ پرتابه مقاوم باشند. باوجود تمامی این تلاش‌ها در جهت شناخت پدیده نفوذ هنوز این پدیده به‌طور کامل شناخته نشده است. دلیل این عدم شناخت دقیق به دست آمدن نتایج متفاوت توسط محققین مختلف بوده است. دخالت عواملی چون ضخامت و جنس هدف، جنس پرتابه، هندسه پرتابه، محدوده‌ی سرعت پرتابه و... سبب این پیچیدگی شده است. با توسعه روش‌های عددی می‌توان با استفاده از روش‌ها به بررسی موضوع نفوذ پرتابه در خاک پرداخت و با استفاده از نتایج حاصله گام مهمی در مقاوم‌سازی سازه‌های موجود برداشت.

۱-۲ معرفی پژوهش

۱-۲-۱ بیان مسئله

در این پژوهش نفوذ پرتابه نوک‌تیز در خاک درشت‌دانه به روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی هدف نفوذ پرتابه در خاک ماسه بوده است که محیط خاک به روش SPH مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین پرتابه مورد استفاده در

این پایان‌نامه دو نوع پرتابه نوک‌تیز و ترکش مثلثی بوده است که تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان نفوذ در خاک مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۲-۲ هدف از پژوهش

با گسترش روزافزون سلاح‌های مخرب و جنگ‌افزارها و اثرات آن بر زندگی جوامع بشری، اندیشیدن تمهیداتی در خصوص راه‌های غیرمستقیم کاهش این اثرات در حوزه‌های مختلف زندگی بشر، در سال‌های اخیر مورد توجه نسبتاً جدی قرار گرفته است. در این میان سازه‌ها و ساختمان‌ها و رفتار آن‌ها در برابر سلاح‌ها و بارهای انفجاری از مؤثرترین عامل کاهش یا افزایش این اثرات هستند. هدف از این پایان‌نامه شبیه‌سازی نفوذ پرتابه نوک‌تیز در خاک با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) است تا بتوان شناختی مناسب از نفوذ پرتابه در خاک پیدا کرد. همان‌طور که گفته شد میزان نفوذ پرتابه در بحث پدافند غیرعامل حائز اهمیت است پس پیدا کردن راه‌حلی برای کاهش صدمات آن امری ضروری است به همین دلیل با تغییر پارامترهای مختلف و شبیه‌سازی آن به مقایسه میزان نفوذ و نقش هر یک از پارامترها در میزان نفوذ پرتابه در خاک درشت‌دانه پرداخته می‌شود.

۱-۲-۳ فصل‌بندی پژوهش

در فصل اول در قسمت مقدمه به بیان موضوع پدافند و اهمیت حفاظت از سازه‌ها در برابر نفوذ پرتابه پرداخته شده است همچنین در ادامه فصل ضرورت انجام تحقیق با توجه به تهدیدات تروریستی بیان شده است. در ادامه این فصل بیان مسئله مورد نظر مطرح شده و در آن روش عددی و نرم‌افزار مورد استفاده معرفی شده است و در انتها هدف از انجام این پژوهش بیان گردیده است.

در فصل دوم به معرفی مفاهیم پایه‌ای در رابطه با موضوع نفوذ و پرتابه پرداخته می‌شود و همچنین تفاوت بارگذاری دینامیکی و ضربه‌ای، عوامل مؤثر بر فرآیند نفوذ، مکانیزم‌های شکست و تقسیم‌بندی سرعت‌های برخورد و تقسیم‌بندی پرتابه‌ها، و کارهای انجام‌شده در این زمینه بیان می‌گردد.

در فصل سوم پس از بیان مقدمه‌ای بر روش‌های عددی، روش‌های عددی مبتنی بر شبکه و روش‌های عددی بدون شبکه و تاریخچه آن بیان می‌گردد. در ادامه روش‌های عددی بدون شبکه ذره‌ای و مدل رفتاری خاک شامل موهر-کولمب مطرح شده است.

در فصل چهارم روش هیدرودینامیک ذرات هموار یکی از روش‌های بدون شبکه ذره‌ای معرفی می‌گردد و گسسته سازی معادلات آن و پارامترهای مختلف آن بیان شده است. در ادامه تقریب ذره‌ای، توابع هموارساز، روابط SPH در مسائل سرعت بالا و معادلات ساختاری ارائه می‌گردد.

در فصل پنجم ابتدا به صحت سنجی و معرفی فیزیک مسئله و همچنین پارامترهای مدل‌سازی پرداخته شده است و در ادامه مدل‌های مختلفی که در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و در نهایت نتایج و تحلیل آن‌ها ارائه می‌گردد.

در فصل شش و آخرین فصل از این پایان‌نامه نتیجه‌گیری و پیشنهادات لازم ارائه گردیده است.

فصل دوم

نفوذ پرتابه در خاک

۲- مقدمه

نفوذ پرتابه یک فرآیند کاملاً پیچیده مکانیکی است که تحقیقات در این زمینه سابقه طولانی داشته است. به دنبال توسعه پرتابه‌های جدید نیاز به پژوهش در این زمینه بیشتر شده است. شناخت مسئله نفوذ پرتابه مستلزم آگاهی از، بسیاری پدیده‌ها می‌باشد. حرارت زیاد، تغییر شکل‌های بزرگ از جمله پدیده‌هایی هستند که در خلال نفوذ اتفاق می‌افتد و نیازمند درک دقیقی هستند. از این رو در این فصل به معرفی کلی پدیده نفوذ، پرتابه‌ها و مطالعاتی که در گذشته در این زمینه رخ داده پرداخته می‌شود.

۲-۱ بارگذاری دینامیکی و ضربه‌ای

فرآیند نفوذ از جمله پدیده‌هایی است که بارگذاری در آن خیلی سریع اتفاق می‌افتد و نسبت به حالتی که بارگذاری استاتیکی است بسیار متفاوت است. تفاوت بارگذاری استاتیکی، دینامیکی در مدت زمان اعمال بار می‌باشد. اگر مدت زمان اعمال بار خیلی کوتاه باشد بارگذاری ضربه‌ای و زمانی که مدت زمان اعمال بار زیاد است جزو بارگذاری‌های گذرا به شمار می‌آید.

بارهای دینامیکی به دو نوع گذرا و ضربه‌ای تقسیم می‌شوند. در بارگذاری گذرا زمان اعمال بار نسبت به بارگذاری استاتیکی کوتاه است ولی در مقایسه با زمان عبور صوت در اجسام قابل ملاحظه می‌باشد درحالی که در بارگذاری ضربه‌ای زمان اعمال بار بسیار کوتاه است [۷و۶].

گاهی زمان اعمال بار با پریود طبیعی اجسام (معکوس فرکانس طبیعی) مقایسه می‌شود و اگر زمان اعمال بار از سه برابر پریود طبیعی بیشتر باشد، بار استاتیکی، و اگر کمتر باشد، بار دینامیکی است. اگر زمان اعمال بار کوچک‌تر از نصف پریود طبیعی باشد، بارگذاری ضربه‌ای نامیده می‌شود [۷].

یک مفهوم مهم دیگر، تفاوت اساسی بین تغییر شکل‌های استاتیکی و دینامیکی است. در تغییر شکل استاتیکی، در هر لحظه، یک وضعیت تعادل استاتیکی برای کل جسم وجود دارد و برای هر المان جسم مجموع نیروهای وارده صفر است. وقتی بر روی یک جسم، بارگذاری با سرعت خیلی زیاد اعمال شود، یک بخش جسم تحت تنش قرار می‌گیرد، درحالی‌که هنوز نواحی دور از محل اعمال بار، آن تنش را حس نکرده‌اند. به عبارت دیگر، تنش باید درون جسم حرکت کند و مدت‌زمانی لازم است تا همه نقاط جسم آن تنش را تجربه کنند. تنش در اثر بارگذاری ضربه‌ای را که با سرعت مشخصی درون جسم حرکت می‌کند، اصطلاحاً موج تنش^۱ می‌نامند. بنابراین تغییر شکل‌های دینامیکی اغلب با انتشار امواج تنش همراه هستند، درحالی‌که تغییر شکل‌های استاتیکی در حال تعادل در نظر گرفته می‌شوند [۷].

امواج تنش در اجسام به صورت موج الاستیک، موج پلاستیک، و موج شوک انتقال می‌یابند. اگر سطح تنش در جسم از مقاومت تسلیم ماده کمتر باشد، تنها یک موج الاستیک در جسم به وجود می‌آید و با سرعت مشخص C در جسم حرکت می‌کند. سرعت C طبق رابطه (۱-۲) قابل محاسبه است:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1-2)$$

در رابطه بالا E مدول الاستیسیته و ρ چگالی جسم است.

هنگامی‌که مقدار تنش وارده از مقاومت تسلیم ماده تجاوز کند، علاوه بر موج الاستیک اولیه، یک موج تنش پلاستیک (به صورت تغییر شکل‌های پلاستیک) با سرعت کمتری در جسم ایجاد می‌شود. البته لازم به ذکر است که مقاومت تسلیم دینامیکی مواد، متفاوت از مقاومت استاتیکی بوده و معمولاً دو تا سه برابر آن است.

^۱ Stress wave

اگر هندسه جسم و بارگذاری به صورتی باشد که حالت کرنش تک‌محوری ایجاد کند، سرعت انتشار امواج پلاستیک با افزایش فشار، زیاد خواهد شد و ممکن است به موج الاستیک برسد. در این حالت موج به تدریج شکل تیزتری به خود گرفته و منجر به تولید موج شوک^۱ می‌گردد [۷].

انتشار امواج ناشی از تنش ضربه‌ای در اجسام، گاهی منجر به شکست هوایی می‌شود که در حالت بارگذاری استاتیکی اتفاق نمی‌افتد. به عنوان مثال، اگر به میله‌ای از جنس بتن بارمحوری استاتیکی F وارد شود میله صرفاً شتاب گرفته و حرکت خواهد کرد ولی اگر نیروی F ضربه‌ای باشد، ممکن است، انتشار موج فشاری و انعکاس آن به صورت موج کششی سبب شکست خردشدگی و جدا شدن تکه‌ای از میله شود. یا اگر به انتهای آزاد یک تیر طره‌ای نیروی F به صورت عمود بر محور تیر وارد شود، اگر F استاتیکی باشد، موجب خمیده شدن تیر و اگر ضربه‌ای باشد می‌تواند سبب شکست یک‌تکه از آن شود، درحالی‌که هنوز بخش‌های دیگر تغییر شکل نداده‌اند. [7] ضربه ممکن است به دلیل خرد شدن یا تسلیم شدن مواد در نقطه تماس و پوسته‌پوسته شدن در وجه پشتی، سبب خسارت به سیستم محافظتی شود. پوسته‌پوسته شدن با انعکاس امواج تنش، در سطح زیرین هدف ایجاد می‌شود. از دیدگاه دینامیکی، سازه می‌تواند مقدار زیادی انرژی را بدون آسیب شدید جذب کند. گرچه ممکن است سطح‌های تنش بیشتر از مقاومت نهایی مواد باشند، اما مدت‌زمان کوتاه آن‌ها می‌تواند از پیامدهای شدیدتر جلوگیری کند.

۲-۲ عوامل مؤثر بر فرآیند نفوذ [8,9]

فرآیند نفوذ را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد:

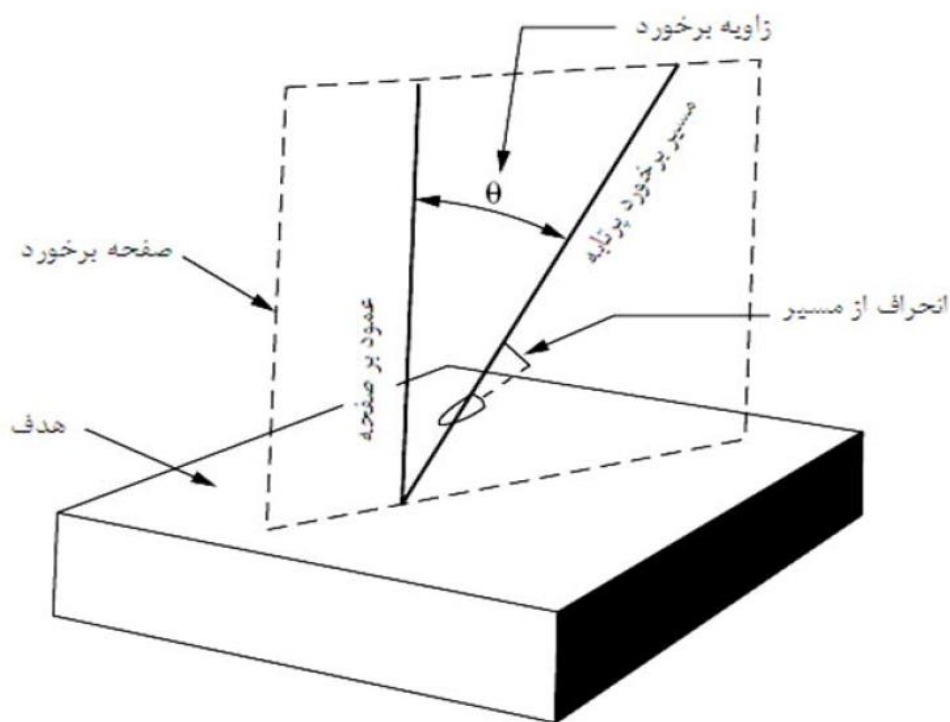
(۱) ضربه

(۲) عبور پرتابه از میان مواد حفاظت کننده

(۳) شرایط پس از نفوذ

¹ Shock wave

مسائل نفوذ پرتابه به عوامل متعددی وابسته است لذا می‌توان آن‌ها را در طبقه‌بندی‌های مختلفی مورد بررسی قرار دهیم. این طبقه‌بندی‌ها بر اساس نوع برخوردکننده، جنس پرتابه، شکل دماغه پرتابه، نسبت منظری پرتابه، جنس هدف، ضخامت هدف یک یا چندلایه بودن هدف، سرعت برخورد و زاویه برخورد (شکل ۱-۲) بررسی می‌شوند.



شکل ۱-۲ هندسه برخورد پرتابه

۱-۲-۲ پرتابه

از جمله عوامل مؤثر در نفوذ پرتابه می‌توان به جنس پرتابه، قطر، دماغه، وزن، خواص مکانیکی، سرعت برخورد، نسبت طول به قطر و زاویه برخورد اشاره کرد که در میزان نفوذ مؤثر واقع می‌شود.

الف) جنس پرتابه: از نظر جنس پرتابه‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند:

پرتابه صلب^۱: معمولاً در آن‌ها از آلیاژهای با سختی زیاد استفاده می‌شود.

پرتابه شکل‌پذیر^۲: این پرتابه‌ها از آلومینیوم، فولاد، مس و از این قبیل فلزات ساخته می‌شود.

ب) دماغه پرتابه: دماغه پرتابه، یکی از عوامل مهم و تعیین‌کننده مکانیزم شکست در هدف محسوب می‌شود و رابطه مستقیمی با میزان انرژی مصرفی هدف در طول فرآیند نفوذ دارد. هرچه قدر دماغه‌ی پرتابه تخت‌تر باشد در هنگام برخورد تغییر شکل بیشتری خواهد داشت و مقاومت آن کم‌تر می‌شود. برعکس این موضوع پرتابه‌های مخروطی هستند، که با تغییر شکل کمتر، نفوذ می‌کنند. در سرعت‌های کمتر از تسلیم دینامیکی پرتابه، هر چه دماغه پرتابه تخت‌تر باشد سرعت حد بالستیک یعنی حداقل سرعت لازم جهت ایجاد نفوذ کامل بیشتر خواهد بود و در سرعت‌های بیشتر از حد تسلیم دینامیکی پرتابه، دماغه اثر ناچیزی در سرعت حد بالستیک دارد. در زیر انواع شکل دماغه پرتابه آورده شده است:

(۱) پرتابه با دماغه نیمکره^۳

(۲) پرتابه با دماغه مخروطی^۴

(۳) پرتابه با دماغه نوک‌تیز^۵

(۴) پرتابه با دماغه تخت^۶

پ) نسبت طول به قطر پرتابه (L/D): افزایش این پارامتر سبب کاهش سرعت حد بالستیک می‌-

گردد و بر این اساس پرتابه‌ها به دو گروه عمده تقسیم می‌گردند:

(۱) پرتابه بلند ($L/D \gg 1$)

(۲) پرتابه کوتاه ($L/D \sim 1$)

ت) ترکیب مواد پرتابه

¹ Rigid

² Deformable

³ Hemispherical

⁴ Conical

⁵ ogive

⁶ Blunt

پرتابه از یک ماده به صورت یک تکه و یا پرتابه از چند ماده به صورت چند تکه^۱ ساخته شده باشد.

۲-۲-۲ اهداف

از جمله پارامترهای مؤثر هدف می‌توان به ضخامت، جنس، خواص مکانیکی، یکپارچه بودن یا لایه لایه بودن هدف، ترتیب چیدمان، فاصله میان لایه‌ها در هدف‌های چند لایه اشاره کرد که در فرآیند نفوذ مؤثر خواهد بود.

۲-۲-۲-۱ ضخامت هدف

هدف خیلی ضخیمی که تشکیل حفره در آن تحت تأثیر سطوح جانبی یا پشتی قرار نگیرد و ضخامت هدف بسیار بیشتر از قطر پرتابه باشد، آن را نیمه بی‌نهایت می‌نامند.

هدف ضخیم هدفی است که سطح پشتی آن فقط پس از نفوذ پرتابه در هدف، بر تشکیل حفره تأثیر می‌گذارد. چنانچه ضخامت هدف در حدود چند برابر قطر پرتابه باشد، آن را ضخیم می‌نامند.

هدف متوسط هدفی است که سطح پشتی آن در تمام طول فرآیند نفوذ، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی تغییر شکل دارد. چنانچه ضخامت هدف در حدود قطر پرتابه باشد، آن را هدف متوسط می‌نامند.

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).

۲-۲-۲-۲ جنس هدف

از جمله پارامترهای مؤثر در جنس هدف، چگالی، تنش تسلیم، تنش نهایی و سختی است. چگالی و انرژی مصرفی توسط هدف باهم ارتباط مستقیم داشته و با افزایش چگالی هدف، انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. افزایش تنش تسلیم و سختی هدف نیز سبب افزایش مقاومت در برابر نفوذ آن می‌-

^۱ Laminated

شود. ازجمله جنس‌های معمول برای هدف می‌توان به فلزات، بتن، خاک، سرامیک و مواد کامپوزیت اشاره کرد.

۲-۲-۳ تعداد لایه‌های هدف

عملکرد هدف‌های یکپارچه و چندلایه در برابر نفوذ پرتابه، متفاوت بوده و بسته به جنس و ضخامت هدف، ممکن است هدف‌های چندلایه از هدف‌های یکپارچه قوی‌تر یا ضعیف‌تر باشند. در اهداف لایه‌لایه شده‌ای که لایه‌ها باهم در تماس هستند، لایه‌ها روی هم تأثیر می‌گذارند ولی در هدف‌های بافاصله این تأثیر صرفاً به واسطه برخورد ایجادشده در لایه قبلی با لایه بعدی می‌باشد و کمتر از حالت اول است.

۲-۲-۳ سرعت برخورد

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در نوع رفتار پرتابه‌ها در هنگام نفوذ سرعت آن می‌باشد. که محدوده‌ی وسیعی از مسائل نفوذ را شامل می‌شود. در هر محدوده‌ی سرعت مدل و نظریه‌های تئوریک خاصی ارائه می‌گردد به همین دلیل سرعت نفوذ پرتابه به شکل‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند. اولین بار در سال ۱۹۶۰ هاپکینز و کولسکی^۱ محدوده‌های اصلی سرعت را پیشنهاد کردند و بعد از آن‌ها جانسون^۲ در سال ۱۹۷۲ به کمک عدد آسیب تقسیم‌بندی جدیدی ارائه کرد (جدول ۱-۲). عدد آسیب بدون بعدی است که به صورت $\frac{\rho v^2}{\bar{Y}}$ تعریف می‌گردد. که در آن v سرعت نسبی عمودی برخورد، ρ چگالی و $\bar{Y}$ تنش تسلیم متوسط است.

^۱ Hopkins and Kolsky

^۲ Johnson

جدول ۲-۱ دسته‌بندی انواع برخورد بر اساس عدد آسیب

نوع رفتار	سرعت m/s	عدد آسیب
رفتار الاستیک	۰/۵	۰/۰۰۰۰۱
رفتار پلاستیک	۵	۰/۰۰۱
نفوذ با سرعت ماورای صوت	۱۰۰۰	۴۰
رفتار هیدرودینامیک	۵۰۰۰	۱۰۰۰
ضربه انفجاری	۱۵۰۰۰	۱۰۰۰۰

در سرعت‌های کمتر از ۲۵۰ متر بر ثانیه بازه زمانی وقوع پدیده نفوذ معمولاً در حدود $\frac{1}{1000}$ ثانیه است. با افزایش سرعت برخورد از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر بر ثانیه رفتار موضعی مواد هدف مورد توجه قرار می‌گیرد. در زمان وقوع پدیده نفوذ ناحیه مؤثر محدوده‌ی ضربه به‌طور تقریبی ۲ تا ۳ برابر قطر گلوله از مرکز ضربه را شامل می‌شود. به‌علاوه با افزایش محدوده‌ی سرعت از ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر بر ثانیه درهم‌فشرده‌گی بسیار بالای مواد با یکدیگر باعث می‌شود تا مواد هدف با یکدیگر تماس شدیدی پیدا کرده و به‌صورت مایع درآیند. در سرعت‌بالای ۱۲۰۰۰ متر بر ثانیه تبادل انرژی فوق‌العاده زیادی اتفاق می‌افتد و برخی مواد تشکیل‌دهنده هدف و پرتابه در زمان برخورد بخار می‌شوند. در جدول زیر تقسیم‌بندی دیگری را برای سرعت برخورد پرتابه مشاهده می‌شود (جدول ۲-۲).

جدول ۲-۲ دسته‌بندی انواع برخورد بر اساس اندازه سرعت برخورد [۸]

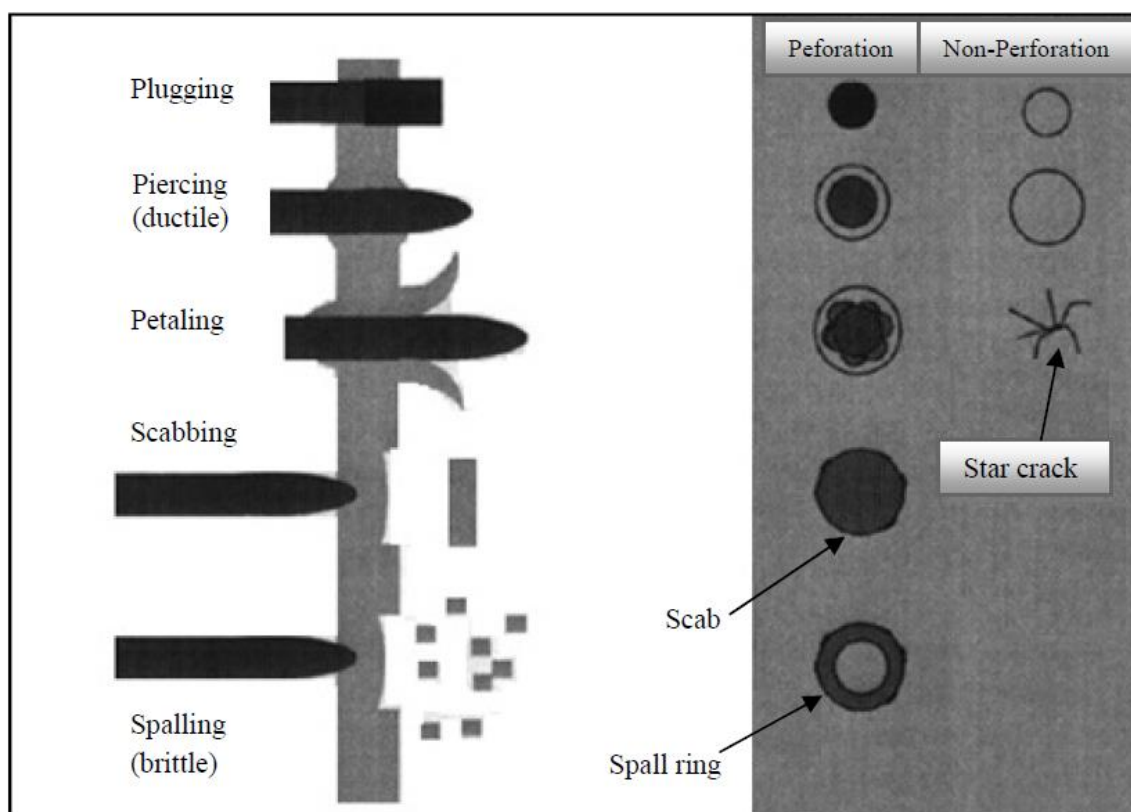
محدوده سرعت m/s	نوع سرعت	رفتار
۰-۱۰۰	سرعت‌های پایین	انتشار امواج الاستیک
۱۰۰-۱۰۰۰	سرعت‌های متوسط	انتشار امواج الاستوپلاستیک
۱۰۰۰-۳۰۰۰	سرعت‌های بالا	انتشار امواج الاستوپلاستیک یا رفتار هیدرودینامیک
بیش از ۳۰۰۰	سرعت‌های بسیار بالا	رفتار هیدرودینامیک

۲-۲-۴ زاویه برخورد

طبقه‌بندی بر اساس زاویه برخورد به دو نوع برخورد عمودی و مایل تقسیم می‌شود. با افزایش زاویه برخورد میزان نفوذ پرتابه در هدف کاهش می‌یابد و پرتابه نیز بیشتر دچار تغییر شکل می‌گردد.

۲-۳ مکانیزم‌های شکست هدف

در هدف‌های ضخیم نفوذ پرتابه به شکل ایجاد حفره صورت می‌پذیرد ولی در مورد هدف‌های نازک و متوسط، پرتابه می‌تواند به‌طور کامل در هدف نفوذ نماید و بسته به شکل نوک پرتابه، جنس و ضخامت هدف و حدود سرعت برخورد، مکانیزم شکست از حالتی به حالت دیگر تغییر می‌کند. در زیر برخی از انواع مکانیزم‌های شکست توضیح داده شده است (شکل ۲-۲) [۶، ۸، ۱۰].



شکل ۲-۲ مکانیزم‌های شکست

۲-۳-۱ ایجاد حفره^۱

برای برخورد و نفوذ در هدف‌های نیمه بی‌نهایت، مکانیزم اولیه آسیب ایجاد حفره می‌باشد. فرآیند ایجاد حفره شدیداً به خواص مادی پرتابه و هدف وابسته است. هرچه چگالی پرتابه بیشتر باشد، تمرکز انرژی جنبشی و در نتیجه عمق حفره بیشتر خواهد بود. افزایش مقاومت تسلیم پرتابه سبب کاهش انهدام قارچی^۲ (به جریان یافتن مواد سر پرتابه پس از برخورد آن به هدف، در جهت شعاعی و افزایش سطح مقطع پرتابه گویند) آن و عمیق‌تر شدن حفره می‌گردد. اگر انهدام قارچی پرتابه کمتر باشد، عمق نفوذ بیشتر می‌شود، ولی اگر انهدام بیشتر شود، حفره پهن‌تر و از عمق آن کاسته می‌شود.

۲-۳-۲ پلاگینگ^۳ (ترک مخروطی)

در اثر برخورد پرتابه با دماغه پهن باهدف نسبتاً سخت و دارای ضخامتی در حدود قطر پرتابه، قسمتی از هدف که پلاگ^۴ نامیده می‌شود از آن جدا شده و همراه پرتابه به سمت جلو حرکت می‌کند. این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که جریان شعاعی مواد کم باشد و مواد جلوی پرتابه به سمت جلو فشرده شده و برش ایجاد گردد. تخت بودن نوک پرتابه و سختی هدف، جریان شعاعی ماده هدف را کاهش می‌دهد.

۲-۳-۳ پتالینگ^۵ یا گلبرگی شدن

در اثر نفوذ پرتابه در هدف‌های نرم ضخیم، جریان مواد هدف در خلاف جهت حرکت پرتابه می‌تواند منجر به تشکیل حالت گلبرگی در جلوی هدف گردد. همچنین وقتی پرتابه نوک‌تیز به هدف نرم

^۱ Cratering

^۲ Mushrooming

^۳ Plugging

^۴ Plug

^۵ Petaling

نسبتاً نازکی برخورد کند، شکست ستاره‌ای شکلی از یک نقطه شروع شده و به صورت شعاعی در مسیرهای مجزایی منتشر می‌شود و چندین گلبرگ به شکل مثلث ایجاد شده و به سمت عقب خم می‌گردد.

۲-۳-۴ اسکبینگ^۱ (پوسته پوسته شدن هدف)

یک نوع شکست هدف در اثر ضربه است. این نوع شکست از تغییر شکل‌های بزرگ ناشی می‌شود با شروع ترک از یک ناحیه غیریکنواخت که در عرض ضربه قرار دارد اتفاق می‌افتد.

۲-۳-۵ اسپالینگ^۲ (تکه تکه شدن)

یکی از شایع‌ترین انواع شکست در اثر ضربه می‌باشد. این نوع شکست ناشی از موج بازگشتی از سطح عقبی ورق هدف است این پدیده بیشتر در مواردی اتفاق می‌افتد که تحمل فشار آن‌ها بیشتر از کشش است.

۲-۳-۶ خردشدگی^۳

این شکست در اثر برخورد با هدف ترد ایجاد می‌شود و ترکش‌های ایجاد شده در اثر شکست هدف، خود می‌تواند مانند پرتابه عمل نموده و در هدف‌های دیگر نفوذ نماید.

۲-۳-۷ شکست نرم یا گسترش حفره نرم^۴

¹ Scabbing

² Spalling

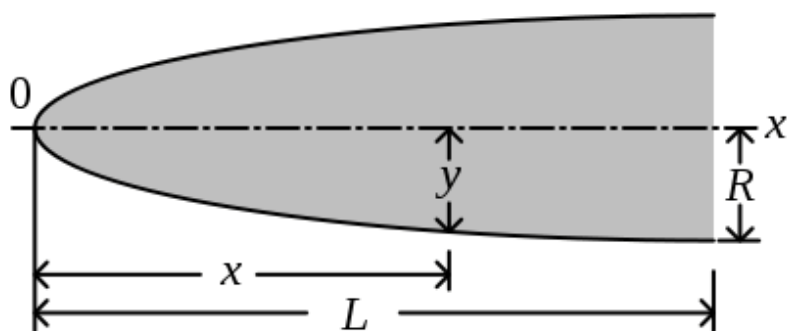
³ Fragmentation

⁴ Ductil Hole Enlargement

در برخورد پرتابه‌های نوک‌تیز با هدف‌های نرم ضخیم، جریان شعاعی مواد ایجاد شکست نرم می‌نماید.

۴-۲ انواع دماغه‌ی مخروطی شکل نوک پرتابه

همان‌طور که گفته شد از عوامل تأثیرگذار در نفوذ پرتابه هندسه دماغه پرتابه می‌باشد که در این رابطه به بررسی بیشتر پرداخته می‌شود. در تمام دماغه‌های ارائه شده L طول کل دماغه، R شعاع پایه، y شعاع در نقطه دلخواه x و x از بازه صفر در ابتدای دماغه تا L پایه‌ی آن متغیر است (شکل ۲-۳).



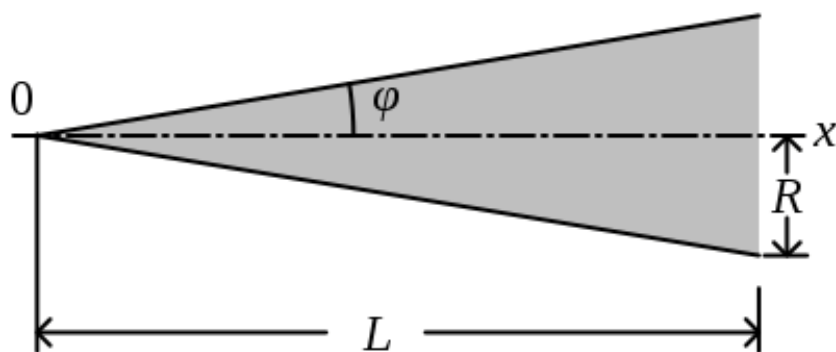
شکل ۲-۳ ابعاد کلی دماغه

۴-۲-۱ دماغه‌ی مخروطی نوک‌تیز^۱

رایج‌ترین دماغه‌ی کاربردی، دماغه‌ی مخروطی نوک‌تیز است (شکل ۴-۲). این هندسه به دلیل راحتی در ساخت از محبوبیت خاصی برخوردار است. با این وجود، این دماغه از مشخصات پسای^۲ نامناسبی برخوردار است [۱۱].

^۱ Conical nose

^۲ Drag characteristic

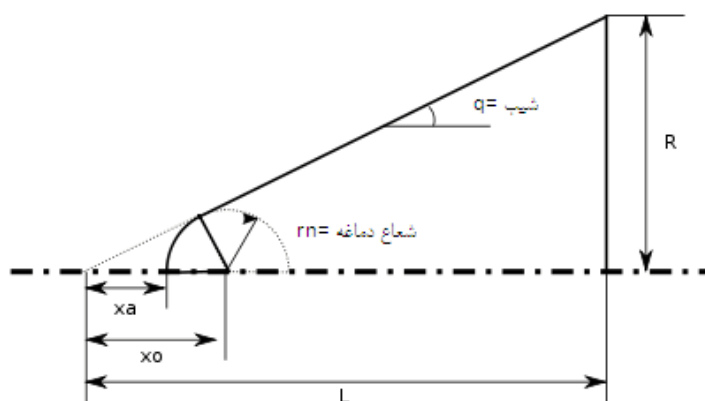


شکل ۴-۲ دماغه مخروطی ساده

۲-۴-۲ دماغه‌ی مخروطی با نوک کروی^۱

در کاربردهای عملی، اغلب، دماغه‌ی مخروطی با نوک کروی به کار می‌رود. همان‌طور که در

شکل (۵-۲) ملاحظه می‌شود rn شعاع کره، q شیب و xO فاصله رأس از مرکز کره است [۱۱].



شکل ۵-۲ دماغه مخروطی با نوک کروی

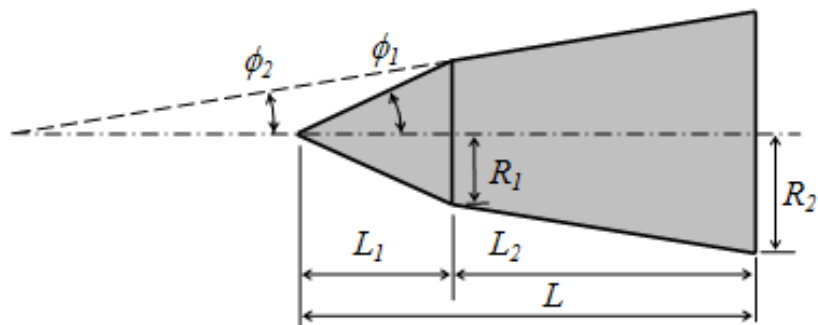
۲-۴-۳ دماغه‌ی دو مخروطی^۲

این دماغه همان‌طور که ملاحظه می‌شود (شکل ۶-۲) متشکل از یک مخروط ساده به طول L_1 در

جلو است که یک مخروط ناقص به طول L_2 در انتها به آن وصل شده است [۱۱].

^۱ Spherically Blunted Cone

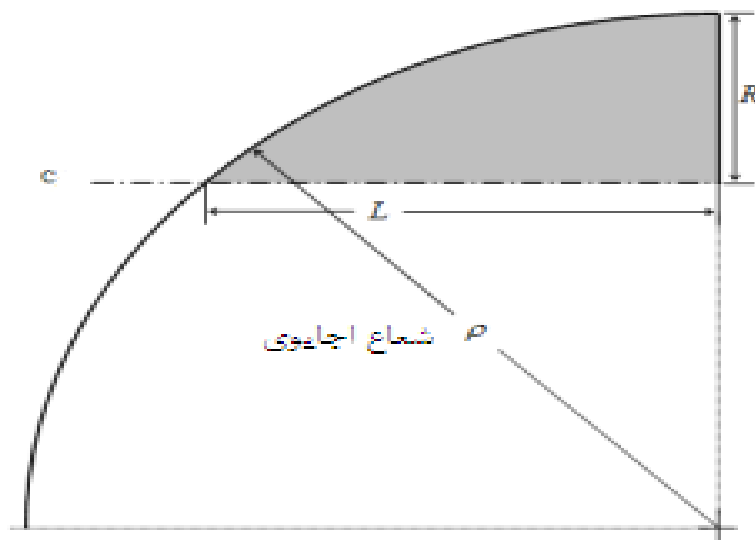
^۲ Bi-conic



شکل ۲-۶ دماغه دو مخروطی

۲-۴-۴ دماغه‌ی نوک‌تیز^۱

یکی از معروف‌ترین انواع دماغه در علوم نظامی دماغه‌ی نوک‌تیز است. این هندسه بخشی از قطاع یک دایره که در آن پایه‌ی دماغه بر شعاع دایره مماس است. این شکل به دلیل راحتی در ساخت دارای محبوبیت زیادی می‌باشد. با توجه به شکل (۲-۷)، ρ شعاع دایره است که شعاع نوک-تیز (ogive) نامیده می‌شود [۱۱].

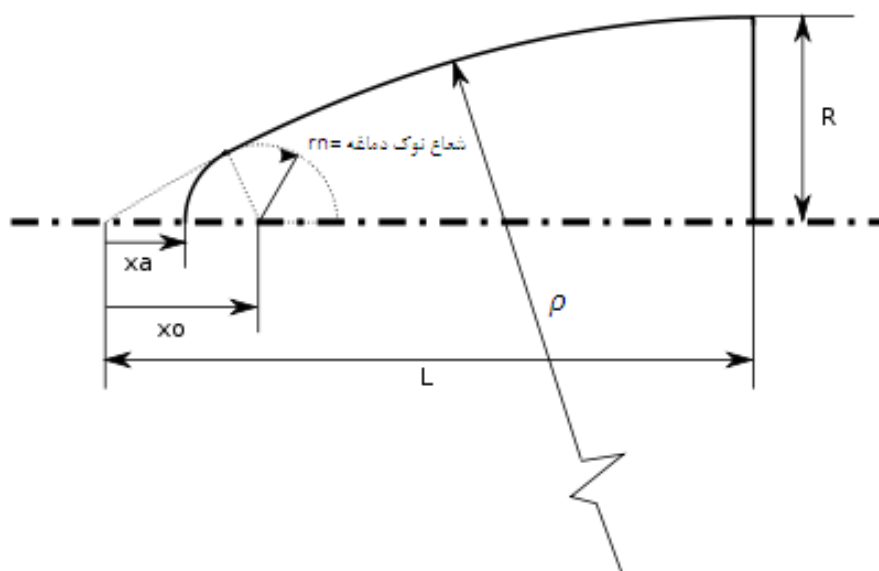


شکل ۲-۷ دماغه نوک‌تیز

^۱ Ogive

۲-۴-۵ دماغه‌ی نوک‌تیز با نوک کروی^۱

همان‌طور که در شکل (۲-۸) ملاحظه می‌کنید اگر به فاصله x_0 از نوک دماغه یک دایره به شعاع m بر دماغه‌ی نوک‌تیز مماس کنیم، دماغه‌ی نوک‌تیز با نوک کروی حاصل می‌شود [۱۱].



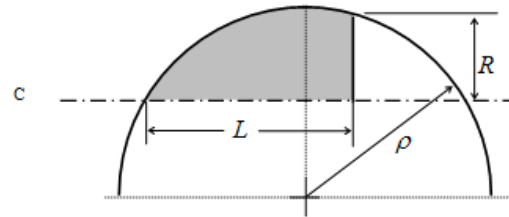
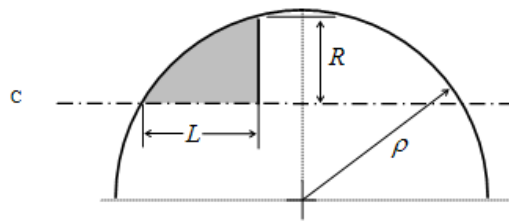
شکل ۲-۸ دماغه نوک‌تیز با نوک کروی

۲-۶-۴ دماغه‌ی نوک‌تیز قطاعی^۲

این دماغه (شکل ۲-۹) نیز قطاعی از دایره است با این تفاوت که شعاع دایره به‌عنوان شعاع اجایوی محسوب نمی‌شود و شعاع بر پایه‌ی دماغه مماس نیست [۱۱].

¹ Spherically Blunted Ogive Nose

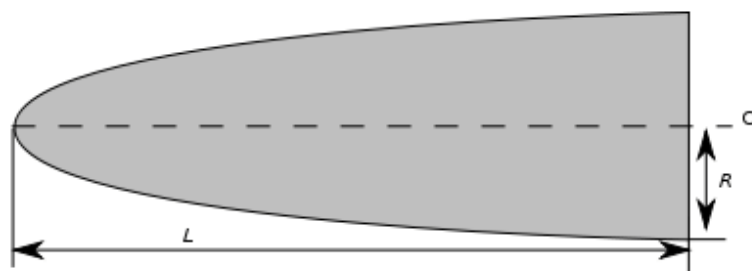
² Secant ogive Nose



شکل ۹-۲ دماغه نوک تیز قطاعی

۷-۴-۲ دماغه‌ی بیضوی^۱

این دماغه (شکل ۱۰-۲) نیمی از یک بیضی است که محور اصلی آن خط تقارن محسوب می‌شود با دوران این شکل حول خط تقارن یک نیم‌کره دوار^۲ ایجاد می‌شود که در سرعت‌های پایین‌تر از سرعت صوت^۳ کاربرد فراوان دارد [۱۱].



شکل ۱۰-۲ دماغه بیضوی

^۱ Elliptical Nose

^۲ Prolate Hemispheroid

^۳ Subsonic

۲-۵ فرآیند نفوذ

به طور کلی نفوذ پرتابه‌ها در اهداف نیمه بی‌نهایت را می‌توان به چهار مرحله تقسیم نمود [۷]:

۲-۵-۱ مرحله گذرا^۱

به محض اصابت پرتابه به هدف، فشاری در سطوح تماس هدف و پرتابه ایجاد می‌شود، که تحت حالت تنش یک‌بعدی است. این امر به این دلیل است که موج‌های رها شونده از سطوح آزاد هنوز فرصت پیدا نکرده‌اند و تنها موج تنش، همان موج فشاری یک‌بعدی ناشی از فشار سطح برخورد می‌باشد. فشار در این حالت از رابطه ۲-۲ قابل محاسبه است.

$$P_H = \rho U_S U_P \quad (2-2)$$

U_P و U_S به ترتیب سرعت موج تنش و سرعت ذرات ماده نسبت به سطح تماس می‌باشد. در نتیجه فشار ایجاد شده در هدف و پرتابه متفاوت خواهد بود. مهم‌ترین پارامترهای نفوذ در این مرحله، شامل نسبت چگالی پرتابه و هدف و مقاومت تراکم‌پذیری مواد در مجاورت سطح تماس می‌باشند.

۲-۵-۲ مرحله نفوذ پایدار^۲

در این مرحله انرژی جنبشی پرتابه با تبدیل شدن به عامل جریان مواد، مستهلک می‌شود. به طوری که در هدف، حفره ایجاد می‌کند و هم‌زمان توده مواد تخریب شده پرتابه و هدف در اثر موج‌های تخریب به صورت جریانی از ذرات و تکه‌ها از حفره بیرون می‌آیند. در طی این مرحله موج‌های ضربه در پرتابه و هدف منتشر می‌شوند و هم‌زمان موج‌های رها شده از سطوح آزاد هدف و پرتابه باعث جریان عرضی هرچند خفیف در هدف و پرتابه می‌گردد. برای پرتابه‌های با L/D کوچک این مرحله

¹ Transient

² Steady- State Penetration

بسیار کوتاه و قابل صرف نظر کردن است. درحالی که برای پرتابه‌های با L/D بزرگ این مرحله طولانی‌ترین و فاز اصلی فرآیند نفوذ می‌باشد. در طی این مرحله، عوامل مؤثر در فرآیند نفوذ، شامل چگالی، مقاومت تراکم‌پذیری مواد و همچنین سرعت پرتابه، هندسه پرتابه و نحوه برخورد می‌باشد. در طی این مرحله که می‌توان آن را نفوذ اولیه (مرحله‌ای از نفوذ که در طی آن پرتابه مستقیماً نقش دارد) نامید، پالس‌های شوک اولیه توسط موج‌های آزاد شده از سطوح تضعیف می‌شوند، در نتیجه سرعت شوک کاهش می‌یابد تا در نهایت به سرعت صفر پرتابه منجر شود. میزان فشار ایجاد شده در پرتابه طی این مرحله را می‌توان به کمک رابطه ۲-۳ تقریب زد.

$$P > 0.5\rho U_p^2 \quad (2-3)$$

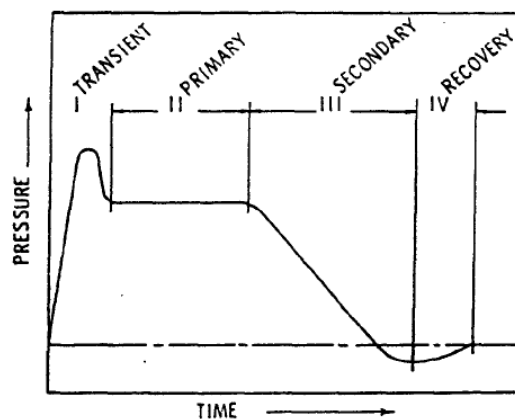
۲-۵-۳ مرحله تعریض حفره نفوذ^۱

بعد از اینکه کل پرتابه تخریب شد، گسترش حفره نفوذ همچنان ادامه می‌یابد. علت این امور انرژی است که هنوز در هدف مستهلک نشده است و به صورت موج‌های رفت و برگشتی کششی و فشاری وجود دارند. هر موج فشاری رها شده از مرزهای حفره نفوذ، با اصابت به مرزهای آزاد، تبدیل به موج کششی می‌شود. اما در هر دو نوع این موج‌ها مسیر جریان ماده در راستای تعریض حفره نفوذ می‌باشد. این موج‌های کششی باز در برخورد با سطوح حفره نفوذ، تبدیل به موج فشاری می‌شوند. این روند تا جایی که دانسیته انرژی موج‌های رفت و برگشتی از میزان مقاومت ماده هدف کمتر شوند، ادامه می‌یابد. در این حالت موج‌های تنش از حالت شوک به پلاستیک و سپس به الاستیک تبدیل می‌شوند و در هدف به صورت ارتعاش مستهلک می‌شوند.

