

بررسی عددی اثر استفاده از خاک مسلح شده به وسیله ی ژئوفوم در کاهش آثار ناشی از بارگذاری انفجار

رضا محمد مؤمنی (دانشجوی دکتری)

مهدی خدایپرست* (دانشیار)

دانشکده ی فنی مهندسی عمران، دانشگاه قم

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۸ (دوره ی ۲ - ۳۵، شماره ی ۴/۱، ص. ۹۱-۸۱)

سازه های امن زیرزمینی، سازه هایی هستند که در عمق مشخصی از سطح زمین، عموماً به وسیله ی بتن مسلح ساخته می شوند و سپس خاکریزی به عنوان سربار روی آن ها اجرا می شود. در پژوهش حاضر، با مدل سازی سه بعدی محیط خاک و لایه ی مسلح کننده ی ژئوفوم در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس، به بررسی کارایی ژئوفوم به عنوان مانع جداساز انفجاری در خاکریز سربار سازه ی زیرزمینی پرداخته شده است. به منظور بررسی کارایی ژئوفوم در کاهش بیشینه ی فشار ناشی از بار انفجاری، از متغیر درصد کاهش در روند تحلیل ها استفاده شده و نتایج نشان داده است که استفاده از لایه ی ژئوفوم، بیشینه ی فشار توسعه یافته در خاکریز سربار در اثر انفجار را به طور چشم گیری (تا ۶۱٪) کاهش می دهد. همچنین با تغییر طول و عرض لایه ی ژئوفوم در محدوده ی ۲ تا ۸ متر، درصد کاهش، ۱۵/۸٪ افزایش یافته است. از سوی دیگر، با افزایش ضخامت خاکریز سربار لایه ی ژئوفوم، درصد کاهش، ۹٪+ تغییر یافته است که با در نظر گرفتن شرایط خاص هر پروژه، از جمله نمودار هزینه - فایده، می توان مقدار بهینه یی برای هر یک از متغیرهای بیان شده به دست آورد. در انتها، رابطه یی برای محاسبه ی درصد کاهش به دست آمده است که در طراحی خاکریزهای دفاعی هوشمند کارایی دارد.

واژگان کلیدی: خاکریز دفاعی هوشمند، ژئوفوم، سازه ی امن زیرزمینی، بارگذاری انفجار، درصد کاهش.

r.mohamad.momeni@st.u.qom.ac.ir
khodaparast@qom.ac.ir

۱. مقدمه

در دستگاه سانتریفیوژ، اثر استفاده از موانع جداساز، شامل: ترانشه ی خالی، ترانشه ی پر شده از آب، ترانشه ی پر شده با ژئوفوم با چگالی های مختلف و ترانشه ی پر شده با بتن در ایزوله کردن موج انفجاری را بررسی کرده اند. نتایج نشان داده است که ترانشه ی خالی و ترانشه ی پر شده از ژئوفوم می توانند موج تنش ناشی از انفجار را به شدت کاهش دهند. این در حالی است که ترانشه ی پر شده از بتن و آب، تأثیری در کاهش موج انفجاری ندارند.^[۱] دارابی محبوب و همکاران (۲۰۱۲)، نیز با مدل سازی عددی در نرم افزار LS-DYNA، به بررسی تأثیر حفره های خالی در خاک سربار در پاسخ سازه ی مدفون در برابر بار انفجاری پرداخته و نتیجه گرفته اند که ایجاد حفره های خالی در خاک سربار، تأثیر به سزایی در کاهش تنش های وارد بر سازه ی مدفون دارد.^[۳]

دی^۲ و همکاران (۲۰۱۶)،^[۲] در پژوهشی با استفاده از تحلیل کوبل اویاری لاگرانژی در نرم افزار اتوداین و آزمایش کوچک مقیاس به وسیله ی دستگاه سانتریفیوژ، به بررسی استفاده از لایه ی محافظتی ژئوفوم روی تونل های مدفون در خاک ماسه یی در برابر بار انفجار سطحی پرداخته اند و با بررسی اثر ضخامت لایه ی ژئوفومی که

کشورهای پیشرفته ی دنیا برای حفظ امکانات و دستاوردهای خود در برابر تهدیدهای خارجی و تروریستی و افزایش توان مقابله در برابر تهاجم دشمنان در شرایط بحرانی، رویکرد استفاده از سازه های امن زیرزمینی را انتخاب کرده اند.^[۱] سازه های امن زیرزمینی، سازه هایی هستند که در عمق مشخصی از سطح زمین، عموماً به وسیله ی بتن مسلح ساخته می شوند. سپس خاکریزی به عنوان سربار روی آن ها اجرا می شود. خاکریز سربار، نقش مهمی در میرا کردن تنش های به وجود آمده ی ناشی از انفجار دارد.

