



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد - گرایش ژئوتکنیک

ارزیابی عددی ترانشه‌های عمیق مسلح‌شده تحت انفجار سطحی و عمقی

**Numerical evaluation of deep-reinforced trenches under surface and deep
blasting**

استاد راهنما:

دکتر کلانتری

دکتر قاسم‌زاده

نگارش:

رضا نقی‌پور

۹۸۲۷۱۸۴

شهریور ۱۴۰۱





تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اظهارنامه دانشجو

اینجانب **رضا نقی پور** دانشجوی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک دانشکده

مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه

شده در پایان‌نامه با عنوان:

ارزیابی عددی ترانشه‌های عمیق مسلح شده تحت اثر ضربه و نفوذ و انفجار سطحی و عمقی

با راهنمایی استاد / اساتید محترم جناب آقای دکتر فرزین کلانتری و حسن قاسم‌زاده توسط

شخص اینجانب انجام شده است. صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید

می‌باشد. در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه

گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی

توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب

(فرمت) مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو: رضا نقی پور

تاریخ: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳

حق طبع، نشر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده و استاد / استادان راهنمای آن می باشد. هرگونه تصویربرداری از کل یا بخشی از پایان نامه تنها با موافقت نویسنده یا استاد / استادان راهنما یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.
- ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.
- ۳- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم و همسر عزیزم

به پاس تمامی تلاش‌های بی دریغ و محبت‌آمیزی که در طول تمامی دوران زندگی‌ام انجام داده‌اند.

تقدیر و تشکر

سپاس بیکران از خداوند متعال که در همه مراحل زندگی یاور ما بوده و نعمت‌های بیکران خود را به ما ارزانی نموده است.

وظیفه خود می‌دانم که در ابتدا از اساتید ارجمندم جناب آقای دکتر کلانتری و قاسم‌زاده که انجام این پایان‌نامه بدون مساعدت‌ها و راهنمایی‌های ایشان میسر نبود، کمال تشکر و قدردانی را نمایم.

در ادامه از دکتر رحمتی بابت دوره بسیار مفید آموزش نرم افزار **LS-Dyna** و دکتر کندی بابت راهکارهای راهگشای ایشان در زمینه مدل سازی تشکر و قدردانی می‌نمایم.

در نهایت از کلیه عزیزانی که در انجام هرچه بهتر این پایان‌نامه مرا یاری نمودند تشکر می‌نمایم و از خداوند منان توفیق روز افزون ایشان را خواستارم.

چکیده

پایدارسازی گودهای عمیق تحت اثر بارهای برآمده از ضربه، نفوذ و انفجار یکی از مسائل حائز اهمیت از نظر پدافندی و نظامی می‌باشد به خصوص کشور ایران که سال‌هاست تحت تاثیر حملات تروریستی و نظامی گوناگون است. مسلماً آمادگی برای رویارویی با چنین شرایطی، نیازمند پایدارسازی سازه‌های حیاتی و زیرساخت‌های مهم کشور نظیر راه‌ها، تونل‌ها، خطوط انتقال، ترانشه‌ها و گودها می‌باشد. در نتیجه بررسی تاثیر انفجار بر این سازه‌های حیاتی کشور، امری واجب می‌باشد.

خاک نقش محیط انتقالی بین سازه و محل وقوع انفجار را دارد. از طرفی رفتار انواع خاک‌ها در شرایط دینامیکی متفاوت می‌باشد. لذا بررسی مکانیسم دقیق رفتار انواع خاک‌ها و همچنین شرایط مختلف بارگذاری دینامیکی، نیازمند بررسی دقیق و جامع می‌باشد.

روش نیلینگ و انکراژ از جمله روش‌های پرکاربرد و مطمئن در امر پایدارسازی انواع گودهای می‌باشد. در گودهای عمیق به دلیل جابجایی‌های زیاد گود، از نظر فنی، اجرایی و هزینه نیل و انکر به صورت همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرند تا جابجایی‌ها و تنش‌های بوجود آمده در گود به حداقل برسد.

