

# نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال یازدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹، (پیاپی ۴۱): صص ۹۰-۸۳

علمی - ترویجی

## تحلیل اثرات وجود لایه بتنی محافظ بر رفتار سازه‌های زیر زمینی تحت اثر بار انفجاری سطحی

صفا پیمان<sup>۱\*</sup>، محمدرضا حسینی<sup>۲</sup>، محمدحسین تقوی پارسا<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۶

### چکیده

امروزه رشد تهدیدات و جنگ‌افزارهای نظامی و افزایش حملات تروریستی، دولت‌ها را به سوی طرح جامعی از پدافند غیرعامل، جهت بالا بردن ضریب امنیت خود سوق داده است. زیرزمینی کردن سازه‌ها یکی از ابتدایی‌ترین راه‌کارها برای حفاظت از تأسیسات حساس و راهبردی در برابر انفجار می‌باشد. در این مقاله اندرکنش دینامیکی خاک و سازه مدنظر بوده و همچنین در این مرحله نتایج ناشی از تحلیل دینامیکی غیرخطی با نتایج حاصل از روابط تجربی و تحلیلی مقایسه شده است. همچنین تلاش شده ضمن توجه به رفتار سازه مدفون تحت اثر بار انفجار، اثر پارامترهای مختلف، مانند عمق سازه و موقعیت نقطه انفجار نسبت به سازه و خصوصیات دینامیکی مجموعه در نوع عملکرد سازه بررسی شود. سپس در قسمت آخر با توجه به نتایج به دست آمده از قسمت قبل، نسبت به نتیجه‌گیری و ارائه راه‌کارهایی برای حفاظت و مقاوم سازی سازه های مدفون در برابر انفجار اقدام شده است. در نهایت دیده شده که لایه بتنی محافظ، به تنهایی به دلیل انتقال مستقیم ضربه به خاک، جهت مقاوم سازی سازه زیرزمینی موثر نبوده و ترکیب آن با محیط متخلخل مانند یک باکس بتنی محافظ روی سازه با فضای متخلخل نزدیک به ۱۰۰ درصد در بین آن اثر قابل توجهی بر کاهش فشار روی سازه زیرزمینی داشته است.

**کلیدواژه‌ها:** انفجار سطحی، لایه بتنی محافظ، اتوداین، پارامترهای شوک زمینی، وزن خرج انفجاری، عمق دفن سازه زیرزمینی

۱- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع) - (speyman@ihu.ac.ir) - نویسنده مسئول

۲- دانشجوی کارشناس ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۳- کارشناس ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

## ۱. مقدمه

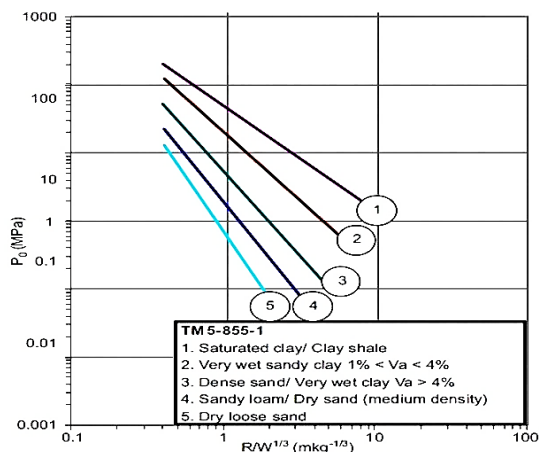
می‌آید:

$$u = 48/8 fc \left( \frac{2/52R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (2)$$

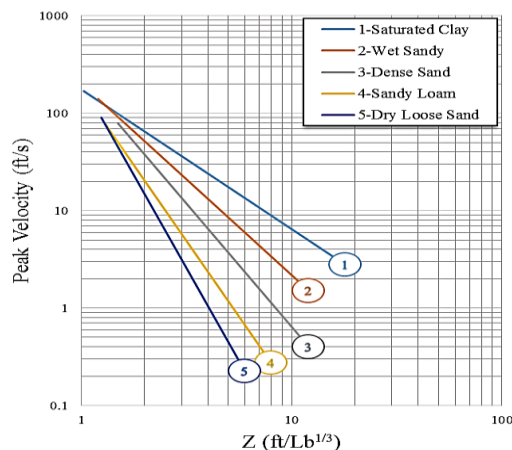
که در آن،  $W$  وزن ماده منفجره به کیلوگرم و  $n$  پارامتر تضعیف موج مربوط به خاک می باشد که از جدول‌های موجود در مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان قابل محاسبه است [۱]. فشار حاصل از انفجار در میدان آزاد خاک، در آیین‌نامه TM5-855-1 توسط رابطه تجربی (۳) محاسبه می‌شود:

$$P = f(\rho c) 160 \left( \frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (3)$$

که در آن،  $f$  ضریب اتصال  $\rho c$ ، ضریب امپدانس صوتی،  $R$  فاصله از محل انفجار به فوت  $W$  وزن ماده منفجره استاندارد به پوند می‌باشد در شکل (۱) توزیع فشار و شکل (۲) توزیع سرعت در خاک‌های فوق بر حسب فاصله مقیاس شده به نمایش در آمده است [۲].



شکل (۱): توزیع فشار در خاک بر حسب فاصله مقیاس در TM-5-855-1



شکل (۲): توزیع سرعت در خاک بر حسب فاصله مقیاس در TM-5-855-1

امروزه رشد تهدیدات و جنگ‌افزارهای نظامی و افزایش حملات تروریستی، دولت‌ها را به سوی طرح جامعی از پدافند غیر عامل، جهت بالا بردن ضریب امنیت خود سوق داده است. در این راستا اقدامات زیادی صورت گرفت است که می‌توان به بحث اثر انفجار بر روی انواع سازه‌های مهم و راه‌کارهای مقابله با آن اشاره کرد.