کاهش ضربه ی ناشی از انفجارهای سطحی یا زیرزمینی به وسیله ی لایه ی ایزوله کننده، شامل: لایه های نرم، متخلخل و مسلح شده از موضوعات نوین در حفاظت از سازه های زیرزمینی است که در ادامه برخی از آن ها بررسی شده اند. وانگ^۱ و همکاران (۲۰۰۹)، در پژوهشی به کمک نرم افزار LS-DYNA و مدل سازی فیزیکی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱/۱۸، پذیرش ۱۳۹۷/۲/۲۲.

DOI:10.24200/J30.2018.5676.2279

سیدان و حسینی‌نیا (۲۰۱۵)، در مطالعه‌ی پارامتریک به روش تفاضل محدود (FDM) و با استفاده از نرم‌افزار فلک دوبعدی^{۱۰}، تراکم خاک ماسه‌یی سیلت‌دار در اطراف سازه‌ی زیرزمینی را در گسترش موج ناشی از انفجار بررسی کردند و نتیجه گرفتند که خاک با درجه تراکم بیشتر (پارامترهای خمیری Φ ، c ، Ψ بیشتر)، انرژی انفجار را بیشتر جذب می‌کند و در نتیجه جابه‌جایی و تنش سطح سازه‌ی زیرزمینی کمتر است.^[۱۲]

تاکنون بیشتر کاربردهای ژئوتکنیکی ژئوفوم، معطوف به استفاده در خاکریزهای مهندسی به‌عنوان ماده‌ی سبک پرکننده به‌منظور کاهش اثر سربار لایه‌های ضعیف خاک و نیز افزایش پایداری شبروانی‌های خاکی بوده است و همان‌طور که بیان شد، پژوهش‌های اندکی به استفاده از ژئوفوم به‌منظور کاهش آثار ناشی از بار انفجاری پرداخته‌اند. در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس تلاش شده است تا اثر استفاده از لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی ژئوفوم و تغییر در مشخصات هندسی و فیزیکی لایه‌ی ژئوفوم، در کاهش بیشینه‌ی فشار توسعه یافته ناشی از بارگذاری انفجار در خاکریز سربار سازه‌ی زیرزمینی بررسی شود. از جمله‌ی دیگر مزیت‌های لایه‌ی ژئوفوم دفاعی هوشمند می‌توان به کاهش وزن خاکریز سربار سازه‌ی زیرزمینی، کاربرد ژئوفوم به‌عنوان عایق جهت جلوگیری از شناسایی سازه‌ی امن زیرزمینی توسط ماهواره‌های دشمن، عدم نیاز به وسائط نقلیه‌ی سنگین برای حمل، سازگاری با شرایط آب و هوایی مختلف (دوام)، شکل‌دهی و برش آسان و سرعت اجرای بالا اشاره کرد.

۲. مدل‌سازی عددی

در پژوهش حاضر، مدل‌سازی محیط خاک و لایه‌ی ژئوفوم به‌صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام شده است.^[۱۳] نرم‌افزار آباکوس، قابلیت زیادی در اعمال الگوهای بارگذاری و قوانین موجود در حوضه‌ی ژئوتکنیک دارد، لذا در بخش حاضر به تشریح اجزاء مختلف مدل‌سازی پرداخته شده است.

۱.۲. مدل‌سازی محیط خاک

بنا به مطالعات هلوانی^{۱۱} (۲۰۰۷)، به دلیل عدم وجود زمان برای زهکشی تحت بارگذاری انفجاری، جرم خاک را می‌توان به‌عنوان ماده‌یی تک‌فاز در نظر گرفت.^[۱۴] برای مدل‌سازی رفتار تنش - کرنش خاک در پژوهش حاضر از مدل رفتاری دراگر - پراگر اصلاح شده با کلاسیک استفاده شده است که ویژگی بارز آن، کنترل اتساع خاک و در نظر گرفتن رفتار سخت‌شوندگی مدل تحت بار فشاری است و برای شبیه‌سازی رفتار خاک تحت بار انفجاری مناسب است. به منظور صحت‌سنجی مدل و نیز دست‌یابی به مشخصات مورد نیاز برای مدل رفتاری دراگر - پراگر اصلاح شده از مشخصات خاک استفاده شده در پژوهش نقی و همکاران (۲۰۱۰)،^{۱۲} مطابق جدول ۱ استفاده شده است.^[۱۵]

