

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل
سال، ششم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶، (پیاپی ۲۹): صص ۱-۱۲

تحلیل اثرات انفجار سطحی بر روی تونل‌های زیرزمینی

صفا پیمان^{۱*}، محمدحسین تقوی پارسا^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۰۸

چکیده

بررسی آثار انفجار ناشی از حمله‌های هوایی و موشکی بر روی سازه‌های مدفون یکی از موضوعات دارای اهمیت در پدافند غیرعامل محسوب می‌باشد. در این مقاله از روش شبیه‌سازی عددی برای تحلیل و شبیه‌سازی اثر انفجار سطحی روی تونل مدفون استفاده می‌گردد. شبیه‌سازی عددی با استفاده از هیدروکد توانمند LS-DYNA انجام شده است. فرآیند شبیه‌سازی آثار ناشی از انفجار بر سازه‌های مدفون شامل چهار مرحله؛ شکل‌گیری چاله انفجاری، انتشار امواج از میان خاک، اندرکنش خاک و سازه مدفون و پاسخ دینامیکی سازه می‌باشد. به منظور ارزیابی پاسخ دینامیکی سازه در برابر انفجار تحلیل ابعادی شامل اثر وزن خرج انفجاری و عمق سازه مدفون انجام می‌گیرد و موج فشاری پیش‌رونده در خاک، تنش موثر و مایسز و شتاب بر روی دیواره بررسی می‌گردد. برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده از حل عددی با پاسخ‌های حاصل از روابط تحلیلی و آیین‌نامه‌ای مقایسه شده است.

کلیدواژه‌ها: انفجار سطحی، شبیه‌سازی عددی، سازه مدفون، پاسخ دینامیکی.

۱- مربی و عضو هیات علمی دانشگاه جامع امام حسین^(ع)، (speyman@mail.kntu.ac.ir) - نویسنده مسئول

۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین^(ع)

۱- مقدمه

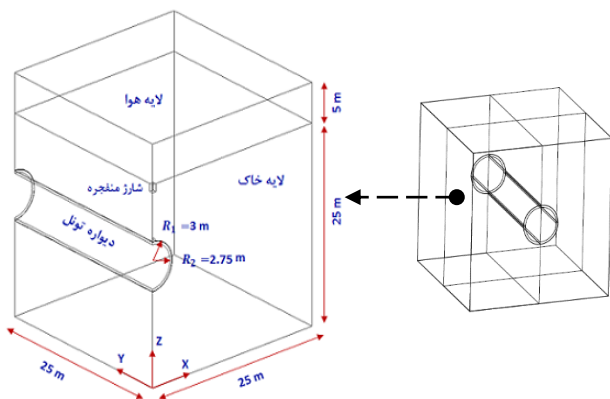
در این مقاله با استفاده از تحلیل عددی اثرات انفجار سطحی بر تونل مدفون انجام می‌شود. در این راستا با استفاده از مطالعه پارامتری، اثر وزن ماده منفجره و عمق دفن بر رفتار سازه زیر زمینی مطالعه می‌شود.

۲- مدل سازی عددی

در ابتدا یک مدل عددی با استفاده از هیدروکد LS-DYNA به منظور ارزیابی پاسخ سازه مدفون در خاک تحت اثر موج انفجار، معرفی می‌شود.

۲-۱- مدل هندسی

مدل هندسی مورد بررسی در این مسئله به ترتیب شامل چهار لایه: هوا، خراج انفجاری، لایه خاک و دیواره تونل در نظر گرفته شده است. کلیه ابعاد هندسی در شکل ۱ نشان داده شده است. تونل مورد نظر دارای سطح مقطع دایره‌ای با قطر داخلی ۵/۵ و قطر خارجی ۶ متر می‌باشد. عمق دفن این تونل در داخل خاک از ۷ تا ۱۴ متر متغیر در نظر گرفته شده است. ضمناً فرض می‌گردد، ماده انفجاری به شکل مکعبی و در در نقطه میانی بالای تونل در تماس با لایه‌های هوا و خاک قرار گرفته است. به منظور کم نمودن حجم محاسبات در تحلیل رایانه‌ای، با توجه به تقارن مدل، یک چهارم محیط مورد بررسی شبیه‌سازی می‌شود.



شکل ۱ - مدل هندسی مسئله، الف) مدل کامل، ب) مدل با تقارن $\frac{1}{4}$

۲-۲- المان بندی مدل هندسی

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد، پس از ساخت مدل هندسی، مدل المان محدود هر یک از لایه‌ها با استفاده از المان‌های هشت گرهی SOLID 164 ایجاد شده است. اندازه متوسط المان‌های مش بندی ۵۰ سانتیمتر می‌باشد.

بی تردید مهندسان به اهمیت طراحی صحیح سازه‌های ایمن در برابر بارگذاری انفجاری واقف هستند. سازه‌های مهندسی دارای کاربردهای متعدد و مختلفی می‌باشند و به همین دلیل، نوع بارگذاری بر روی این سازه‌ها متغیر خواهد بود.

بی شک طراحی یک سازه سطحی با مشخصاتی که بتواند در برابر بارگذاری‌های انفجاری متعدد مقاومت مناسب داشته باشد غیرممکن نیست، ولی قطعاً چنین طرحی دارای هزینه‌های اجرایی بسیار بالا خواهد بود. برای غلبه بر این مشکل سازه‌های پناهگاهی و زیرزمینی مدفون مورد توجه قرار گرفته‌اند. دلیل انتخاب چنین سازه‌هایی مربوط به استفاده از خاصیت میرایی و ویسکوالاستیک خاک است که دامنه موج شوک ناشی از انفجار سطحی را به حداقل می‌رساند. در این موارد امکان صرفه‌جویی در زمینه طراحی و اجرای سازه مقاوم در برابر انفجار وجود خواهد داشت.

پژوهش‌های بسیاری برای تعیین بار انفجار سطحی بمب‌ها انجام گرفته است. در بیشتر این تحقیقات فشار میدان آزاد حاصل از این بمب‌ها بررسی شده است. فشار میدان آزاد، بار انفجار در خاک در نبود سازه زیرزمینی است. فشار ایجاد شده در اثر انفجار بمب با در نظر گرفتن سازه زیرزمینی با فشار میدان آزاد متفاوت می‌باشد. این تفاوت به دلیل برخورد امواج انفجار به سازه زیرزمینی و بازتاب موج‌های فشاری از سطح سازه است. لامسن [۱] بررسی‌های ابتدایی تعیین فشار میدان آزاد انفجار بمب را انجام داد. در سال‌های اولیه دهه ۱۹۸۰ آزمایش‌های متعددی در مرکز تحقیقات آب راه‌های آمریکا روی انفجار سطحی بمب‌ها انجام گرفت. دریک و لیتل [۲] با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها روابطی برای تعیین بیشینه فشار میدان آزاد و چگونگی کاهش آن ارائه کردند. فریسنهان و وستین [۳] نیز روابطی برای تعیین بیشینه فشار میدان آزاد در خاک اشباع و غیراشباع پیشنهاد کردند. در میان این روش‌ها، رابطه‌های ارائه شده توسط دریک و لیتل کاربرد گسترده‌ای در پژوهش‌های محققان پیدا و در آیین‌نامه TM5-855-1 ارتش آمریکا نیز مورد استفاده قرار گرفتند.

