

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الهِ،!

حقّ محمد و آل محمد بر ما عظیم است؛ «اللّهم صلّ



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی

اثر انفجار سطحی بر تونل در محیط‌های لایه‌ای غیراشباع

تحقیق و تدوین :

دانیال شینی دشت‌گلی

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم‌زاده

اردیبهشت ۱۳۹۲

تقدیم بہ محترم :

کہ سایہ مہربانیش سایہ سار زندگی می باشد

او کہ اسوہ صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را بر ایم
تسہیل نمود.

چکیده

امروزه لزوم توجه به پدافند غیرعامل بر هیچ کس پوشیده نیست. به خصوص در کشور استراتژیکی چون ایران، که سالهاست آماج حملات و تهدیدات گوناگون نظامی و تروریستی می‌باشد. مسلم است که بقاء جامعه در گرو فائق آمدن بر این تهدیدها و محافظت از کشور است. از جمله مواردی که در این بین حفاظت از آن‌ها ضروری می‌باشد، شریان‌های حیاتی است.

شریان‌های حیاتی شامل راه‌ها، پل‌ها، تونل‌ها، خطوط انتقال و همچنین شبکه‌های مخابراتی و رسانه‌ای می‌باشند. تونل‌ها از جمله سازه‌هایی هستند که به هنگام تهدیدهای نظامی می‌توانند به عنوان پناهگاه مورد استفاده قرار بگیرند، لذا بررسی اثرات پدیده انفجار بر این گونه سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

بررسی محیط‌های خاکی نیز به عنوان ناحیه انتقالی بین محل وقوع انفجار و سازه خود مستلزم بررسی‌های همه جانبه در این مورد است. خاک‌ها در طبیعت به حالت اشباع و غیر اشباع و خشک وجود دارند. مکانیزم رفتاری متفاوت خاک‌های غیر اشباع بررسی دقیق‌تر مدل سازی این گونه از خاک‌ها را ضروری می‌کند.

در این تحقیق اثر انفجار سطحی بر روی تونل مورد بررسی قرار گرفته است. در بخشی از تحقیق پیش رو ابتدا اثر انفجار بر تونل در خاک خشک و اشباع با استفاده از نرم افزار اجزا محدود Plaxis Professional 8/5 بررسی گردیده است. تأثیر پارامترهای مختلف موثر همچون تراز سفره آب زیرزمینی، مدول الاستیسیته خاک و بتن، ضخامت پوشش بتنی، چسبندگی خاک و برخی دیگر از پارامترهای مهم در مسئله مورد توجه بوده و نتایج برای خاک خشک و اشباع ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد آب به عنوان عامل تشدید کننده تغییر مکان تاج تونل، نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ضمن آنکه با افزایش مدول الاستیسیته خاک و بتن و افزایش چسبندگی، تغییر مکان تاج تونل رو به کاهش خواهد بود.

در بخش دیگری از این تحقیق به بررسی تحلیلی اثرات موج برشی ناشی از انفجار سطحی در محیط‌های غیر اشباع ماسه‌ای بر تونل پرداخته شده است. برای حل مسئله از روش شبه استاتیکی استفاده گردیده است. سپس با به‌کارگیری تأثیرات درجه اشباع بر مدول برشی خاک‌ها، با به‌کارگیری نرم افزار Plaxis، برآوردی از نتایج در خاک‌های لایه ای غیر اشباع حاصل گشته است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش درجه اشباع، تنش‌های درونی تونل افزایش یافته و سبب بروز تغییر شکل‌های بزرگتر می‌شود. حضور آب از آنجا که سبب کاهش مدول برشی خاک می‌گردد باعث می‌شود تغییر شکل‌های بزرگتری در تونل به وجود آید.

فهرست

۱- مقدمه..... ۱

۱-۱- تعریف موضوع ۱

۱-۲- اهمیت موضوع	۱
۱-۳- مراحل تحقیق	۲
۱-۴- شرح فصول	۲
۲- مروری بر ادبیات فنی موضوع..... ۴	
۲-۱- تحلیل حوزه ی آزاد انفجار سطحی و مدفون.....	۴
۲-۱-۱- تعریف انفجار.....	۴
۲-۱-۲- موج انفجار.....	۴
۲-۱-۳- اهمیت بررسی پدیده انفجار.....	۵
۲-۱-۴- انواع بارگذاری انفجار.....	۵
۲-۱-۵- پارامترهای موج انفجار.....	۷
۲-۱-۶- انواع انفجار از نظر ماهیت.....	۹
۲-۱-۷- معادل سازی مواد منفجره با تی ان تی.....	۱۳
۲-۱-۸- قوانین مقیاس انفجار.....	۱۴
۲-۱-۹- پروفیل فشار موج.....	۱۷
۲-۱-۱۰- گودال ناشی از انفجار.....	۱۷
۲-۱-۱۱- گسترش موج انفجار در خاک.....	۲۰
۲-۱-۱۲- فشارهای ناشی از انفجار در خاک (محیط نامحدود).....	۲۰
۲-۱-۱۳- تجزیه ی انرژی موج در مرزها.....	۲۱
۲-۱-۱۴- اثر آب و درصد هوا در گسترش موج انفجار.....	۲۲
۲-۱-۱۵- فشار انفجار بر حسب هوای موجود در خاک.....	۲۴
۲-۱-۱۶- فشار بیشینه ی حوزه ی آزاد.....	۲۵
۲-۲- روش های دینامیکی.....	۲۸
۲-۲-۱- روش های عددی مانند روش اجزای محدود FEM و روش تفاضل محدود FDM در محدوده فرکانس یا زمانی.....	۲۸
۲-۲-۲- روش تغییر شکل های میدان آزاد.....	۲۹
۲-۲-۳- تغییر شکل بیضوی تونل های دایره ای تحت بارگذاری لرزه ای.....	۲۹
۲-۲-۴- حل حالت بسته برای آنالیز شبه استاتیکی ساده شده با در نظر گرفتن اندر کنش.....	۳۲
۲-۲-۵- روشی دیگر برای حل تحلیلی تغییر شکل های بیضوی تونل های دایره ای.....	۳۵

