

## ایمن سازی سازه بتنی مدفون در برابر بار انفجار

امین قلی زاد<sup>۱\*</sup>، محسن رجبی<sup>۲</sup>

۱- استادیار و ۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه دانشکده فنی دانشگاه محقق اردبیلی

(دریافت: ۹۱/۰۹/۱۱، پذیرش: ۹۲/۰۹/۱۰)

## چکیده

استفاده از سازه‌های مدفون یکی از رویکردهای معمول پدافند غیرعامل برای محافظت از تأسیسات در برابر انفجار می‌باشد. در این مطالعه ضمن بررسی اثر انفجارهای سطحی و زیرسطحی بر روی سازه‌های مدفون و نحوه مدل‌سازی و تحلیل آنها در نرم‌افزار اتوداین، راهکارهایی برای ارتقای ایمنی این سازه‌ها پیش‌بینی و کارآیی آنها نیز بررسی گردیده است. میدان فشار ناشی از انفجار در خاک، که از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی به‌دست آمده با روابط تجربی موجود مقایسه شده است. بررسی اثر نوع خاک، نشان دهنده عملکرد بهتر خاک‌های دانه‌ای به‌عنوان پوشش سازه‌های مدفون حفاظت شده از انفجار است. نتایج تحلیل‌ها گویای این مطلب است که استفاده از دال ضد انفجار کارآیی چندانی در کاهش انتقال موج انفجار به سازه مدفون نخواهد داشت، مگر این‌که از یک فضای خالی یا لایه‌ای از مصالح متخلخل در زیر این دال استفاده شود. در مورد انفجارات زیرسطحی نیز تعبیه چاهک‌هایی با فواصل متفاوت در اطراف سازه بررسی گردید و مشخص شد که این روش برای محافظت از سازه‌های مدفون در برابر انفجارات زیرسطحی کارآیی مناسبی خواهد داشت.

**کلیدواژه‌ها:** سازه مدفون، بار انفجار، ایمن‌سازی، تحلیل دینامیکی غیرخطی.

## Securing the Buried Concrete Structure against Blast Loading

A. Gholizad\*, M. Rajabi

University of Mohaghegh Ardabili

(Received: 01/12/2012; Accepted: 01/12/2013)

## Abstract

SOIL-BURIED STRUCTURES ARE THE MOST USUAL PROTECTION OF STRATEGIC FACILITIES AGAINST EXPLOSIONS. SURFACE EXPLOSIONS AND UNDERGROUND DETONATIONS EFFECTS ON BURIED STRUCTURES HAVE BEEN ANALYZED IN THIS STUDY THROUGH SEVERAL APPROACHES WHICH HAVE BEEN SUGGESTED TO SECURE UNDERGROUND STRUCTURES FROM DAMAGE. BLAST INDUCED PRESSURES AMPLITUDES HAVE BEEN EVALUATED THROUGH NONLINEAR DYNAMIC ANALYSES FOR DIFFERENT SOIL TYPES AND RESULTS HAVE BEEN COMPARED WITH CONVENTIONAL FORMULATIONS. GRANULAR SOILS HAVE PROTECTIVE EFFICIENCY IN COMPARISON WITH COHESIVE SOILS. ALTHOUGH CONCRETE BLANKET DOES NOT PRODUCE COHESIVE EFFECT AGAINST BLAST WAVES RESULTED FROM SURFACE EXPLOSIONS BUT A VOID SPACE OR COMPRESSIBLE MATERIAL CONCRETE COVER MAY INCREASE ITS PROTECTIVITY. ADJACENT TRENCHES OR HOLES IN VICINITY OF THE BURIED STRUCTURE CAN BE AN EFFECTIVE PROTECTION AGAINST BLAST WAVE'S PROPAGATION AND THEIR EFFICIENCY HAS BEEN EVALUATED IN THIS STUDY CONSIDERING DIFFERENT DISTANCES FROM THE STRUCTURE AND FROM EACH OTHER.

**Keywords:** Buried Structure, Blast Load, Protection, Nonlinear Dynamic Analysis.

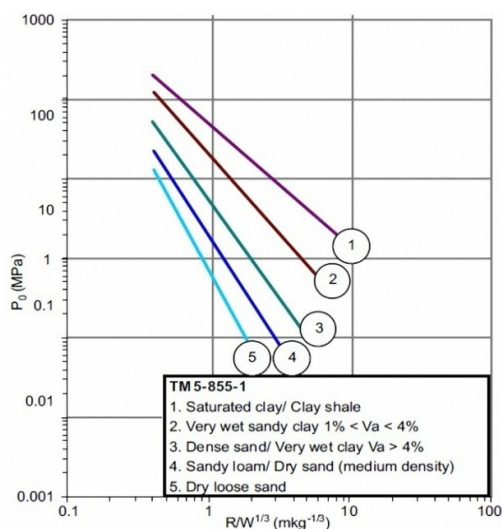
\*Corresponding Author E-mail: Gholizad@uma.ac.ir

(فشاری یا عرضی) و موج سطحی (رایلی) می‌باشد، که مخرب‌ترین آن برای سازه مدفون نزدیک به محل انفجار، موج حجمی فشاری است. حداکثر سرعت ذرات و حداکثر اضافه فشار ناشی از انفجار در محیط‌های پیوسته و آزاد از روابط زیر قابل محاسبه خواهد بود [۷ و ۸]:

$$u = 48.8 f_c \left( \frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (1)$$

$$P_g = \rho \cdot C \cdot u \quad (2)$$

که در روابط فوق،  $f_c$  ضریب اتصال بین زمین و ماده منفجره (میزان پیوستگی ماده منفجره با زمین)،  $W$  وزن ماده منفجره به کیلوگرم،  $R$  فاصله از محل انفجار به متر،  $C$  سرعت انتشار موج انفجار بر حسب متر بر ثانیه،  $P_g$  حداکثر اضافه فشار ناشی از انفجار در خاک بر حسب کیلوگرم بر متر مربع،  $\rho$  چگالی خاک و  $n$  پارامتر تضعیف موج مربوط به خاک می‌باشد که از جدول‌های موجود در مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان قابل محاسبه است [۸]. توزیع بیشینه فشار انفجار در محیط آزاد خاک به فاصله مقیاس شده انفجار ( $Z$ ) بستگی دارد که این پارامتر از تقسیم فاصله تا مرکز انفجار به ریشه سوم وزن ماده منفجره به دست می‌آید. این توزیع در چند نمونه خاک بر حسب فاصله مقیاس شده در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱. مقادیر بیشینه فشار بر حسب فاصله مقیاس شده برای انواع مختلف خاک [۶]

### ۳. مدل سازی مواد

#### ۳-۱. هوا

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

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (3)$$

که در آن،  $P$  فشار و  $\gamma$  نسبت ضرایب گرمای ویژه در حالت فشار ثابت

#### ۱. مقدمه

برای بررسی نحوه انتشار امواج حاصل از انفجار در خاک و نحوه تأثیر آن روی سازه، تاکنون تحقیقات زیادی صورت گرفته است. لو<sup>۱</sup> و ونگ<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۵ مدلی برای تحلیل دینامیکی غیرخطی، انفجار در خاک و توزیع فشار حاصل از انفجار در خاک ارائه کردند [۱ و ۲]. آنها با استفاده از نرم‌افزار تحلیل غیرخطی اتوداین<sup>۳</sup> و با کمک معادله حالت و مدل رفتاری مناسب مصالح، خاک، ماده منفجره و سازه را در یک محیط مدل کرده و نسبت به تحلیل آن اقدام کردند. مزیت مدل ارائه شده کاهش خطا و صرفه‌جویی در زمان تحلیل می‌باشد. یانگ لو در سال ۲۰۰۶ به بررسی اثر انفجار هوایی بر روی سازه سطحی با در نظر گرفتن شوک زمین پرداخت [۳]. وی نیز در این تحقیق از نرم‌افزار المان محدود اتوداین استفاده کرد و خاک را به کمک معادله حالت سه‌فازی مدل نمود. در سال ۲۰۰۷ لئونگ<sup>۴</sup> و همکارانش به بررسی توزیع فشار در انواع خاک با توجه به فاصله مقیاس شده از مرکز انفجار پرداختند [۴]. برای این کار، نتایج حاصل از تحلیل عددی در نرم‌افزار با روابط تجربی موجود در TM5-855-1 [۶] مقایسه و به بررسی نتایج حاصل پرداخته شده است. در سال ۲۰۱۰ نقی<sup>۵</sup> و همکارانش مدل‌سازی عددی اثر انفجار سطحی روی سازه مدفون را انجام دادند [۵]. آنها نیز از مدلی مشابه مدل ارائه شده توسط لو و ونگ برای مدل‌سازی هندسه مسئله استفاده کردند. در این تحقیق نیز برای بررسی صحت مدل، نتایج توزیع فشار حاصل از انفجار با نتایج تجربی موجود در دستورالعمل TM5-855-1 مقایسه شده است [۶]. برای ایمن‌سازی سازه مدفون تحت اثر بار انفجار روش‌های متفاوتی وجود دارد. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم نمود. در روش اول نسبت به افزایش مقاومت سازه و اصلاح سیستم رفتاری آن اقدام می‌شود که می‌توان به‌عنوان مثال از بتن پر مقاومت یا بتن الیافی و مصالح پر مقاومت دیگر جهت مقاوم‌سازی سازه استفاده نمود. در روش دوم شرایطی ایجاد می‌شود که موج حاصل از انفجار نسبت به حالت عادی تأثیر کمتری روی سازه داشته باشد. در حقیقت هر روشی که بتواند موج حاصل از انفجار را مستهلک کند یا از برخورد مستقیم ماده منفجره و ترکش‌های آن به سازه جلوگیری کند، می‌تواند موجب کاهش صدمات وارد بر سازه شود. در این تحقیق نیز سعی شده است با استفاده از رویکرد دوم نسبت به ایمن‌سازی سازه اقدام شود. بنابراین در این تحقیق به ایمن‌سازی سازه مدفون بتن مسلح بر اساس روش استهلاک موج انفجار سطحی و زیرسطحی که ماهیت متفاوتی دارند، پرداخته شده است.