زیرزمینی کردن سازه‌ها یکی از ابتدایی‌ترین راه‌کارها برای حفاظت از تاسیسات حساس و راهبردی در برابر انفجار می‌باشد. به صورت معمول سازه‌های مدفون در زمین (تونل‌ها، لوله‌ها، پناهگاه‌ها، انباره و مخازن و ...) در برابر بارهای سطحی، فشار خاک پیرامون و سطح آب زیرزمینی و انتشار امواج زلزله در خاک بارگذاری، تحلیل و طراحی می‌شوند. بر این اساس سازه‌های زیادی تاکنون در کشور طراحی و ساخته شده‌اند. از طرف دیگر، بر اساس دستورالعمل پدافند غیرعامل و همچنین مبحث بیست و یکم از مقررات ملی ساختمان لازم است سازه‌های فوق در مقابل بار ناشی از انفجار نیز تحلیل و بررسی گردند. از آنجایی که تاکنون در طراحی این‌گونه سازه‌ها کمتر به این مقوله پرداخته شده، لازم است اثر انفجار سازه‌ها بررسی شده و تلفات، خسارت، و راه‌کارهای افزایش ایمنی و مقاوم‌سازی آن مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد.

لذا در این تحقیق ابتدا به بررسی مطالعات انجام گرفته درباره نحوه انتشار امواج ناشی از انفجار در خاک با توجه به شرایط انفجار، خاک و سازه (مانند قدرت انفجار، مکان انفجار، نوع خاک، سطح آب زیر زمینی، عمق قرارگیری سازه، شکل هندسی و ... پرداخته و سپس سازه مذکور با توجه به شرایط فوق بارگذاری شده و به کمک یک نرم‌افزار المان محدود با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار می‌گیرد. سپس تاثیر انفجار بر رفتار سازه بررسی شده و در نهایت راه‌کارهایی طبق اصول پدافند غیرعامل برای کاهش تاثیر انفجار بر روی سازه پیش‌بینی می‌شود.

در توزیع موج انفجار در خاک مشابه پدیده زمین لرزه، امواج ناشی از انفجارهای سطح زمین و یا زیر آن شامل، امواج حجمی و امواج سطحی می‌باشند. حداکثر فشار انفجار در میدان آزاد بر حسب نیوتن بر مترمربع از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_g = \rho c u \quad (1)$$

که در آن،  $\rho$  چگالی خاک بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب،  $C$  سرعت بارگذاری موج انفجار،  $u$  حداکثر سرعت ذرات و حداکثر سرعت ذرات با فاصله  $R$  از محل انفجار توسط رابطه زیر به دست

## ۲. روش تحقیق

در این تحقیق از روش مدل‌سازی مواد توسط نرم‌افزار استفاده شده است که به صورت زیر معرفی می‌شود.

### ۲-۱. هوا

هوا به صورت گاز ایده‌آل مدل می‌شود. بنابراین، معادله حالت آن با استفاده از قانون گاز ایده‌آل گاما به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (۴)$$

که در آن،  $P$  فشار و  $\gamma$  ضریب گرمای ویژه می‌باشد که به صورت فشار ثابت به حجم ثابت تعریف می‌شود و برای گازهای دو اتمی مانند هوا برابر با  $1/4$  می‌باشد.  $\rho$  چگالی جریان می‌باشد.  $P_0$  تراکم اولیه هوا است که در حدود  $1/225$  کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.  $E$  انرژی درونی اولیه می‌باشد، که در فشار استاندارد  $10^3/3$  kpa و گرمای ویژه توده هوای  $717.6$  ژول بر کیلوگرم کلونین و مرجع دمایی  $288/2$  درجه کلونین برابر با  $253/4$  کیلوژول بر مترمکعب می‌باشد [۳-۴].

### ۲-۲. خاک

برای مدل کردن ماسه معادله حالت فشاری مواد متخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرد. که شکل خاصی از معادله حالت مای-گرانیشن می‌باشد که در آن، عبارت دوم سمت راست معادله حذف شده است.

$$P = P_H + \Gamma \rho (e - e_H) \quad (۵)$$

در معادله فوق،  $P$  فشار (مجموع فشار منفذی و موثر) در اسکلت خاک،  $\rho$  چگالی فعلی خاک،  $\Gamma$  پارامتر گاما گرانیشن،  $e$  چگالی انرژی داخلی و زیرنویس  $H$  استفاده شده به معنای مرجع شوک هوگونویوت سطح، یک کمیت معلوم می‌باشد. معادله حالت تراکم برای ماسه بر اساس رابطه تکه‌ای - چند خطی بین فشار و چگالی در شکل (۳) نشان داده شده است [۳ و ۵].