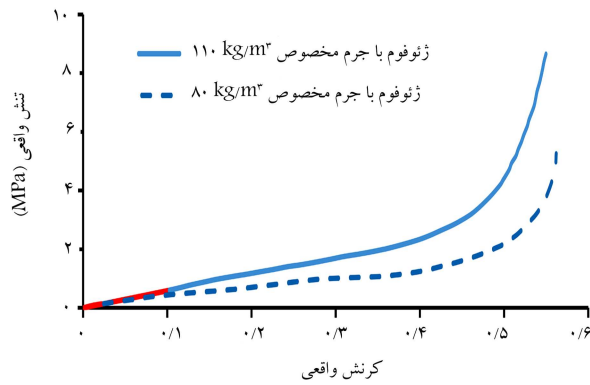
برای شبیه‌سازی تنش‌های اولیه‌ی برجا در توده‌ی خاک، از گزینه‌ی تنش‌های خاکی^{۱۳}، موجود در بخش بارگذاری^{۱۴} نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. ابعاد هندسی و شرایط مرزی مدل به گونه‌یی انتخاب شده‌اند که تغییری در نتایج تحلیل ایجاد نکنند و باعث بازتاب امواج ناشی از انفجار به درون محیط خاک نشوند (شکل ۱).

در تحلیل اشاره شده، با استفاده از قسمت‌بندی^{۱۵} محیط خاک از المان‌هایی با بعد ۰٫۳ متر و ۰٫۲ متر به ترتیب در خارج از محدوده‌ی قسمت مرکزی و در

مستقیماً روی تونل زیرزمینی نصب شده بود، مشخص شد که با ثابت بودن لایه‌ی خاک روی ژئوفوم و افزایش ضخامت لایه‌ی ژئوفوم، آثار ناشی از انفجار، نظیر تنش و فشار و کرنش‌ها در تونل کاهش یافته و میزان تأثیر ضخامت لایه‌ی ژئوفوم در کاهش آثار ناشی از انفجار با بیشتر شدن ضخامت لایه‌ی ژئوفوم، ناملموس‌تر شده است.^[۴] همچنین دی و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی پتانسیل لایه‌ی محافظتی ژئوفوم در کاهش آثار ناشی از انفجارهای سطحی و بررسی نقش مؤثر ژئوفوم، نتیجه گرفتند که اگر به‌عنوان نمونه از ژئوفوم با ضخامت ۰٫۹ متر استفاده کنند، کرنش بیشینه‌ی تاج تونل به اندازه‌ی ۱٫۶ + تا ۰٫۶٪ و جابه‌جایی قائم نیز به اندازه‌ی ۰٫۵۶/۰ تا ۱٫۱/۱ متر کاهش می‌یابد.^[۵] وانگ و همکاران (۲۰۰۸)،^[۶] نیز در بررسی کاهش موج تنش‌ی ناشی از انفجار در لایه‌ی بتنی با حفره‌های مستطیلی‌شکل پر شده با ژئوفوم، نتیجه گرفته‌اند که استفاده از لایه‌ی ژئوفوم در بتن، اثر قابل ملاحظه‌یی در استهلاک موج تنش‌ی ناشی از انفجار دارد همچنین ضخامت، چگالی و ارتفاع بتن روی ژئوفوم تأثیر چندانی در کاهش بیشینه‌ی فشار و تنش ناشی از انفجار ندارد و ضریب کاهش فشار و تنش در لایه‌های ذکر شده به طول لایه‌ی ژئوفوم و نیز فاصله از زیر لایه‌ی ژئوفوم بستگی دارد. در پژوهش مذکور، رابطه‌یی نیز برای محاسبه‌ی ضریب کاهش بیشینه‌ی فشار ارائه شده است که می‌تواند در طراحی لایه‌های دفاعی استفاده شود.^[۶] ابراهیم^۳ و همکاران (۲۰۱۷)، نیز با استفاده از آزمایش برش متناوب و مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار انسیس اتوداین^۴ به بررسی اثر استفاده از خاک ماسه‌یی شامل درصد‌های مختلف دانه‌های خردشده‌ی ژئوفوم در نسبت میرایی، مقاومت برشی ترکیب، و اضافه فشار ایجاد شده ناشی از بار انفجاری پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که ترکیب ۴۰٪ دانه‌های ژئوفوم با ماسه، مقاومت برشی بهینه، بیشترین نسبت میرایی و کمترین اضافه فشار ناشی از بار انفجاری را ایجاد می‌کند.^[۷]