#### ۲. توزیع موج انفجار در خاک

انتشار امواج ناشی از انفجار در خاک، به دو صورت امواج حجمی

<sup>1</sup> Lu

<sup>2</sup> Wang

<sup>3</sup> Ansys Autodyn V13

<sup>4</sup> Leong

<sup>5</sup> Nagy

<sup>6</sup> Gamma

است) این رابطه معادل است با معادله حالت استاندارد مای-گرانایسون، که در آن پارامتر  $\Gamma = v \left( \frac{\partial P}{\partial E} \right)$  برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود و 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 و 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.

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = C^2(\rho) \quad (5)$$

که در آن،  $C$  سرعت صوت در ماسه با چگالی  $\rho$  می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، در قسمت بارگذاری و باربرداری الاستیک، رابطه فشار و چگالی به‌صورت خطی نیست که این نشان دهنده این حقیقت است که سرعت صوت در ماسه تابعی از چگالی ماسه می‌باشد. در نرم‌افزار اتوداین وابستگی سرعت صوت به چگالی ماسه با کمک ده نقطه  $(\rho, c)$  که ایجاد یک رابطه تکه‌ای چندخطی می‌کند، تعریف می‌شود. مدل مقاومتی دانه‌ای<sup>۳</sup> برای خاک، مبتنی بر ایزوتروپیک بودن، کاملاً پلاستیک بودن، نرخ مستقل سطح تسلیم تقریبی و این ادعا که تنش تسلیم بستگی به فشار دارد نه به تراکم مواد، می‌باشد. در نرم‌افزار اتوداین رابطه بین تنش تسلیم  $Y$  و فشار  $P$  به‌کمک ده نقطه مشابه حالت‌های قبلی تعریف می‌شود [۹].

در مواد متخلخل مانند شن و ماسه، مدول برشی تابع چگالی ماده بوده که این رابطه نیز با کمک ده نقطه  $(\rho, G)$  به‌عنوان منحنی چند خطی به نرم‌افزار معرفی می‌شود [۹].

در تحقیق حاضر از چهار نمونه خاک برای مدل‌سازی استفاده شده است.

۱- ماسه خشک پیش‌فرض نرم‌افزار

۲- ماسه خشک اصلاح شده (در مدل اولیه ماسه ارائه شده توسط نرم‌افزار دو عامل مهم اثر درجه اشباع و میزان نرخ تغییر شکل در نظر گرفته نشده است) [۹].

۳- ماسه رس‌دار (۱۵ درصد رس و نیمه‌اشباع)

۴- رس ماسه‌دار (۱۰ درصد ماسه و نیمه‌اشباع)

### ۳-۳. بتن

رفتار بتن تحت بار دینامیکی مانند انفجار، با رفتار معمولی بتن تحت بار استاتیکی متفاوت می‌باشد، بنابراین لازم است برای مدل‌سازی بتن از مدل منطبق بر رفتار دینامیکی آن استفاده شود [۱۱].

**معادله حالت (EOS<sup>۴</sup>):** رابطه بین فشار و چگالی در بتن تا یک فشار فشار معین به‌صورت خطی است. اما پس از این فشار، منافذ بتن فشرده شده و ترک‌های موسوم به میکروتورک شکل می‌گیرند و در اثر فشارهای بیشتر منافذ بتن از هم پاشیده شده و مواد متراکم

به حجم ثابت تعریف می‌شود و برای گازهای دو اتمی مانند هوا برابر با  $1/4$  می‌باشد. همچنین چگالی جریان و  $\rho_0$  دانسیته اولیه هوا بوده که در حدود  $1/225 \frac{kg}{m^3}$  است.  $E$  نیز انرژی درونی اولیه می‌باشد که در فشار استاندارد  $101/3 \text{ kpa}$  و گرمای ویژه توده هوای  $\frac{J}{kg.K}$   $253/4$  و مرجع دمایی  $288/2$  درجه کلوین برابر با  $\frac{kJ}{m^3}$   $253/4$  است [۹].

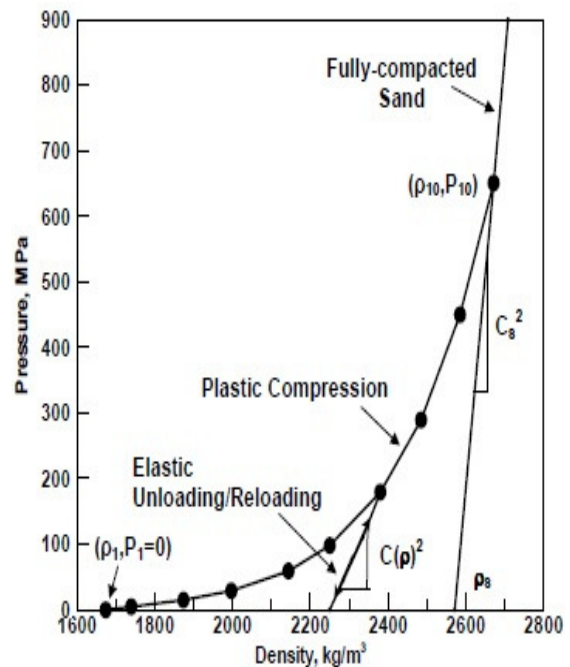
### ۲-۳. خاک

برای مدل کردن خاک، معادله حالت فشاری مواد متخلخل (compaction) مطابق رابطه (۵) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادله شکل خاصی از معادله حالت مای-گرانایسن<sup>۱</sup> می‌باشد که ترم دوم آن حذف شده است [۹].

$$P = P_H + \Gamma \rho (e - e_H) \quad (4)$$

در معادله فوق  $P$  فشار (مجموع فشارمنفذی و مؤثر) در اسکلت خاک،  $\rho$  چگالی فعلی خاک،  $\Gamma$  پارامتر گاما گرانایسن،  $e$  چگالی انرژی داخلی و زیرنویس  $H$  استفاده شده به معنای مرجع شوک هوگونویوت<sup>۲</sup> سطح، یک کمیت قابل محاسبه و مبتنی بر معادله‌ای است که فرآیند شوک را با استفاده از خواص ترمودینامیکی نشان می‌دهد و جزئیات محاسبه آن در مرجع ارائه شده است [۹].

معادله حالت تراکم برای ماسه، بر اساس رابطه تکه‌ای چندخطی بین فشار و چگالی در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۰].



شکل ۲. رابطه بین چگالی و فشار در ماسه خشک [۹]

لازم به‌ذکر است از آنجا که فرض می‌شود در خاک فشار به انرژی داخلی بستگی ندارد (صحت این فرض در مرجع [۹] اثبات شده

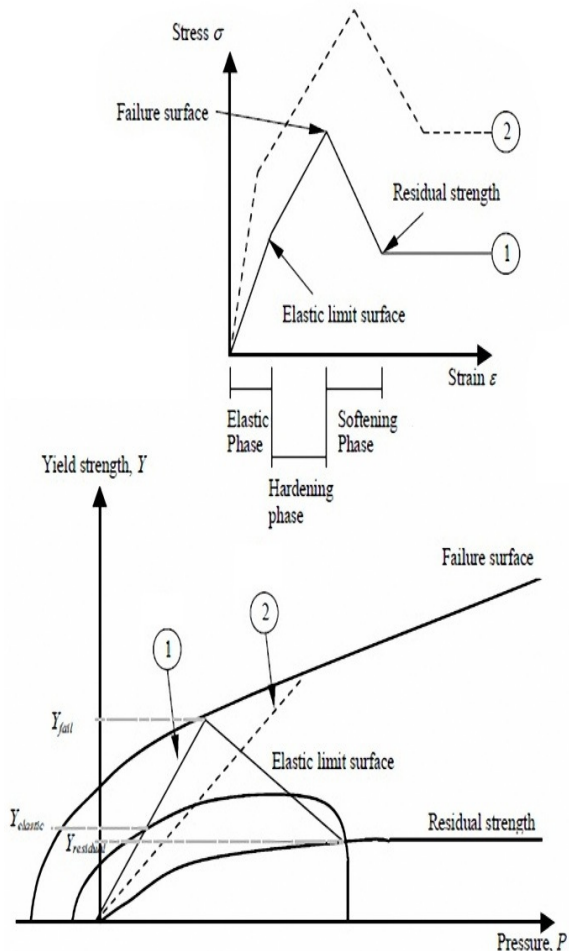
<sup>3</sup> Granular

<sup>4</sup> Equation of state

<sup>1</sup> Mie-Gruneisen

<sup>2</sup> Hugoniot

الاستیک آن برسد. در مرحله بعدی که فاز سخت‌شدگی نام دارد، رفتار غیرخطی به صورت یک رفتار خطی تقریب زده می‌شود که شیب آن به کمک پارامترهای مدول برشی الاستیک و پلاستیک قابل بیان است [۱۱].



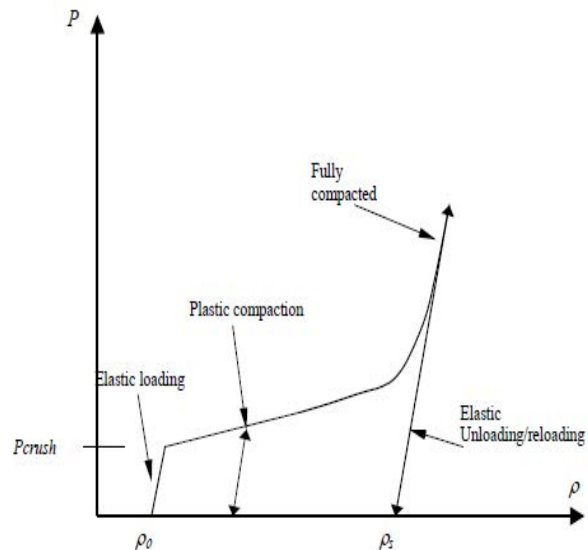
شکل ۴. مدل RHT برای بتن [۱۱]

سطح شکست در پایان این مرحله قرار دارد و بعد از آن مرحله نرم‌شدگی آغاز می‌شود. در مرحله نرم‌شدگی، فشار و مقاومت رو به کاهش خواهند گذاشت تا به سطح مقاومت باقیمانده برسد. در نرم‌افزار برای معادله حالت از معادلات پی-آلفا<sup>۴</sup> و برای مدل‌سازی رفتار مقاومتی و شکست بتن از مدل RHT استفاده شده است که پارامترهای پیش‌فرض معادله حالت P-Alpha و مدل مقاومت و شکست RHT در نرم‌افزار مطابق با جدول (۱) می‌باشد [۱۰ و ۱۱].