این پژوهش قصد دارد تا با روش اجزاء محدود و به صورت سه بعدی به کمک الگو سازی در نرم اسلوپ^۱ و ال اس داینا^۲، جابجایی‌های دیواره گود و تنش بوجود آمده در المان‌های تسلیح برای گود مسلح شده به نیل و انکر را در دو بخش، مورد بررسی قرار دهد.

بخش اول ضربه و نفوذ یک موشک ۵۰۰ کیلوگرمی با سرعت برخورد ۳۴۵ متر بر ثانیه در گود مسلح به نیل (مونوبار ساینز ۳۲) و انکر (استرند ۵ رشته‌ای) می‌باشد که در این حالت پارامترهایی که تاثیر آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد

¹ Slop/w

² Ls-Dyna

عبارت‌اند از سرعت پرتابه، چسبندگی خاک، میزان پیش تنیدگی انکرها و فاصله برخورد از راس گود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش چسبندگی خاک، افزایش فاصله محل برخورد از راس گود و کاهش سرعت موشک، باعث کاهش جابجایی‌های دیواره گود می‌شود به طوری که موشک در سنگ نفوذ نمی‌کند و تاثیری در میزان جابجایی گود از جنس سنگ ندارد. کاهش تعداد استرندها از ۵ رشته‌ای به ۳ رشته‌ای نیز باعث افزایش میزان نفوذ موشک در خاک می‌شود.

در بخش دیگر نیز تاثیر انفجار سطحی و عمقی ناشی از انفجار خرج انفجاری TNT روی گود مسلح به نیل (مونوبار ساینز ۳۲) و انکر (استرند ۵ رشته‌ای) می‌باشد که در این حالت پارامترهای مورد بررسی عبارت‌اند از وزن خرج انفجاری، چسبندگی خاک، میزان پیش تنیدگی انکرها و فاصله محل وقوع انفجار از راس گود. در این حالت نیز نتایج نشان می‌دهد که افزایش چسبندگی خاک، افزایش فاصله محل وقوع انفجار از راس گود و کاهش وزن خرج انفجاری، باعث کاهش جابجایی‌ها دیواره گود می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ضربه و نفوذ، انفجار عمقی، انفجار سطحی، ترانشه عمیق، نیل و انکر، Ls-Dyna

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

Contents

۱۲	فهرست جداول
۱۳	فهرست شکل‌ها
۱۴	فصل اول: مقدمه و کلیات
۱۵	۱-۱ مقدمه
۱۶	۲-۱ بیان مسئله
۱۶	۳-۱ هدف پژوهش
۱۷	۴-۱ سوالات پژوهش
۱۷	۵-۱ روش پژوهش
۱۷	۶-۱ ضرورت پژوهش
۱۸	۷-۱ فصل‌بندی پژوهش
۱۹	فصل دوم: مروری بر ادبیات فنی موضوع
۲۰	۱-۲ نفوذ
۲۰	۲-۱-۱ عوامل تأثیرگذار بر نفوذ
۲۳	۲-۱-۲ مکانیزم‌های شکست هدف
۲۵	۲-۲ انفجار
۲۵	۱-۲-۲ انفجار چیست
۲۶	۲-۲-۲ تقسیم‌بندی موج ناشی از انفجار
۲۶	۳-۲-۲ دسته‌بندی بارگذاری انفجار
۳۲	۳-۲ روش تسلیح گود