همچنین اولگن و توپگار^۵ (۲۰۱۵)، با انجام یک آزمایش بزرگ مقیاس، اثر استفاده از ترانشه‌ی خالی، ترانشه‌ی پر شده از آب و پر شده از ژئوفوم را در ارزیابی ارتعاشات بررسی و نتیجه‌گیری کردند که کارایی ترانشه‌ی باز و ترانشه‌ی پر شده از ژئوفوم بسیار به هم نزدیک است و می‌توانند حدود ۶۷٪ از دامنه‌ی ارتعاشات را کاهش دهند.^[۸] الوازی و ناگار^۶ (۲۰۱۱)، نیز با انجام آزمایش در محل و مقایسه‌ی نتایج با مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس^۷ به بررسی عملکرد ژئوفوم و ترانشه‌ی باز در میراکردن ارتعاشات هارمونیک ناشی از فونداسیون‌های مکانیکی پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که اثر حفاظتی لایه‌ی ژئوفوم می‌تواند تا ۶۸٪ و بیشتر باشد.^[۹]

قلی‌زاده و رجبی (۲۰۱۴)، نیز ضمن بررسی اثر انفجار سطحی و زیرسطحی در سازه‌های مدفون، راهکارهایی برای ارتقاء ایمنی سازه‌های مذکور پیش‌بینی کرده‌اند. نتایج تحلیل‌ها نشان داده است که برای انفجارهای سطحی، دال بتنی ضد انفجار، کارایی چندانی برای کاهش موج انفجاری ندارد. همچنین در بررسی نوع خاک به‌عنوان پوشش مناسب سازه‌ی مدفون، عملکرد بهتر خاک‌های دانه‌یی مشخص شده است. ضمناً برای انفجارهای زیرسطحی، استفاده از چاهک‌هایی با فواصل متفاوت در اطراف سازه‌ی محافظت شده، کارایی مناسبی خواهد داشت.^[۱۰] آقاجانی و همکاران (۲۰۱۱)، نیز با مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار پلاکسیس^۸ و نیز آزمایش در محل، به بررسی تأثیر ویژگی‌های سربار خاکی در رفتار سازه‌ی مدفون تحت بار انفجاری پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که اجرای خاکریز ریزدانه روی سازه‌ی مدفون، سبب تحمل نیروی فشاری ناشی از انفجار و اجرای خاکریز درشت‌دانه در زیر آن سبب استهلاک انرژی انفجار می‌شود. همچنین اجرای ژئوتکستایل سبب جلوگیری از واپاشی خاکریز زیرین خود می‌شود.^[۱۱]



شکل ۲. نمودار تنش - کرنش واقعی برای ژئوفوم با جرم مخصوص ۸۰ و ۱۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب.

جدول ۲. مشخصات رفتار تنش - کرنشی ژئوفوم در ناحیه‌ی کشسان.

ردیف	نوع ژئوفوم	مدول کشسان (مگا پاسکال)	ضریب پواسون
۱	۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۵٫۷	۰٫۲۳
۲	۱۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۵٫۱	۰٫۲۵

