

به نام و یاد تو... ..

تو؛ که رحمانی؛ به واسطه‌ی بخشش؛ که همه را رسیده، حتی آن کس که پاس لطفت نگذاشت!

و تو؛ که رحیمی؛ به واسطه‌ی مهرت؛ که به آنان که پاس بندگی ات نگذاشتند بی حساب بخشیدی!

تو؛ که هر دم، خیرت بر ما نازل است و در عوض شر ما به سوی حضرتت صاعدا!

پس پاس برانده قامت کبریا بی توست؛ حمدی که نیای بر آن نیست؛ که تو خود بی نیای!

تو؛ که حمیدی... ..

و رحمان... ..

و رحیم... ..

والبتة... ..
اللَّهُ!



دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مهندسی زلزله

بررسی عملکرد خطوط لوله گاز تحت فشار در اثر انفجار

تحقیق و تدوین:

عباس آقاسی

استاد راهنما:

دکتر رضا راستی اردکانی

استاد مشاور:

دکتر محمد صافی

مهر ۱۳۹۱



دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - مهندسی زلزله آقای عباس آفاسی
تحت عنوان

بررسی عملکرد خطوط لوله گاز تحت فشار در اثر انفجار

در تاریخ ۱۳۹۱/۷/۱۷ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | | |
|-------|-------------------------------|-------------------------------|
| ..... | دکتر رضا راستی اردکانی (امضا) | ۱- استاد راهنمای پایان نامه |
| ..... | دکتر محمد صافی | ۲- استاد مشاور پایان نامه |
| ..... | دکتر رضا کرمی | ۳- استاد داور |
| ..... | دکتر عباس مهدویان | ۴- استاد داور |
| ..... | دکتر وزین رام | معاونت تحصیلات تکمیلی دانشکده |

تقدیر و تشکر:

بر خود لازم می‌دانم تا از تمامی عزیزانی که مرا تا این مرحله یاری نموده‌اند، بالاترین مراتب تقدیر و تشکر خود را به جا آورم. از **خانواده عزیزم** که همواره مایه آرامش و دل‌گرمی‌ام بوده‌اند، از معلمان عزیز ابتدایی تا اساتید محترم دانشگاه که پله به پله بال‌های علم و دانشم را توان پرواز دادند؛ خصوصاً جناب **آقای دکتر محمد صافی و آقای دکتر رضا راستی اردکانی**، و همچنین از **دوستان عزیزتر از جانم** که رفیقِ راه و شریکِ بارم بودند: **آقایان محسن ذوالفقاری، دانیال شینی دشتگلی، محمد رکاب اسلامی، مهران کنگانی، سید سجاد حسینی، آزاد سلیمان نژاد، سید محمد سید کلبادی** و دیگر دوستانی که بحمدالله شمارشان آنقدر زیاد است که خود مثنوی هفتاد من کاغذی است. امید است که توانسته باشم در سایه لطف خداوند گامی هر چند کوچک در راستای توسعه و تعالی کشور بردارم.

«تعهد اصالت اثر»

اینجانب «عباس آقاسی» تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب بوده و به پژوهش دیگران که در این نوشتار از آن‌ها استفاده شده، مطابق قوانین و مقررات ارجاع گردیده است.

این پایان‌نامه قبلاً برای هیچ مدرک هم‌سطح و یا بالاتر ارائه نشده و کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه صنعت آب و برق می‌باشد.

عباس آقاسی

تقدیم بہ آستان حضرت دوست، کہ چشم کرویان، خاک ساری قدوم اوست

وجان عشاق در عطش می سوزد می سوزد ...

بہ آستان قطب عالم امکان، حضرت صاحب الامر،



الاعظم (أرواحنا له الفداء)

کہ مایہ می قرار آسمان ہا زمین، و واسطی فیض الہی است ...

اوبی کہ داشتہ و نداشتہ می این کمترین، خرد و کلان، ہمہ از لطف اوست.

فهرست مطالب

چکیده	۱
۱- مقدمه	۲
۱-۱- پیشگفتار	۲
۱-۲- هدف از اجرای طرح و اهمیت و ضرورت آن	۲
۱-۳- روش‌ها و فنون اجرایی طرح	۳
۱-۴- شرح کار	۳
۲- بررسی مدل‌های رفتاری و اندرکنش بین خاک و سازه	۴
۲-۱- مدل الاستیسیته خطی	۴
۲-۲- مدل کشسان-خمیری	۴
۲-۳- نظریه خمیری	۵
۲-۴- شرایط تسلیم ماده	۵
۲-۵- مدل موهر-کلمب (Mohr-Coulomb)	۷
۲-۶- مدل دراگر-پراگر (Drucker-Prager)	۸
۲-۷- مفهوم اندرکنش	۱۰
۲-۸- اندرکنش خاک و سازه	۱۰
۲-۹- مدل‌سازی کلی اندرکنش خاک و سازه	۱۰
۲-۹-۱- معادلات حرکت	۱۳
۲-۹-۲- اندرکنش خاک و لوله	۱۳
۳- تحلیل حوزه‌ی آزاد انفجار سطحی و مدفون	۱۴
۳-۱- مقدمه	۱۴
۳-۲- اهمیت بررسی پدیده انفجار	۱۴
۳-۳- انفجار هوایی	۱۴
۳-۳-۱- انفجار در هوا	۱۵
۳-۳-۲- انفجار سطحی	۱۵
۳-۴- پارامترهای موج انفجار	۱۵