به‌طور پیش‌فرض مقدار کرنش نهایی کششی بتن در نرم‌افزار برابر ۰/۰۱ پیشنهاد شده است که مقدار واقعی آن در برابر بار انفجار بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۰۲ می‌باشد. در این تحقیق میزان این کرنش برابر با ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است [۱۳ و ۱۴].

می‌شوند. رفتار فشار چگالی در این مرحله غیرخطی است. اما در فشارهای بسیار بالا بتن به‌طور کامل فشرده شده و رابطه بین فشار و چگالی دوباره خطی می‌شود [۱۱ و ۱۲].

در شکل (۳)،  $\rho_0$  چگالی اولیه بتن دست‌نخورده است و  $\rho_c$  چگالی بتن به‌طور کامل متراکم در فشار صفر می‌باشد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، فشار متناظر با  $P_{crush}$  رفتار بتن به‌طور کامل الاستیک است، اما پس از آن، مرحله تراکم پلاستیکی آغاز و سپس با متراکم شدن بتن، رفتار آن دوباره خطی می‌شود.



شکل ۳. نمودار رفتار چگالی-فشار بتن [۱۱]

معادلات مکمل<sup>۱</sup>: 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 می‌شوند [۱۱]:

$$\sigma_{ij} = f(\epsilon_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, E, D) \quad (6)$$

در نرم‌افزار اتوداین این رابطه با استفاده از معیار RHT<sup>۲</sup> ارائه شده توسط ریدل<sup>۳</sup> (۲۰۰۰) صورت می‌پذیرد که شامل سختی فشاری، سختی کرنشی و سختی نرخ کرنش و سه ثابت وابسته (محصول سه تنش اصلی) و شاخص آسیب می‌باشد. سه ثابت وابسته به صورت سطح شکست، حدالاستیک و مقاومت باقیمانده توصیف می‌شود.

در شکل (۴) مدل RHT به صورت تنش تسلیم در برابر فشار ارائه شده است که در آن فشار به صورت میانگین حاصل از سه تنش اصلی تعریف می‌شود. هنگامی که عضو در معرض یک فشار خطی (خط ۱ و ۲ در شکل ۴) قرار گیرد، در ابتدا کرنش همراه با تنش افزایش پیدا می‌کند (رابطه الاستیک تنش-کرنش). این وضعیت با شیئی متناظر با مدول الاستیسیته ادامه پیدا می‌کند تا به سطح حد

<sup>۱</sup> Supplementary equations

<sup>۲</sup> Riedel-Hiermaier-Thoma

<sup>۳</sup> Riedel

<sup>۴</sup> P-Alpha

جدول ۲. پارامترهای فولاد مسلح کننده [۱۰]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
معادله حالت خطی			
مدول بالک	$۱۶۶/۷ \times ۱۰^۳$ (MPa)	چگالی	۷۸۹۶ Kg/m <sup>3</sup>
مدل مقاومت جانسون کوک			
مدول برشی	$۸/۱۸ \times ۱۰^۴$ (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

## ۳-۵. 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 می باشد [۱ و ۲]:

$$P = A \times \left(1 - \frac{w\rho}{R_1\rho_0}\right) \times e^{(-R_1\frac{\rho_0}{\rho})} + B \left(1 - \frac{w\rho}{R_2\rho_0}\right) \times e^{(-R_2\frac{\rho_0}{\rho})} + \frac{w\rho^2}{\rho_0} E_{m0} \quad (7)$$

که در آن، A و B و  $R_1$  و  $R_2$  و ثابت های مصالح،  $E_{m0}$  انرژی ویژه اولیه،  $\rho_0$  چگالی اولیه ماده منفجره و  $\rho$  چگالی محصولات حاصل از فرآیند انفجار می باشند. مقدار چگالی اولیه و چگالی محصولات حاصل از انفجار در لحظه اول انفجار برابر می باشد. مشخصات مربوط به ماده منفجره استاندارد TNT با چگالی ۱/۶۳ گرم بر سانتی متر مکعب مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۳) موجود می باشد [۱۰].

جدول ۳. پارامترهای معادله حالت JWL برای ماده منفجره TNT [۱۰]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
A (Kpa)	$۳/۷۳۷ \times ۱۰^۸$	سرعت (m/s)	۶۹۳۰
B (Kpa)	$۳/۷۴۷ \times ۱۰^۶$	انرژی بر واحد حجم	$۶ \times ۱۰^۶$
R1	۴/۱۵	فشار (kpa)	$۲/۱ \times ۱۰^۷$
R2	۰/۹	Emo	$۳/۶۸۱ \times ۱۰^۶$
W	۰/۳۵		

## ۴. کلیات مدل سازی مسئله

طبق آن چه در مقدمه اشاره شد، دو روش کلی برای بررسی اثر انفجار بر روی هر نوع سازه ای وجود دارد. در روش اول تحلیل در دوگام صورت می گیرد، در گام اول انفجار و متغیرهای مرتبط به آن تحت بررسی قرار می گیرد و به کمک روابط تجربی یا عددی بارگذاری روی سازه محاسبه می شود و در گام دوم این بار بر سازه وارد شده و سازه تحت تحلیل قرار می گیرد. در روش دوم تحلیل انفجار و اثر آن روی سازه در یک گام صورت می پذیرد. استفاده از روش دوم نیازمند به یک نرم افزار با قابلیت فوق می باشد که بتوان

جدول ۱. پارامترهای مدل RHT بتن با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال [۱۰ و ۱۱]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
معادله حالت EOS			
چگالی متخلخل	۲۳۱۴ (kg/m <sup>3</sup> )	توان تراکم	۳
چگالی مرجع	۲۷۵۰ (kg/m <sup>3</sup> )	A1	$۳/۵۲۷ \times ۱۰^۴$ (MPa)
سرعت صوت در متخلخل	۲۹۲۰ (m/s)	A2	$۳/۹۵۸ \times ۱۰^۴$ (MPa)
فشار تراکم اولیه	۲۳/۳ (MPa)	A3	$۹/۰۳ \times ۱۰^۳$ (MPa)
فشار توپر اولیه	$۶ \times ۱۰^۴$ (MPa)	B1, B2	۱/۲۲
پارامترهای مدل مقاومت RHT			
مدل برشی	$۱/۶۷ \times ۱۰^۴$ (MPa)	مقاومت الاستیک کششی	۰/۷
مقاومت فشاری	۳۵ MPa	Ge/Gp	۲
ft/fc	۰/۱	B	۱/۶
fs/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
پارامترهای مدل شکست RHT			
D1	۰/۰۴	حداقل کرنش کششی شکست	۰/۰۱
D2	۱	کرنش هندسی	۲

## ۳-۴. 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 مقاومت و معادله شکست می باشد. برای توصیف رفتار فولاد در این تحقیق از معادله حالت خطی استفاده شده است. این معادله توصیف کننده رفتار خطی بین کرنش حجمی و فشار در فولاد است که به وسیله مدول بالک (k) به یکدیگر مرتبط می شوند [۱۱]. جهت تعریف رفتار مقاومتی فولاد از مدل جانسون-کوک<sup>۱</sup> استفاده شده است که با لحاظ کردن اثرات سختی، نرخ کرنش و درجه حرارت، کاربرد فراوان و موافقی در شبیه سازی مسائل مربوط به ضربه و انفجار دارد [۱]. برای شبیه سازی شکست از مدل شکست ناشی از کرنش پلاستیک استفاده می شود. پارامترهای معادله حالت و مدل مقاومت و شکست برای فولاد مصرفی در جدول (۲) ارائه شده است [۱۰].

<sup>1</sup> Johnson Cocke

کامل خاک به‌صورت لاگرانژی وجود ندارد. برای حل این مشکل از ترکیب محیط اویلری و ALE استفاده شده است، به‌این ترتیب که در نزدیکی محل انفجار از محیط اویلری و در نزدیکی سازه از محیط ALE استفاده شده است [۵]. برای المان‌بندی سازه مدفون از محیط لاگرانژی استفاده شده است. همچنین برای المان‌بندی مسلح‌کننده‌ها در وجوه داخلی و خارجی دیواره‌های سازه مدفون از المان‌های پوسته‌ای<sup>۲</sup> دوبعدی استفاده شده است. این المان‌ها به المان‌های لاگرانژی سازه کوپل شده‌اند تا اثر مسلح‌کننده‌ها در نظر گرفته شود [۱ و ۲]. پس از مش‌بندی هندسه مدل لازم است ارتباط بین محیط‌های مختلف با یکدیگر تعریف شود. این ارتباط به سه دسته تقسیم می‌شود:

(۱) لاگرانژی-لاگرانژی

(۲) اویلری-لاگرانژی

(۳) اویلری-اویلری

نرم‌افزار اتوداین اندرکنش از نوع اویلری-لاگرانژی را به‌صورت پیش‌فرض انجام می‌دهد. اما باید سایر ارتباط‌های محیط‌ها به برنامه تعریف شود. در این تحقیق ارتباط مسلح‌کننده‌ها و بتن سازه از نوع لاگرانژی-لاگرانژی می‌باشد که با یکدیگر یکپارچه‌سازی شده‌اند. ارتباط خاک و سازه و اندرکنش آنها نیز از نوع لاگرانژی-لاگرانژی می‌باشد که برای ایجاد این ارتباط با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه نیاز به تعریف اندازه المان فاصله<sup>۳</sup> می‌باشد. این اندازه باید بین  $\frac{1}{10}$  تا  $\frac{1}{2}$  کوچک‌ترین بعد المان‌های خاک و سازه که با یکدیگر در تماس هستند، باشد. پس از ایجاد المان‌های فاصله نرم‌افزار به‌صورت خودکار المان‌های تماسی بین خاک و سازه را ایجاد می‌کند [۱۰]. در تحقیق حاضر، دسته ارتباطات اویلری-اویلری در انفجارهای سطحی که ماده منفجره در هوا و روی خاک مدل می‌شود اهمیت پیدا می‌کند و این ارتباط به‌صورت دستی با یکپارچه‌سازی دو محیط به نرم‌افزار معرفی می‌شود. برای جلوگیری از بازگشت امواج از مرزها و همچنین برای بی‌اثر کردن مرزها بر روی نتایج تحلیل، لازم است مرزهای جاذب انرژی مدل شوند. شبیه‌سازی این مرزها در نرم‌افزار اتوداین به دو صورت انجام می‌شود:

(۱) استفاده از شرط مرزی جریان مواد<sup>۴</sup>

(۲) استفاده از شرط مرزی انتقال انرژی<sup>۵</sup>

از شرط مرزی جریان مواد، در مرزهای جانبی محیط گازی استفاده می‌شود. این مرز به مواد موجود در محیط مسئله، اجازه خروج از محدوده تعریف شده، بدون ایجاد اثرات جانبی بر روی محیط را می‌دهد [۹ و ۱۰]. شرط مرزی انتقال نیز شبیه شرط مرزی جریان رو به بیرون عمل کرده، با این تفاوت که برای محیط‌های مواد جامد قابل استفاده می‌باشد. در این تحقیق مرزهای محدوده خاک با

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 مدل‌سازی نمود، از این‌رو در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱۰].

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 به آنها به‌صورت هم‌زمان در نرم‌افزار اتوداین مدل شده و تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار خواهد گرفت. برای بررسی صحت مدل‌سازی و انتشار جبهه موج انفجار در خاک، نتایج به‌دست آمده با روابط تجربی دستورالعمل TM5-855-1 مقایسه خواهد شد. برای این‌منظور نیز مدل‌هایی برای بررسی انتشار امواج در خاک در نظر گرفته می‌شوند. این مدل‌ها شامل انفجار سطحی و انفجار زیرسطحی در محیط‌های مختلف می‌باشد.

## ۵. هندسه مدل

در این تحقیق برای تعیین الگوی توزیع فشار در خاک از محیط یکبعدی و برای مدل‌سازی سازه تحت اثر بار انفجار از محیط دوبعدی و در بعضی موارد از تقارن محوری استفاده شده است. سازه موردنظر از بتن مسلح با مقاومت فشاری ۳۵ مگا پاسکال ساخته شده و از دو سفره آرماتورگذاری در وجوه داخلی و خارجی دیواره بتنی آن استفاده شده است. ضخامت دیواره‌های سازه ۵۰ و ضخامت سقف سازه ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. لازم به‌ذکر است که اطراف سازه مدفون را خاک در بر گرفته است. میزان مدل‌سازی خاک اطراف سازه بستگی به شرایط مسئله و موقعیت ماده منفجره و وضعیت مرزهای جاذب انرژی دارد. در این تحقیق میزان مدل‌سازی خاک اطراف سازه با توجه به شرایط مرزی و حجم محاسبات به‌گونه‌ای انتخاب شده که ضمن بی‌تأثیر بودن اثر مرزها بر روی نتایج تحلیل، حجم مدل به حداقل ممکن کاهش پیدا کند. پس از تعریف هندسه مسئله، لازم است برای تحلیل، مدل هندسی به مدل اجزا محدود تبدیل شود. نرم‌افزار اتوداین<sup>۱</sup> قابلیت استفاده از محیط‌های اویلری، لاگرانژی، لاگرانژی-اویلری (ALE) و ... را برای مش‌بندی هندسه مدل دارا می‌باشد [۱ و ۱۰]. بنابراین، در این تحقیق با توجه به خصوصیات ماده منفجره، خاک، بتن و مسلح‌کننده‌ها، المان‌بندی صورت گرفته است، که در ادامه تشریح خواهد شد. همان‌طور که می‌دانیم ماده منفجره TNT پس از انفجار به گازهای محصول انفجار تبدیل می‌شود و در نتیجه المان‌های آن جابه‌جایی‌های بسیار بزرگی خواهد داشت. بنابراین، در این تحقیق برای مش‌بندی ماده منفجره از محیط اویلری استفاده شده است [۱۷-۱۵] با توجه به ماهیت انفجار و خاک، می‌دانیم که در نواحی نزدیک به محل انفجار جابه‌جایی‌های بزرگی رخ خواهد داد. بنابراین، امکان مدل کردن

<sup>2</sup> Shell

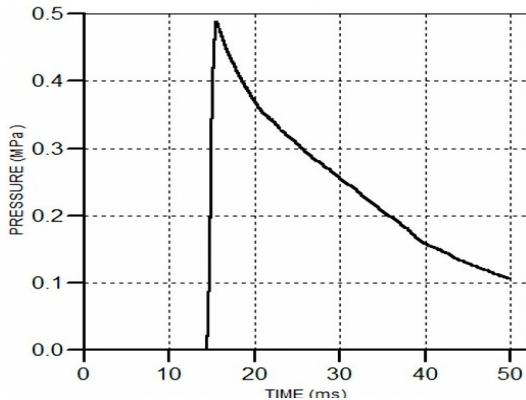
<sup>3</sup> Gap Element

<sup>4</sup> Flow Out Boundary Condition

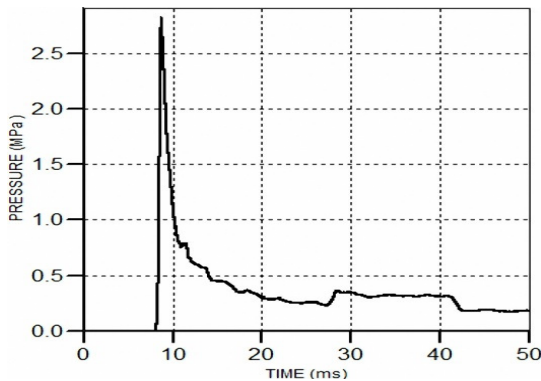
<sup>5</sup> Transmit Boundary Condition

<sup>1</sup> Autodyn

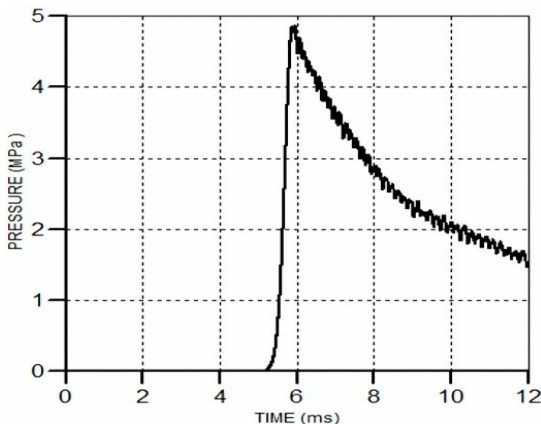
افزایش رطوبت خاک موجب افزایش بیشینه فشار در یک فاصله تقریبی ثابت از محل انفجار شده است. بنابراین، استفاده از خاک‌های درشت‌دانه زهکشی‌شده در اطراف سازه می‌تواند یک راه مؤثر در کاهش اثرات ناشی از انفجار بر روی سازه باشد.



شکل ۷. توزیع فشار در خاک ماسه‌ای خشک اصلاح شده در فاصله ۴ متری در برابر ۱۲۰ کیلوگرم TNT مدفون

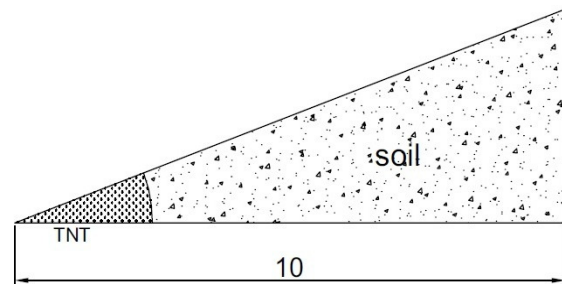


شکل ۸. فشار در خاک ماسه رس دار (۱۵ درصد رس و نیمه اشباع) در فاصله ۵ متری در برابر ۱۲۰ کیلوگرم TNT مدفون



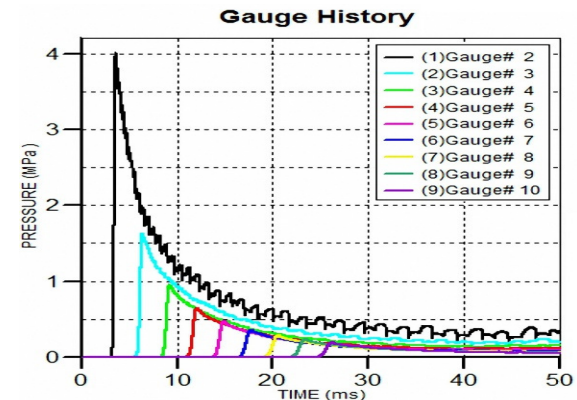
شکل ۹. فشار در خاک رس ماسه‌دار تر (۱۰ درصد ماسه و نیمه اشباع) در فاصله ۵ متری از ۱۲۰ کیلوگرم TNT مدفون

این شرط مرزی پوشش داده شده است [۹ و ۱۰]. برای ثبت تاریخچه فشار در خاک بدون در نظر گرفتن اثر سازه از محیط یک‌بعدی گوه‌ای<sup>۱</sup> استفاده شده است. شکل (۵) و در آن سنجه‌هایی<sup>۲</sup> از فاصله یک متری تا ده متری محل انفجار (به ترتیب از سنجه شماره ۱ تا ۱۰) و برای اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها و خسارات روی سازه، سنجه‌هایی در نقاط مختلف مدل‌ها تعیین شده‌اند که در تمامی طول تحلیل به ثبت اطلاعات به‌دست آمده از تحلیل انفجار و سازه می‌پردازند. از این داده‌ها برای بررسی اثر انفجار بر روی سازه و نتیجه‌گیری استفاده خواهد شد. پس از تکمیل مدل‌سازی و انجام تنظیمات لازم برای تحلیل مانند تعداد سیکل‌های حل، شتاب گرانش، زمان پیشرفت، شرایط اولیه و تنظیمات مربوط به ذخیره‌سازی و ثبت داده‌ها، تحلیل مدل آغاز می‌شود.