۳۲	۱-۳-۲ مکانیزم عملکرد نیل و انکر
۳۳	۲-۳-۲ روش ترکیبی میخ‌کوبی و انکر
۳۵	۳-۳-۲ مبارکی و واقفی (۲۰۱۵)
۳۵	۴-۳-۲ تیواری و همکاران (۲۰۱۴)
۳۵	۵-۳-۲ یانگ و همکاران (۲۰۱۰)
۳۶	۶-۳-۲ بیبو و همکاران (۲۰۰۸)
۳۶	۷-۳-۲ ضمیران و همکاران (۲۰۱۲)
۳۶	۸-۳-۲ ما و همکاران (۲۰۱۳)
۳۷	۹-۳-۲ یی و همکاران (۲۰۱۹)
۳۷	۱۰-۳-۲ حسینی و منافی (۲۰۲۱)
۳۹	۴-۲ تحقیقات تأثیر انفجار در ترانشه‌ها و گودبرداری‌ها
۳۹	۱-۴-۲ یوگندراکومر و همکاران (۱۹۹۲)
۳۹	۲-۴-۲ چو و همکاران (۲۰۰۰)
۳۹	۳-۴-۲ بازیار و همکاران
۴۲	۴-۴-۲ سورانی و همکاران (۲۰۲۰)
۴۳	۵-۲ تحقیقات صورت گرفته در ارتباط با تأثیر ضربه و نفوذ در سنگ، بتن، بتن-خاک و فولاد
۴۳	۱-۵-۲ لو و شن (۲۰۰۶)
۴۴	۲-۵-۲ ژائو و همکاران (۲۰۱۷)
۴۴	۳-۵-۲ هو و همکاران (۲۰۱۷)
۴۴	۶-۲ نتیجه‌گیری
۴۵	فصل سوم: معرفی نرم‌افزار
۴۵	LS-DYNA و SLOP به همراه صحت‌سنجی
۴۶	۱-۳ مقدمه
۴۶	۲-۳ معرفی نرم افزارها
۴۶	۱-۲-۳ نرم افزار GEOSLOPE
۴۹	۲-۲-۳ نرم افزار LS-DYNA
۵۰	۳-۳ صحت سنجی
۶۴	۴-۳ صحت سنجی دوم (استاتیکی)
۶۸	۵-۳ نتیجه
۶۸	۵-۳ صحت سنجی سوم (دینامیکی)
۷۳	فصل چهارم: روش تحقیق، مدل سازی و تحلیل نتایج
۷۴	۱-۴ مقدمه
۷۴	۲-۴ مفاهیم و اصطلاحات
۷۴	۱-۲-۴ روشهای عددی شبکه‌محور
۷۷	۲-۲-۴ روش عددی لاگرانژی اویلری دلخواه (ALE)
۷۸	۳-۴ مدل سازی استاتیکی
۷۹	۱-۳-۴ مدل سازی در اسلپ و تحلیل استاتیکی و شبه‌استاتیکی
۸۴	۲-۳-۴ مدل سازی استاتیکی در LS-DYNA
۹۱	۴-۴ مدل سازی دینامیکی

۹۱	۲-۴-۴ هندسه مدل
۹۷	۴-۴-۴ مش‌بندی و شرایط تقید
۹۹	۵-۴ مدل سازی انفجار سطحی و عمقی
۱۰۰	۱-۵-۴ هندسه خاک و TNT و هوا
۱۰۴	۳-۵-۴ فشار ناشی از انفجار
۱۰۶	۶-۴ خروجی ها
۱۰۶	۱-۶-۴ بررسی خروجی ضربه و نفوذ
۱۱۸	۲-۶-۴ بررسی خروجی انفجار عمقی
۱۲۵	۳-۶-۴ بررسی خروجی انفجار سطحی
۱۲۹	فصل ۵: جمع‌بندی و پیشنهادها
۱۳۰	۵-۱ ضربه و نفوذ
۱۳۱	۵-۲ انفجار عمقی
۱۳۲	۵-۳ انفجار سطحی
۱۳۲	۵-۴ جمع‌بندی
۱۳۲	۵-۵ پیشنهادها
۱۳۴	فصل ۶: منابع
۱۳۵	۱-۶ منابع