با نرخ کرنش زیاد پرداخته‌اند، که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به پژوهش اولت ۱۸ و همکاران (۲۰۰۶)، [۱۶] برای تعیین رفتار تنش کرنشی ژئوفوم‌های مختلف با استفاده از آزمایش فشاری استاندارد (برای نرخ کرنش‌های کم) و آزمایش هاپکینسون (برای نرخ کرنش‌های زیاد) اشاره کرد. در پژوهش حاضر، به منظور در نظر گرفتن شرایط واقعی رفتارهای کشسان، خمیری و سخت‌شوندگی ژئوفوم تحت بارگذاری سریع انفجار (با نرخ کرنش حدود ۱۰۰۰ هرتز)، از نتایج حاصل از پژوهش اولت و همکاران، برای دو نوع ژئوفوم ۸۰ و ۱۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب با نرخ کرنش ۱۶۲۸ و ۱۵۸۹ هرتز استفاده شده است. با توجه به اینکه در پژوهش مذکور، تنش و کرنش مهندسی بر مبنای ابعاد اولیه‌ی نمونه از آزمایش به دست آمده است، برای در نظر گرفتن تغییر سطح مقطع و تغییر طول نمونه از روابط ۱ و ۲ برای تبدیل تنش و کرنش مهندسی به تنش و کرنش واقعی استفاده شده است. برای معرفی دقیق‌تر خواص کشسان، خمیری و سخت‌شوندگی ژئوفوم به نرم‌افزار آباکوس، مشخصات بخش قرمز رنگ نمودار تنش - کرنش ژئوفوم (شکل ۲) به وسیله‌ی تعریف مدول کشسان و ضریب پواسون در بخش کشسان نرم‌افزار آباکوس انجام شده است (جدول ۲)، همچنین رفتار ژئوفوم در ناحیه‌ی خمیری و سخت‌شوندگی با معرفی نقطه‌به‌نقطه‌ی نمودار تنش - کرنش ژئوفوم در بخش آبی رنگ (شکل ۲) به نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.

$$\varepsilon' = \ln(\varepsilon + 1) \quad (1)$$

که در آن، ε' کرنش واقعی و ε کرنش مهندسی است.

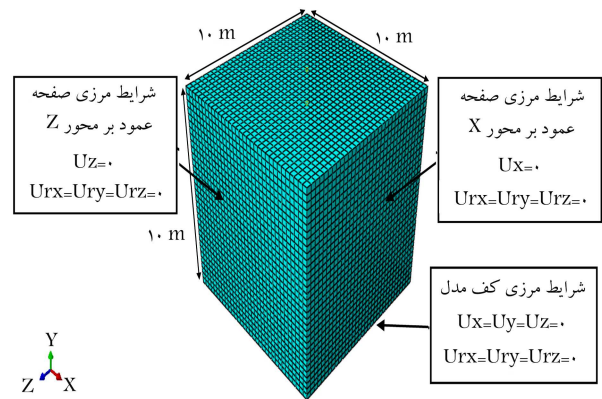
$$\sigma' = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2)$$

که در آن، σ' تنش واقعی، σ تنش مهندسی و ε کرنش مهندسی است.

جهت مدل‌سازی اتصال و اندرکنش بین خاک و ژئوفوم از گزینه‌ی تماس کلی^{۱۹} در آباکوس به همراه تماس سخت^{۲۰} در جهت نرمال و تماس اصطکاکی^{۲۱} در جهت عمود با در نظر گرفتن مقادیر پیش فرض نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات مورد استفاده‌ی خاک. [۱۵]

مشخصات خاک رسی	
مدول یانگ (E)	۵۱٫۷ MPa
ضریب پواسون (ν)	۰٫۴۵
چگالی (ρ)	۱۹۲۰ $\frac{kg}{m^3}$
چسبندگی (d)	۰٫۳۶ MPa
زاویه‌ی اصطکاک (β)	۲۴ درجه
پارامتر خروج از مرکزیت کلاهدک (R)	۰٫۳
موقعیت سطح تسلیم اولیه کلاهدک (ε_V)	۰٫۰۲
پارامتر انتقال شعاع سطح (α)	۰
تنش (MPa)	کرنش حجمی خمیری
۲٫۷۵	۰
۴٫۸۳	۰٫۰۲
۵٫۱۵	۰٫۰۴
۶٫۲۰	۰٫۰۸
رفتار سخت‌شوندگی کلاهدک	



شکل ۱. مشخصات هندسی و شرایط مرزی مدل.

نقاط حساس داخل آن استفاده شده است تا علاوه بر بهینه کردن زمان تحلیل، دقت نتایج نیز قابل قبول باشد (شکل ۱). المان‌های محیط خاک با استفاده از المان‌های لاگرانژی از نوع ۸ گره‌ی (C3D8R) به همراه انتگرال کاهش یافته^{۱۶} و کنترل ساعت شنی^{۱۷} ایجاد شده‌اند. المان‌های مذکور از کتابخانه‌ی المان‌های با حل صریح نرم‌افزار آباکوس انتخاب شده‌اند و ویژگی بارزشان، انعطاف پذیری بالای آن‌هاست. [۱۳]