۱۷	..... انواع انفجار از نظر ماهیت	۳-۵
۱۸	..... انفجار هسته‌ای	۳-۵-۱
۱۸	..... انفجار شیمیایی	۳-۵-۲
۲۰	..... معادل‌سازی مواد منفجره با تی‌ان‌تی	۳-۶
۲۱	..... قوانین مقیاس انفجار	۳-۷
۲۱	..... قانون هاپکینسون	۳-۷-۱
۲۲	..... قانون ساچ	۳-۷-۲
۲۳	..... پروفیل فشار موج	۳-۸
۲۳	..... گودال ناشی از انفجار	۳-۹
۲۴	..... ابعاد چال انفجاری ناشی از انفجار زیرزمینی	۳-۹-۱
۲۵	..... ابعاد چال انفجاری ناشی از انفجار سطحی	۳-۹-۲
۲۶	..... بررسی انتشار امواج انفجار در محیط خاکی	۴-۴
۲۶	..... مقدمه	۴-۱
۲۶	..... فشارهای ناشی از انفجار در خاک (محیط نامحدود)	۴-۲
۲۶	..... موج فشار یا فشار با میدان آزاد	۴-۲-۱
۲۶	..... موج ماند یا فشار ماند	۴-۲-۲
۲۷	..... تجزیه‌ی انرژی موج در مرزها	۴-۳
۲۷	..... اثر آب و درصد هوا در گسترش موج انفجار	۴-۴
۲۷	..... مدل رفتاری سه فازه خاک وانگ (۲۰۰۴)	۴-۴-۱
۳۰	..... فشار انفجار بر حسب هوای موجود در خاک	۴-۴-۲
۳۰	..... بار گذاری انفجار برای سازه‌های مدفون	۴-۵
۳۳	..... مدل‌سازی و نتیجه‌گیری	۵-۵
۳۳	..... مقدمه و کلیات	۵-۱
۳۳	..... کلیاتی در مورد نرم افزار Abaqus	۵-۲
۳۴	..... ساخت مدل در نرم افزار	۵-۳
۳۴	..... آنالیز حساسیت برای کنترل ابعاد مدل	۵-۳-۱
۳۶	..... هندسه‌ی مدل	۵-۳-۲
۳۶	..... مشخصات مصالح	۵-۳-۳

۳۷	..... نوع المانها ۴-۳-۵
۳۷	..... اندرکنش ۵-۳-۵
۳۷	..... شرایط مرزی ۶-۳-۵
۴۰	..... بارگذاری ۷-۳-۵
۴۱	..... مش بندی ۸-۳-۵
۴۲	..... نوع تحلیل ۴-۵
۴۴	..... بررسی نتایج تحلیلها ۵-۵
۴۵	..... تأثیر عمق دفن لوله ۱-۵-۵
۴۹	..... تأثیر وزن مادهی منفجره ۲-۵-۵
۵۳	..... تأثیر فاصلهی انفجار از محور لوله ۳-۵-۵
۵۵	..... تأثیر فشار داخلی لوله ۴-۵-۵
۵۵	..... تأثیر ضریب اصطکاک بین خاک و لوله ۵-۵-۵
۵۶	..... تأثیر قطر لوله ۶-۵-۵
۵۷	..... تأثیر ضخامت لوله ۷-۵-۵
۵۹	..... تأثیر ضریب اصطکاک داخلی خاک ۸-۵-۵
۵۹	..... تأثیر وزن مخصوص خاک ۱-۵-۵
۶۲	..... نتایج و پیشنهادات ۶-۶
۶۲	..... مقدمه ۱-۶
۶۲	..... نتیجه گیری ۲-۶
۶۳	..... پیشنهاد برای مطالعات بعدی ۳-۶
۶۵	..... مراجع ۷-۷

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: رفتار تنش - کرنش ماده ۴
- شکل ۲-۲: نمایش ترسیمی حالت تسلیم ۶
- شکل ۳-۲: نمودار تنش - کرنش مواد الاستوپلاستیک کامل ۶
- شکل ۴-۲: معیارهای موهر-کلمب و دراگر-پراگر در دستگاه مختصات تنش‌های اصلی ۹
- شکل ۵-۲: مدل مرکب شامل سازه، پی و زمین ۱۱
- شکل ۶-۲: مدل ساده‌ای از سازه و خاک ۱۲
- شکل ۱-۳: جبهه‌ی موج نیم‌کروی در انفجار سطحی ۱۵
- شکل ۲-۳: موج انفجار ایده‌آل ۱۷
- شکل ۳-۳: انفجار فیزیکی ۱۷
- شکل ۴-۳: انفجار شیمیایی ۱۸
- شکل ۵-۳: انفجار هسته‌ای ۱۸
- شکل ۶-۳: پارامترهای موج انفجار کره‌ای شکل، در سطح آزاد دریا (TM5-1300 (1969) ۱۹
- شکل ۷-۳: پارامترهای موج انفجار نیم‌کره‌ای شکل، در سطح آزاد دریا (TM5-1300 (1969) ۲۰
- شکل ۸-۳: قانون هاپکینسون ۲۲
- شکل ۹-۳: چال انفجار ۲۳
- شکل ۱۰-۳: گودال ظاهری ۲۳
- شکل ۱۱-۳: گودال واقعی ۲۴
- شکل ۱-۴: پارامترهای چال انفجار ۲۶
- شکل ۲-۴: مدل رفتاری سه‌فازه‌ی خاک وانگ، برای بار انفجار ۲۹
- شکل ۳-۴: اثر درصد هوا بر ضربه ناشی از انفجار ۳۰
- شکل ۴-۴: ضریب جفت‌کنندگی ۳۱
- شکل ۱-۵: فلوچارت روند آنالیز در نرم افزار Abaqus ۳۴
- شکل ۲-۵: نمودار مربوط به مقادیر سرعت موج در دورترین گره مدل‌های مختلف ۳۵
- شکل ۳-۵: نمودار مربوط به مقادیر شتاب موج در دورترین گره مدل‌های مختلف ۳۵
- شکل ۴-۵: هندسه مدل ۳۶
- شکل ۵-۵: تعریف شرایط مرزی ۳۸
- شکل ۶-۵: اعمال شرایط تقارن در مرزهای جانبی خاک ۳۹
- شکل ۷-۵: اعمال شرایط تقارن در مرزهای جانبی خاک ۴۰
- شکل ۸-۵: محل اعمال بار انفجار ۴۰

