

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل
سال پنجم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳، (پیاپی ۱۷): صص ۵۱-۶۰

مدل سازی عددی فشار هوای انفجار بر روی دیوارهای خاکی مسلح

سید مجتبی اصل مند^۱، مصطفی امینی مزرعه نو^۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۴/۰۵

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۶

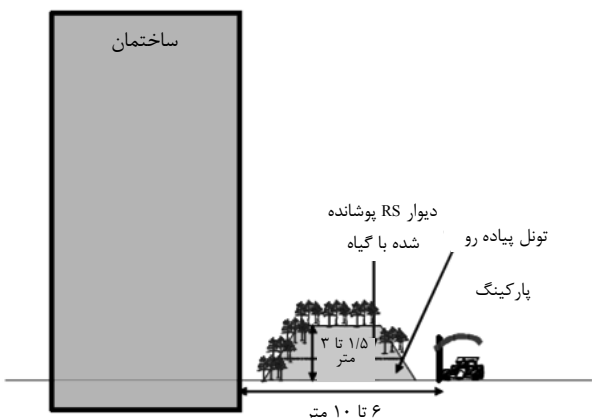
چکیده

استفاده از سازه‌های خاکی مسلح، یکی از رویکردهای معمول پدافند غیرعامل برای محافظت از افراد و دارایی‌ها در برابر انفجار تصادفی ناشی از ذخیره‌سازی مهمات و یا بمب‌های تروریستی می‌باشد. دیوارهای خاکی مسلح به دلیل مشخصات ذاتی مصالح خاکی، سازه‌های مناسبی از لحاظ قابلیت جذب انرژی می‌باشند. در این مطالعه، ضمن مقایسه کلی انواع دیوارهای خاکی مسلح، به مدل سازی عددی این دیوارها در فواصل مختلف از ماده منفجره پرداخته شده است. میدان فشار ناشی از انفجار در دیوار که از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی به دست آمده با آزمایشات تجربی موجود مقایسه شده است. از نتایج اصلی این تحقیق، بررسی علت تفاوت رفتار دیوارهای خاک مسلح در انفجارهای محدوده نزدیک و انفجارهای محدوده دور می‌باشد. در انفجارهای محدوده نزدیک، رفتار، دیوار موضعی و در انفجارهای محدوده دور، رفتار آن کلی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: دیوار خاکی مسلح، بار انفجار، انفجار محدوده نزدیک، انفجار محدوده دور

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران - نویسنده مسئول

۲- مربی و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)



شکل ۲- ایجاد مانع محافظ بین پارکینگ تا ساختمان با استفاده از دیوار RS (نمای جانبی) [۱]

در روی شیب برای پوشش و همچنین زیبایی آن ساخته شود. بسیاری از محصولات تجاری در دسترس مانند ورقه‌های ژئوتکستایلی می‌توانند به عنوان پوشش این دیوارهای RS به کار روند.

دیوارهای RS همچنین می‌توانند به عنوان پناهگاه‌های نظامی موقت برای افراد در محل نیز به کار روند. زیرا ساخت برخی از این دیوارها بسیار سریع بوده و نیاز به مهارت یا تجهیزات خاص ندارد.



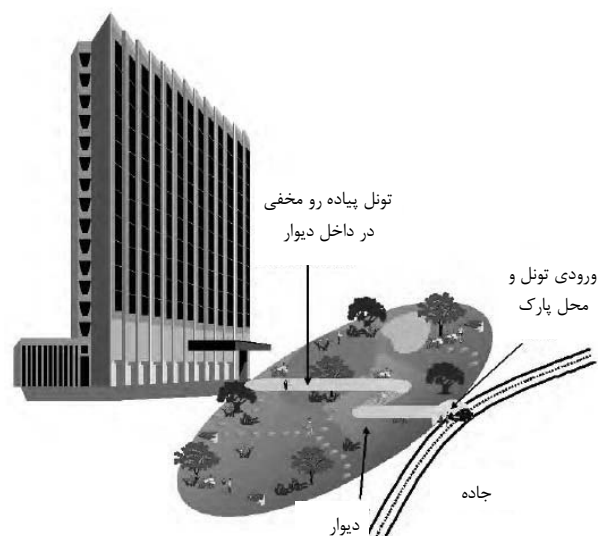
شکل ۳- دیوار ژئوسل به منظور نقطه مهمات [۱]

دیوارهای RS همچنین می‌توانند انفجار تصادفی ناشی از انبار مهمات را به شدت کاهش دهند. در شکل (۴) پلان یکی از آرایش‌های ممکن دیوارهای RS به عنوان موانع محافظت کننده از انبارهای مهمات نشان داده شده است. مطابق شکل ممکن است به چندین ردیف دیوار RS برای مجزا کردن این انبارها نیاز باشد. برای محافظت این انبارها از حملات سبک مانند راکت‌های دستی و

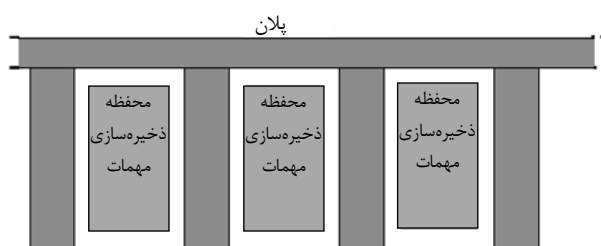
۱- مقدمه

خاک مسلح یکی از مصالح ساختمانی است که از ترکیب خاک و اجزای مقاوم در مقابل کشش (مسلح کننده) تشکیل شده است. مسلح کننده‌ها اغلب شامل نوارهای فلزی و صفحات یا شبکه‌های ژئوسنتتیک می‌باشند. ژئوسنتتیک‌ها یا پارچه‌های مرکب مصنوعی موادی از مشتقات نفت بوده که به رفع مشکلات پروژه‌های عمرانی شتافته‌اند. کاربرد فراوان این محصولات در شاخه‌های مختلف علوم مهندسی منجر به رشد روزافزون آنها در سراسر دنیا شده است که از جمله آنها می‌توان به دیوارهای خاکی مسلح با ژئوسنتتیک یا به اختصار دیوارهای RS اشاره نمود.