۲.۲. مدل‌سازی ژئوفوم

ژئوفوم به وسیله‌ی دو عملکرد، موج فشاری ناشی از انفجار را کاهش می‌دهد: ۱. به خاطر وزن کم، نیروهای داخلی کمتری تحت بار انفجاری در آن ایجاد می‌شود و در نتیجه، بیشینه‌ی سرعت ذره‌ی که به یک طرف آن وارد می‌شود، از طرف دیگر آن با شدت کمتری خارج می‌شود؛ ۲. به دلیل وجود هوا در سلول‌ها و خاصیت میرایی بالای ژئوفوم، انرژی انفجار دچار استهلاک می‌شود. [۶]

تاکنون پژوهش‌های اندکی به بیان خواص تنش کرنشی ژئوفوم تحت بارگذاری

۳.۲. مدل سازی ماده‌ی منفجره

در پژوهش حاضر، برای مدل سازی ماده‌ی منفجره با استفاده از روش CONWEP در بخش اندرکنش های ۲۲ نرم افزار آباکوس با تعریف نقطه‌ی مبنا (مرکز جرم TNT) در فاصله‌ی ۳۰ سانتی متری از سطح زمین، انتخاب موج ضربه از نوع انفجار سطحی ۲۳ و وارد کردن جرم ماده‌ی منفجره و ضرایب تبدیلی مدنظر، مدل سازی ماده‌ی منفجره TNT با جرم ۱۰۰ و ۵۰ کیلوگرم در روند تحلیل ها انجام شده است.

۴.۲. روش تحلیل

در پژوهش حاضر از روش حل صریح ۲۴ موجود در نرم افزار آباکوس استفاده شده است. روش صریح، جابه جایی هر گره را با توجه به شتاب آن گره در هر گام با رگداری محاسبه می کند. در روش تحلیل، تأثیر نیروهای خارجی بر روی جسم به شکل انتشار امواج تنشی خواهد بود و مسئله به صورت دینامیکی حل شده است، که برای تحلیل انتشار موج انفجار در خاک، روشی مناسب است.

۵.۲. صحت سنجی مدل

برای بررسی صحت نتایج مدل سازی صورت گرفته، به مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با مطالعات پیشین موجود در این زمینه پرداخته شده است. به منظور نزدیک کردن نتایج حاصل از مدل سازی به نتایج مطالعات پیشین از تغییر در پارامترهای میرایی رایلی خاک استفاده شده است.

نقی و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از نرم افزار آباکوس به بررسی اثر انفجار سطحی در سازه‌ی بتنی مسلح زیرزمینی پرداخته و رابطه‌ی ۳ را برای بیشینه‌ی فشار در خاک به دست آورده اند.^[۱۵] با توجه به اینکه مشخصات خاک مورد استفاده در نوشتار اخیر، مشابه مشخصات خاک در پژوهش حاضر است، لذا برای صحت سنجی مدل می توان از نتایج پژوهش نقی و همکاران (۲۰۱۰) استفاده کرد.

$$PP = 1.03 \left(\frac{R}{M^{\frac{1}{3}}} \right)^{-2.2797} \quad (3)$$

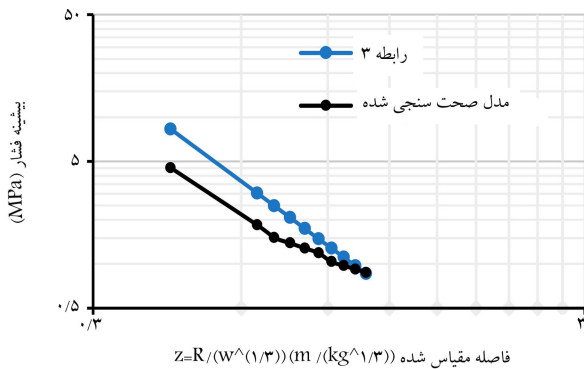
که در آن، PP بیشینه‌ی فشار در خاک (برحسب مگاپاسکال)، R فاصله‌ی نقطه‌ی مورد نظر از مرکز انفجار (بر حسب متر) و M جرم ماده‌ی منفجره (بر حسب کیلوگرم) است. همچنین در پژوهش مذکور، رابطه‌ی ۴ از آیین نامه‌ی ارتش آمریکا^[۲۵] (مبتنی بر آزمایش های انفجاری در محل) استخراج شده است که از آن برای صحت سنجی در بخش حاضر نیز استفاده شده است.^[۱۵]