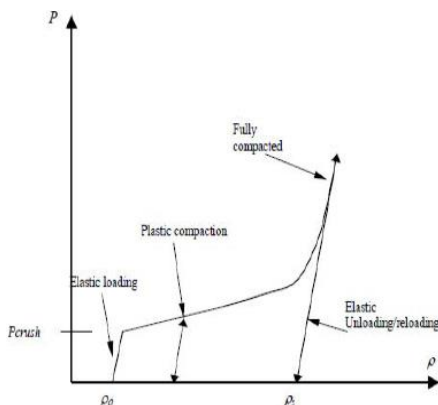
لازم به ذکر است از آنجا که فشار به انرژی داخلی بستگی ندارد، این رابطه معادل است با معادله حالت استاندارد مای گرانیشن، که در آن پارامتر  $\Gamma$  برابر با صفر گرفته می‌شود. این بدین معنی است که این مدل پاسخ قابل اعتمادتری را زمانی که انرژی جذب شده بسیار بالا نباشد یا تخلخل اولیه مواد کم باشد یا زمانی که بزرگی پارامتر گاما نزدیک صفر باشد، نتیجه می‌دهد. باربرداری و بارگذاری مواد متخلخل مانند شن و ماسه در هر سطح از فشردگی به‌طور کلی معادله دیفرانسیل زیر را دارا می‌باشد.

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = C^2(\rho) \quad (۶)$$

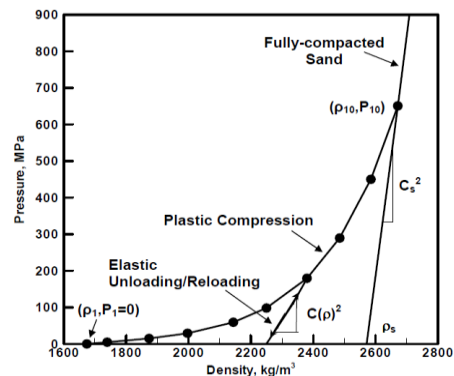
که در آن،  $C$  سرعت صوت در ماسه با چگالی  $\rho$  می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده، در قسمت بارگذاری و باربرداری الاستیک رابطه فشار و چگالی به صورت خطی نیست که این نشان دهنده این حقیقت است که سرعت صوت در ماسه تابعی از چگالی ماسه می‌باشد. در نرم افزار AUTODYN وابستگی سرعت صوت به چگالی ماسه با کمک ده نقطه  $(\rho, c)$  که ایجاد یک رابطه تکه‌ای - چند خطی می‌کند، تعریف می‌شود.

### ۲-۳. بتن

در معادله حالت EOS رابطه بین فشار و چگالی در بتن تا یک فشار معین به صورت خطی است. اما پس از این فشار، منافذ بتن فشرده شده و ترک‌های موسوم به میکرو شکل می‌گیرند. و در اثر فشارهای بیشتر منافذ بتن از هم پاشیده شده و مواد متراکم می‌شوند. رفتار فشار - چگالی در این مرحله غیرخطی است. اما در فشارهای بسیار بالا بتن کاملاً فشرده شده و رابطه بین فشار و چگالی مجدداً خطی می‌شود. در شکل (۴)  $\rho_0$  چگالی اولیه بتن دست نخورده می‌باشد و  $\rho_s$  چگالی بتن کاملاً متراکم در فشار صفر می‌باشد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود تا فشار متناظر با  $P_{cruch}$  رفتار بتن کاملاً الاستیک می‌باشد. اما پس از آن مرحله تراکم پلاستیکی آغاز می‌شود، سپس با متراکم شدن بتن رفتار آن مجدداً خطی می‌شود [۶].



شکل (۴): نمودار رفتار چگالی - فشار بتن



شکل (۳): رابطه بین چگالی و فشار در ماسه خشک موجود در نرم‌افزار AUTODYN

مدل سازی رفتار مقاومتی و شکست بتن از مدل RHT استفاده شده است که پارامترهای پیش فرض معادله حالت P-Alpha و مدل مقاومت شکست RHT در جدول (۱) می باشد.

جدول (۱): پارامترهای RHT بتن با مقاومت ۳۵ مگاپاسکال

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
<b>معادله حالت EOS</b>			
چگالی متخلخل	۲۳۱۴ (Kg/m <sup>3</sup> )	توان تراکم	۳
چگالی مرجع	۲۹۲۰ (m/s)	A1	۳/۵۲۷*۱۰ <sup>۴</sup> (MPa)
سرعت صوت در متخلخل	۲۹۲۰ (m/s)	A2	۳/۹۵۸*۱۰ <sup>۴</sup> (MPa)
فشار تراکم اولیه	۲۳/۳ (MPa)	A3	۹/۰۳*۱۰ <sup>۳</sup> (MPa)
فشار توپر اولیه	۶*۱۰ <sup>۴</sup> (MPa)	B1,B2	۱/۲۲
<b>پارامترهای مدل مقاومت RHT</b>			
مدل برشی	۱/۶۷*۱۰ <sup>۴</sup> (MPa)	Ft مقاومت الاستیک کششی	۰/۷
مقاومت فشاری	۳۵ MPa	Ge/Gp	۲
Ft/fc	۰/۱	B	۱/۶
Ft/fc	۰/۱۸	M	۰/۶۱
A	۱/۶	توان نرخ کرنش فشاری	۰/۰۳۲
N	۰/۶۱	Q	۰/۶۸۰۵
انتقال ترد به شکل پذیر	۰/۰۱۰۵	Fc مقاومت الاستیک فشاری	۰/۵۳
<b>پارامترهای مدل شکست RHT</b>			
D1	۰/۰۴	حداقل کرنش کششی شکست	۰/۰۱
D2	۱	کرنش هندسی	۲