نتایج موفقیت‌آمیز حاصل از آزمایشات انفجار در طول سال‌ها، نشان‌دهنده پتانسیل استفاده از دیوارهای RS به عنوان سازه‌های محافظ در برابر بارگذاری انفجار می‌باشد. یکی از خطرات خاص، ماشین‌های تروریستی حاوی بمب می‌باشد که از نمونه‌های آن می‌توان به بمب‌گذاری هتل جاکارتا (۲۰۰۹)، هتل پاکستان (۲۰۰۹) و منطقه لاهور پاکستان (۲۰۰۹) اشاره کرد. با استفاده از دیوارها یا شیب‌های خاکی مسلح در جلوی ساختمان‌های مهم، خسارات احتمالی وارده از سوی این ماشین‌های بمب‌گذاری شده به مردم و ساختمان‌ها به میزان زیادی کاهش می‌یابد. این مسئله به طور شماتیک در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. با ساخت دیوار RS بین پارکینگ تا ساختمان، از بروز خسارات شدید ناشی از انفجار بمب ماشینی جلوگیری می‌شود. به‌علاوه، یک باغچه می‌تواند



شکل ۱- ایجاد مانع محافظ بین پارکینگ تا ساختمان با استفاده از دیوار RS [۱]



ضلع آزاد برای دسترسی

شکل ۴- پلان ذخیره سازی مهمات [۱]

واقعی تحت انفجارهای با شدت مختلف قرار گرفتند. در این پروژه امکان مقایسه عملکرد این دو نوع دیوار و برتری دیوار RS نسبت به دیوار RE در برابر انفجار مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در ادامه، دیوار RS با استفاده از نرم افزار اجزای محدود Plaxis و به صورت دو بعدی مدل سازی شده و برای بارگذاری انفجار در وجه جلوی آن از روابط و نمودارهای تجربی استفاده گردید [۳].

در سال ۲۰۰۲ یک آزمایش میدانی تمام مقیاس در صحرای وومرای استرالیا روی ۷ دیوار RS تحت انفجارهای معادل ۵ و ۲۷ تن TNT انجام شد. هدف از انجام این آزمایش، مطالعه مکانیسم فشار انفجار روی دیوارهای RS و بررسی تأثیر دیوار بر میزان

توپ، یک سقف روی این انبارها تعبیه شده است. این فضاهای حفاظتی می توانند برای پوشش حجم وسیع تر به شکل دایره ساخته شوند. جزئیات آرایش واقعی این دیوارها در عمل با استفاده از نمودارهای طراحی و مدل سازی های عددی همراه با کالیبراسیون به دست می آید.

تاکنون انواع مختلف دیوارهای مسلح ژئوسنتتیکی مورد استفاده قرار گرفته اند. سه نوع متداول که در برابر بار انفجار مورد آزمایش واقع شده اند، عبارتند از: دیوار ژئوتکستایل، دیوار ژئوسل و دیوار ژئوبلوکی. در جدول (۱) مقایسه ای بین این سه نوع دیوار و عملکرد آنها در برابر انفجار صورت گرفته است. در شکل (۳) یک دیوار ژئوسل ساخته شده در یکی از جزایر کوچک سنگاپور نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود، بر روی این دیوار گیاهانی جهت مطابقت و سازگاری با محیط زیست رشد کرده اند.

در سال ۱۹۹۸ و در پروژه تحقیقاتی ETSC^۱ در یکی از جزایر سنگاپور، یک دیوار RS (متشکل از ژئوتکستایل به عنوان مسلح کننده و نما) و یک دیوار RE (متشکل از پانل های بتنی پیش ساخته به عنوان نما و نوارهای فلزی برای تسلیح) با مقیاس

جدول ۱- مقایسه سه نوع دیوار ژئوسنتتیکی در برابر انفجار

نوع دیوار	ژئوتکستایل	ژئوسل	ژئوبلوک
ترکیب	ژئوتکستایل	ژئوسل + ژئوتکستایل	ژئوکامپوزیت + ژئوتکستایل
نام محصول	ژئوتکستایل کامپوزیتی	شبکه سلولار سه بعدی	قالب ژئوسنتتیک حرارت داده شده
نام ماده	پلی پروپیلن متشکل از الیاف نفاخته سوزنی با مقاومت بالا	پلی اتیلن با مقاومت بالا در برابر اشعه UV	پلی پروپیلن هموپلیمر
میزان صلبیت	کم	زیاد	متوسط
احتمال گسیختگی موضعی دیوار و ایجاد ترکش	بسیار کم	متوسط	کم
احتیاج به نیروی متخصص یا تجهیزات خاص برای ساخت	زیاد	کم	ندارد
زمان ساخت برای یک دیوار با عرض ۳، ارتفاع ۳ و طول ۶ متر	۳ تا ۴ روز	حدود ۱ روز	کمتر از ۸ ساعت
کاربرد	انفجارهای محدوده دور ^۲	انفجارهای محدوده نزدیک ^۳	انفجارهای محدوده نزدیک و دور

1- Explosive Testing Structural Component

2- Close Range Blast

3- Far Range Blast

۲- مدل سازی مواد

۲-۱- هوا

هوا به صورت گاز ایده آل مدل می شود. بنابراین معادله حالت آن با استفاده از قانون گاز ایده آل گاما^۱ به صورت زیر تعریف می شود.