فهرست جداول

صفحه	عنوان

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

فصل اول: مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

از جمله بحث‌های مطرح در حیطه ژئوتکنیک و بحث‌های اجرایی، پایداری سازی ترانشه‌های عمیق در شرایط گوناگون می‌باشد و سالانه نتایج تحقیقات و مطالعات در این زمینه به صورت مقالات و کتب، منتشر می‌شود. به کارگیری فضاهای زیرزمینی یک امر حیاتی در مباحث پدافند غیرعامل محسوب می‌شود. به دلیل گسترش روزافزون حملات تروریستی و در نتیجه خسارات جانی و اقتصادی برآمده از اثر ضربه، نفوذ و انفجار بر روی سازه‌های حیاتی و مهم کشور نیاز است تا بررسی دقیقی درباره پایداری و قابلیت خدمت رسانی سازه‌های مهم بعد از انفجار صورت پذیرد. به طور کلی دو نوع بارگذاری بر سازه داریم: استاتیکی و دینامیکی که بارگذاری برآمده از انفجار از جمله بارگذاری‌های دینامیکی می‌باشد که در زمان چند هزارم ثانیه نیرویی عظیم به سازه‌های روی زمین و زیر زمین وارد می‌کند. به دلیل بزرگ بودن مقادیر کرنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در اثر انفجار، تحلیل‌های غیر خطی و نرم افزارهای عددی نظیر اجزای محدود دوبعدی یا سه بعدی اجتناب ناپذیر است. امروزه به دلیل افزایش تراکم شهری، ساخت و ساز سازه‌های بلند در کلان شهرها و همچنین اهمیت سازه‌ها و فضاهای زیرزمینی در زمینه مباحث نظامی و پدافند غیرعامل، بکارگیری ترانشه‌های عمیق را امری اجتناب ناپذیر می‌کند. اما بکارگیری گودهای عمیق با یک سیستم پایداری قدرتمند و کارا نیز امری اجتناب ناپذیر است.

برای در نظر گرفتن پدافند غیرعامل، علاوه بر پایداری استاتیکی در حالت دینامیکی (انفجار) نیز نیاز به پایداری سازی گود می‌باشد که بعضاً چند سیستم به صورت همزمان و ترکیبی جهت پایداری سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بر پایه مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان، روش‌های مختلفی جهت پایداری سازی ترانشه‌ها و گودبرداری‌ها وجود دارد از جمله: ایجاد شیب پایدار، میخکوبی^۳ یا اجرای میل مهار، دیوارهای مهار شده با تیرک از جلو، دیوارهای مهار شده با میل مهار از پشت، نگهداری ساختمان مجاور گود با تیرک یا پی بندی با رعایت کلیه موارد فنی، استفاده از سیستم‌های مهار خرابایی، استفاده از سیستم‌های شمع‌ها و دیوارک‌های طره‌ای.

³ Nailing

سیستم نیلینگ یکی از محبوب‌ترین روش‌های پایدارسازی می‌باشد که بکارگیری آن از حدود سه دهه اخیر رایج شده است. تاریخچه استفاده از این سیستم مربوط به روش‌های تونل زنی در استرالیا می‌باشد. پس از آن در موارد گوناگونی از قبیل پایدارسازی خاک‌های سست، گودبرداری‌های با عمق‌های گوناگون، ترانشه‌های جاده‌ای و پایداری شیب‌های تند نزدیک خطوط راه آهن مورد استفاده قرار گرفت [۱].

سیستم انکر^۴ یا کابل‌های مهاری هم، مانند سیستم نیلینگ است با این تفاوت که انکرها در حالت محرک^۵ و نیل‌ها در حالت مقاوم^۶ عمل می‌نمایند. برای به کار افتادن نیل‌ها نیازمند جابجایی خاک هستیم در حالی که انکر را با یک نیرویی پس کشیده می‌کنیم و دیگر نیازی به جابجایی خاک جهت به کار افتادن انکر نیست.

۱-۲ بیان مسئله

از دیرباز تا کنون همواره بشر به دنبال ابداع راهی بود تا خود و تجهیزاتش را از گزند حوادث و بلایا مصون نگه دارد یا کمتر دچار آسیب شود. موضوع ضربه، نفوذ و انفجار از مباحث حائز اهمیت در مسائل پدافندی و بویژه حفظ و نگهداری از سازه‌های زیر زمینی می‌باشد. این پژوهش با مدل سازی سه بعدی گود عمیق تحت تأثیر ضربه، نفوذ و انفجار، تأثیر این شرایط دینامیکی را جابجایی‌های دیواره گود مورد بررسی قرار می‌دهد.