#### ۴-۲ فولاد

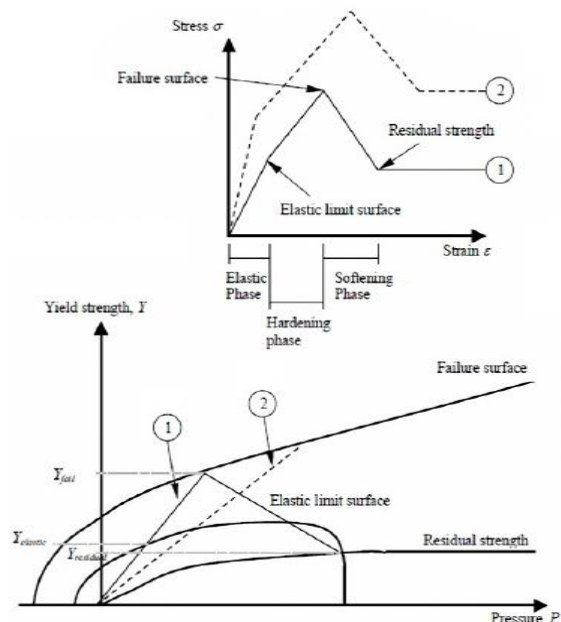
از فولاد برای مدل کردن مسلح کننده ها در سازه بتنی استفاده می شود. مانند خاک و بتن برای تعریف کردن خصوصیات این ماده جهت تحلیل دینامیکی غیرخطی نیاز به تعریف معادله حالت، معادله مقاومتی و معادله شکست آن می باشیم. به دلیل خواص ایزوتروپیک فولاد پاسخ های الاستیک و غیرالاستیک آن را تحت بارگذاری های دینامیکی می توان به راحتی تعیین نمود. خواص مکانیکی فولاد در نرخ کرنش های بالا به طور قابل ملاحظه ای تغییر می کند. چنانچه بارگذاری استاتیکی منبنا قرار

معادلات مکمل: این معادلات به صورت رابطه بین تنش با کرنش  $\epsilon$ ، نرخ کرنش  $\dot{\epsilon}$ ، انرژی داخلی E و شاخص خسارت D، به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\sigma_{ij} = f(\epsilon_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, E, D) \quad (7)$$

در نرم افزار AUTODYN این رابطه با استفاده از معیار RHT ارائه شده توسط ریدل صورت می پذیرد. که شامل سختی فشاری، سختی کرنشی و سختی نرخ کرنش و سه ثابت وابسته (محصول سه تنش اصلی) و شاخص آسیب می باشد. سه ثابت وابسته به صورت سطح شکست، حد الاستیک و قدرت باقیمانده توصیف می شود.

هنگامی که عضو در معرض یک فشار خطی (خط ۱ و ۲ در شکل ۵) قرار گیرد، در ابتدا کرنش همراه با تنش افزایش پیدا می کند (رابطه الاستیک تنش - کرنش) این وضعیت با شیبی متناظر با مدل الاستیسیته ادامه پیدا می کند تا به سطح حد الاستیک آن برسد. در مرحله بعدی که فاز سخت شدگی نام دارد، رفتار غیر خطی به صورت یک رفتار خطی تقریب زده می شود که شیب آن به کمک پارامترهای مدول برشی الاستیک و پلاستیک قابل بیان است. به طور پیش فرض مقدار کرنش نهایی کشش بتن در نرم افزار برابر ۰/۰۱ پیشنهاد شده است که مقدار واقعی آن در برابر انفجار بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۰۲ می باشد. در این تحقیق، میزان این کرنش برابر ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است.



شکل (۵): مدل RHT بتن

سطح شکست در پایان این مرحله قرار دارد و بعد از آن مرحله نرم شدگی آغاز می شود. در مرحله نرم شدگی، فشار و مقاومت رو به کاهش خواهند گذاشت تا به سطح باقیمانده برسد.

$$P = A \times \left(1 - \frac{w\rho}{R_1\rho_0}\right) \times e^{\left(-R_1\frac{\Delta t}{\rho}\right)} + B \left(1 - \frac{w\rho}{R_2\rho_0}\right) \times e^{\left(-R_2\frac{\Delta t}{\rho}\right)} + \frac{w\rho^2}{\rho_0} E_{m_0} \quad (۸)$$

ک  
ش  
ای  
نی:

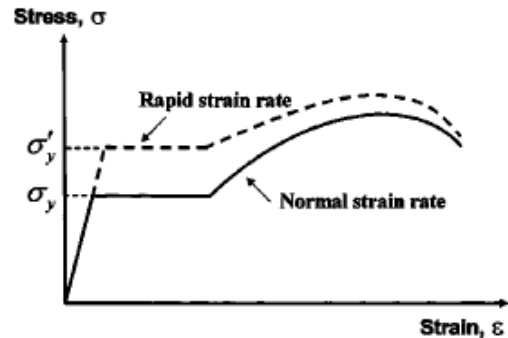
که در آن، A و B و R1 و R2 و W ثابت‌های مصالح Em0 انرژی ویژه اولیه، ρ0 چگالی اولیه ماده منفجره و ρ چگالی محصولات حاصل از فرآیند انفجار می‌باشند. مقدار چگالی اولیه و چگالی محصولات حاصل از انفجار در لحظه اول انفجار برابر می‌باشد. مشخصات مربوط به ماده منفجره استاندارد TNT با چگالی ۱/۶۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۳) موجود می‌باشد [۳].