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

که در آن، P فشار و γ ضریب گرمای ویژه می باشد که به صورت فشار ثابت به حجم ثابت تعریف می شود و برای گازهای دو اتمی مانند هوا برابر با ۱/۴ می باشد. ρ چگالی جریان می باشد. ρ_0 تراکم اولیه هوا است که در حدود $1/225 \text{ kg/m}^3$ می باشد. E انرژی درونی اولیه می باشد، که در فشار استاندارد $101/3 \text{ kPa}$ ، گرمای ویژه توده هوای $717/6 \text{ J/kg.k}^\circ$ و مرجع دمایی $2/288$ درجه کلوین برابر با $253/4 \text{ kJ/m}^3$ می باشد [۴].

۲-۲- دیوار خاکی مسلح

بر اساس مطالعات قبلی صورت گرفته توسط Zhiwei [۲] نرم افزار Autodyn که بر پایه حل مسائل دینامیکی غیر خطی طراحی شده، توانایی مدل سازی اتصال بین خاک و ژئوسنتتیک را دارا نبوده و می توان برای مدل سازی فشار هوای روی دیوار (نه رفتار خود دیوار که در برنامه های ژئوتکنیکی صورت می پذیرد) از مدل سازی مسلح کننده ها صرف نظر نمود. به علاوه از آنجا که دیوارهای مورد مطالعه همگی تحت آزمایش قرار گرفته و حداکثر کرنش لایه های مسلح کننده آن ها در حین انفجار ناچیز گزارش شده است، می توان مدل سازی دیوارهای RS را در Autodyn به صورت یک بلوک خاکی صورت داد [۲].

برای مدل کردن خاک، معادله حالت فشاری مواد متخلخل (compaction) مورد استفاده قرار می گیرد که شکل خاصی از معادله حالت مای-گرانیسن^۲ می باشد که در آن، عبارت دوم سمت راست معادله حذف شده است [۴].

$$P = P_H + \Gamma \rho (e - e_H) \quad (2)$$

در معادله فوق، P فشار (مجموع فشار منفذی و مؤثر) در اسکلت خاک، ρ چگالی فعلی خاک، Γ پارامتر گاما-گرانیسن، e چگالی انرژی داخلی و زیرنویس H استفاده شده به معنای مرجع

کاهش امواج انفجار بود. در ادامه آزمایش فوق و برای اهداف طراحی این دیوارها، در سال ۲۰۰۴ نیز یک آزمایش تمام مقیاس دیگر در وومرا انجام شد که در آن سه دیوار RS تحت دو انفجار ۵ تنی قرار گرفتند. همچنین این دیوارها مورد مدل سازی عددی قرار گرفته و این بار علاوه بر نرم افزار Plaxis برای بررسی رفتار دیوار، برای تعیین فشار هوای انفجار نیز از نرم افزار Autodyn با قابلیت تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده شد. نرم افزار Autodyn در این آزمایشات که همگی در فواصل مقیاس شده بزرگتر از یک یا انفجار محدوده دور قرار داشتند، توانست دقت قابل قبولی را برای مدل سازی فشار هوای انفجار ارائه کند [۲].

در سال های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ نیز در ادامه پروژه تحقیقاتی ETSC در سنگاپور و وومرای استرالیا علاوه بر روش متداول تسلیح با استفاده از ژئوتکستایل، روش های جدیدی مانند استفاده از ژئوسل و ژئوبلوک نیز به کار برده شد و این نوع دیوارها نیز تحت تعدادی انفجار در فواصل مختلف قرار گرفتند. هدف اصلی پروژه در این زمان مطالعه رفتار انواع مختلف دیوار RS در برابر انفجارهای محدوده نزدیک (فاصله مقیاس شده کمتر از یک) و انفجارهای محدوده دور (فاصله مقیاس شده بزرگتر از ۲) و همچنین بررسی روش های ساخت سریع دیوارهای RS بود. مدل سازی عددی این دیوارها نیز با استفاده از نرم افزارهای Autodyn و Plaxis صورت پذیرفت [۱].

در حوزه مهندسی عمران، مدل های فیزیکی همواره هزینه بر بوده و جمع آوری اطلاعات نیازمند زمان زیادی می باشد. به علاوه، آزمایشات میدانی انفجار، مخرب و بسیار گران هستند. بنابراین تعداد محدودی آزمایش قابل انجام بوده و در برخی موارد سیگنال های دیجیتالی به دلیل شرایط نامناسب سیستم جمع آوری داده در حین انفجار، به سختی قابل دریافت هستند. بنابراین مدل سازی عددی برای شناسایی دقیق تر مکانیزم دیوارها تحت بارگذاری انفجار بسیار سودمند به نظر می رسد. این تحقیق به مدل سازی عددی فشار هوای انفجار بر روی دیوار RS با استفاده از نرم افزار Autodyn خواهد پرداخت. مدل سازی ها برای فواصل مختلف دیوار از محل انفجار صورت گرفته است تا بتوان دقت نرم افزار Autodyn را در پیش بینی فشار در حالات مختلف مشخص نمود. دیوارهای مورد مطالعه از بین دیوارهای به کار رفته در آزمایشات میدانی سال های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ انتخاب شده اند تا امکان صحت سنجی مدل فراهم گردد.

1- Gamma

2- Mie-Gruneisen

کمک ده نقطه (ρ, c) که ایجاد یک رابطه تکه‌ای چندخطی می‌کند، تعریف می‌شود. مدل مقاومتی دانه‌ای^۲ 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 Autodyn رابطه بین تنش تسلیم Y و فشار P به کمک ده نقطه مشابه حالت‌های قبلی تعریف می‌شود [۴].

در موارد متخلخل مانند شن و ماسه، مدول برشی تابع چگالی ماده می‌باشد. که این رابطه نیز با کمک ده نقطه (ρ, G) به عنوان منحنی چند خطی به نرم‌افزار معرفی می‌شود [۴].