برای طراحی سازه‌های مدفون تحت اثر بارهای انفجاری نیاز به در نظر گرفتن رفتار کل سیستم شامل شکل‌گیری چاله انفجاری، انتشار امواج شوک از میان خاک، اندرکنش خاک- سازه مدفون و پاسخ سازه در یک مدل شبیه‌سازی شده، می‌باشد. چنین مدلی قادر خواهد بود، از این پدیده شبیه‌سازی نزدیک‌تری به واقعیت ارائه دهد.

صورت زیر [۶] نوشته می‌شود:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) \times e^{\left(-\frac{R_1 \rho_0}{\rho} \right)} + B \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) \times e^{\left(-\frac{R_2 \rho_0}{\rho} \right)} + \frac{\omega \rho^2}{\rho_0} E_{mo} \quad (2)$$

پارامترهای $R_1, R_2, B, A, \omega, \rho_0$ و ثابت‌های ماده منفجره می‌باشند که برای بسیاری از مواد با استفاده از آزمایش‌های دینامیکی تعیین شده‌اند. چگالی ماده منفجره و ρ چگالی محصولات انفجار می‌باشد. چگالی نسبی اولیه $\frac{\rho}{\rho_0}$ نیز جزو مفروضات است. بنابراین، مقادیر غیر صفر از انرژی مخصوص اولیه E_{mo} بایستی تعیین گردد.

در این آنالیز، شارژ منفجره TNT با معادله حالت JWL مطابق پارامترهای ارائه شده در مرجع [۷] که در جدول ۲ ارائه شده‌اند، مدل‌سازی شده است.

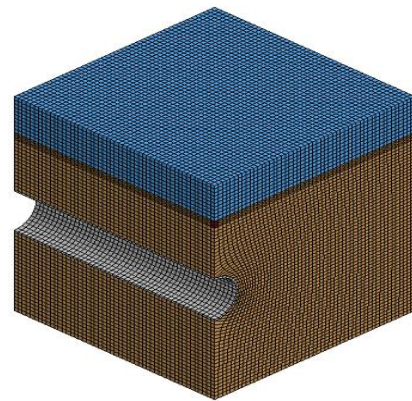
جدول ۲- ضرایب مدل شارژ منفجره TNT [۷]

| ρ (gr/cm ³) | v_D (m/s) | P_{CJ} (MPa) | A (MPa) | B (MPa) |
|------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|---------------------------|
| ۱/۶۳ | ۶۹۳۰ | ۲/۱×۱۰ ^۴ | ۳/۷۳×۱۰ ^۵ | ۳/۷۴×۱۰ ^۵ |
| R_1 | R_2 | ω | V | E_0 (J/m ³) |
| ۴/۱۵ | ۰/۹ | ۰/۳۵ | ۱ | ۶×۱۰ ^۹ |

۲-۴- مدل خاک

در نمونه مورد بررسی لایه خاک با یک مدل Soil & Foam در نرم‌افزار که توسط کریگ در سال ۱۹۷۲ ارائه شده است، مدل‌سازی می‌گردد. این یک مدل ساده است که در بعضی مواقع رفتاری همانند سیال از خود نشان می‌دهد [۸]. پارامترهای اصلی در این مدل شامل چگالی جرمی ρ ، مدول برشی G، مدول بالک K_u در مسیر باربرداری، ثابت a_0, a_1 و a_2 مربوط به توابع تنش و فشار P_{cut} برای شکست کششی می‌باشند.

در نمودار شکل ۳ فشار را بر حسب کرنش حجمی برای خاک ماسه‌ای- شنی مطابق با این مدل ترسیم شده شده است. همچنین جدول ۳ پارامترهای اصلی در مدل Soil & Foam را مطابق مرجع [۹] بیان می‌کند. لازم به ذکر است این مدل برای لایه خاک از جنس ماسه‌ای شنی در نظر گرفته شده است و برای سادگی در محاسبات کل عمق خاک تنها از یک جنس انتخاب شده است.



شکل ۲- مدل کامل المان محدود در LS-DYNA

۲-۳- تعیین مدل و معادله حالت مواد

در این مرحله مدل‌های مادی برای هر یک از قسمت‌ها معرفی می‌شوند. در کل چهار نوع مدل مواد در این مسئله وجود دارد: هوا، ماده انفجاری، خاک و پوشش بتنی تونل.

لایه هوا عمدتاً با مدل ماده Null و معادله حالت Linear Polynomial مدل‌سازی می‌شود. در این معادله حالت رابطه فشار به صورت معادله زیر تعریف می‌شود:

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0 \quad (1)$$

در رابطه (۱) که پارامتر μ به صورت $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ تعریف شده

است. پارامترهای دیگر ρ چگالی، ρ_0 چگالی مرجع (اسمی) و C_0 تا C_6 ضرایب معادله می‌باشند. پارامتر E_0 نیز انرژی درونی اولیه از حجم مخصوص مرجع بر واحد حجم است. جدول ۱ پارامترهای مورد نیاز برای مدل هوا را مطابق مراجع [۴ و ۵] ارائه می‌دهد.

جدول ۱- ضرایب مدل هوا [۴ و ۵]

| ρ (gr/cm ³) | C_0 | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 | C_6 | E_0 (J/m ³) |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------|
| ۱/۲۹ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰ | ۲/۵×۱۰ ^۹ |

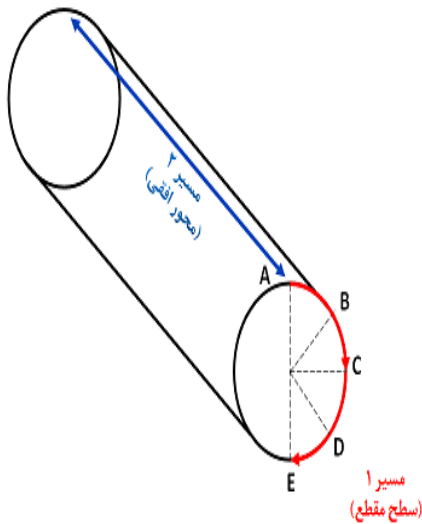
ماده منفجره با استفاده از معادله حالت JWL مدل‌سازی شده است که فشار ایجاد شده ناشی از انبساط محصولات انفجار یا انرژی آزاد شده شیمیایی را شبیه‌سازی می‌نماید. این مدل به صورت گسترده در مهندسی انفجار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

معادله حالت JWL در ترم‌های انرژی اولیه بر واحد جرم E_{mo} به

تونل، به منظور ارزیابی پاسخ دینامیکی دیواره، در شکل ۴ نشان داده شده است. مسیر ۱ در راستای عرضی است که برای تحلیل در این مسیر ۵ نقطه روی سطح مقطع انتخاب شده‌اند. مسیر ۲ نیز به صورت محور افقی در راستای طولی است که فاصله افقی از مرکز خرج انفجاری در محدوده ۰ تا ۲۰ m مورد بررسی قرار خواهد گرفت. جهت صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های انجام‌شده، یک نمونه از این نتایج با نتایج تحقیق انجام‌شده در دانشگاه تونجی چین که بر روی سازه تونل مترو انجام شده است، مقایسه می‌گردد.