۴۲	۲-۳- اثر انتشار موج بر سازه های زیرزمینی
۴۳	۲-۳-۱ مطالعات عددی
۴۴	۲-۳-۲ مطالعات آزمایشگاهی (کوچک مقیاس)
۴۷	۲-۳-۳ مطالعات میدانی (بزرگ مقیاس)

۳- آشنایی با نرم افزار Plaxis ۴۹

۴۹	۳-۱ مقدمه
۴۹	۳-۲ معادله اساسی رفتار دینامیکی
۵۰	۳-۳ به کار بستن طرح انتگرال در Plaxis
۵۱	۳-۴ سرعت های موج
۵۲	۳-۵ مرز های مدل
۵۲	۳-۶ صحت سنجی نرم افزار

۴- اثر انفجار بر تونل در خاک های خشک و اشباع ۵۷

۵۷	۴-۱ مقدمه
۵۷	۴-۲ مشخصات مسئله
۵۸	۴-۳ بارگذاری
۶۰	۴-۴ تراز سفره آب زیرزمینی
۶۰	۴-۵ نتایج
۶۰	۴-۵-۱ کنترل تنش و تغییر مکان
۶۴	۴-۵-۲ بررسی اثر تراز آب بر تونل
۶۵	۴-۵-۳ ضخامت پوشش بتنی
۶۷	۴-۵-۴ مدول الاستیسیته بتن
۶۷	۴-۵-۵ مدول الاستیسیته خاک
۶۹	۴-۵-۶ اثر چسبندگی خاک

۵- فصل پنجم ۷۴

۷۴	.....	۵-۱- اثر انفجار بر تونل در ماسه غیر اشباع
۷۴	.....	۵-۱-۱- محاسبه سرعت ذرات در خاک‌های ماسه ای غیر اشباع
۷۵	.....	۵-۱-۲- سرعت موج برشی در خاک
۷۹	.....	۵-۱-۳- پارامتر های مدل
۸۲	.....	۵-۱-۴- محاسبه سرعت موج برشی در ماسه
۸۵	.....	۵-۱-۵- روابط طراحی لرزه ای
۸۹	.....	۵-۱-۶- محاسبه جابه جایی تونل با روش Joseph Penzien (2000)
۹۳	.....	۵-۲- اثر انفجار بر تونل در ماسه لایه ای

۶- نتیجه گیری و پیشنهادها ۹۹

۹۹	.....	۶-۱- نتیجه گیری
۱۰۰	.....	۶-۲- پیشنهادها

۷- مراجع ۱۰۳

فهرست اشکال

۷	.....	شکل ۱-۲: جبهه ی موج نیم کروی در انفجار سطحی
۹	.....	شکل ۲-۲: موج انفجار ایده آل
۱۰	.....	شکل ۳-۲: انفجار فیزیکی
۱۰	.....	شکل ۴-۲: انفجار شیمیایی
۱۰	.....	شکل ۵-۲: انفجار هسته ای

- شکل ۶-۲: پارامترهای موج انفجار کره‌ای شکل، در سطح آزاد دریا (TM5-1300 (1969)، [۲] ۱۲
- شکل ۷-۲: پارامترهای موج انفجار نیمکره‌ای شکل، در سطح آزاد دریا (TM5-1300 (1969)، [۲] ۱۳
- شکل ۸-۲: قانون هاپکینسون ۱۶
- شکل ۹-۲: چال انفجار ۱۷
- شکل ۱۰-۲: گودال ظاهری ۱۸
- شکل ۱۱-۲: گودال واقعی ۱۸
- شکل ۱۲-۲: پارامترهای چال انفجار ۲۰
- شکل ۱۳-۲: مدل رفتاری سه فازهی خاک وانگ، برای بار انفجار ۲۴
- شکل ۱۴-۲: اثر درصد هوا بر ضربه ناشی از انفجار ۲۵
- شکل ۱۵-۲: ضریب جفت کنندگی ۲۶
- شکل ۱۶-۲: اعوجاج برشی میدان آزاد زمین حفاری شده و نشده در شکل دایره ای ۳۱
- شکل ۱۷-۲: وضعیت تنش اطراف تونل و تغییر شکل برشی خالص ۳۳
- شکل ۱۸-۲: نیروهای داخلی پوسته استوانه ای ۳۳
- شکل ۱۹-۲: نیروها و ممان های حاصل از امواج لرزه ای. a: نیروها و ممان های حاصل از انتشار امواج در امتداد محور تونل، b: نیروها و ممان های محیطی حاصل از انتشار امواج عمود بر محور تونل ۳۷
- شکل ۲۰-۲: ضریب پاسخ پوشش تونل در مقابل نسبت انعطاف پذیری در شرایط لغزش کامل و تونل دایره‌ای ۳۸
- شکل ۲۱-۲: ضریب پاسخ پوشش تونل در مقابل نسبت فشردگی در شرایط عدم لغزش کامل در سطح مشترک و تونل دایره ای ۴۰
- شکل ۲۲-۲: سانتریفیوژ ۴۵
- شکل ۲۳-۲: نمودار کرنش - زمان [۸] ۴۶
- شکل ۲۴-۲: نمودار کرنش - زمان هنگام به کار گیری ژئوفوم [۸] ۴۶
- شکل ۲۵-۲: اثرات مقدار ماده منفجره بر کرنش محوری اندازه گیری شده در یک چهارم دهانه تونل ۴۷
- شکل ۱-۳: شماتیک مدلسازی سانتریفیوژ [۸] ۵۳
- شکل ۲-۳: نمودار کرنش - زمان [۸] ۵۴
- شکل ۳-۳: منحنی بارگذاری صحت سنجی ۵۵
- شکل ۴-۳: نمودار کرنش - زمان ناشی از مدل صحت سنجی ۵۵
- شکل ۱-۴: نمایی از هندسه کلی مدل ۵۷
- شکل ۲-۴: رابطه بین b و Z ۵۹
- شکل ۳-۴: پروفیل موج فشاری به کار رفته در تحلیل عددی ۵۹
- شکل ۴-۴: تراز آب در عمق ۱۰ متری از سطح زمین ۶۰
- شکل ۵-۴: فشار آب حفره ای اولیه در خاک ۶۱
- شکل ۶-۴: تنش موثر اولیه در خاک ۶۱
- شکل ۷-۴: تراز آب در سطح زمین ۶۲
- شکل ۸-۴: فشار آب حفره ای اولیه در خاک ۶۲
- شکل ۹-۴: تنش موثر اولیه قبل از حفاری در خاک ۶۳
- شکل ۱۰-۴: شمایی از تغییر شکل‌های قائم پس از حفاری و نصب پوشش بتن ۶۳