جدول (۳): پارامترهای معادله حالت JWL برای ماده منفجره TNT

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
A(KPa)	۳/۷۴۷*۱۰ <sup>۸</sup>	سرعت (m/s)	۶۹۳۰
B(KPa)	۳/۷۴۷*۱۰ <sup>۶</sup>	انرژی برواحد حجم	۶*۱۰ <sup>۶</sup>
R1	۴/۱۵	فشار (KPa)	۲/۱*۱۰ <sup>۷</sup>
R2	۰/۹	Emo	۳/۶۸۱*۱۰ <sup>۶</sup>
W	۰/۳۵		

## ۲-۶. مدل سازی مسئله

دو روش کلی برای بررسی اثر انفجار بر روی هر نوع سازه‌ای وجود دارد. در روش اول تحلیل در دوگام صورت می‌گیرد، در گام اول انفجار و متغیرهای مربوطه به آن تحت بررسی قرار می‌گیرد و به کمک روابط تجربی یا عددی بارگذاری روی سازه محاسبه می‌شود و در گام دوم، این بار بر سازه وارد شده و سازه تحت تحلیل قرار می‌گیرد. در روش دوم تحلیل انفجار و اثر آن روی سازه در یک گام صورت می‌گیرد. استفاده از روش دوم نیازمند به یک نرم افزار با قابلیت فوق می‌باشد که بتوان ماده منفجره و سازه را همزمان در آن مدل کرد. نرم‌افزار اتوداین با قابلیت تحلیل دینامیکی غیرخطی این ویژگی را دارد که بتوان هر دو مرحله انفجار و اثرات آن روی سازه را در آن مدل سازی نمود. از این رو، در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این تحقیق برای بررسی اثر انفجار بر روی سازه بتنی مدفون در خاک از روش دوم استفاده شده است، به این صورت که ماده منفجره، خاک و سازه بتنی و جزئیات مرتبط با آن‌ها به صورت همزمان در نرم‌افزار اتوداین مدل شده و تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار خواهد گرفت. برای بررسی صحت مدل سازی و انتشار جبهه موج انفجار در خاک، نتایج اولیه تحقیق با روابط تجربی دستورات عمل TM5-855-1 و تحلیلی مقایسه خواهد شد.



شکل (۶): اثر نرخ کرنش بر روی منحنی تنش - کرنش فولاد

جهت تعریف رفتار مقاومتی فلز از مدل جانسون - کوک استفاده شده است. که با لحاظ کردن اثرات سختی، نرخ کرنش، و درجه حرارت، کاربرد فراوان و موفقیتی در شبیه‌سازی مسائل مربوط به ضربه و انفجار دارد. برای شبیه‌سازی شکست از مدل شکست ناشی از کرنش پلاستیک استفاده می‌شود. پارامترهای معادله حالت و مدل مقاومت و شکست برای فولاد مصرفی در جدول (۲) ارائه شده است [۳].

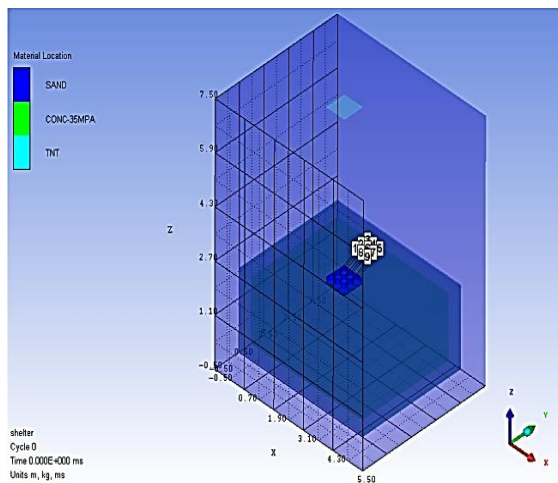
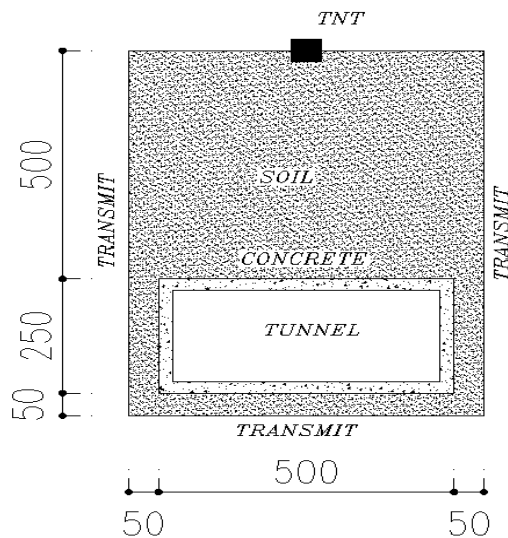
جدول (۲): پارامترهای فولاد مسلح کننده

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
معادله حالت خطی			
مدول بالک	۱۶۶/۷*۱۰ <sup>۳</sup> (MPa)	چگالی	۷۸۹۶ Kg/m <sup>۳</sup>
مدل مقاومت جانسون کوک			
مدول برشی	۸/۱۸*۱۰ <sup>۴</sup> (MPa)	تنش تسلیم	۴۰۰ (Mpa)
ثابت سختی	۲۷۵	توان سخت شدگی	۰/۳۶
ثابت نرخ کرنش	۰/۰۲۲	نرخ کرنش مرجع	۱
دمای ذوب	۱۸۱۱ (کلوین)	کرنش نهایی	۰/۲

## ۲-۵. ماده منفجره

برای مدل سازی ماده منفجره از معادله حالت JWL استفاده شده است. استفاده از این معادله برای مدل کردن انواع مواد منفجره کاربرد بسیار فراوانی دارد. فرم عمومی این معادله به صورت زیر می‌باشد [۸-۱۰].

اکثر سنجه‌ها در این وجه از سازه طراحی شده است. در شکل (۷) مدل شبیه‌سازی و محل قرارگیری سازه و خرج انفجاری نشان داده شده است.