^۱ Cavitation

۲-۵-۴ مرحله بازیافت^۱

نتایج تجربی نشان می‌دهد که تغییرات قابل ملاحظه‌ای پس از پایان یافتن انرژی نفوذ در هدف رخ می‌دهد. برگشت‌های الاستیک حفره نفوذ، شکست‌های ترد در محدوده سطوح حفره و تبلور مجدد مواد هدف در قسمت‌های قابل‌رؤیت و داخل هدف، ازجمله این رویدادها می‌باشند. در شکل (۲-۱۱) منحنی فشار-زمان در طی این چهار مرحله نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۱ منحنی فشار-زمان مراحل مختلف فرآیند نفوذ [۷]

۲-۶ کارهای انجام‌شده در زمینه نفوذ پرتابه

پیشینه مطالعه نفوذ پرتابه در خاک درشت‌دانه به سال ۱۷۴۲ و فرمول عمق نفوذ رابین-اوایلر برمی‌گردد. از آن زمان تعدادی از مدل‌های تجربی پیشنهاد شد که بعضی از آنها هنوز هم استفاده می‌شود [۱۶]. گرچه این مسئله قرن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است ولی تعداد مطالعات تجربی سیستماتیک و دقیق موجود در ادبیات فنی باز هم کم است.

^۱ Recovery

آلن و همکاران^۱ [۱۲، ۱۳، ۱۴] تعدادی داده‌های آزمایشی و یک مدل نظری برای نفوذ پرتابه‌های صلب در شن و ماسه ارائه دادند درحالی‌که جانسون و همکاران^۲ [۱۵] یک مدل برای بررسی اثرات سرعت ضربه و مقاومت شن و ماسه در طول زره‌پوش ارائه کردند.

در سال ۱۹۴۰ یک نظریه هیدرودینامیکی حالت پایدار به‌منظور مدل نفوذ پرتابه‌های سرعت‌بالا به وجود آمد. از مهم‌ترین پارامترها چگالی پرتابه و هدف بود که رابطه خطی متناسب با طول پرتابه داشت [۱۷].

$$P = L \sqrt{\frac{\rho_P}{\rho_t}} \quad (۴-۲)$$

که در رابطه بالا ρ_P و ρ_t به ترتیب چگالی پرتابه و مواد هدف بوده و L طول پرتابه و P میزان نفوذ پرتابه می‌باشد.

در سال ۱۹۹۲ فرستال و لوک^۳ [۱۸] با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیلی نفوذ پرتابه‌های فولادی نوک‌تیز به وزن ۲۳/۱ کیلوگرم و سرعت ۰/۳ کیلومتر بر ثانیه در خاک ماسه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها معادله نفوذی بر اساس نظریه گسترش حفره کروی را توسعه دادند که نشانگر اهمیت شکل دماغه پرتابه و خواص فیزیکی خاک بود. فرسایش نامتقارن دماغه پرتابه باعث شده بود که پرتابه خم و شکسته شود.

نچیتایلو^۴ در مقاله خود به بررسی نفوذ پرتابه‌های سرعت‌بالا در خاک پرداخت که در آن تأثیر شکل مواد و ساختار یکپارچگی پرتابه‌های مختلف بر عمق نفوذ در محدوده‌ی سرعت‌های ۰/۳ تا ۰/۴ کیلومتر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. نچیتایلو به این نتیجه رسید که با افزایش سرعت ضربه عمق نفوذ افزایش خواهد یافت پس از بررسی سرعت نفوذ چندین پرتابه در ماسه به این نتیجه رسید که وزن، قدرت و رطوبت خاک نقش مهمی را در نفوذ پرتابه ایفا می‌کند. برای پرتابه‌های آلومینیومی، فولادی و تنگستن عمق نفوذ پرتابه در خاک رابطه‌ی خطی با طول پرتابه ندارد و می‌توان گفت

¹ Allen et al

² Johnson et al

³ Forrestal and luk

⁴ Nechitailo

حساسیت عمق نفوذ به طول پرتابه بسیار کم است. قطر حفره ایجادشده در ماسه در اثر نفوذ پرتابه حدود سه تا چهار برابر قطر پرتابه است. پس از بررسی‌های انجام‌گرفته توسط این محقق می‌توان گفت آب در فرآیند نفوذ در ماسه نقش خنک‌کننده دارد و باعث فرسایش کم‌تر پرتابه‌ها می‌شود که همین امر باعث شده تا عمق نفوذ پرتابه تنگستن در خاک ماسه‌ای اشباع سه تا پنج برابر بیشتر از خاک خشک باشد [۱۷].

ساواتو^۱ و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۰۱ به‌طور تجربی سرعت نفوذ پرتابه‌های فولادی در شن و ماسه اشباع را مورد مطالعه قرار دادند. طبق تحقیقات آن‌ها در محدوده‌ی سرعت نسبتاً کم، عمق نفوذ با افزایش سرعت ضربه افزایش می‌یابد. با این حال در سرعت بیش از ۱/۳ کیلومتر بر ثانیه عمق نفوذ به دلیل افزایش سطوح تنش و دمای ناشی از اصطکاک با شن و ماسه کاهش می‌یابد. ساواتو و همکاران نفوذ پرتابه‌های آلومینیومی، فولادی و تنگستن در ماسه خشک و مرطوب را در محدوده‌ی سرعت ۰/۸ تا ۳ کیلومتر بر ثانیه را مورد مطالعه قرار دادند. پرتابه‌های مورد بررسی کروی و نوک‌تیز بودند که وزنی بین ۷ تا ۳۰ گرم داشتند. پرتابه‌ها مسیر نفوذ مستقیمی را در خاک طی کردند. سایش و ذوب شدن قابل‌توجهی در نوک پرتابه وجود داشت و قطر حفره‌ی ایجادشده در اثر نفوذ پرتابه ۳ تا ۴ برابر قطر پرتابه بود.

مشاهدات نشان می‌دهد که پرتابه‌های با نسبت $\frac{L}{D}$ بین ۸ تا ۱۲ در اثر نفوذ خم‌شده است. طبق بررسی‌های ساواتو پرتابه‌ای که بهترین عملکرد را داشته باشد باید نسبت $\frac{L}{D}$ بین ۵ تا ۷ داشته باشد تا از خم شدن پرتابه جلوگیری شود. طبق نظریه این محقق هنگامی که سرعت پرتابه کمتر از سرعت بحرانی V_c باشد عمق نفوذ تقریباً متناسب با $V^{0/4}$ است. خصوصیات مواد پرتابه در میزان نفوذ تأثیرگذار است به‌طوری‌که پرتابه‌هایی که دمای ذوب پایین دارند نفوذ کمتری دارند. در پرتابه آلومینیومی حداکثر عمق نفوذ ۵ سانتی‌متر همچنین در پرتابه فولادی حداکثر عمق نفوذ ۲۴ سانتی‌متر و پرتابه تنگستن ۴۱ تا ۵۰ سانتی‌متر بوده است [۱۹].

¹ Savvateev

رابطه ساواتو برای میزان نفوذ در ماسه خشک به صورت زیر ارائه شده است:

$$P = \left(A\sqrt{D} + BL - C \frac{D}{L} - E \right) \frac{\rho_P}{10} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{0.4} \quad (5-2)$$

$$A = 26.2 \frac{cm^{3.5}}{g}$$

$$B = 1.75 \frac{cm^3}{g}$$

$$C = 1 \frac{cm^4}{g}$$

$$E = 5.3 \frac{cm^4}{g}$$

در رابطه بالا D قطر پرتابه، L طول پرتابه، V سرعت برخورد، V_0 معادل ۱ کیلومتر بر ثانیه می-باشد.

$$V_C = \sqrt{\frac{4m}{m} (c_b \Delta T + \lambda_b)} = 2\sqrt{c_b \Delta T + \lambda_b} \quad (6-2)$$

$$\Delta T = T_m - T_0$$

T_m دمای ذوب پرتابه، T_0 دمای اولیه پرتابه، λ_b گرمای ذوب پرتابه و c_b ظرفیت گرمایی ویژه می-باشد. طبق معادله بالا سرعت بحرانی تنگستن برابر ۲/۴ کیلومتر بر ثانیه، فولاد ۱/۸۴ کیلومتر بر ثانیه می-باشد. پرتابه‌های فولادی کروی با وزن ۸ گرم حداکثر نفوذ در خاک را در سرعت ۱/۶ کیلومتر بر ثانیه داشتند و همچنین پرتابه میله‌ای فولادی به وزن ۷ گرم حداکثر عمق نفوذ را در سرعت ۲ تجربه کرده است [۱۹].

بورویک^۱ و همکاران در مقاله‌ی خود به مطالعه تجربی و عددی نفوذ گلوله‌های کوچک اسلحه در خاک درشت‌دانه پرداختند. در آزمایش‌های تجربی ۵ نوع خاک درشت‌دانه برای هدف در نظر گرفته شد. (۲-۰ میلی‌متر ماسه مرطوب، ۲-۰ میلی‌متر ماسه خشک، ۸-۲ میلی‌متر شن، ۱۶-۸ میلی‌متر

¹ Borvik

سنگ خردشده و ۲۲-۱۶ میلی متر تکه سنگ خردشده). بورویک این اهداف را تحت شلیک چهار نوع گلوله کوچک (گلوله ۷/۶۲ میلی متر با هسته سربی نرم، ۷/۶۲ میلی متر AP با هسته فولادی سخت، گلوله ۱۲/۷ میلی متری با هسته فولادی نرم و گلوله ۱۲/۷ میلی متری با هسته تنگستن) بررسی کرد. در تمام آزمایش‌ها سرعت اولیه پرتابه و عمق نفوذ در خاک درشت‌دانه برای هر نوع گلوله اندازه‌گیری شد و با استفاده از یک مدل عددی مبتنی بر ذرات گسسته به بررسی این موضوع و مقایسه با نتایج تجربی و آزمایشگاهی پرداخت.

مشاهدات مهم حاصل از مطالعه بورویک و همکاران این است که عمق نفوذ در شن و ماسه خشک به شدت تحت تأثیر انحراف گلوله از مسیر اصلی است. طبق نتایج آزمایش‌های بورویک و همکاران روشن است که عمق نفوذ در ماسه مرطوب مستقل از نوع گلوله به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از ماسه خشک است. به‌طور مثال برای گلوله ۷/۶۲ میلی متر و ۱۲/۷ میلی متر AP عمق نفوذ در شن و ماسه مرطوب بیش از ۲ برابر شن و ماسه خشک بوده است. علت این امر به‌طور کامل درک نشده است اما به نظر می‌رسد به علت ترکیبی از کاهش اصطکاک بین دانه‌های خاک و افزایش فشار منفی در شن و ماسه مرطوب باشد [۱۶].

تراکم ذرات خاک موضوعی است که باید در محاسبه عمق نفوذ پرتابه در نظر گرفت. شی^۱ و همکاران در مقاله خود در سال ۲۰۱۴ با استفاده از معادلات p - α و موهر کولمب و ترسکا به توصیف روابط سازنده‌ای برای شن و ماسه پرداختند. سه سازوکار اصلی شن و ماسه در پاسخ به فشردگی و تراکم عبارت‌اند از: ۱- فشردگی سازی الاستیک ۲- لغزش ۳- خرد شدن.

چهار منطقه مجزا بر اساس مکانیزم‌های بالا ممکن است رخ دهد:

- ۱- پاسخ تنش-کرنش الاستیک است که مربوط به تغییر شکل‌های الاستیک ذرات است.
- ۲- تنش محوری اعمالی از اصطکاک استاتیک بین دانه‌ها بیشتر است و رفتار ماسه غیر الاستیک است.

¹ Shi

۳- قرار گرفتن دانه‌ها در فضاهای خالی باعث افزایش چگالی می‌شود و می‌توان گفت دانه‌ها در میان یکدیگر قفل می‌شوند.

۴- در این ناحیه ذرات شروع به خرد شدن می‌کنند.

در منطقه الاستیک پاسخ ماسه مطابق قانون هوک است و رابطه تنش کرنش توسط مدول یانگ و نسبت پواسون و مدول بالک بیان می‌شود. در منطقه پلاستیک می‌توان از معیارهای عملکرد موهر کولمب و ترسکا استفاده کرد [۲۰].

عمق نفوذ پرتابه مخروطی:

پس از برخورد پرتابه با سرعت اولیه قابل توجه نیروهای نرمال و مماسی بر روی یک المان کوچک برابر است با:

$$dF_t = 2\pi \frac{r}{\sin\theta} \sigma_n \mu_0 dr \quad dF_n = 2\pi \frac{r}{\sin\theta} \sigma_n \quad (۷-۲)$$

نیروی محوری بر روی دماغه پرتابه برابر است با:

$$F = 2\pi \int_0^{r_0} r \sigma_n \left(1 + \frac{\mu_0}{\tan\theta}\right) dr \quad (۸-۲)$$

σ_n تنش نرمال دماغه پرتابه

r_0 و θ شعاع پرتابه و نصف زاویه نوک دماغه

F_n نیروی نرمال

F_t نیروی مماسی

رابطه سرعت پرتابه V_m و سرعت گسترش حفره مطابق زیر می‌باشد.

$$V = V_m \sin\theta \quad (۹-۲)$$

مقاومت را می‌توان با استفاده از توابع چند جمله سرعت گسترش حفره توصیف کرد: [21,22]

$$\sigma_n = q_1 + q_2 v + q_3 v^2 \quad (۱۰-۲)$$

از ترکیب معادله ۸ و ۱۰ داریم:

$$F = \alpha_s + \beta_s v_m + \eta_s v_m^2 \quad (11-2)$$

$$\alpha_s = \pi r_0^2 (1 + \mu_0 \cot \theta) q_1$$

$$\beta_s = \pi r_0^2 (1 + \mu_0 \cot \theta) q_2 \sin \theta$$

$$\eta_s = \pi r_0^2 (1 + \mu_0 \cot \theta) q_3 \sin^2 \theta$$

معادله دیفرانسیل حرکت پرتابه :

$$m \frac{dv_m}{dt} = -F \quad (12-2)$$

جایی که m جرم پرتابه و عمق نفوذ از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$h = m \int_0^{v_0} \frac{v_m}{\alpha_s + \beta_s v_m + \eta_s v_m^2} dv_m \quad (13-2)$$

وُرن^۱ و همکاران به بررسی نفوذ میله‌های بلند با سرعت تقریباً ۱۰۰ متر بر ثانیه در ماسه خشک پرداختند. او هدف از این کار را ایجاد یک درک اساسی از شکل‌گیری و انتقال زنجیره‌های نیروی دینامیکی و حرکت و شکست دانه‌ها ماسه می‌دانست. آن‌ها در یافته‌های خود یک ساختار دو موجی را مشاهده کردند که متشکل از موج تراکمی و آسیب بود همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در سرعت کمتر از ۳۵ متر بر ثانیه شکست دانه‌های ماسه اتفاق نمی‌افتد [۲۳].

لو و همکاران [۱۰۰] شبیه‌سازی عددی بر روی ساختارهای حفاظتی جدیدی که با ماسه پر شده است را با استفاده از نرم‌افزار LS-Dyna و روش عددی sph انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد زمانی که بی‌ثباتی در پرتابه اتفاق می‌افتد نیروی و گشتاور مقاوم در پرتابه بلند بزرگتر است. همچنین پرتابه‌هایی که با زاویه ۴۵ درجه شلیک شده‌اند باعث ایجاد انرژی بیشتر در ساختار محافظتی و نفوذ کمتر می‌شود.

¹ Vooren

فصل سوم

روش‌های عددی

۳- مقدمه‌ای بر روش‌های عددی

مدل‌سازی عددی ابزار مهمی برای تحلیل مسائل کاربردی پیچیده در علوم مهندسی می‌باشد. روش‌های عددی جنبه‌های مهم یک مسئله فیزیک را به یک فرم گسسته از توصیف معادلات ریاضی درآورده، معادلات را بازسازی کرده و سپس توسط رایانه حل می‌کنند. درواقع می‌توان گفت در تحلیل عددی با استفاده از قدرت محاسباتی رایانه‌ها، برخلاف روش‌های قدیمی که بر اساس یک سری داده‌ها و فرضیات بود، در ابتدا به سراغ پیکره اصلی مسئله رفته و به جزئیات آن می‌پردازد. روش‌های عددی مشکلات روش‌های تجربی از قبیل گرانی، زمان زیاد و آزمایش‌های خطرناک درسایت را به همراه ندارد ازاین‌رو می‌توان آن را جایگزین مناسبی به‌جای روش‌های تجربی به شمار آورد. محاسبات عددی بیشتر زمانی مفید واقع می‌شوند که مطالعات مسئله موردنظر با جزئیات کامل توسط آزمایش‌ها، کاری سخت و طاقت‌فرسا باشد. از موارد دیگر کاربرد روش‌های عددی، تأیید درستی تئوری‌های اولیه و یا حتی کشف تئوری‌های جدید می‌باشد. درواقع می‌توان گفت که روش‌های عددی پلی ارتباطی میان داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌های تئوری است.

۳-۱ مراحل شبیه‌سازی عددی

از پدیده‌های فیزیکی، مدل‌های ریاضی با فرضیات و ساده‌سازی‌های ممکن ایجاد می‌شود. مدل‌های ریاضی ایجادشده اصولاً به‌صورت معادلات حاکم همراه با شرایط مرزی و شرایط اولیه می‌باشند. معادلات به کار گرفته‌شده ممکن است به‌صورت معادلات دیفرانسیلی معمولی، معادلات دیفرانسیل جزئی و معادلات انتگرالی یا هر حالت دیگری از معادلات باشد.

داشتن شرایط اولیه و مرزی امری ضروری برای تعیین رشته متغیرها نسبت به زمان یا مکان می-باشد. برای حل عددی معادلات حاکم، نیازمند تقسیم‌بندی شکل هندسی فضای حل مسئله به ذرات ریزتر هستیم.

تکنیک گسسته سازی محیط معادله برای روش‌های عددی مختلف گوناگون است. از طرف دیگر گسسته سازی عددی وسیله‌ای برای تبدیل عمل انتگرال یا مشتق در معادلات حاکم در حالت پیوسته به حالت ناپیوسته است.

درواقع می‌توان گفت گسسته سازی تقسیم یک دامنه پیوسته به تعداد معین اجزا می‌باشد که این اجزا درواقع چارچوب محاسباتی را برای تقریب زنی عددی تشکیل می‌دهند. چارچوب محاسباتی مجموعه از نقاط یا گره‌های شامل شبکه^۱ می‌باشد که متغیرهای دامنه توسط المان‌ها یا گره‌ها محاسبه می‌شود و ارتباط گره‌ها توسط اتصال گره‌ای^۲ حاصل می‌شود. در روش‌های عددی مبتنی بر شبکه^۳ دقت آنالیز عددی به شدت به اندازه سلول شبکه^۴ و الگوهای ساخت شبکه^۵ بستگی دارد.

عملیات مشتق یا انتگرال در قالب معادلات پیوسته با استفاده از تکنیک گسسته سازی عددی می-توان به فرم گسسته تبدیل کرد. این تکنیک معمولاً بر اساس نظریه تقریب توابع استوار است [۲۴]. معادلات فیزیکی پس از گسسته سازی به صورت دستگاه معادلات جبری و یا معادلات دیفرانسیل درمی‌آید که به کمک تکنیک‌های موجود قابل حل هستند.

در مرحله ایجاد دستگاه معادلات جبری یا دیفرانسیل معمولاً دو نوع فرمول‌بندی قوی و ضعیف مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطابق آنچه که توسط لیو^۶ و گو^۷ در سال ۲۰۰۳ گزارش شده است [۳۴]. این دو نوع روش می‌توانند باهم ترکیب شوند و فرم ترکیب ضعیف-قوی را در روش‌های بدون شبکه به وجود آورند و از مزایای هر دو استفاده کرد.

¹ Mesh or Grid

² Nodal Connectivity

³ Grid-Based Numerical Methods

⁴ Mesh cell size

⁵ Mesh Patterns

⁶ Liu

⁷ Gu

۲-۳ روش‌های عددی مبتنی بر شبکه

روش مبتنی بر شبکه معمولاً از اتصال گره‌ها و نوعی شبکه‌بندی برای گسسته سازی دامنه حل استفاده می‌شود. روش‌های عددی مبتنی بر شبکه یا مش مانند روش تفاضل محدود^۱ (FDM) روش حجم محدود^۲ (FVM) و روش المان محدود (FEM) به‌طور گسترده در بخش‌های مختلف دینامیک سیالات محاسباتی^۳ (CFD) و مکانیک جامدات محاسباتی^۴ (CSM) استفاده می‌شود. این روش برای حل معادلات دیفرانسیل یا معادلات با مشتقات جزئی که بر پدیده‌های فیزیکی حاکم است بسیار مفید است.

FDM به‌عنوان یکی از روش‌های مبتنی بر شبکه مدت‌ها به‌عنوان ابزار اصلی حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی در مسائل با هندسه ساده مورد استفاده قرار می‌گرفت سپس از FVM برای مسائل سیالاتی و FEM برای مسائل مکانیک جامدات با هندسه پیچیده استفاده شد [۳۵-۳۷]. از ویژگی‌های قابل توجه روش‌های عددی مبتنی بر شبکه تقسیم‌بندی دامنه پیوسته حل مسئله به زیر دامنه‌های گسسته کوچک از طریق گسسته سازی یا مش بندی است. نقاط به‌وسیله مش به هم متصل می‌شوند که نتیجه آن ایجاد مش بندی المان‌ها در FEM، سلول‌ها در FVM و شبکه در FDM است.

سیستم مش متشکل از شبکه، سلول‌ها و یا المان‌ها باید برای ایجاد رابطه بین گره‌ها و قبل از فرآیند تقریب معادلات دیفرانسیل با معادلات با مشتقات جزئی، ایجاد شود. معادلات حاکم را با توجه به گره‌ها می‌توان بر اساس مش از پیش تعیین شده به مجموعه‌ای از معادلات جبری برای متغیرها موجود تبدیل کرد.

¹ Finite Difference Methods

² Finite Volume Methods

³ Computational Fluid Dynamics

⁴ Computational Solid Mechanics

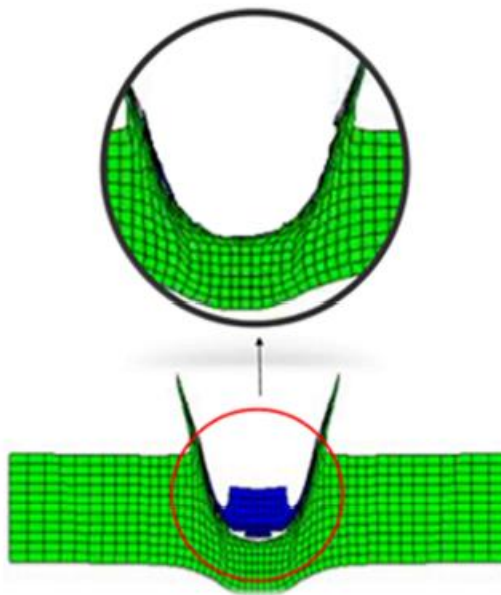
روش‌های عددی مبتنی بر شبکه امروزه بسیار موردتوجه بوده و در حال حاضر، روش‌هایی غالب برای شبیه‌سازی عددی و حل مشکلات در علوم مهندسی بوده است [۲۴]. این روش‌ها به‌طور گسترده-ای در زمینه‌های مختلف مهندسی به کار می‌روند و بسته‌های نرم‌افزاری حاوی کدهای گسترده‌ای برای آن نوشته شده است که از معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به نرم‌افزارهای انسیس، آباکوس و فلوئنت اشاره کرد. اما علیرغم کاربردهای وسیع هنوز در زمینه‌های مختلف دچار محدودیت می‌باشند.

در روش‌های مبتنی بر شبکه، ایجاد شبکه برای حل مسئله یک پیش‌نیاز اساسی و غیرقابل‌اجتناب است. ایجاد شبکه‌ای منظم برای هندسه‌های نامنظم و پیچیده معمولاً کار بسیار دشواری است که نیازمند عملیات ریاضی پیچیده‌ای برای تبدیل و نگاشت شبکه نامنظم به منظم در دامنه محاسباتی هستیم که در برخی شرایط حتی از حل خود مسئله زمان‌برتر و هزینه‌برتر است. همچنین بررسی و ردیابی سطوح آزاد سطوح تداخلی مواد^۱ مرزهای با تغییر شکل دائمی و نیز تشخیص ناهمگنی‌ها توسط یک شبکه ثابت اولیه‌ای کار دشواری می‌باشد. از همه مهم‌تر این‌که دنبال کردن تاریخچه اطلاعات^۲ متغیرهای دامنه در یک نقطه مشخص از دامنه حل کار ساده‌ای نیست. در شبکه‌های لاگرانژی نیز با اینکه شبکه ایجاد شده به دامنه حل متصل است و با آن حرکت می‌کند اما در مسائل دارای تغییر شکل زیاد که با اعوجاج^۳ المانی بیش‌ازحد در شبکه مواجه هستیم، شبکه‌های لاگرانژی هم ناکارآمد خواهند بود. در این مواقع نیازمند تکنیک شبکه‌بندی مجدد هستیم که به‌نوبه خود فرآیند سنگینی از لحاظ زمان و هزینه می‌باشد و معمولاً از دقت حل مسئله کاسته می‌شود. شکل (۳-۱) نمونه‌ای از اعوجاج بیش‌ازحد المان‌ها در مسائل برخورد با سرعت‌های بالا را نشان می‌دهد.

¹ Material Interfaces

² Time History

³ Mesh Distorsion



شکل ۳-۱ نمونه‌ای از اعوجاج بیش از حد المان‌ها در مسائل برخورد با سرعت بالا [۳۸]

مشکلات و محدودیت‌های روش‌های مبتنی بر شبکه به‌خصوص در شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرودینامیک مانند انفجار و ضربه با سرعت بالا کاملاً مشهود است؛ چراکه در تمام طول فرآیند حل در چنین مسائلی با تغییر شکل‌های خیلی زیاد در سطوح آزاد و مرزها سروکار داریم که زمینه‌های اصلی محدودیت‌های روش مبتنی بر شبکه می‌باشد. ازجمله مشکلات این مسائل سرعت بالای ضربه که شامل موج شوک منتشرشده از طریق برخورد و یا ضربه اجسامی که مانند مایعات رفتار می‌کنند، اشاره کرد. تجزیه و تحلیل معادلات اندازه حرکت و معادلات حالت فشار بالا، توصیفات کلیدی برای بیان رفتار مواد است. در پدیده‌هایی که تغییر شکل‌های بزرگی وجود دارد یافتن رابطه اندازه حرکت، مرزهای تغییر شکل‌پذیر و سطح آزاد بر اساس روش مبتنی بر شبکه دشوار است [۳۹]. از دیگر مشکلات روش‌های مبتنی بر شبکه حل مسائلی است که ذرات فیزیکی مسئله گسسته می‌باشد مانند تقابل ستاره‌ها در مسائل ستاره‌شناسی، آنالیز حرکت میلیون‌ها اتم در حالت‌های تعادلی یا غیر تعادلی، رفتار دینامیکی میلیون‌ها اتم در حالت تعادلی یا غیر تعادلی و

۳-۳ روش‌های عددی بدون شبکه^۱

با توجه به محدودیت‌های روش‌های عددی مبتنی بر شبکه در مسائل با تغییر شکل‌های زیاد اخیراً روش‌های عددی بدون شبکه ارائه شده‌اند. همان‌طور که از نام آن‌ها پیداست ویژگی اصلی این روش‌ها عدم نیاز آن‌ها به شبکه برای حل مسائل است. ایده اصلی روش‌های بدون شبکه، یافتن حل‌های عددی دقیق و پایدار برای انواع معادلات دیفرانسیل جزئی و انتگرالی با تمام حالات ممکن در بیان شرایط مرزی، به کمک ذرات یا گره‌هایی است که دامنه حل را گسسته سازی کرده و از هیچ نوع ارتباط و اتصالی بین گره‌ها و نقاط استفاده نمی‌شود. نقاط گسسته شده در این روش‌ها فاقد هرگونه توزیع منظم و ارتباط از پیش تعیین‌شده‌ای می‌باشند. در این روش‌ها دسته‌ای از نقاط بر روی مرزها قرار می‌گیرند که مرز را تشکیل داده و دسته‌ای از آن‌ها در داخل محیط حل قرار می‌گیرند [۲۶].

۳-۳-۱ تاریخچه روش‌های عددی بدون شبکه

لیو در سال ۲۰۰۲ تئوری و جزئیات تعداد زیادی از روش‌های [۲۴] عددی بدون شبکه را مطرح کرد. از اهداف اولیه در تحقیق پیرامون روش‌های عددی بدون شبکه اصلاح ساختار داخل روش‌های مبتنی بر شبکه برای افزایش قدرت تطابق‌پذیری و پایداری آن‌ها بود. پس از آن به تحقیق بیشتر در رابطه با مسائلی پرداختند که روش‌های مبتنی بر شبکه از حل آن‌ها ناتوان بودند.

روش هیدرودینامیک ذرات هموار [۲۵،۲۶] به عنوان یک روش بدون شبکه ذره‌ای در سال ۱۹۷۷ در ابتدا برای مدل کردن پدیده‌های نجومی به وجود آمد. یکی از روش‌های اصلی در روش‌های ذره‌ای، روش هیدرودینامیک ذرات هموار و بیان‌های مختلف آن می‌باشد.

^۱ Meshless

لیسکا^۱ و ارکیس^۲ در سال ۱۹۸۰ یک روش اساسی تفاضل محدود بهبودیافته را معرفی کردند که شامل شبکه دلخواه نامنظم بود. نیرلز و همکارانش^۳ در سال ۱۹۹۲ از جمله افرادی بودند که اولین بار از تقریب حداقل مربعات^۴ در قالب یک روش گالرکین^۵ استفاده کردند و فرمول بندی المان پخشی^۶ را ارائه دادند. بلیچکو و همکارانش^۷ در سال ۱۹۹۴ بر اساس روش المان پخشی روش بهبودیافته بدون المان گالرکین^۸ را ارائه دادند [۲۷]. روش بدون المان گالرکین هم‌اکنون یکی از روش‌های بدون شبکه مشهور در زمینه مکانیک جامدات است اما کاملاً بدون شبکه محسوب نشده چراکه از یک شبکه محلی پس‌زمینه برای مرحله انتگرال‌گیری استفاده می‌کند.

آلتوری^۹ و ژو^{۱۰} در سال ۱۹۹۸ روش بدون شبکه محلی پترو-گالرکین^{۱۱} را ارائه دادند [۲۸] که مانند روش بدون المان گالرکین از یک شبکه محلی پس‌زمینه برای انتگرال‌گیری استفاده می‌کند. از این روش برای آنالیز تیرها و سازه‌های ورقی [۲۹]، جریان سیال [۳۰] و سایر مسائل مکانیک استفاده شده است. جزئیات بیشتر روش بدون شبکه محلی پترو-گالرکین در سال ۲۰۰۲ توسط آلتوری و شن^{۱۲} در مقاله‌ای تشریح داده شده است [۳۱]. لیو و همکارانش در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ روش درون‌یابی نقطه‌ای^{۱۳} و تعدادی از روش‌های بهبودیافته آن را معرفی کردند [۳۳، ۳۲].

مشکل نقاط تکین برای روش بدون المان گالرکین و روش بدون شبکه محلی پترو-گالرکین را می‌توان با استفاده از یک تابع پایه‌ای شعاعی^{۱۴} و یا همراه با چند جمله‌ای‌ها رفع کرد [۴۰]. اخیراً یک روش بدون شبکه ضعیف-قوی^{۱۵} بر اساس ترکیب دو فرمول بندی ضعیف و قوی ارائه شده است [۴۱].

¹ Liszka

² Orkisz

³ Nayroles et al

⁴ Moving Least Square Approximations

⁵ Galerkin

⁶ Diffuse Element Method (DEM)

⁷ Belytschko et al

⁸ Element Free Galerkin (EFG)

⁹ Alturi

¹⁰ Zhu

¹¹ Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG)

¹² Shen

¹³ Point Interpolation Method (PIM)

¹⁴ Radial Basis Function

¹⁵ Meshfree Weak_Strong (MWS)

این روش از هر دو توابع شکل چندجمله‌ای در روش حداقل مربعات و شعاعی در روش میان‌یابی نقطه-ای استفاده می‌کند و مانند روش بدون شبکه محلی پترو-گالرکین به یک شبکه محلی پس‌زمینه نیازمند است. سایر روش‌های بدون شبکه قابل توجه شامل روش ابری^۱ توسط دوارت^۲ و ادن^۳ در سال ۱۹۹۶، روش شبکه آزاد توسط یاگاوا^۴ و یامادا^۵ در سال‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۸ روش مونتاژ نقطه‌ای^۶ توسط لیو در سال ۱۹۹۹ می‌باشد [۴۲].

به‌طور کلی روش‌های بدون شبکه از لحاظ نحوه تقریب توابع به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند:

۱- فرمول‌بندی قوی

۲- فرمول‌بندی ضعیف

۳- روش ذره‌ای^۷

فرمول‌بندی قوی مانند روش با هم‌گذاری^۸، مزایای سادگی به کارگیری و راندمان خوب محاسباتی را دارا است. اما این روش‌ها معمولاً از دقت و پایداری خوبی در حل برخورددار نیستند به‌ویژه زمانی که توزیع اولیه گره‌ها به‌صورت نامنظم باشد.

فرمول‌بندی ضعیف مانند روش‌های بدون المان گالرکین و بدون شبکه محلی پترو-گالرکین و درون‌یابی نقطه‌ای از دقت و پایداری خوبی برخوردار هستند اما مشکل آن‌ها این است که کاملاً بدون شبکه نیستند و از یک شبکه پس‌زمینه محلی یا کلی استفاده می‌کنند.

در جدول ۱-۳ خلاصه‌ای از مهم‌ترین روش‌های عددی بدون شبکه با توضیح نحوه تقریب زنی آن‌ها آورده شده است.

¹ HP-Cloud

² Duarte

³ Oden

⁴ Yagawa

⁵ Yamada

⁶ Point Assembly Method

⁷ Particle Methods

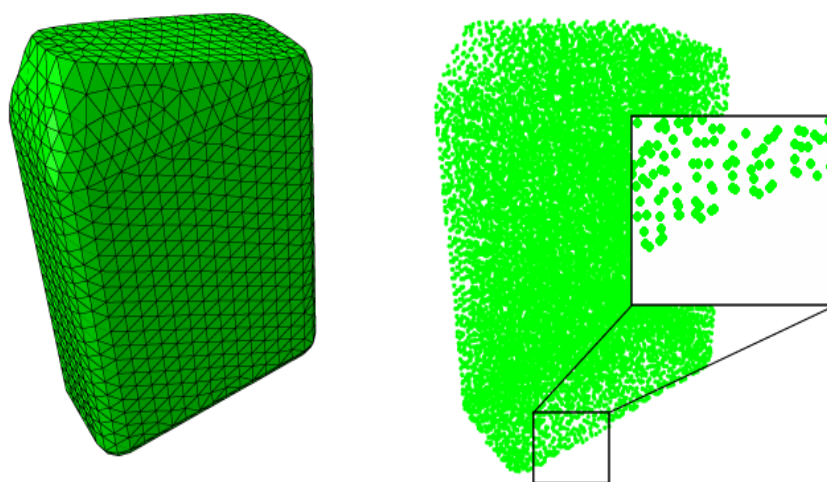
⁸ Collocation

جدول ۳-۱ روش‌های عددی بدون شبکه و نحوه تقریب آن‌ها [۴۲]

Methods	References	Methods of Approximation
Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)	Lucy, 1977; Gingold and Monaghan, 1977, etc.	Integral representation
Finite Point Method	Liszka and Orkisz, 1980; Onate et al., 1996, etc	Finite difference representation
Diffuse Element Method (DEM)	Nayroles et al., 1992	Moving least square (MLS) approximation Galerkin method
Element Free Galerkin (EFG) Method	Belytschko et al., 1994, 1996; 1998; etc.	MLS approximation Galerkin Method
Reproduced Kernel Particle Method (RKPM)	Liu et al., 1995; 1996, etc	Integral representation Galerkin method
HP-Cloud Method	Duarte and Oden, 1996, etc.	MLS approximation, Partition of unity
Free Mesh Method	Yagawa and Yamada, 1996; 1998, etc.	Galerkin method
Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) Method	Alturi and Zhu, 1998; 1999; Alturi and Shen, 2002; etc	MLS approximation Petrov-Galerkin method
Point Interpolation Method (PIM)	Liu and Gu, 1999; 2001a-d; Gu and Liu, 2001a,c; Liu, 2002; Wang and Liu, 2000; 2001; 2002	Point interpolation, (Radial and Polynomial basis), Galerkin method, Petrov-Galerkin method
Meshfree Weak-Strong Form (MWS)	Liu and Gu, 2002; 2003c; 2003; etc	MLS, PIM, radial PIM (RPIM), Collocation plus Petrov-Galerkin

۳-۴ روش بدون شبکه ذره‌ای^۱

در روش بدون شبکه ذره‌ای برای حل مسئله از تعداد معینی ذره، برای بیان فیزیک سیستم استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳-۲) مشاهده می‌کنید گسسته سازی دامنه حل به کمک ذرات صورت می‌گیرد.



شکل ۳-۲ گسسته سازی دامنه حل به کمک ذرات

این ذرات می‌تواند در هر نوع ابعادی به‌طور مثال خیلی کوچک نانو یا میکرو، در ابعاد بزرگ ماکرو و یا در ابعاد نجومی به کار گرفته شود. تعدادی از متداول‌ترین روش‌های بدون شبکه در جدول ۳-۲ آمده است [۴۲].

تقسیم‌بندی روش‌های بدون شبکه ذره‌ای بر اساس مقیاس طولی:

- ۱- روش‌های در مقیاس اتمی
- ۲- روش‌های در مقیاس مسوسکوپی^۲
- ۳- روش‌های در مقیاس ماکروسکوپی

^۱ Meshfree Particle Methods(MPM)

^۲ Mesoscopic MPMs

یک روش ذره‌ای در ابعاد اتمی روش دینامیک مولکولی^۱ می‌باشد. روش‌های دینامیک پراکندگی ذرات^۲ [۴۳] و سلول شبکه‌ای گاز^۳ [۴۴] در ابعاد مسوسکوپی می‌باشند. همچنین روش هیدرودینامیک ذرات هموار [۲۶، ۲۷]، روش ذره در سلول^۴ [۴۵]، روش سلول و نشانه‌گذاری^۵ [۴۶]، روش سیال در سلول^۶ [۴۷]، روش ذره متحرک شبه ضمنی^۷ [۴۸] و روش ذره-ذره-شبکه^۸ [۴۹] در ابعاد ماکروسکوپی می‌باشند.

جدول ۳-۲ متداول‌ترین روش‌های عددی بدون شبکه ذره‌ای [۴۲]

Methods	References
Molecular dynamics (MD)	Alder and Wainright ,1957; Rahman, 1964; Stillinger and Rahman, 1974; etc.
Monte Carlo (MC)	Metropolis and Ulam, 1949; Binder, 1988, 1992; etc.
Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)	Bird, 1994; Pan et al., 1999, 2000, 2002; etc
Dissipative Particle Dynamics (DPD)	Hoogerbrugge and Koelman, 1992; Espanol, 1998; etc.
Lattice Gas Cellular Automata (CA)	Wolfram, 1983; Kandanoft et al, 1989; etc.
Lattice Boltzman equation (LBE)	Chen and Doolen, 1998; Qian et al., 2000; etc.
Particle-In-Cell (PIC)	Harlow, 1963; 1964; etc
Marker-and-Cell (MAC)	Harlow, 1964; etc.
Fluid-In-Cell (FLIC)	Gentry et al., 1966; etc.
Moving Particle Semi-Implicit (MPS)	Koshizuka et al., 1998; etc.
Discrete Element Method (DEM)	Cundall, 1987; Owen, 1996; etc.
Vortex Methods	Chorin, 1973; Leonard, 1980
Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)	Lucy, 1977; Gingold and Monaghan, 1977; etc.

¹ Molecular Dynamics(MD)

² Dissipative Particle Dynamics(DPD)

³ Lattice Gas Cellular Automata(CA)

⁴ Particle-In-Cell(PIC)

⁵ Marker-and-Cell(MaC)

⁶ Fluid-In-Cell(FIC)

⁷ Moving Particle Semi-implicit(MPS)

⁸ Particle-Particle-Mesh(P3M)

ازجمله مزایای روش‌های بدون شبکه ذره‌ای نسبت به دیگر روش‌های عددی عبارت‌اند از:

- ۱- این روش‌ها به راحتی می‌توانند تغییر شکل‌های بزرگ را پذیرا باشند. این امر از آنجا میسر می‌گردد که ارتباط بین نقاط به عنوان بخشی از محاسبات ایجاد می‌گردد و توانایی تغییر بازمان را دارد.
- ۲- روش ذره‌ای به راحتی می‌تواند تخریب اجزا را پذیرا باشد، مانند شکست که ثابت می‌کند این روش‌ها، روش‌های مفیدی برای مدل کردن شکست مواد هستند.
- ۳- جداسازی بدون مش می‌تواند نمایش دقیقی از شیء هندسی فراهم سازد.
- ۴- ریزتر کردن تقسیم‌بندی ناحیه حل، برای افزایش دقت، به کمک ذرات بسیار راحت‌تر از انجام این کار به وسیله شبکه می‌باشد.
- ۵- به علت اینکه هر ذره در دامنه حل، با خود کمیت‌های فیزیکی را حمل می‌کند، بنابراین دنبال کردن تاریخچه زمانی اطلاعات مربوط به متغیرهای فیزیکی مختلف در مسائل مختلف شامل سطوح آزاد، تغییر شکل‌های زیاد در مرزها، بررسی مرزهای تداخلی مواد و... ویژه این روش‌ها خواهد بود.

۳-۵ مدل‌های رفتاری خاک

مصلحی که رفتار و تسلیم آن‌ها مستقل از نامتغیر اول تانسور تنش و یا تنش مؤثر میانگین باشد به این مواد، مصالح غیر اصطکاکی نیز می‌گویند. در مصالح خاکی این نوع رفتار وجود ندارد و مقاومت آن‌ها به شدت تحت تأثیر تنش هیدرو استاتیک خواهد بود. برخلاف فلزات عموماً خاک‌ها با ازدیاد تنش هیدرو استاتیک تغییر حجم زیادی از خود نشان می‌دهند و به مقاومت آن‌ها نیز افزوده می‌شود. البته رفتار در خاک‌های رسی در شرایط زهکشی نشده را می‌توان تا حدی شبیه به فلزات لحاظ نمود زیرا برای این مصالح نیز با افزایش فشار همه‌جانبه تغییری در مقاومت برشی زهکشی نشده مشاهده نمی‌شود. اما به طور کلی در هر مصالحی که رفتار سخت شونده با ازدیاد تنش‌های هیدرو استاتیک مشاهده شود، معیارهای تسلیم مانند ترسکا و ون میزس مناسب نخواهد بود.