- شکل ۹-۵: مش بندی خاک ۴۱
- شکل ۱۰-۵: مش بندی لوله ۴۱
- شکل ۱۱-۵: انتشار موج تنشی حاصل از انفجار در محیط خاک ۴۴
- شکل ۱۲-۵: انتشار موج تنشی حاصل از انفجار در لوله ۴۴
- شکل ۱۳-۵: نتایج تحلیل جهت بررسی اثر عمق دفن لوله (انفجار ناشی از ۱۰ کیلوگرم TNT) ۴۷
- شکل ۱۴-۵: نتایج تحلیل جهت بررسی اثر عمق دفن لوله (انفجار ناشی از ۲۰ کیلوگرم TNT) ۴۸
- شکل ۱۵-۵: نتایج تحلیل جهت بررسی اثر عمق دفن لوله (انفجار ناشی از ۳۰ کیلوگرم TNT) ۴۹
- شکل ۱۶-۵: نتایج تحلیل جهت بررسی اثر وزن ماده‌ی منفجره (عمق دفن لوله ۲ متر) ۵۱
- شکل ۱۷-۵: نتایج تحلیل جهت بررسی اثر وزن ماده‌ی منفجره (عمق دفن لوله ۳ متر) ۵۲
- شکل ۱۸-۵: نتایج تحلیل جهت بررسی اثر وزن ماده‌ی منفجره (عمق دفن لوله ۴ متر) ۵۳
- شکل ۱۹-۵: نتایج تحلیل، جهت بررسی اثر فاصله‌ی انفجار از محور لوله ۵۴
- شکل ۲۰-۵: نتایج تحلیل، جهت بررسی اثر قطر لوله ۵۷
- شکل ۲۱-۵: نتایج تحلیل، جهت بررسی اثر ضخامت لوله ۵۸
- شکل ۲۲-۵: نتایج تحلیل، جهت بررسی اثر ضریب اصطکاک داخلی خاک ۶۰
- شکل ۲۳-۵: نتایج تحلیل، جهت بررسی اثر وزن مخصوص خاک ۶۱

فهرست جداول

- جدول ۱-۳: ضریب تبدیل برای مواد منفجره مختلف ۲۱
- جدول ۱-۴: پارامترهای مربوط به فشار هوا بر اساس هوای موجود در خاک ۳۰
- جدول ۲-۴: مقدار ضریب کاهش کاهندگی ۳۱
- جدول ۱-۵: مدل های ساخته شده برای آنالیز حساسیت ابعاد مدل خاک ۳۴
- جدول ۲-۵: مشخصات انواع خاک مورد استفاده در تحلیل ها ۳۶
- جدول ۳-۵: مشخصات فولاد ۳۶
- جدول ۴-۵: مشخصات مدل ها جهت بررسی اثر عمق دفن لوله ۴۶
- جدول ۵-۵: مشخصات مدل ها جهت بررسی اثر وزن ماده ی منفجره ۵۰
- جدول ۶-۵: مشخصات مدل ها جهت بررسی اثر فاصله ی انفجار از محور لوله ۵۴
- جدول ۷-۵: مشخصات مدل ها جهت بررسی اثر فشار داخلی لوله ۵۵
- جدول ۸-۵: نتایج تحلیل، جهت بررسی اثر فشار داخلی لوله ۵۵
- جدول ۹-۵: مشخصات مدل ها جهت بررسی اثر ضریب اصطکاک بین خاک و لوله ۵۵
- جدول ۱۰-۵: نتایج تحلیل، جهت بررسی اثر ضریب اصطکاک بین خاک و لوله ۵۶
- جدول ۱۱-۵: مشخصات مدل ها جهت بررسی اثر قطر لوله ۵۶
- جدول ۱۲-۵: مشخصات مدل ها جهت بررسی اثر ضخامت لوله ۵۸
- جدول ۱۳-۵: مشخصات مدل ها جهت بررسی اثر ضریب اصطکاک داخلی خاک ۵۹
- جدول ۱۵-۵: مشخصات مدل ها جهت بررسی اثر وزن مخصوص خاک ۵۹

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 می باشد. 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 می باشد، شریان های حیاتی است.

شریان های حیاتی شامل راه ها، پل ها، تونل ها، خطوط انتقال و همچنین شبکه های مخابراتی و رسانه ای می باشند. از آنجا که کشور ما دارای منابع سرشار گاز و نفت می باشد و وابستگی شدید اقتصاد ما به صدور و انتقال نفت و گاز کاملاً مشخص است، محافظت از این خطوط نیز اهمیتی دوچندان می یابد.