جدول ۵- حالت‌های محاسباتی

| مورد بررسی | عمق تونل (m) | TNT (Kg) |
|------------|--------------|----------|
| ۰ | - | ۱۰۰۰ |
| ۱ | ۷ | ۳۰۰ |
| ۲ | ۷ | ۵۰۰ |
| ۳ | ۷ | ۱۰۰۰ |
| ۴ | ۱۴ | ۳۰۰ |
| ۵ | ۱۴ | ۵۰۰ |
| ۶ | ۱۴ | ۱۰۰۰ |



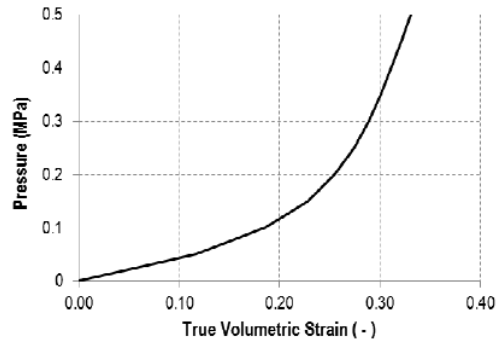
شکل ۴- دو مسیر مورد بررسی در راستای طولی و عرضی

۳-۱- انتشار و پیشروی امواج در خاک

شکل ۵ پیشروی موج شوک در خاک را در زمان‌های مختلف برای حالت اول محاسباتی جدول ۵ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده برای مدل ماده خاک ماسه‌ای - شنی [۹]

| ρ (gr/cm ³) | G (MPa) | K _a (MPa) | a ₀ | a ₁ | a ₂ | p _{cut} (MPa) |
|------------------------------|---------|----------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|
| ۱/۲۵ | ۱/۷۲ | ۵/۵۱ | ۰ | ۰ | ۰/۸۷ | ۰ |



شکل ۳- نمودار فشار- کرنش حجمی برای خاک ماسه‌ای-شنی [۱۴]

۳-۲- مدل دیواره تونل

دیواره تونل با مدل ماده Plastic Kinematic مدل‌سازی شده است. این یک مدل ترکیبی است که در آن از ضریب سخت‌شوندگی β به منظور تنظیم مشخصات سهم سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سخت‌شوندگی سینماتیک استفاده شده است.

پارامترهای اصلی در این مدل شامل چگالی جرمی ρ ، مدول یانگ E، ضریب پواسون ν ، تنش تسلیم σ_y ، مدول تماسی E_{TAN} ، پارامتر سخت‌شوندگی β و کرنش شکست برای المان‌های فرسایشی ϵ_f می‌باشند. لازم به ذکر است دیواره تونل معمولاً از بتن مسلح طراحی می‌شود. لذا میلگردهای فولادی و بتن به صورت کاملاً ترکیب‌شده مطابق با اصل سختی معادل EI در نظر گرفته شده است. جدول ۴ پارامترهای مدل سازه تونل را ارائه می‌دهد. [۱۰]

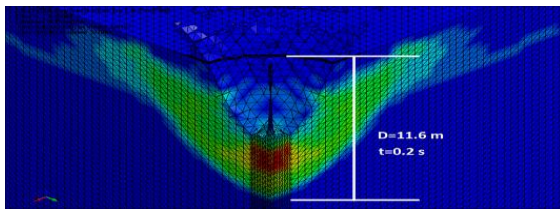
جدول ۴- ضرایب مدل ماده دیواره تونل [۱۰]

| ρ (gr/cm ³) | E (GPa) | ν | σ_y (MPa) | E_{tan} (MPa) | β | ϵ_f |
|------------------------------|---------|-------|------------------|-------------------|---------|--------------|
| ۲/۶۵ | ۳۹/۱ | ۰/۲۵ | ۱۰ ^۲ | ۴×۱۰ ^۳ | ۰/۵ | ۰/۸ |

۳-۳- بحث و بررسی نتایج

مطالعه پارامتری در این مسئله، مطابق حالت‌های محاسباتی که در جدول ۵ بیان شده است و شامل مقادیر مختلف از جرم خرج انفجاری و عمق تونل می‌باشند، صورت گرفته است. در حالت اول، وضعیت بدون حضور تونل (میدان آزاد) بررسی شده است و در شش وضعیت دیگر، پاسخ دینامیکی سازه تونل در عمق و با جرم خرج انفجاری متفاوت ارزیابی می‌شود.

دو مسیر مورد بررسی در سازه، حول محور افقی و سطح مقطع

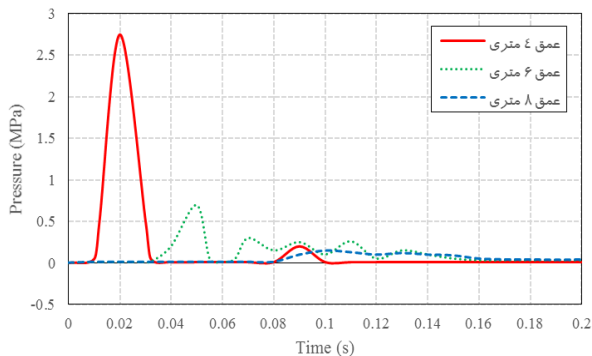


شکل ۶ - منطقه پایدار تحت تأثیر انفجار در خاک پس از ۰/۲ s

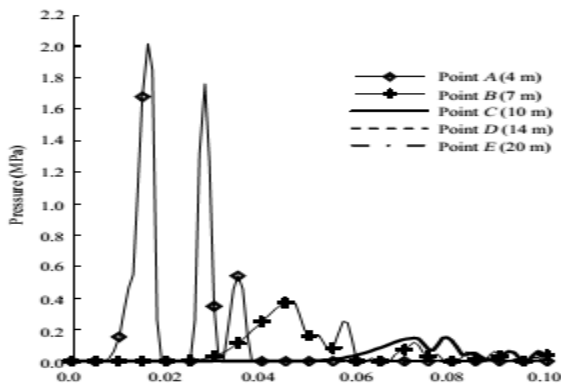


شکل ۷ - چاله انفجاری ایجاد شده در یک انفجار

همان‌گونه که اشاره شد یک نمونه از نتایج بررسی‌هایی که در دانشگاه تونجی چین بر روی سازه تونل مترو انجام شده است در شکل ۹ برای مقایسه و صحت‌سنجی نتایج نشان داده شده است. اختلاف نتایج عددی مقاله و نتایج دانشگاه تونجی در انتخاب نوع خاک است. در تحقیق دانشگاه تونجی خاک مدل شده از نوع ماسه نرم در نظر گرفته شده است.



شکل ۸ - امواج فشاری در خاک در اعماق مختلف (حالت محاسباتی)



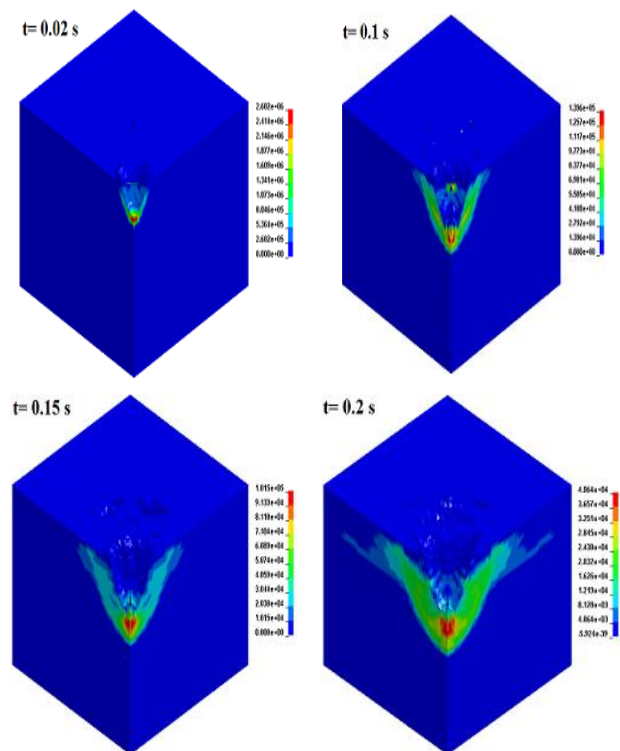
شکل ۹ - نتایج تحقیقات دانشگاه تونجی بر روی سازه تونل مترو [۱۰]

می‌شود، امواج فشاری در خاک به صورت جبهه نیم‌کره‌ای پیشروی می‌کنند. همچنین جبهه موج با پیشروی در خاک بزرگ‌تر می‌گردد.