شکل ۵. مدل انفجار در عمق زمین در محیط یک‌بعدی بدون در نظر گرفتن اثر سازه

در این تحقیق مدل‌های تک‌بعدی برای بررسی اضافه فشار ناشی از انفجار در خاک‌های مدل شده متفاوت تا سقف ۵۰ میلی‌ثانیه از وقوع انفجار تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفته (نتایج توزیع فشار مثلی در خاک در شکل‌های (۹-۶) نمایش داده شده است).



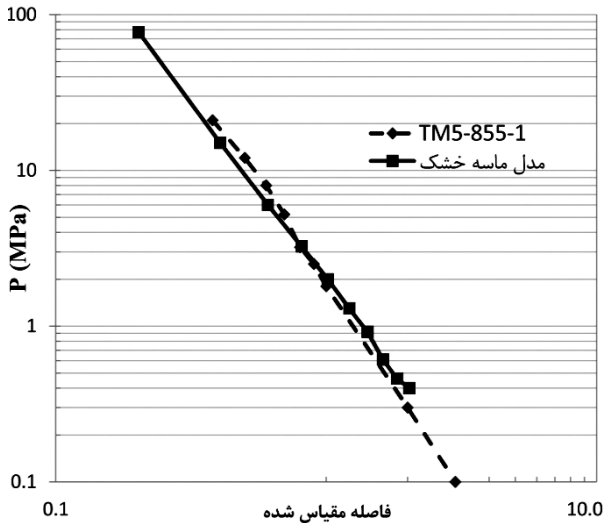
شکل ۶. توزیع فشار از فاصله دو متری تا ده متری (با فاصله یک متر) در ماسه پیش‌فرض نرم‌افزار در انفجار ۱۰۰ کیلوگرم TNT مدفون

همان‌طور که در شکل‌های (۹-۶) دیده می‌شود، بیشینه اضافه فشار حاصل از انفجار در یک فاصله مقیاس شده تقریباً برابر، برای خاک‌های ریزدانه بیشتر از خاک‌های درشت‌دانه می‌باشد و همچنین

<sup>1</sup> Edge

<sup>2</sup> Gauge





شکل ۱۲. مقایسه فشار در خاک ماسه‌ای اصلاح شده با روابط TM5

جدول ۵. مقادیر اوج فشار در میدان آزاد مربوط به مدل ماسه پیش‌فرض و اصلاحی خشک در مقایسه با مقادیر حاصل از آیین نامه TM5

فاصله مقیاس شده m/kg <sup>1/3</sup>	بیشینه فشار در مدل ماسه اولیه MPa	بیشینه فشار در مدل اصلاح شده MPa	بیشینه فشار در TM5-855-1	در صد تفاوت مدل TM5 با اولیه	در صد تفاوت مدل TM5 با اصلاحی
۰/۴	۶/۴	۱۵	۲۱	-۶۹٪	-۲۸٪
۰/۶	۲/۴	۶	۸	-۷۰٪	-۲۵٪
۰/۸	۱/۳	۳/۲۵	۳/۲	-۶۰٪	+۱٪
۱	۰/۶۴	۲	۱/۸	-۶۴٪	+۱۰٪
۲	۰/۱۹	۰/۴۰	۰/۳	-۳۶٪	+۲۵٪

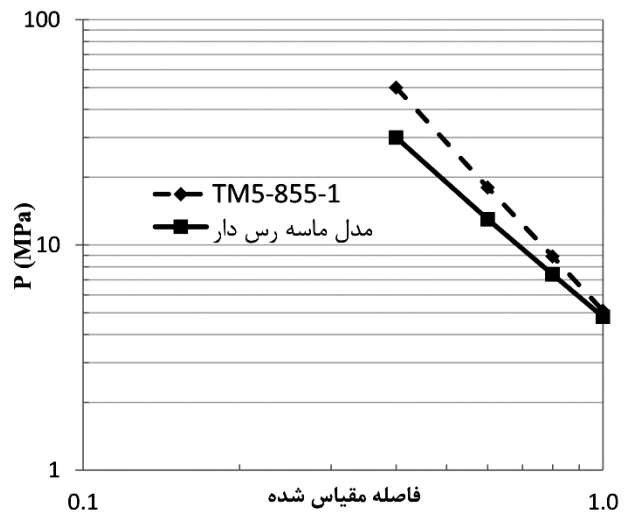
با توجه به جدول (۶) اختلاف فشار با فاصله گرفتن کاهش پیدا می‌کند که این موضوع می‌تواند ناشی از تغییرات شدید خصوصیات خاک نزدیک به محل انفجار و جابه‌جایی‌های بزرگ در المان‌های خاک مدل شده در محل انفجار، که موجب بروز خطا در محاسبات عددی می‌شود و همچنین خطی در نظر گرفته نشدن رفتار خاک در روابط TM5 باشد (در روابط تجربی چگالی و سرعت حرکت موج در خاک ثابت در نظر گرفته شده است) هر چه از محل انفجار فاصله گرفته شود با کاهش اضافه فشار تغییرات چگالی و به دنبال آن سایر خصوصیات خاک کاهش می‌یابد و نتایج تحلیل نرم‌افزاری به روابط تجربی نزدیک‌تر می‌شود. البته تأثیر دقیق درصد رطوبت نیز در روابط TM5 لحاظ نشده است. با توجه به جدول‌های (۶ - ۴) مشخص می‌گردد که با فاصله گرفتن از محل انفجار نتایج تحلیل به نتایج تجربی نزدیک‌تر شده است که با در نظر گرفتن موارد یاد شده می‌توان نتیجه گرفت استفاده از مدل‌سازی خاک به شیوه فوق در نرم‌افزار و بررسی اثر انفجار در فواصل مقیاس شده بیشتر از ۰/۶ الی ۰/۷ با درصد خطای مناسبی، قابل اعتماد می‌باشد.

### ۶. مقایسه با روابط تجربی

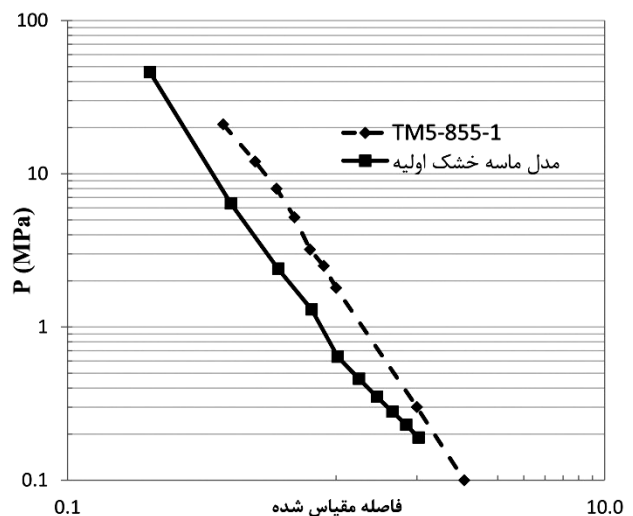
برای بررسی صحت نتایج حاصل از تحلیل اولیه لازم است این نتایج با روابط تجربی ارائه شده در این پژوهش مقایسه شود برای این منظور از جداول (۴ و ۵) و نمودارهای شکل‌های (۱۰-۱۲) استفاده شده است.

جدول ۴. مقایسه نتایج تحلیلی با مقادیر حاصل از آیین نامه TM5

فاصله مقیاس شده m/kg <sup>1/3</sup>	بیشینه فشار در مدل ماسه رس دار MPa	بیشینه فشار در TM5-855-1 MPa	در صد تفاوت مدل TM5 با
۰/۴	۲۲	۲۶	-۱۵٪
۰/۶	۸/۵	۹/۶	-۱۱٪
۰/۸	۴/۳	۴/۶	-۶٪
۱	۲/۸	۲/۶۷	+۴٪



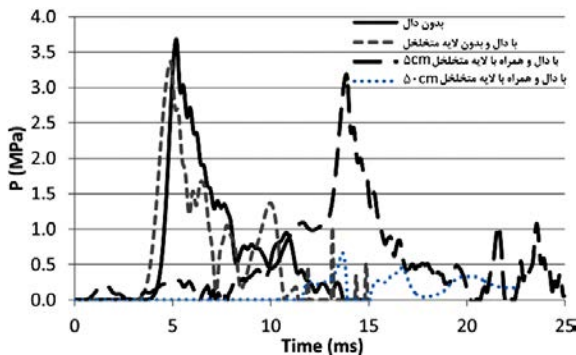
شکل ۱۰. مقایسه فشار در خاک ماسه رس‌دار (۱۵ درصد رس و نیمه اشباع) با روابط TM5-855-1