طی سال های اخیر وقوع حوادث تروریستی گوناگون در مورد سازه های مهم در سراسر جهان، سبب شده است که بارهای انفجاری مورد توجه ویژه ای قرار گیرند. انفجار می تواند با ارتعاشی که در پهنه ی وسیعی از محیط خاک ایجاد می کند، خرابی های زیادی را به وجود آورد؛ لذا پیش بینی بارهای ضربه ای دینامیکی و بررسی پاسخ رفتاری سازه ها از اهمیت زیادی برخوردار است.

با توجه به توسعه ی قابل توجه روش های عددی در دهه های اخیر، امکان بررسی اثرات انفجار بر سازه های سطحی و زیرزمینی، با دقت بالا فراهم آمده است. در این تحقیق با بررسی جدیدترین روش های به کار رفته برای مدل سازی پدیده انفجار و پاسخ های حاصل شده از سازه های زیرزمینی، اطلاعات جامعی به دست آمده است.

در این تحقیق اثر انتشار امواج انفجار بر روی خطوط لوله مدفون در نرم افزار Abaqus/CAE 6.10-1 و با استفاده از مدل اجزاء محدود، شبیه سازی شده است و به بررسی اثرات انفجارهای سطحی بر روی خطوط لوله ی مدفون گاز، و پاسخ دینامیکی آنها، بسته به مشخصات و ویژگی هایشان، پرداخته شده است. در تحلیل مدل اثرات تغییر عمق دفن لوله، شدت و فاصله ی انفجار و همچنین اثرات تغییر در خصوصیات خاک اطراف لوله در حالات مختلف، اعمال و نتایج آنها آورده شده است.

در پایان، نتایج نشان می دهند که در لوله های مدفون تحت انفجارهای سطحی، با افزایش عمق دفن و فاصله ی انفجار، جابه جایی ها، تنش های اصلی و کرنش ها در سه نوع خاک رس، ماسه سست، ماسه متراکم کاهش می یابد. این نتیجه به دلیل افزایش محصور شدگی لوله در خاک می باشد و همچنین با افزایش زاویه اصطکاک داخلی برای یک نوع خاک تنش وارد بر لوله کاهش می یابد. ولی با افزایش چگالی خاک نتیجه برعکس می شود. یعنی با افزایش چگالی خاک تنش وارد بر لوله بیشتر می شود. همچنین مشاهده شد که عملکرد لوله به ترتیب در خاک رس و ماسه ی سست، بهتر از ماسه ی متراکم است.

کلمات کلیدی: شریان حیاتی، لوله مدفون، انفجار، اندرکنش خاک و سازه

۱-۱- پیش‌گفتار

امروزه با وجود سلاح‌های مخرب با برد زیاد، دیگر جنگ‌ها به خطوط مقدم جبهه‌ها منحصر نمی‌شود. در هنگام جنگ خطر بمباران و موشک‌ها، تمامی شهرها را تهدید خواهد نمود. برای مقابله و خنثی کردن چنین تهدیداتی در کنار راهکارهای نظامی، انجام اقدامات پدافندی غیرعامل نیز راه‌حل بسیار مؤثری می‌باشد. تجربه نشان داده است، کشورهایی که از دفاع غیر نظامی قوی برخوردارند، کم‌تر در برابر تهدیدات راه دور (عملیات‌های خراب کارانه هوایی - موشکی) آسیب‌پذیر هستند.

با توجه به اهمیت استراتژیک ایران در منطقه‌ی خاورمیانه و نیز وقوع جنگ‌های متعدد در این منطقه طی سال‌های اخیر، لزوم توجه به توسعه‌ی سیستم‌های پدافند غیرعامل به موازات سیستم‌های پدافند عامل بیش از پیش مشخص می‌گردد. کشور ما به عنوان یکی از کشورهای استراتژیک دنیا که در طول تاریخ بارها مظلومانه مورد حملات تجاوزکارانه قرار گرفته است، بایستی از قدرت دفاعی بالای نظامی و غیرنظامی برخوردار باشد تا حوادث تلخ گذشته تکرار نشوند و دیگر هیچ کشور متخاصمی به خود جرأت حمله به حریم ایران اسلامی را ندهد. از جمله مواردی که در این بین حفاظت از آن‌ها امری ضروری می‌باشد، شریان‌های حیاتی است؛ تا با حفاظت از آن‌ها در برابر تهدیدات پیش رو، حیات جامعه تضمین شود.

شریان‌های حیاتی، آن‌گونه که از نامشان بر می‌آید، ضامن بقای جوامع می‌باشند. آن‌ها شامل راه‌ها، پل‌ها، تونل‌ها، خطوط انتقال (آب، نفت، گاز و...) و همچنین شبکه‌های مخابراتی و رسانه‌ای می‌باشند و به‌عنوان اصلی‌ترین اجزای هر شهر، در اولویت اول اهمیت قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، در صورت آسیب‌پذیر بودن و نقص در عملکرد یکی از شریان‌های حیاتی، فعالیت‌های شهری و یا امداد رسانی در زمان بحران فلج می‌شود و به این ترتیب خسارات جانی و مالی، رو به فزونی می‌گذارند.