مطابق با شکل ۶ منطقه اثرگذاری امواج در محدوده ۱۱/۶ متر پایین‌تر از سطح زمین است که تنها در مدت‌زمان ۰/۲ ثانیه شکل گرفته است. با توجه به پیشروی موج بعد از زمان ۰/۲ ثانیه مشخص می‌گردد که امواج از این زمان به بعد فرسایش یافته و ادامه گسترش آنها در خاک متوقف شده است.

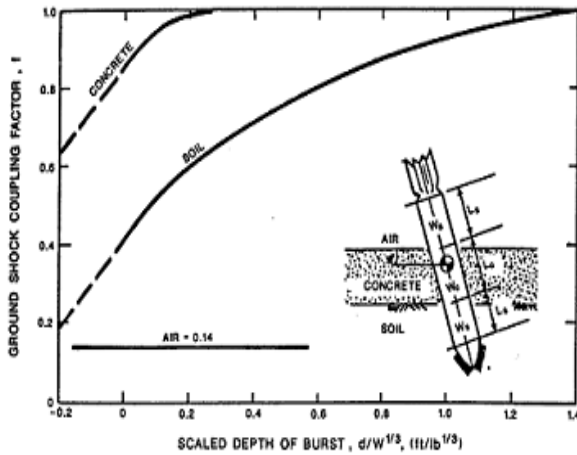
یک نمونه واقعی از شکل‌گیری چاله انفجاری در اثر انفجار سطحی در شکل ۷ نشان داده شده است. قدرت تخریب بسیار بالای این انفجار باعث ایجاد چاله‌ای به قطر ۳۰ m و عمق ۱۰ m شده است.

شکل ۸ مقادیر امواج فشاری را در خاک نسبت به زمان در اعماق مختلف (۴، ۶ و ۸ m) نشان می‌دهد. طبق تعاریف آزمایش آلکسنکو [۸] و مطابق شکل ۱۰، این نقاط (اعماق ۴، ۶ و ۸ m) در محدوده مرکزی جبهه موج می‌باشند که امواج فشاری در آنها مهم‌ترین عامل شوک ایجاد شده در زمین است. در شکل ۸ پیشروی موج و همچنین فرسایش آن در خاک مشاهده می‌گردد.



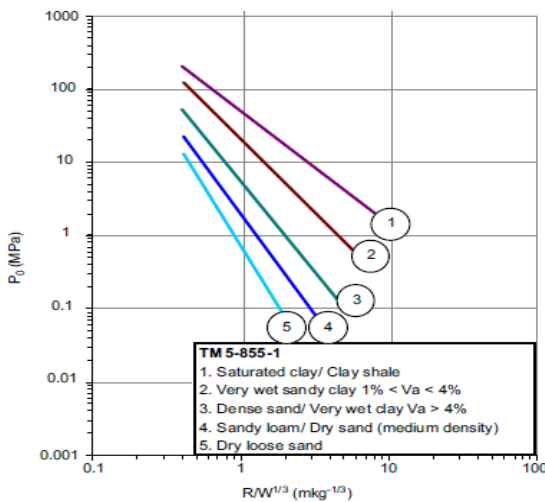
شکل ۱۰ - کانتور فشار در خاک در زمان‌های مختلف برای حالت محاسباتی

شتاب می‌باشند. ضرایب معادلات ۳ و ۴ در جدول ۶ از مرجع [۱۱] برای انواع خاک ارائه شده است. خاک نرم مورد بررسی در این مقاله معادل سطر پنجم جدول ۶ است.



شکل ۱۱- نمودار ضریب جفت‌شدگی بر حسب فاصله مقیاسی $\frac{d}{W^{1/3}}$ [۱۲]

با توجه به مرجع [۱۲] مقادیر پیک فشار انواع خاک بر حسب فاصله مقیاسی در آیین‌نامه ارتش آمریکا (TM5-855-1) با توجه به مشخصات آنها در نمودار شکل شماره ۱۲ ترسیم شده است.

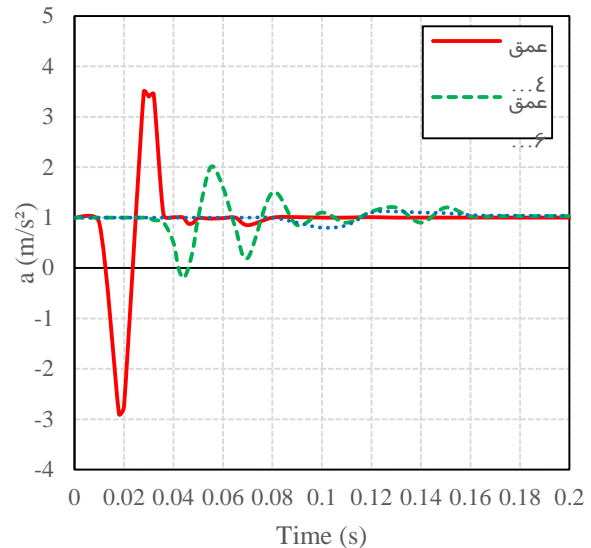


شکل ۱۲- پیک فشار انواع خاک بر حسب فاصله مقیاسی در آیین‌نامه ارتش آمریکا (TM5-855-1) [۱۳]

با استفاده از ضرایب ارائه‌شده برای نوع چهارم خاک در جدول ۶ و مطابق شکل ۱۱ با فرض $f \approx 0.41$ می‌توان نتایج عددی به دست آمده را با مقادیر ارائه‌شده در آیین‌نامه TM5-855-1 که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، مقایسه نمود (جدول‌های ۷ و ۸).

۳-۲- مقایسه بین نتایج و آیین‌نامه ارتش آمریکا

شکل ۱۱ شتاب عمودی اعماق ۴، ۶ و ۸ متری را نشان می‌دهد. مقادیر حداکثر در اعماق ۴، ۶ و ۸ m به ترتیب $\frac{m}{s^2}$ ۳۳۳۰، $\frac{m}{s^2}$ ۱۹۷۰ و $\frac{m}{s^2}$ ۳۲۰ می‌باشند.