- شکل ۴-۱۱: تغییر مکان قائم بعد از اعمال بار انفجار در خاک کاملاً اشباع ۶۴
- شکل ۴-۱۲: اثر تراز آب زیر زمینی بر تغییر مکان تاج تونل ۶۵
- شکل ۴-۱۳: تاریخچه تغییر مکان تاج تونل به ازای تغییرات ضخامت پوشش بتنی ۶۶
- شکل ۴-۱۴: حداکثر جابه‌جایی تاج تونل در خاک خشک و اشباع با تغییرات ضخامت پوشش بتنی ۶۶
- شکل ۴-۱۵: حداکثر جابه‌جایی تاج تونل در خاک خشک و اشباع با تغییرات مدول الاستیسیته بتن ۶۷
- شکل ۴-۱۶: تاریخچه تغییر مکان تاج تونل در خاک اشباع با تغییرات مدول الاستیسیته خاک ۶۸
- شکل ۴-۱۷: حداکثر جابه‌جایی تاج تونل در خاک خشک و اشباع با تغییرات مدول الاستیسیته خاک ۶۹
- شکل ۴-۱۸: تاریخچه تغییرات جابه‌جایی تاج تونل در خاک اشباع با تغییرات چسبندگی خاک ۷۰
- شکل ۴-۱۹: حداکثر جابه‌جایی تاج تونل در خاک خشک و اشباع با تغییرات چسبندگی خاک ۷۰
- شکل ۴-۲۰: اثر چسبندگی خاک اشباع بر زمان وقوع حداکثر تغییر مکان تاج تونل ۷۱
- شکل ۵-۱: تغییرات سرعت موج برشی با درجه اشباع در ماسه ۸۴
- شکل ۵-۲: نتایج نیروی محوری حاصله در تونل با استفاده از حل فرم بسته در حالت عدم لغزش بین تونل و خاک پیرامونی ۸۶
- شکل ۵-۳: نتایج لنگر خمشی حاصله در تونل با استفاده از حل فرم بسته در حالت عدم لغزش بین تونل و خاک پیرامونی ۸۶
- شکل ۵-۴: نتایج نیروی محوری حاصله در تونل با استفاده از حل فرم بسته در حالت لغزش کامل بین تونل و خاک پیرامونی ... ۸۷
- شکل ۵-۵: نتایج لنگر خمشی حاصله در تونل با استفاده از حل فرم بسته در حالت لغزش کامل بین تونل و خاک پیرامونی ۸۷
- شکل ۵-۶: تغییرات نیروی محوری در مقابل ضریب انعطاف پذیری در حالت لغزش کامل ۸۸
- شکل ۵-۷: تغییرات نیروی محوری در مقابل ضریب انعطاف پذیری در حالت لغزش کامل ۸۹
- شکل ۵-۸: اثر تغییرات مدول الاستیسیته بتن بر تغییر مکان حداکثر تاج تونل ۹۰
- شکل ۵-۹: اثر تغییرات قطر تونل بر تغییر مکان حداکثر تاج تونل ۹۱
- شکل ۵-۱۰: اثر تغییرات ضخامت پوشش بتن بر تغییر مکان حداکثر تاج تونل ۹۱
- شکل ۵-۱۱: تغییرات سرعت موج برشی در خاک با درجه اشباع برای خاک‌های مختلف ۹۲
- شکل ۵-۱۲: اثر تغییرات مدول برشی خاک بر تغییر مکان حداکثر تاج تونل ۹۲
- شکل ۵-۱۳: تاریخچه تغییر مکان تاج تونل، ناشی از بار انفجار با حضور لایه ۵ متری ماسه غیر اشباع ۹۴
- شکل ۵-۱۴: تغییر مکان حداکثر تاج تونل، ناشی از بار انفجار با حضور لایه ۵ متری ماسه غیر اشباع ۹۴
- شکل ۵-۱۵: تاریخچه تغییر مکان تاج تونل، ناشی از بار انفجار با حضور لایه ۷/۵ متری ماسه غیر اشباع ۹۵
- شکل ۵-۱۶: تغییر مکان حداکثر تاج تونل، ناشی از بار انفجار با حضور لایه ۷/۵ متری ماسه غیر اشباع ۹۵
- شکل ۵-۱۷: تاریخچه تغییر مکان تاج تونل، ناشی از بار انفجار با حضور لایه ۱۰ متری ماسه غیر اشباع ۹۶
- شکل ۵-۱۸: تغییر مکان حداکثر تاج تونل، ناشی از بار انفجار با حضور لایه ۱۰ متری ماسه غیر اشباع ۹۶
- شکل ۵-۱۹: مقایسه تغییر مکان تاج تونل با حضور لایه‌هایی با ضخامت‌های مختلف از ماسه غیر اشباع ۹۷

فهرست جداول

جدول ۲-۱: ضریب تبدیل برای مواد منفجره مختلف.....	۱۴
جدول ۲-۲: پارامترهای مربوط به فشار هوا بر اساس هوای موجود در خاک	۲۵
جدول ۲-۳: مقدار ضریب کاهندگی [۳۷].....	۲۶
جدول ۳-۱: مشخصات مدل	۵۴
جدول ۴-۱: مشخصات مصالح	۵۸
جدول ۴-۲: مشخصات خاک	۶۴
جدول ۴-۳: مقادیر پارامترها	۶۵
جدول ۴-۴: مقادیر پارامترها	۶۷
جدول ۴-۵: مقادیر پارامترها	۶۸
جدول ۴-۶: مقادیر پارامترها	۶۹
جدول ۵-۱: رابطه تجربی برای تعیین سرعت ذره در ماسه غیر اشباع [۳۶].....	۷۴
جدول ۵-۲: مشخصات آب و هوا.....	۸۲
جدول ۵-۳: مقادیر سرعت موج برشی محاسبه شده	۸۳
جدول ۵-۴: محاسبه مدول برشی خاک ماسه	۹۳