۳-۵-۱ معیار گسیختگی موهر-کولمب

بر اساس معیار گسیختگی موهر-کولمب، مقاومت برشی، با افزایش تنش نرمال بر صفحه گسیختگی ازدیاد می‌یابد.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (۱-۳)$$

در این رابطه τ مقاومت برشی، c چسبندگی و ϕ زاویه اصطکاک خاک خواهد بود. این معیار به صورت شماتیک در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. معیار موهر-کولمب را می‌توان با استفاده از تنش‌های اصلی نیز بیان نمود بر اساس شکل ۳-۳ می‌توان نوشت:

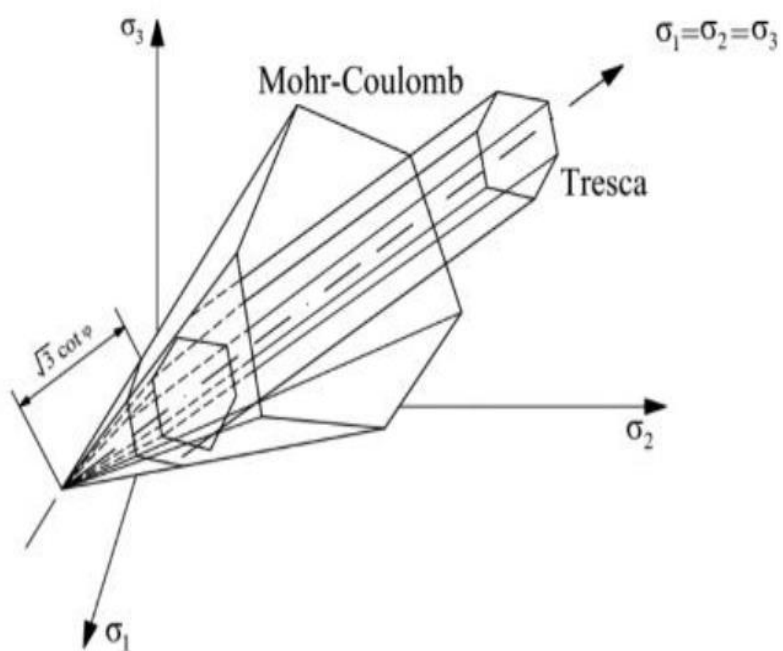
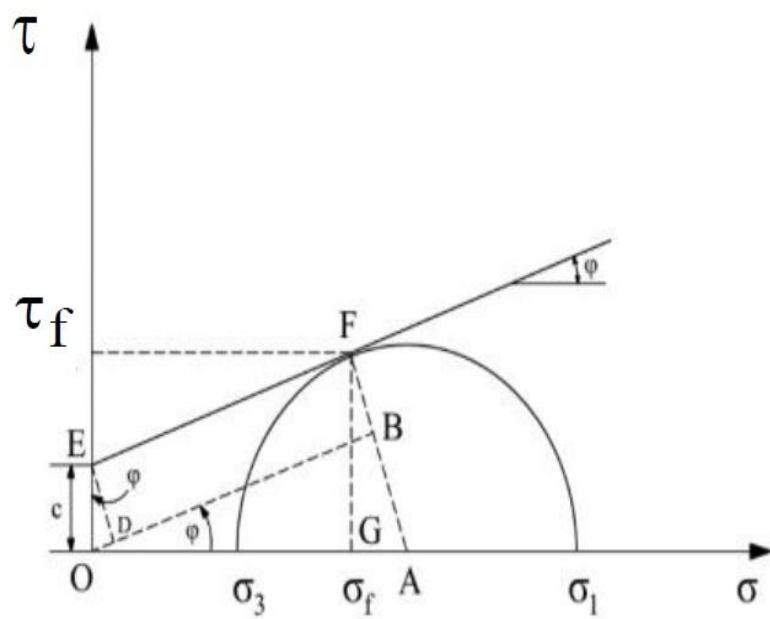
$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = AB + BF \quad (۲-۳)$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = OA \sin \phi + C \cos \phi = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi + C \cos \phi$$

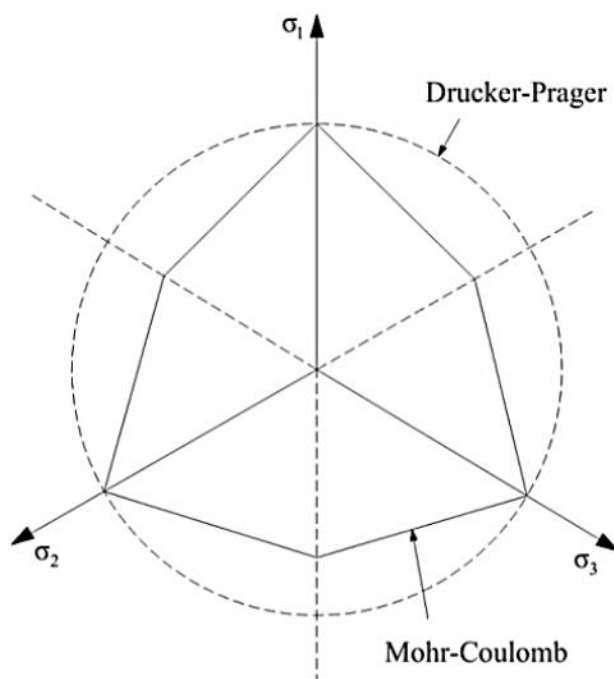
در این رابطه σ_1 و σ_3 تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل بوده و همان‌طور که مشخص است از تنش میانگین σ_2 صرف‌نظر شده است. با استفاده از مؤلفه‌های تانسور تنش، معیار فوق را می‌توان به صورت دیگر نیز نوشت:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2}\right)^2 + \sigma_{13}^2} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{33}}{2} \sin \phi + C \cos \phi \quad (۳-۳)$$

معیار ارائه شده توسط معادلات ذکر شده بیانگر یک شش ضلعی نامتقارن و در فضا یک هرم بوده که در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. تصویر این معیار بر صفحه پی در شکل ۴-۳ ارائه گردیده است.



شکل ۳-۳ معیار گسیختگی موهر-کولمب در شرایط دو و سه بعدی (دسای و سیریواردان ۱۹۸۴)



شکل ۳-۴ تصویر معیارهای موهر-کولمب و دراگر-پراگر بر صفحه پی(دسای و سیریواردان ۱۹۸۴)

بر اساس معیار موهر کولمب، مقاومت نظیر شرایط تسلیم در فشار بیشتر از مقدار نظیر در شرایط کشش خواهد بود. این موضوع بیانگر وابستگی رفتار مکانیکی ماده به نامتغیر سوم تانسور تنش است. اما با توجه به عدم تأثیرپذیری معیار از تنش اصلی میانی، امکان ارائه فرمولاسیون آن بر اساس تنش مؤلفه تانسور تنش مشکل خواهد بود و به عبارت دیگر امکان ارائه فرمولاسیون بر اساس نامتغیرهای تنش پیچیده است. البته با استفاده از پارامتر جدید θ می توان شکل تازه ای از معیار تسلیم موهر-کولمب را ارائه نمود. پارامتر θ بر اساس رابطه زیر ارائه می گردد.

$$\theta = -\frac{1}{3} \sin^{-1} \left(\frac{-3\sqrt{3}}{2} \frac{J_{3D}}{J_{2D}^{\frac{3}{2}}} \right) \quad -\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq +\frac{\pi}{6} \quad (4-3)$$

بدین ترتیب با استفاده از J_{2D} (نامتغیر دوم تانسور تنش انحرافی)، J_1 (نامتغیر اول تانسور تنش) و θ به عنوان سری جدید نام تغییرها، معیار موهر-کولمب در حالت سه بعدی فضا تنش به شرح زیر ارائه می گردد:

$$f = J_1 \sin \phi + \sqrt{J_{2D}} \cos \theta - \frac{\sqrt{J_{2D}}}{3} \sin \phi \sin \theta - C \cos \phi = 0 \quad (5-3)$$

نکته قابل ذکر آن است که در شرایط $\phi = 0$ فرمولاسیون معیار موهر کولمب به معیار ترسکا تبدیل خواهد شد. پارامترهای C و ϕ از آزمایش‌های مصالح مکانیک خاک مانند برش مستقیم یا سه محوری قابل محاسبه خواهد بود. برای تعیین این پارامترها انجام حداقل دو آزمایش برای ترسیم پوش مشترک خطی دواير موهر الزامی خواهد بود.

فصل چهارم

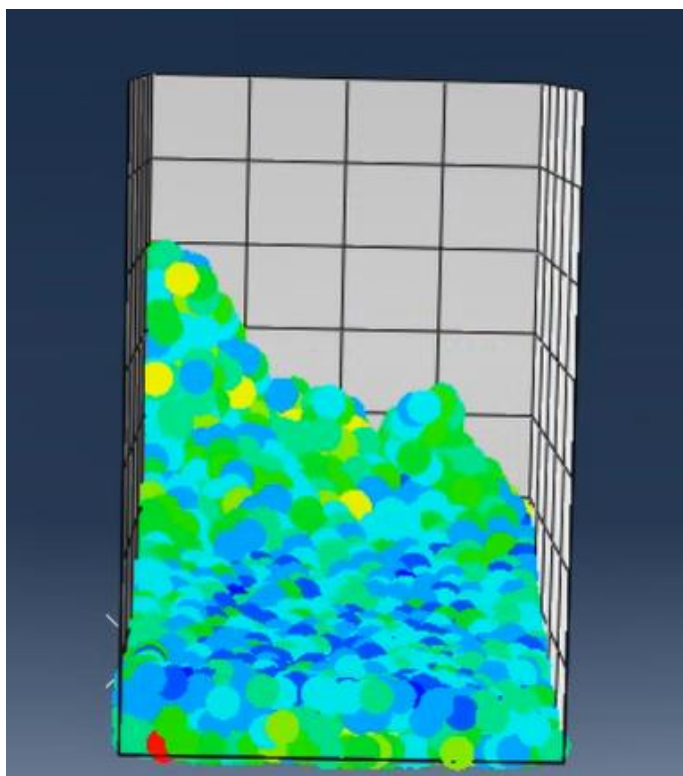
روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

۴- مقدمه

روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) روشی لاگرانژی و بدون شبکه بوده که در آن سیستم فیزیکی توسط تعدادی ذره که خواص فیزیکی ماده تشکیل دهنده از جمله جرم و حجم را دارا هستند، بیان و گسسته می‌شود درواقع می‌توان گفت SPH یک روش برای تخمین زدن حل‌های عددی معادلات دینامیک سیالات و جامدات توسط جایگزینی محیط پیوسته با یک سری ذرات می‌باشد. اساس و پایه این روش بر تئوری درونیابی انتگرالی^۱ بنانهاده شده است. مقدار یک متغیر وابسته، به‌وسیله جمع زدن بر روی یکسری ذرات مجاور هم محاسبه می‌شوند. معادلات دیفرانسیلی با استفاده از یک تابع درونیابی به معادلات انتگرالی تبدیل می‌شوند. مشتقات مکانی به‌جای کمیت‌های فیزیکی بر روی تابع درونیابی که یک تابع تحلیل و مشتق‌پذیر است، عمل می‌کنند. برای ریاضی‌دانان ذرات فقط حکم نقاطی را دارند که محاسبات در آن‌ها انجام می‌گیرد و برای فیزیکدانان ذرات SPH ذرات مادی هستند که می‌توان با آن‌ها رفتاری مشابه دیگر سیستم‌های ذرات را داشت.

شکل (۴-۱) نمونه‌ای از بیان جریان سطحی سیال را به کمک روش هیدرودینامیک ذرات هموار نشان می‌دهد که مدل سقوط ستون آب در یک ظرف می‌باشد، رنگ‌های متفاوت ذرات می‌تواند نشان‌دهنده مقادیر متفاوت کمیت‌های فیزیکی نظیر چگالی، سرعت و... باشد.

¹ Integral interpolation



شکل ۴-۱ مدل جریان آب در ظرف به کمک روش SPH

یکی از مزیت‌های بارز روش هیدرودینامیک ذرات هموار، قابلیت انعطاف‌پذیری^۱ در گام‌های مختلف فرآیند حل، از تخمین ابتدایی توابع و کمیت‌های دامنه حل تا تقریب ذرات در گام‌های متعدد زمانی می‌باشد. پس می‌توان گفت دقت حل این روش با توزیع‌های دلخواه ذرات دچار لطمه نمی‌شود و بنابراین قدرتمندترین ویژگی این روش که توانایی حل مسائل با تغییر شکل‌های خیلی زیاد هست رقم می‌زند. روش هیدرودینامیک ذرات هموار علاوه بر ویژگی فوق دارای یک تفاوت اصلی با بسیاری از روش‌های بدون شبکه می‌باشد و آن این است که ذرات به‌کاررفته در روش مذکور برای گسسته‌سازی دامنه حل، تنها به‌عنوان نقاط درون یاب برای تخمین توابع دامنه عمل نمی‌کنند بلکه هر ذره، کمیت-های متفاوت مانند جرم، حجم، سرعت، مومنتوم، انرژی و ... را با خود حمل می‌کنند. ذرات به‌کاررفته، در تمام طول فرآیند حل، باهم تراکنش داشته و به یکدیگر نیرو وارد می‌کنند.

^۱ Adaptive Nature

مشخصات اصلی روش هیدرودینامیک ذرات هموار در سه کلمه کلیدی تشکیل دهنده نام این روش وجود دارد، درواقع می توان گفت هر واژه مشخصه ای از کاربرد این روش را نشان می دهد. واژه اول بیان کننده قابلیت ویژه روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای آنالیز کلیه مسائل هیدرودینامیک است. واژه دوم درواقع ماهیت ذره ای بودن روش مذکور و تعلق آن به دسته روش های بدون شبکه ذره ای را نشان می دهد. واژه سوم به معنای هموارسازی بوده و نشان دهنده تقریب وزنی همواری است که توسط تابع وزن در این روش، بر روی ناحیه ای از ذرات اعمال می شود. به طور کلی دو نوع روش SPH تاکنون معرفی شده است در نوع اول یا استاندارد این روش به سیال از این دید نگریسته می شود که سیالات واقعی کمی تراکم پذیر هستند، هرچند که این تراکم پذیری اندک است. در این روش با برقراری یک معادله ریاضی بین تغییرات چگالی و فشار می توان جریان سیالات تراکم ناپذیر را شبیه سازی کرد. این ضرایب تراکم ناپذیری مصنوعی باعث می شود که در محاسبات عددی گام های زمانی کوچکی منظور شود که از نقاط ضعف این روش می باشد به علاوه در این روش مقادیر منفی فشار می تواند باعث ناپایداری شود. از این روش به عنوان روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم پذیر ضعیف^۱ یاد می شود (WC-SPH). در روش دوم SPH، سیالات کاملاً تراکم ناپذیر فرض می شوند و با اعمال این قید و با یک روش پیش بینی حل می شوند. از این روش به عنوان روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم ناپذیر^۲ یاد می شود [۵۰].

در دهه نود میلادی از روش هیدرودینامیک ذرات هموار در زمینه های پاسخ دینامیکی مصالح، مدل سازی ترک خوردگی، مدل سازی برخورد، مصالح ترد، شکل دهی فلزات، دینامیک سیالات، پدیده انفجار، و انفجار در زیر آب استفاده می کردند. کاربردهای جالب تری از روش هیدرودینامیک ذرات هموار در زمینه اندرکنش فاز مایع و جامد مانند بررسی اندرکنش خون و رگ و اندرکنش آب و شیر کنترل لاستیکی اخیراً ارائه شده است [۵۱].

^۱ Weakly compressible SPH Method

^۲ Incompressible SPH Method

برخی از مزیت‌های ویژه روش هیدرودینامیک ذرات هموار نسبت به روش‌های عددی مبتنی بر شبکه به شرح زیر می‌باشد:

۱- روشی لاگرانژی است که به‌وسیله آن می‌توان تاریخچه زمانی^۱ ذرات ماده را به دست آورد.
۲- این روش یک روش بدون مش یا شبکه بوده که مبتنی بر ذرات است این ویژگی بدون مش بودن روش SPH این موقعیت را فراهم می‌سازد که به‌طور مستقیم به بررسی تغییر شکل‌های بزرگ بپردازد چراکه ارتباط بین ذرات از طریق بخش محاسبات تأمین و می‌تواند باگذشت زمان تغییر کند.
۳- با گسترش ذرات در موقعیت‌های ویژه در حالت اولیه و قبل از تجزیه و تحلیل می‌توان سطح آزاد ارتباط مواد و شرایط مرزی متغیر را به‌صورت طبیعی در فرآیند شبیه‌سازی پیش‌بینی کرد درحالی‌که این موضوع در روش اویلری یک چالش بزرگ محسوب می‌شود درنتیجه SPH یک انتخاب مناسب برای مدل‌سازی سطح آزاد و مسائل جریان سطحی است.

۴- در روش SPH یک‌ذره نشان‌دهنده یک حجم محدود در مقیاس پیوسته است. این روش کاملاً مشابه روش دینامیک مولکولی^۲ (MD) و روش دینامیک ذرات پویا^۳ (DPD) است. درنتیجه تعمیم و گسترش روش SPH و یا ادغام آن با روش دینامیک مولکولی و دینامیک ذرات پویا به‌ویژه در مسائل بیوفیزیک و بیوشیمی امکان‌پذیر است.

۵- SPH برای مسائلی که موضوع موردبررسی آن‌ها پیوسته نیست مناسب است، این روش به‌ویژه در مهندسی نانو و بیو در مقیاس نانو و میکرو و در اخترفیزیک در مقیاس نجومی دقیق است. برای این‌گونه مسائل SPH به‌عنوان یک انتخاب خوب برای شبیه‌سازی پیشنهاد می‌شود.

۶- SPH در اجرا نسبتاً ساده‌تر و توسعه آن برای مدل‌های عددی سه‌بعدی نسبت به روش‌های مبتنی بر شبکه راحت‌تر است [۵۲].

¹ Time history

² Molecular Dynamics Method

³ Dissipative particle Dynamics Method

با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد این روش در تغییر شکل‌های بزرگ در این پروژه برای مدل-سازی نفوذ پرتابه از این روش استفاده شده است. در ادامه تاریخچه این روش و معادلات حاکم و فرمول‌بندی SPH بیان می‌شود.

۴-۱ تاریخچه روش هیدرودینامیک ذرات هموار

روش هیدرودینامیک ذرات هموار، اولین بار توسط لوسی^۱، گینگلد^۲ و مناقان^۳ در سال ۱۹۷۷ برای تحلیل مسائل نجومی به کار گرفته شد [۲۶، ۲۵]. دلیل استفاده از این روش در پدیده‌های اخت‌فیزیک این بوده است که، الگوریتم اولیه SPH از نظریه احتمالی اتخاذ و از مکانیک آماری به‌طور گسترده برای تخمین عددی استفاده می‌کرد. در این الگوریتم‌ها اندازه حرکت خطی و زاویه‌ای حفظ نمی‌شد. با توسعه روش SPH و کاربردهای گسترده آن در طیف وسیعی از مسائل توجه بیشتری به آن کرده و برخی از اشکالات این روش کشف و در نتیجه تغییراتی برای بهبود این روش ارائه شد.

گینگلد و مناقان غیر پیوستگی اندازه حرکت خطی و زاویه‌ای الگوریتم SPH را پیدا و سپس الگوریتم SPH را معرفی کردند که هر دو حالت اندازه حرکت خطی و زاویه‌ای را پوشش می‌داد. این روش در حوزه‌های مختلف نجوم از جمله: آنالیز ستاره‌های دوگانه^۴، برخورد ستاره‌ای^۵ [۵۳، ۵۴، ۵۵، ۵۶]، فروپاشی و شکل‌گیری کهکشان‌ها^۶ [۵۷، ۵۸، ۵۹، ۶۰] و حتی شکل‌گیری جهان [۶۱] استفاده شده است.

هو و آدامز^۷ نیز یک الگوریتم برای جریان ویسکوز تراکم ناپذیر ارائه دادند. در همین راستا، تحقیقاتی در رابطه با جنبه‌های دقت عددی، ثبات، همگرایی و کارا بودن روش SPH توسط بسیاری از

¹ Lucy

² Gingold

³ Monaghan

⁴ Binary Stars

⁵ Stellar Collisions

⁶ Collapse and Formation of Galaxies

⁷ Hu and Adams

محققین صورت گرفته است. مسائل بی‌ثباتی کشش که برای مصالح با استحکام بیان می‌شود، توسط سوگل^۱ و همکاران بررسی شده است همچنین موریس^۲ به مسئله بی‌ثباتی ذرات که باعث کم شدن دقت حل SPH می‌شود، اشاره کرد. سال‌ها تغییرات و اصطلاحات مختلف به منظور بهبود این روش صورت گرفته است و باعث شده SPH به روشی قدرتمند در حل مسائل مختلف عددی تبدیل شود. به‌طور مثال، مناگان با ارائه یک فرمولاسیون متقارن باعث ایجاد اثرات بهتری در این روش شد. همچنین جانسون^۳ و همکارانش یک فرمولاسیون نرمال شده تک‌محوری را ارائه دادند. راندلس و لیبراسکای^۴ یک فرمول نرمال شده برای تقریب چگالی و یک فرمولاسیون برای واگرایی تانسور تنش^۵ ارائه کردند. روش ذرات هموار اصلاحی (CSPM) توسط چن و همکاران^۶ پیشنهاد شد این روش دقت شبیه‌سازی را در هر دو حالت داخل دامنه مسئله و اطراف منطقه مرزی افزایش می‌دهد. روش ذرات هموار اصلاحی^۷ برای مسائل با ناپیوستگی‌هایی مانند موج شوک به صورت SPH ناپیوسته^۸ (DSPH) توسط لیو و همکارانش^۹ ارائه شد. لیو و همکارانش همچنین روش ذرات محدود^{۱۰} (FPM) را ارائه کردند. در این روش از یک مجموعه توابع پایه برای تقریب متغیرها موجود در ذرات با توزیع خودسرانه استفاده می‌شود. درواقع می‌توان گفت نسخه بهبودیافته روش SPH و CSPM روش FPM است، که در آن عملکرد ثبات ذرات بهبود یافته است.

باترا و همکارانش^{۱۱} هم‌زمان یک ایده مشابه FPM با برنامه‌های کاربردی در مکانیک جامدات ارائه نمودند و آن را SPH اصلاح شده^{۱۲} (MSPH) نامیدند. MSPH توسط فانگ و همکارانش^{۱۳} برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد ارتقا داده شد و پس‌از آن یک روش ذرات محدود لاگرانژی منظم برای

¹ Swegle

² Morris

³ Johnson

⁴ Randles and Libersky

⁵ Divergence of the stress tensor

⁶ Chen et al

⁷ Corrective smoothed particle Method

⁸ Discontinuous SPH

⁹ Liu et al

¹⁰ Finite particle Method

¹¹ Batra et al

¹² Modified SPH

¹³ Fang et al

شبیه‌سازی جریان لزج تراکم ناپذیر ارائه دادند از دیگر اصلاحات قابل توجه روش SPH می‌توان به روش هیدرولیک مربعات ذرات در حال حرکت^۱ (MLSPH)، یکپارچه‌سازی کرنل اصلاحی^۲، روش ذرات کرنلی قابل تکثیر^۳ (RKPM)، روش اصلاح پایداری ذرات^۴ و چندین روش دیگر برای بازیابی بی-ثباتی ذرات اشاره کرد.

بلیجکو^۵ و همکارانش تحقیقاتی را در زمینه ایجاد ثبات و همگرایی در روش ذرات بدون شبکه انجام داده‌اند که می‌تواند برای روش SPH مفید باشد [۵۲]. همان‌طور که ذکر شد پس از کاربردهای متعدد در روش هیدرودینامیک ذرات هموار در مسائل مرتبط با علم نجوم، این روش به حوزه دینامیک سیالات گسترش داده شد. مسائلی مانند جریان الاستیک [۶۲]، هیدرودینامیک توأم با مغناطیس^۶ [۶۳]، جریان‌های چند فازی [۶۴]، جریان‌های شبه غیرقابل تراکمی [۶۶، ۶۵]، جریان در محیط متخلخل [۶۸، ۶۷]، انتقال حرارت و جریان جرم [۶۹] نمونه‌هایی از این کاربردها می‌باشند.

بنز^۷ و آسفاگ^۸، در سال‌های ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۵، کاربرد روش هیدرودینامیک ذرات هموار را به آنالیز شکست جامدات ترد گسترش دادند [۷۰-۷۲]. زوکاس^۹ در سال‌های ۱۹۸۲ و ۱۹۹۰ [۷۴، ۷۳] لیبرسکی^{۱۰} و همکارانش [۷۵-۸۰]، جانسون^{۱۱} و همکارانش در سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۶ [۸۱-۸۳]، از روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای تحلیل مسائل ضربه با سرعت‌های بسیار بالا و انتشار امواج در اجسام استفاده کردند. سوئجل^{۱۲} و آتاری^{۱۳} در سال ۱۹۹۵ [۸۴] از روش مذکور برای آنالیز انفجار در زیرآب استفاده کردند همچنین بورت و کولاسگارام از روش SPH در مدل‌سازی شکل دادن مواد استفاده کردند. لیو و همکارانش در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳ [۸۵-۹۲] از این روش برای تحلیل

¹ Moving Least Square particle Hydrodynamics

² Integration kernel correction

³ Reproducing kernel particle method

⁴ Correction for stable particle method

⁵ Belytschko

⁶ Magneto-Hydrodynamics

⁷ Benz

⁸ Asphaug

⁹ Zukas

¹⁰ Libersky

¹¹ Johnson

¹² Swegle

¹³ Attaway

مسائل متفاوت در حوزه مواد منفجره، انفجار و ضربه‌های زیر آب، کاهش اثرات مخرب ناشی از انفجار در آب بهره بردند. کاربرد گسترده روش هیدرودینامیک ذرات هموار در حل مسائل مختلف باعث پیشرفت این روش نسبت به دیگر روش‌های عددی شد و همچنین برخی از مشکلات آن تشخیص داده شد و راه‌حلهایی برای تصحیح آن ارائه گردید.

۴-۲ روش عددی SPH

در روش‌های عددی به‌منظور حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر فیزیک مسئله از گسسته سازی معادلات استفاده می‌شود. در گسسته سازی فضای مسئله به نقاطی محدود تقسیم و معادلات دیفرانسیل حاکم با تکنیک‌های مناسب و متناسب با نوع گسسته سازی به یک سری معادلات جبری تبدیل می‌شوند که با حل این معادلات جواب متغیرهای مسئله حاصل می‌شود. در روش‌های مرسوم (FEM) المان محدود فضای مسئله شبکه‌بندی شده و جواب مسئله تنها در نقاط شبکه به دست آورده می‌شود [۹۳]. اما در روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) فضای مسئله به تعدادی ذره که به‌صورت دلخواه پراکنده شده و هیچ‌گونه اتصالی بین آن‌ها وجود ندارد، تقسیم‌بندی می‌شود. روش SPH یک روش بدون شبکه و لاگرانژی است و برای مدل‌سازی جریان سطح آزاد و دارای تغییر شکل-های بزرگ بسیار مناسب است. در ادامه به جزئیات فرمول‌بندی و خصوصیات این روش پرداخته می‌شود.

۴-۲-۱ گسسته سازی معادلات در روش SPH

در این گسسته سازی، مقدار کمی ذره موردنظر، با استفاده از اطلاعات موجود در محدوده‌ای در اطراف ذره و با استفاده از تابع وزنی به‌صورت انتگرالی تقریب زده می‌شود. درواقع می‌توان گفت فرمول‌بندی روش هیدرودینامیک ذرات هموار در دو مرحله اساسی انجام می‌پذیرد. مرحله اول، تقریب

کرنل توابع میدان بوده و مرحله دوم شامل تقریب ذره‌ای می‌باشد. فرم دقیق معادله انتگرالی درونیابی با استفاده از تعریف تابع انتگرالی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') \delta(x - x') dx' \quad (1-4)$$

که در آن $f(x)$ بردار متغیر وابسته در X در حوزه سه بعدی حل بوده است. $f(x')$ مقادیر بردارهای متغیر وابسته در همسایگی نقطه x ، Ω فضای حل شامل x و همسایگی اطراف x' است و δ تابع دلتای دیراک می‌باشد.

تابع دلتای دیراک تابعی است که در تمام نقاط دامنه دارای مقدار صفر می‌باشد و تنها در نقطه x' برابر واحد می‌باشد.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x - x') dx' = 1 \quad (2-4)$$

$$\delta(x - x') = \begin{cases} 1 & x = x' \\ 0 & x \neq x' \end{cases} \quad (3-4)$$

به دلیل عدم پیوستگی تابع دلتای دیراک، عدم مشتق پذیری تابع و شعاع تأثیر کوچک این تابع کارایی لازم برای حل مسائل مبتنی بر ذره را نداشته در نتیجه از تابع کرنل $w(x-x',h)$ به جای تابع دلتای دیراک استفاده می‌کنیم. در این حالت تابع‌های $f(x)$ و $\nabla f(x)$ به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

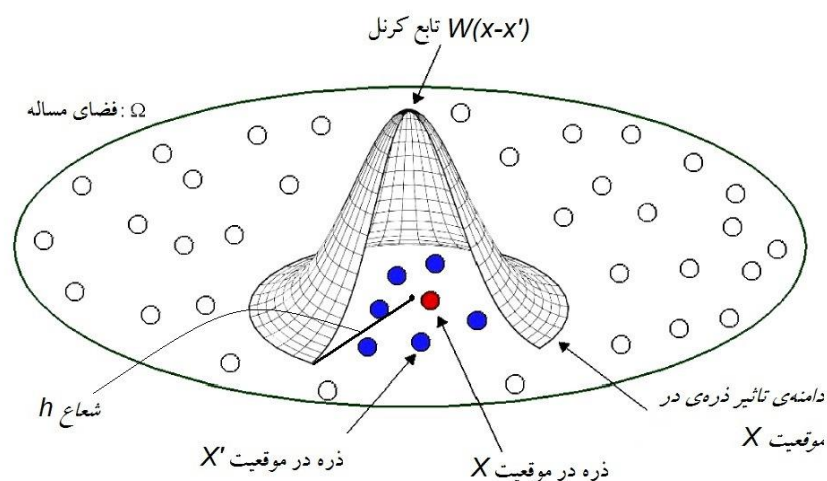
$$f(x) \approx \oint_{\Omega} f(x') w(x - x', h) dx' \quad (4-4)$$

تقریب انتگرالی به کمک کرنل را با علامت $< >$ نشان می‌دهند.

$$< f(x) > \approx \int_{\Omega} f(x') w(x - x', h) dx' \quad (5-4)$$

$$< \nabla \cdot f(x) > \approx - \int_{\Omega} f(x') \nabla_{x'} \cdot w(x - x', h) dx' \quad (6-4)$$

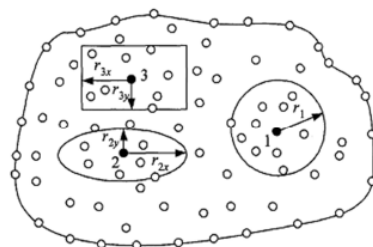
در رابطه بالا h طول هموار کننده^۱ نام دارد و مشخص کننده شعاع تأثیرگذاری تابع کرنل در ناحیه مورد بررسی است (شکل ۴-۲). h معمولاً در محاسبات ثابت و برابر با فاصله اولیه ذرات در نظر گرفته می شود.



شکل ۴-۲ نمایش تابع کرنل و شعاع تأثیر ذره در موقعیت x [۴۲]

۴-۲-۲ دامنه پوشش^۲

دامنه پوشش ناحیه‌ای است که تابع کرنل بر روی آن گسترش یافته و هر ذره برای استفاده از تأثیرات تراکنش ذرات مجاور خود، دامنه پوشش مخصوص به خود را دارا است به شکل زیر توجه کنید [۴۲].



شکل ۴-۳ انواع نواحی پوشش [۴۲]

^۱ Smoothing length

^۲ Support Domain

۴-۲-۳ طول هموار کننده h

طول هموار کننده h در روش SPH مشابه اندازه‌ی سلول شبکه در روش اویلری است. در واقع طول هموار ساز h بیان‌کننده ناحیه تأثیر اطراف یک ذره مرکزی است که با ذرات واقع در این ناحیه برهم-کنش دارد یا به عبارت دیگر می‌توان گفت ناحیه تأثیر ذرات یک ذره دایره‌ای با مرکزیت ذره مورد نظر و شعاع kh است.

طول هموار ساز رابطه مستقیمی با ناحیه پشتیبانی h_t داشته و تأثیر بسزایی در دقت نتایج خواهد داشت. در واقع می‌توان گفت اگر این طول خیلی کوچک در نظر گرفته شود ممکن است تعداد کافی ذرات در ناحیه تأثیر ذره مرکزی وجود نداشته باشد که باعث کاهش دقت نتایج می‌شود. اگر طول هموار سازی h زیاد باشد تمام جزئیات ذرات و خصوصیات محلی ممکن است از حالت هموار خارج شوند که تأثیر منفی در نتایج خواهد داشت و در این صورت تعداد ذرات واقع در ناحیه تأثیر ذره مرکزی و حجم محاسبات افزایش خواهد یافت .

کینگلد و موناگان نشان دادند که وجود یک طول هموار ساز بهینه به تعداد ذرات وابسته است [۹۴]. هرچه تعداد ذرات بیشتر و طول هموار ساز کم‌تری در نظر بگیریم خطای محاسبات کم‌تر می‌شود. این نتیجه‌گیری با یافته‌های اسپیت سازگار است. اسپیت ثابت کرد که دقت نتایج روش SPH به تعداد ذرات همسایه N_I بستگی دارد [۹۵].

$$N_i \propto \left[\frac{h}{\delta r} \right]^d N \quad (۷-۴)$$

که در آن متغیر N متناظر با تعداد کل ذرات، d بعد مسئله مورد نظر و δr فاصله اولیه ذرات است. با افزایش طول هموار سازی و ثابت نگه داشتن تعداد کل ذرات با توجه به رابطه (۷-۴) تعداد ذرات همسایه افزایش خواهد یافت اگرچه اسپیت با استفاده از این رابطه نشان داد که طول هموار سازی h تعیین‌کننده وضوح شبیه سازی می‌باشد، اما در نهایت دقت کلی حل مسئله به متوسط تعداد اندرکنش‌های بین ذرات وابسته است [۹۶]. نتیجه‌گیری اسپیت با نتیجه‌گیری که موناگان و کینگلد

ارائه کرده بودند دارای تناقض بود، اما به‌طور کلی می‌توان با انتخاب تعداد مناسب کل ذرات یک سازگاری میان تعداد ذرات و طول هموارساز برقرار کرد.

۴-۲-۴ طول هموار کننده متغیر

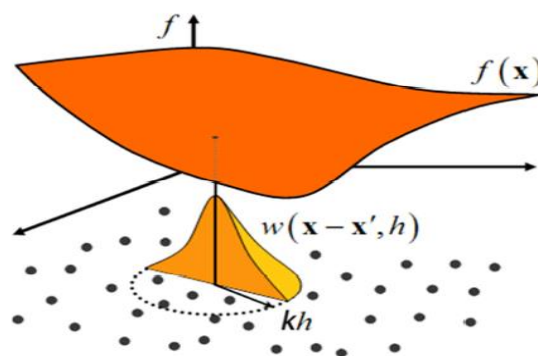
در مسائل برخورد با سرعت بالا، از آنجاکه با تغییر شکل‌های زیاد، شکست و تکه‌تکه شدن سروکار داریم، معقول نیست طول هموار کننده را ثابت در نظر بگیریم. طول هموارساز را در هر گام زمانی و بر اساس توزیع چگالی در هر گام باید تغییر داد طول هموارساز متغیر را مانند رابطه زیر بیان می‌کنیم:

$$\frac{Dh}{Dt} = \frac{-1}{d} \frac{h}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} \quad (۸-۴)$$

که در آن، h و ρ به ترتیب طول هموار کننده و چگالی بوده و D بیانگر مشتق مادی است.

۴-۲-۵ ذرات همسایه^۱

به کلیه ذرات مجاور ذره i که در داخل ناحیه پوشش قرار دارند و به‌نوعی بر روی ذره i تأثیر می‌گذارند ذرات همسایه گفته می‌شود [۹۷].



شکل ۴-۴ توزیع ذرات همسایه در دامنه پوشش [۹۷]

^۱ Neighboring Particles

۳-۴ تقریب ذره‌ای در روش هیدرودینامیک ذرات هموار

پس از تقریب انتگرالی توابع دامنه به کمک تابع کرنل، دامنه حل توسط تعدادی ذره، گسسته سازی می‌شود و فرم انتگرالی معادلات، به صورت مجموعی بر روی کلیه ذرات دامنه تبدیل می‌شود. به مرحله گسسته سازی توسط ذرات، مرحله تقریب ذره‌ای گفته می‌شود.

اگر حجم بسیار کوچک dx' در موقعیت ذره z ام را برابر با حجم محدودی که ذره z ام به جرم $m_j = \Delta v_j \cdot \rho_j$ اشغال می‌کند، در نظر بگیریم و تعداد کل ذرات همسایه N باشد آنگاه تقریب انتگرالی تابع $f(x)$ مطابق روند زیر به صورت تقریب ذره‌ای درمی‌آید:

$$\tilde{f}(x) \approx \int_{\Omega} \tilde{f}(x') w(x - x', h) dx' \quad (۹-۴)$$

$$\begin{aligned} &\cong \sum_{j=1}^N \tilde{f}(x_j) w(x - x_j, h) \Delta v_j = \sum_{j=1}^N \tilde{f}(x_j) w(x - x_j, h) \frac{1}{\rho_j} (\rho_j \Delta v_j) \\ &= \sum_{j=1}^N \tilde{f}(x_j) w(x - x_j, h) \frac{1}{\rho_j} m_j \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \tilde{f}(x) \approx \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \tilde{f}(x_j) w(x - x_j, h) \quad (۱۰-۴)$$

$$\Rightarrow \tilde{f}(x_i) \geq \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \tilde{f}(x_j) w_{ij}$$

که در معادله فوق:

$$w_{ij} = w(x_i - x_j, h) \quad (۱۱-۴)$$

۴-۳-۱ تقریب انتگرالی مشتق تابع

برای تقریب انتگرالی مشتق محلی^۱ تابع $(\nabla \cdot \tilde{f}(x))$ کافی است که در معادله ۴-۵ $\nabla \cdot \tilde{f}(x)$ را جایگزین $\tilde{f}(x)$ کنیم و در نتیجه به دست می‌آید:

$$\langle \nabla \cdot \tilde{f}(x) \rangle = \int_{\Omega} [\nabla \cdot \tilde{f}(x')] w(x - x', h) dx' \quad (۴-۱۲)$$

$$[\nabla \cdot \tilde{f}(x')] w(x - x', h) = \nabla \cdot [\tilde{f}(x') w(x - x', h)] - \tilde{f}(x') \cdot \nabla w(x - x', h) \quad (۴-۱۳)$$

$$\langle \nabla \cdot \tilde{f}(x) \rangle = \int_{\Omega} \nabla \cdot [\tilde{f}(x') w(x - x', h)] dx' - \int_{\Omega} \tilde{f}(x') \cdot \nabla w(x - x', h) dx' \quad (۴-۱۴)$$

مطابق قضیه دیورژانس، جمله اول سمت راست تساوی در معادله (۴-۱۳) به صورت انتگرال مرزی

قابل تبدیل است:

$$\int_{\Omega} \nabla \cdot [\tilde{f}(x') w(x - x', h)] dx' = \oint_S \tilde{f}(x') w(x - x', h) \cdot \vec{n} ds \quad (۴-۱۵)$$

در معادله بالا $\vec{n}$ بردار یکه عمود بر سطح S است.

از آنجاکه تابع کرنل دارای تکیه‌گاه به صورت فشرده است. انتگرال روی مرز برابر با صفر است

بنابراین نتیجه می‌شود:

$$\langle \nabla \cdot \tilde{f}(x) \rangle = 0 - \int_{\Omega} \tilde{f}(x') \cdot \nabla w(x - x', h) dx' \Rightarrow \langle \nabla \cdot \tilde{f}(x) \rangle = - \int_{\Omega} \tilde{f}(x') \cdot \nabla w(x - x', h) dx' \quad (۴-۱۶)$$

مطابق رابطه بالا در تقریب مشتق تابع، عمل مشتق‌گیری، به تابع کرنل منتقل می‌شود یعنی

مطابق آنچه که در فرمول‌بندی ضعیف داریم، برای تقریب مشتق یک متغیر دامنه، از مقدار خود تابع

و مشتق کرنل، در ذرات همسایه استفاده می‌شود.

^۱ Local Derivative

۴-۳-۲ تقریب ذره‌ای مشتق تابع

در تقریب ذره‌ای مشتق تابع کافی است روندی مشابه تقریب ذره‌ای تابع طی کنیم در نتیجه خواهیم داشت:

$$\langle \nabla \cdot \tilde{f}(x_i) \rangle = - \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \tilde{f}(x_j) \cdot \nabla w_{ij} \quad (۱۷-۴)$$

روش دیگری برای بیان مشتق توابع دامنه توسط مناقان در سال ۱۹۹۲ ارائه شد [55] که در آن، فرمول‌بندی تابع میدان برحسب دو ذره i و j صورت گرفته است.

$$\nabla \cdot \tilde{f}(x) = \frac{1}{\rho} [\nabla \cdot (\rho \tilde{f}(x)) - \tilde{f}(x) \cdot \nabla \rho] \quad (۱۸-۴)$$

$$\nabla \cdot \tilde{f}(x) = \rho \left[\nabla \cdot \left(\frac{\tilde{f}(x)}{\rho} \right) + \frac{\tilde{f}(x)}{\rho^2} \cdot \nabla \rho \right] \quad (۱۹-۴)$$

با اعمال کردن تقریب ذره‌ای بر روی دو معادله بالا نهایتاً به مدل‌های مناقان برای تقریب مشتق تابع می‌رسیم:

$$\nabla \cdot \tilde{f}(x_i) = \frac{1}{\rho_i} [\sum_{j=1}^N m_j [\tilde{f}(x_i) - \tilde{f}(x_j) \cdot \nabla_i w_{ij}]] \quad (۲۰-۴)$$

$$\nabla \cdot \tilde{f}(x_i) = \frac{1}{\rho_i} [\sum_{j=1}^N m_j [\frac{\tilde{f}(x_j)}{\rho_j^2} + \frac{\tilde{f}(x_i)}{\rho_j^2} \cdot \nabla_i w_{ij}]] \quad (۲۱-۴)$$

معادلات به‌دست‌آمده برای تقریب ذره‌ای تابع و مشتق آن، می‌توانند بر روی کمیت‌های مختلف فیزیکی از جمله چگالی، سرعت، انرژی و ... اعمال‌شده و فرم گسسته آن‌ها را تولید کنند.

۴-۴ توابع هموارساز

طبق مطالب گفته‌شده توابع هموارساز نقش بسیار مهمی در روش SPH دارند. درواقع می‌توان گفت توابع هموارسازی جانشین تابع دیراک شده و مشخصات نقاط مختلف را تقریب می‌زنند. درواقع هر-چقدر تابع هموارساز همخوانی بیشتری با مسئله موردنظر داشته باشد جواب به‌دست‌آمده دقیق‌تر خواهد بود. در مورد انتخاب و ساختن توابع کرنل تحقیقات زیادی انجام‌شده است که از آن جمله می-

توان به تحقیقات لیو همکارانش اشاره کرد. در تمامی تحقیقات صورت گرفته در رابطه با تابع هموارساز تمامی شرایط لازم (مانند نرمالیزه، فشردگی، مثبت بودن، همواری) رعایت شده است، درواقع از هر تابعی که دارای شرایط بیان شده است می توان به عنوان تابع وزن استفاده کرد. در این قسمت از ذکر روابط ریاضی و ضابطه های تابع صرف نظر شده و تنها برخی توابع معرفی شده اند روابط ریاضی در جدول ۱-۴ ارائه شده است.

۱-۴-۴ کرنل زنگوله ای

لوسی تابع زنگوله ای شکل را به عنوان اولین تابع هموارساز SPH معرفی نمود. معادله تابع هموارساز وی در رابطه (۲۲-۴) و شکل تابع و مشتق اول در شکل (۶-۴) ارائه شده است [۲۵].

$$W(R, h) = \alpha_d \begin{cases} (1 + 3R)(1 - R)^3 & R \leq 1 \\ 0 & R > 1 \end{cases} \quad (22-4)$$

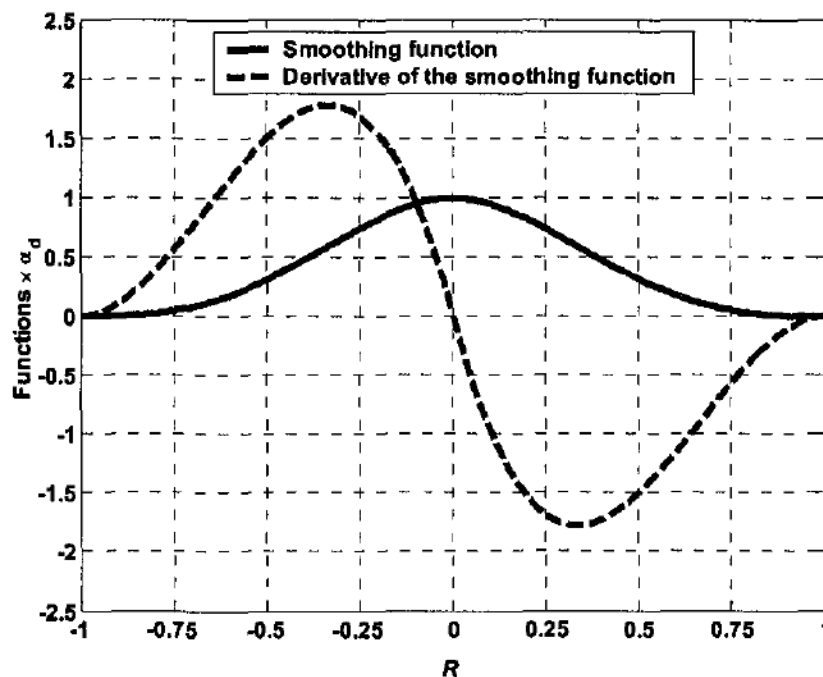
که در آن R را می توان به صورت زیر تعریف کرد: α_d

$$R = \frac{r}{n} = \frac{|\vec{x} - \vec{x}'|}{h} \quad (23-4)$$

در رابطه بالا $\vec{x}$ بردار موقعیت و h طول هموار کننده می باشد α_d ضریب ثابتی بوده که وظیفه

نرمالیزه کردن تابع کرنل بر روی دامنه پشتیبانی را بر عهده دارد و به ترتیب دارای مقادیر $\frac{5}{\pi h^2}$ و $\frac{5}{4h}$

و $\frac{105}{16\pi h^3}$ در فضای یک، دو و سه بعدی می باشد.