۱-۲- هدف از اجرای طرح و اهمیت و ضرورت آن

اگر عوامل تهدیدکننده‌ی شریان‌های حیاتی را به دو دسته‌ی عوامل طبیعی و انسانی تقسیم شوند؛ به عنوان نمونه می‌توان به ترتیب زلزله و انفجار را نام برد. طی سال‌های اخیر وقوع حوادث تروریستی گوناگون در مورد سازه‌های مهم در سراسر جهان، سبب شده است که بارهای انفجاری مورد توجه ویژه‌ای قرار گیرند. در شهرهای بزرگ که فضاهای زیرزمینی برای بزرگراه‌ها، تونل‌ها و لوله‌های زیرزمینی کاربرد دارند، در صورت بروز حملات تروریستی خسارت‌های جانی و مالی قابل توجهی به این سازه‌ها وارد می‌شود. لوله‌های زیرزمینی که در انتقال آب، فاضلاب، نفت، گاز و... کاربرد گسترده‌ای دارند، می‌بایست در مقابل اثرات تخریبی انفجار طراحی گردند. زیرا انفجار می‌تواند با ارتعاشی که در پهنه‌ی وسیعی از محیط خاک ایجاد می‌کند، خرابی‌های زیادی را به وجود آورد. لذا پیش‌بینی بارهای ضربه‌ای دینامیکی و بررسی پاسخ رفتاری سازه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. طراحی قابل اطمینان و اقتصادی سازه‌ها نیازمند درک بهتر پارامترهای پیچیده‌ی مؤثر در این سازه‌ها می‌باشد. با توجه به ضرورت و

اهمیت این دسته از شریان‌های حیاتی، و در صورت وجود اطلاعات مناسب، قادر خواهیم بود متناسب با مشخصات خطوط لوله‌ی موجود، آثار احتمالی انفجار را بر آن‌ها پیش بینی، و در صورت لزوم اقدامات علاج بخشی در مورد آن‌ها انجام شود. به علاوه با داشتن چنین اطلاعاتی، طراحی خطوط لوله در آینده می‌تواند، دقیق تر و ایمن تر صورت گیرد و ملاحظات مربوط به پدافند غیرعامل شریان‌های حیاتی نیز به شکل مؤثرتری در آن لحاظ شود.

با نگاهی به ادبیات فنی موجود در زمینه‌ی مباحث مرتبط با انفجار مشخص می‌شود که عمده‌ی فعالیت‌های صورت گرفته در این زمینه، در سه بخش آزمایشات تمام مقیاس میدانی، مدل‌سازی‌های کوچک مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از روش سانتریفیوژ و توسعه‌ی روش‌های تحلیلی و نیز عددی متمرکز شده است. با توجه به توسعه قابل توجه روش‌های عددی در دهه‌های اخیر، امکان بررسی اثرات انفجار بر سازه‌های سطحی و زیرزمینی، با دقت بالا فراهم آمده است. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های مناسبی در توسعه روش‌های عددی و آزمایشگاهی برای مطالعه چنین سیستم‌هایی حاصل شده است. در این تحقیق با بررسی جدیدترین روش‌های به کار رفته برای مدل‌سازی پدیده انفجار و پاسخ‌های حاصل شده از سازه‌های زیرزمینی، اطلاعات جامعی به دست خواهد آمد.

۳-۱- روش‌ها و فنون اجرایی طرح

در این تحقیق مسئله‌ی اثر انتشار امواج انفجار بر روی خطوط لوله مدفون با استفاده از مدل سه بعدی اجزاء محدود به کمک نرم افزار Abaqus/CAE 6.10-1 شبیه‌سازی شد. سپس به بررسی اثرات انفجارهای سطحی بر روی خطوط لوله‌ی مدفون گاز، و پاسخ دینامیکی آن‌ها بسته به مشخصات و ویژگی‌هایشان، پرداخته شد. در این مدل، لوله با استفاده از المان پوسته‌ای، و خاک نیز با المان‌های سه بعدی مدل‌سازی شده است. در این مدل، اثر انفجار به صورت فشار خارجی بر روی سطح خاک قرار داده شده است.

در تحلیل مدل اثرات تغییر عمق دفن لوله، شدت و فاصله‌ی انفجار و همچنین اثرات تغییر در خصوصیات خاک اطراف لوله در حالات مختلف، اعمال و نتایج آن‌ها آورده شده است. خصوصیات فیزیکی و رفتاری مصالح سازه و خاک به طور دقیق با لحاظ کردن اندرکنش بین آن‌ها در نرم‌افزار مدل شده است.

۴-۱- شرح کار

ابتدا کلیات موضوع تحقیق بیان شد. در فصل دوم راجع به مدل‌های رفتاری مصالح بحث گردیده و دو مدل موهر- کولمب و دراگر- پراگر شرح داده شده اند. همچنین به بیان اندرکنش و مفهوم آن و کاربرد آن در مسائل تحلیلی و ارائه‌ی برخی از معادلات حاکم بر آن پرداخته شده است. در فصل سوم بر مفاهیم انفجار مروری شده است. فصل چهارم به اثر انفجار بر محیط خاکی اختصاص دارد و در مورد پارامترهای اثرگذار آن و همچنین ارتباط آن‌ها با مسئله مطالبی آورده شده است. در فصل پنجم نیز روند مدل‌سازی در نرم‌افزار و نتایج تحلیل‌ها در حالات مختلف بیان شده است. در پایان، نتیجه‌گیری و پیشنهادات جهت ادامه کار ارائه شده است.