$$PP = C \left(\frac{R}{M^{\frac{1}{3}}} \right)^{-n} \quad (4)$$

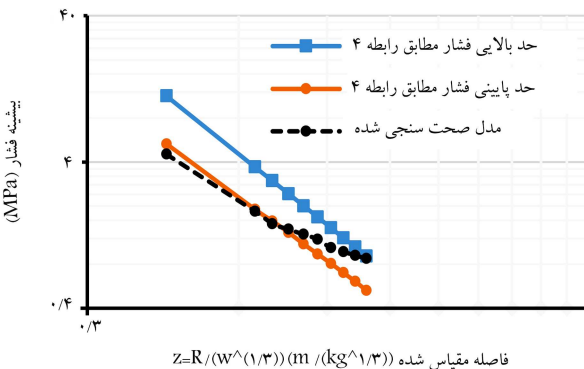
پارامترهای موجود در رابطه‌ی ۴ مشابه رابطه‌ی ۳ است و C و n نیز ضرایب ثابتی هستند که در جدول ۳، مقادیر آن ها برای حد بالایی و پایینی رابطه‌ی مذکور ارائه شده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از پژوهش با روابط ارائه شده در برخی مطالعات پیشین، همگرایی خوبی نشان داده است (شکل های ۳ و ۴). که در شکل های ۳ و ۴، z فاصله‌ی مقیاس شده است و پارامترهای آن مشابه پارامترهای رابطه‌ی ۳ است.

جدول ۳. پارامترهای موجود در رابطه‌ی ۴.^[۱۵]

ردیف	متغیر	n	C
۱	حد بالای رابطه‌ی ۴	۲٫۷۵	۱٫۱۲
۲	حد پایین رابطه‌ی ۴	۲٫۵	۰٫۶۵



شکل ۳. مقایسه‌ی نتایج مدل صحت سنجی شده با رابطه‌ی ۳ (مقیاس لگاریتمی).



شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج مدل صحت سنجی شده با رابطه‌ی ۴ (مقیاس لگاریتمی).

۳. تحلیل نتایج

در بخش حاضر، با توجه به شرایط مدل صحت سنجی شده در بخش ۵.۲، ابتدا انتشار موج شوک ناشی از انفجار در خاک بررسی شده است و در ادامه، برای تعیین کارایی لایه‌ی مسلح کننده‌ی ژئوفوم در کاهش فشار ناشی از انفجار، اثر تغییر در خواص فیزیکی، ضخامت، لایه بندی، طول لایه‌ی ژئوفوم در مدل های جداگانه‌ی بررسی شده است. همچنین در انتهای بخش حاضر، اثر ضخامت لایه‌ی خاک سرپار ژئوفوم نیز بررسی و در انتها رابطه‌ی تجربی برای محاسبه‌ی ضریب کاهش بیشینه‌ی فشار در حالت خاصی از مدل سازی بیان شده است.

۱.۳. بررسی انتشار موج شوک ناشی از انفجار در خاک

با در نظر گرفتن تحلیل مدل صحت سنجی شده در بخش ۵.۲، تحت دو انفجار با وزن ماده‌ی منفجره‌ی ۱۰۰ و ۵۰ کیلوگرم، با گذشت زمان در هر یک از نقاط شاهد، بیشینه‌ی تنش فشاری رسیده به نقطه‌ی مورد نظر میرا شده و به صفر رسیده است و فشار ناشی از موج شوک انفجاری، در نقاط نزدیک تر به محل انفجار بیشتر از نقاط دورتر از محل انفجار است و این به دلیل تئوری گسترش موج تنش در محیط خاک است. همچنین با کاهش وزن ماده‌ی منفجره، بیشینه‌ی فشار ایجاد شده در نقاط متناظر کاهش پیدا کرده است (شکل ۵).