۲-۳- 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 [۶]:

$$P = A \times \left(1 - \frac{w\rho}{R_1\rho_0}\right) \times e^{\left(-R_1 \frac{\rho}{\rho_0}\right)} + B \left(1 - \frac{w\rho}{R_2\rho_0}\right) \times e^{\left(-R_2 \frac{\rho}{\rho_0}\right)} + \frac{w\rho^2}{\rho_0} E_{m_0} \quad (4)$$

که در آن، A و B و R_1 و R_2 و W ثابت‌های مصالح، E_{m_0} انرژی ویژه اولیه، ρ_0 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 (۲) موجود می‌باشد [۵].

۳- کلیات مدل سازی مسئله

طبق آنچه در مقدمه به آن اشاره شد دو روش کلی برای بررسی اثر انفجار بر روی هر نوع سازه‌ای وجود دارد. در روش اول، تحلیل در دو گام صورت می‌گیرد؛ در گام اول، انفجار و متغیرهای مرتبط با 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 می‌پذیرد.

شوک هوگونیوت^۱ سطح، یک کمیت معلوم می‌باشد.

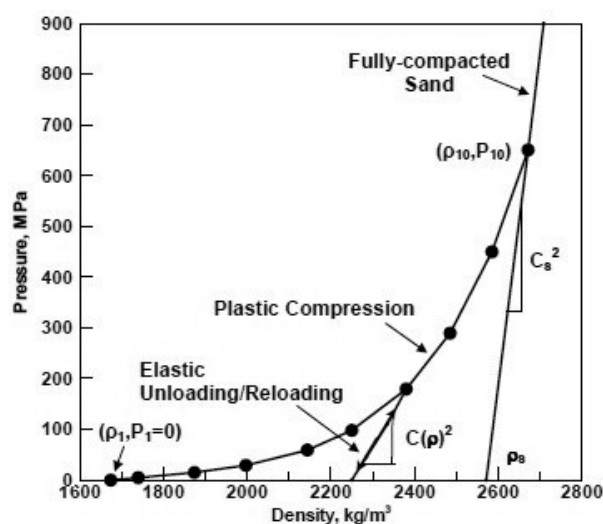
معادله حالت تراکم برای ماسه بر اساس رابطه تکه‌ای- چندخطی بین فشار و چگالی در شکل شماره (۵) نشان داده شده است [۵].

لازم به ذکر است از آنجا که فشار به انرژی داخلی بستگی ندارد، 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 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 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 به طور کلی معادله دیفرانسیل زیر را دارا می‌باشد.

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = C^2(\rho) \quad (3)$$

که در آن، C سرعت صوت در ماسه با چگالی ρ می‌باشد. همانطور که در شکل (۵) 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.



شکل ۵- رابطه بین چگالی و فشار در ماسه خشک [۴]

در نرم‌افزار Autodyn وابستگی سرعت صوت به چگالی ماسه با

جدول ۳- مشخصات دیوارهای مورد بررسی

دیوار	فاصله از خرج (متر)	نوع دیوار	ابعاد دیوار (طول×ارتفاع×عرض)	طول مدل (متر)
RSW1	۴	ژئوتکستایل	۳×۳×۶	۱۵
RSW2	۵/۱۴	ژئوتکستایل	۳×۳×۶	۳۰
RSW3	۶/۹	ژئوسل	۸/۲×۳×۶	۲۰
RSW4	۲	ژئوسل	۸/۲×۳×۶	۱۰

مدل شده است. برای مدل سازی انفجار واقعی نیم کروی وزن معادل تی ان تی خرج در یک ضریب ۱/۸ بر اساس 1-TM5-855 [۷] ضرب شده تا اثر بازتاب از زمین و انرژی از دست رفته ناشی از ایجاد فرو رفتگی لحاظ گردد. بنابراین خرج نیم کروی واقعی ۱۱۰ کیلوگرم تی ان تی به صورت خرج کروی ۱۹۸ کیلوگرم تی ان تی مدل شده است.

اندازه المان ها برای گوه یک بعدی، ۱ میلی متر است. موج انفجار تا یک زمان معین قبل از رسیدن به دیوار مدل شده است. این فاصله، به فاصله انفجار تا دیوار RS بستگی دارد تا به جواب های دقیقی دست یابیم. یک خروجی با پسوند fill از مدل گوه یک بعدی به دست می آید که انتشار موج انفجار را به دست می دهد. این فایل سپس به Autodyn سه بعدی و در محل خرج نگاهت می شود.

مدل سه بعدی به کار رفته، در شکل (۶) نشان داده شده است. فضای مدل در بالای زمین نسبت به صفحه X-Z متقارن است. فضای مدل به کار رفته دارای ارتفاع ۸ متر، عرض ۱۰ متر و طول L متر است. L متناسب با فاصله دیوار RS تا خرج بوده و در جدول (۳) مقدار آن مشخص شده است. معیار انتخاب این فاصله بر این اساس است که فشار هوای انفجار تا فاصله ای برابر با ارتفاع دیوار از پشت آن تحت تأثیر دیوار قرار می گیرد. به چهار وجه مدل شرایط مرزی flow-out اعمال شده تا هوا بتواند به راحتی از این صفحه ها جریان یابد. از آنجا که در واقعیت، دیوارها حدود ۰/۵ متر در داخل زمین مهار می شوند، در مدل سازی عددی نیز شرایط گیرداری در وجه تحتانی آن ها اعمال شده است. مدل سازی دیوار با استفاده از محیط لاگرانژی و هوا با استفاده از محیط اویلری گاز ایده آل صورت گرفته است. ابعاد المان ها برای محیط اویلری (هوا) ۱۰۰ میلی متر و برای محیط لاگرانژی (دیوار) ۲۰۰ میلی متر بکار رفته است. بخشی از شبکه اجزاء محدود مسئله در شکل (۷) نشان داده شده است.