۱-۳ هدف پژوهش

هدف از انجام این پژوهش در بخش اول بررسی تأثیر بارهای دینامیکی ناشی از ضربه و نفوذ یک موشک ۵۰۰ کیلوگرمی با سرعت برخورد ۳۴۵ و ۱۰۰۰ متر بر ثانیه بر جابجایی‌های دیواره گود مسلح به روش ترکیبی نیل (مونوبار سایز ۳۲) و انکر (استرند ۵ رشته‌ای) در انواع خاک‌ها از ماسه خشک تا سنگ می‌باشد. در بخش دیگر، اثرات موج انفجار ناشی از انفجار سطحی و عمقی با خرج انفجاری ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم TNT روی گود مسلح شده با نیل (مونوبار سایز ۳۲) و انکر (استرند ۵ رشته‌ای) در فواصل ۱۵، ۳۰ و ۴۵ متر از راس گود بررسی می‌گردد.

⁴ Anchor

⁵ Active

⁶ Passive

۴-۱ سوالات پژوهش

مکان برخورد پرتابه و ضربه چقدر در میزان جابجایی‌ها تأثیرگذار است؟

خواص مکانیکی سنگ چه میزان در جابجایی‌ها اهمیت دارد؟

تسلیم گود چه سهمی در کاهش جابجایی‌های گود دارد؟

میزان پیش تنیدگی انکرها چه تاثیری در در مقدار نفوذ موشک در خاک دارد؟

چسبندگی خاک چه اهمیتی در کاهش یا افزایش جابجایی دیواره گود دارد؟

۵-۱ روش پژوهش

در ابتدا از مدل عددی صحت سنجی استاتیکی می‌کنیم تا از درستی مدل سازی مطلع شویم. سپس به تعریف مدل مورد نظر می‌پردازیم اما پیش از آغاز مدل سازی دینامیکی، یک اجرای استاتیکی از مدل گرفته تا جابجایی‌های گود را با رواداری‌های مجاز آئین نامه مقایسه کنیم و صحت مدل مجدد کنترل شود.

۶-۱ ضرورت پژوهش

مواردی که امروزه برای سازه‌های روزمینی و زیرزمینی بررسی می‌شود، پدافند غیرعامل در سازه است. در شرایط انفجار، سازه‌های زیرزمینی نظیر تونل‌ها و پناهگاه‌ها که از سازه‌های مهم کشور محسوب می‌شوند، بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه برای احداث چنین سازه‌های مهم زیرزمینی و سازه‌های بلند، نیاز به حفاری‌ها و ترانشه‌های عمیق می‌باشد، لذا پایدارسازی این ترانشه‌ها امری بسیار راهبردی در زمینه پدافند غیرعامل می‌باشد. امروزه نیز با گسترش روز افزون حملات تروریستی و خرابکاری‌های برآمده از انفجارها، خسارات جانی و مالی فراوانی را برای کشور پدید می‌آورد. در نتیجه لازم است سازه‌های مهم و راهبردی کشور در برابر این خطرات احتمالی مقاوم شده تا کمترین خسارات را متحمل شود.

پژوهش‌های متعددی در زمینه انفجار در انواع سازه‌های مدفون در خاک و محدود پژوهشی در زمینه تاثیر انفجار بر گود مسلح صورت گرفته است. حال آنکه گودهای شهری و غیرشهری فراوانی در کشور وجود دارد که بررسی تاثیر پارامترهای مختلف در پایداری گود، امری اجتناب ناپذیر است، لذا برای درک جامع از رفتار گودها در برابر انواع شرایط دینامیکی، بررسی دقیق محیط‌های خاکی، امری ضروری می‌باشد.