فصل اول :

مقدمه

۱- مقدمه

۱-۱- تعریف موضوع

انسانها از آغاز آفرینش تاکنون همواره با انواع آسیب‌ها و بلایا دست به گریبان بوده و از این بابت آسیب‌های جانی و مالی زیادی به آنها وارد شده است. هیچ جایی از این کره خاکی را نمی‌توان نام برد که از بحران‌ها و حوادث گوناگون در امان بوده باشد. به همین دلیل جوامع مختلف پیوسته به دنبال کشف و ابداع راه حل‌هایی بوده و هستند تا بتوانند آسیب‌های ناشی از حوادث غیر مترقبه را به گونه ای کنترل نموده یا به حداقل رسانند و در واقع حوادث و بحرانها را مدیریت نمایند.

با توجه به رفتار مکانیکی متفاوت خاک‌های غیراشباع، بررسی اثر انفجار بر تونل در این محیط‌ها ضروری می‌نماید. در این پایان نامه، سعی شده است تا به بررسی اثرات انفجار سطحی بر تونل با حضور آب در محیط خاکی پرداخته شود. نتایج تغییر مکان و نیروهای تونل برای حالت‌های خشک، اشباع و غیر اشباع خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد تا بتوان رفتار دقیق‌تری از پاسخ تونل با حضور آب در محیط‌های خاکی ارائه داد.

۱-۲- اهمیت موضوع

در سال‌های اخیر سازه های مدفون به عنوان سازه های امن در مباحث پدافند غیر عامل مورد توجه بوده است. گسترش روز افزون استفاده از فضاهای زیر زمینی و محیط‌های محصور در خاک و سنگ نیاز به بررسی دقیق و مطالعات بیشتر در خصوص بارهای وارده در این محیط‌ها را ضروری کرده است. از جمله بارگذاری‌های خاص وارده می‌توان به بارگذاری ناشی از انفجار اشاره کرد. انفجار یک پدیده موضعی و نقطه‌ای محسوب می‌شود که علاوه بر آن، ویژگی‌های محیطی که در آن موج ناشی از انفجار گسترش می‌یابد و موانع موجود در مسیر آن، این پدیده را به موضوعی بسیار پیچیده تبدیل کرده است. محیط احاطه‌کننده این سازه‌ها می‌تواند تأثیر زیادی در محافظت از آن‌ها در برابر چنین خطراتی داشته باشد. از جمله مهم‌ترین محیط‌های احاطه کننده سازه های زیر زمینی محیط‌های خاکی است. خاک ماده‌ای ناهمگن می‌باشد و از ذرات جدا از هم کانی تشکیل شده است و فضای بین دانه‌ها توسط آب و هوا پر شده است. بنابراین رفتار این ماده نامشخص و بسیار پیچیده است. به تبع رفتار نامشخص ماده، رفتار ماده و حرکت موج انفجار در برخورد با آن بسیار پیچیده و نامعین می‌باشد.

محققین بسیاری تلاش کرده‌اند تا روابط جامع و کاملی در محیط‌های مختلف برای محاسبه پارامترهای مختلف ناشی از انفجار مانند فشار تولید شده ارائه دهند. اما توجه اکثر محققین بر خاک به عنوان ناحیه انتقالی معطوف به خاک‌های خشک و در مواردی معدود اشباع بوده

است. حال آنکه خاک‌ها عموماً به صورت غیر اشباع در طبیعت حضور دارند و انتشار امواج در محیط‌های سه فازه با حضور ذرات خاک، آب و هوا مکانیزمی متفاوت دارد؛ لذا ضروری به نظر می‌رسد برای درک جامع‌تری از رفتار تونل در محیط‌های خاکی از نتایج سایر محققین برای نیل به مشاهده رفتار دقیق‌تر تونل‌ها استفاده کرد تا نگاهی جامع‌تر به اثرات انفجار سطحی بر تونل‌های زیرزمینی داشت.

۱-۳- مراحل تحقیق

بخشی از نتایج موجود در این پژوهش به کارگیری حل عددی با نرم افزار Plaxis Professional 8/5 حاصل شده است. در بخش دیگر از نتایج حل تحلیلی معادله موج در محیط‌های متخلخل سه فازی و روش‌های شبه استاتیکی تحلیلی برای بررسی لرزه ای تونل استفاده گردیده است.

۱-۴- شرح فصول

در فصل دوم که مروری بر ادبیات فنی می‌باشد، سعی شده تا کلیاتی از پدیده انفجار، انتشار و نفوذ موج انفجار، مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته پیرامون انتشار موج در محیط‌های اشباع و غیر اشباع و نیز تحقیقات پیرامون اثرات انفجار بر تونل آورده شود.

در فصل سوم به بررسی نرم افزار Plaxis professional 8/5 پرداخته شده است.

فصل چهارم به مدل سازی و بررسی اثر انفجار سطحی بر تونل در خاک‌های اشباع و خشک می‌پردازد.

در فصل پنجم با به‌کارگیری روش‌های تحلیلی به محاسبه اثرات ناشی از انفجار های سطحی در محیط‌های خشک، اشباع و غیر اشباع پرداخته می‌شود و نتایج حاصل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از نرم افزار Plaxis و با در نظر گرفتن اثر درجه اشباع و فشار مکش بر مدول برشی خاک، اثر حضور لایه های غیر اشباع ماسه مورد نظر می‌باشد.

فصل ششم، روند و نتایج کلی تحقیق ذکر شده و پیشنهادهایی نیز برای مطالعات بیشتر آورده شده است.