۲- بررسی مدل‌های رفتاری و اندرکنش بین خاک و سازه

۱-۲- مدل الاستیسیته خطی

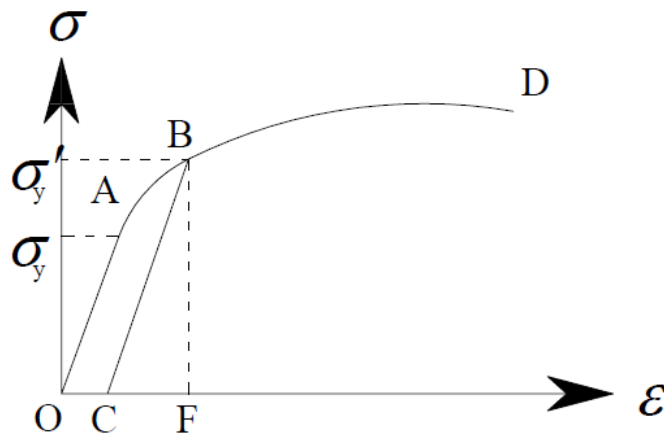
در مدل الاستیسیته میزان تغییر شکل، چه در بارگذاری و چه در باربرداری، منحصراً به میزان بار در آن بستگی دارد و در یک بار مفروض، وضعیت تغییر شکل در حالت بارگذاری و باربرداری یکسان است. مدل الاستیسیته‌ی خطی، مدلی بسیار معمول برای مصالح در مهندسی سازه می‌باشد؛ که بر فرض‌های زیر استوار است:

۱. هنگامی که تنش افزایش می‌یابد، کرنش ناشی از آن نیز با همان نسبت خطی افزایش می‌یابد؛
۲. هنگامی که تنش کاهش می‌یابد، کرنش ناشی از آن با همان نسبت خطی کاهش می‌یابد؛
۳. کرنش به وجود آمده در جهت عمود بر کرنش اعمال شده، با آن رابطه‌ی خطی دارد (اثر پواسون)؛
۴. مصالح همگن و پیوسته هستند.

فرض تنش-کرنش خطی، در محدوده‌ی تنش‌های کوچک، برای حوزه وسیعی از مصالح مهندسی معتبر است. به عنوان مثال این فرض برای فلزات در دمای معمولی، مناسب است. مدل خطی برای خاک، تنها در حالت تغییر شکل‌های کوتاه مدت رس و ماسه‌ی سست قابل قبول است [۱].

۲-۲- مدل کشسان-خمیری

شکل (۱-۲) رفتار تنش-کرنش ماده را در حالت یک‌بعدی نشان می‌دهد. مطابق شکل، رفتار ماده تا نقطه‌ی A به صورت کشسان و خطی است و بعد از آن با افزایش کرنش تا نقطه‌ی F، تنش به میزان σ_y (نقطه‌ی B) خواهد رسید. اگر از نقطه‌ی B باربرداری آغاز شود، پس از حذف کل بار وارده، کرنشی معادل CF به ماده بازگشته و کرنشی معادل پاره خط OC در آن باقی خواهد ماند. حال اگر سیستم از نقطه‌ی C مجدداً بارگذاری شود، رفتار ماده تا حد تنش σ_y به صورت کشسان و خطی است و سپس از یک رابطه‌ی غیرخطی تبعیت می‌کند. در واقع در این حالت پس از یک دوره باربرداری مجدد، تنش تسلیم ماده از σ_y به σ_y رسیده و جسم سخت‌تر شده است [۱].



شکل ۱-۲: رفتار تنش-کرنش ماده

به این گونه مصالح که حد تسلیم آنها، ضمن باربرداری و بارگذاری‌های مجدد افزایش یا کاهش می‌یابد، مصالح الاستیک-پلاستیک یا کشسان-خمیری می‌گویند. قانونی که روند افزایش سطح تنش تسلیم مصالح از آن تبعیت می‌کنند، قانون سخت‌شدگی و قانونی که روند کاهش سطح تنش تسلیم مصالح از آن پیروی می‌کنند، قانون نرم‌شدگی نام دارد [۱].

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon_p \quad (1-2)$$

که در این رابطه ε کرنش، ε^e کل کرنش کشسان (الاستیک) و ε_p کرنش خمیری (پلاستیک) است.

۳-۲- نظریه خمیری

قبل از بیان اصول این نظریه، قبول فرض‌های ساده‌کننده‌ای ضروری است. در اینجا فرض می‌شود ماده در ابتدا همگن و همسان است. همگن بودن به این معنی که ماده در تمام نقاط دارای خواص یکسان است؛ و همسان بودن به این معنی است که در یک نقطه مشخص، ماده دارای خواص مکانیکی مشابه در کلیه جهات می‌باشد. با قبول این فرضیات، در این بخش اصول نظریه خمیری یا پلاستیسیته بیان می‌شود [۱].

۴-۲- شرایط تسلیم ماده

همواره این سؤال مطرح است که تحت چه شرایطی ماده رفتار خمیری از خود نشان می‌دهد. برای پاسخ به این پرسش، باید یک رابطه عددی بین متغیر تنش و متغیر کرنش خمیری تعریف شود. به این رابطه عددی تابع تسلیم گویند. در حالت کلی این تابع را می‌توان به صورت رابطه زیر تعریف کرد:

$$F = f(\sigma, k) \quad (2-2)$$

که در این رابطه F تابع تسلیم، σ میدان برداری تنش و k ضریب سخت‌شوندگی است.