شکل ۴-۶ تابع هموارساز Lucy و مشتق اول آن [۲۵]

۴-۴-۲ کرنل گوسی

مناقان [۵۵] در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که هسته‌ی تابع هموارساز SPH می‌بایست دارای تعبیر فیزیکی باشد و بدین منظور استفاده از تابع گوسی را پیشنهاد نمود. حتی مشتقات مرتبه بالاتر تابع گوسی به اندازه کافی هموار می‌باشد.

این تابع دارای دقت و پایداری بالایی بوده و حتی در مدل‌سازی فضاها با بی‌نظمی شدید نیز نتایج مطلوبی ارائه می‌کند.

از لحاظ تئوری تنها زمانی شرط فشردگی برای این تابع رعایت می‌شود که نسبت فاصله بین دونقطه به شعاع هموارسازی به سمت بی‌نهایت میل نماید. ولی از نظر عملی با توجه به اینکه این تابع بسیار سریع به سمت صفر میل می‌نماید، فشرده محسوب می‌شود. یکی از معایب این تابع، هزینه بالای استفاده از آن می‌باشد. با توجه به اینکه تابع وزن تنها در فواصل بسیار دور از مرکز به صفر می‌-

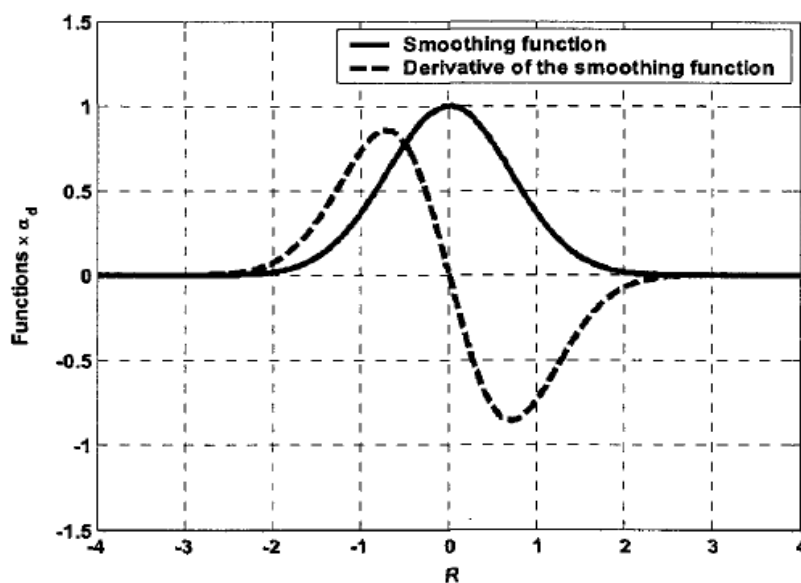
رسد، باید از نقاط بیشتری در داخل دامنه هموارسازی استفاده شود که باعث افزایش دامنه و افزایش ماتریس‌های محاسباتی می‌گردد.

معادله تابع هموارساز گوسی در رابطه (۴-۲۴) و شکل تابع و مشتق اول آن در شکل (۴-۷) ارائه شده است.

$$W(R, h) \propto_d \cdot e^{-R^2} \quad (۴-۲۴)$$

در رابطه فوق α_d برای حالات یک‌بعدی تا سه‌بعدی به ترتیب برابر $\frac{1}{\pi^2 h}$ و $\frac{1}{\pi h^2}$ و $\frac{1}{\pi^2 h^3}$ و همچنین

$$R = \frac{r}{n} = \frac{|\vec{x} - \vec{x}|}{h} \text{ می‌باشد.}$$



شکل ۴-۷ تابع هموارساز مناقان با هسته گوسی و مشتق اول آن [۵۵]

۴-۳-۴ کرنل مرتبه سه (B.Spline)

مناقان و لتنزویو در سال ۱۹۸۵ تابع هموارسازی بر پایه کثیرالجمله‌های درجه سه ارائه کرد [۵۷]. به دلایل گوناگون از جمله شباهت بر هسته گوسی اثرات کمتر فشردگی در مرزها و هموار باقی ماندن

تابع هموارساز در برخی مشتقات مراتب بالاتر تابع اخیر را به عنوان متداول ترین هسته SPH می شناسند که اغلب در مقالات و پژوهش های اخیر از آن استفاده می شود.

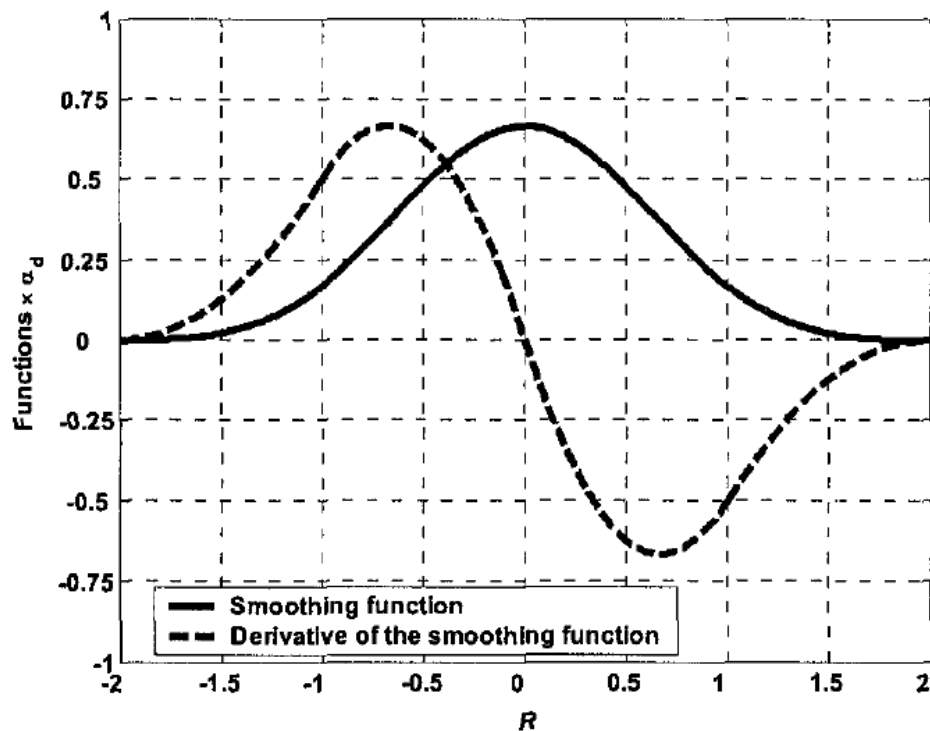
معادله تابع هموارساز B.Spline در رابطه (۴-۲۵) و شکل تابع و مشتق آن در شکل (۴-۸) ارائه شده است.

$$W(R, h) = \quad (۴-۲۵)$$

$$\alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2}R^3 & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6}(2 - R)^3 & 1 \leq R \leq 2 \\ 0 & R > 2 \end{cases}$$

در رابطه فوق α_d برای حالات یک بعدی تا سه بعدی به ترتیب برابر $\frac{1}{h}$ ، $\frac{15}{7\pi h^2}$ ، $\frac{3}{2\pi h^3}$ و همچنین

$$R = \frac{r}{n} = \frac{|\vec{x} - \vec{x}'|}{h} \text{ می باشد.}$$



شکل ۴-۸ تابع هموارساز Spline و مشتق اول آن

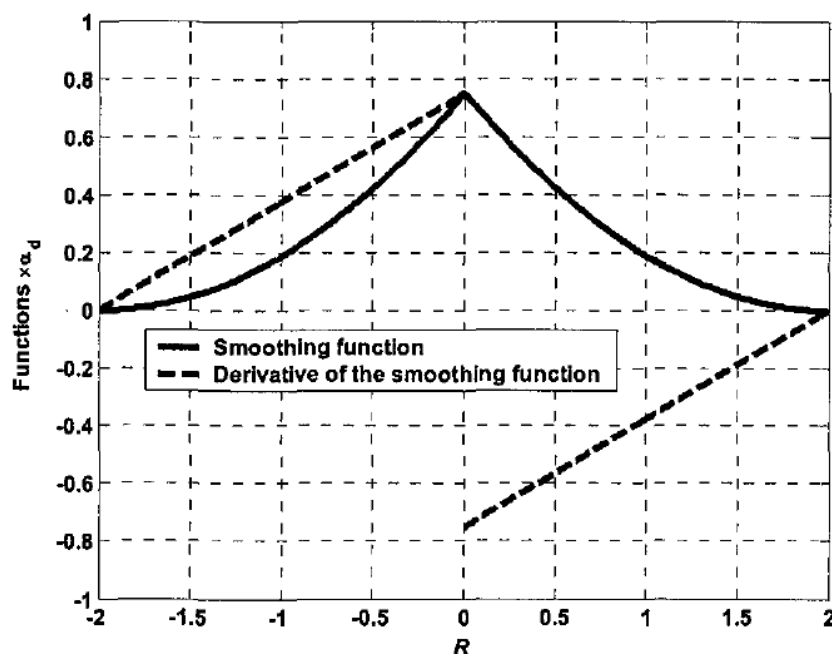
۴-۴-۴ کرنل مرتبه دو

در سال ۱۹۹۶ جانسون [۸۳] تابع مرتبه دومی برای مدل سازی ضربات شدید ارائه نمود. تابع پیشنهادی وی از جهاتی خلاف سایر توابع می باشد. مطابق شکل (۴-۹) مشتق این تابع با نزدیک شدن ذرات به مرکز همواره صعودی و با دور شدن از مرکز همواره نزولی است. این خاصیت به پایداری مسائل ضربه ای کمک می کند. معادله تابع هموار ساز وی در رابطه (۴-۲۶) و شکل تابع و مشتق اول آن در شکل (۴-۹) ارائه شده است.

$$w(R, h) = \alpha_d \begin{cases} \frac{3}{16}R^2 - \frac{3}{4}R + \frac{3}{4} & 0 \leq R < 2 \\ 0 & R > 2 \end{cases} \quad (۴-۲۶)$$

در رابطه فوق α_d برای حالات یک بعدی تا سه بعدی به ترتیب برابر $\frac{1}{h}$ ، $\frac{2}{\pi h^2}$ ، $\frac{5}{4\pi h^3}$ و همچنین

$$R = \frac{r}{n} = \frac{|\vec{x} - \vec{x}'|}{h} \text{ می باشد.}$$



شکل ۴-۹ تابع مرتبه دوم و مشتق آن

طی سالیان اخیر، محققان به فراخور موضوع کاری درصدد استخراج توابعی برآمدند که حداکثر کارایی و حداقل خطا را در آن زمینه فراهم آورد. لذا، دامنه‌ی گسترده‌ای از انواع گوناگون توابع هموارساز SPH در دسترس است که در جدول زیر به برخی اشاره شده است.

جدول ۴-۱ برخی از توابع هموارساز در روش SPH [۴۲]

نام روش	تابع هموارساز $W(R,h)$
مرتبه چهارم لوسی ۱۹۷۷	$\alpha_d(1+3R)(1-R)^3 \quad R < 1$
تابع گوسی Gingold, monaghan197 (7)	$\alpha_d \cdot e^{-R^2}$
اسپیلاین مکعبی (Monaghan,Lat tanzio 1985)	$\alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2}R^3 & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6}(2-R)^3 & 1 \leq R \leq 2 \end{cases}$
پله‌ای مرتبه چهار (Morris1996)	$\alpha_d \begin{cases} (R+2.5)^4 - 5(R+1.5)^4 + 10(R+0.5)^4 & 0 \leq R < 0.5 \\ (2.5-R)^4 - 5(1.5-R)^4 & 0.5 \leq R < 1.5 \\ (2.5-R)^4 & 1.5 \leq R \leq 2.5 \end{cases}$
پله‌ای مرتبه پنجم (Morris1996)	$\alpha_d \begin{cases} (3-R)^5 - 6(2-R)^5 + 15(1-R)^5 & 0 \leq R < 1 \\ (3-R)^5 - 6(2-R)^5 & 1 \leq R < 2 \\ (3-R)^5 & 2 \leq R \leq 3 \end{cases}$
مرتبه ۲ (Johnson1996)	$\alpha_d \left(\frac{3}{16}R^2 - \frac{3}{4}R + \frac{3}{4} \right) \quad 0 < R < 2$
گوسی ویژه (Monaghan,Lat tanzio 1985)	$\alpha_d \cdot \left(\frac{3}{2} - R^2 \right) e^{-R^2} \quad 0 < R < 2$
مرتبه ۲ گنبدی شکل (Hicks,liebrok 2000)	$\alpha_d \cdot (1-R^2) \quad 0 < R < 1$
مرتبه چهارم جدید (Liu,Lam 2002)	$\alpha_d \cdot \left(\frac{2}{3} - \frac{9}{8}R^2 + \frac{19}{24}R^3 - \frac{5}{32}R^4 \right) \quad 0 \leq R \leq 2$

۴-۵ روابط SPH مسائل ضربه با سرعت بالا

در برخوردهای با سرعت بالا انرژی جنبشی در هنگام برخورد، در حدی است که موجب تغییر شکل شدید مواد جامد شده و حتی در مواردی در برخی نواحی ماده جامد به صورت جریانی از سیال درمی-آید. زمانی که برخورد همراه بانفوذ باشد، جسم جامد به تکه‌های کوچک‌تری می‌شکند و هر تکه، آزادانه در فضا منتشر می‌شود. تحلیل حرکات این قطعات در گام‌های زمانی مختلف کار دشواری است. SPH روش مفید برای گسسته سازی معادلات دیفرانسیل وابسته به زمان در قالب معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی و روابط ساختاری موجود برای جسم جامد به کمک تابع کرنل می‌باشد.

۴-۵-۱ پیوستگی

در روش هیدرودینامیک ذرات هموار، معادله پیوستگی یک از معادلات اساسی در حل می‌باشد، چراکه توزیع ذرات در هر لحظه بر اساس این معادله استوار است. همچنین در صورت استفاده از طول هموار کننده متغیر بازمان در طول حل، معادله پیوستگی نقش مهمی را در ساختار رابطه طول هموار کننده ایفا می‌کند. فرم کلی معادله پیوستگی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \vec{v} \quad (۴-۲۷)$$

در رابطه بالا ρ چگالی و v بردار سرعت است. با استفاده از رابطه (۴-۱۶) می‌توان معادله پیوستگی را به فرم متداول در SPH نوشت:

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \rho_i \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta} \quad (۴-۲۸)$$

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \rho_i \sum_j m_j (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\delta w(r - r_j, h)}{\delta x_i^\beta}$$

فرم اول به علت دربرداشتن چگالی هر دو ذره شرکت کننده در برهم کنش برای تحلیل مسائل با مرزهای تداخلی در دو ماده متفاوت مناسب تر است. برای این که نحوه استخراج معادلات پیوستگی بیشتر روشن شود، روند استخراج هر دو فرم معادلات بالا را تشریح می کنیم:

استخراج فرم اول:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \vec{v} = -\rho \frac{\delta v^\beta}{\delta x^\beta} \quad (29-4)$$

$$\left(-\rho \frac{\delta v^\beta}{\delta x^\beta}\right)_i = -\rho_i \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} v_j^\beta \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta} \quad (30-4)$$

$$\nabla 1 = 0 \Rightarrow \int_\Omega 1 \cdot \nabla w(x - x', h) dx' = 0 \quad (31-4)$$

$$\Rightarrow \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta} = 0 \quad (32-4)$$

$$6 - 4 \times v_i^\beta \rho_i \Rightarrow \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} v_j^\beta \rho_i \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta} = 0 \quad (33-4)$$

$$30 - 4 + 33 - 4 \Rightarrow \left(-\rho \frac{\delta v^\beta}{\delta x^\beta}\right)_i = \quad (34-4)$$

$$\rho_i \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta}$$

طبق ۲۹-۴ و ۳۴-۴

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \rho_i \sum_j m_j (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\delta w(r - r_j, h)}{\delta x_i^\beta}$$

استخراج فرم دوم

$$-\rho \frac{\delta v^\beta}{\delta x^\beta} = \left(\frac{\delta(\rho v^\beta)}{\delta x^\beta} - v^\beta \cdot \frac{\delta \rho}{\delta x^\beta}\right) \quad (35-4)$$

$$\left(\frac{\delta(\rho v^\beta)}{\delta x^\beta}\right)_i = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} v_j^\beta \rho_j \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta} \quad (36-4)$$

$$= - \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} v_j^\beta \rho_j \frac{\delta w(r - r_j, h)}{\delta x_i^\beta}$$

$$\left(-v^\beta \cdot \frac{\delta \rho}{\delta x^\beta}\right)_i = -\sum_j \frac{m_j}{\rho_j} v_i^\beta \rho_j \frac{\delta w(r-r_{j,h})}{\delta x_j^\beta} \quad (37-4)$$

$$= \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} v_i^\beta \rho_j \frac{\delta w(r-r_{j,h})}{\delta x_j^\beta}$$

$$36-4+37-4 \Rightarrow \left(-\rho \frac{\delta v^\beta}{\delta x^\beta}\right)_i = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\delta w(r-r_{j,h})}{\delta x_i^\beta} \quad (38-4)$$

$$(29-4)_9 (35-4)_9 (38-4) \Rightarrow$$

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_j m_j (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\delta w(r-r_{j,h})}{\delta x_i^\beta}$$

۲-۵-۴ مومنتوم

فرم کلی معادله مومنتوم به شکل زیر است:

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \sigma \quad (39-4)$$

در فرمول بندی هیدرودینامیک ذرات هموار معادله مومنتوم را به دو فرم رایج زیر می توان بیان کرد:

$$\frac{Dv_i}{Dt} = \sum_j m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta} + \sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_i \rho_j} + \Pi_{ij} \right) \frac{\delta w(r-r_{j,h})}{\delta x_i^\beta} \quad (40a-4)$$

$$\frac{Dv_i}{Dt} = \sum_j m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \frac{\delta w(r-r_{j,h})}{\delta x_i^\beta} \quad (40b-4)$$

در معادلات بالا $\sigma_i^{\alpha\beta}$ ، تانسور تنش در ذره i ام و $\sigma_j^{\alpha\beta}$ ، مقدار متناظر آن در ذره j ام می باشد.

Π_{ij} نوعی ویسکوزیته مصنوعی^۱ بوده که به معادلات مومنتوم اضافه می شود. هر دو فرم ذکر شده در

بالا در حل مسائل به روش SPH کاربرد دارد اما فرم دوم به علت مثبت و متقارن بودن باعث بالا رفتن

دقت حل شد و با دقت بهتری عمل می کند.

روند استخراج فرم معادله مومنتوم به عنوان نمونه بیان می کنیم:

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \sigma = \frac{1}{\rho} \frac{\delta \sigma^{\alpha\beta}}{\delta x^\beta} \quad (41-4)$$

^۱ Artificial Viscosity

$$\frac{1}{\rho} \frac{\delta \sigma^{\alpha\beta}}{\delta x^\beta} = \frac{\delta}{\delta x^\beta} \left(\frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\rho} \right) + \frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\rho^2} \frac{\delta \rho}{\delta x^\beta} \quad (42-4)$$

$$\left(\frac{\delta}{\delta x^\beta} \left(\frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\rho} \right) \right)_i = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_j} \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta} \quad (43-4)$$

$$\left(\frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\rho^2} \frac{\delta \rho}{\delta x^\beta} \right)_i = \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \rho_j \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta} \quad (44-4)$$

$$(41-4), (42-4), (43-4), (44-4) \Rightarrow$$

$$\frac{Dv_i}{Dt} = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_j} \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta} + \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \rho_j \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta} \quad (45-4)$$

$$\Rightarrow \frac{Dv_i}{Dt} = \sum_j m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta} \quad (46-4)$$

با لحاظ کردن ویسکوزیته مصنوعی

$$\frac{Dv_i}{Dt} = \sum_j m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta}$$

طبق دیدگاه مکانیک محیط‌های پیوسته هر تانسور را می‌توان به دو جزء کروی و انحرافی تقسیم

کرد در نتیجه خواهیم داشت:

$$\sigma^{\alpha\beta} = -\rho \delta^{\alpha\beta} + S^{\alpha\beta} \quad (47-4)$$

که در آن $\sigma^{\alpha\beta}$ مؤلفه‌های تانسور کلی تنش، P فشار همگن وارده به ماده که باعث تغییر حجم

می‌شود، $S^{\alpha\beta}$ مؤلفه‌های انحرافی تانسور تنش که باعث تغییر شکل می‌شوند و $\delta^{\alpha\beta}$ مؤلفه‌های دلتای

کرونکر می‌باشد. با جایگزین کردن ۴۷-۴ در ۴۰-۴ داریم:

$$\frac{Dv_i}{Dt} = \sum_j m_j \left(\frac{-(P_i + P_j) \delta^{\alpha\beta}}{\rho_i \rho_j} + \frac{S_i^{\alpha\beta} + S_j^{\alpha\beta}}{\rho_i \rho_j} + \Pi_{ij} \right) \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta} \quad (48a-4)$$

$$\frac{Dv_i}{Dt} = \sum_j m_j \left(\frac{S_i^{\alpha\beta} - p_i \delta^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{S_j^{\alpha\beta} - p_j \delta^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \frac{\delta w(r-r_j, h)}{\delta x_i^\beta} \quad (48b-4)$$

۴-۵-۳ انرژی

فرم کلی معادله انرژی به شکل زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{De}{Dt} = \frac{1}{\rho} \sigma : \nabla \otimes \vec{v} \quad (۴۹-۴)$$

برای به دست آوردن معادله انرژی به فرم SPH کافی است روندی مشابه روند به دست آوردن

معادله مومنتوم دنبال شود فرم نهایی انرژی را می‌توان به دو صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_j m_j \frac{(P_i + P_j)}{\rho_i \rho_j} (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\delta w(r-r_{j,h})}{\delta x_i^\beta} + \frac{1}{\rho_i} S_i^{\alpha\beta} \dot{\epsilon}_l^{\alpha\beta} \quad (۵۰ a-۴)$$

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_j m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} \right) (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\delta w(r-r_{j,h})}{\delta x_i^\beta} + \frac{1}{\rho_i} S_i^{\alpha\beta} \dot{\epsilon}_l^{\alpha\beta} \quad (۵۰ b-۴)$$

روند استخراج معادله انرژی نیز مشابه روند استخراج معادله مومنتوم بوده که پیش‌تر شرح داده

شد. در معادلات بالا $\dot{\epsilon}^{\alpha\beta}$ مؤلفه‌های تانسور نرخ کرنش بوده و به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\dot{\epsilon}^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta v_\alpha}{\delta x_\beta} + \frac{\delta v_\beta}{\delta x_\alpha} \right) \quad (۵۱-۴)$$

رابطه تانسور نرخ کرنش در فرمول‌بندی SPH به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{\epsilon}_l^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \left\{ (v_j^\alpha - v_i^\alpha) \frac{\delta w(r-r_{j,h})}{\delta x_i^\beta} + (v_j^\beta - v_i^\beta) \frac{\delta w(r-r_{j,h})}{\delta x_i^\alpha} \right\} \quad (۵۲-۴)$$

فصل پنجم

مدل سازی عددی نفوذ پرتابه

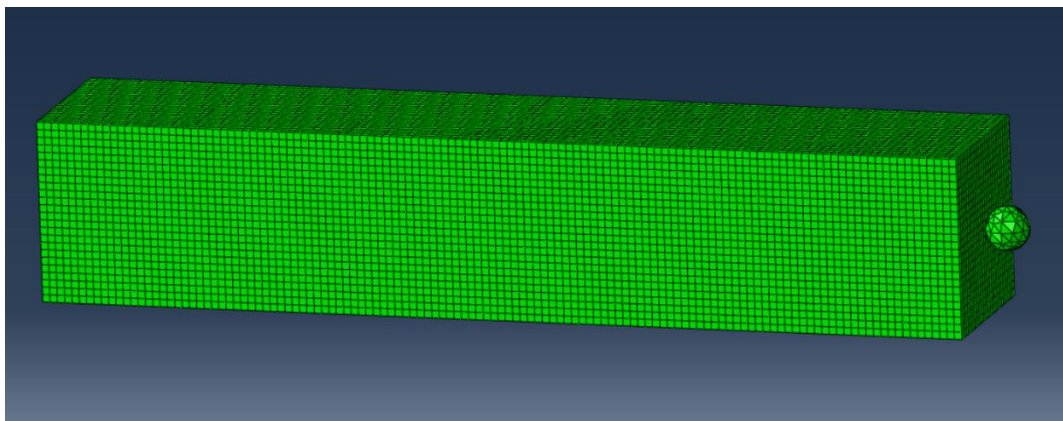
۵- مقدمه

در این بخش به مدل سازی عددی نفوذ پرتابه با استفاده از روش SPH در نرم افزار ABAQUS پرداخته می شود. برای تحقق این هدف نفوذ گلوله کروی شکل در نرم افزار مدل سازی شده است و نتایج حاصل از آن را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در بخش بعدی شبیه سازی نفوذ پرتابه های نوک تیز انجام گرفته است و به بررسی تأثیر انواع پارامترها بر میزان نفوذ پرتابه پرداخته شده است. و در انتها با استفاده از شبیه سازی نفوذ ترکش در خاک درشت دانه، تأثیر عوامل مختلف در میزان نفوذ مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۵-۱ صحت سنجی

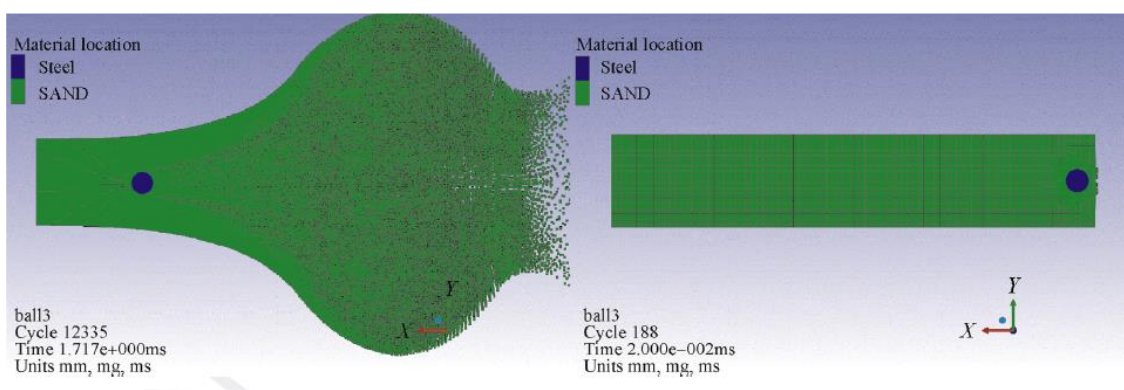
به منظور انجام صحت سنجی گلوله فولادی کروی شکل به شعاع ۰/۶ سانتیمتر با سرعت 850 m/s به سمت هدف شلیک می شود. هدف مورد نظر خاک ماسه ای با چگالی $1/82 \text{ g/cm}^3$ و ابعاد $25 \times 4/8 \times 4/8$ سانتی متر در نظر گرفته شده است. جهت حصول اطمینان از صحت فرضیات مدل سازی، نتایج به دست آمده، با تحقیقات انجام شده توسط ماکسنس^۱ و همکاران مقایسه می گردد [۹۹]. شکل (۱-۵) گلوله کروی و هدف مورد بررسی که در نرم افزار آباکوس مدل سازی شده است و همچنین شکل (۲-۵) نحوه برخورد و شکل کلی هدف و گلوله که توسط ماکسنس و همکاران انجام گرفته است را نشان می دهد.

¹ MOXNES

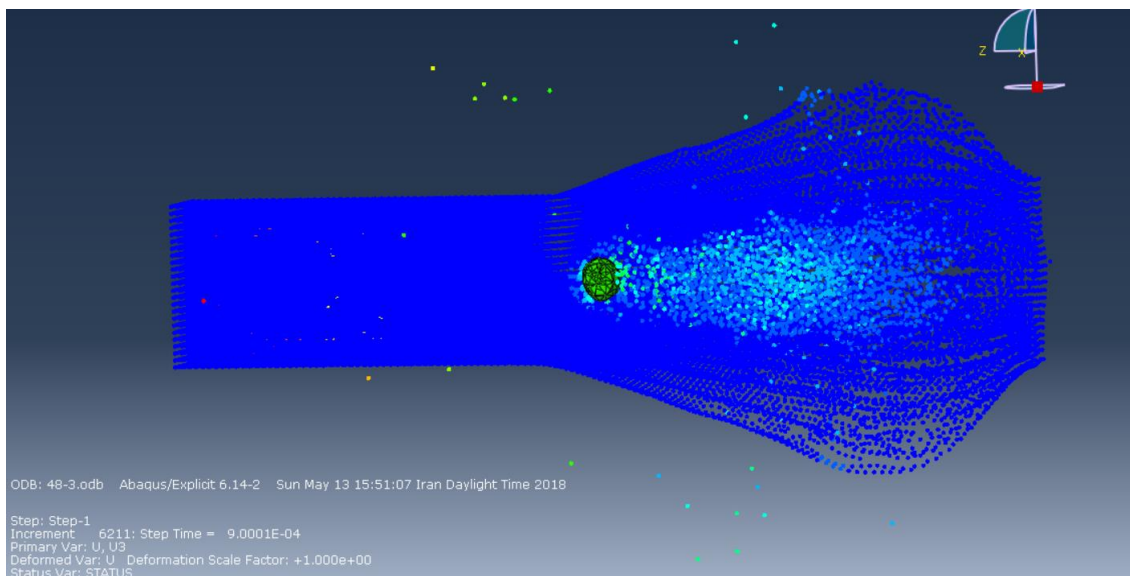


شکل ۵-۱ نمایشی از گلوله کروی و هدف

همان‌گونه که در فصل قبل اشاره شد درروش SPH جسم شبیه‌سازی‌شده به‌جای شبکه با مجموعه‌ای از ذرات مدل‌سازی می‌گردد. از این‌رو در این پژوهش، هدف ماسه‌ای با ۷۲۰۰۰ ذره مدل‌سازی می‌شود. همچنین تعداد المان‌های گلوله ۴۱۱ عدد در نظر گرفته‌شده است. در شبیه‌سازی حاضر، گلوله با سرعت 850 m/s و در جهت Z مطابق شکل (۵-۳) به داخل خاک شلیک‌شده و با توجه به سرعت بالا حرکت گلوله مدت‌زمان شبیه‌سازی ۰/۰۰۹ ثانیه می‌باشد تا گلوله مسیر مدل‌سازی را طی نموده و به نفوذ حداکثر و سرعت تقریباً صفر برسد.

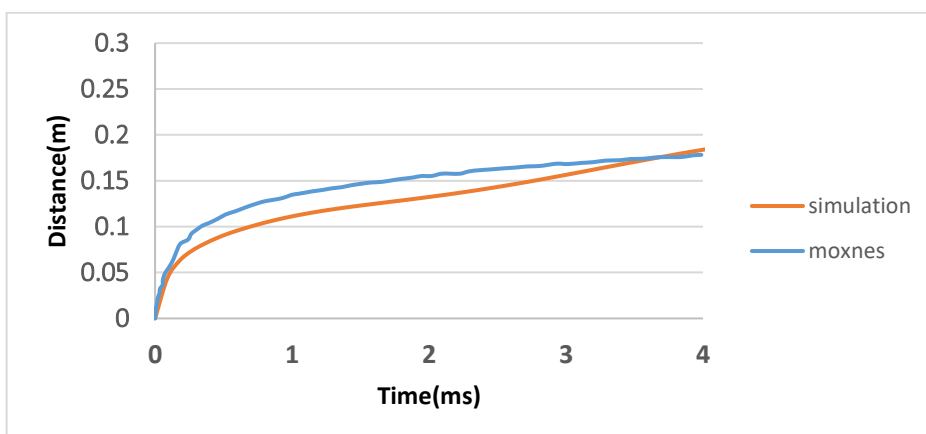


شکل ۵-۲ مدل‌سازی صورت گرفته توسط Moxnes [۹۹]

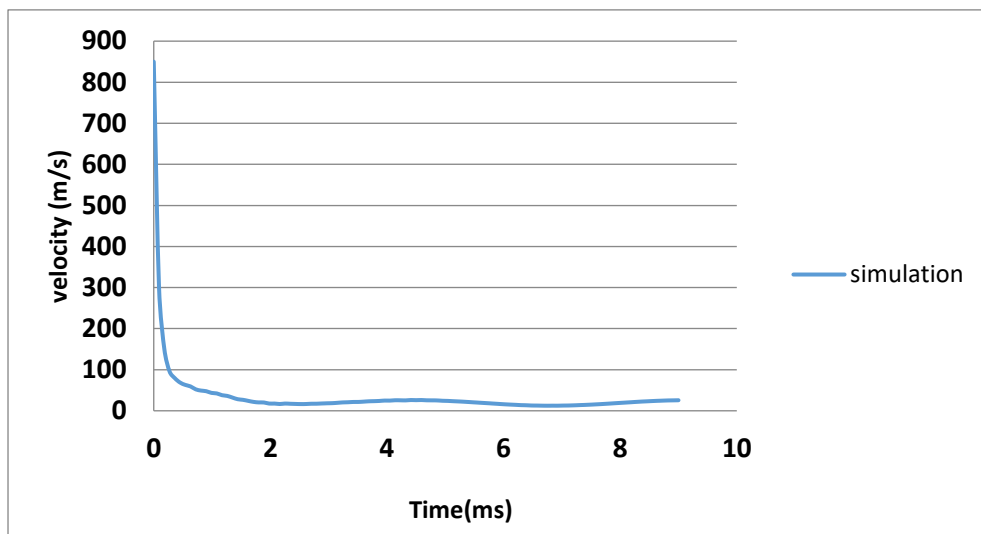


شکل ۵-۳ مدل سازی صورت گرفته در ABAQUS

بر اساس نتایج به دست آمده، حداکثر میزان نفوذ پرتابه در زمان 0.004 ثانیه اتفاق افتاده است که این میزان حدود 18 سانتیمتر می باشد. مطابق شکل (۵-۴) می توان نمودار نفوذ-زمان برای دو حالت شبیه سازی شده با استفاده از نرم افزار ABAQUS و AUTODYN را که حاصل تحقیقات ماکسنس و همکاران می باشد را مشاهده نمود. همان گونه که در این شکل نیز مشهود است، نفوذ حداکثر گلوله در زمان 0.004 ثانیه اتفاق افتاده است. طبق نتایج ماکسنس و همکاران سرعت گلوله در انتها زمان نفوذ حداکثر به طور کامل صفر نشده است بلکه سرعت بسیار ناچیزی در گلوله باقی می ماند (شکل ۵-۵).



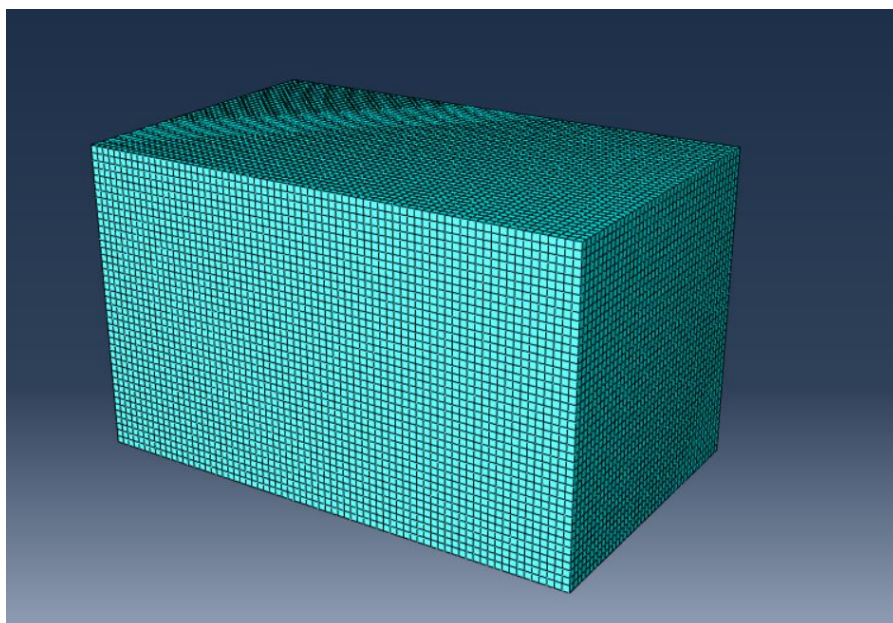
شکل ۵-۴ نمودار نفوذ-زمان پرتابه کروی



شکل ۵-۵ نمودار سرعت-زمان پرتابه کروی

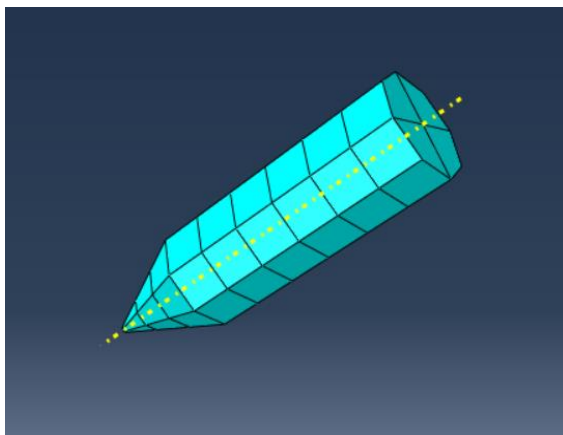
۲-۵ فیزیک مسئله

به منظور بررسی میزان نفوذ پرتابه در خاک، مدل شبیه سازی شامل دو بخش پرتابه و هدف در نظر گرفته شده است. هدف مورد نظر که خاک ماسه ای می باشد، دارای ابعاد $30 \times 30 \times 50$ سانتی متر و 131279 ذره است که در شکل (۵-۶) نمایی از هدف شبیه سازی شده نشان داده شده است.

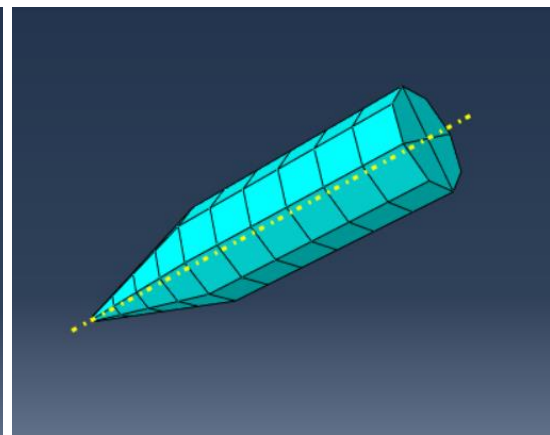


شکل ۵-۶ هدف ماسه ای

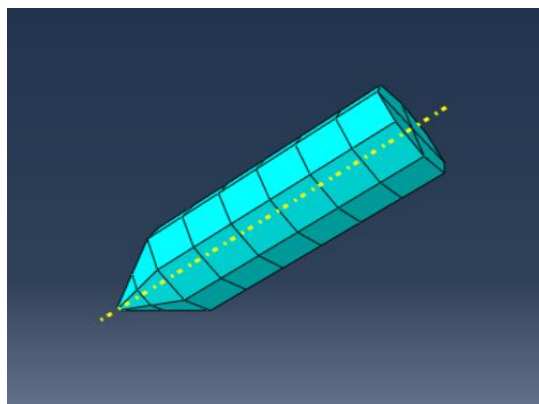
پرتابه‌های مورد بررسی در این پژوهش شامل پرتابه‌های نوک‌تیز و ترکش‌های مثلثی شکل می‌باشند. همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد پرتابه دارای دماغه مخروط نوک‌تیز به دلیل راحتی در ساخت از محبوبیت خاصی برخوردار است و رایج‌ترین دماغه می‌باشد. پرتابه‌های نوک‌تیز دارای زاویه نوک مختلف می‌باشند که در این پژوهش به بررسی سه نوع پرتابه با زاویه نوک ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه پرداخته شده است. این پرتابه‌ها دارای طول آزاد ۳ سانتی‌متر و طول کل تقریباً ۵ سانتی‌متر و قطر ۱۲ میلی‌متر می‌باشد که در شکل (۵-۷، ۵-۸ و ۵-۹) نمایی از پرتابه‌های نوک‌تیز شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.



شکل ۵-۸ پرتابه با زاویه نوک ۴۵ درجه

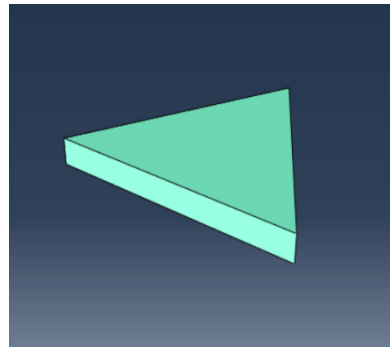
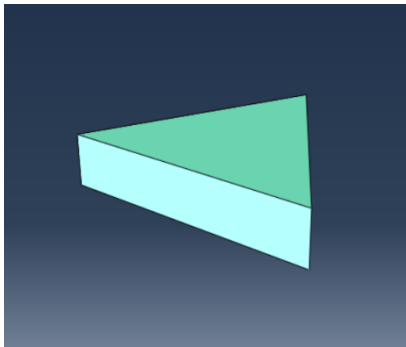


شکل ۵-۷ پرتابه با زاویه نوک ۳۰ درجه

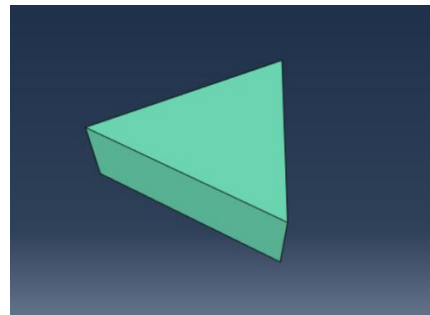
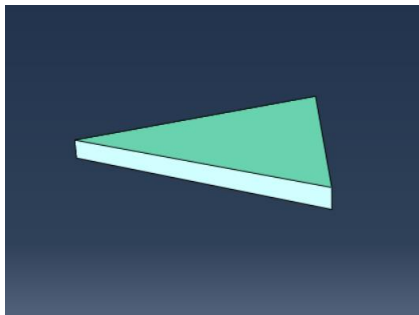


شکل ۵-۹ پرتابه با زاویه نوک ۶۰ درجه

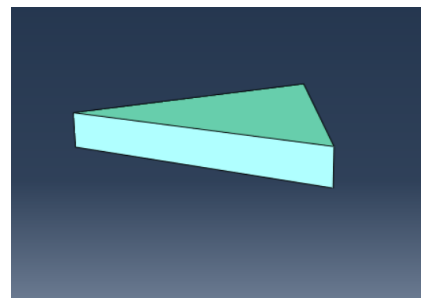
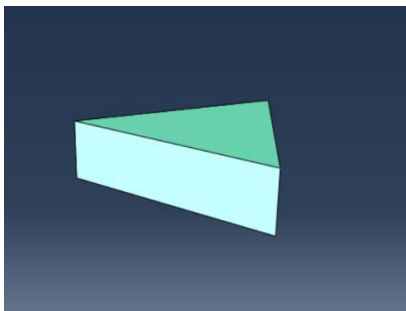
همچنین ترکش‌های مثلثی شکل شبیه‌سازی شده شامل ۱۱ نوع ترکش با ابعاد و ضخامت‌های مختلف می‌باشد (شکل ۵-۱۰ الی ۵-۲۰) این ترکش‌ها دارای دو تیپ مثلث متساوی‌الاضلاع و متساوی‌الساقین می‌باشند که ترکش‌های متساوی‌الاضلاع ابعاد ضلع آن‌ها ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر است که با ضخامت‌های ۲، ۴ و ۸ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین دو ترکش باقاعده ۱ و ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر در این پژوهش شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار داده شده است.