فصل دوم :

مروری بر ادبیات فنی موضوع

۲- مروری بر ادبیات فنی موضوع

۲-۱- تحلیل حوزه‌ی آزاد انفجار سطحی و مدفون

۲-۱-۱- تعریف انفجار

انفجار^۱ آزاد شدن بسیار سریع انرژی به صورت نور، گرما، صدا و موج ضربه‌ای می‌باشد [۱].



شکل ۱-۲ انفجار

۲-۱-۲- موج انفجار

موج ضربه‌ای^۲ شامل هوای بسیار متراکمی می‌باشد که به صورت شعاعی از منبع انفجار به سمت خارج با سرعت مافوق صوت در حرکت است. با گسترش موج ضربه‌ای، مقدار فشار به سرعت کاهش می‌یابد (متناسب با توان سوم فاصله) و پس از برخورد به یک سطح، منعکس شده و مقدار آن ممکن است تا سیزده برابر افزایش یابد. مقدار ضریب انعکاس تابع نزدیکی ماده منفجره و زاویه موج برخوردی می‌باشد. فشار همچنین با گذشت زمان به سرعت کاسته می‌شود (به صورت نمایی). در بارگذاری انفجاری، زمان اعمال بار بسیار کوتاه می‌باشد و معمولاً بر حسب هزارم ثانیه (میلی ثانیه) بیان می‌شود.

در آخر پدیده انفجار، موج ضربه‌ای منفی ایجاد می‌شود که مکش ایجاد می‌کند و در جایی که خلأ ایجاد شده باشد، یک باد قوی یا نیروی کششی وارد می‌شود. این باد، آثار مخروبه به جا مانده از انفجار را بر می‌چیند و سبب جابجایی آن‌ها می‌شود. در انفجارهای خارجی بخشی از انرژی به زمین وارد می‌شود که سبب ایجاد گودال^۳ و موج ضربه زمینی می‌شود که از نظر شدت و مدت زمان شبیه زلزله می‌باشد [۱].

1 Blast
2 Shock wave
3 Crater

فشار حداکثر^۱، تابع میزان مواد منفجره و توان سوم فاصله است. برای یک خطر انفجاری که بر حسب وزن ماده منفجره و فاصله بیان می‌شود، فشار حداکثر برخوردی و انعکاس یافته موج ضربه‌ای و سایر پارامترها مثل مقدار ضربه برخوردی و انعکاس یافته، سرعت ضربه و زمان رسیدن موج را می‌توان با استفاده از چارت‌هایی که در برخی منابع مثل [2] TM5-1300 ارائه شده است، استخراج نمود [۱].

۲-۱-۳- اهمیت بررسی پدیده انفجار

پاسخ سازه‌های زیرزمینی که در سطح زمین متأثر از بارگذاری انفجار هستند در پدافند غیر عامل مبحث با اهمیتی است. معمولاً چنین سازه‌هایی به صورت سازه‌های بتنی بسته می‌باشد که گاهی بخشی از آن‌ها و گاهی نیز تمام سازه درون زمین مدفون است.

سازه‌های زیرزمینی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. اول سازه‌هایی که کاملاً مدفون هستند و دوم سازه‌هایی که بخشی از آن‌ها مدفون است [۳].

سازه‌هایی نظیر قالب‌های غوطه‌ور، پناهگاه‌ها، زیرزمین، انبارها و تأسیسات مخزنی، شفت‌ها، تونل‌ها و لوله‌ها از انواع این سازه‌ها می‌باشند. مصالح به کار رفته در این سازه مصالحی چون انواع فلزات، فولاد ساختمانی، بتن مسلح، چوب، فایبرگلاس و غیره می‌باشد [۳].

لوله‌های زیرزمینی در صنعت انتقال آب، فاضلاب، هوای پر فشار، نفت و گاز و غیره کاربرد گسترده‌ای دارند. در این نوع سازه‌ها می‌بایست اثرات تخریبی انفجار در طراحی‌ها لحاظ گردد. زیرا انفجار می‌تواند با ارتعاشی که در پهنه وسیعی از محیط ایجاد می‌کند خرابی‌های زیادی را به وجود آورد. در اثر انفجار علاوه بر خسارت‌های جانی، تأسیسات صنعتی دچار اختلالاتی در فرایند تولید می‌شوند و زمین نیز دچار فرسایش می‌گردد [۳].

۲-۱-۴- انواع بارگذاری انفجار

انفجارها، بر اساس محل انفجار به دو دسته‌ی انفجار هوایی و انفجار زیرزمینی تقسیم می‌شوند.

۲-۱-۴-۱- انفجار هوایی

اگر محل انفجار بالای سطح زمین باشد، انفجار هوایی نامیده می‌شود. انفجار هوایی خود می‌تواند بر اساس ارتفاع انفجار از سطح زمین به دو دسته تقسیم می‌شود [۴]:

- انفجار در هوا^۱
- انفجار در سطح^۲

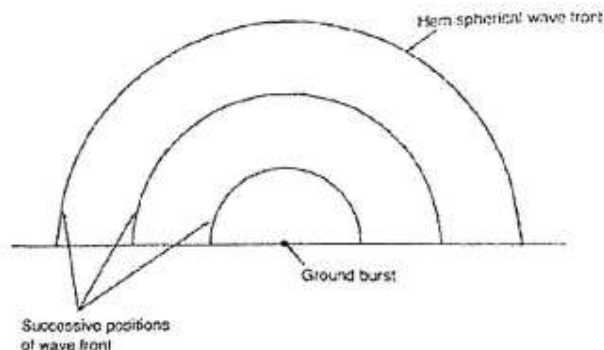
۲-۱-۴-۲- انفجار در هوا

پدیده‌ی انفجار مانند حرکت موج ضربه در یک گاز در هوا انتشار می‌یابد. بررسی پدیده‌ی انتشار امواج در مواد وابستگی زیادی به کارهای ابتدایی ارنشاو^۳ (۱۸۵۸) و لمب^۴ (۱۸۹۵)، که به عنوان بنیان گذار اصلی هیدرودینامیک، انتشار امواج، تغییر شکل الاستیک ورق و تئوری صوت شناخته می‌شود، دارد. شرایط فشار، سرعت و چگالی گاز پیش و پس از احتراق نیز توسط رانکین^۵ (۱۸۷۰) و هوگانیوت^۶ (۱۸۸۷، ۱۸۸۹) بسط داده شده است. به علت این که در اغلب مراجع هم چون بالسون^۷ (۱۹۹۷) بشارا^۸ (۱۹۹۴) و هنریچ^۹ (۱۹۷۹)، انفجار در هوا دارای اثر کمتر و ضعیف‌تری بر سازه‌های زیرزمینی تشخیص داده شده است، در اینجا از بیان معادلات حاکم بر آن صرف‌نظر می‌شود [۴].