بنابراین استفاده از این روش، نیازمند یک نرم افزار با قابلیت فوق می باشد که بتواند ماده منفجره و سازه را همزمان در آن مدل کرد. نرم افزار Ansys Autodyn قابلیت تحلیل دینامیکی غیرخطی را دارا می باشد که در سال های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است [۵].

در این تحقیق برای بررسی اثر انفجار بر روی دیوار خاکی مسلح از روش دوم استفاده شده است؛ به این صورت که ماده منفجره، خاک و دیوار و جزئیات مرتبط به آن ها به صورت همزمان در نرم افزار Ansys Autodyn v13 مدل شده و تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار خواهد گرفت. برای بررسی صحت مدل سازی و انتشار جبهه موج انفجار در محیط، نتایج به دست آمده با نتایج آزمایش های تجربی موجود مقایسه خواهد شد.

جدول ۲- پارامترهای معادله حالت WL برای ماده منفجره TNT [۵]

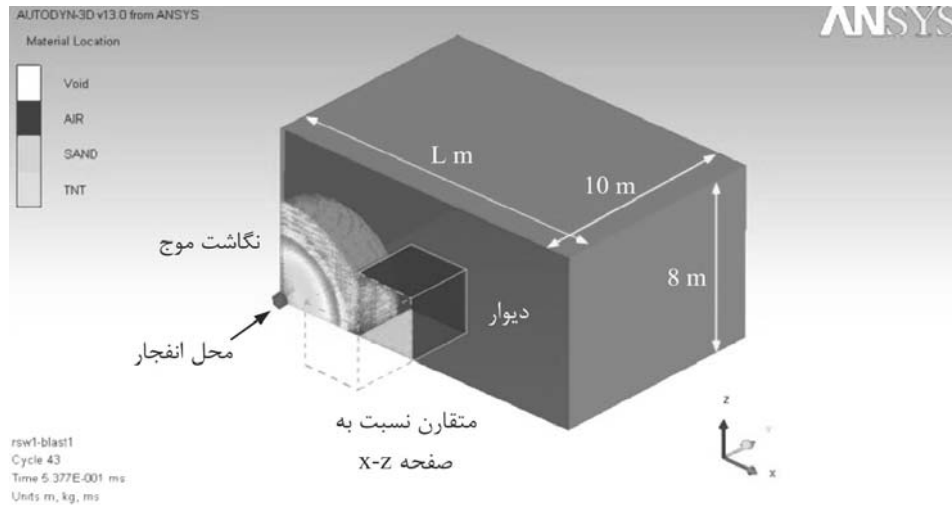
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
A (kPa)	$3/737 \times 10^8$	سرعت (m/s)	۶۹۳۰
B (kPa)	$3/747 \times 10^6$	انرژی بر واحد حجم	6×10^6
R ₁	۴/۱۵	فشار (kPa)	$2/1 \times 10^7$
R ₂	۰/۹	E _{mo}	$3/681 \times 10^6$
W	۰/۳۵		

۴- هندسه مدل

دیوارهای خاکی مسلح مورد مطالعه در این تحقیق شامل دو نوع دیوار ژئوتکستایلی و دیوار ژئوسلی می باشند که مشخصات آن ها در جدول (۳) آورده شده است.

به دلیل اینکه ارتفاع متداول و کاربردی یک سازه محافظ در جلوی یک ساختمان یا یک انبار ذخیره سازی مهمات حدود ۳ متر است، ارتفاع این دیوارها نیز برابر این مقدار انتخاب شده است. همچنین به دلیل جلوگیری از پراکنده شدن امواج انفجار از طریق وجوه کناری و فوقانی دیوار، طول دیوار دو برابر ارتفاع آن انتخاب شده است [۱].

در این تحقیق برای تعیین الگوی توزیع فشار در خاک، از محیط یک بعدی و برای مدل سازی دیوار تحت اثر بار انفجار از محیط سه بعدی استفاده شده است. در ابتدا فشار انفجار ناشی از خرج با استفاده از یک گوه یک بعدی در Autodyn مدل سازی شده است. در این گوه، انفجار به عنوان یک انفجار کروی در فضای آزاد

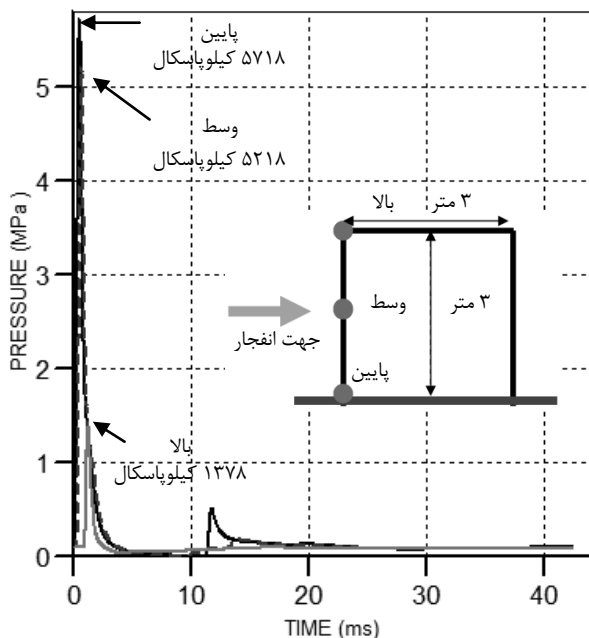


شکل ۶- مدل‌سازی دیوار RS در Autodyn

شده‌اند. در شکل‌های (۸) و (۹) مقادیر فشار هوا در جبهه جلو و عقب دیوار RSW1 نشان داده شده است. در جدول (۴) نیز مقایسه‌ای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر مدل‌سازی عددی برای تمامی دیوارها در جبهه جلو و عقب‌شان نشان داده شده است. با توجه به جدول (۴)، مقادیر فشار در جلو و پشت دیوار با استفاده از Autodyn نسبتاً خوب مدل شده است.