شکل ۱۱. مقایسه فشار در خاک ماسه‌ای اولیه با روابط TM5-855-1



نقش دال محافظ در ممانعت از انتشار امواج را بی‌اثر کرده و موج ضربه پس از انتقال یافتن به دال دوباره به خاک منتقل می‌شود. در این تحقیق فرض شده که فضای اندکی زیر قسمت مرکزی دال تخلیه گردیده است، به‌صورتی که دال در قسمت مرکزی خود به خاک تکیه نکرده است. همچنین فرض می‌شود خاک روی دال بتنی پس از اتمام مراحل کار متراکم شده است. در شکل (۱۳) هندسه مدل به نمایش درآمده است. پس از مدل‌سازی هندسی، مش‌بندی و اعمال شرایط مرزی، سازه یک بار با حضور دال محافظ و شرایط متغیر محیط متخلخل و بار دیگر بدون حضور این دال، مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار می‌گیرد. نتایج فشار در خاک و در فاصله ۳ متری از انفجار، در دو حالت وجود دال با شرایط مختلف محیط متخلخل و بدون حضور دال در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۴. تغییرات فشار در فاصله ۳ متری از انفجار در شرایط مختلف دال

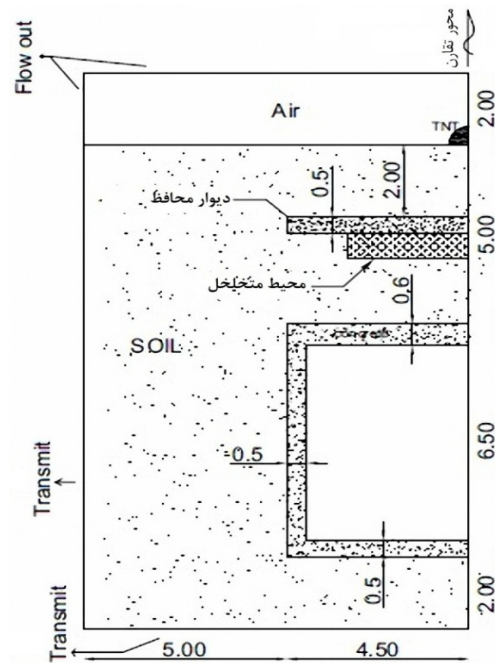
در شکل (۱۴) دیده می‌شود که فشار در فاصله ۳ متری از محل انفجار در خاک، در دو وضعیت با دال و بدون دال تفاوت چندانی نکرده و دال تنها باعث کاهش درصد کمی از فشار ناشی از انفجار شده است. این موضوع ناشی از آن است که دال بتنی موج حاصل از انفجار را پس از دریافت به‌سرعت به خاک زیرین خود منتقل می‌کند. در حقیقت دال بتنی فشار روی خود را به خاک زیرین منتقل می‌کند و تنها درصد کمی از این فشار در اثر عبور از دیواره و ایجاد خسارت در آن مستهلک می‌شود. بنابراین وجود فضای متخلخل و مستهلک‌کننده‌ای که مانع از انتقال فشار به خاک شود ضرورت پیدا می‌کند. در شکل (۱۴) دیده می‌شود که با افزایش ضخامت این لایه متخلخل (در این تحقیق از فضای خالی استفاده شده است) فشار زیر دیواره کاهش شدیدی دارد. در شکل (۱۵) توزیع خسارت روی سازه بعد از گذشت ۲۰ میلی‌ثانیه در دو حالت بدون دال و با دال همراه با محیط متخلخل نشان داده شده است. بر اساس این شکل دیده می‌شود که سازه اصلی زمانی که دال و محیط متخلخل وجود دارد خسارت چندانی ندیده و بیشتر خسارت متوجه سازه محافظ شده است، اما در وضعیت بدون دال محافظ، سازه اصلی دچار آسیب شده است. شکل (۱۶) توزیع خرابی (نسبت کرنش به کرنش نهایی در سازه) در ۳۰ میلی‌ثانیه اول پس از انفجار را روی بحرانی‌ترین نقطه سازه در وضعیت‌های مختلف دال محافظ نشان می‌دهد.

جدول ۶. مقادیر اوج فشار در میدان آزاد مربوط به مدل رس ماسه‌دار ۱۰٪ در برابر مقادیر محاسباتی حاصل از آیین‌نامه TM5

فاصله مقیاس شده $m/kg^{1/3}$	بیشینه فشار در مدل ماسه رس دار MPa	بیشینه فشار در TM5-855-1 MPa	در صد تفاوت مدل با TM5
۰/۴	۳۰	۵۰	-۴۰٪
۰/۶	۱۳	۱۸	-۲۷٪
۰/۸	۷/۴	۸/۹	-۱۶٪
۱	۴/۸	۵/۱	-۵٪

## ۷. ایمن‌سازی سازه مدفون در برابر انفجار سطحی

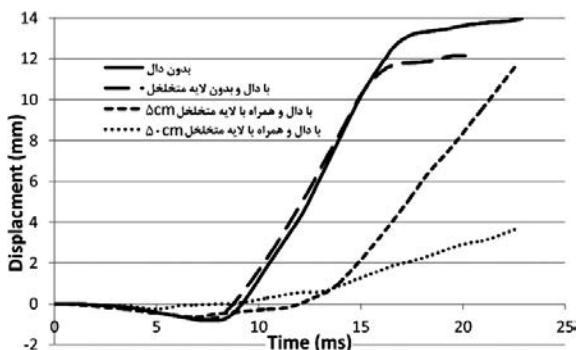
سازه مورد بحث در این تحقیق یک مخزن ذخیره سوخت بتنی زیرزمینی است که در عمق ۵ متری خاک قرار گرفته است. پیرامون سازه را خاک‌رسی ماسه‌دار احاطه کرده است. موقعیت انفجار در سطح زمین و در بحرانی‌ترین نقطه نسبت به سازه و در فاصله ۵ متری از آن قرار گرفته است. منبع انفجار یک بمب GP-500 معادل با ۱۲۰ کیلوگرم ماده منفجره استاندارد TNT می‌باشد [۶]. برای محافظت از سازه شکل (۱۳)، در عمق ۲ متری خاک از یک دال بتنی محافظ به ضخامت ۰/۵ متر که بر روی سازه تعبیه شده است، استفاده می‌شود.



شکل ۱۳. هندسه سازه، ماده منفجره، دیوار بتنی، شرایط مرزی

این دال بتنی در طی مراحل ساخت سازه در موقعیت فعلی آن اجرا شده و سپس روی آن با خاک پوشانده شده و زیر آن نیز با کمک لایه‌ای از مواد متخلخل از خاک جدا شده است. این جداسازی بسیار مهم است و در صورتی که خاک زیر دال به آن چسبیده باشد،

با لایه متخلخل در کاهش تغییر شکل سقف سازه می‌باشد به‌صورتی که با افزایش ضخامت لایه متخلخل این اثر کاهش بیشتری شده و سازه ایمن‌تر گردیده است.

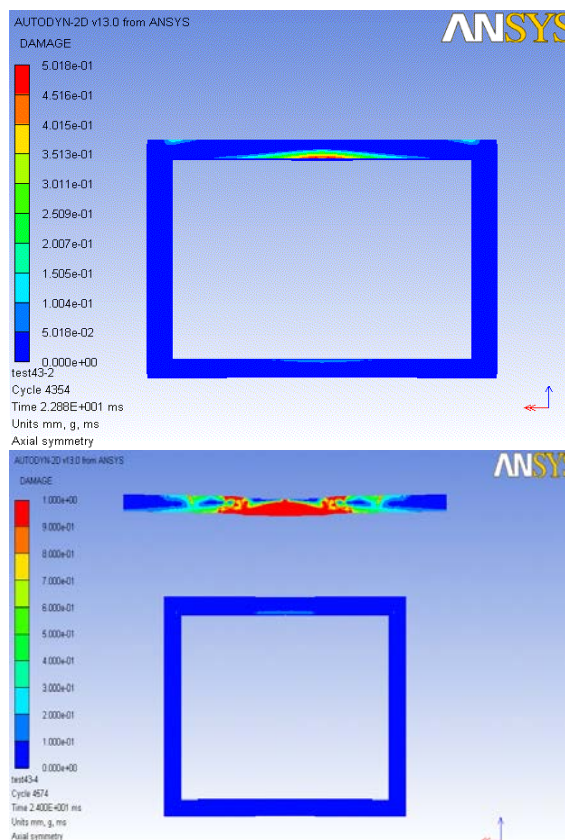


شکل ۱۷. تغییر شکل قائم سقف تحت اثر انفجار در شرایط مختلف سازه

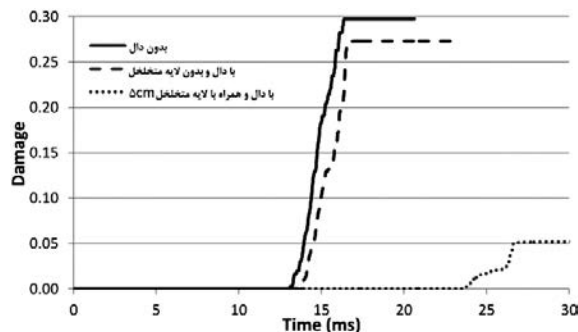
همان‌طور که در شکل‌های (۱۷-۱۴) دیده می‌شود استفاده ترکیبی از سیستم دال محافظ به همراه لایه متخلخل توانسته است تا حدود قابل توجهی از اثرات فشار ناشی از انفجار سطحی بر سازه مدفون بکاهد.