۲-۱-۴-۳- انفجار سطحی

در شرایط ایده‌آل تئوری، در هنگام وقوع پدیده‌ی انفجار در مجاورت یک سطح سفت ماهیتی به صورت نیم‌کره خواهد داشت (شکل ۱-۲). (لازم به ذکر است که در انفجار در هوا جبهه‌ی موج به شکل کره است) به همین دلیل انرژی ناشی از موج انفجاری بر ناحیه‌ی کوچکتري متمرکز می‌شود. به این منظور کلیه‌ی روابطی که برای انفجار در هوا به دست آمده است، با دو برابر کردن وزن مواد منفجره قابل استفاده است. هرچند در مواقعی که سطح زمین سفت و غیر قابل نفوذ باشد، با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی ۱/۷ توصیه می‌شود [4].

۱ Air burst
 2 Surface burst
 3 Earnshaw
 4 Lamb
 5 Rankine
 6 Hugoniot
 7 Bulson
 8 Beshara
 9 Henrych



شکل ۱-۲: جبهه‌ی موج نیم کره‌ی در انفجار سطحی

۲-۱-۵- پارامترهای موج انفجار

پارامترهای جبهه موج انفجار^۱ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار دارند. حل تحلیلی این پارامترها ابتدا توسط هوگانیوت^۲ و رانکین^۳ برای توصیف شوک‌ها در گاز ایده‌آل بیان شد. این معادلات بر ای سرعت جبهه موج U_s و ماکزیم فشار دینامیکی q_s به صورت زیر بیان می‌شود [۴]:

$$U_s = a \sqrt{\frac{6p_s + 7p_0}{7p_0}} \quad (2-1)$$

$$q_s = \frac{5p_s^2}{2(p_s + 7p_0)} \quad 2-2$$

که p_s اضافه فشار استاتیکی، p_0 فشار اتمسفر و a سرعت صوت در هوا و در فشار اتمسفر می‌باشد. فاصله‌ی مقیاس بندی^۴، Z ، به صورت زیر تعریف می‌شود [۴]:

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (3-2)$$

¹ Blast wavefront

² Hugoniot

³ Rankine

⁴ Scaled distance

R فاصله‌ی واقعی از مرکز ماده‌ی منفجره تا نقطه مورد نظر و W جرم خرج انفجاری^۱ بر حسب کیلوگرم تی‌ان‌تی معادل می‌باشد. استفاده از Z این امکان را می‌دهد که بیان خلاصه و مؤثری از موج انفجار برای محدوده‌ی وسیعی از حالات داشته باشیم.

قبل از این که پارامترها برای یک انفجار استخراج شوند، جرم تی‌ان‌تی معادل مورد نیاز هست. چندین روش برای بیان تی‌ان‌تی معادل وجود دارد، ولی ساده‌ترین آن‌ها به صورت نسبت انرژی ویژه جرمی مواد منفجره‌ی واقعی به انرژی ویژه جرمی تی‌ان‌تی می‌باشد. انرژی ویژه-ی جرمی تی‌ان‌تی برابر 6700 KJ/Kg می‌باشد [۴].

سایر پارامترهای موج انفجار عبارتند از مدت زمان فاز مثبت^۲ T_s ، ضربه مثبت^۳ i_s که سطح زیر نمودار فشار- زمان از زمان t_a تا انتهای فاز مثبت می‌باشد [۴]:

$$i_s = \int_{t_a}^{t_a+T_s} p_s(t) dt \quad (2-4)$$

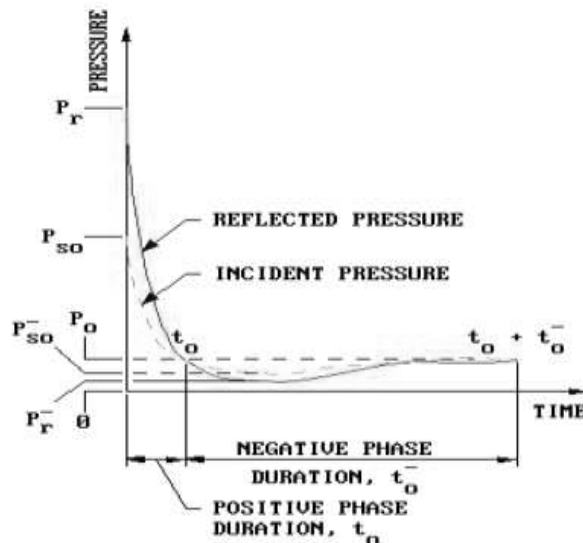
ضربه مثبت و منفی توسط بیکر^۴ نیز به صورت زیر ارائه شده است [۴]:

$$i_s^+ = \int_{t_a}^{t_a+t_0^+} [P(t) - P_a] dt$$

$$i_s^- = \int_{t_a+t_0^+}^{t_a+t_0^-} [P_a(t) - P(t)] dt \quad (2-5)$$

یک روش رایج برای استخراج پارامترهای موج انفجار، استفاده از گراف‌هایی است که در برخی مراجع مثل *TM5-1300* نیز ارائه شده است [۳]:

1 Charge mass
2 Positive phase duration
3 Positive impulse
4 Baker



شکل ۲-۲: موج انفجار ایده آل

۲-۱-۶ انواع انفجار از نظر ماهیت

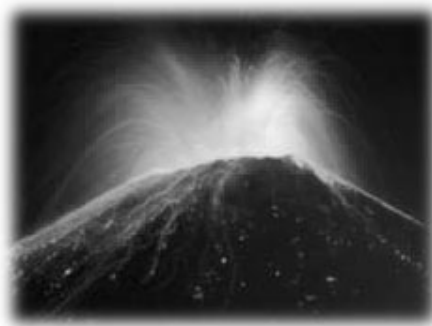
انفجارها عموماً به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱. فیزیکی