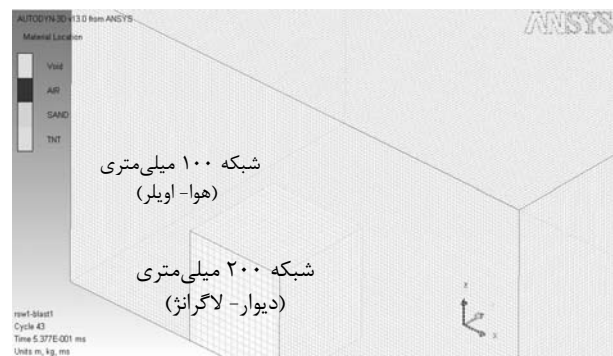
این ابعاد به صورت بهینه با توجه به زمان محاسبه و دقت مورد نظر انتخاب شده است. برای در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و هوا از تحلیل کوپل کامل استفاده شده است.

برای ثبت تاریخچه فشار در هوا و خاک، گیج‌هایی^۱ در نقاط مختلف مدل تعیین شده‌اند که در تمامی طول تحلیل به ثبت اطلاعات ناشی از تحلیل انفجار و دیوار می‌پردازند. از این داده‌ها برای بررسی اثر انفجار بر روی دیوار و نتیجه‌گیری استفاده شده است. پس از تکمیل مدل‌سازی و انجام تنظیمات لازم برای تحلیل، مانند تعداد سیکل‌های حل، زمان پیشرفت، شرایط اولیه و تنظیمات مربوط به ذخیره‌سازی و ثبت داده‌ها، تحلیل مدل‌ها آغاز می‌شود.



شکل ۸- فشار هوای انعکاسی در وجه جلوی دیوار RSW1

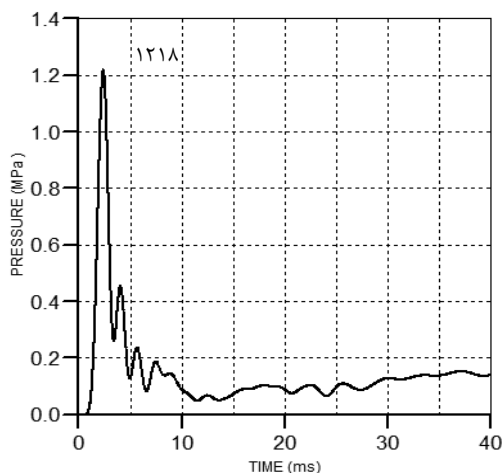
در شکل (۱۰) روند تغییرات فشار خاک در نقطه‌ای با فاصله ۰/۵ متر از وجه جلویی دیوار نشان داده شده است.



شکل ۷- شبکه اجزاء محدود مورد استفاده در Autodyn

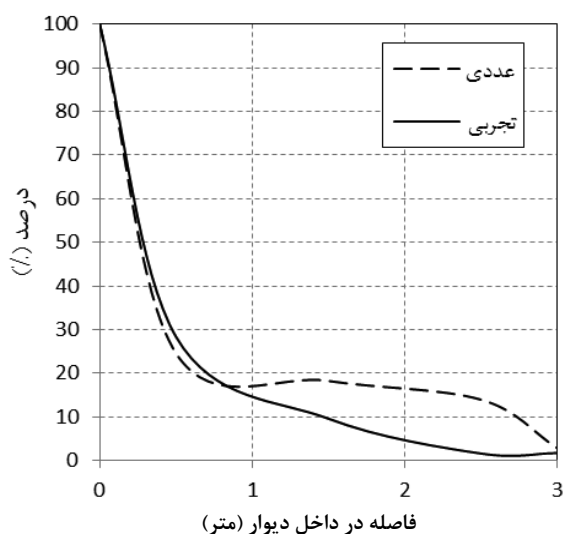
۵- صحت‌سنجی و ارائه نتایج

تمامی دیوارهای مشخص شده در جدول (۳) مورد مدل‌سازی قرار گرفته و نتایج عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده موجود مقایسه

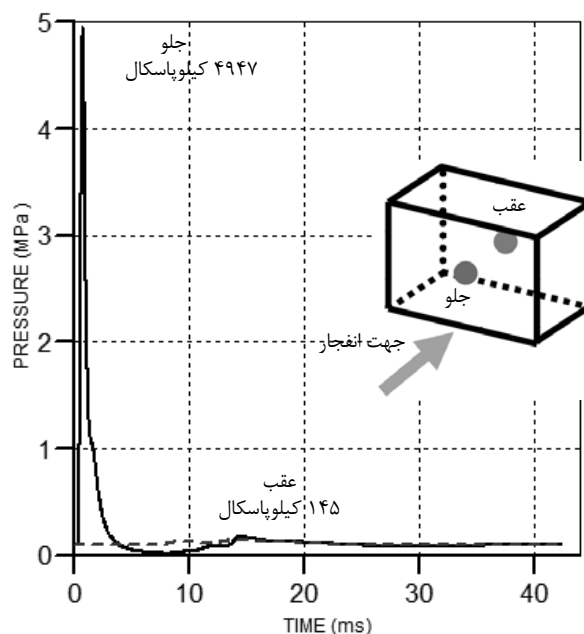


شکل ۱۰- روند تغییرات فشار خاک با زمان در یک نقطه از دیوار RSW1

نتیجه نشان می‌دهد که نرم‌افزار Autodyn برای تخمین پروفیل فشار خاک در کل دیوار غیر دقیق است در حالیکه تخمین آن از فشار خاک در نزدیکی وجه جلویی دیوار مناسب است. به عبارت دیگر، نرم‌افزار Autodyn در پیش‌بینی پاسخ انفجار در سطوح مشترک بین هوا و ماده جامد بسیار خوب بوده ولی در خود ماده جامد دقت خوبی ندارد. دلیل این امر، پایه دینامیک سیالات محاسباتی Autodyn است که پاسخ هوا را بر خلاف ماده جامد به خوبی مدل می‌کند. یک نرم‌افزار ژئوتکنیکی جایگزین برای مدل سازی عملکرد دیوار، نرم‌افزار Plaxis می‌باشد که در مقاله دیگر این محققین برای بررسی تغییر شکل پذیری دیوار خاکی مسلح مورد استفاده قرار گرفته است. [۸].