در رابطه (۲-۲) با ارضاء شرط $F < 0$ ، میدان تنش کشسان و در حالاتی از تنش که $F > 0$ ، میدان تنش خمیری حاصل می‌شود. در حالتی که $F = 0$ ، بایستی نمودار تابع F تعیین علامت گردد، به عبارتی اگر در این حالت $\partial F / \partial \sigma > 0$ باشد تمایل انجام کرنش‌های خمیری در پیش بوده و اگر $\partial F / \partial \sigma \leq 0$ باشد، تمایل به انجام کرنش خمیری موجود نیست [۱].

قانون سخت‌شوندگی اساساً، به گونه‌های مختلفی قابل تعریف و ارائه است. اثر این قانون در تابع تسلیم با ضریب سخت‌شوندگی حاصل می‌گردد. ضریب سخت‌شوندگی به دو صورت زیر قابل تعریف می‌باشد:

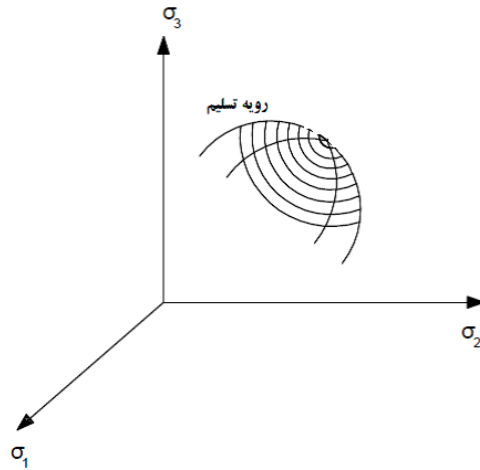
$$K = K(w^p) \quad (3-2)$$

$$K = K(\varepsilon^p) \quad (4-2)$$

که در این رابطه w^p کار خمیری و ε^p بردار کرنش خمیری است.

امکان تعریف تابع تسلیم برحسب تنش‌های اصلی یا سایر مستقل‌های تنشی، که در هر نقطه از ماده به ازای یک بارگذاری مشخص قابل محاسبه هستند، وجود دارد. لذا می‌توان رابطه‌ی (۴-۲) را در فضای سه بعدی تنش‌های اصلی ترسیم نمود. شکل (۲-۲) نمایش ترسیمی این رابطه را نشان می‌دهد. این شکل، رابطه‌ی (۲-۲) در فضای تنش

اصولی یک سطح حدی را نمایش می دهد که به آن «حد تسلیم» می گویند. نقاط درون سطح تسلیم معرف رفتار خمیری ماده می باشد. فضای خارج از سطح، فضای تغییر و رشد تابع تسلیم در ماده را نشان می دهد [۱].



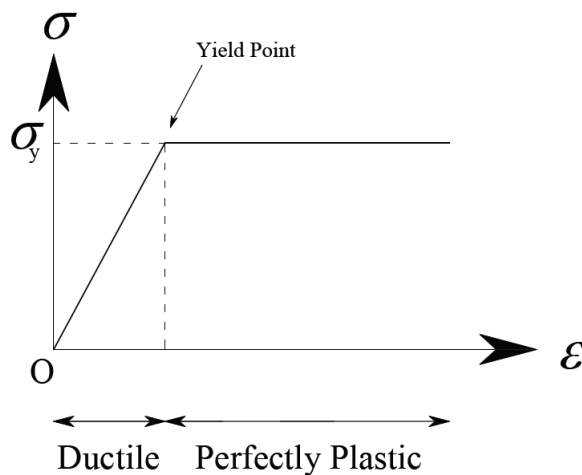
شکل ۲-۲: نمایش ترسیمی حالت تسلیم

به عنوان مثال می توان رابطه ی زیر را به عنوان معیار تسلیم ماده در حالت یک بعدی در نظر گرفت :

$$F(\sigma) = \sigma - \sigma_y \quad (۵-۲)$$

که در آن σ تنش محوری موجود و σ_y تنش تسلیم محوری است. در رابطه فوق، به ازای $F < 0$ رفتار ماده کشسان، و به ازای $F > 0$ رفتار ماده خمیری است.

برخی از مصالح سازه ای تا یک حد مشخص، ارتجاعی رفتار نموده و سپس یا می شکنند (مصالح شکننده) و یا آن که رفتار پلاستیکی از خود نشان می دهند. معمولی ترین مدل برای رفتار پلاستیک، «مدل پلاستیک کامل» است. بدین معنی که مصالح در آن سوی حد پلاستیک، پیوسته با تنش تسلیم σ_y مقاومت می نمایند و هیچ گونه افزایشی در تنش و مقاومت رخ نمی دهد (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳: نمودار تنش - کرنش مواد الاستوپلاستیک کامل

۲-۵- مدل موهر- کلمب (Mohr-Coulomb)

معیار موهر-کلمب قبل از ارائه‌ی معیارهای ترسکا^۱ و فون مایسز^۲ برای فلزات، برای مصالح ژئوتکنیکی پیشنهاد گردید و اولین معیاری است که در آن اثر تنش‌های هیدرواستاتیکی نیز منظور شده است. تابع عمومی تسلیم را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$F(I_1, I_2, I_3) = F_e \quad (6-2)$$

معیار موهر-کلمب بیانی عملی از معادله‌ی فوق است و نیز، بهترین معیار گسیختگی در ژئومکانیک به حساب می‌آید. براساس این معیار، گسیختگی وقتی رخ می‌دهد که تنش برشی و تنش نرمال وارده بر المان مصالح در رابطه‌ی زیر صدق نمایند:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (7-2)$$