شکل (۷): مدل شبیه‌سازی شده و محل قرارگیری سازه و خرج انفجاری و سنجه‌ها

با توجه به نتایج حاصل از جدول‌های (۴-۵) و شکل‌های (۸-۹) می‌توان مشاهده نمود روش‌های عددی و تحلیلی با یکدیگر تطابق خوبی دارند، ولی نتایج حاصل از گراف‌های تجربی TM5-855-1 برای این حالت از وقوع انفجار کمی محافظه کارانه به‌دست آمد. علت این امر نیز به دلیل فرض وقوع انفجار کامل در ترسیم گراف‌های آئین‌نامه و ضریب جفت‌شدگی یک می‌باشد، درحالی که در انفجار سطحی بخش زیادی از انرژی انفجار به محیط اطراف خرج منتقل می‌شود. میزان اختلاف نتایج پیک سرعت در روش عددی نسبت به نتایج روش تحلیلی برای خرج‌های ۲۵۰ و ۷۵۰ کیلوگرمی به ترتیب برابر ۲۵ و ۲۲ درصد

## ۷-۲. هندسه مدل

مدل‌سازی‌ها در این پژوهش، همگی به‌صورت سه‌بعدی و با واحدهای اصلی (kg, m, ms) توسط نرم‌افزار انجام گرفته است. اندرکنش سازه زیرزمینی با خاک با استفاده از حلگر لاگرانژی شبیه‌سازی شده است. همچنین با توجه به نوع مسئله شرایط مرزی به‌صورت Transmit فرض شده تا نرم‌افزار در مرزهای مدل‌سازی سرعت و فشار و امپیدانس را صفر در نظر بگیرد. در واقع با انتخاب این نوع شرایط مرزی، نرم‌افزار سرعت، فشار و امپیدانس را در مرزهای مدل انتقال داده و برگشت هر کدام از این موارد را به سمت محل انفجار، صفر در نظر می‌گیرد. ابعاد سازه زیرزمینی به ترتیب برای طول و عرض و ارتفاع برابر (۵\*۴\*۲/۵) متر می‌باشد. شبکه‌بندی مدل‌ها برای سازه با شبکه‌بندی ۱۰ سانتیمتری انتخاب شد و برای خاک با حساسیت ۲۵ سانتیمتری برای تحلیل‌های سه‌بعدی واقع‌گرایانه به‌دست آمد.

برای ساخت مدل از ماژول parts مشخصات هندسی هر کدام از قسمت‌های سازه معرفی می‌گردد. با توجه به نوع مسئله با استفاده از قسمت Boundary لازم است تا نوع شرایط مرزی را Transmit فرض کرده تا نرم‌افزار در مرزهای مدل‌سازی سرعت و فشار امپیدانس را صفر در نظر بگیرد. در واقع با انتخاب این نوع شرایط مرزی، نرم‌افزار سرعت، فشار و امپیدانس را در مرزهای مدل انتقال داده و برگشت هر کدام از این موارد را به سمت محل انفجار، صفر در نظر می‌گیرد. بر هم کنش میان خاک و سازه از قسمت Interaction نوع Lagrange/Lagrange با Gap Size به میزان ۰/۱ انتخاب شده است. همچنین نوع چاشنی نیز در تمام مدل‌سازی‌ها به‌صورت صفحه‌ای از ماژول Detonation وارد شده است و ضریب کوپلینگ با توجه به نوع انفجار که سطحی می‌باشد در ۰/۴ در نظر گرفته شده است.

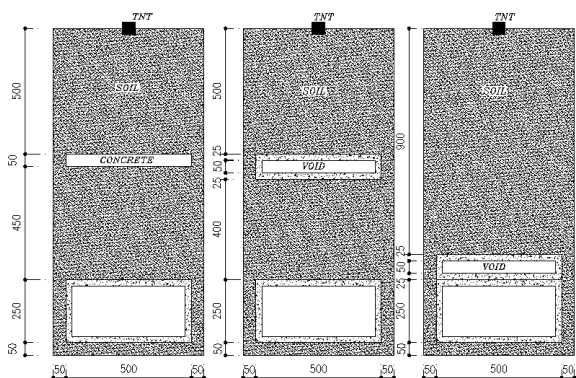
## ۳. نتایج و بحث

### ۳-۱. مقایسه با روابط تجربی و تحلیلی

برای بررسی صحت نتایج حاصل از تحلیل اولیه لازم است این نتایج با روابط تجربی و تحلیلی ارائه‌شده در این پژوهش مقایسه شود برای این منظور پاسخ سازه زیرزمینی بتن مسلح مدل‌سازی شده تحت اثر انفجار با خرج‌های انفجاری ۲۵۰ و ۷۵۰ کیلوگرمی از ماده منفجره TNT در روی سطح زمین که نسبت به سازه دارای فاصله عمودی ۵ متر می‌باشد بررسی می‌گردد. با استفاده از مدل‌سازی رایانه‌ای (روش عددی) و نیز به روش‌های تحلیلی و نیمه تحلیلی (تجربی) پاسخ سازه و پارامتر شوک زمینی از جمله پیک فشار و سرعت بررسی شده است. در این حالت به دلیل آنکه بیشترین مقدار فشار در وجه مجاور انفجار قابل پیش‌بینی است،