شکل ۱۱- کاهش فشار خاک در طول دیوار RSW1 (تجربی و عددی)



شکل ۹- فشار هوای انعکاسی در وجه جلو و عقب دیوار RSW1

جدول ۴- مقایسه بین مقادیر فشار هوای اندازه‌گیری شده و محاسباتی

نام دیوار	محل گیج	مقادیر اندازه‌گیری (کیلوپاسکال)	مقادیر محاسباتی (کیلوپاسکال)	فاصله مقیاس شده (متر بر ریشه سوم کیلوگرم بر متر مکعب)
RSW1	جلو	۶۵۳۹	۴۹۴۷	۰/۸
	عقب	۱۱۵	۱۴۵	
RSW2	جلو	۴۴۹	۳۳۳	۳
	عقب	۲۱	۳۸	
RSW3	جلو	۵۴۵	۷۵۹	۲
	عقب	۵۵	۱۰۱	
RSW4	جلو	۱۷۰۳۸	۱۴۵۶۰	۰/۴
	عقب	۵۰	۴۲	

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به مقایسه کاهش حداکثر مقادیر فشار در طول دیوار برای مقادیر اندازه‌گیری و مدل‌سازی عددی پرداخته است. همانطور که دیده می‌شود در انفجار محدوده نزدیک دقیق می‌باشد و بعد از آن مدل‌سازی عددی، فشار خاک تقریباً ثابتی را تخمین زده است؛ در حالی که مقادیر واقعی فشار خاک با فاصله کاهش می‌یابد. این در حالیست که در انفجار محدوده دور مقادیر فشار خاک کاملاً بیشتر از واقعیت است. این

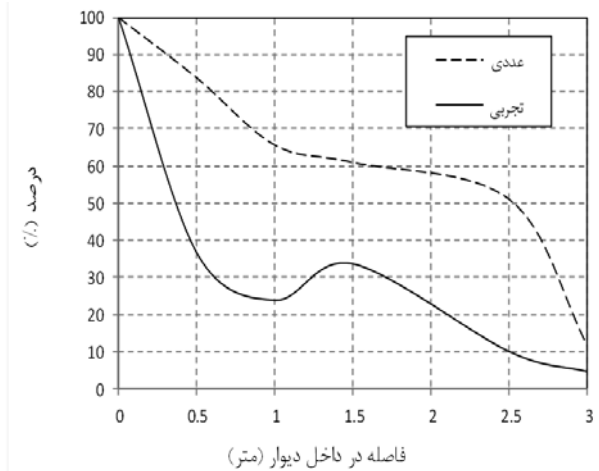
شکل (۱۳) به مقایسه تغییرات فشار در وجه جلویی دیوارهای RSW1 تا RSW4 می پردازد. با توجه به شکل (۱۳) میزان کاهش فشار از پایین تا بالای دیوار با افزایش فاصله مقیاس شده کاهش می یابد به طوری که برای دیوار RSW4 با فاصله مقیاس شده ۰/۴ این کاهش فشار، حدود ۸۱ درصد و برای دیوار RSW2 با فاصله مقیاس شده ۳ برابر ۳۲ درصد می باشد. همانطور که دیده می شود با فاصله گرفتن دیوار از مرکز انفجار، توزیع فشار به صورت یکنواخت تر در می آید.

این تفاوت در الگوی توزیع فشار موجب تفاوت در رفتار دیوارها شده و این مورد در آزمایشات تجربی [۱] گزارش شده است. در انفجار محدوده دور دیوار دارای رفتار یا تغییرشکل های کلی می باشد. در حالی که در انفجارهای محدوده نزدیک به دلیل توزیع غیریکنواخت فشار، رفتار دیوار موضعی بوده و حفره ای در وجه جلوی دیوار ایجاد می گردد [۱].

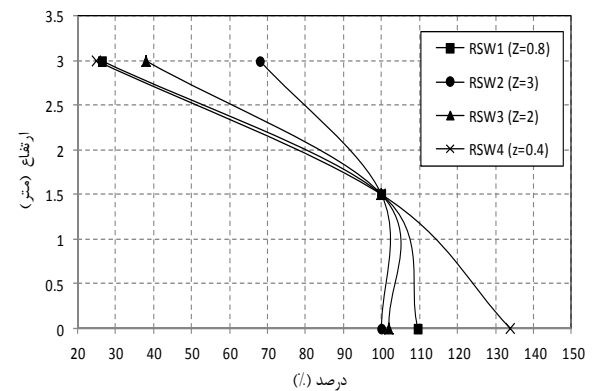
در شکل (۱۴) نمودار مقادیر فشار هوای محاسباتی بر اساس مقادیر اندازه گیری شده آن برای هر چهار دیوار رسم شده است. برای مقایسه بهتر، محورهای نمودار با مقیاس لگاریتمی انتخاب شده است. همانطور که دیده می شود کلیه نقاط در نزدیکی خط تقارن واقع بوده و در نتیجه، Autodyn مقادیر فشار را در وجوه دیوارها با دقت خوبی پیش بینی کرده است.