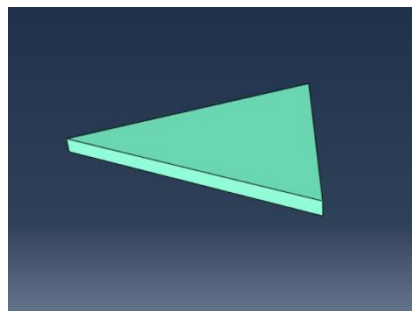
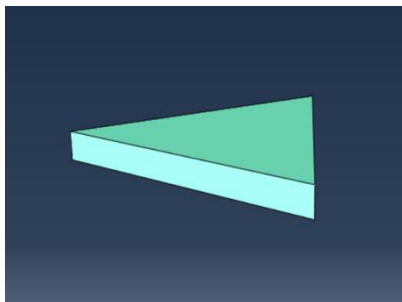
شکل ۵-۱۰ ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر شکل ۵-۱۱ ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر



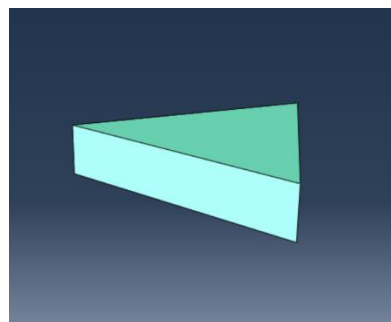
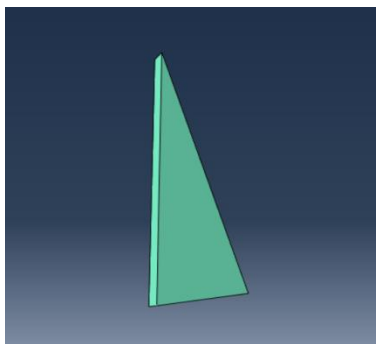
شکل ۵-۱۲ ترکش ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۸ میلی‌متر شکل ۵-۱۳ ترکش ۳ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر



شکل ۵-۱۴ ترکش ۳ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر شکل ۵-۱۵ ترکش ۳ سانتی‌متر و ضخامت ۸ میلی‌متر

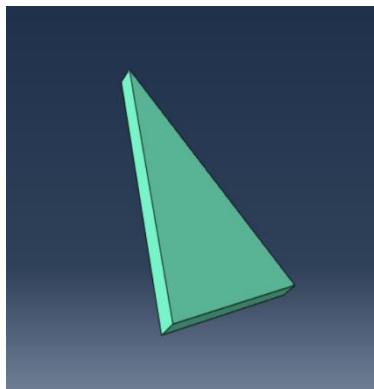


شکل ۵-۱۶ ترکش ۴ سانتی متر و ضخامت ۲ میلی متر شکل ۵-۱۷ ترکش ۴ سانتی متر و ضخامت ۴ میلی متر



شکل ۵-۱۹ ترکش باقاعده ۱ سانتی متر

شکل ۵-۱۸ ترکش ۴ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر



شکل ۵-۲۰ ترکش باقاعده ۲ سانتی متر

۵-۳ پارامترهای مدل سازی

پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی پرتابه و هدف در جدول ۵-۱ و ۵-۲ آورده شده است. جهت مدل رفتاری خاک ماسه‌ای تحت اثر بار دینامیکی و سرعت بالای گلوله از مدل رفتاری موهر کولمب

استفاده می‌کنیم. هدف موردنظر در سه نوع خاک مختلف موردبررسی قرار گرفته است. همچنین تمام پرتابه‌ها از جنس فولاد می‌باشند که برای آن خواص آسیب ورقه‌ای^۱، آسیب برش^۲ و پلاستیک^۳ تعریف شده است هرچند که این نوع خواص در نتایج مدنظر تأثیر بسزایی نمی‌گذارد.

جدول ۵-۱ پارامترهای مدل‌سازی پرتابه فولادی

چگالی (kg/m^3)	E(MPa)	ν
۷۸۰۰	۲۰۰	۰٫۳

جدول ۵-۲ پارامترهای مدل‌سازی خاک ماسه‌ای

ترتیب	چگالی (kg/m^3)	E(MPa)	ϕ
نوع ۱: ماسه سست	۱۵۰۰	۲۰	۳۰
نوع ۲: ماسه متوسط	۱۸۰۰	۳۵	۳۲
نوع ۳: ماسه نیمه متراکم	۲۱۰۰	۵۰	۳۴

اهداف مورد نظر سه نوع خاک درشت دانه با خصوصیات مکانیکی مختلف می‌باشد. خاک نوع ۱ ماسه سست می‌باشد که دارای چگالی $1500 kg/m^3$ و مدول الاستیسیته ۲۰ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه می‌باشد. خاک نوع ۲ که ماسه متوسط است دارای چگالی $1800 kg/m^3$ و مدول الاستیسیته ۳۵ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی ۳۲ می‌باشد. همچنین خاک نوع ۳ ماسه نیمه متراکمی است که دارای چگالی $2100 kg/m^3$ و مدول الاستیسیته ۵۰ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی ۳۴ درجه می‌باشد.

¹ Ductile Damage

² Shear Damage

³ Plastic

۵-۴ شبیه سازی

هدف مورد نظر طبق مشخصات گفته شده در نرم افزار مدل سازی شد. برای حل مسائل دینامیکی از دو نوع حلگر Implicit و Explicit می توان استفاده کرد. روش ضمنی (Implicit) همواره حل پایداری ارائه می دهد و می توان گفت معمولاً بهترین گزینه در خصوص مسائل استاتیک و یا شبه استاتیک است. در این روش، مجموعه معادلات سیستم به روش مستقیم حل می شود، به عبارت دیگر در این روش، ماتریس سختی برای کل سازه تشکیل شده و برای هر گره جابه جایی متناظر با آن به دست می آید. و حل مسئله بر مبنای معکوس کردن ماتریس سختی استوار است. به همین دلیل زمان حل این روش در مقایسه با روش صریح (Explicit) بیشتر خواهد بود. در عوض نتایج روش ضمنی نسبت به روش صریح تطابق بهتری با واقعیت دارند.

یکی از مزایای روش صریح نسبت به روش ضمنی، سرعت بالاتر حل در مسائل پیچیده تماس است دیگر مزیت استفاده از این روش نیاز کم تر به فضای ذخیره سازی در یک مسئله یکسان نسبت به روش ضمنی در رایانه است. روش Explicit به خوبی از عهده حل مسائل غیرخطی برای مواد غیرخطی برمی آید اما نباید از یک نکته مهم غافل شد، پایداری در روش Explicit مشروط به انتخاب گام های زمانی کوچک است لذا به منظور پایداری حل در این روش معمولاً نمود زمانی حل کوچک انتخاب می شود که در این پژوهش گام زمانی ۰/۰۰۹ ثانیه در نظر گرفته شده است.

در اینجا برای تحلیل از روش SPH استفاده شده است. برای انتخاب بهترین اندازه مش، این مدل سازی بامش بندی های مختلفی صورت گرفت و اندازه مش تا جایی کوچک شد که کوچک تر شدن بیشتر اندازه مش تأثیر چندانی روی نتیجه ایجاد نمی کرد و تنها زمان محاسبات را طولانی می کرد. ابعاد شبکه استفاده شده برای هدف ماسه ۰/۰۰۷ متر و برای پرتابه ۰/۰۰۵ متر در نظر گرفته شده است. در این پژوهش پرتابه ها و ترکش ها با سرعت ۷۵۰ متر بر ثانیه و در جهت Z به مدل برخورد کرده اند و تنها عامل محرک پرتابه است.

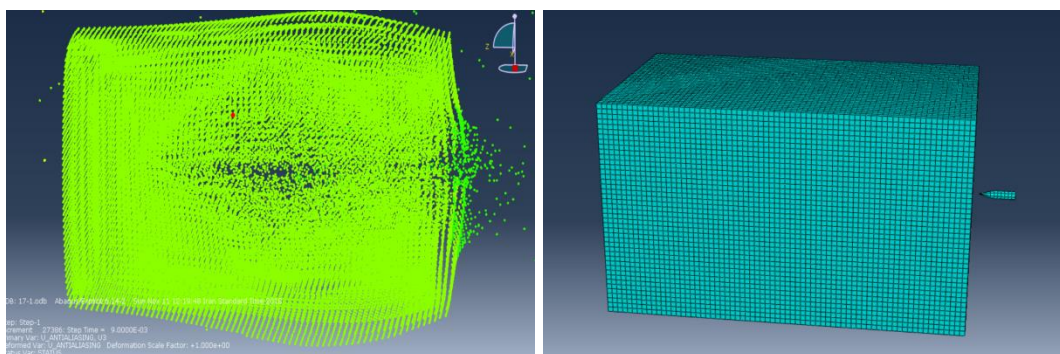
۵-۵ نتایج شبیه سازی

ابتدا به بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی پرتابه نوک تیز پرداخته و در ادامه ترکش با ابعاد و ضخامت مختلف مورد بحث قرار گرفته است.

۵-۵-۱ نتایج حاصل از پرتابه نوک تیز

نتایج حاصل از نفوذ پرتابه نوک تیز برای سه نوع پرتابه با زاویه دماغه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ در اهداف سست، متوسط و نیمه متراکم در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۵-۱-۱ پرتابه با زاویه نوک دماغه ۳۰ درجه

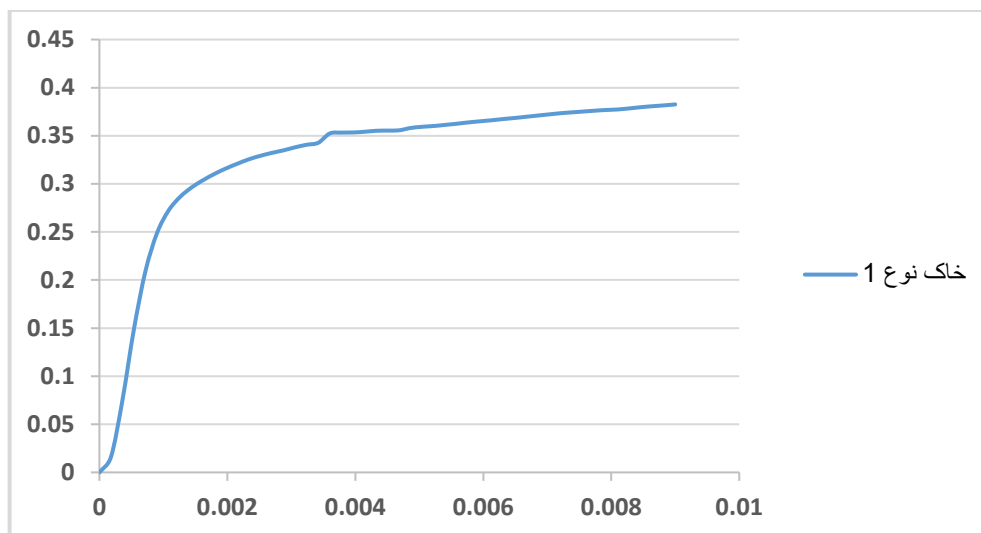


شکل ۵-۲۲ شکل نفوذ پرتابه ۳۰ درجه

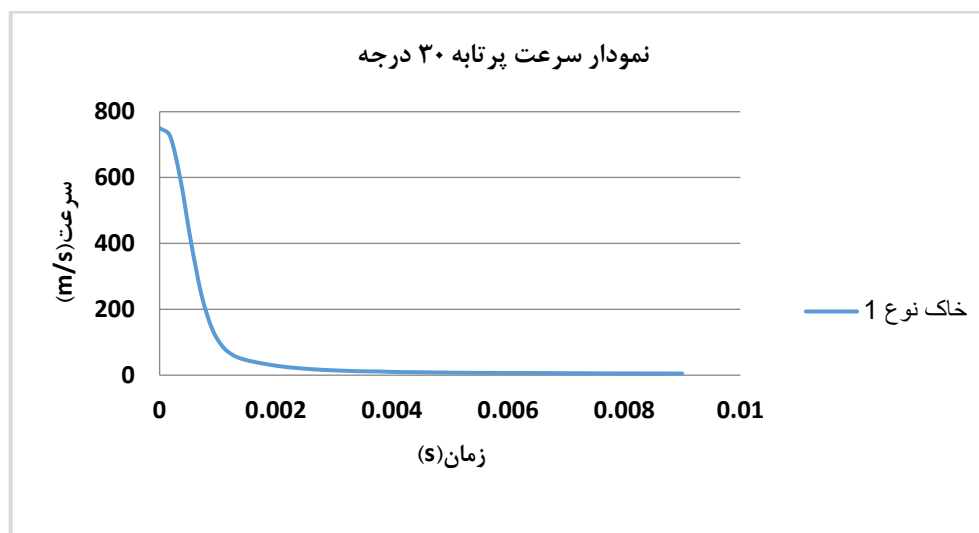
شکل ۵-۲۱ المان بندی پرتابه ۳۰ درجه

این پرتابه را در سه هدف ماسه ای مختلف نوع ۱، ۲ و ۳ (ماسه سست، متوسط و نیمه متراکم) با سرعت ۷۵۰ متر بر ثانیه شلیک کرده که در شکل (۵-۲۱) و (۵-۲۲) المان بندی و شکل نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۱ (ماسه سست) نشان داده شده است و در پایان بازه زمانی حل مسئله که ۰/۰۰۹ ثانیه در نظر گرفته شده است نتایج خروجی حاصل از هریک از نمودارهای نفوذ، سرعت و نفوذ- سرعت مورد بررسی قرار گرفته است.

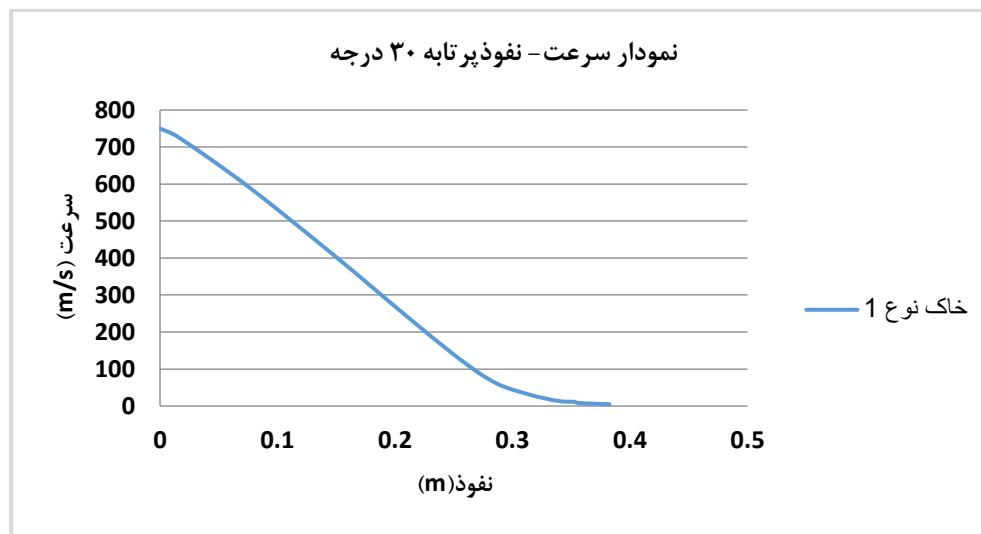
الف) خاک نوع ۱ (ماسه سست) :



شکل ۵-۲۳ نمودار نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۱



شکل ۵-۲۴ نمودار سرعت پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۱



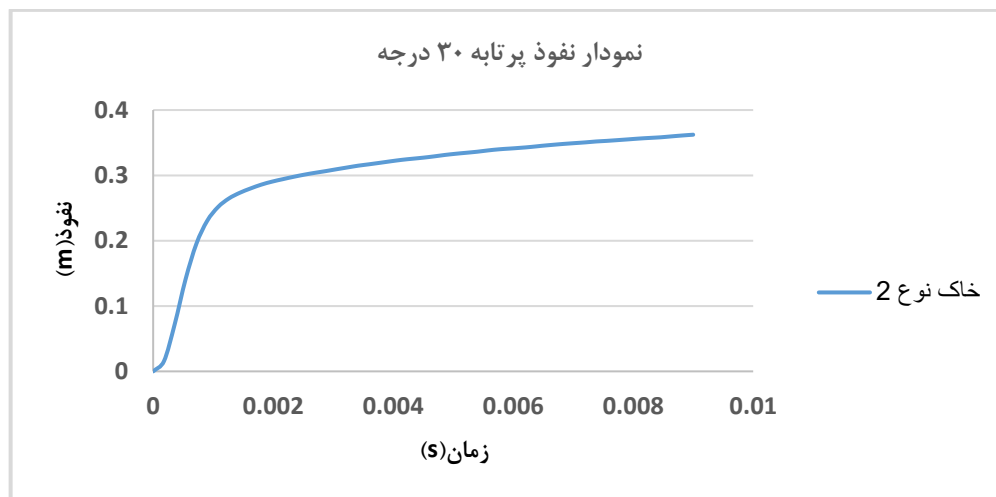
شکل ۵-۲۵ نمودار سرعت - نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۱

مطابق شکل (۵-۲۳) ۲۷ سانتی‌متر از نفوذ پرتابه در زمان 0.001 ثانیه اتفاق می‌افتد و ادامه نفوذ در طول زمان 0.008 ثانیه به صورت خطی ولی با نرخ کمتر افزایش می‌یابد تا زمانی که میزان نفوذ ثابت شود. حداکثر میزان نفوذ پرتابه تقریباً ۳۸ سانتی‌متر می‌باشد.

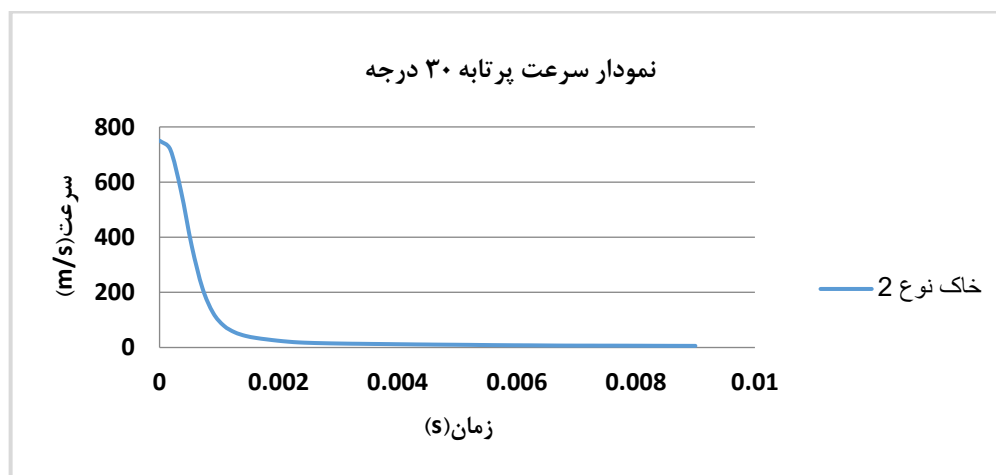
همان‌طور که در شکل (۵-۲۴) نشان داده شده در زمان 0.001 ثانیه سرعت پرتابه حدود ۸۷ متر بر ثانیه رسیده است. که این میزان کاهش نشان‌دهنده نفوذ ۲۷ سانتی‌متری پرتابه می‌باشد. سرعت نهایی پرتابه در زمان 0.009 ثانیه به صفر نرسیده است و سرعت باقی‌مانده‌ای به اندازه ۴,۹۴ متر بر ثانیه در پرتابه وجود دارد. که این موضوع مطابق با نتایج تحقیقات ماکسنس و همکاران است.

طبق شکل (۵-۲۵) تا نفوذ حدود ۲۷ سانتی‌متر سرعت پرتابه ۳۰ درجه به صورت خطی کاهش یافته است. که نشان‌دهنده این موضوع است که با افزایش نفوذ پرتابه در خاک سرعت به صورت خطی و با شیب نسبتاً زیاد کاهش می‌یابد تا در نهایت سرعت به مقدار تقریباً ثابتی برسد و نفوذ به حداکثر مقدار خود برسد.

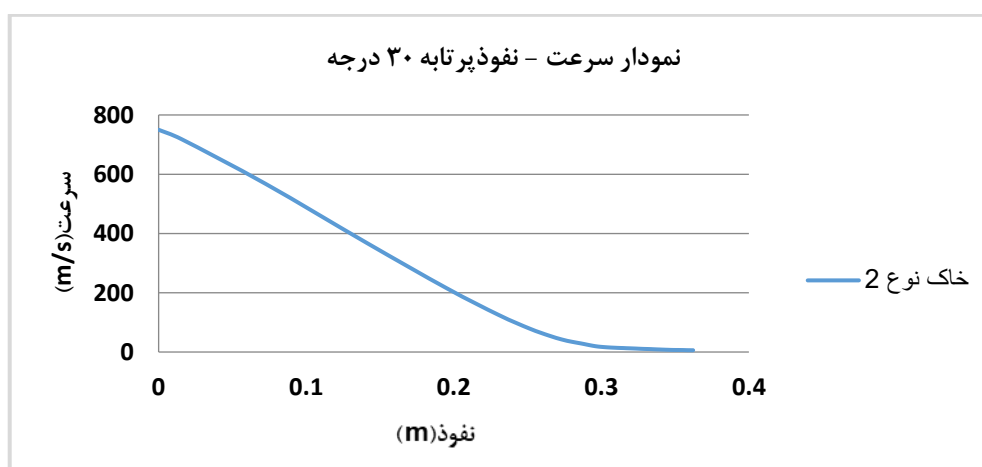
(ب) خاک نوع ۲ (ماسه متوسط):



شکل ۵-۲۶ نمودار نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۲



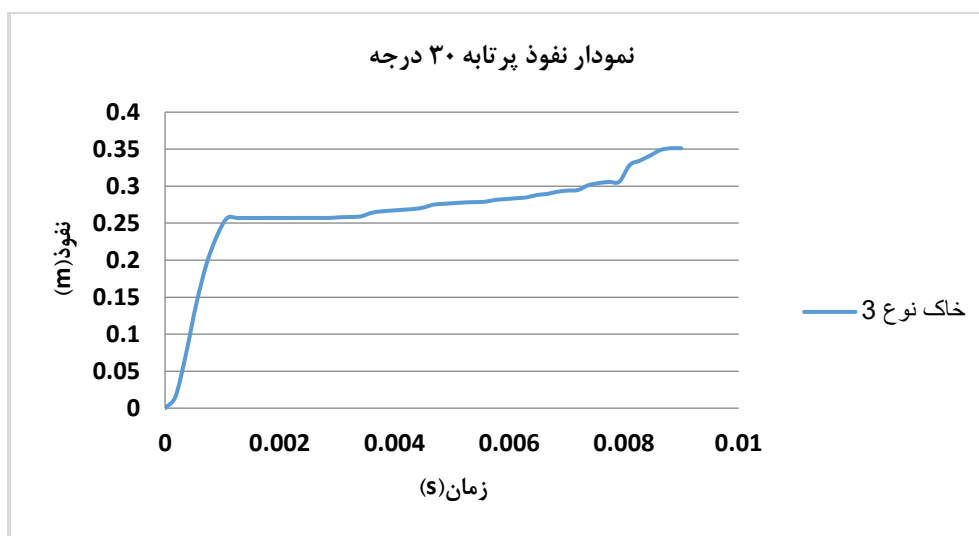
شکل ۵-۲۷ نمودار سرعت پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۲



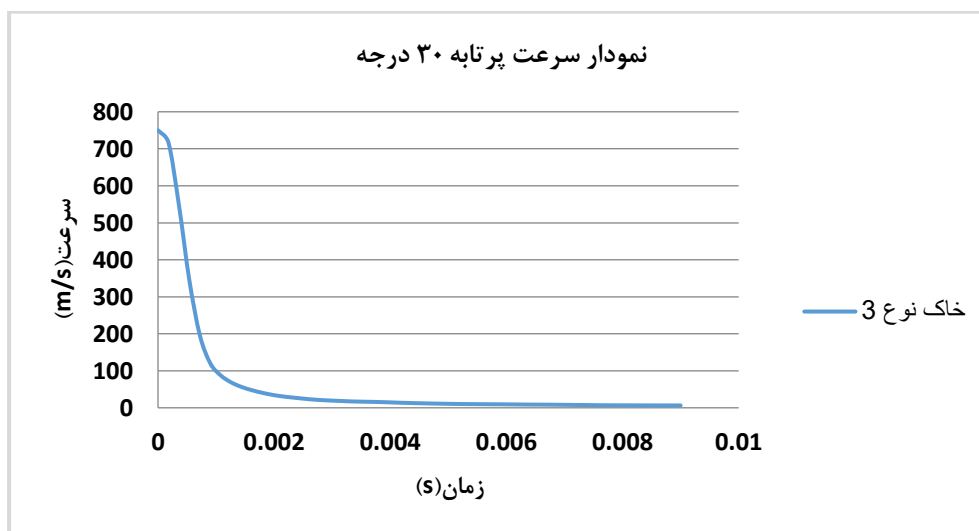
شکل ۵-۲۸ نمودار سرعت - نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۲

طبق شکل (۵-۲۶) در زمان ۰/۰۰۱ ثانیه نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک ماسه‌ای متوسط برابر ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. حداکثر نفوذ پرتابه در انتها بازه زمانی حل مسئله حدوداً ۳۶ سانتی‌متر است که این میزان نسبت به خاک ماسه‌ای سست کم‌تر است. سرعت باقی‌مانده پرتابه در خاک ماسه‌ای متوسط برابر ۵/۸۷ متر بر ثانیه است (شکل ۵-۲۷ و ۵-۲۸) که به دلیل افزایش خصوصیات مکانیکی و تراکم خاک مقاومت پرتابه در برابر نفوذ بیشتر و سرعت باقی‌مانده در پرتابه افزایش می‌یابد.

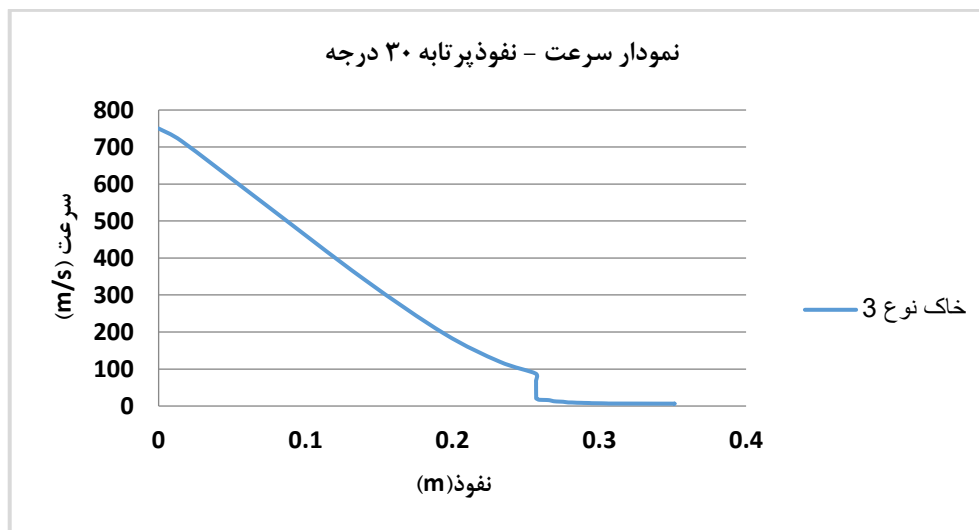
پ) خاک نوع ۳ (ماسه نیمه تراکم):



شکل ۵-۲۹ نمودار نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۳

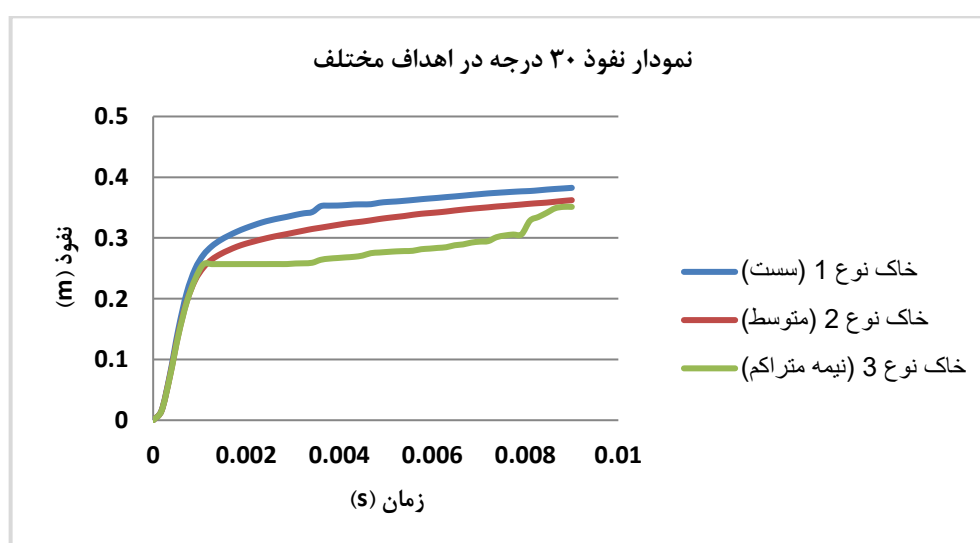


شکل ۵-۳۰ نمودار سرعت پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۳

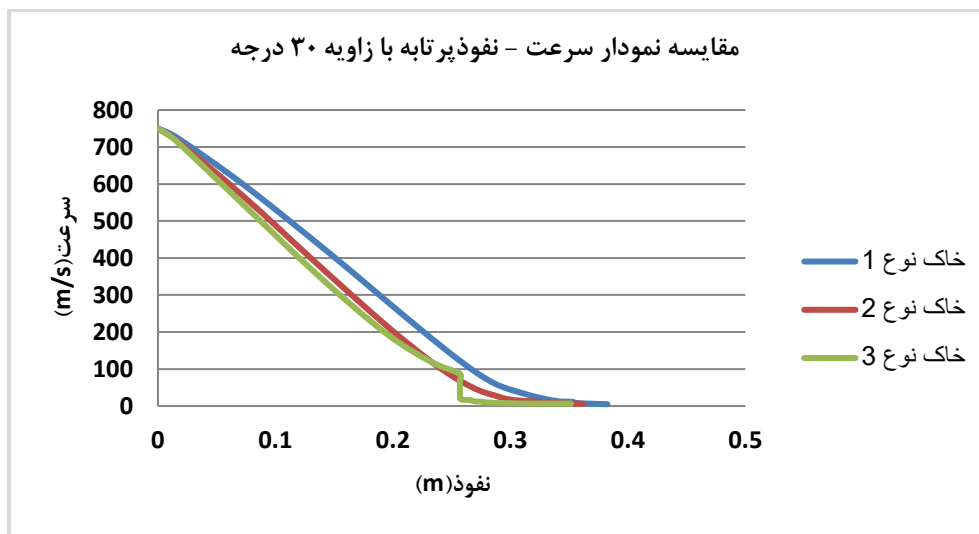


شکل ۳۱-۵ نمودار سرعت - نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک نوع ۳

طبق شکل (۵-۲۹) حداکثر نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در خاک ماسه‌ای نیمه متراکم حدود ۳۵ سانتی‌متر است. مطابق دیگر اهداف ماسه‌ای ۲۵ سانتی‌متر از نفوذ در زمان ۰/۰۰۱ ثانیه اتفاق افتاده است. مطابق شکل (۵-۳۰) سرعت باقی‌مانده پرتابه ۶/۳۸ متر بر ثانیه است که نسبت به اهداف ماسه‌ای سست و متوسط این مقدار بیشتر است که همین امر باعث کاهش نفوذ حداکثر در خاک نوع ۳ شده است و طبق شکل (۵-۳۱) تا نفوذ حدود ۲۵ سانتی‌متر سرعت به صورت خطی کاهش یافته است و به دلیل افزایش چگالی و خواص مکانیکی خاک کاهش سرعت قابل ملاحظه‌ای رخ داده است.



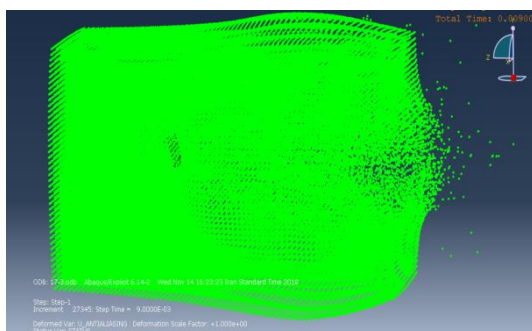
شکل ۳۲-۵ مقایسه نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در اهداف مختلف



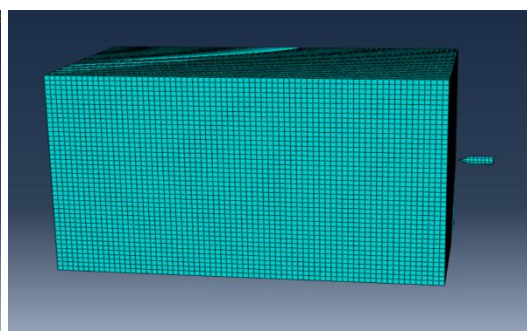
شکل ۳۳-۵ مقایسه سرعت - نفوذ پرتابه ۳۰ درجه در اهداف مختلف

مطابق شکل (۳۲-۵) با افزایش خصوصیات مکانیکی خاک میزان نفوذ پرتابه کاهش می‌یابد. تمامی پرتابه‌ها تا زمان ۰/۰۰۱ ثانیه به صورت خطی و با شیب یکسان در اهداف مختلف نفوذ کرده است. با افزایش ۲۰ درصدی چگالی، نفوذ حداکثر ۶ درصد کاهش پیدا کرده است. در خاک نوع ۳ نفوذ حداکثر نسبت به خاک نوع ۱، ۸ درصد کاهش یافته است. با افزایش خصوصیات مکانیکی خاک سرعت پرتابه با شیب بیشتری کاهش یافته است به طوری که در نفوذ ۲۰ سانتی‌متر سرعت پرتابه در خاک نوع ۳ (ماسه نیمه متراکم) از دیگر اهداف کم‌تر است که این موضوع را در شکل (۳۳-۵) می‌توان مشاهده کرد.

۵-۵-۲ پرتابه با زاویه نوک دماغه ۴۵ درجه



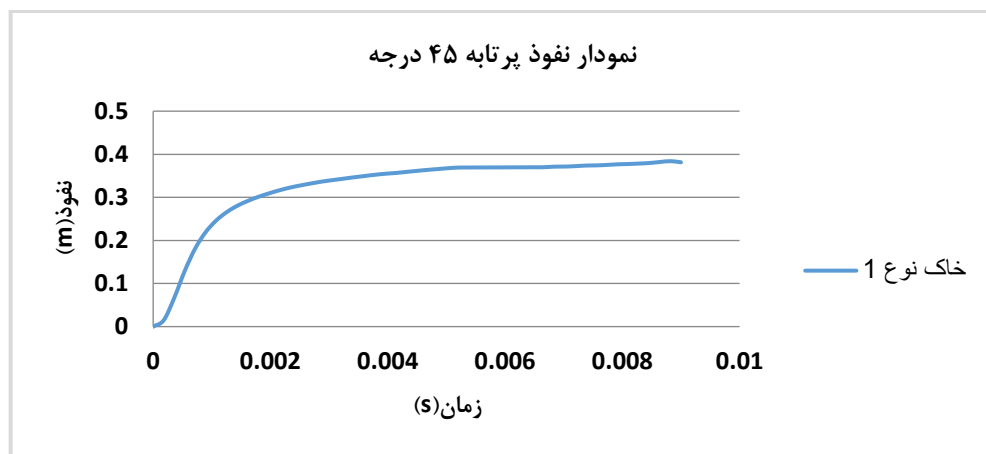
شکل ۳۵-۵ شکل نفوذ پرتابه ۴۵ درجه



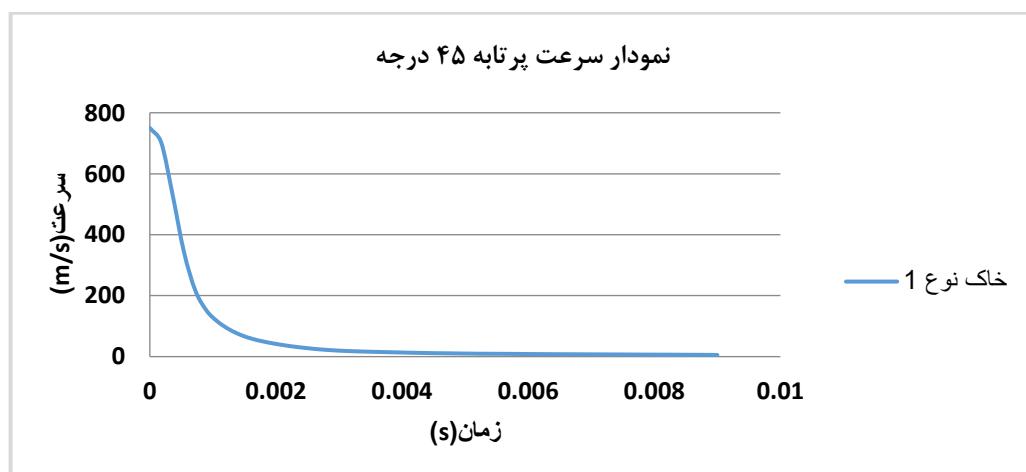
شکل ۳۴-۵ المان بندی پرتابه ۴۵ درجه

مطابق روند انجام گرفته در دیگر مدل‌ها پرتابه‌ای با زاویه ۴۵ درجه را با سرعت ۷۵۰ متر بر ثانیه و در جهت Z به سمت سه هدف ماسه‌ای مختلف سست، متوسط و نیمه‌متراکم شلیک کرده که هریک از نمودار میزان نفوذ، سرعت و نفوذ- سرعت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در شکل (۵-۳۴) و (۵-۳۵) المان بندی و شکل نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۱ نمایش داده شده است.

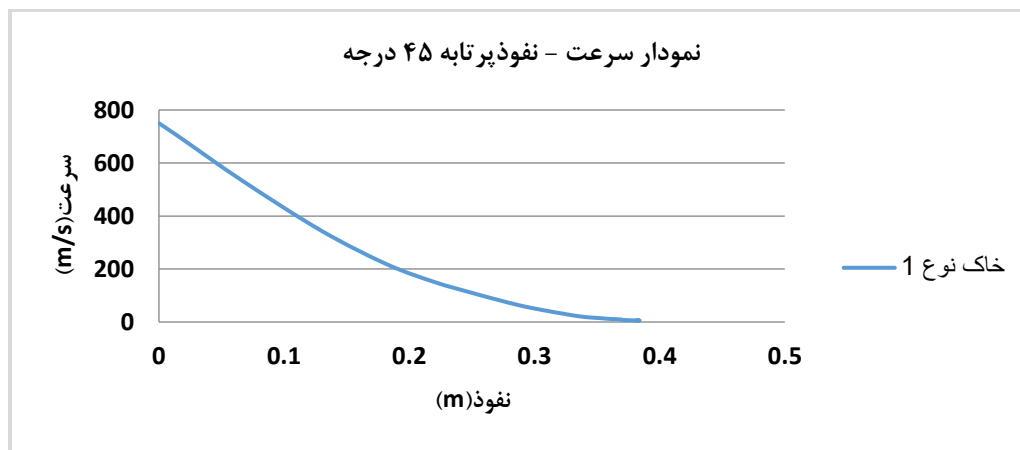
الف) خاک نوع ۱ (ماسه سست) :



شکل ۵-۳۶ نمودار نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۱



شکل ۵-۳۷ نمودار سرعت پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۱

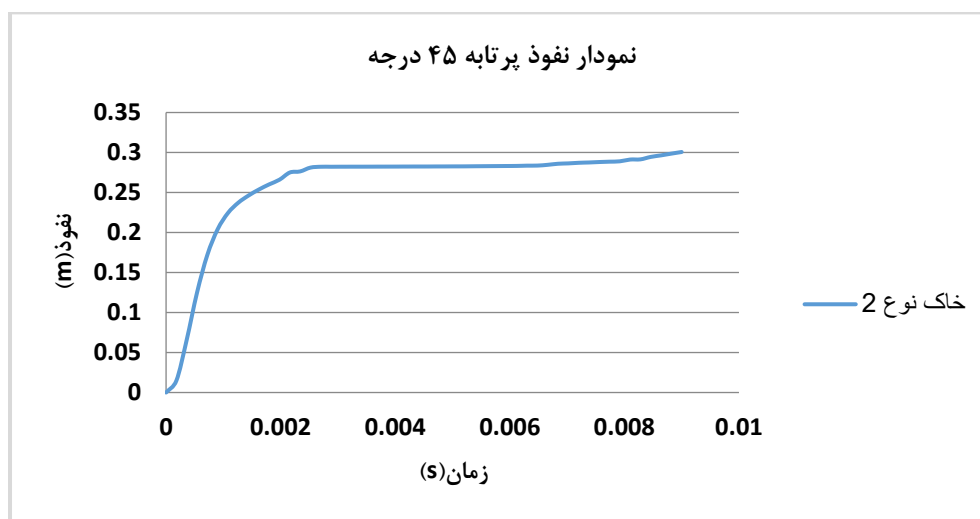


شکل ۵-۳۸ نمودار سرعت - نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۱

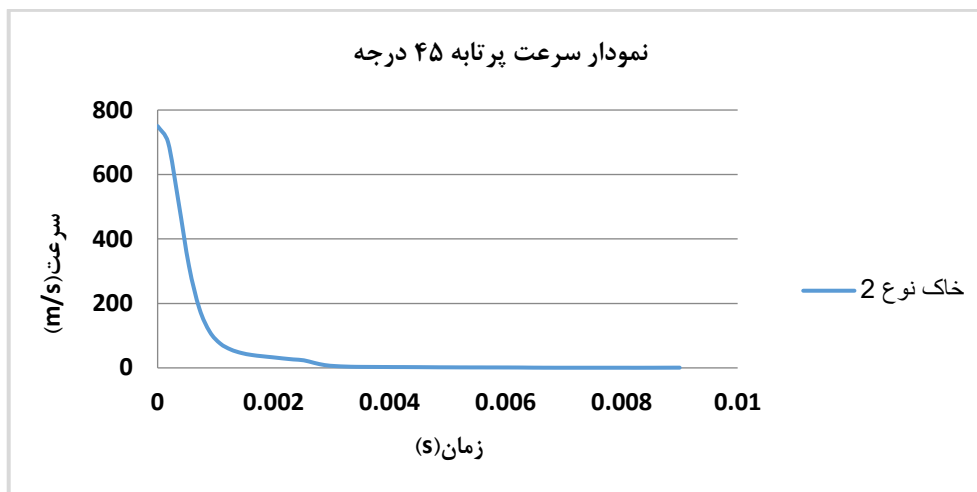
طبق شکل (۵-۳۶) بخش بزرگی از نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در زمان ۰/۰۰۱ ثانیه اتفاق می‌افتد. حداکثر نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در ماسه نوع ۱ تقریباً برابر ۳۸ سانتی‌متر است.