تحت اثر انفجار پرداخته می‌شود. همان‌طور که در قبل ذکر شد در این حالت هم انفجار در راستای قائم سقف سازه رخ می‌دهد که بیشترین تأثیر را روی آن خواهد داشت. هدف از بررسی‌های عددی در این بخش تعیین اثر دیوار محافظ بتنی بر روی سازه زیرزمینی و در نظر گرفتن عمق دفن سازه در عمق ۱۰ متری از سطح زمین تحت اثر انفجارهای با وزن خرج‌های انفجاری متفاوت ۲۵۰ و ۷۵۰ کیلوگرمی (Kg) از ماده منفجره TNT می‌باشد. برای محافظت از سازه در عمق ۵ متری خاک یک بار از مانع بتنی به ضخامت ۰/۵ متر و بار دیگر به دلیل استفاده حداکثر اثر تخلخل از باکس بتنی به ضخامت ۰/۲۵ متر با فضای خالی ۰/۵ متر در بین آن و همچنین ایجاد همین باکس در عمق ۱۰ متری که روی سازه تعبیه شده است، استفاده می‌گردد. این فضای خالی در باکس بتنی بسیار مهم است و باعث کاهش فشار بر سازه اصلی شده است. در روش آخر که باکس بتنی بر روی سازه قرار می‌گیرد می‌تواند به‌عنوان محل عبور تاسیسات سازه زیرزمینی هم مورد استفاده قرار گیرد که باعث اقتصادی شدن طرح مذکور می‌گردد. از طرفی این سازه‌های محافظ بتنی در مراحل ساخت سازه در مکان فعلی آن قرار گرفته و سپس روی آن با خاک پوشانده شده است. که جنس آن با تراکم و مشخصات مکانیکی مدل موجود در نرم‌افزار می‌باشد. برای این منظور پارامتر اصلی شوک زمینی برای هر یک از مدل‌ها تعیین شده است. در شکل (۹) نمایی از محل قرارگیری سازه‌ها در روی سازه مستطیلی آمده است.



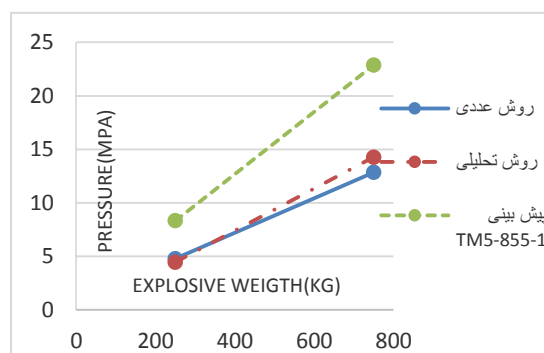
شکل (۹): نمایی از سازه مقاوم سازی مدل سازی شده

با توجه به جدول (۶) مشاهده می‌گردد، به علت چسبندگی خاک به دال محافظ، حضور دال بتنی را بی اثر کرده و موج ضربه پس از انتقال یافتن به دال محافظ بتنی دوباره به خاک منتقل می‌شود. ولی باکس محافظ بتنی تاثیرگذار بوده است و باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در پیک فشار شده است. علت اصلی این امر وجود فضای خالی با حداکثر تخلخل در باکس بتنی می‌باشد که باعث شده موج ضربه به‌طور مستقیم به خاک زیرین انتقال

و نسبت به روش تجربی نیز به ترتیب ۱۹ و ۱۸ درصد اختلاف دارد که ناچیز می‌باشد و نشان‌دهنده دقت روش نرم‌افزاری به واقعیت است.

جدول (۴): نتایج حداکثر فشار با روش حل عددی، تحلیلی و تجربی برای وزن خرج‌های ۲۵۰ و ۷۵۰ کیلوگرمی

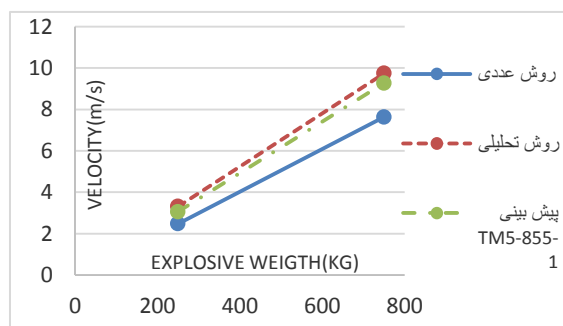
وزن خرج. KG	Z	C(m/s)	پیک فشار (MPa)		
			عددی	تحلیلی	TM5
۲۵۰	۰/۸	۵۰۹/۶۲	۴/۷۹	۴/۴۵	۸/۳۳
۷۵۰	۰/۵۵	۵۵۴/۶۷	۱۲/۸۴	۱۴/۳	۲۲/۸۷



شکل (۸): مقایسه نتایج حداکثر فشار به روش عددی، تحلیلی و تجربی برای وزن خرج ۲۵۰ و ۷۵۰ کیلوگرمی

جدول (۵): نتایج پیک سرعت با روش عددی، تحلیلی و تجربی برای وزن خرج ۲۵۰ و ۷۵۰ کیلوگرم

وزن خرج. KG	Z	پیک سرعت (m/s)	پیک سرعت (m/s)		
			عددی	تحلیلی	TM5
۲۵۰	۰/۸	۳/۰۶	۲/۴۸	۳/۳۱	۳/۰۶
۷۵۰	۰/۵۵	۹/۲۷	۷/۶۳	۹/۷۴	۹/۲۷



شکل (۹): مقایسه پیک سرعت به روش عددی، تحلیلی و تجربی برای وزن خرج ۲۵۰ و ۷۵۰ کیلوگرمی

### ۳-۲. ایمن‌سازی سازه مدفون در برابر انفجار سطحی

در این بخش به بررسی پاسخ سازه زیرزمینی شبیه‌سازی شده

پیدا نکند و در نتیجه باعث کاهش فشار به سقف سازه زیرزمینی می‌گردد.