۲. شیمیایی

۳. هسته‌ای

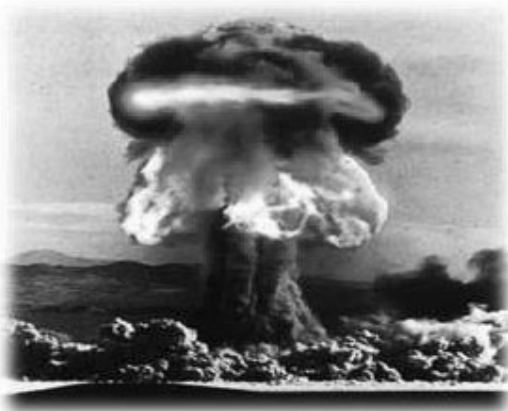
انفجارهای فیزیکی اغلب ناشی از فشار ناگهانی یا تغییرات دمایی بدون هیچ گونه رفتار شیمیایی حاصل می‌شوند. انفجار و فوران آتش‌فشان‌ها از این دسته می‌باشند (شکل ۲-۳). انفجارهای شیمیایی ناشی از اکسیداسیون سریع مواد سوختنی می‌باشند. انفجارهای هسته‌ای ناشی از تغییر شکل متفاوت هسته‌ی اتم به واسطه‌ی باز توزیع پروتون‌ها و نوترون‌ها در طی فعل و انفعالات هسته‌ای می‌باشد. از آنجایی که نیروی موجود بین اجزای هسته، چندین برابر بزرگتر از نیروی موجود بین اتم‌ها است لذا انرژی آزاد شده از يك انفجار هسته‌ای بسیار بیشتر از انرژی آزاد شده از همان مقدار ماده منفجره طی انفجار شیمیایی است [۴].



شکل ۳-۲: انفجار فیزیکی



شکل ۴-۲: انفجار شیمیایی



شکل ۵-۲: انفجار هسته‌ای

۱-۶-۲- انفجار هسته‌ای

نیومارک^۱ و هالتي واگنر^۲ (۱۹۶۲) تقریب‌های تحلیلی زیادی برای اضافه فشار انفجارهای هسته‌ای به عنوان تابعی از زمان و فاصله ارائه کردند. جزئیات کامل انفجار هسته‌ای توسط بیکر (۱۹۷۳) ارائه شده است. رابطه‌ی زیر تقریب مناسبی برای تغییرات اضافه فشار - فاصله ناشی از انفجار هسته‌ای روی سطح زمین می‌باشد [۸]:

$$P_s^+ = 15 \left[\frac{1000}{10^{15}} \right] \left[\frac{1000}{R} \right]^3 + 11 \left[\frac{W}{10^{15}} \right]^{0.5} \left[\frac{1000}{10^{15}} \right]^{\frac{3}{2}} \left(N/cm^2 \right) \quad (2-6)$$

در رابطه‌ی فوق W بازده جنگ افزارها^۳ با واحد ژول می‌باشد و R فاصله‌ی محل انفجار از نقطه‌ی مورد نظر بر حسب متر است. با ضرب فاکتور λ در R می‌توان اضافه فشار را برای بازده‌های دیگر نیز به دست آورد. اثرات انفجارهای سطحی حدود دو برابر انفجارهای هوایی می‌باشد، لذا نصف بازده انفجاری W ، برای اضافه فشار حداکثر در انفجار هوایی لحاظ می‌شود.

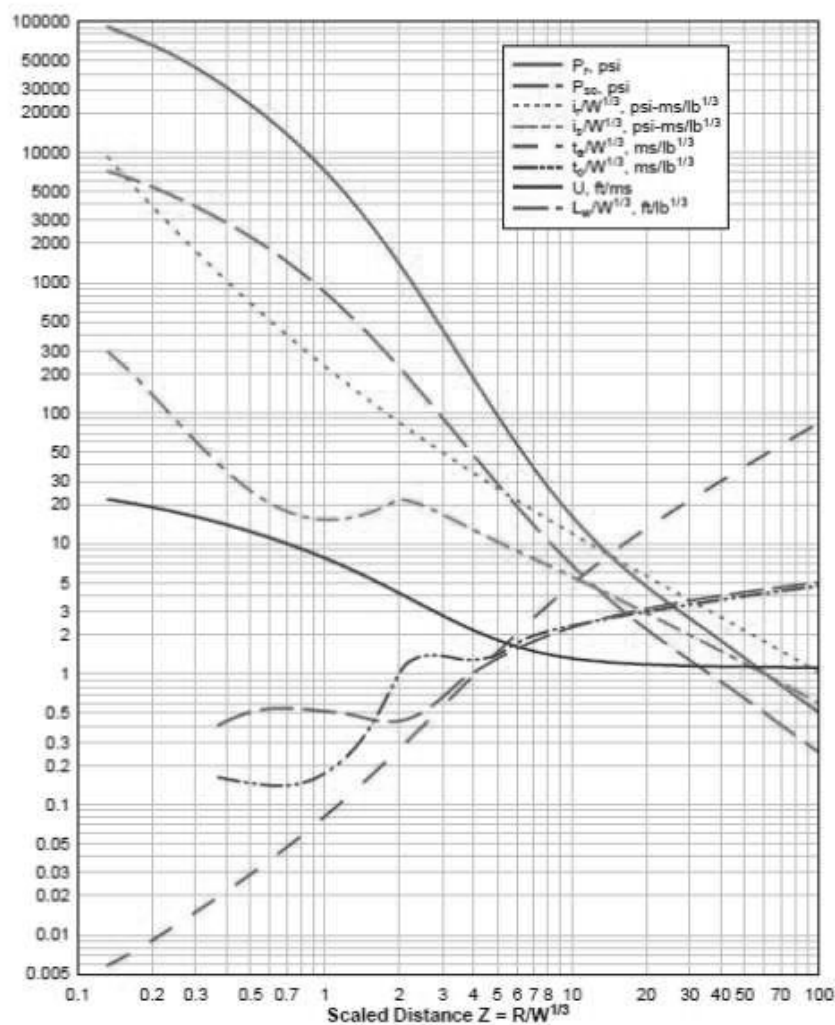
۲-۱-۶-۲- انفجار شیمیایی

روابط زیادی برای اضافه فشار حداکثر ناشی از انفجارهای مرسوم (شیمیایی) وجود دارد که بر اساس ماده منفجره مورد استفاده توسط محققین حاصل شده‌اند. رابطه‌ی بشارا برای انفجار شیمیایی مرسوم آورده شده است [۴]:

$$\frac{P_s^+}{P_0} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\left\{ \left[1 + \left(\frac{Z}{0.045} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{Z}{0.32} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{Z}{1.35} \right)^2 \right] \right\}^{0.5}} \quad (7-2)$$

منحنی‌های اضافه فشار حداکثر (هم چون منحنی سایر پارامتر های موج انفجار) به صورت تابعی از فاصله‌ی مقیاس شده در $TM5-1300$ مربوط به سازمان دفاع وجود دارد و می‌توان با استفاده از آن‌ها اضافه فشار حداکثر را به دست آورد (شکل ۲-۶).

1-Newmark
2-Halti Wagner
3-Weapon yield

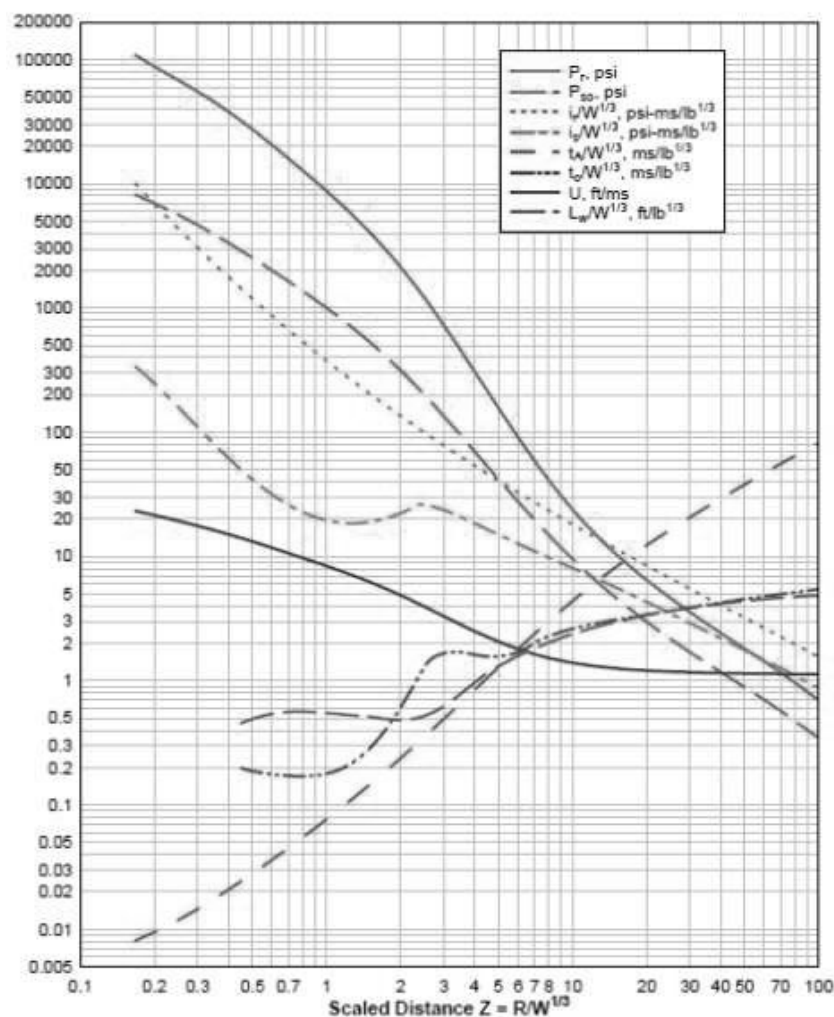


شکل ۶-۲: پارامترهای موج انفجار کره‌ای شکل، در سطح آزاد دریا (TM5-1300 (1969)، [۲].

زمانی که ماده‌ی منفجره روی سطح زمین یا در فاصله‌ی بسیار کم از آن منفجر می‌شود، موج انفجار در شرایط ایده‌آل جبهه‌ی موجی به صورت نیم کره خواهد داشت که متفاوت است از جبهه‌ی موج کروی که در انفجار هوایی حاصل می‌شود [۴]؛ لذا انرژی آزاد شده به سطح کوچک‌تری اعمال شده و باید ضرایب اصلاحی در معادلات انفجار هوایی اعمال شود تا بتوان اضافه فشار را در شرایط انفجار سطحی بدست آورد. نیومارک در سال ۱۹۶۳ رابطه‌ی زیر را برای محاسبه‌ی اضافه فشار حداکثر در انفجارهای سطحی شیمیایی پیشنهاد کرد:

$$P_s = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left(\frac{W}{R} \right)^{0.5} \quad (Bars) \quad (8-2)$$

در این رابطه، P_s اضافه فشار، W وزن هم ارز تی‌ان‌تی (تن) و R فاصله‌ی مرکز انفجار در روی سطح زمین از نقطه مورد نظر بر حسب متر می‌باشد (شکل ۷-۲).



شکل ۷-۲: پارامترهای موج انفجار نیم کره‌ای شکل، در سطح آزاد دریا (TM5-1300 (1969)، [۲].

۷-۱-۲- معادل سازی مواد منفجره با تی‌ان‌تی

در مطالعاتی که محققین مختلفی هم چون بالسون^۱، بشارا^۲ و هنریچ^۳ در زمینه‌ی انفجار انجام داده‌اند، نتایج آزمایشات بر اساس مقدار ماده منفجره معادل تی‌ان‌تی گزارش شده است؛ لذا ارائه

^۱ Bulson