مطابق شکل (۵-۳۷) سرعت باقی‌مانده پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۱ حدوداً ۵/۵۱ متر بر ثانیه است که نسبت به پرتابه ۳۰ درجه ۱۲ درصد بیشتر است که این موضوع به دلیل افزایش زاویه نوک پرتابه و نفوذ کمتر پرتابه در خاک است. سرعت پرتابه ۴۵ درجه هم‌زمان با نفوذ در خاک با شیب ملایمی کاهش می‌یابد. (شکل ۵-۳۸)

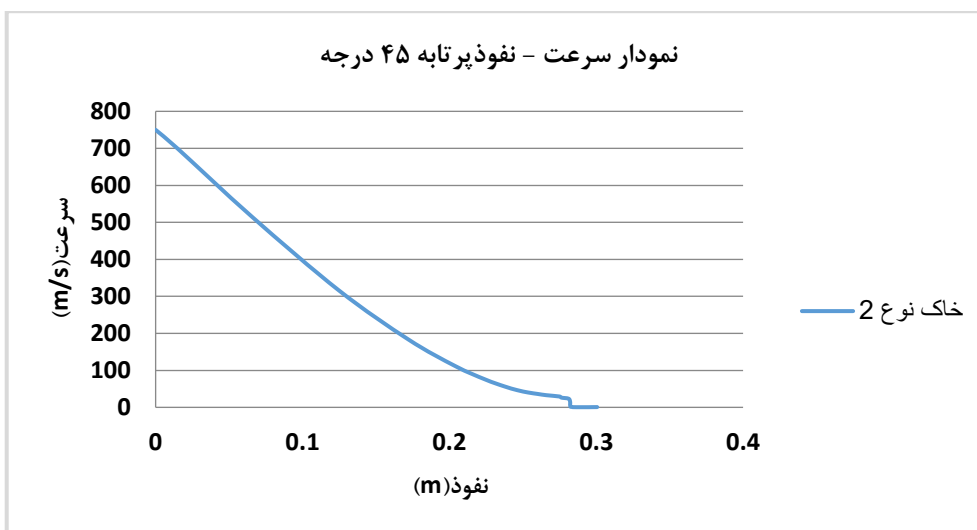
ب) خاک نوع ۲ (ماسه متوسط) :



شکل ۵-۳۹ نمودار نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۲



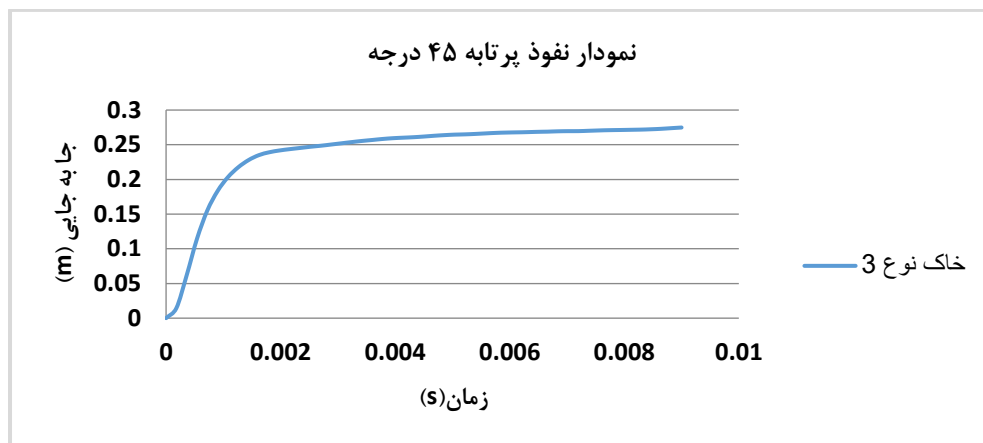
شکل ۴۰-۵ نمودار سرعت پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۲



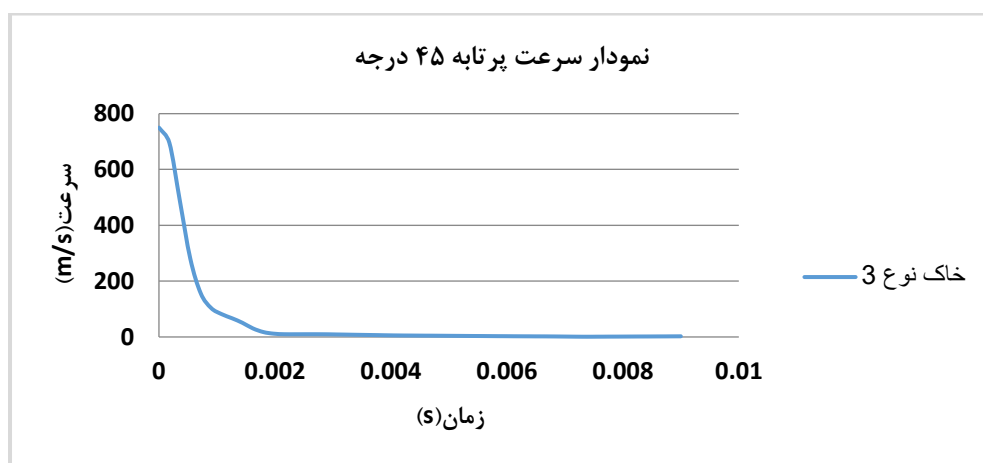
شکل ۴۱-۵ نمودار سرعت - نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۲

همان‌طور که در شکل (۳۹-۵) مشهود است نفوذ حداکثر پرتابه ۴۵ درجه در ماسه متوسط تقریباً ۳۰ سانتی‌متر است که نسبت به ماسه‌سست حدوداً ۲۱ درصد کاهش پیدا کرده است. مطابق شکل (۵-۴۰) برای پرتابه ۴۵ درجه سرعت پرتابه به صفر نمی‌رسد و سرعتی معادل ۰/۷ متر بر ثانیه در پرتابه باقی می‌ماند. شیب نمودار سرعت جابه‌جایی در خاک ماسه‌ای نوع ۲ نسبت به خاک نوع ۱ بیشتر است و این موضوع حاکی از آن است که در یک نفوذ یکسان سرعت پرتابه ۴۵ درجه در خاک ماسه‌ای متوسط نسبت به هدف ماسه‌ای‌سست، کمتر است. (شکل ۴۱-۵)

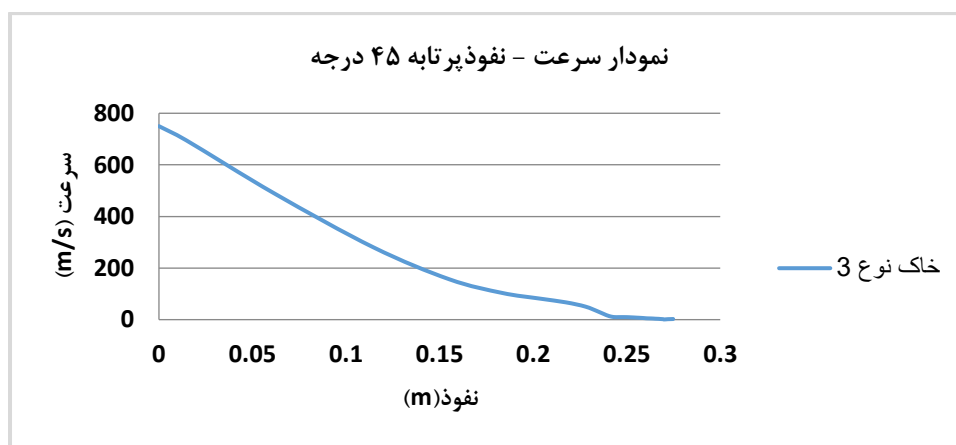
پ) خاک نوع ۳ (ماسه نیمه متراکم) :



شکل ۵-۴۲ نمودار نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۳

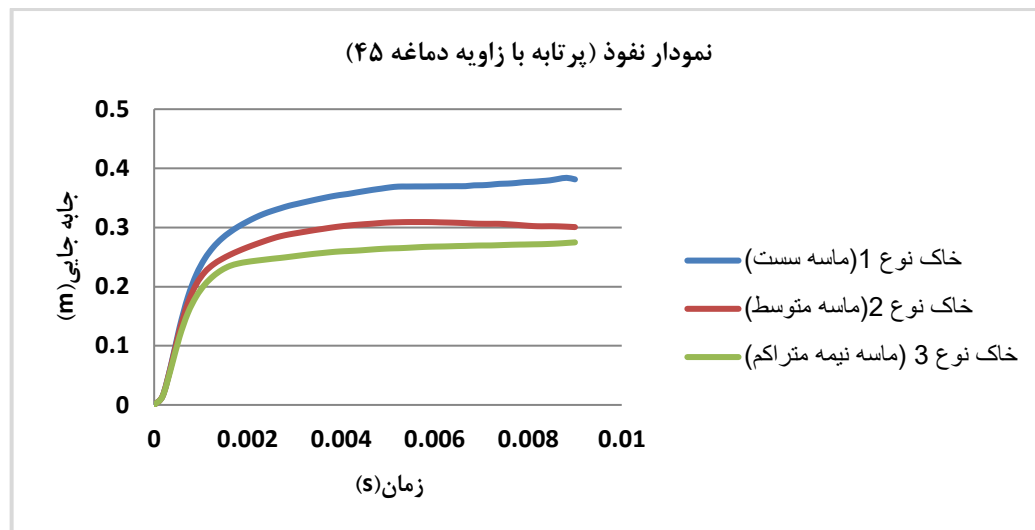


شکل ۵-۴۳ نمودار سرعت پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۳



شکل ۵-۴۴ نمودار سرعت - نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک نوع ۳

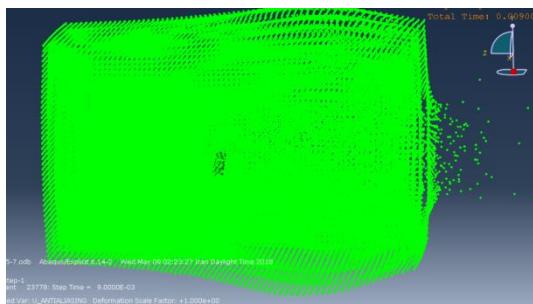
مطابق شکل (۵-۴۲) نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در خاک ماسه‌ای نوع ۳ (ماسه نیمه متراکم) حدود ۲۷ سانتی‌متر است که نسبت به خاک نوع ۲ حدود ۳ سانتی‌متر نفوذ کاهش یافته است. که این موضوع نشان‌دهنده این است که با افزایش خصوصیات مکانیکی خاک مقاومت پرتابه در برابر نفوذ افزایش یافته و باعث افزایش اصطکاک و اتلاف انرژی جنبشی پرتابه شده است. همان‌طور که در شکل (۴۳-۵) مشاهده می‌شود به دلیل افزایش زاویه نوک پرتابه در لحظه ورود پرتابه به خاک کاهش سرعت لحظه‌ای قابل توجهی رخ داده است در حالی که در پایان نفوذ سرعت باقی‌مانده پرتابه ۲/۴۱ متر بر ثانیه است. طبق شکل (۵-۴۴) روند نزولی نمودار سرعت-نفوذ نسبت به دو خاک ماسه‌ای نوع ۱ و ۲ با شیب بیشتری اتفاق افتاده است.



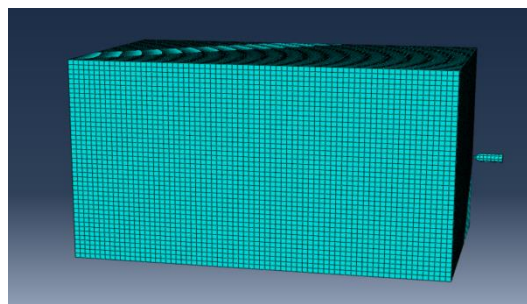
شکل ۵-۴۵ مقایسه نفوذ پرتابه ۴۵ درجه در اهداف با چگالی مختلف

نفوذ حداکثر پرتابه ۴۵ درجه با افزایش خصوصیات مکانیکی کاهش می‌یابد. نفوذ حداکثر برای خاک ماسه‌ای نوع ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۳۸، ۳۰ و ۲۷ سانتی‌متر است. (شکل ۵-۴۵)

۵-۱-۳ پرتابه با زاویه نوک دماغه ۶۰ درجه

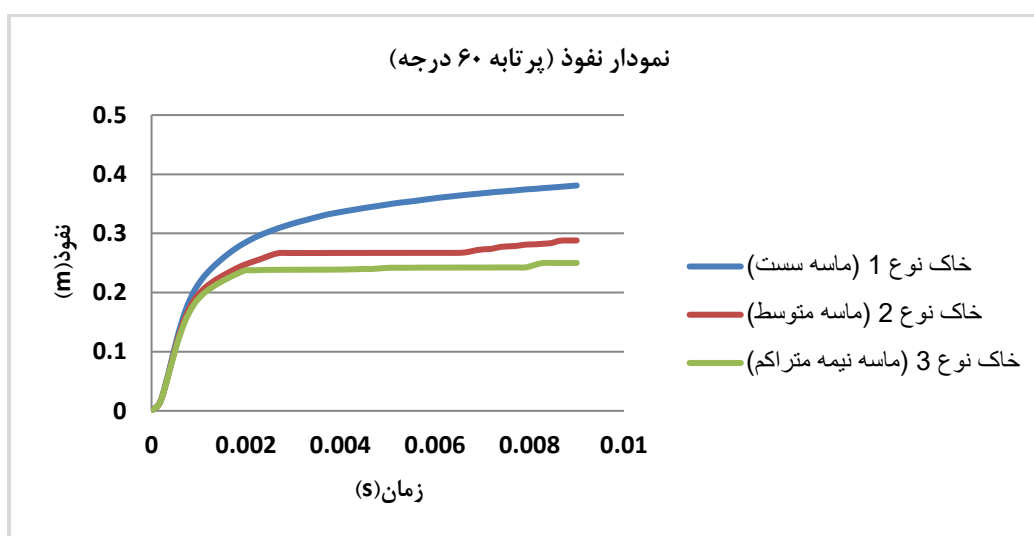


شکل ۴۷-۵ شکل نفوذ پرتابه ۶۰ درجه



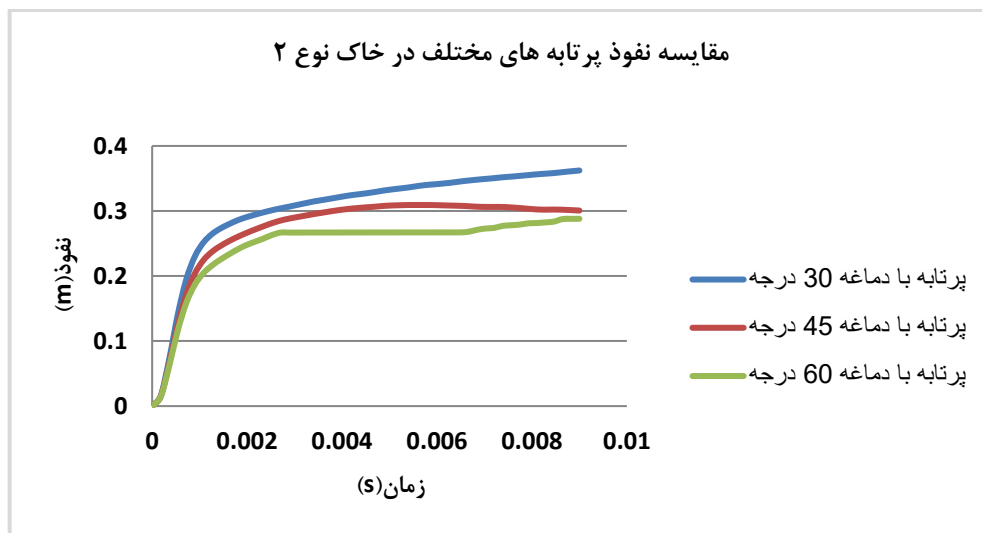
شکل ۴۶-۵ المان بندی پرتابه ۶۰ درجه

این پرتابه را در سه هدف ماسه‌ای مختلف سست، متوسط و نیمه متراکم شلیک کرده که نمودار میزان نفوذ مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۴۶-۵) و (۴۷-۵) المان بندی و شکل نفوذ پرتابه ۶۰ درجه در خاک نوع ۱ را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴۸-۵) نفوذ حداکثر پرتابه در ماسه نوع ۲ نسبت به ماسه نوع ۱ حدود ۲۶ درصد کاهش پیدا کرده است و به حدود ۲۸ سانتی متر رسیده است.

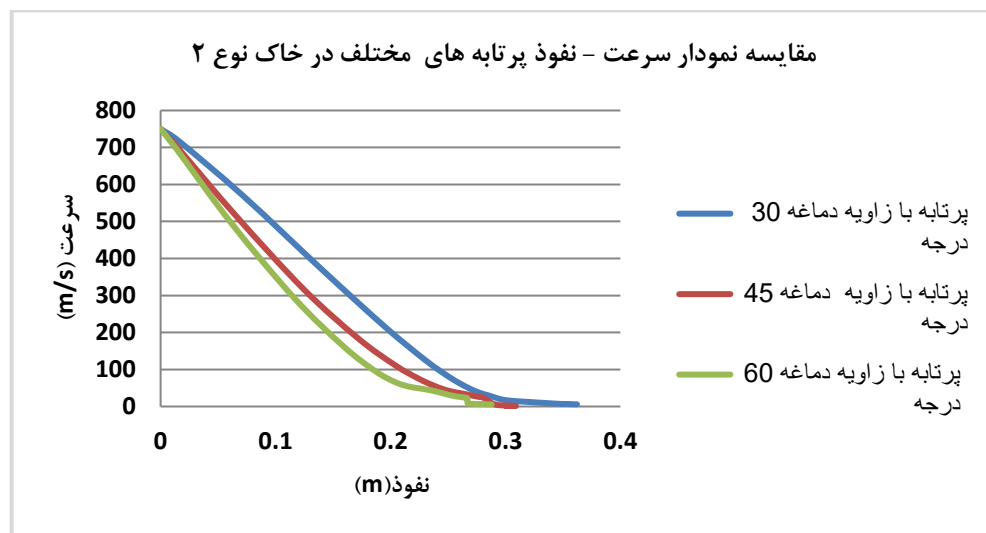


شکل ۴۸-۵ مقایسه نفوذ پرتابه ۶۰ درجه در اهداف مختلف

با افزایش ۴۰ درصدی چگالی ماسه نفوذ حداکثر پرتابه ۶۰ درجه ۳۷ درصد کاهش می‌یابد. حداکثر نفوذ پرتابه موردنظر در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و نیمه‌متراکم به ترتیب ۳۸، ۲۸ و ۲۴ سانتی‌متر است.



شکل ۵-۴۹ مقایسه نفوذ پرتابه با زاویه دماغه مختلف در خاک نوع ۲

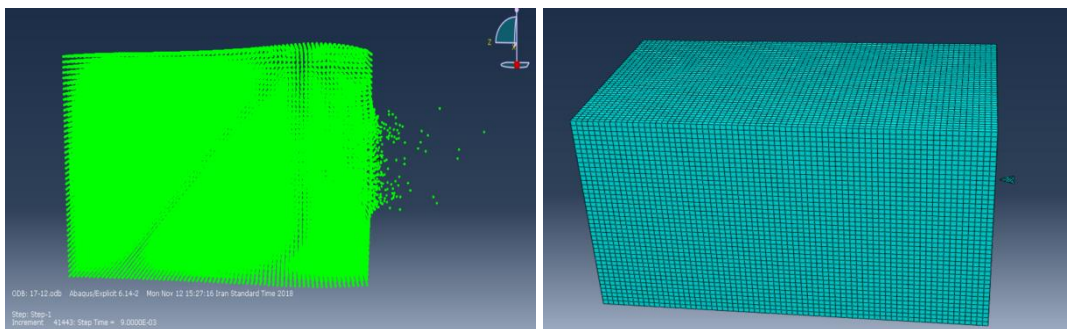


شکل ۵-۵۰ مقایسه سرعت - نفوذ پرتابه با زاویه دماغه مختلف در هدف ماسه‌ای نوع ۲

مطابق شکل (۵-۴۹) میزان نفوذ پرتابه‌های مختلف در خاک ماسه‌ای متوسط را مورد مقایسه و بررسی قرار داده‌ایم که طبق شکل با افزایش زاویه نوک پرتابه به دلیل افزایش سطح مقطع نوک دماغه و ایجاد تماس بیشتر با خاک میزان نفوذ پرتابه در خاک کاهش می‌یابد. میزان نفوذ سه پرتابه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در هدف موردنظر به ترتیب ۳۶، ۳۰ و ۲۸ سانتی‌متر است. همچنین با کاهش زاویه نوک پرتابه شیب نمودار سرعت-نفوذ کاهش یافته و با شیب ملایم‌تری کاهش می‌یابد که این موضوع در شکل (۵-۵۰) مشهود است.

۵-۵-۲ نتایج حاصل از ترکش ۲ سانتی‌متر

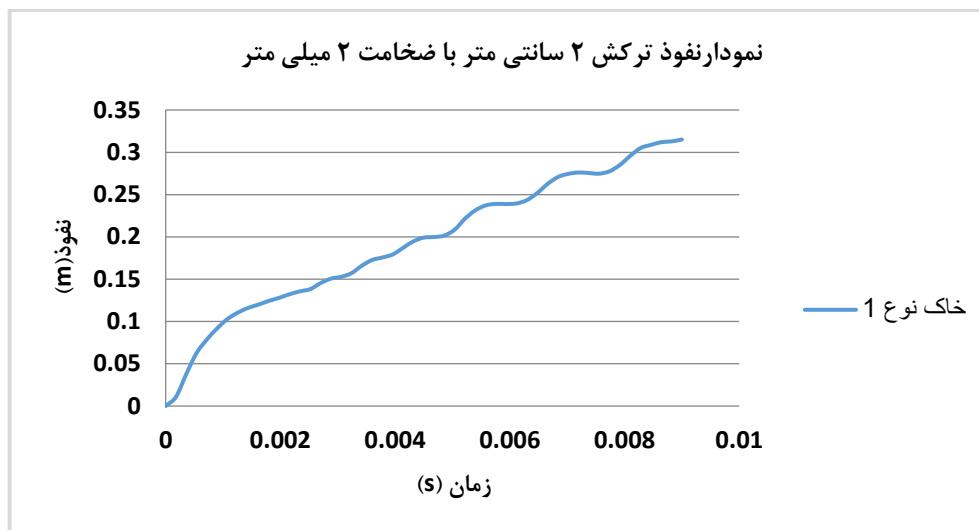
۵-۵-۲-۱ ترکش متساوی‌الاضلاع ۲ سانتی‌متر به ضخامت ۲ میلی‌متر



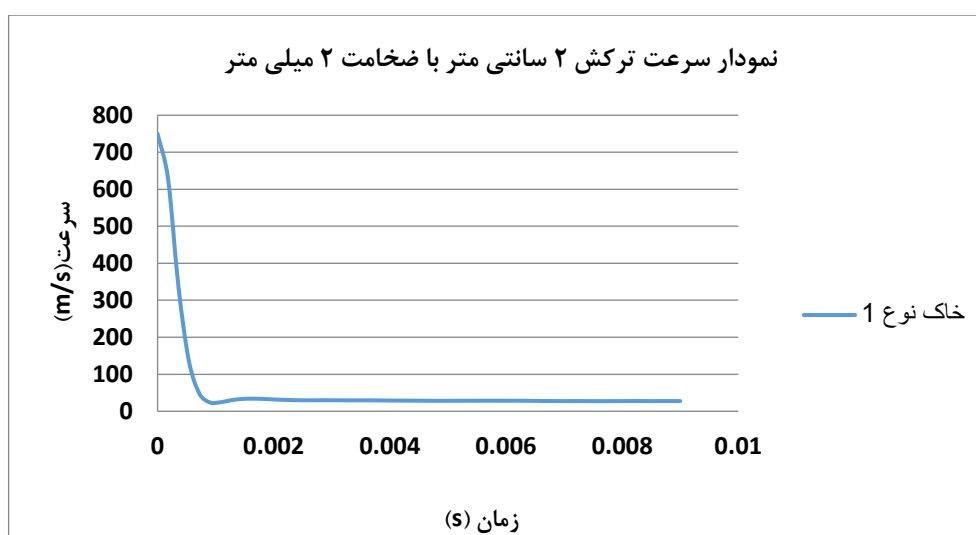
شکل ۵-۵۱ المان بندی ترکش ۲ به ضخامت ۲ شکل ۵-۵۲ شکل نفوذ ترکش ۲ به ضخامت ۲

ترکش ۲ سانتی‌متر به ضخامت ۲ میلی‌متر که در شکل (۵-۲۱) شکل المان بندی ترکش موردنظر آورده شده است با سرعت ۷۵۰ متر بر ثانیه به هدف موردنظر برخورد کرده است که (شکل ۵-۲۲) شکل نفوذ این ترکش در خاک نوع ۱ را نشان می‌دهد.

الف) خاک نوع ۱ (ماسه‌سست) :



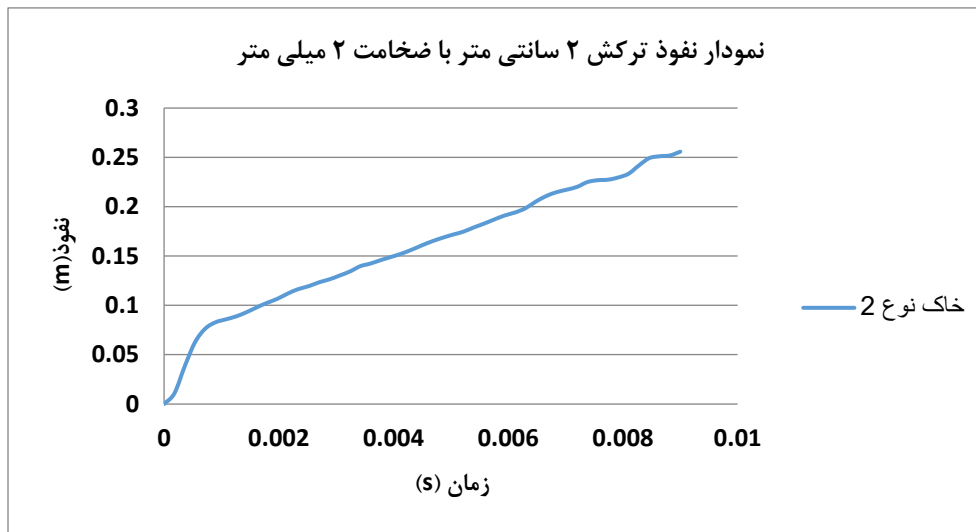
شکل ۵-۵۳ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۲ میلی متر در خاک نوع ۱



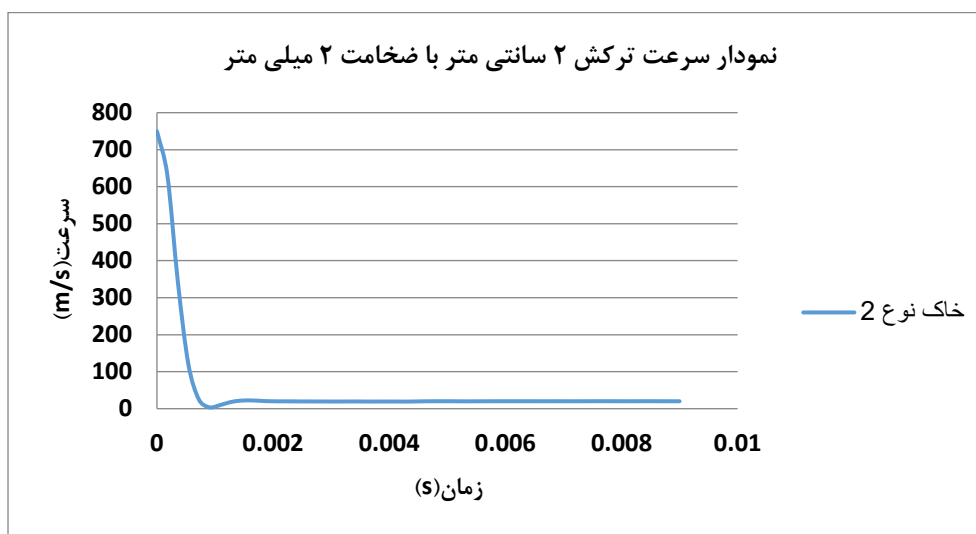
شکل ۵-۵۴ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۲ میلی متر در خاک نوع ۱

مطابق شکل (۵-۵۳) نفوذ حداکثر ترکش ۲ سانتی متر در خاک نوع ۱ حدود ۳۱ سانتی متر است. طبق نتایج حاصل از تحقیقات ماکسنس و همکاران سرعت ترکش در انتها بازه زمانی حل مسئله به صفر نرسیده و به طور کامل متوقف نمی شود بلکه سرعتی به اندازه ۲۷ سانتی متر بر ثانیه در پرتابه باقی می ماند. در لحظات اولیه برخورد و در ۰/۰۰۱ ثانیه سرعت ترکش به طور قابل توجهی کاهش می یابد و به حدود ۳۰ متر بر ثانیه می رسد. (شکل ۵-۵۴)

ب) خاک نوع ۲ (ماسه متوسط):



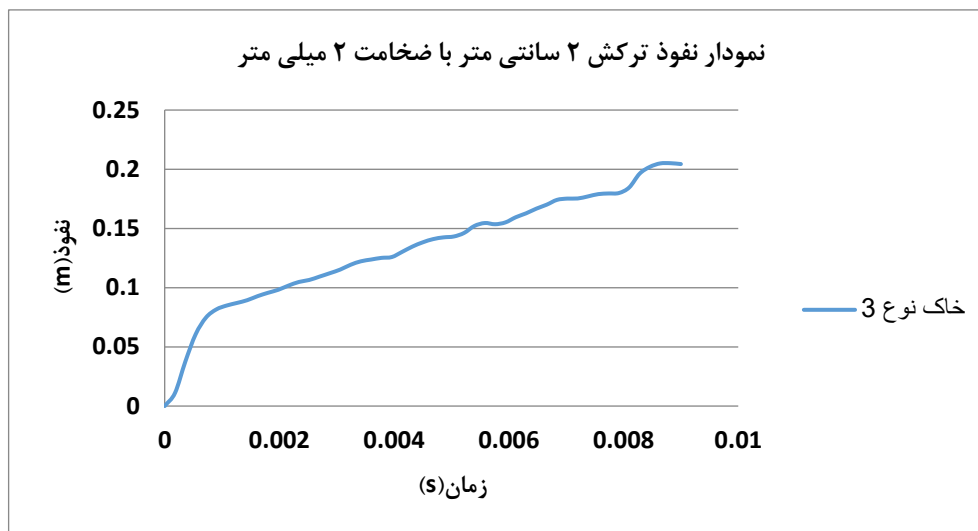
شکل ۵-۵۵ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۲ میلی متر در خاک نوع ۲



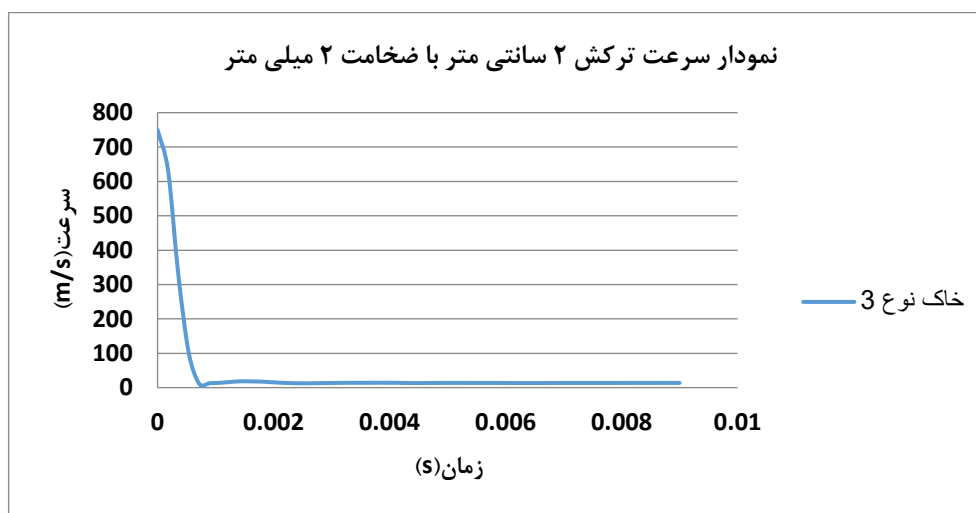
شکل ۵-۵۶ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۲ میلی متر در خاک نوع ۲

مطابق شکل (۵-۵۵) نفوذ حداکثر ترکش ۲ سانتی با ضخامت ۲ میلی متر در خاک نوع ۲ حدود ۲۵ سانتی متر است. که نسبت به هدف با چگالی ۱۵۰۰، ۶ سانتی متر کاهش نفوذ داشته است. این ترکش تا زمان ۰/۰۰۱ ثانیه به صورت خطی افزایش نفوذ داشته است که این روند ناشی است از کاهش زیاد سرعت تا زمان مذکور می باشد. سرعت باقی مانده ترکش ۲۰/۱۰ m/s است. (شکل ۵-۵۶)

پ) خاک نوع ۳ (ماسه نیمه متراکم):

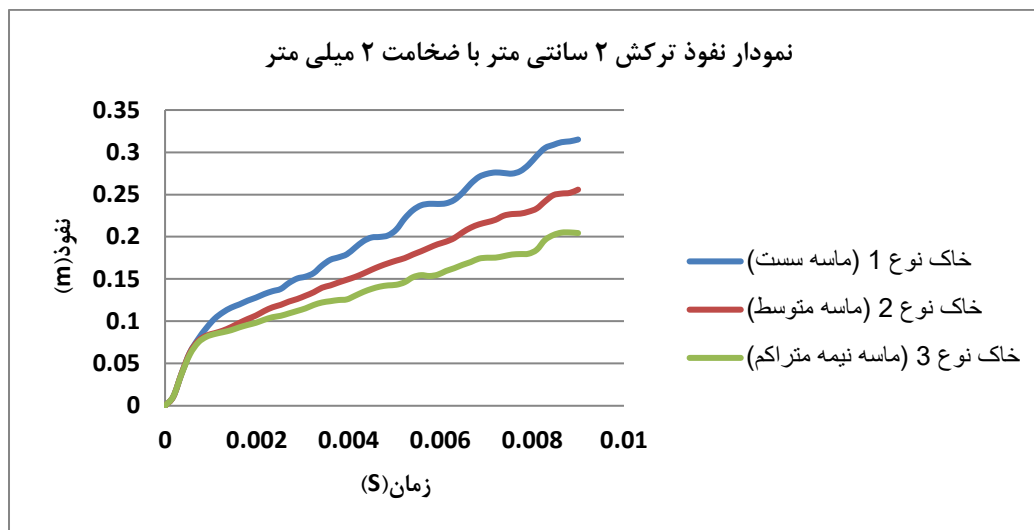


شکل ۵-۵۷ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۲ میلی متر در خاک نوع ۳



شکل ۵-۵۸ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۲ میلی متر در خاک نوع ۳

مطابق شکل (۵-۵۷) نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متری در خاک ماسه‌ای نیمه متراکم تقریباً مشابه با خاک متوسط می‌باشد. نفوذ حداکثر در این هدف به میزان ۲۰ سانتی متر می‌باشد. که در انتهای بازه زمانی حل مسئله رخ داده است. سرعت باقی مانده ترکش در خاک نیمه متراکم به میزان ۱۳/۷۰ متر بر ثانیه است که نسبت به دیگر اهداف کم تر است. (شکل ۵-۵۸)

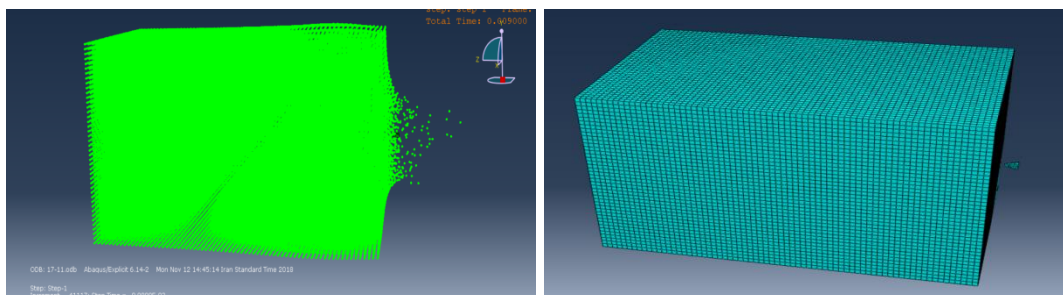


شکل ۵-۵۹ مقایسه نفوذ ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت ۲ میلی متر در اهداف مختلف

مطابق شکل (۵-۵۹) نفوذ حداکثر ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت ۲ میلی متر در اهداف ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم به ترتیب ۳۱، ۲۵ و ۲۰ سانتی متر است. با افزایش ۴۰ درصدی چگالی نفوذ حداکثر ۳۵ درصد کاهش یافته است. نفوذ حداکثری ترکش ۲ سانتی متری از پرتابه ۶۰ درجه در اهداف مختلف کم تر است. پس می توان گفت پرتابه ۶۰ درجه می تواند در اهداف ماسه‌ای خشک بحرانی تر باشد نسبت به ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت ۲ میلی متر زیرا میزان نفوذ آن بیشتر است. همان طور که در شکل بالا می بینید ترکش در هر سه هدف تا زمان ۰/۰۰۱ ثانیه با شیب یکسان و منطبق بر هم نفوذ کرده است و بعد از آن زمان در هدف با چگالی کم تر شیب نمودار بیشتر شده است و بیشترین میزان نفوذ هم مربوط به نمودار با شیب بیشتر است.

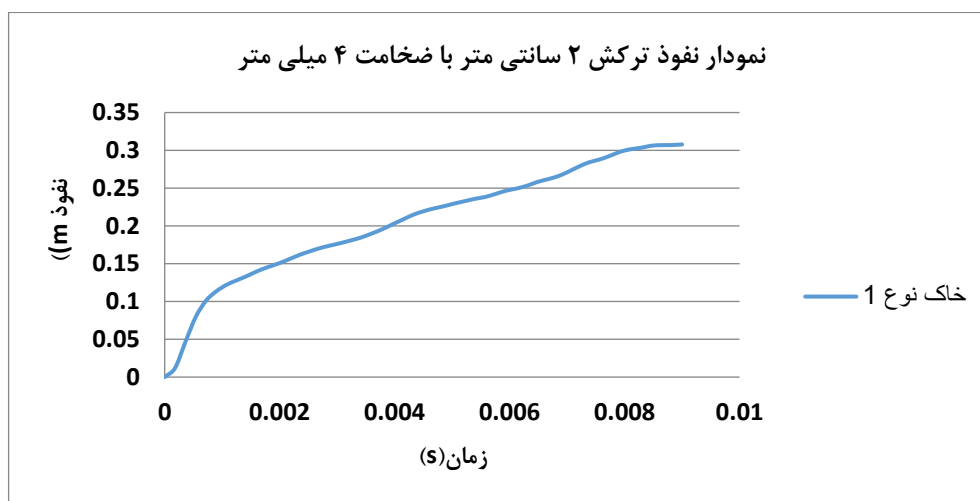
۵-۲-۲ ترکش متساوی الاضلاع ۲ سانتی متر به ضخامت ۴ میلی متر

ترکش ۲ سانتی متر به ضخامت ۴ میلی متر که در شکل (۵-۶۰) شکل المان بندی ترکش موردنظر آورده شده است با سرعت ۷۵۰ متر بر ثانیه به هدف موردنظر برخورد کرده است که (شکل ۵-۶۱) شکل نفوذ این ترکش در خاک نوع ۱ را نشان می دهد.

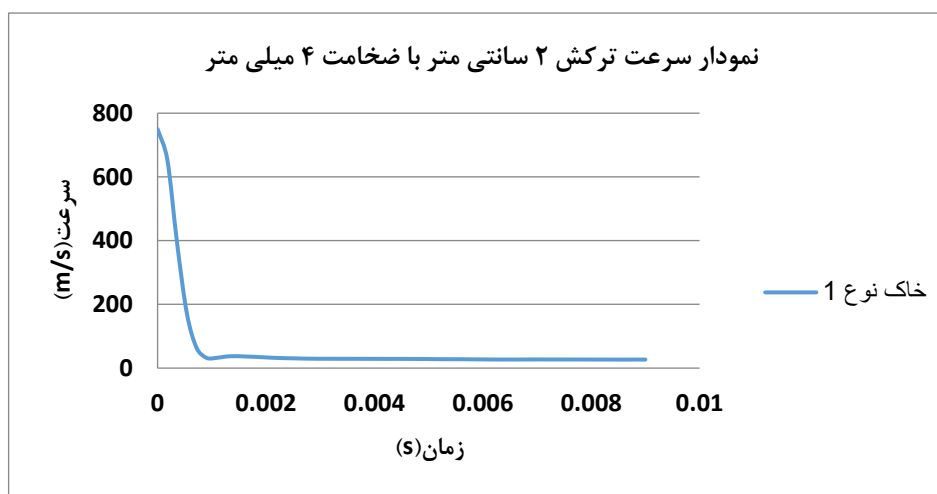


شکل ۵-۶۰ المان بندی ترکش ۲ به ضخامت ۴ شکل نفوذ ترکش ۲ به ضخامت ۴ شکل ۵-۶۱

الف) خاک نوع ۱ (ماسه‌سست) :



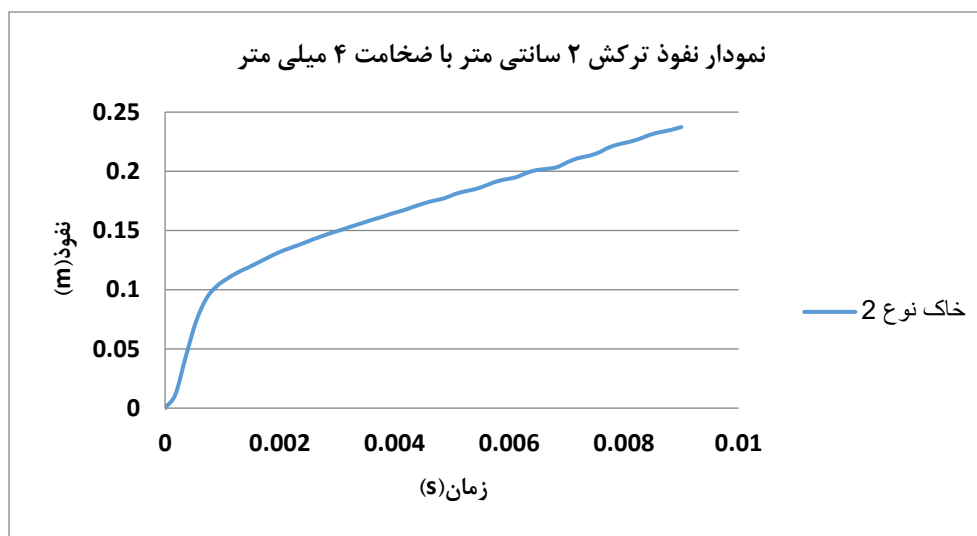
شکل ۵-۶۲ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۴ میلی متر در خاک نوع ۱



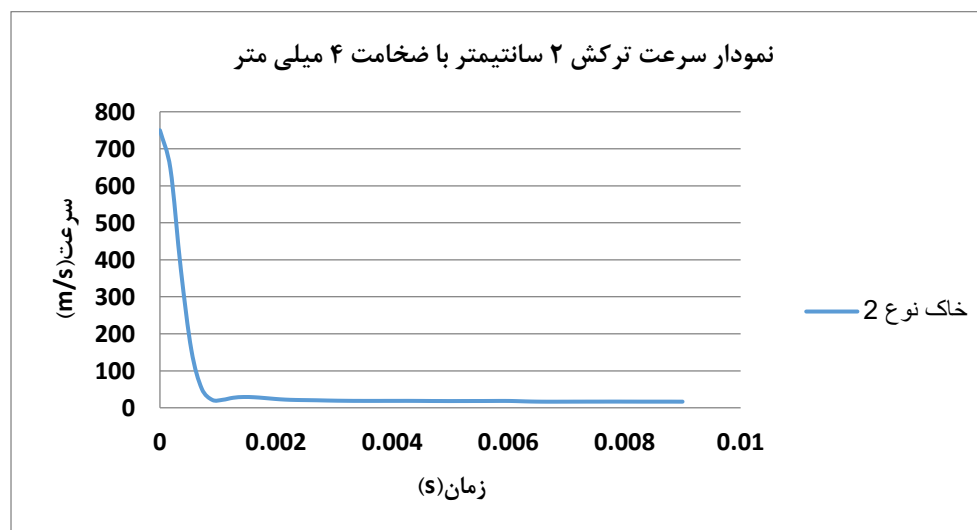
شکل ۵-۶۳ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۴ میلی متر در خاک نوع ۱

مطابق شکل (۵-۶۲) نفوذ حداکثر پرتابه ۲ سانتی متر با ضخامت ۴ میلی متر در خاک ماسه‌ای حدود ۳۰ سانتی متر است و سرعت نهایی آن به ۲۶ متر بر ثانیه رسیده است (شکل ۵-۶۳). نفوذ ترکش ۴ میلی متر کمتر از ترکش ۲ میلی متر است که این کاهش نفوذ در حدود ۲ سانتی متر و به دلیل افزایش سطح تماس ترکش با خاک و همچنین کاهش تیز بودن نوک ترکش می‌باشد.

ب) خاک نوع ۲ (ماسه متوسط) :



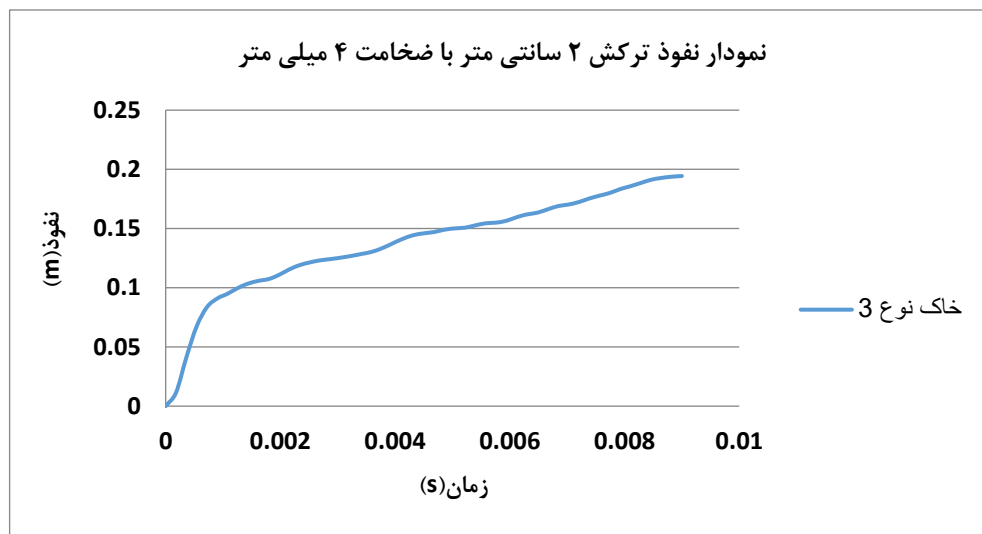
شکل ۵-۶۴ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۴ میلی متر در خاک نوع ۲



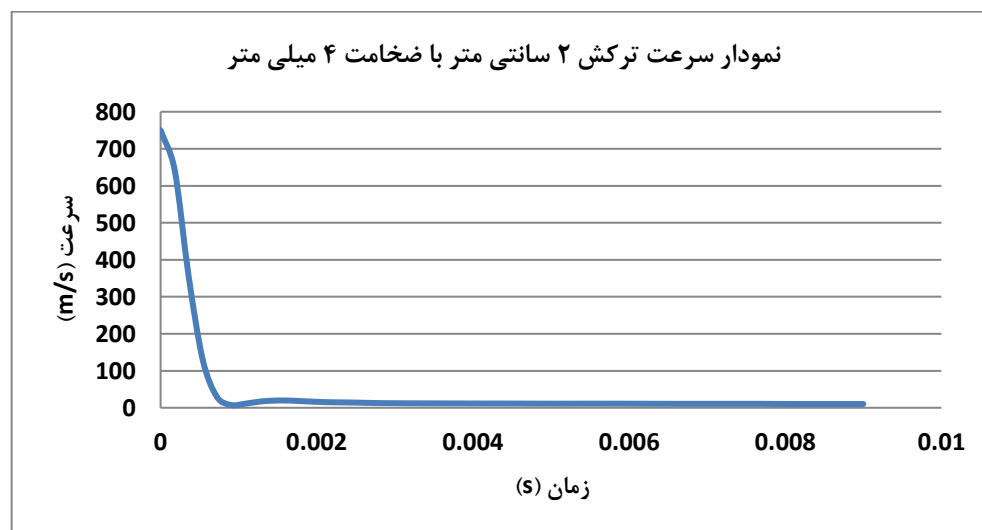
شکل ۵-۶۵ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۴ میلی متر در خاک نوع ۲

طبق شکل (۵-۶۴) ۱۰ سانتی متر از نفوذ ترکش در زمان ۰/۰۰۱ ثانیه اتفاق می افتد و نفوذ نهایی ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت ۴ میلی متر در ماسه متوسط (خاک نوع ۲) برابر ۲۳ سانتی متر است که نسبت به ماسه نوع ۱ حدود ۷ سانتی متر کاهش یافته است. سرعت نهایی ترکش ۱۶/۵۴ متر بر ثانیه است که مشابه پرتابه ها و ترکش دیگر به صفر نرسیده است (شکل ۵-۶۵).