#### ۸. ایمن‌سازی سازه مدفون در برابر بار انفجار زیر سطح زمین

با توجه به این‌که توزیع فشار ناشی از انفجار در داخل زمین شدیدتر از انفجار سطحی است، لازم است که سازه مدفون در برابر این انفجارها نیز مقاوم‌سازی شود. با توجه به اینکه امکان استفاده از سیستم پیشنهادی در مورد انفجار سطحی برای انفجار زیر سطحی بسیار مشکل و هزینه‌بر است، لازم است از سیستم دیگری برای استهلاک موج حاصل از فشار استفاده شود. برای ایمن‌سازی سازه مدفون در برابر انفجار زیرسطحی از طریق کاهش اثر موج انفجار می‌توان از روش‌های متعددی استفاده نمود. با توجه به این‌که موج انفجار در خاک‌های با دانه‌بندی درشت‌تر و بد دانه‌بندی شده با استهلاک بیشتری همراه است (شکل ۱۲-۱۰)، استفاده از این خاک‌ها در اطراف سازه می‌تواند در کاهش اثر انفجار مؤثر واقع گردد. همچنین می‌توان با استفاده از جداگرهایی از جنس مواد پلی‌اتیلن، بین خاک و سازه جدایی ایجاد کرد تا از اندرکنش مستقیم بین خاک و سازه جلوگیری به‌عمل آید. اما تمام این موارد می‌تواند درصد کمی از انرژی حاصل از انفجار را جذب کند و برای تکمیل مقاوم‌سازی نیاز به روش مؤثرتری می‌باشد که بتواند مقدار انرژی بیشتری را جذب و مستهلک کند. برای این منظور در این تحقیق اثر چاه‌های مستهلک کننده امواج لرزه‌ای در اطراف سازه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این چاه‌ها اگر در موقعیت مناسبی اطراف سازه قرار گیرند می‌توانند تا حدود زیادی از رسیدن امواج حاصل از انفجار به سازه جلوگیری نمایند. برای بررسی این موضوع، یک سازه بتن مسلح مدفون تحت اثر انفجار زیر سطحی در شرایط مختلف چیدمان چاه‌های مستهلک

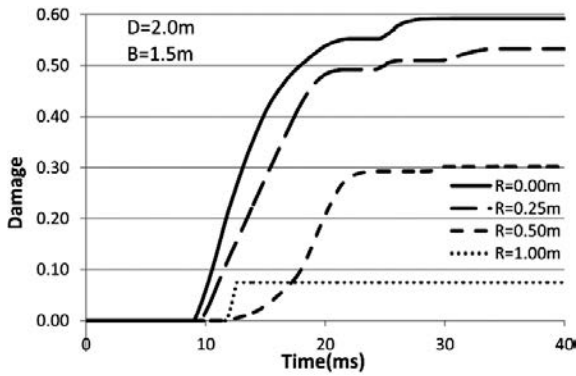


شکل ۱۵. توزیع گرافیکی خرابی روی سازه در حالت بدون محافظ و با دال محافظ همراه با لایه متخلخل

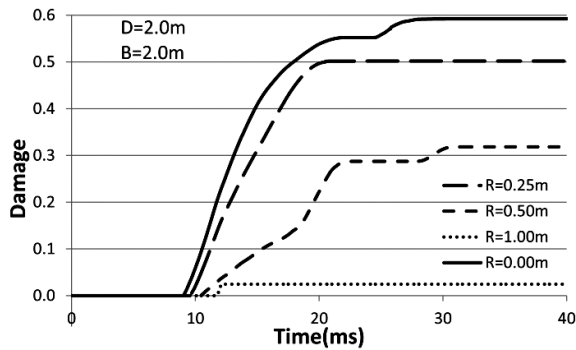


شکل ۱۶. پیشرفت خرابی روی بحرانی‌ترین نقطه سازه در وضعیت‌های مختلف

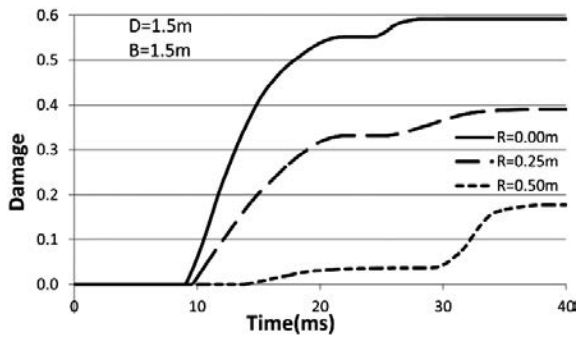
با توجه به داده‌های حاصل از شکل (۱۶) مشخص است که ترکیب دال و فضای زیر آن، نقش بسیار مهمی در کاهش خرابی روی سازه داشته، به‌گونه‌ای که ایجاد حدود ۵ سانتی‌متر فضای آزاد بین دال محافظ و خاک زیر آن باعث کاهش حدود ۸۰ درصد خرابی کششی در سازه بتنی شده است. البته می‌توان جهت ساده بودن روند اجرا و ساخت، از یک ماده متخلخل برای جداسازی خاک و سازه محافظ استفاده نمود تا مانع از انتقال انرژی حاصل از انفجار به خاک زیر آن شود. برای مقایسه بهتر در شکل (۱۷) تغییر شکل قائم سقف سازه در برابر بار انفجار در وضعیت‌های مختلف بارگذاری به نمایش درآمده است. نتایج حاصل از این نمودارها نیز حاکی از مؤثر بودن دال همراه



شکل ۲۰. پیشرفت خسارت در بحرانی‌ترین نقطه روی دیواره سازه در شرایطی که فاصله چاه‌ها از یکدیگر ۱/۵ متر و از دیواره سازه ۲ متر می‌باشد.



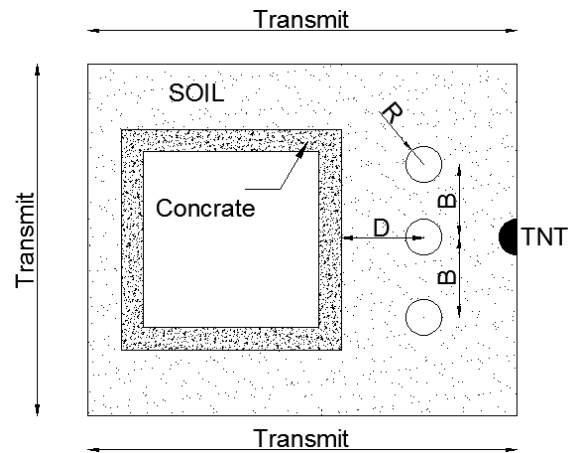
شکل ۲۱. پیشرفت خسارت در بحرانی‌ترین نقطه روی دیواره سازه در شرایطی که فاصله چاه‌ها از یکدیگر ۲ متر و از دیواره سازه ۲ متر می‌باشد.



شکل ۲۲. پیشرفت خسارت در بحرانی‌ترین نقطه روی دیواره سازه در شرایطی که فاصله چاه‌ها از یکدیگر ۱/۵ متر و از دیواره سازه ۱/۵ متر می‌باشد.

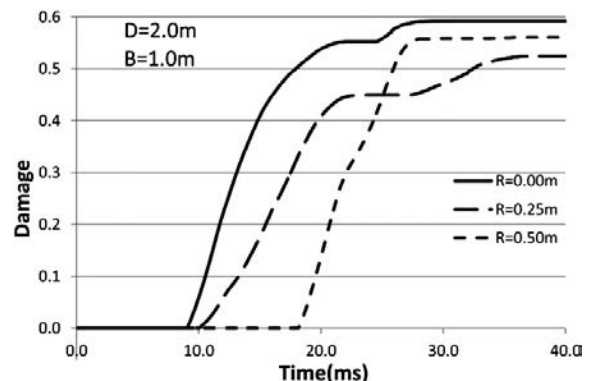
همان‌طور که از شکل‌های (۲۲ - ۱۹) مشخص است، به‌طور کلی با افزایش قطر چاه‌ها، میزان خسارت وارده به سازه کاهش یافته است. در شکل (۱۹) که فاصله چاه‌ها به هم نزدیک است (۱ متر) تغییر اندازه شعاع چندان در کاهش خسارات مؤثر نبوده است. اما در شکل (۲۱) که فاصله چاه‌ها از یکدیگر بیشتر است (۲ متر) افزایش قطر چاه‌ها موجب کاهش محسوس خسارت روی سازه شده است.

کننده انرژی قرار گرفته است. در این چیدمان‌ها قطر چاه‌ها، فاصله چاه‌ها از یکدیگر و فاصله چاه‌ها از سازه، متغیر در نظر گرفته شده است. مقدار ماده منفجره در تمامی مدل‌ها یکسان بوده تا امکان مقایسه شرایط متغیر مسئله مهیا شود. خاک اطراف سازه ماسه‌ای در نظر گرفته شده است. دیگر شرایط مسئله مانند شرایط مرزی و غیره مانند وضعیت انفجار سطحی مدل شده‌اند. برای بررسی وضعیت‌های مختلف چیدمان چاه‌های مستهلک کننده انرژی، متغیرهایی برای ابعاد و هندسه آن‌ها در نظر گرفته شده که در شکل (۱۸) نمایش داده شده است. تحلیل مدل‌ها در وضعیت‌های مختلف چاه‌ها صورت خواهد گرفت و نتایج با یکدیگر مقایسه خواهد شد. در شکل (۱۸)،  $R$  شعاع چاه‌های مستهلک کننده انرژی،  $B$  فاصله مرکز تا مرکز چاه‌ها از یکدیگر و  $D$  فاصله مرکز چاه‌ها از دیواره سازه می‌باشد.



شکل ۱۸. پلان هندسه مدل و چیدمان چاه‌ها

در این تحقیق فاصله چاه‌ها از یکدیگر و از سازه ( $B$  و  $D$ ) مقادیر (۱، ۱/۵، ۲ متر) انتخاب گردیده و شعاع چاه‌ها نیز از صفر (فرض عدم وجود چاه‌ها) تا ۱ متر متغیر می‌باشد.



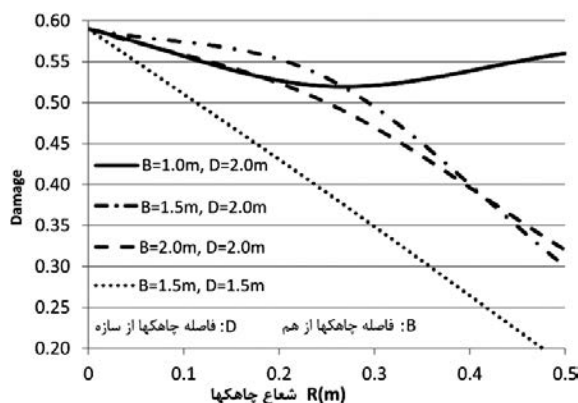
شکل ۱۹. پیشرفت خسارت در بحرانی‌ترین نقطه روی دیواره سازه در شرایطی که فاصله چاه‌ها از یکدیگر ۱ متر و از دیواره سازه ۲ متر می‌باشد.