۶- نتیجه گیری

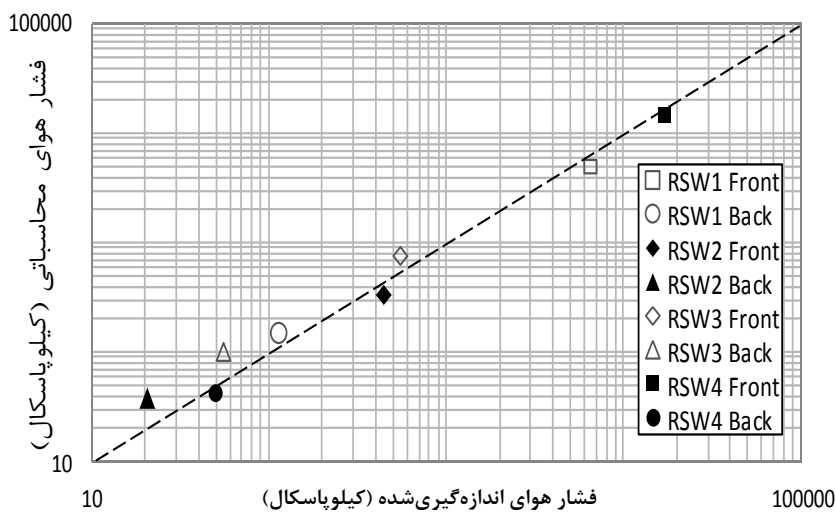
در این تحقیق در راستای بررسی سازه های محافظ در مبحث



شکل ۱۲- کاهش فشار خاک در طول دیوار RSW2 (تجربی و عددی)



شکل ۱۳- توزیع فشار خاک در وجه جلویی دیوار



شکل ۱۴- فشار هوای اندازه گیری شده و محاسباتی

6. Wang, Z.; Lu, Y.; Hao, H.; Chong, K. "A Full Coupled Numerical Analysis Approach for Buried Structures Subjected to Subsurface Blast."; *Comput Struct*; 83, 339-356, (2005).
7. TM5-855-1, "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons."; U.S. Department of the Army; Washington DC, (1986).
8. Aslmand, S.M.; Mazraeno, M. A. "Deformability Investigation of Geosynthetic Reinforced Soil Wall Subject to Bast Load."; *Passive Defence Sci. & Tech.*, Submitted, (2013).

پدافند غیرعامل، ابتدا به مقایسه اجمالی انواع دیوارهای خاکی مسلح با ژئوسنتتیک و معرفی مزایا و معایب آنها در برابر انفجار و در ادامه، به مدل سازی عددی چهار دیوار خاکی مسلح با فواصل مختلف از محل انفجار با استفاده از نرم افزار Autodyn پرداخته شد. براساس تحلیل های صورت گرفته مشاهده شد که نرم افزار Autodyn توانایی تخمین نسبتاً دقیق فشار امواج انفجار در اطراف دیوار را داشته و می تواند به عنوان ابزار مناسبی برای محاسبه فشار هوا روی دیوار خاکی مسلح، هم در انفجار محدوده نزدیک و هم در انفجار محدوده دور بکار رود. همچنین در انفجار محدوده نزدیک، نرم افزار مذکور قادر به تخمین فشار خاک تا فاصله ۰/۵ متری از بر دیوار بوده است. مقادیر محاسباتی به دست آمده در محدوده مقادیر اندازه گیری شده موجود قرار داشتند. در انفجار محدوده دور، Autodyn قادر به تخمین مناسب فشار خاک در داخل دیوار نبوده و مقادیری بیش از واقعیت را به دست می دهد. در این گونه موارد برای بررسی رفتار دیوار مانند تعیین تنش ها و تغییر شکل های توده خاک، بایستی از نرم افزارهای ژئوتکنیکی مناسب مانند Plaxis استفاده نمود.

تحلیل ها نشان داد که در انفجار محدوده نزدیک، فشار هوا بر وجه جلویی دیوار کاملاً غیریکنواخت بوده و با فاصله گرفتن دیوار از محل انفجار، این فشار به حالت یکنواخت تبدیل می شود. این پدیده باعث می شود رفتار دیوار در دو حالت انفجار محدوده نزدیک (عملکرد موضعی) و انفجار محدوده دور (عملکرد کلی) متفاوت باشد.

مراجع

1. Hongwei, A. T. "Reinforced Soil (RS) Walls for Mitigation of Close Range Blast Loading."; Ph.D. Thesis, National university of Singapore, (2010).
2. Zhiwei, H. "Geosynthetic Reinforced Structures Subject to Blast Load." ; Ph.D thesis, National University of Singapore, (2008).
3. Ng, C.C. "Response of Geosynthetics Reinforced Soil Structure Subject to Blast."; Master thesis, National University of Singapore, (2000).
4. Pandurangan, B. "Development, Parameterization and Validation of Dynamic Material Models for Soil and Transparent Armor Glass."; Ph.D. Thesis, Graduate School of Clemson University, (2009).
5. Ansys Autodyn User's Manual, SAS IP Inc., (2010).

Numerical Modeling of Blast Air Pressure on Reinforced Soil (RS) Walls

M. A. Mazraeno ¹

S. M. Aslmand ²

Abstract

Reinforced soil structures are one of the most usual means of passive defense in the protection of personnel and property from accidental explosion of stored explosives and terrorist bomb attacks. Reinforced Soil (RS) walls are good blast energy-absorbing structures due to inherent properties of the backfill soil materials. In this study, in addition to general comparison of different kinds of reinforced soil walls, numerical modelling has been done for walls with different distance from the explosion. Blast induced pressures amplitudes have been evaluated through nonlinear dynamic analysis and results have been compared with full-scale blast trials. One of the key findings of this study is investigating the reason of different response of walls in close range blasts and far field blast. Walls showed a localized failure mechanism occurred in close range blasts in contrast to general behavior in far field blasts.

Key Words: *Reinforced Soil Wall, Blast Load, Close Range Blast, Far Range Blast*

1- Instructor and Academic Member of Department of Civil Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

2- MS in Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran - Writer in Charge