پ) خاک نوع ۳ (ماسه نیمه تراکم):

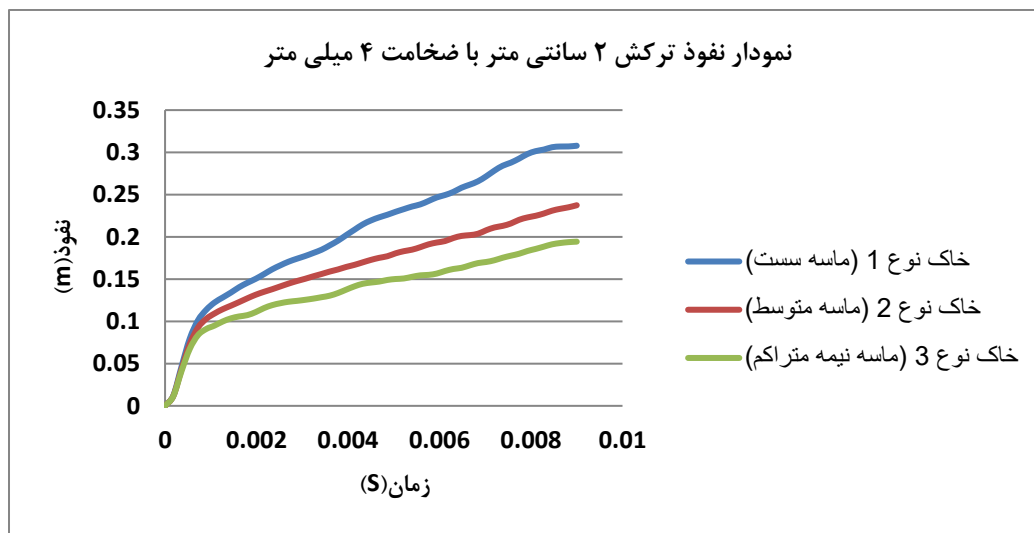


شکل ۵-۶۶ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۴ میلی متر در خاک نوع ۳



شکل ۵-۶۷ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۴ میلی متر در خاک نوع ۳

مطابق شکل (۵-۶۶) نفوذ حداکثر ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۴ میلی متر در ماسه نیمه متراکم حدود ۱۹ سانتی متر است که نسبت به ماسه متوسط تقریباً ۴ سانتی متر کاهش پیدا کرده است. سرعت باقی مانده ترکش در انتها بازه زمانی حل مسئله برابر ۱۰/۱۹ متر بر ثانیه است (شکل ۵-۶۷). همان طور که مشاهده می کنید با افزایش چگالی هدف سرعت باقی مانده افزایش می یابد.

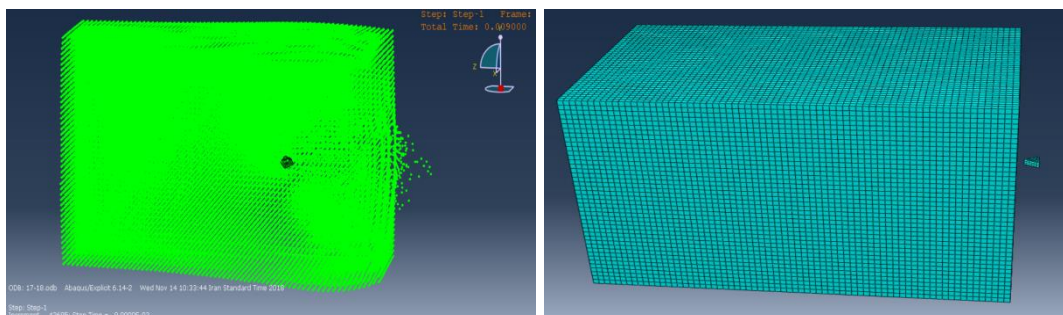


شکل ۵-۶۸ مقایسه نفوذ ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت ۴ میلی متر در اهداف مختلف

نفوذ حداکثر ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۴ میلی متر در اهداف ماسه ای سست، متوسط و نیمه-متراکم به ترتیب ۳۰، ۲۳ و ۱۹ سانتی متر است. با افزایش ۴۰ درصدی چگالی نفوذ حداکثر ۳۷ درصد کاهش یافته است. طبق شکل (۵-۶۸) تا قبل از زمان ۰/۰۰۱ ثانیه نمودار نفوذ ترکش در هر سه هدف منطبق بر هم و با شیب یکسان می باشد. در زمان ۰/۰۰۱ نفوذ ترکش در ماسه سست بیشتر از ماسه نیمه متراکم است.

۵-۵-۲-۳ ترکش متساوی الاضلاع ۲ سانتی متر به ضخامت ۸ میلی متر

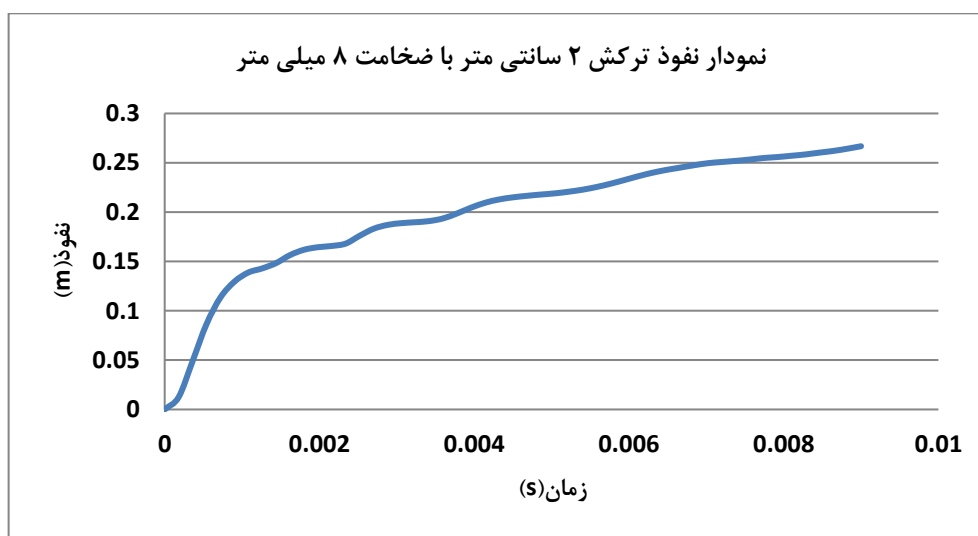
ترکش ۲ سانتی متر به ضخامت ۸ میلی متر که در شکل (۵-۶۹) شکل المان بندی ترکش مورد نظر آورده شده است با سرعت ۷۵۰ متر بر ثانیه به هدف مورد نظر برخورد کرده است که (شکل ۵-۷۰) شکل نفوذ این ترکش در خاک نوع ۱ را نشان می دهد.



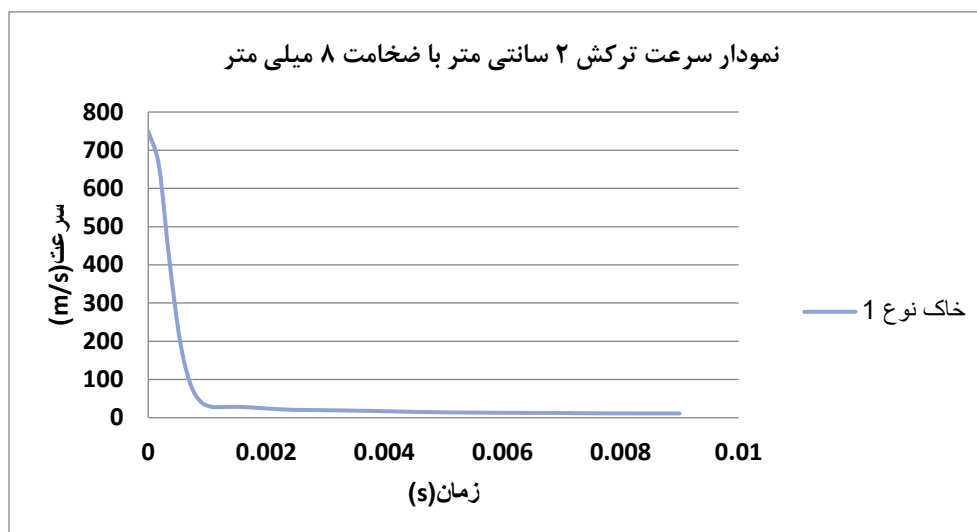
شکل ۵-۶۹ المان بندی ترکش ۲ به ضخامت ۸ شکل ۵-۷۰ شکل نفوذ ترکش ۲ به ضخامت ۸

الف) خاک نوع ۱ (ماسه سست) :

ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت ۸ میلی متر را با سرعت ۷۵۰ متر بر ثانیه در هدف موردنظر که خاک ماسه‌ای سست می باشد شلیک کرده طبق شکل (۵-۷۱) میزان نفوذ آن تا زمان ۰/۰۰۱ ثانیه از دیگر ترکش‌ها بیشتر می باشد. با افزایش ضخامت ترکش به دلیل افزایش سطح مقطع پرتابه با خاک و اتلاف انرژی در اثر اصطکاک نفوذ کاهش می یابد.



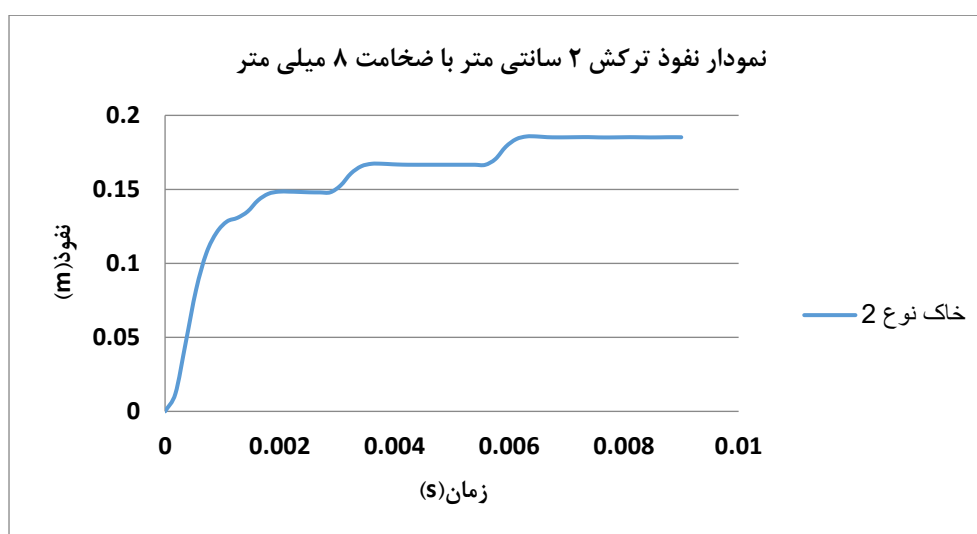
شکل ۵-۷۱ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر در خاک نوع ۱



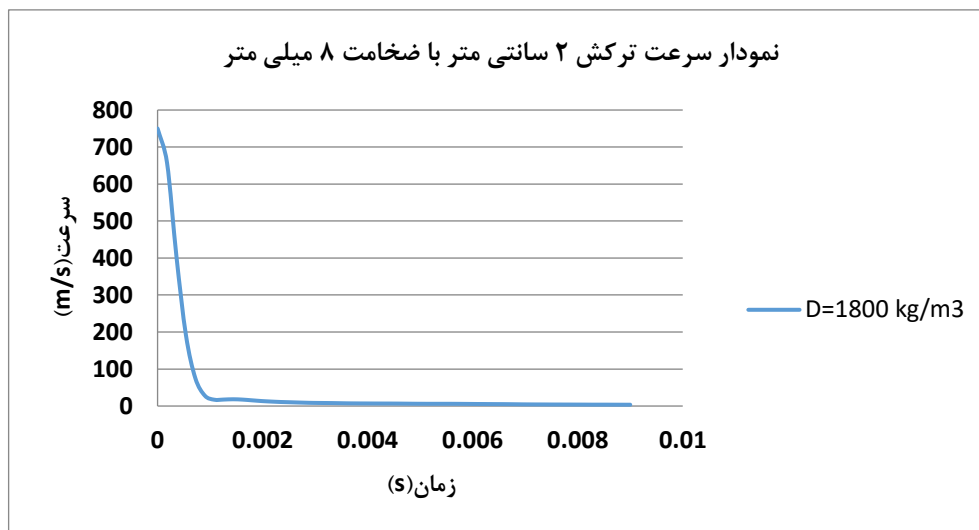
شکل ۵-۷۲ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر در خاک نوع ۱

مطابق شکل (۵-۷۱) نفوذ حداکثر ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت ۸ میلی متر در ماسه سست در زمان بازه زمانی حل مسئله که ۰/۰۰۹ ثانیه در نظر گرفته شده است حدود ۲۶ سانتی متر است. که این میزان نسبت به ترکش با همین ابعاد و ضخامت ۴ میلی متر، ۴ سانتی متر کاهش پیدا کرده است. به دلیل ضخامت زیاد پرتابه سرعت باقی مانده آن نسبت به ترکش با ضخامت ۴ میلی متر کمتر است و مقدار آن ۱۱/۲۹ متر بر ثانیه است. (شکل ۵-۷۲)

ب) خاک نوع ۲ (ماسه متوسط) :



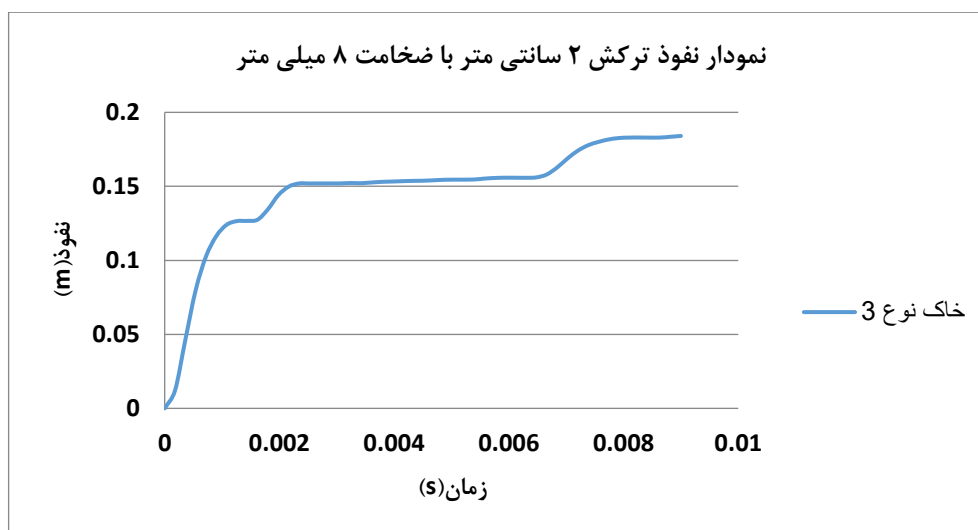
شکل ۵-۷۳ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر در خاک نوع ۲



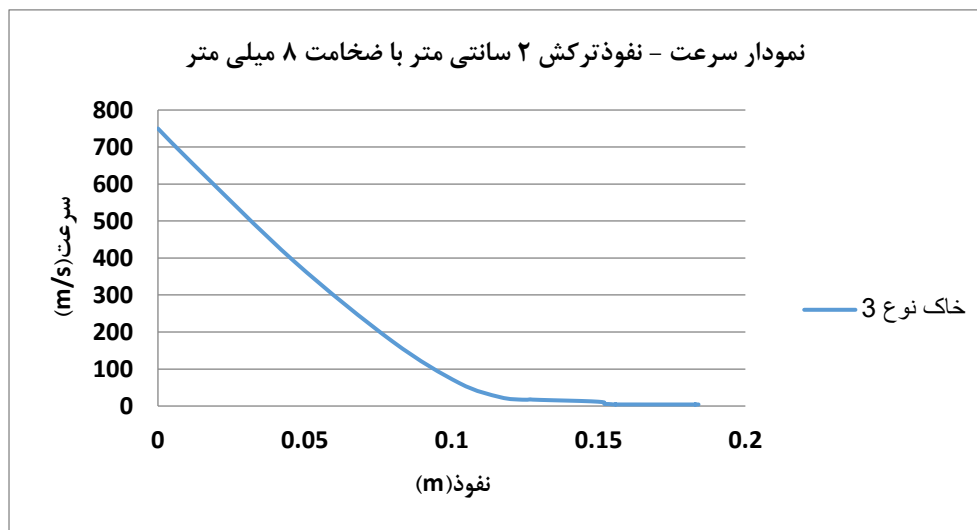
شکل ۵-۷۴ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر در خاک نوع ۲

مطابق شکل (۵-۷۳) نفوذ حداکثر ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت ۸ میلی متر در ماسه نوع ۲ حدود ۱۸/۵۲ سانتی متر است. با افزایش چگالی خاک میزان نفوذ حدود ۸ سانتی متر نسبت به خاک نوع ۱ کاهش یافته است. همچنین همان طور که در شکل (۵-۷۴) مشهود است سرعت باقی مانده ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت ۸ میلی متر چیزی در حدود ۳/۵ متر بر ثانیه است.

پ) خاک نوع ۳ (ماسه نیمه متراکم) :

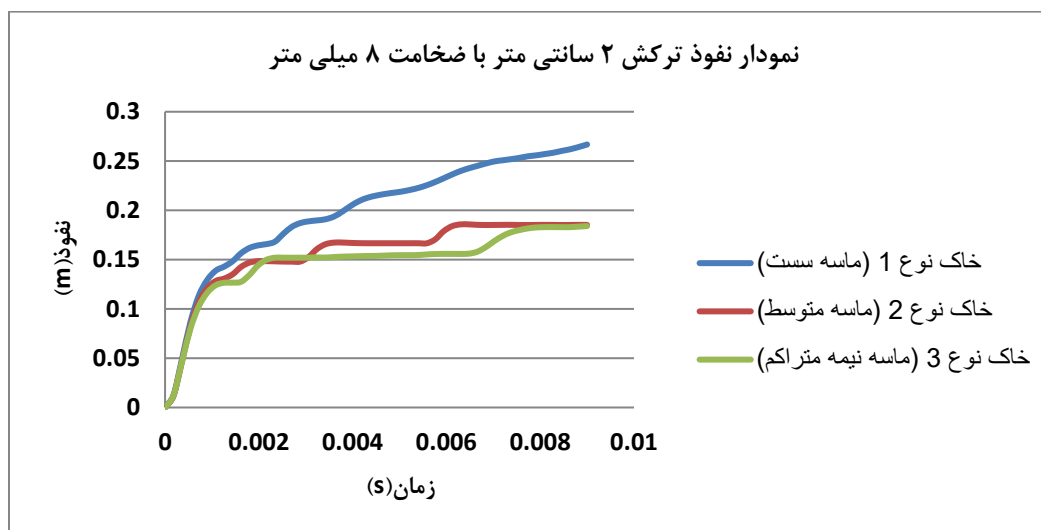


شکل ۵-۷۵ نمودار نفوذ ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر در خاک نوع ۳



شکل ۵-۷۶ نمودار سرعت ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر در خاک نوع ۳

مطابق شکل (۵-۷۵) نفوذ حداکثر ترکش ۲ سانتی متر به ضخامت ۸ میلی متر در ماسه نیمه-متراکم نوع ۳ تقریباً ۱۸ سانتی متر است. این مقدار نسبت خاک نوع ۱ حدود ۳۱ درصد کاهش یافته است. سرعت باقی مانده ترکش ۲ سانتی متر به ضخامت ۸ میلی متر حدود ۳ متر بر ثانیه است. (شکل ۵-۷۶)



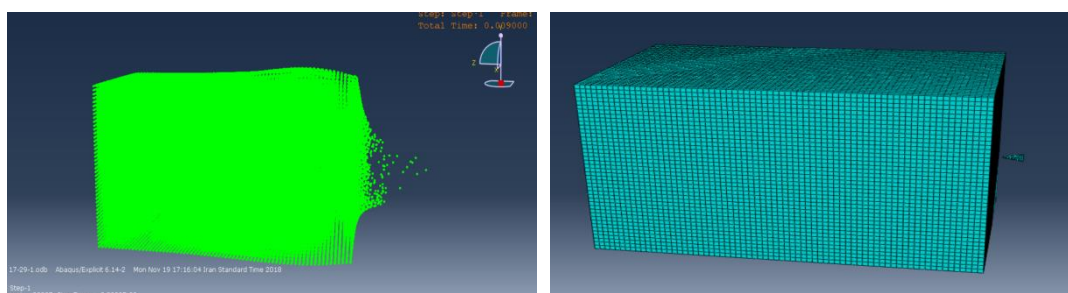
شکل ۵-۷۷ مقایسه نفوذ ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت ۸ میلی متر در اهداف مختلف



شکل ۵-۷۸ مقایسه نفوذ ترکش ۲ سانتی متر با ضخامت مختلف خاک نوع ۲

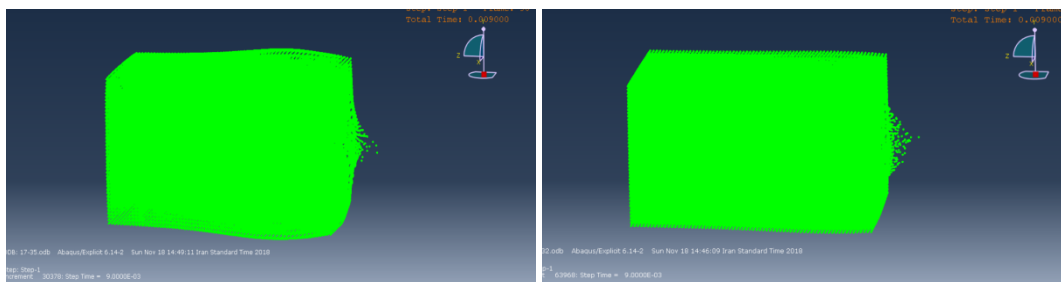
طبق شکل (۵-۷۷) نفوذ حداکثر ترکش ۲ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر در اهداف ماسه‌ای سست، متوسط و نیمه متراکم به ترتیب ۲۶، ۱۸،۵ و ۱۸ سانتی متر است. همان طور که در پرتابه‌ها مشاهده شد با افزایش خصوصیات مکانیکی هدف مقاومت در برابر نفوذ افزایش می‌یابد. در زمان ۰/۰۰۱ ثانیه ترکش با ضخامت ۸ میلی متر نفوذ بیشتری نسبت به دو ترکش دیگر داشته است ولی در طول زمان حل مسئله روند صعودی نفوذ کم‌تر از دو ترکش دیگر است. مطابق شکل (۵-۷۸) با افزایش ضخامت ترکش به دلیل افزایش سطح مقطع و تماس بیشتر ترکش با خاک نفوذ در هدف کم‌تر می‌شود.

۵-۵-۳ نتایج حاصل از ترکش ۳ سانتی متر



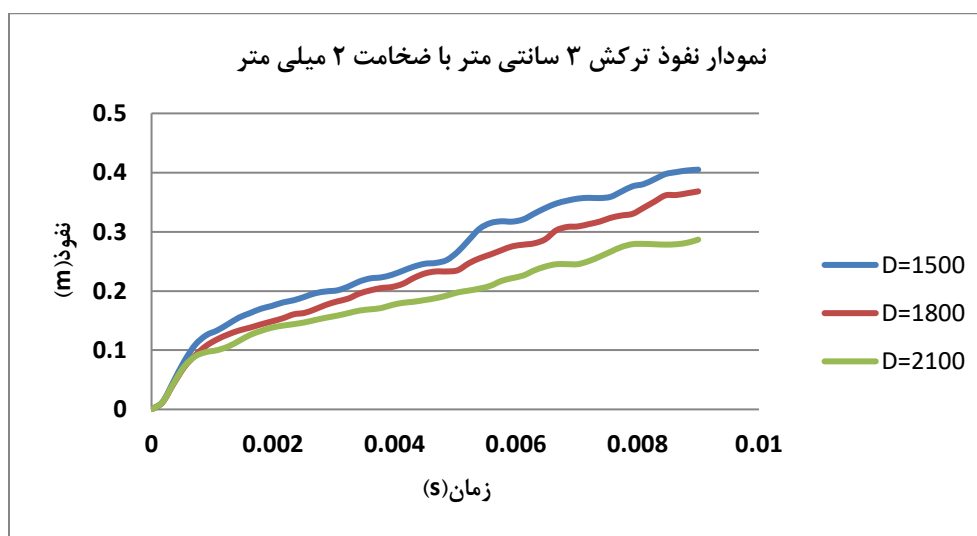
شکل ۵-۸۰ شکل نفوذ ترکش ۳ به ضخامت ۲

شکل ۵-۷۹ المان بندی ترکش ۳ به ضخامت ۲

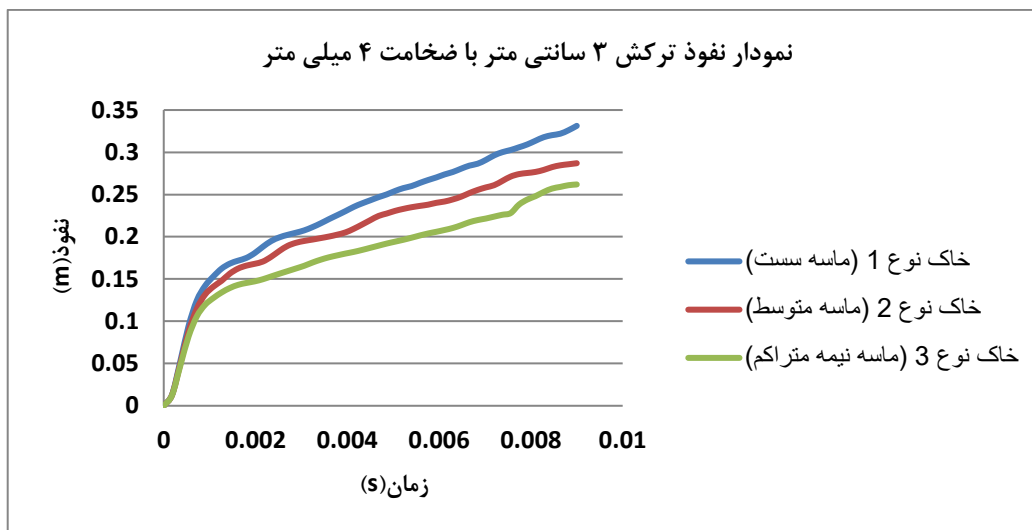


شکل ۵-۸۱ شکل نفوذ ترکش ۳ به ضخامت ۴ شکل ۵-۸۲ شکل نفوذ ترکش ۳ به ضخامت ۸

در شکل (۵-۷۹) نحوه المان بندی ترکش ۳ سانتی متر آورده شده است و در شکل های (۵-۸۰ تا ۵-۸۲) شکل نفوذ ترکش ۳ سانتی متر با ضخامت های ۲، ۴ و ۸ میلی متر نشان داده شده است. این ترکش ها با سرعت ۷۵۰ متر بر ثانیه به سمت خاک شلیک شده است.

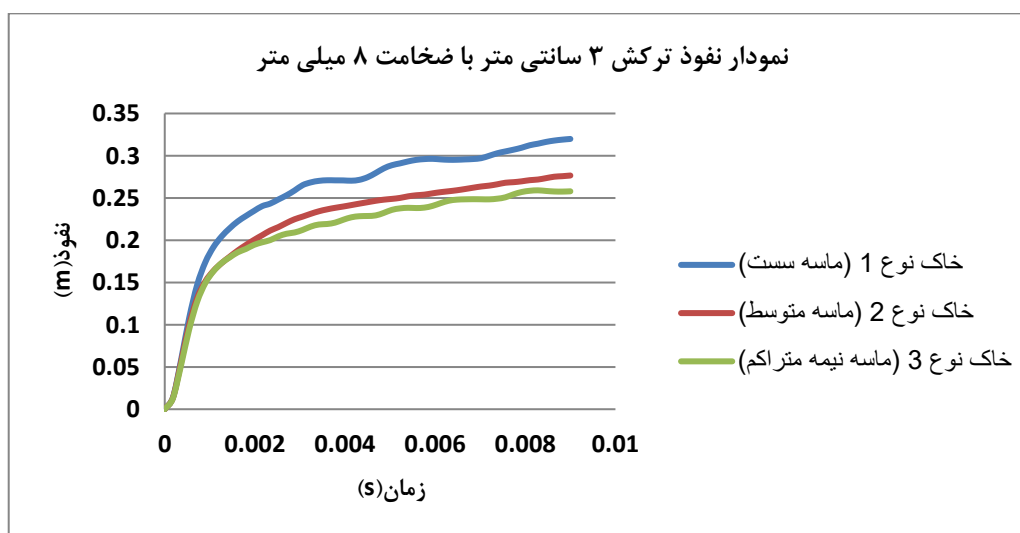


شکل ۵-۸۳ مقایسه نفوذ ترکش ۳ سانتی متر با ضخامت ۲ میلی متر در اهداف مختلف

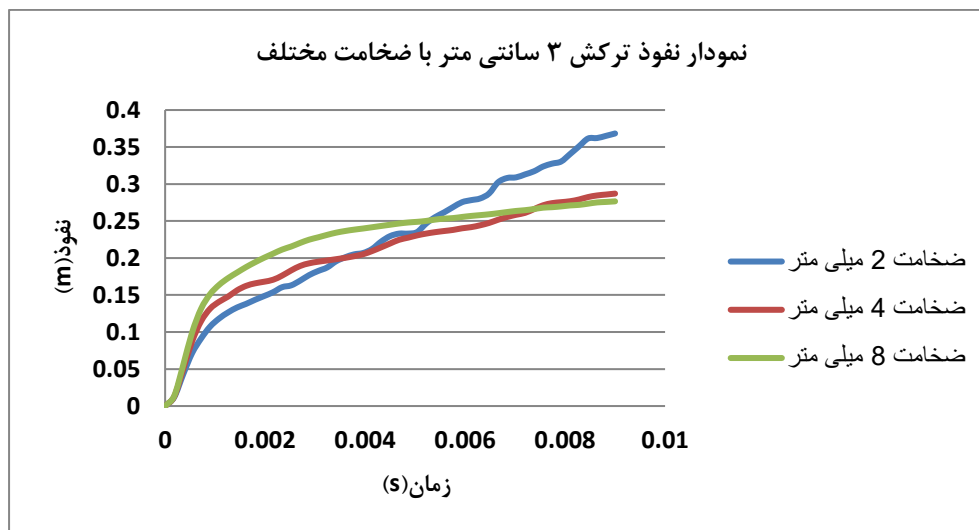


شکل ۵-۸۴ مقایسه نفوذ ترکش ۳ سانتی متر با ضخامت ۴ میلی متر در اهداف مختلف

مطابق شکل (۵-۸۳) نفوذ حداکثر ترکش ۳ سانتی متر به ضخامت ۲ میلی متر در اهداف ماسه‌ای سست، متوسط و نیمه متراکم به ترتیب برابر ۴۰، ۳۶ و ۲۸ سانتی متر است. همچنین سرعت باقی مانده در این اهداف به ترتیب برابر ۲۹، ۳۰ و ۲۱ متر بر ثانیه است. همچنین طبق نمودار شکل (۵-۸۴) نفوذ حداکثر ترکش ۳ سانتی متر به ضخامت ۴ میلی متر در اهداف ماسه‌ای سست، متوسط و نیمه متراکم به ترتیب برابر ۳۳، ۲۸ و ۲۶ سانتی متر است. همچنین سرعت باقی مانده در این اهداف به ترتیب برابر ۱۱/۳۹، ۱۶/۱۳ و ۵۷/۷ متر بر ثانیه است.



شکل ۵-۸۵ مقایسه نفوذ ترکش ۳ سانتی متر با ضخامت ۸ میلی متر در اهداف مختلف

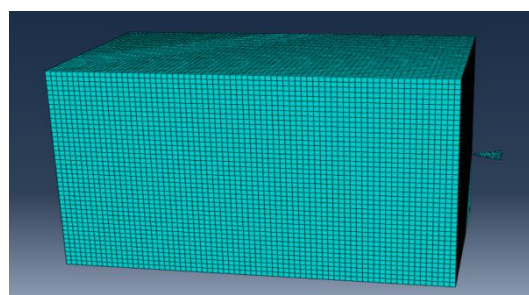
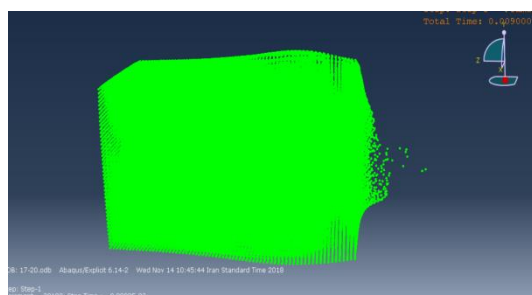


شکل ۸۵-۵ مقایسه نفوذ ترکش ۳ سانتی متر با ضخامت مختلف در هدف نوع ۲

طبق شکل (۸۵-۵) نفوذ حداکثر ترکش ۳ سانتی متر به ضخامت ۸ میلی متر در اهداف ماسه‌ای سست، متوسط و نیمه متراکم به ترتیب برابر ۳۱، ۲۷ و ۲۵ سانتی متر است. همان طور که مشهود است با افزایش خصوصیات مکانیکی خاک نفوذ ترکش در آن کم تر شده است و تا زمان ۰,۰۰۱ ثانیه نمودار نفوذ هر سه ترکش بر هم منطبق است و تا زمان مذکور کاهش سرعت قابل ملاحظه‌ای در ترکش رخ می‌دهد.

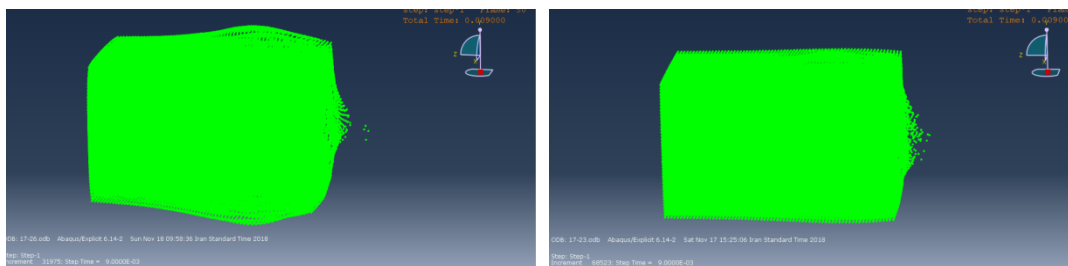
طبق شکل (۸۶-۵) با افزایش ضخامت ترکش نفوذ حداکثر کم تر شده است. با افزایش ۶ میلی متری ضخامت ترکش نفوذ نهایی ترکش ۳ سانتی متری ۲۵ درصد کاهش یافته است.

۴-۵-۵ نتایج حاصل از ترکش ۴ سانتی متر



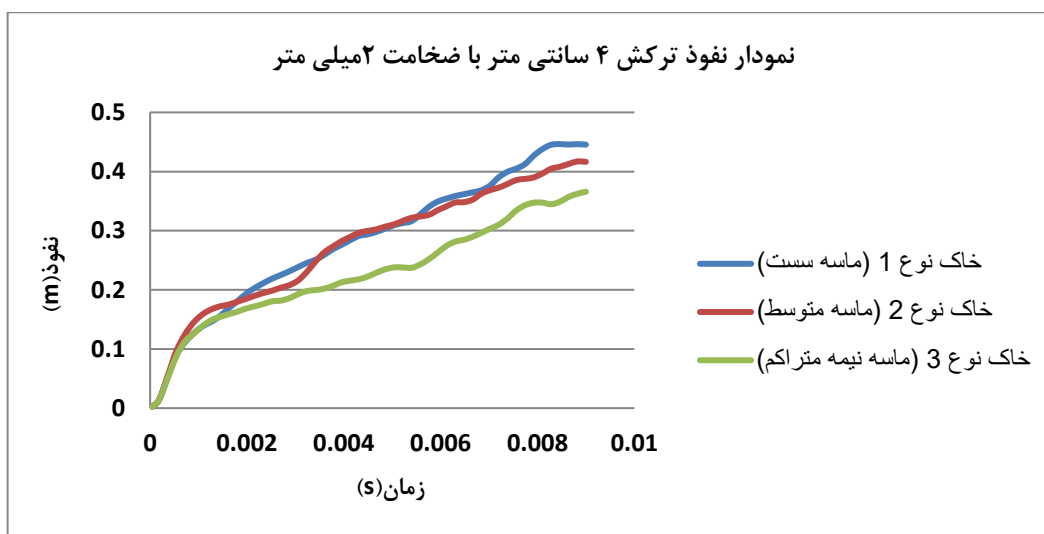
شکل ۸۸-۵ شکل نفوذ ترکش ۴ به ضخامت ۲

شکل ۸۷-۵ المان بندی ترکش ۴ به ضخامت ۲

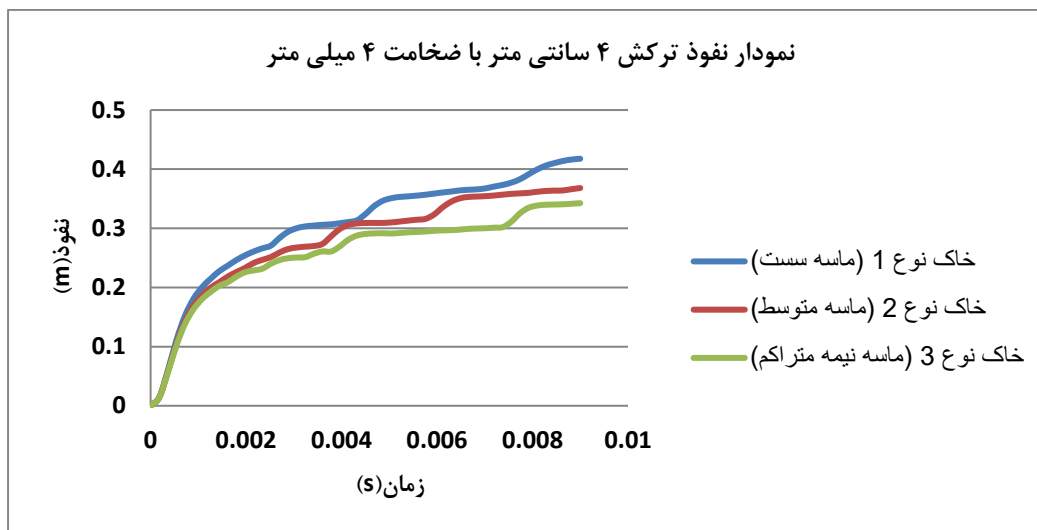


شکل ۵-۸۹ شکل نفوذ ترکش ۴ به ضخامت ۴ شکل ۵-۹۰ شکل نفوذ ترکش ۴ به ضخامت ۸

در شکل (۵-۸۷) نحوه امان بندی ترکش ۴ سانتی متر آورده شده است و در شکل های (۵-۸۸ تا ۵-۹۰) شکل نفوذ ترکش ۴ سانتی متر با ضخامت های ۲، ۴ و ۸ میلی متر نشان داده شده است. این ترکش ها با سرعت ۷۵۰ متر بر ثانیه به سمت خاک شلیک شده است.

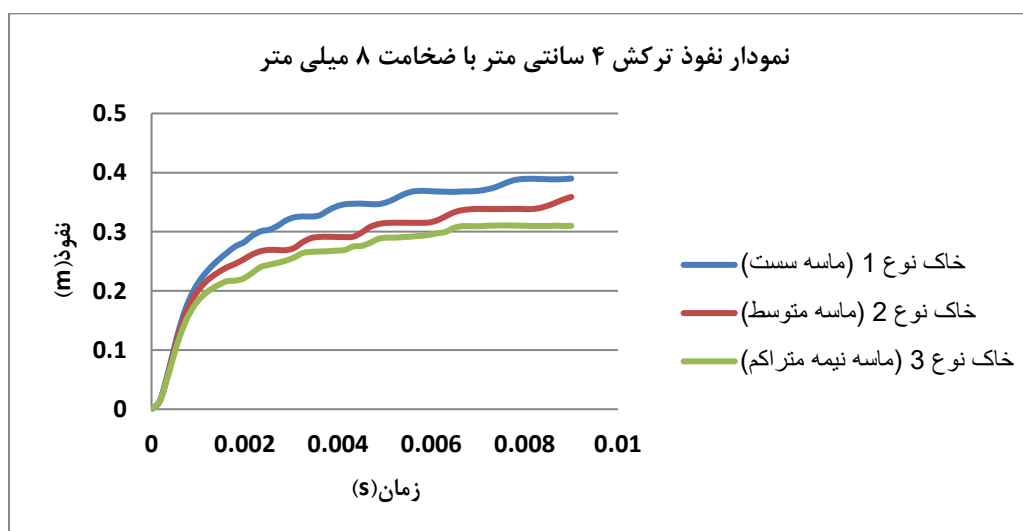


شکل ۵-۹۱ مقایسه نفوذ ترکش ۴ سانتی متر با ضخامت ۲ میلی متر در اهداف مختلف

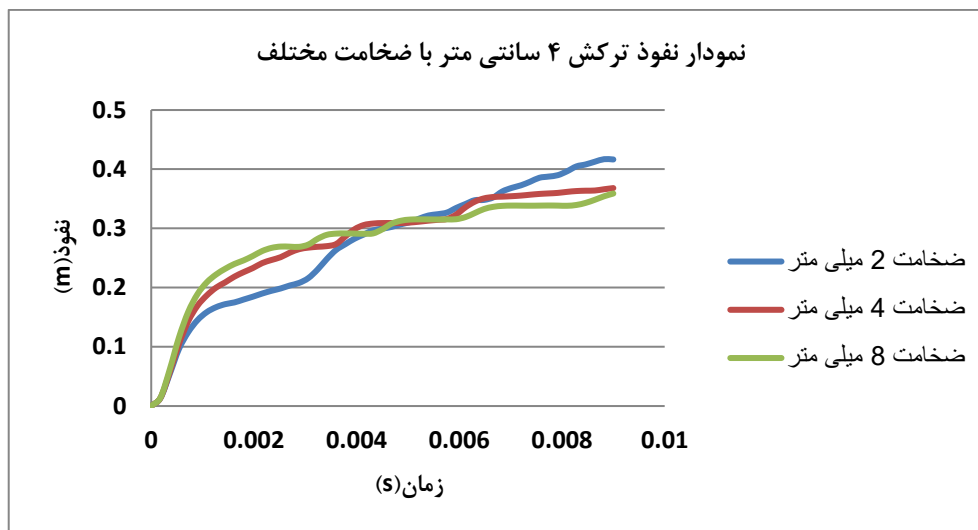


شکل ۵-۹۲ مقایسه نفوذ ترکش ۴ سانتی متر با ضخامت ۴ میلی متر در اهداف مختلف

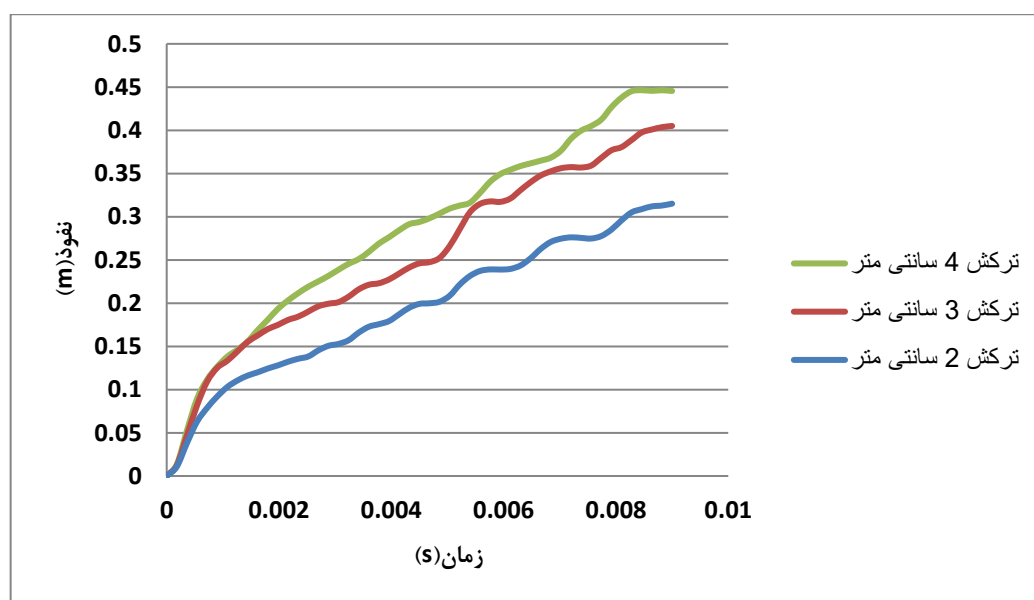
طبق شکل (۵-۹۱) نفوذ حداکثر ترکش ۴ سانتی متر به ضخامت ۲ میلی متر در اهداف ماسه‌ای سست، متوسط و نیمه متراکم به ترتیب برابر ۴۴، ۴۱ و ۳۶ سانتی متر است. که این میزان نسبت به نفوذ ترکش ۳ سانتی متر با ضخامت ۲ میلی متر افزایش یافته است. مطابق شکل (۵-۹۲) نفوذ حداکثر ترکش ۴ سانتی متر به ضخامت ۴ میلی متر در اهداف ماسه‌ای سست، متوسط و نیمه متراکم به ترتیب برابر ۴۱، ۳۶ و ۳۴ سانتی متر است. این کاهش نفوذ در اثر افزایش خصوصیات مکانیکی به دلیل افزایش مقاومت ترکش در برابر نفوذ در اهداف با خصوصیات بالا می‌باشد.