جدول (۶): نتایج حداکثر فشار تحت انفجار

پیک فشار (MPa) P		نوع سازه محافظ
مقدار	درصد کاهش	
<b>وزن خرج ۲۵۰ کیلوگرم TNT</b>		
۰	۲/۹۸	بدون سازه محافظ
۰/۰۱	۲/۹۵	دال بتنی در عمق ۵ متر
۰/۸۶	۰/۴۳	باکس بتنی در عمق ۵ متر
۰/۹۳	۰/۲۱	باکس بتنی در عمق ۱۰ متر
<b>وزن خرج ۷۵۰ کیلوگرم TNT</b>		
۰	۶/۵۵	بدون سازه محافظ
۰/۱۴	۶/۴۶	دال بتنی در عمق ۵ متر
۰/۳۳	۴/۳۷	باکس بتنی در عمق ۵ متر
۰/۹۱	۰/۶	باکس بتنی در عمق ۱۰ متر

#### ۴. نتیجه‌گیری

مدل ارائه‌شده در این تحقیق به بررسی اثر سازه محافظ بر کاهش موج انفجار روی سازه می‌پردازد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته سازه محافظ، به تنهایی نمی‌تواند اثر قابل توجهی روی کاهش فشار بر سازه داشته باشد. اما با استفاده از محیط متخلخل بین سازه محافظ، که نقش جدا کننده بین سازه و خاک را ایفا می‌کند، مانند باکس بتنی که در بین آن فضای خالی با تخلخل ۱۰۰ درصد وجود دارد، فشار روی سازه زیرزمینی کاهش پیدا کرده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت استفاده ترکیبی از سازه محافظ همراه با محیط متخلخل بین آن و یا باکس بتنی با فضای خالی بین آن، می‌تواند به‌عنوان یک روش مطمئن برای مقاوم‌سازی و کاهش خسارت روی سازه مدفون در برابر انفجار مورد استفاده قرار بگیرد.

در تحقیقات آینده می‌توان روی جزئیات محیط متخلخل مانند انواع کامپوزیت‌ها و ژئوتکستایل و ... به‌صورت انفرادی و یا تلفیقی بررسی بیشتری نمود ولی در کارهای اجرایی فعلی پیش‌نهاد می‌گردد تا رسیدن به اطلاعات دقیق‌تر از روش گفته‌شده در این مقاله استفاده گردد.

#### ۵. مراجع

۱. مقررات ملی ساختمان، مبحث بیست و یکم، "پدافند غیرعامل"
2. TM 5-855-1, "Fundamentals of protective design for conventional weapons," U. S. Department of the Army, Washington DC, 1986.
3. Ansys Autodyn users Manual, Material library, 2010.
4. D. Fiserova, "Numerical Analyses of Buried Mine Explosions With Emphasis on Effect of Soil Properties on Loading," Cranfield University, 2005-2006.
5. B. Pandurangan, "Development, Parameterization and validation of dynamic material models for soil and transparent armor glass," Graduate school of Clemson University, 2009.
6. T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, and J. Ramsay, "Blast Loading and Blast Effects on Structures," An Overview, The University of Melbourne, Australia.
7. H. Chen and R. J. Y. R. Liew, "Explosion and fire analysis of steel frames using mixed element approach," ASCE: J. Eng. Mech., vol. 131, no. 6, pp. 606-616, 2005.
8. Y. Lu, Z. Wang, and K. Chong, "A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulations," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 25, pp. 275-288, 2005.
9. Z. Wang, Y. Lu, H. Hao, and K. Chong, "A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast," Computer and Structure, vol. 83, pp. 339-356, 2005.
10. Z. Tu and Y. Lu, "Modifications of RHT material model for improved numerical simulation of dynamic response of concrete," International Journal of Impact Engineering, vol. 37, pp. 1072-1082, 2010.



---

## **Analysis of the Effects of the Presence of Protective Concrete Layer on the Effect of Underground Structures Under the Influence of Explosive Charge**

**S. Peiman\*, M. R. Hosseini, M. H. T. Parsa**

### **Abstract**

Today, the growth of threats and military weapons and the rise of terrorist attacks has pushed governments into a comprehensive plan of non-operational defense in order to increase their security. Underground structures are one of the most basic ways to protect sensitive and strategic sites against explosions. In this paper, the dynamic interaction of soil and structure is considered, and at this stage, the results of nonlinear dynamic analysis are compared with the results of experimental and analytical relations. Also, while considering the behavior of the buried structure under the influence of the explosion load, the effect of different parameters, such as structural depth and position of the explosion point relative to the structure, and the dynamics characteristics of the complex in the type of structural performance, have been investigated. Then, in the last part, according to the results obtained from the previous section, it was proposed to conclude and provide solutions for protecting and retrofitting the buried structures against the explosion. Finally, it has been observed that the protective concrete layer alone was not effective for the reinforcement of the underground structure due to direct transfer of soil to the soil, and its composition with a porous medium such as a protective concrete box on a structure with porous space is close to 100%. Attention was paid to reducing the pressure on the underground structure.

**Key Words:** *Surface Explosion, Retrofitting, Ground Shock, Explosive Charge, Buried Structures, Depth of Explosion, AUTODYN Software*

---

\*Imam Hossein Comprehensive University (speyman@ihu.ac.ir)- Writer-in-Charge