شکل ۱۰- شتاب عمودی در خاک در اعماق مختلف (حالت محاسباتی ۰)

لازم به ذکر است زمانی که خرج انفجاری متراکم و منفجر می‌شود، یک موج انفجاری ایجاد می‌گردد که تاکنون روابط متعددی توسط محققان مختلف برای محاسبه بیشینه فشار شوک این امواج ارائه شده است. در این میان آیین‌نامه ارتش آمریکا (TM5-855-1) [۹] به طور گسترده در متون تخصصی و گزارش‌های تحقیقاتی به منظور تخمین پارامترهای شوک ایجادشده در زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطابق این آیین‌نامه معادلات زیر به ترتیب برای مقادیر پیک فشار و شتاب ارائه شده‌اند [۱۱]:

$$P_p = 0.407 f(\rho c) \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (3)$$

$$a_p = \frac{39.8}{W^{1/3}} (fc) \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-(n+1)} \quad (4)$$

پارامترهای P_p مقدار پیک فشار (Pa)، f ضریب جفت‌شدگی وابسته به عدد مقیاسی انفجار $\left(\frac{d}{W^{1/3}}\right)$ مطابق نمودار شکل ۱۲، d عمق نفوذ خرج، ρ_c امپدانس آکوستیکی، c سرعت ارتعاش، R فاصله از منبع انفجار، W جرم ماده منفجره، n ضریب فرسایش و a_p پیک

جدول ۶- مشخصات خاک برای محاسبه پارامترهای شوک زمینی [۱۲]

| چگالی $\rho \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ | سرعت ارتعاش $c \left(\frac{m}{s}\right)$ | امپدانس آکوستیک $\rho_c \left(10^6 \frac{Pa \cdot s}{m}\right)$ | ضریب تأثیر N | نوع خاک |
|---|---|--|-----------------|--|
| ۲۰۸۰-۱۹۲۰ | >۱۵۲۴ | ۴۰/۶۸-۳۳/۹ | ۱/۵ | (1) Heavy saturated clays and clay shale |
| ۱۹۸۴-۱۷۶۰ | ۱۵۲۴ | ۲۹/۳۸ | ۲/۵-۲/۲۵ | (2) Saturated sandy clays and sands with air voids < 1% |
| ۱۷۴۴ | ۴۷۸/۶۸ | ۹/۹۴۴ | ۲/۵ | (3) Dense sand with high relative density, |
| ۲۰۰۰-۱۹۲۰ | ۵۴۸/۶۴ | ۱۰/۸۴۸ | ۲/۵ | wet sandy clay with air voids > 4% |
| ۱۹۸۴ | ۳۰۴/۸ | ۴/۹۷۲ | ۲/۷۵ | (4) Sandy loam, loess dry sands and backfills |
| ۱۶۰۰-۱۴۴۰ | ۱۸۲/۸۸ | ۲/۱۷۲ | ۳/۲۵-۳ | (5) Loose, dry sands and gravels with low relative density |

جدول ۷- مقایسه بین پیک فشار به دست آمده از نتایج عددی و آیین‌نامه

| W (kg) | R (m) | $\frac{R}{W^{\frac{1}{3}}}$ | پیک فشار (MPa) | | |
|---|----------|-----------------------------|----------------|------------|-------------|
| | | | آیین‌نامه | نتایج عددی | درصد اختلاف |
| $n=2/75 \rho_c = 4/972 \text{ MPa} \cdot s/m$ | | | | | |
| | ۴ | ۰/۶۳ | ۳/۴۲ | ۲/۷۴ | ۱۹ |
| ۳۰۰ | ۶ | ۰/۹۵ | ۱/۱۲ | ۰/۶۴ | ۴۲ |
| | ۸ | ۱/۲۶ | ۰/۵ | ۰/۱۱ | ۷۸ |

جدول ۸- مقایسه بین پیک شتاب به دست آمده از نتایج عددی و آیین‌نامه

| W (kg) | R (m) | $\frac{R}{W^{\frac{1}{3}}}$ | پیک فشار (MPa) | | |
|-----------------------------------|----------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| | | | آیین‌نامه | نتایج عددی | درصد اختلاف |
| $c = 304/8 \text{ (m/s)}, n=2/75$ | | | | | |
| | ۴ | ۰/۶۳ | $5/21 \times 10^{-3}$ | $3/9 \times 10^{-3}$ | ۲۳/۸ |
| ۳۰۰ | ۶ | ۰/۹۵ | $1/12 \times 10^{-3}$ | $1/2 \times 10^{-3}$ | ۷/۱ |
| | ۸ | ۱/۲۶ | $0/38 \times 10^{-3}$ | $0/11 \times 10^{-3}$ | ۷۱/۸ |

ولی تفاوت اندکی بین آن‌ها وجود دارد. این تفاوت از دو دیدگاه قابل تفسیر است:
۱- در آیین‌نامه فرض بر این است که عمق خرج دفن شده به اندازه

همان‌طور که از مقایسه نتایج حاصل از محاسبات عددی با مقادیر پیش‌بینی شده در آیین‌نامه امریکا می‌توان مشاهده نمود، نتایج عددی پیک فشار تقریباً از مرتبه بزرگی مقادیر پیش‌بینی می‌باشد

لازم به ذکر است وجود سازه تونل مانع از پیشروی موج انفجار به عمق بیشتری از لایه‌های خاک خواهد شد و بنابراین انرژی انفجار از خاک به دیواره تونل منتقل می‌شود.

۳-۳- پیشروی و انتشار موج در سازه تونل

شکل ۱۴ انتشار موج بر سازه تونل را در زمان‌های مختلف مطابق حالت محاسباتی ۳ نشان می‌دهد. اثر امواج بر تونل در محدوده زمانی $t = 0.02$ s شروع و در $t = 1$ s پایان می‌یابد. امواج فشاری بر تونل در هر دو راستای طولی و عرضی (سطح مقطع) پیشروی می‌کنند. برخلاف امواج منتشرشده در خاک این امواج، شکل و جبهه موج ثابتی ندارند. همچنین واضح است که پیشروی در راستای طولی سریع‌تر از عرضی است.

در شکل ۱۵ تا ۱۸ پیک فشار در تمامی موارد محاسباتی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. از این نمودارها می‌توان دریافت که فشار بیشینه در همه آن‌ها در نقطه A (صفر درجه) رخ می‌دهد. هنگامی که عمق تونل ۷ m و ماده منفجره TNT از ۳۰۰ Kg تا ۱۰۰۰ Kg افزایش یابد (موارد محاسباتی ۱، ۲، ۳) مقدار پیک در نقطه A به ترتیب $9.6/8$ KPa، $3.59/8$ KPa و $2/7$ MPa می‌باشند؛ درحالی‌که اگر عمق تونل ۱۴ m باشد (موارد محاسباتی ۴، ۵ و ۶) این مقادیر به ترتیب 0.14 ، 0.14 و $2/77$ Pa است. بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌گردد با دو برابر شدن عمق سازه مدفون، مقدار پیک فشار کاهش چشم‌گیری خواهد داشت.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر جرم ماده منفجره، مقادیر پیک فشار در هر دو مسیر برای موارد محاسباتی ۴ و ۵ نزدیک به هم می‌باشند و مشاهده می‌شود که تغییر وزن خرج انفجاری از ۳۰۰ تا ۵۰۰ Kg تأثیری چندانی در پاسخ دینامیکی سازه نداشته است. شکل ۱۸ و ۱۹ نیز مقادیر حداکثر فشار را برای شش حالت محاسباتی مسیر ۲ نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده نمود که بیشینه فشار $3/369$ MPa در حالت سوم و در فاصله افقی ۴ m از مرکز خرج انفجاری رخ داده است.