شکل ۵-۹۳ مقایسه نفوذ ترکش ۴ سانتی متر با ضخامت ۸ میلی متر در اهداف مختلف



شکل ۵-۹۴ مقایسه نفوذ ترکش ۴ سانتی متر با ضخامت مختلف در خاک نوع ۲

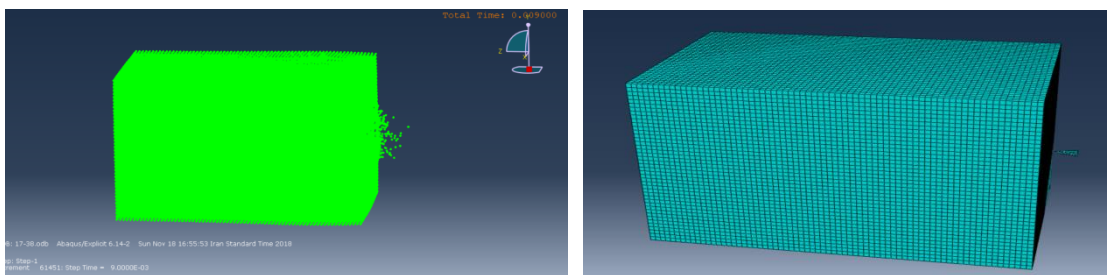


شکل ۵-۹۵ مقایسه نفوذ ترکش با ابعاد مختلف و ضخامت ۲ میلی متر در خاک نوع ۱

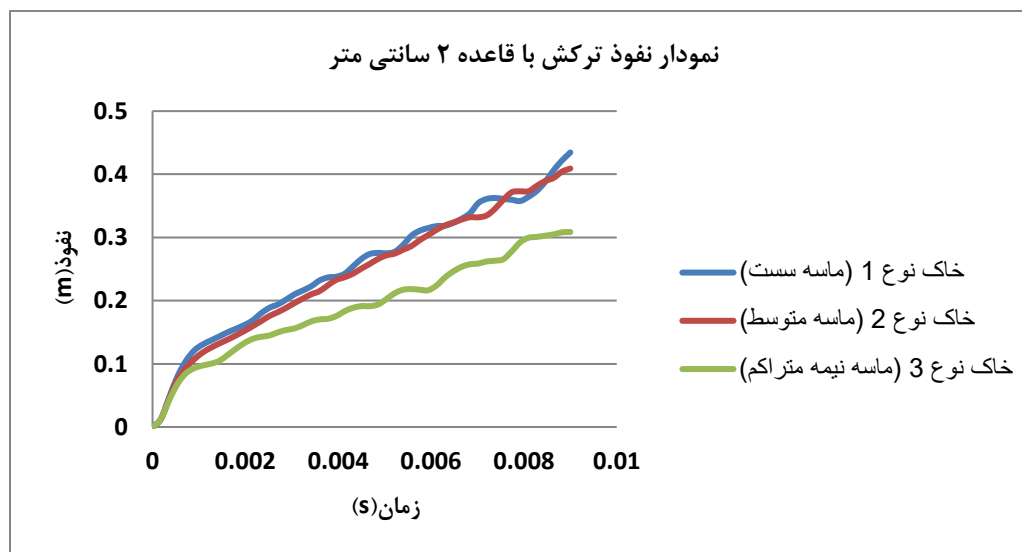
طبق شکل (۵-۹۳) نفوذ حداکثر ترکش ۴ سانتی متر به ضخامت ۸ میلی متر در اهداف ماسه‌ای سست، متوسط و نیمه متراکم به ترتیب برابر ۳۸، ۳۵ و ۳۰ سانتی متر است. همان طور که در ترکش-های ۲ و ۳ سانتی متر مشاهده شد با افزایش ضخامت ترکش نفوذ حداکثر کاهش می‌یابد که این موضوع در مورد پرتابه ۴ سانتی متر هم صادق است. (شکل ۵-۹۴)

طبق نتایج به دست آمده از مدل سازی، با افزایش خصوصیات مکانیکی خاک ماسه ای نفوذ کاهش می یابد و همچنین با کاهش ضخامت ترکش نفوذ افزایش می یابد. می توان از نتایج نمودارها این چنین برداشت کرد که در یک نوع خاک ثابت و ضخامت ثابت با افزایش ابعاد ترکش نفوذ نهایی ترکش افزایش می یابد. طبق شکل (۵-۹۵) نفوذ سه ترکش با ابعاد مختلف و ضخامت یکسان ۲ میلی متر در هدف ماسه ای نوع ۱ مورد مقایسه قرار گرفته است همان طور که مشهود است با افزایش ابعاد ترکش میزان نفوذ در خاک افزایش می یابد. به طوری که روند صعودی نمودار نفوذ ترکش ۴ سانتی متر با شیب بیشتری بعد از زمان ۰/۰۰۱ ثانیه افزایش می یابد.

۵-۵-۵ نتایج حاصل از ترکش باقاعده ۲ سانتی متر



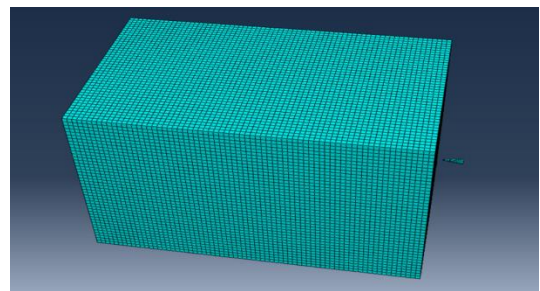
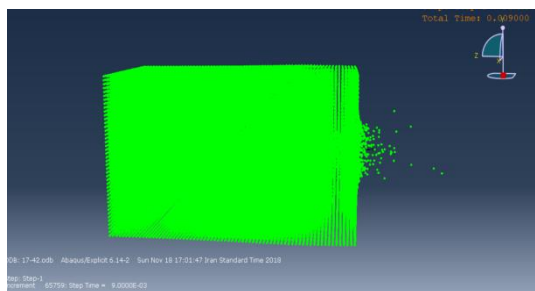
شکل ۵-۹۶ المان بندی ترکش باقاعده ۲ سانتی متر شکل ۵-۹۷ شکل نفوذ ترکش باقاعده ۲ سانتی متر



شکل ۵-۹۸ مقایسه نفوذ ترکش باقاعده ۲ سانتی متر با ضخامت ۲ میلی متر در اهداف مختلف

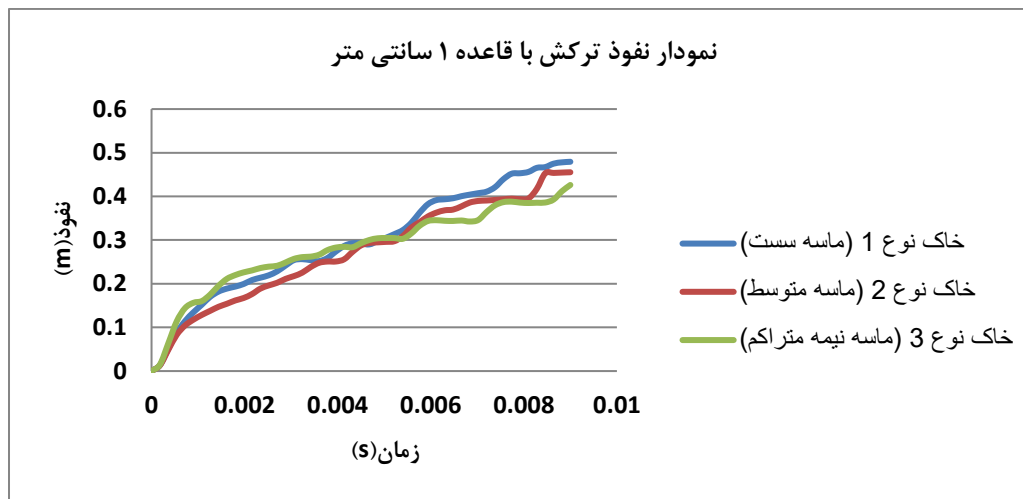
ترکش باقاعده ۲ سانتی متر با سرعت ۷۵۰ متربرثانی به سمت هدف شلیک شده است که نحوه المان بندی مسئله و شکل نفوذ در خاک نوع ۳ در شکل (۵-۹۶ و ۵-۹۷) نشان داده شده است. مطابق شکل (۵-۹۸) نفوذ حداکثر ترکش متساوی الساقین باقاعده ۲ سانتی متر به ضخامت ۲ میلی متر در اهداف ماسه ای سست، متوسط و نیمه متراکم به ترتیب برابر ۴۳، ۴۰ و ۳۰ سانتی متر است. طبق دیگر مدل ها با افزایش خصوصیات مکانیکی میزان نفوذ کاهش پیدا می کند. طول ساق های این ترکش ۳ سانتی متر است و زاویه نوک ترکش ۳۸/۹۴ درجه است که به دلیل کاهش زاویه نوک میزان نفوذ ترکش نسبت به ترکش متساوی الاضلاع ۳ و ۲ سانتی متر بیشتر است به طوری که برای ترکش با طول اضلاع ۲ سانتی متر و زاویه نوک ۶۰ درجه میزان نفوذ در خاک ماسه ای نوع ۱ برابر ۳۱ سانتی متر است و برای ترکش ۳ سانتی متر و زاویه نوک ۶۰ درجه در همان خاک ۴۰ سانتی متر و برای ترکش با ساق ۳ و قاعده ۲ سانتی متر میزان نفوذ به ۴۳ سانتی متر می رسد، که نشان گر اهمیت زاویه رأس ترکش- های مثلثی در میزان نفوذ در خاک می باشد.

۵-۵-۶ نتایج حاصل از ترکش باقاعده ۱ سانتی متر

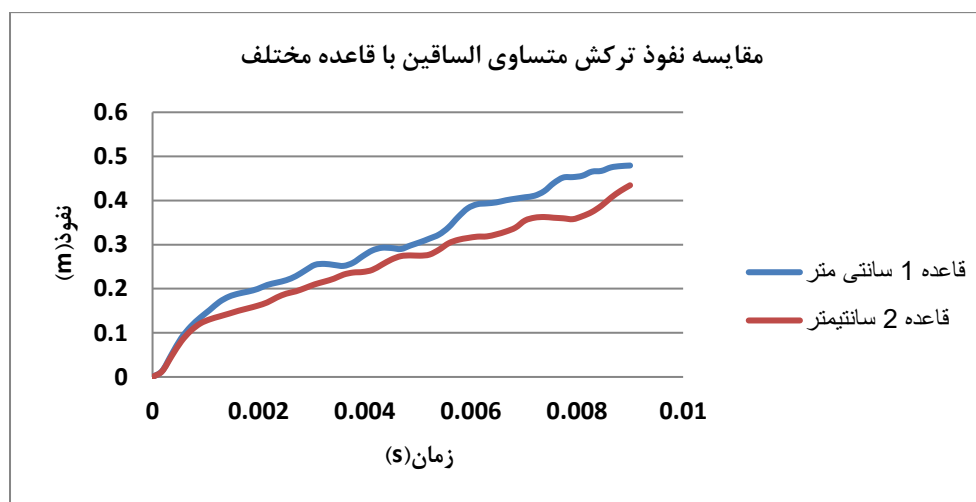


شکل ۵-۹۹ المان بندی ترکش باقاعده ۱ سانتی متر شکل ۵-۱۰۰ شکل نفوذ ترکش باقاعده ۱ سانتی متر

ترکش باقاعده ۱ سانتی متر با سرعت ۷۵۰ متربرثانی به سمت هدف شلیک شده است که نحوه
المان بندی مسئله و شکل نفوذ در خاک نوع ۳ در شکل (۵-۹۹ و ۱۰۰-۵) نشان داده شده است.

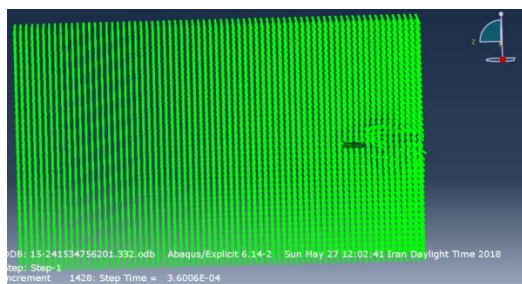


شکل ۵-۱۰۱ مقایسه نفوذ ترکش باقاعده ۱ سانتی متر با ضخامت ۲ میلی متر در اهداف مختلف

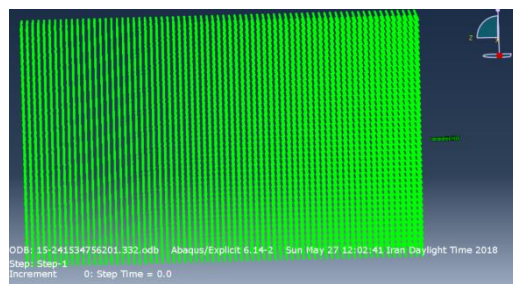


شکل ۵-۱۰۲ مقایسه نفوذ ترکش باقاعده مختلف به ضخامت ۲ میلی متر در خاک نوع ۱

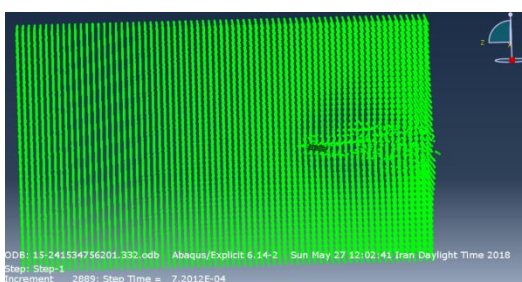
طبق شکل (۵-۱۰۱ و ۵-۱۰۲) با کاهش قاعده و نوک تیز شدن نوک ترکش، نفوذ در خاک افزایش می یابد. نفوذ ترکش باقاعده ۱ سانتی متر و قاعده ۲ سانتی متر در ماسه سست به ترتیب ۴۷ و ۴۳ سانتی متر است که نشان دهنده تأثیر بسیار زیاد قاعده ترکش و زاویه نوک در میزان نفوذ می باشد. در اشکال (۵-۷۹ تا ۵-۹۱) روند نفوذ ترکش ۴ سانتی متر با ضخامت ۴ میلی متر نشان داده شده است.



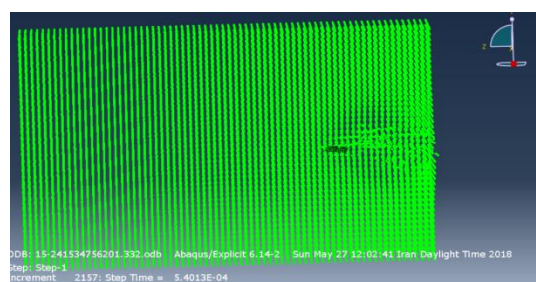
شکل ۵-۱۰۴ نفوذ در زمان ۰/۰۰۰۳۶ ثانیه



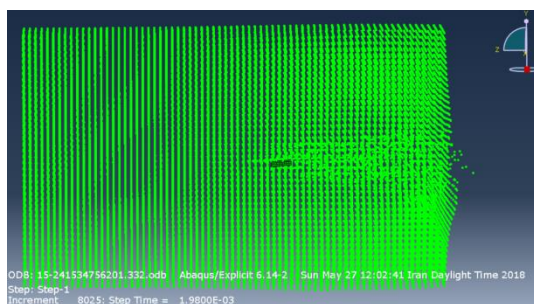
شکل ۵-۱۰۳ قبل از نفوذ



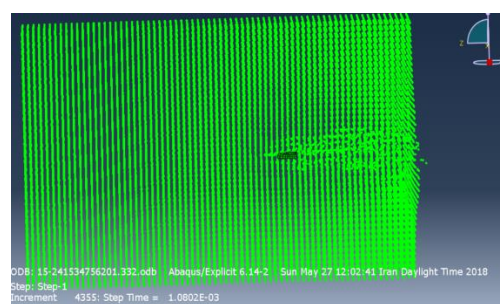
شکل ۵-۱۰۶ نفوذ در زمان ۰/۰۰۰۷۲ ثانیه



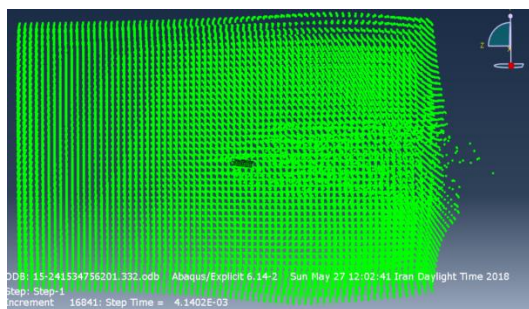
شکل ۵-۱۰۵ نفوذ در زمان ۰/۰۰۰۵۴ ثانیه



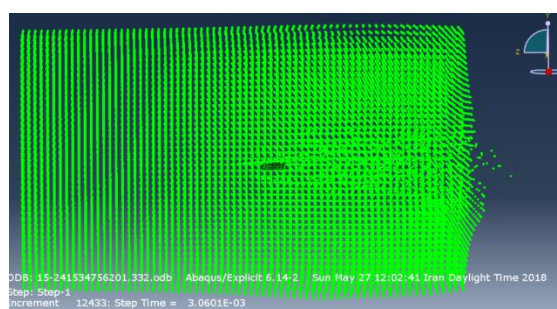
شکل ۵-۱۰۸ نفوذ در زمان ۰/۰۰۲ ثانیه



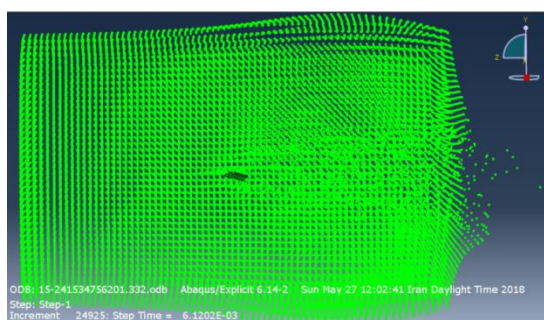
شکل ۵-۱۰۷ نفوذ در زمان ۰/۰۰۱ ثانیه



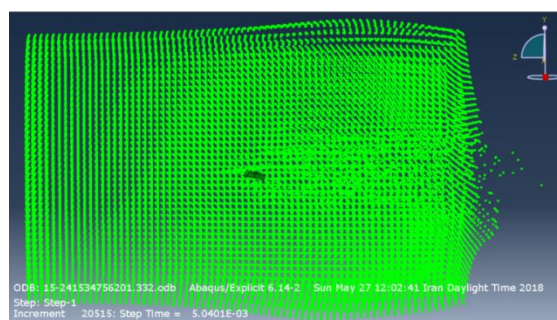
شکل ۵-۱۱۰ نفوذ در زمان ۰/۰۰۴ ثانیه



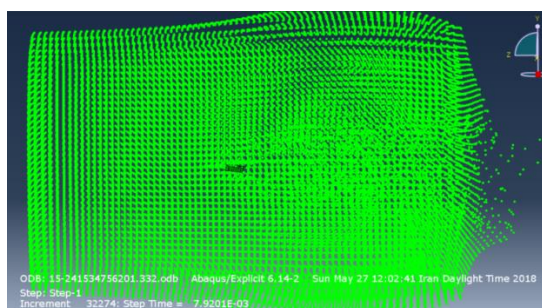
شکل ۵-۱۰۹ نفوذ در زمان ۰/۰۰۳ ثانیه



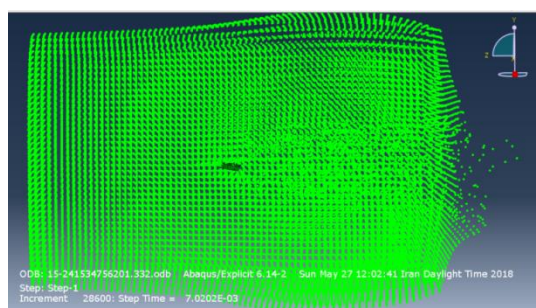
شکل ۵-۱۱۲ نفوذ در زمان ۰/۰۰۶ ثانیه



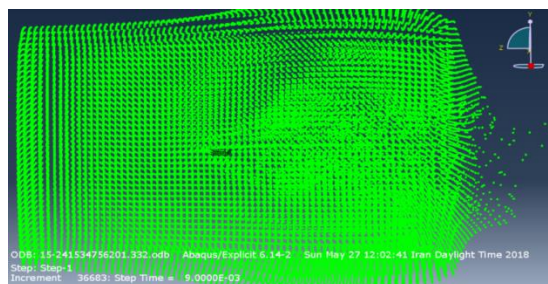
شکل ۵-۱۱۱ نفوذ در زمان ۰/۰۰۵ ثانیه



شکل ۵-۱۱۴ نفوذ در زمان ۰/۰۰۸ ثانیه



شکل ۵-۱۱۳ نفوذ در زمان ۰/۰۰۷ ثانیه



شکل ۵-۱۱۵ نفوذ در زمان ۰/۰۰۹ ثانیه

فصل ششم

نتایج و پیشنهادات

۶-۱ نتایج کلی

شبیه‌سازی نفوذ انواع پرتابه ترکش با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) انجام گرفته و با مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج محققین دیگر مشاهده شد که همخوانی بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد و می‌توان از نتایج مدل‌سازی به کاررفته در پژوهش حاضر، در بررسی پدیده فوق استفاده نمود.

با بررسی نتایج مدل‌سازی پرتابه نوک‌تیز در اهداف مختلف این نتیجه به دست آمد که در شرایط یکسان با تغییر خاک ماسه‌ای سست به نیمه‌متراکم نفوذ پرتابه کاهش می‌یابد، این میزان کاهش در اثر نفوذ پرتابه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ به ترتیب ۸، ۲۹ و ۳۷ درصد و برای ترکش ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر به ترتیب ۳۵، ۳۰ و ۱۹ درصد می‌باشد. بخش عمده‌ای از نمودارهای نفوذ پرتابه و ترکش روندی صعودی داشته است که سهم زیادی از نفوذ در همان لحظات اولیه برخورد و وارد شدن پرتابه به هدف انجام می‌گیرد. با توجه به مدل‌سازی پرتابه‌های نوک‌تیز در شرایط یکسان با کاهش زاویه نوک پرتابه نفوذ پرتابه در خاک بیشتر می‌شود به طور مثال در هدف متوسط با کاهش زاویه نوک پرتابه از ۶۰ به ۳۰ درجه نفوذ در هدف ۸ سانتی‌متر و برای هدف نیمه‌متراکم ۱۱ سانتی‌متر، افزایش یافته است. و کم‌ترین میزان نفوذ در پرتابه‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه متعلق به پرتابه ۶۰ درجه می‌باشد.

در نتایج حاصل از مدل‌سازی ترکش‌ها مشاهده شد که همانند پرتابه‌ها با افزایش خصوصیات مکانیکی خاک ماسه‌ای نفوذ ترکش در خاک کاهش می‌یابد. پس می‌توان گفت خصوصیات مکانیکی هدف نقش بسزایی در نفوذ ایفا می‌کند و برای کاهش جبران خسارات وارده با افزایش دانسیته و مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی خاک محل و هدف احتمالی می‌توان خسارات را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داد.

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار نفوذ ترکش‌ها در خاک ضخامت ترکش‌ها می‌باشد. با کاهش ضخامت ترکش نفوذ در خاک بیشتر شده و به عبارتی کاهش آسیب‌های وارده بر هدف در ترکش‌های با شرایط یکسان، بهتر است طراحی بر اساس ترکش‌های با ضخامت کم‌تر انجام شود.

در شرایطی که ضخامت ترکش‌ها و نوع خاک یکسان است با افزایش ابعاد ترکش نفوذ در خاک افزایش می‌یابد به طوری که با افزایش ابعاد ترکش از ۲ به ۴ سانتی‌متر و با ضخامت ثابت ۲ میلی‌متر در اهداف سست، متوسط و نیمه‌متراکم به ترتیب نفوذ در هدف ۴۲، ۶۴ و ۸۰ درصد افزایش یافته است. همچنین با کاهش ابعاد قاعده ترکش و کاهش زاویه نوک ترکش نفوذ در خاک بیشتر می‌شود.

جدای از نتایج کلی حاصل‌شده می‌توان از نتایج تحقیق برای طراحی پوشش خاکی انواع سنگرها و سایر مناطق حفاظت‌شده استفاده نمود. با توجه به نوع تهدید و تخمین نوع پرتابه و ترکش می‌توان ضخامت ایمن و موردنیاز را تعیین نموده و از عدم نفوذ کامل پرتابه در آن اطمینان حاصل نمود.

۶-۲ پیشنهادات

- انواع شکل‌های دیگر پرتابه‌ها و ترکش‌ها نیز موردبررسی قرار گیرد.
- بررسی نفوذ گلوله‌های انفجاری به طوری که پس از برخورد انفجاری رخ گیرد.
- استفاده از سایر روش‌های عددی بدون شبکه و مقایسه نتایج آن موردبررسی قرار گیرد.
- از سایر خاک‌های موجود مانند خاک‌های چسبنده و خاک‌های درشت‌دانه‌شنی نیز در مدل‌سازی استفاده گردد.

منابع و مآخذ

[۱] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، پدافند غیرعامل. پیش‌نویس مبحث بیست و یکم مقررات، ملی ساختمان. تهران، ۳۱۴

[2] Børvik, T., Dey, S., & Olovsson, L. (2015). Penetration of granular materials by small-arms bullets. *International Journal of Impact Engineering*, 75, 123-139.

[3] Johnson, W., & Mamalis, A. (1978). The perforation of circular plates with four-sided pyramiddally-headed square-section punches. *International Journal of Mechanical Sciences*, 20(12), 849-866.

[4] Levy, N., & Goldsmith, W. (1984). Normal impact and perforation of thin plates by hemispherically-tipped projectiles—II. Experimental results. *International Journal of Impact Engineering*, 2(4), 299-324.

[5] Anderson Jr, C. E., Hohler, V., Walker, J. D., & Stilp, A. J. (1999). The influence of projectile hardness on ballistic performance. *International Journal of Impact Engineering*, 22(6), 619-632.

[6] Goldsmith, W. (1999). Non-ideal projectile impact on targets. *International Journal of Impact Engineering*, 22(2-3), 95-395.

[۷] خداحمی، ح.، "مباحثی از مکانیک ضربه و انفجار"، انتشارات موسسه آموزش عالی ایوانکی،

۰۵۹

[8] Zukas, J. (1990). *High Velocity Impact Dynamics* John Wiley&Sons. Inc UK.

[9] Orphal, D. L., & Anderson Jr, C. E. (2001). Target damage from highly oblique hypervelocity impacts of steel spheres against thin laminated targets. *International Journal of Impact Engineering*, 26(1-10), 567-578.

[10] Corbett, G., Reid, S., & Johnson, W. (1996). Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: a review. *International Journal of Impact Engineering*, 18(2), 141-230.

[11] Bruisten, S., Nilsson-Ihrfelt, E., Buhrman, M., & Ekselius, L. (2006). TOXBASE. *Emerg Med J*. 2006 Aug; 23 (8): 614-7. PMID: 16858093 [PubMed-in process] 24: Team V, Markovic M. Internet advertising of artificial tanning in Australia. Paper presented at the Oncol Nurs Forum.

[12] Autodyn, A. (2005). *Theory manual revision 4.3*. Century Dynamics, Concord, CA.

[13] Allen, W. A., Mayfield, E. B., & Morrison, H. L. (1957a). Dynamics of a projectile penetrating sand. *Journal of Applied Physics*, 28(3), 370-376.

[14] Allen, W. A., Mayfield, E. B., & Morrison, H. L. (1957b). Dynamics of a projectile penetrating sand. Part II. *Journal of Applied Physics*, 28(11), 1331-1335.

[15] Baif, Y., & Johnson, W. (1981). The effects of projectile speed and medium resistance in ricochet off sand. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 23(2), 69-75.

- [16] Børvik, T., Dey, S., & Olovsson, L. (2015). Penetration of granular materials by small-arms bullets. *International Journal of Impact Engineering*, 75, 123-139 .
- [17] Nechitailo, N. (2015). Hypervelocity penetration into soil. *Procedia Engineering*, 103, 427-435 .
- [18] Forrestal, M., & Luk, V. (1992). Penetration into soil targets. *International Journal of Impact Engineering*, 12(3), 427-444 .
- [19] Savvateev, A., Budin, A., Kolikov, V., & Rutberg, P. G. (2001). High-speed penetration into sand. *International Journal of Impact Engineering*, 26(1-10), 675-681 .
- [20] Shi, C., Wang, M., Li, J., & Li, M. (2014). A model of depth calculation for projectile penetration into dry sand and comparison with experiments. *International Journal of Impact Engineering*, 73, 112-122 .
- [21] Mingyang, W., Xiaoli, R., Qihu, Q., & Tao, G. (2003). CALCULATION PRINCIPLE FOR PENETRATION AND PERFORATION OF PROJECTILES INTO ROCK [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 11.
- [22] Wang, M., Tan, K., Wu, H., & Qian, Q. (2009). New method of calculation of projectile penetration into rock. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(9), 1863-1869 .
- [23] Van Vooren, A., Borg, J., Sandusky, H., & Felts, J. (2013). Sand penetration: a near nose investigation of a sand penetration event. *Procedia Engineering*, 58, 601-607.
- [24] Liu, G.-R. (2009). *Meshfree methods: moving beyond the finite element method*: CRC press.
- [25] Lucy, L. B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The astronomical journal*, 82, 1013-1024 .
- [26] Gingold, R. A., & Monaghan, J. J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly notices of the royal astronomical society*, 181(3), 375-389 .
- [27] Belytschko, T., Lu, Y. Y., & Gu, L. (1994). Element-free Galerkin methods. *International journal for numerical methods in engineering*, 37(2), 229-256.
- [28] Atluri, S. N., & Zhu, T. (1998). A new meshless local Petrov-Galerkin (MLPG) approach in computational mechanics. *Computational mechanics*, 22(2), 117-127.
- [29] Atluri, S., Cho, J., & Kim, H.-G. (1999). Analysis of thin beams, using the meshless local Petrov-Galerkin method, with generalized moving least squares interpolations. *Computational mechanics*, 24(5), 334-347 .
- [30] Lin, H., & Atluri, S. (2001). Analysis of incompressible Navier-Stokes flows by the meshless MLPG method. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2(2), 117-142 .
- [31] Atluri, S. N., & Shen, S. (2002). *The meshless method*: Tech Science Press Encino, CA.

- [32] Gu, Y., & Liu, G. (2001). A boundary point interpolation method (BPIM) using radial function basis. Paper presented at the First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics.
- [33] Gu, Y., & Liu, G.-R. (2001). A local point interpolation method for static and dynamic analysis of thin beams. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190(42), 5515-5528.
- [34] Liu, G., Gu, Y., & Wu, Y. (2003). A Meshfree Weak-Strong-form (MWS) method. Paper presented at the International Workshop on MeshFree Methods.
- [35] Chung, T. (2010). *Computational fluid dynamics*: Cambridge university press.
- [36] Anderson John, D. (1995). *Computational fluid dynamics: the basics with applications*. International edition: McGraw-Hill .
- [37] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Taylor, R. L., & Taylor, R. (2000). *The finite element method: solid mechanics (Vol. 2)*: Butterworth-heinemann.
- [38] ANSYS AUTODYN New Feature Highlights.
- [39] Zukas, J. A. (1990). *High velocity impact dynamics*: Wiley-Interscience.
- [40] Liu, G., & Gu, Y. (۲۰۰۱). A local radial point interpolation method (LRPIM) for free vibration analyses of 2-D solids. *Journal of Sound and vibration*, 246(1), 29-46 .
- [41] Liu, G., Gu, Y., & Wu, Y. (2003). A Meshfree Weak-Strong-form (MWS) method. Paper presented at the International Workshop on MeshFree Methods.
- [42] Liu, G., & Liu, M. (2003). *Smoothed Particle Hydrodynamics—A Meshfree Particle Method*, World Sci. Publishing Co. Pte. Ltd.
- [43] Hoogerbrugge P., J., Koelman J. M. V. A. (1992). Simulating microscopic hydrodynamic phenomena with dissipative particle dynamics, *Europhysics Letters*, 19(3), 155-160.
- [44]. Wolfram S. (1977). *Cellular Automata*, Los Alamos Science, Astronomical Society, 181, 375-389.
- [45] Harlow, F. H. (1962). The particle-in-cell method for numerical solution of problems in fluid dynamics. Retrieved from.
- [46] Harlow, F. H. (1964). The particle-in-cell computing method for fluid dynamics. *Methods Comput. Phys.*, 3, 319-343 .
- [47] Gentry, R. A., Martin, R. E., & Daly, B. J. (1966). An Eulerian differencing method for unsteady compressible flow problems. *Journal of computational Physics*, 1(1), 87-118.
- [48] Koshizuka, S., Nobe, A., & Oka, Y. (1998). Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 26(7), 751-769.
- [49] Hockney, R. W., & Eastwood, J. W. (1988). *Computer simulation using particles*: crc Press.

[۵۰] امانی فرد، نیما. خداپرست حقی، اکبر. (۱۳۸۹) آشنایی با روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) و کاربردهای آن. انتشارات دانشگاه گیلان .

- [51] khayat zadeh,H.(1391). simulation of under water explosion. Master thesis, 124-165.
- [52] Liu, M., & Liu, G. (2010). Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments. Archives of computational methods in engineering, 17(1), 25-76 .
- [53] Benz, W. (1988). Applications of smooth particle hydrodynamics (SPH) to astrophysical problems. Computer Physics Communications, 48(1), 97-105.
- [54] Benz, W. (1990). Smoothed particle hydrodynamics: A review. In numerical modeling of nonlinear stellar pulsation: Problems and prospects. Kluwer Academic Dordrecht.
- [55] Monaghan J. J.(1992) Smoothed particle hydrodynamics, Annual Review of Astronomical and Astrophysics, 30, 543-574.
- [56] Rasio, F. A., & Lombardi Jr, J. C. (1999). Smoothed particle hydrodynamics calculations of stellar interactions. Journal of Computational and applied Mathematics, 109(1-2), 213-230 .
- [57] Monaghan, J. J., & Lattanzio, J. C. (1991). A simulation of the collapse and fragmentation of cooling molecular clouds. The Astrophysical Journal, 375, 177-189 .
- [58] Berczik, P., & Kolesnik, I. (1993). Smoothed particle hydrodynamics and its application to astrophysical problems. Kinematics and Physics of Celestial Bodies, 9, 1-11.
- [59] Berczik, P., & Kolesnik, I. (1998). Gasodynamical model of the triaxial protogalaxy collapse. Astronomical and Astrophysical Transactions, 16(3), 163-185 .
- [60] Berczik, P. (2000). Modeling the star formation in galaxies using the Chemo-DynamicalSPH code. Astrophysics and Space Science, 271(2), 103-126 .
- [61] Monaghan J. J.(1990). Modeling the universe; Proceedings of the Astronomical Society of Australia, 18, 233-237.
- [62] Swegle, J. (1992). Report at Sandia National Laboratories: August.
- [63] Morris, J. P. (1996). Analysis of smoothed particle hydrodynamics with applications: Monash University Australia.
- [64] Monaghan J. J.(1995). Kocharyan A., SPH simulation of multi-phase flow, Computer Physics Communication, 87, 225-235.
- [65] Monaghan J. J. (1994). Simulating free surface flow with SPH, Journal of Computational Physics, 110, 399.
- [66] Morris, J. P., Fox, P. J., & Zhu, Y. (1997). Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH. Journal of computational Physics, 136(1), 214-226 .
- [67] Morris J. P., Zhu Y., Fox P. J.(1999). Parallel simulation of pore-scale flow through porous media, Computers and Geotechnics, 25, 227-246.
- [68] Zhu Y., Fox P. J., Morris J. P.(1999). A pore-scale numerical model for flow through porous media, International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics, 23, 881-904.
- [69] Cleary P. W.(1998). Modeling confined multi-material heat and mass flows using

SPH, Applied Mathematical Modeling, 22, 981-993.

[70] Benz, W., & Asphaug, E. (1993). Explicit 3D continuum fracture modeling with smooth particle hydrodynamics. Paper presented at the Lunar and planetary science conference.

[71] Benz W., Asphaug E.(1994). Impact simulations with fracture, I methods and tests, ICARUS, 107, 98-116.

[72] Benz, W., & Asphaug, E. (1995). Simulations of brittle solids using smooth particle hydrodynamics. Computer Physics Communications, 87(1-2), 253-265 .

[73] Zukas J. A. (1982). Impact dynamics, John Wiley & Sons, New York.

[74] Zukas J. A.(1990). High velocity impact, John Wiley & Sons, New York.

[75] Libersky, L. D., & Petschek, A. G. (1991). Smooth particle hydrodynamics with strength of materials Advances in the free-Lagrange method including contributions on adaptive gridding and the smooth particle hydrodynamics method (pp. 248-257): Springer.

[76] Libersky, L. D., Petschek, A. G., Carney, T. C., Hipp, J. R., & Allahdadi, F. A. (1993). High strain Lagrangian hydrodynamics: a three-dimensional SPH code for dynamic material response. Journal of computational Physics, 109(1), 67-75.

[77] Libersky L. D., Randles P. W., Carney T. C. (1995).SPH calculations of fragmentation, Proceedings of the 3rd U. S. Congress on Computational Mechanics, Dallas,TX.

[78] Randles, P., & Libersky, L. D. (1996). Smoothed particle hydrodynamics: some recent improvements and applications. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 139(1-4), 375-408 .

[79] Randles, P., Carney, T., Libersky, L., Renick, J., & Petschek, A. (1995). Calculation of oblique impact and fracture of tungsten cubes using smoothed particle hydrodynamics. International Journal of Impact Engineering, 17(4-6), 661-672

[80] Randles P. W.(1995). SPH calculation of fragmentation in the MK82 bomb, Proceedings of APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter, Seattle, WA.

[81] Johnson G. R., Petersen E. H., Stryk R. A.(1993). Incorporation of an SPH option into the EPIC code for a wide range of high velocity impact computations, International Journal of Impact Engineering, 14, 385-394.

[82] Johnson G. R., Stryk R. A., Beissel S.R.(1996). Interface effects for SPH computations, In Jones N. et al. (eds.) Structures Under Shock and Impact, 285-294.

[83] Johnson G. R., Stryk R.A., Beissel S.R.(1996). SPH for high velocity impact computations, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 139, 347-373.

[84] Swegle J. W., Attaway S. W.,(1995). On the feasibility of using smoothed particle hydrodynamics for underwater explosion calculations, Computational Mechanics, 17, 151-168.

- [85] Liu M. B., Liu G. R., Zong Z., Lam K. Y.(2000). Numerical simulation of underwater explosion by SPH. In Atluri SN & Brust FW (Eds.): Advances in Computational Engineering & Science, 1475-1480.
- [86] Liu M. B., Liu G. R., Lam K. Y.(2002). Investigations into water mitigations using a meshless particle method, Shock Waves 12(3), 181-195.
- [87] Liu, M., Liu, G., & Lam, K. (2003a). Comparative study of the real and artificial detonation models in underwater explosions. Electron Model, 25(2), 113-124 .
- [88] Liu, M., Liu, G., & Lam, K.(2003b). Constructing smoothing functions in smoothed particle hydrodynamics with applications. Journal of Computational and applied Mathematics, 155(2), 263-284 .
- [89] Liu, M., Liu, G., & Lam, K. (2003c). A one-dimensional meshfree particle formulation for simulating shock waves. Shock waves, 13(3), 201-211 .
- [90] Liu M. B., Liu G. R., Zong Z., Lam K. Y.(2003). Computer simulation of the high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology, Computers & Fluids, 32(3), 305-322.
- [91] Liu, M., Liu, G., & Lam, K. (2003c). A one-dimensional meshfree particle formulation for simulating shock waves. Shock waves, 13(3), 201-211 .
- [92] Liu M. B., Liu G. R., Zong Z., Lam K. Y.(2003). Smoothed particle hydrodynamics for numerical simulation of underwater explosions, Computational Mechanics, 30(2), 106-118.
- [93] Anderson, J. D., & Wendt, J.(1995). Computational fluid dynamics (VOL.206). New York: Mc Graw-Hill.
- [94] Gingold, R., & Monaghan, J. (1982). Kernel estimates as a basis for general particle methods in hydrodynamics. Journal of computational Physics, 46(3), 429-453 .
- [95] Speith, R., & Riffert, H. (1999). The viscous gas ring as an astrophysical test problem for a viscous SPH-code. Journal of Computational and Applied Mathematics, 109(1), 231-242.
- [96] Quinlan, N. J., Basa, M., & Lastiwka, M. (2006). Truncation error in mesh-free particle methods. International journal for numerical methods in engineering, 66(13), 2064-2085 .
- [97] Feldman, J. (2006). Dynamic refinement and boundary contact forces in Smoothed Particle Hydrodynamics with applications in fluid flow problems: Swansea University (United Kingdom).
- [98] "http://www.simulia.com," Abaqus,U.M, 2006. [Online].
- [99] Moxnes, J. F., Frøyland, Ø., Skriudalen, S., Prytz, A. K., Teland, J. A., Friis, E., & Ødegårdstuen, G. (2016). On the study of ricochet and penetration in sand ,water and gelatin by spheres, 7.62 mm APM2, and 25 mm projectiles. Defence technology, 12(2), 159-170 .
- [100] Luo, W., Shi, S., Chen, Z., Sun, J., & Wang, W. (2017). Projectile Penetration into Sandy Soil Confined by a Honeycomb-Like Structure. Shock and Vibration, 2017.

Abstract

Buried structures on the soil, which can be used as a safe structure, have an irrefutable role in the discussion of non-operating defense. One of the dangers that threatens these types of structures is the impact of their projectiles and crackdowns and their penetration. Awareness and understanding of the complex subject of the projectile's encounter with various goals has been a matter of interest to researchers and civil engineers. Military applications such as the design of propellant-resistant structures, the design of protective coatings are among the most important applications of this discussion. Investigating the phenomenon of collision and penetration due to the effectiveness of various parameters such as heat transfer and mass transfer, friction, the impact of object geometry and other very complicated cases, has many problems and problems. Investigating the effects of projectile encounter in the past has been carried out by various experiments, but these experiments have determined relative and approximate projectile behavior due to the limitation of facilities and the provision of test conditions. Therefore, the importance of this issue has led to the study of the projectile penetration in sandy soils in numerical order. Analysis of issues with boundaries with constant deformation during problem solving is weak using a network-based method. To solve this problem, commonly used non-networking methods. One of these methods, which is particularly suitable for impact, penetration and failure problems, is the particle hydrodynamic method. In the present study, the influence of the projectile and cracker in sandy soils was investigated. In this study, the effects of angular projectile, soil density, thickness and crack shape have been investigated. For modeling, a non-SPH method has been used and the velocity and displacement diagram of the projectiles and shrouds has been compared. The results of the comparison of these diagrams indicate that the increase in the density and the angle of the supercell decreases the penetration of the projectile. It also increases the penetration into the soil by decreasing the thickness and increasing the crack size.

Keywords: Projectile, Penetration, Grain Soil, Abacus, Particle Particle Hydrodynamic (SPH)



Faculty of Civil Engineering
M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

**Numerical Modelling of penetration of conical projectile in
granular soil**

By: Seyyed Vahid Mousavi

Supervisor:
Dr. Reza Naderi

July 2019