سازه کاهش یافته و بالعکس با افزایش فاصله چاه‌ها از دیواره سازه میزان خسارت وارده بیشتر بوده است.

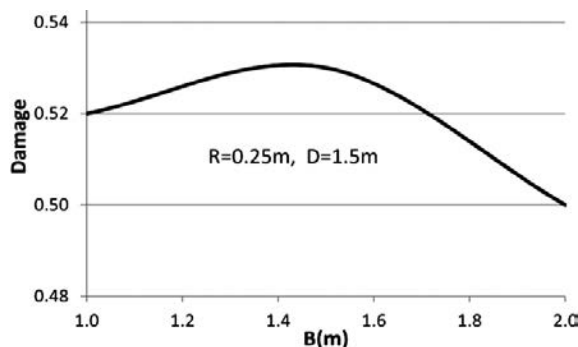
### ۹. نتیجه‌گیری

ایمن‌سازی سازه مدفون در برابر انفجار سطحی: مدل ارائه شده در این تحقیق بعد از بررسی انتشار موج حاصل از انفجار و بیشینه فشار حاصل در فواصل مختلف خاک به بررسی اثر دال محافظ بر کاهش موج انفجار و میزان خرابی سازه با توجه به شرایط دال، می‌پردازد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته، دال محافظ به‌تنهایی نمی‌تواند اثر قابل توجهی روی کاهش خرابی و فشار روی سازه داشته باشد. اما با استفاده از یک لایه متخلخل زیر دال محافظ، که نقش جداکننده بین دیوار و خاک را ایفا می‌کند، فشار وارد به سازه و به تبع آن خرابی و تغییر شکل سازه کاهش پیدا خواهد کرد. اثر این لایه متخلخل به‌گونه‌ای است که هر چه درصد تخلخل و ضخامت آن بیشتر باشد نقش بیشتری در کاهش بار وارد به سازه ایفا خواهد کرد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت استفاده ترکیبی از دال محافظ همراه با لایه متخلخل زیر آن می‌تواند به‌عنوان یک روش مطمئن برای ایمن‌سازی و کاهش خسارت سازه مدفون در برابر انفجار سطحی مورد استفاده قرار گیرد.

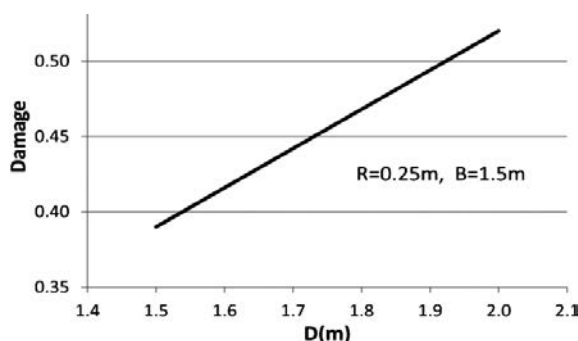
ایمن‌سازی سازه مدفون در برابر انفجار زیرسطحی: مدل ارائه‌شده در این تحقیق به بررسی اثر چاه‌های حفر شده در اطراف سازه با چیدمان‌های مختلف و شرایط متغیر ابعادی بر کاهش خسارت وارد به سازه در اثر انفجار زیرسطحی می‌پردازد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در شرایط مختلف تعریف شده، دیده شد که حفر چاه‌های نزدیک به یکدیگر با قطر کم چندان در کاهش خسارت سازه مؤثر واقع نشده و استفاده از چاه‌هایی با فاصله و قطر بیشتر در استهلاک امواج حاصل از انفجار و به تبع آن کاهش خسارت سازه، مؤثرتر بوده است. همچنین دیده شد که فاصله چاه‌ها از سازه با خسارت سازه رابطه مستقیم دارد. در این تحقیق با انجام تحلیل‌های متعدد، استفاده از چاه‌هایی با شعاع ۲۵ تا ۵۰ سانتی‌متر و با فاصله ۱/۵ متری از هم و فاصله ۱/۵ متری از دیواره سازه، بهترین چیدمان در برابر انفجار زیرسطحی (با قدرت ۱۲۰ کیلوگرم TNT) که در فاصله بیشتر از ۳ متری دیواره سازه قرار دارد، بوده است. همچنین به‌طور کلی می‌توان با استفاده از خاک‌های درشت‌دانه در نزدیکی سازه و زهکشی نمودن آن موجبات کاهش بیشتر بیشینه فشار ناشی از انفجار را فراهم آورد. بنابراین، استفاده از چاه‌های مستهلک‌کننده انرژی با چینش مناسب و دال بتنی همراه با لایه متخلخل و استفاده از خاک‌های درشت‌دانه و متخلخل و زهکشی آن در اطراف سازه می‌تواند به‌عنوان راهکارهایی مؤثر جهت کاهش اثر انفجار بر روی سازه مدنظر قرار گیرد.



شکل ۲۳. تغییرات حداکثر آسیب بر دیواره سازه بر حسب شعاع چاه‌ها



شکل ۲۴. توزیع خسارت بر حسب تغییرات فاصله چاه‌ها از یکدیگر



شکل ۲۵. توزیع خسارت بر حسب تغییرات فاصله چاه‌ها از دیوار

در شکل (۲۲) نیز این وضعیت به‌خوبی مشخص می‌باشد. بنابراین، می‌توان گفت که افزایش قطر چاه‌ها در وضعیتی که چاه‌ها به هم نزدیک باشند از کارایی کمتری برخوردار است. در شکل (۲۳) دیده می‌شود که در وضعیتی که فاصله چاه‌ها از یکدیگر ۱/۵ متر بوده شیب کاهش خسارت وارد بر سازه با افزایش شعاع چاه‌ها بیشتر می‌باشد.

در شکل (۲۴) نیز دیده می‌شود افزایش فاصله چاه‌ها از یکدیگر در یک شعاع و فاصله ثابت از دیواره، تأثیر چندانی بر خسارت سازه نداشته و با افزایش این مقدار، خسارت تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین در شکل (۲۵) مشهود است که با کاهش فاصله چاه‌ها از دیواره (D) در شعاع و فاصله ثابت چاه‌ها از یکدیگر، خسارت وارده به

## ۱۰. مراجع

- [9] Pandurangan, B. "Development, Parameterization and Validation of Dynamic Material Models for Soil and Transparent Armor Glass"; Ph.D. Thesis, Graduate School of Clemson Univ., 2009.
- [10] Ansys Autodyn User's Manual, SAS IP Inc., 2010.
- [11] Rempling, R. "Concrete Wall Subjected to Fragment Impacts, Numerical Analyses of Perforation and Scabbing"; M.Sc. Thesis, Dep't of Structural Eng. Concrete Structures, Chalmers Univ. of Tech., Goteborg, Sweden, 2004.
- [12] Yankelevsky, D. Z.; Karinski, Y. S.; Feldgun, V. R. "Re-Examination of the Shock Wave's Peak Pressure Attenuation in Soils"; Int. J. Impact Eng. 2011, 38, 864-881.
- [13] Tu, Z.; Lu, Y. "Evaluation of Typical Concrete Material Models Used in Hydrocodes for High Dynamic Response Simulations"; Int. J. Impact Eng. 2009, 36, 132-146.
- [14] Tu, Z.; Lu, Y. "Modifications of RHT Material Model for Improved Numerical Simulation of Dynamic Response of Concrete"; Int. J. Impact Eng., 2010, 37, 1072-1082.
- [15] Fiserova, D. "Numerical Analyses of Buried Mine Explosions with Emphasis on Effect of Soil Properties on Loading"; Ph.D. Thesis, Cranfield Univ., 2006.
- [16] Niroumand, H.; Kassim, K. A. "Analytical and Numerical Study on Explosion into/on Cohesion less Soils"; Eur. J. Sci. Res. 2010, 4, 554-562.
- [17] Niroumand, H.; Kassim, K. A. "Simulation Comparison of the Dispersion Behaviour of Dry Sand Subjected to Explosion"; Int. J. Phys. Sci. 2011, 6, 1583-1590.
- [1] Lu, Y.; Wang, Z.; Chong, K. "A Comparative Study of Buried Structure in Soil Subjected to Blast Load Using 2D and 3D Numerical Simulations"; Soil Dyn. Earthq. Eng. 2005, 25, 275-288.
- [2] Wang, Z.; Lu, Y.; Hao, H.; Chong, K. "A Full Coupled Numerical Analysis Approach for Buried Structures Subjected to Subsurface Blast"; Comput. Struct. 2005, 83, 339-356.
- [3] Lu, Y.; Wang, Z. "Characterization of Structural Effects from Above-Ground Explosion Using Coupled Numerical Simulation"; Comput. Struct. 2006, 84, 1729-1742.
- [4] Leong, E. C.; Anand, S.; Cheong, H. K.; Lim, C. H. "Reexamination of Peak Stress Scaled Distance Due to Ground Shock"; Int. J. Impact Eng. 2007, 34, 1487-1499.
- [5] Nagy, N.; Mohamed, M.; Boot, J. C. "Nonlinear Numerical Modeling for the Effects of Surface Explosions on Buried Reinforced Concrete Structures"; Geomechanics and Eng., an Int. J. Techn. Press 2010, 2, 1-18.
- [6] TM5-855-1, "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons"; U.S. Department of the Army, Washington DC, 1986.
- [7] Smith, P. D.; Hetherington, J. G. "Blast and Ballistic Loading of Structures"; Taylor & Francis Ltd, Butterworth Heinemann, Oxford, UK, 1994.
- [8] National Construction Standards Preparation and Promotion Office, Draft of 21st Topic in National Standards of Construction, "Passive Defense", Iran Ministry of Building and House, 2010 (In Persian)