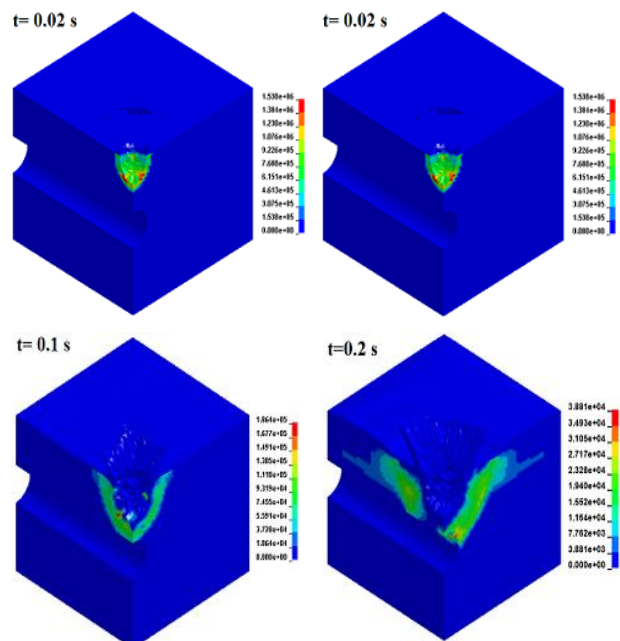
۳-۴- ارزیابی تخریب بر مبنای تنش موثر

تنش موثر σ_1 به عنوان معادل غیر محوری برای تنش چند محوری در نظر گرفته شده و در بسیاری از معیارهای تخریب و تسلیم استفاده می‌شود. بنابراین، اگر ماده‌ای در آزمایش فشار غیر محوری (σ_1 تنها مؤلفه غیر صفر تنش باشد) به تخریب برسد، هنگامی که $\sigma_1 = \sigma_{crit}$ باشد، سازه مورد نظر در بارهای چند محوری نیز تخریب خواهد شد.

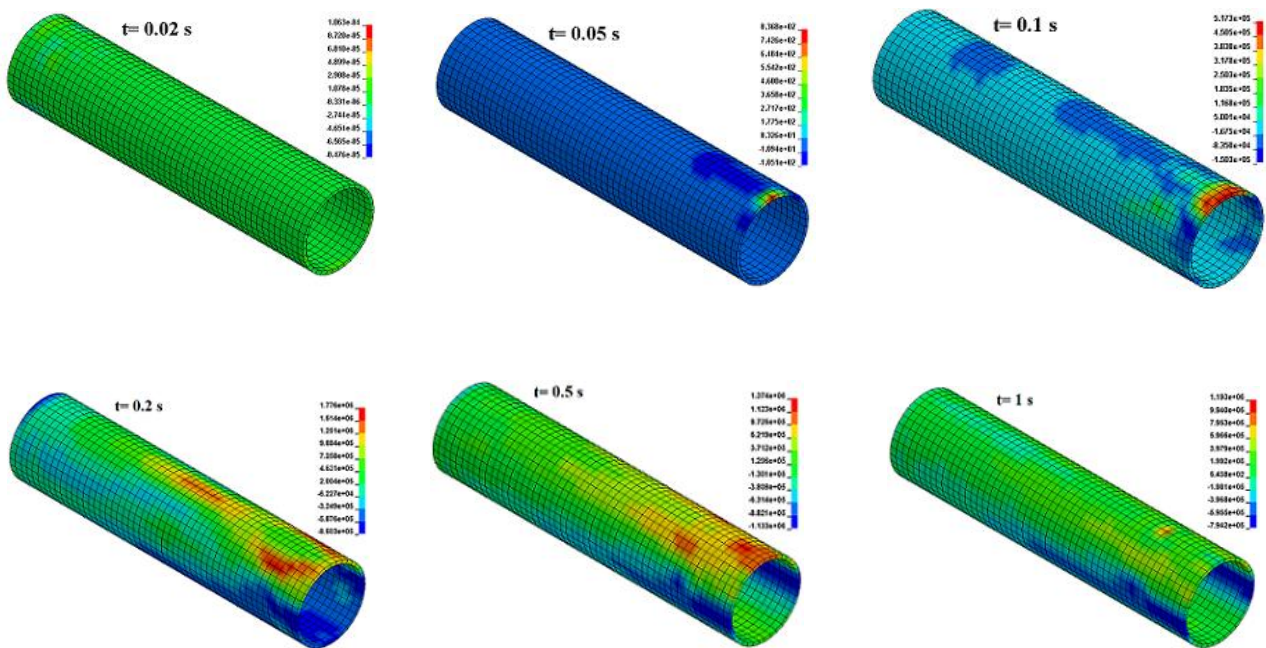
کافی بزرگ باشد تا یک محدوده کامل انفجار شکل بگیرد ($f=1$). درحالی‌که در مدل مورد بررسی، انفجار در سطح مشترک هوا و خاک شکل گرفته است. به عبارت دیگر عمق دفن خرج تقریباً صفر بوده است. با این وجود مطابق شکل ۱۱ ضریب جفت‌شدگی $f=0.4$ در این تحلیل در نظر گرفته شده است. بنابراین طبیعی است که نتایج عددی کمتر از مقادیر آیین‌نامه باشند.

۲- در آزمایش آلکسنکو، مطابق با مدل عددی مورد بررسی، ماده منفجره در خاک دفن شده و سطح بالایی آن هم سطح زمین است. این آزمایش نشان می‌دهد که، نسبت انرژی جذب‌شده توسط هوا و خاک به ترتیب ۵۳٪ و ۴۷٪ خواهد بود. این بدین معنی است که نیمی از انرژی انفجار در هوا پخش خواهد شد. بنابراین نتایج عددی کمتر از مقادیر آیین‌نامه خواهند شد.

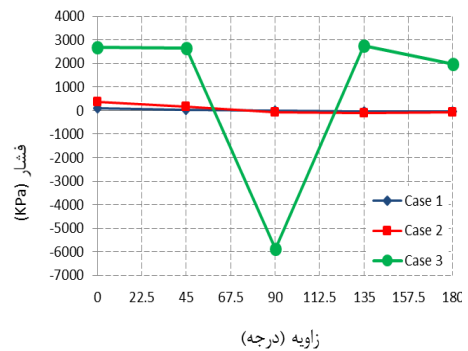
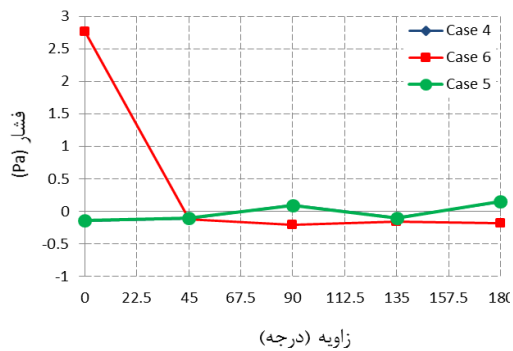
شکل ۱۳ انتشار موج در خاک در زمان‌های مختلف برای حالت سوم محاسباتی جدول ۵ را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان مشاهده نمود که منطقه تحت تأثیر قرارگرفته در خاک تا بخش میانی تونل ادامه پیدا کرده است. یعنی در مدت‌زمان 0.12 s و در حدود ۱۰ دورتر از سطح زمین. بنابراین تفاوت بین دو حالت محاسباتی (۰ و ۳)، در عمق اثر انفجار در خاک می‌باشد.