۷-۱ فصل‌بندی پژوهش

این پژوهش به طور کلی شامل ۴ فصل می‌باشد:

فصل دوم مروری بر ادبیات فنی موضوع می‌باشد که در این فصل تلاش شده است تا درباره مکانیزم عملکرد سیستم پایدارسازی ترکیبی نیل و انکر، پدیده انفجار و انتشار موج ناشی از آن در خاک مطالبی گردآوری شود. در فصل سوم به بررسی نرم افزار ال اس داینا و اسلوپ پرداخته شده و همچنین ۲ صحت سنجی استاتیکی و ۱ صحت سنجی دینامیکی جهت اطمینان از صحت نتایج آورده شده‌است. در فصل چهارم مدل سازی ضربه، نفوذ و انفجار سطحی و عمقی بر روی گود مسلح به نیل و انکر انجام و به بررسی تاثیر بارگذاری دینامیکی روی جابجایی-های دیواره گود پرداخته شده‌است. در فصل پنجم با جمع‌بندی و مقایسه نتایج مختلف تاثیرگذار ترین پارامترها مشخص شده و همچنین پیشنهادهایی در ارتباط با پژوهش‌های آتی پیرو این موضوع ارائه می‌گردد.

فصل دوم: مروری بر ادبیات فنی

موضوع

۲-۱ نفوذ

نفوذ موشک در خاک یک فرآیند پیچیده مکانیکی است که پژوهش‌های گسترده‌ای در ارتباط با آن صورت گرفته است که اولین پژوهش‌ها مربوط به فارستال^۷ و رابطه تحلیلی نفوذ آن می‌باشد [۲]. به دنبال پیشرفت در زمینه ساخت انواع موشک‌های جدید، پژوهش در افزایش اطلاعات در این زمینه امری اجتناب ناپذیر گشته 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 موشک‌ها و مطالعاتی که در گذشته در این زمینه رخ داده پرداخته می‌شود.

۲-۱-۱ عوامل تاثیرگذار بر نفوذ

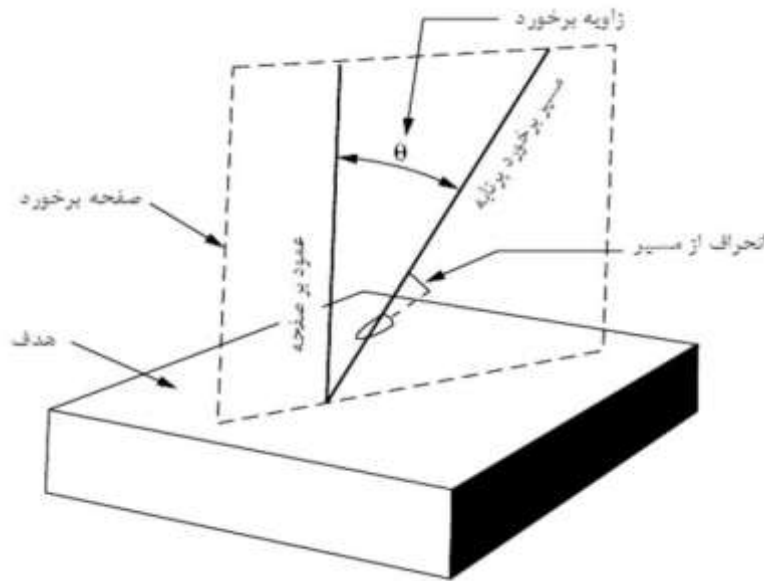
در بخش نفوذ، سه مرحله‌ی زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند [۳]:

(۱) ضربه

(۲) عبور موشک از میان محیط انتقالی

(۳) شرایط بعد از نفوذ

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



شکل نحوه برخورد موشک به هدف [۴]

پارامترهای موثر در بحث نفوذ که مختص موشک هستند عبارت‌اند از جنس موشک، قطر، دماغه، وزن موشک، خواص مکانیکی موشک، سرعت برخورد موشک با هدف، نسبت طول به قطر موشک و زاویه برخورد آن با هدف.

الف) جنس موشک: از نظر جنس، موشک به دو گروه تقسیم می‌شوند:

موشک صلب^۸: معمولاً در آن‌ها از آلیاژهای با سختی زیاد استفاده می‌شود.