که در آن c و ϕ به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی هستند. برای حالت خاص مصالح بدون اصطکاک داخلی مثل فلزات و یا رس که در آنها $\phi = 0$ است، معادله فوق با معیار تنش برشی ماکزیمم ترسکا معادل می‌شود. اگر شرط $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ صحیح باشد معیار موهر-کلمب به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = -(\sigma_1 + \sigma_2) \sin \phi + 2c \cdot \cos \phi \quad (8-2)$$

معیار گسیختگی موهر-کلمب در فضای تنش‌های اصلی یک هرم شش ضلعی را ترسیم می‌نماید. جهت دستیابی به یک تقریب بهتر و در شرایط وقوع تنش کششی، می‌توان معیار موهر-کلمب را با یک رابطه‌ی محدود کننده‌ی ماکزیمم مقاومت کششی، ترکیب نمود (معیار موهر-کلمب اصلاح شده).

$$\sigma = F_t < 0 \quad (9-2)$$

که در آن F_t مقاومت کششی می‌باشد که در آن آزمایش بدست می‌آید. هرچند معیار موهر-کلمب بسیار ساده است ولی در فرم گرافیکی سطح رویه آن، گوشه و شکستگی وجود دارد در مرحله آنالیز عددی مشکلاتی را در برخواهد داشت. ضمن این که تنش‌های اصلی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma_1 = 2 \cos \theta \sqrt{\frac{j_2}{3}} + I_1/3 \quad (10-2)$$

$$\sigma_3 = 2 \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \sqrt{\frac{j_2}{3}} + I_1/3 \quad (11-2)$$

با جایگذاری معادلات فوق در معادله قبلی معیار موهر-کلمب به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{I_1 \sin \phi}{3} + \sqrt{j_2} \left[(1 + \sin \phi) \cos \theta - (1 - \sin \phi) \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] - C \cdot \cos \phi = 0 \quad (12-2)$$

این معیار از اثر تنش اصلی میانه روی مقاومت برشی صرف نظر می‌کند. با این حال در بیشتر موارد به خاطر سادگی و درک فیزیکی ملموس آن، در مسائل مهم و عملی مهندسی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

1- Tresca
2- Von mises

مزایای مدل موهر - کلمب :

- ✓ سادگی و درک فیزیکی راحت؛
- ✓ معتبر بودن برای بیشتر خاک‌ها؛
- ✓ ساده بودن معادله ریاضی؛
- ✓ کم بودن تعداد پارامترهای معادله و استخراج آن‌ها از آزمایش‌های سه محوری و برش مستقیم.

بر اساس این نظریه، مطابق معادله تسلیم برای وقوع گسیختگی، سطح خاصی وجود دارد، لیکن در عمل ممکن است چنین سطحی به وضوح تعریف شده نبوده و تحت زاویه مشخصی رخ ندهد. این معیار بیانگر یک رابطه‌ی خطی بین تنش قائم و تنش برشی است که البته در سطوح تنش‌های پایینی، این خط قابل قبول است. لیکن در تنش‌های بالا، پوش مربوطه‌ای که حاصل می‌شود، معادله‌ای غیرخطی خواهد داشت. با قراردادن $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$ می‌توان مقاومت کششی تک محوری مصالح را به دست آورد:

$$\sigma_t = -2C \cdot \cos\phi / (1 + \sin\phi) \quad (13-2)$$

با انجام آزمایشات مختلف بر روی مصالح چنین نتیجه‌گیری شده است که این رابطه، مقاومت کششی را بیش از مقدار واقعی مصالح نشان می‌دهد. لذا می‌بایست مدل در قسمت کششی رویه اصلاح گردد. اثر تنش میانه در این معیار در نظر گرفته نمی‌شود. رویه‌ی فضایی مدل نیز دارای گوشه‌های تیز است [۱].

۲-۶- مدل دراگر - پراگر (Drucker-Prager)

شکل معیار موهر - کلمب برحسب J_1, J_2, J_3 نسبتاً پیچیده بوده و باعث بروز مشکلاتی در بیان رفتار جریان پلاستیک در گوشه‌ها می‌شود. به این منظور برای مقاصد عملی غالباً در آنالیز اجزای محدود الاستوپلاستیک در حالت عمومی تنش‌ها از یک رویه تسلیم تقریباً ملایم استفاده می‌شود مدل کاملاً پلاستیک دراگر - پراگر که از اثر J_3 بر روی سطح مقطع رویه‌ی گسیختگی صرف نظر می‌نماید، می‌تواند به عنوان اولین سعی برای تقریب معیار شناخته شده‌ی موهر - کلمب با یک تابع ملایم ساده بکار رود [۱].

$$F = aI_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (14-2)$$

رویه‌ی تسلیم یا گسیختگی معادله‌ی فوق‌الذکر در فضای تنش‌های اصلی، نمایانگر یک مخروط با مقطع دایره است که نسبت به محور تنش‌های هیدرواستاتیک متقارن می‌باشد. رویه‌ی تسلیم دراگر - پراگر در واقع توسعه یافته رویه فون مایسز برای مصالحی مثل خاک و بتن است. از این رو، آن را معیار فون مایسز پیشرفته نیز می‌گویند. در معیار دراگر - پراگر I_2 نامتغیر اول تنش، J_2 نامتغیر دوم تنش تفاضلی، α و k پارامترهای مدل هستند.

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_{kk} \quad (15-2)$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - I_1 \frac{\delta_{ij}}{3} \quad (16-2)$$

$k=1,2,3$
 $ij=1,2,3$