شکل ۱۳- کانتور فشار در خاک در زمان‌های مختلف برای حالت محاسباتی ۳

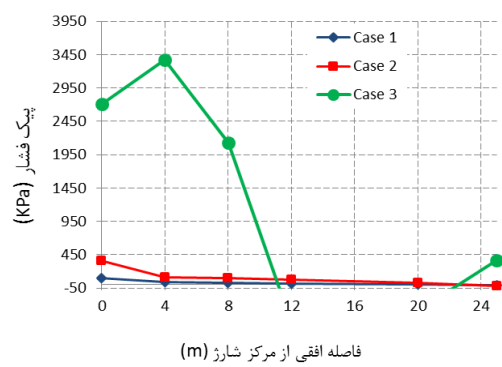
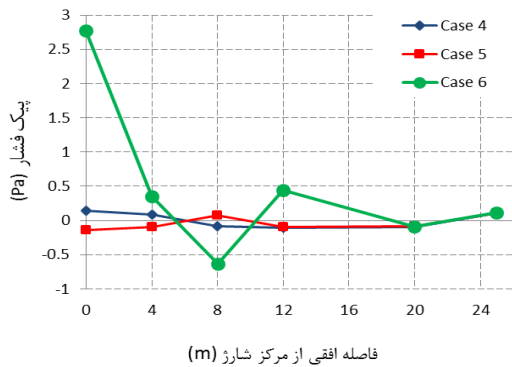


شکل ۱۴- کانتور فشار برای تونل در زمان‌های مختلف برای حالت محاسباتی ۳



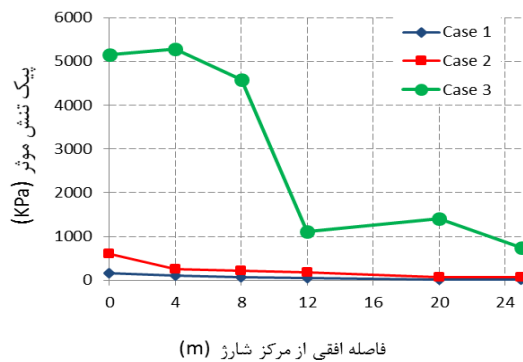
شکل ۱۶- مقایسه پیک فشار بر روی تونل در مسیر ۱ برای ۳ حالت دوم

شکل ۱۵- مقایسه پیک فشار بر روی تونل در مسیر ۱ برای ۳ حالت اول

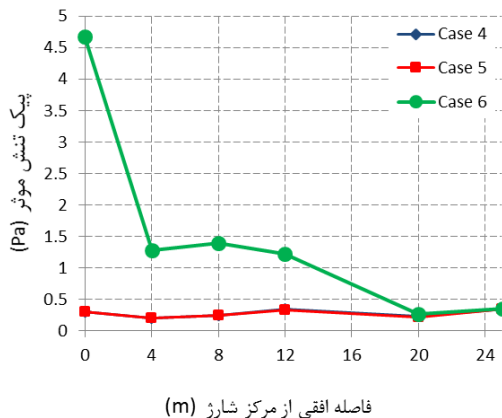


شکل ۱۸- مقایسه پیک فشار بر روی تونل در مسیر ۲ برای ۳ حالت دوم

شکل ۱۷- مقایسه پیک فشار بر روی تونل در مسیر ۲ برای ۳ حالت اول



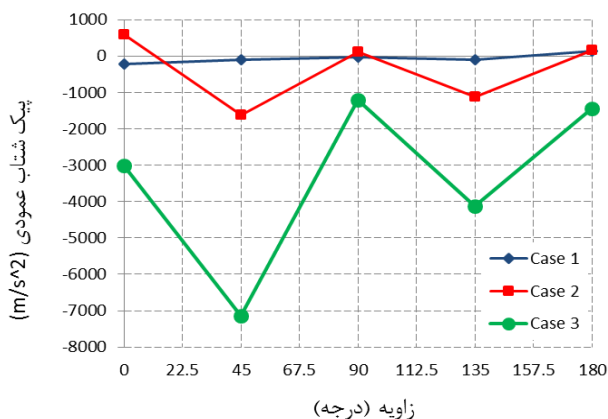
شکل ۲۱- مقایسه پیک تنش موثر روی تونل در مسیر ۲ برای ۳ حالت اول



شکل ۲۲- مقایسه پیک تنش موثر روی تونل در مسیر ۲ برای ۳ حالت دوم

۳-۵- شتاب ایجاد شده در دیواره تونل

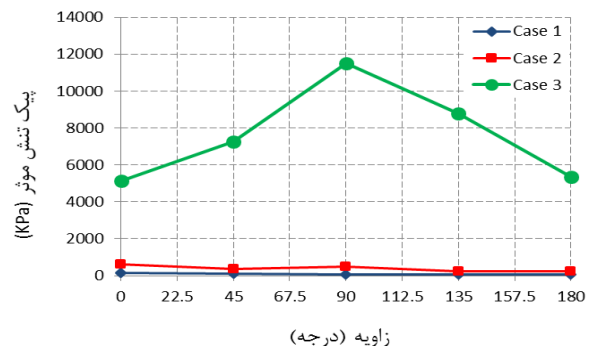
از شکل ۲۳ می‌توان دریافت که بیشینه شتاب ۷۱۲۹- متر بر مجذور ثانیه در بالای تونل برای حالت ۳ و کمینه آن برای حالت ۱ در پایین تونل برابر ۲۴/۰۷ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. لازم به ذکر است مقادیر پیک شتاب برای دیواره تونل در موارد محاسباتی ۴ الی ۶ نزدیک به صفر (از مرتبه ۵- تا ۱۰- و ۶- تا ۱۰-) است و از رسم نمودار مربوطه خودداری شده است. بنابراین، پیک فشار در حالتی که عمق تونل ۱۴ m است، اثری بر دیواره نداشته است.



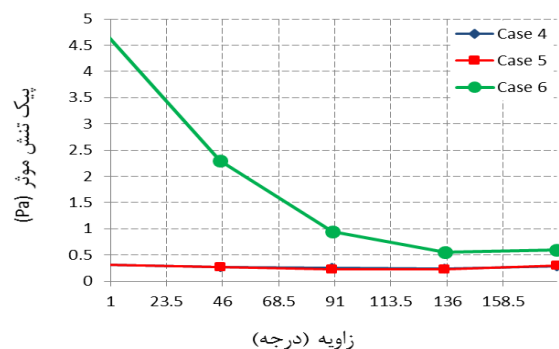
شکل ۲۳- مقایسه پیک شتاب در مسیر ۱ برای حالت محاسباتی ۱ الی ۳

مطابق شکل‌های ۱۹ تا ۲۲ هنگامی که عمق تونل ۷ m است و مقدار وزن خرج از ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ Kg افزایش می‌یابد (موارد ۲، ۱ و ۳) در مسیر ۱ مقادیر پیک در نقطه A به ترتیب ۱۶۲ KPa، ۱۶۲ KPa و ۶۱۰/۳ MPa و ۱۱/۵ MPa است. در وضعیت تونل با عمق ۱۴ m (موارد ۴، ۵، ۶) این مقادیر به ترتیب ۰/۳، ۰/۳۱، ۰/۳ Pa و ۴/۶۷ Pa خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در اینجا نیز با دو برابر شدن عمق سازه مدفون مقدار پیک تنش موثر کاهش چشم‌گیری داشته است. همچنین مقادیر پیک تنش موثر برای موارد محاسباتی ۴ و ۵ برای هر دو مسیر طولی و عرضی در محدوده ۰/۲ تا ۰/۳ Pa، ناچیز و نزدیک به هم می‌باشد.

شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نیز نشان می‌دهد که پیک تنش موثر در مسیر ۲ و از مرکز خرج انفجاری شروع به کاهش می‌نماید و بیشینه مقدار آن ۵/۲۸ MPa و در فاصله افقی حدود ۵ m از نقطه انفجار در حالت ۳ محاسباتی به دست آمده است. درجه مقاومت بتن دیواره تونل، C50 است که مقاومت کششی آن ۸/۴ MPa و مقاومت طراحی آن ۵/۱ MPa لحاظ شده است. لازم به ذکر است اگر تنش موثری که توسط نیروهای دیگر چون فشار آب و خاک لحاظ گردد، تنش موثر در حالت ۳ محاسباتی احتمالاً از مقدار استاندارد تجاوز خواهد کرد و سبب تخریب تونل مسلح در کل محدوده سطح مقطع و فاصله افقی ۰ تا ۵ m از مرکز انفجار خواهد شد.



شکل ۱۹- مقایسه پیک تنش موثر روی تونل در مسیر ۱ برای ۳ حالت اول



شکل ۲۰- مقایسه پیک تنش موثر روی تونل در مسیر ۱ برای ۳ حالت دوم

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثرات انفجار سطحی واقع بر یک تونل مدفون با استفاده از هیدروکد LS-DYNA تحلیل و با مطالعه پارامتری، شامل اثر وزن خرج انفجاری و عمق سازه مدفون در یک مدل عددی، موج انفجار پیش‌رونده در خاک، تنش موثر و مایسز و همچنین شتاب دیواره و ایمنی پوشش داخلی تونل بر مبنای معیارهای تخریب بررسی گردید. همچنین به منظور صحت‌سنجی، نتایج عددی با روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه (TM5-855-1) ارتش آمریکا مقایسه شد. از مجموع مباحث مطرح‌شده می‌توان نتایج زیر را بیان نمود:

۱- در طراحی سازه‌های مدفون تحت اثر بارهای انفجاری برای دستیابی به مدلی که شبیه‌سازی نزدیک‌تری به واقعیت ارائه دهد، نیاز به در نظر گرفتن رفتار کل سامانه شامل شکل‌گیری چاله انفجاری، انتشار امواج شوک از میان خاک، اندرکنش خاک- سازه مدفون و پاسخ سازه در یک مدل شبیه‌سازی شده، می‌باشد.

۲- امواج انفجار در خاک به شکل امواج نیم‌کره‌ای پیشروی می‌کنند. نتایج شبیه‌سازی عددی شامل حداکثر مقادیر فشار و شتاب با مقادیر ارائه شده در آیین‌نامه ارتش آمریکا (TM5-855-1) با یکدیگر مقایسه گردیدند. همان‌طور که مشاهده گردید نتایج عددی حداکثر مقادیر فشار تقریباً از مرتبه بزرگی مقادیر پیش‌بینی آیین‌نامه ارتش آمریکا (TM5-855-1) می‌باشد ولی به دلیل آن که در آیین‌نامه فرض بر این است که عمق دفن خرج به اندازه کافی بزرگ باشد تا یک محدوده کامل انفجار شکل بگیرد (ضریب جفت‌شدگی $f=1$) درحالی‌که در مدل مورد بررسی، انفجار در سطح مشترک هوا و خاک شکل گرفته است. ($f=0.4$) به عبارت دیگر عمق دفن خرج تقریباً صفر بوده است، تفاوت اندکی بین آن‌ها وجود دارد.

۳- اندازه و توزیع میدان تنش در دیواره تونل متأثر از عمق دفن آن و خرج انفجاری است. مطابق معیار تخریب ون- مایسز کل محدوده سطح مقطع سازه مدفون و در فاصله افقی ۵ m دورتر از مرکز خرج انفجاری، منطقه‌ای ناپایدار است.

۴- دیواره بتنی تونل در ناحیه بالای آن هنگامی که عمق آن ۷ m و مقدار خرج انفجاری به ۱۰۰۰ Kg برسد، تخریب خواهد شد. به عبارت دیگر تونل در خاک نرم هنگامی که عمق دفن تونل بیش از ۷ m است و ماده منفجره TNT در انفجار سطحی بیش از ۵۰۰ Kg نباشد، می‌تواند ایمن باشد.

۵- مراجع

1. C. W. Lampson, "Effects of impact and explosions," in Explosions in Earth, NRDC Washington, 1946.
2. J. Drake and C. D. J. Little, "Ground shock from penetrating conventional weapons," 1983.
3. P. Westine and G. Friesenhahn, "Free-field ground shock pressures from buried detonations in saturated and unsaturated soils," in Interaction of Non-nuclear Munitions with Structures, 1983.
4. L. Muyu and L. Zhifang, "Analysis of dynamic response of Yangtze River tunnel subjected to contact explosion loading," Journal of Wuhan University of Technology, pp. 113-117, 2007.
5. H. Qiuyun, Y. Haitao, and Y. Yong, "Numerical simulation of dynamic response of an existing subway station subjected to internal blast loading," Transactions of Tianjin University, pp. 563-568, 2008.
6. E. L. Lee, H. C. Hornig, and J. W. Kury, "Adiabatic expansion of high explosive detonation products," Lawrence Radiation Laboratory, UCRL-50422, 1968.
7. S. Xiaojiang and S. Jianyu, "ANSYS/LS-DYNA dynamic analysis methods and projects," Beijing: China Water Power Press, 2006.
8. LS-DYNA, "LS-DYNA user's manual, version 971," Livermore software technology cooperation, 2012.
9. L. Guobin and H. Xueyuan, "Unloading modulus of the Shanghai soft clay," Chinese Journal of Geotechnical Engineering, pp. 18-23, 1996.
10. Y. Yang, X. Xie, and R. Wang, "Numerical simulation of dynamic response of operating metro tunnel induced by ground explosion," Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010.
11. U. S. Department of the Army, "Fundamental of protective design for conventional weapons," US Army Engineer Waterways Experiment Station, TM5-855-1, 1984.
12. E. C. Leong, S. Anand, and H. K. Cheong, "Re-examination of peak stress and scaled distance due to ground shock," International Journal International Journal, pp. 1487-1499, 2007.

Analysis of the Surface Explosion Effects on Underground Tunnels

S. Peyman^{*}, M. H. Taghavi Parsa

Abstract

Nowadays air missile attacks on buried structures are one of the most important issues in passive defense. In this paper, the numerical simulation method is used to analyze and simulate the ground explosion on a buried tunnel. All the simulations and modeling presented are using LS-DYNA hydro code. Generally, the simulation of explosions are divided into a four-step process; blast hole formation, propagation of waves in the soil, soil-structure interaction and dynamic response of buried structure. In order to evaluate the dynamic response of the structure, parametric analysis is used. This analysis includes the effect of the explosive charge weight and the buried depth of the structure, the progression of pressure wave in the soil, von-mises effective stress and the acceleration on the tunnel wall. In the end, the numerical results are compared to the US Army Corps of Engineers Manual (TM5-855-1).

Key Words: *surface explosion, numerical simulation, Underground Structure, dynamic response.*

^{*} Imam Hussein Comprehensive University - (speyman@ihu.ac.ir) - Writer-in-Charge