موشک شکل‌پذیر^۹: این موشک‌ها از آلومینیوم، فولاد، مس و از این قبیل فلزات ساخته می‌شود.

ب) دماغه موشک: دماغه موشک، 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. هرچقدر دماغه‌ی موشک تخت‌تر باشد در هنگام برخورد تغییر شکل بیشتری خواهد داشت و مقاومت آن کمتر می‌شود. برعکس این موضوع موشک‌های مخروطی هستند، که با تغییر شکل کمتر، نفوذ می‌کنند. در سرعت‌های کمتر از تسلیم دینامیکی موشک، هر چه دماغه موشک تخت‌تر باشد سرعت حد بالستیک یعنی حداقل سرعت لازم جهت ایجاد

⁸ Rigid

⁹ Deformable

نفوذ کامل بیشتر خواهد بود و در سرعت‌های بیشتر از حد تسلیم دینامیکی موشک، دماغه اثر ناچیزی در سرعت حد بالستیک دارد. انواع شکل دماغه موشک عبارت‌اند از:

موشک با دماغه نیمکره^{۱۰}

موشک با دماغه مخروطی^{۱۱}

موشک با دماغه نوک‌تیز^{۱۲}

موشک با دماغه تخت^{۱۳}

پ) نسبت طول به قطر پرتابه (L/D): افزایش این پارامتر سبب کاهش سرعت حد بالستیک می‌گردد و بر این اساس موشک‌ها به دو گروه عمده تقسیم می‌گردند:

۱) موشک بلند ($L/D \gg 1$)

۲) موشک کوتاه ($L/D \sim 1$)

■ 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 موشک 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 موشک باشد، آن را ضخیم می‌نامند.

هدف متوسط هدفی است که سطح پشتی آن در تمام طول فرآیند نفوذ، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی تغییر شکل دارد. چنانچه ضخامت هدف در حدود قطر موشک باشد، آن را هدف متوسط می‌نامند. هدف نازک هدفی است که تغییرات تنش و گرادیان تغییر شکل در ضخامت وجود نداشته باشد. (عموماً وقتی ضخامت هدف از قطر موشک کوچک‌تر است، هدف نازک در نظر گرفته می‌شود).

¹⁰ Hemispherical

¹¹ Conical

¹² ogive

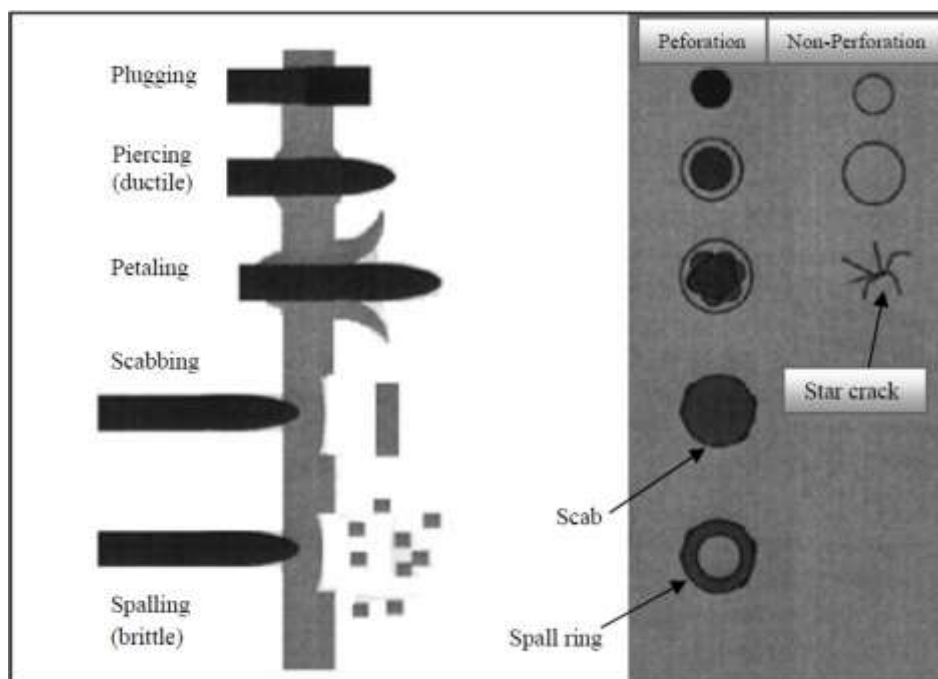
¹³ Blunt

□ جنس هدف

از جمله پارامترهای تاثیرگذار 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 می‌شود. از جمله جنس‌های متداول برای هدف می‌توان به فلزات، بتن، خاک، سرامیک و مواد کامپوزیت اشاره کرد.

۲-۱-۲ مکانیزم‌های شکست هدف

در هدف‌های ضخیم نفوذ پرتابه به شکل ایجاد حفره صورت می‌پذیرد ولی در مورد هدف‌های نازک و متوسط، موشک می‌تواند به‌طور کامل در هدف نفوذ نماید و بسته به شکل نوک موشک، جنس و ضخامت هدف و حدود سرعت برخورد، مکانیزم شکست از حالتی به حالت دیگر تغییر می‌کند. در زیر نمونه مکانیزم‌های شکست آورده شده است [۵].



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^{۱۴} (به جریان یافتن مواد سر موشک پس از برخورد آن به هدف، در جهت شعاعی و افزایش سطح مقطع پرتابه گویند) آن و عمیق‌تر شدن حفره می‌گردد. اگر انهدام قارچی موشک کمتر باشد، عمق نفوذ بیشتر می‌شود، اما در صورت بیشتر شدن انهدام، حفره پهن‌تر و عمق آن کمتر می‌شود.

□ پلاگینگ^{۱۵} (ترک مخروطی)

در اثر برخورد موشک با دماغه پهن باهدف نسبتاً سخت و دارای ضخامتی در حدود قطر موشک، قسمتی از هدف که پلاگ^{۱۶} نامیده می‌شود از آن جدا شده و همراه موشک به سمت جلو رانده می‌شود. این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که جریان شعاعی مواد کم باشد و مواد جلوی موشک به سمت جلو فشرده شده و برش ایجاد گردد. تخت بودن نوک موشک و سختی هدف، جریان شعاعی ماده هدف را کاهش می‌دهد.

□ پتالینگ^{۱۷} یا گلبرگی شدن

در اثر نفوذ موشک در هدف‌های نرم ضخیم، جریان مواد هدف در خلاف جهت حرکت موشک می‌تواند منجر به تشکیل حالت گلبرگی در جلوی هدف گردد. همچنین وقتی موشک نوک‌تیز به هدف نرم 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 خم‌شدگی به سمت عقب اتفاق می‌افتد.

¹⁴ Mushrooming

¹⁵ Plugging

¹⁶ Plug

¹⁷ Petaling

□ اسکبینگ^{۱۸} (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 گیریکنواخت که در عرض ضربه قرار دارد اتفاق می‌افتد.

□ اسپالینگ^{۱۹} (تکه تکه شدن)

یکی از متداول‌ترین 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.

□ خردشدگی^{۲۰}

این شکست در اثر برخورد باهدف ترد ایجاد می‌شود و ترکش‌های ایجادشده در اثر شکست هدف، خود می‌تواند مانند موشک عمل نموده و در هدف‌های دیگر نفوذ نماید.

□ شکست نرم یا گسترش حفره نرم^{۲۱}

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

۲-۲ انفجار

۱-۲-۲ انفجار ۲۲ چیست

به واکنشی گفته می‌شود که طی آن سرعت نرخ سوختن ماده از سرعت صوت بیشتر باشد که باعث پدید آمدن گرادیان دما و فشار بسیار بالا به همراه موج شوک^{۲۳} می‌شود.

¹⁸ Scabbing

¹⁹ Spalling

²⁰ Fragmentation

²¹ Ductil Hole Enlargement

²² Blast

²³ Shock Wave