۲.۳. بررسی اثر استفاده از ژئوفوم به عنوان لایه‌ی میراکننده‌ی موج انفجاری

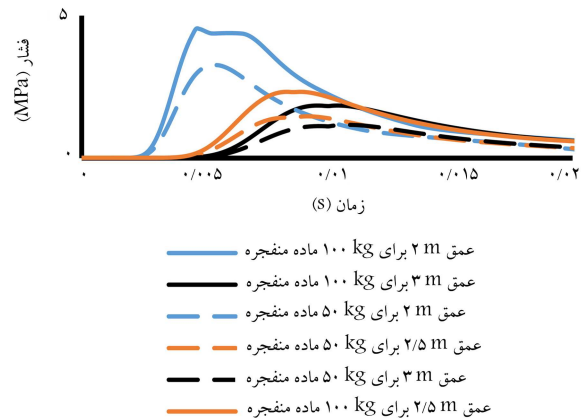
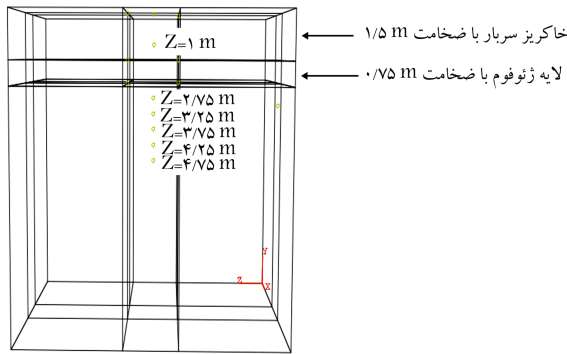
در بخش حاضر، اثر خواص فیزیکی، ابعاد، لایه بندی و شیب لایه‌ی مسلح کننده‌ی

جدول ۴. ویژگی مدل‌های مورد استفاده در بررسی اثر جرم مخصوص لایه‌ی ژئوفوم.

شماره‌ی مدل	ویژگی
۱	مدل صحت سنجی شده است که بدون مانع ژئوفوم بوده و به‌عنوان مدل مبنا برای مقایسه نتایج استفاده می‌شود.
۲	مدل با مانع ژئوفوم با جرم مخصوص ۱۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.
۳	مدل با مانع ژئوفوم با جرم مخصوص ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.

جدول ۵. نتایج تحلیل مدل دارای مانع ژئوفوم با جرم مخصوص ۱۱۰ و ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب.

عمق نقطه‌ی شاهد از تراز بیشینه‌ی فشار (مگاپاسکال) در مدل	درصد کاهش		بیشینه‌ی فشار (مگاپاسکال) در مدل		درصد کاهش سطح زمین (متر)
	در مدل ۲	در مدل ۳	در مدل ۱	در مدل ۳	
۱	۵,۶۲۷	۱,۵	۵,۶۱۳	۱,۵۴	۱
۲	۱,۰۷۸	۴۷,۷	۲,۰۶۲	۵۵,۴۸	۲,۷۵
۳	۰,۹۷۵	۳۵,۷	۱,۵۱۷	۴۴,۴۷	۳,۲۵
۴	۰,۸۴۵	۳۴,۰	۱,۲۸۱	۴۲,۹۸	۳,۷۵
۵	۰,۷۷۰	۲۵,۷	۱,۰۳۶	۳۵,۵۳	۴,۲۵
۶	۰,۶۷۹	۲۶,۴	۰,۹۲۲	۳۵,۵۲	۴,۷۵



شکل ۵. نمودار فشار- زمان در نقاط شاهد برای ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم ماده‌ی منفجره.

شکل ۶. شرایط هندسی مدل و مکان هندسی نقاط شاهد در بررسی اثر جرم مخصوص لایه‌ی ژئوفوم.

است. همچنین برای حذف اثر طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم، لایه‌ی ژئوفوم با طول و عرض بی‌نهایت مدل‌سازی شده است. نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که صرف‌نظر از نوع ژئوفوم، استفاده از لایه‌ی مسلح‌شده به‌وسیله‌ی ژئوفوم در خاک می‌تواند بیشینه‌ی فشار در نقاط شاهد زیر لایه‌ی ژئوفوم را به‌طور چشم‌گیری کاهش دهد (کمینه‌ی ۲۵٪ و بیشینه‌ی ۵۵٪) که این به دلیل وجود یک لایه‌ی میراگر با سختی پایین در مسیر انتقال موج تنش ناشی از انفجار است. همچنین تغییر در جرم مخصوص لایه‌ی ژئوفوم از ۱۱۰ به ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بیشینه‌ی ۱۰٪ باعث تغییر در میزان درصد کاهش شده است (جدول ۵).

در هر دو مدل ۲ و ۳، در نقطه‌ی شاهدی که در بالای لایه‌ی ژئوفوم قرار دارد (عمق ۱ متری از تراز سطح زمین)، کاهش تقریباً ۱/۵٪ مشاهده شد که علت آن وجود لایه‌ی ژئوفوم با سختی پایین در زیر خاکریز سربار لایه‌ی ژئوفوم است که باعث کاهش سختی و فشار توسعه یافته ناشی از انفجار شده است. همچنین در اولین نقطه‌ی شاهد در زیر لایه‌ی ژئوفوم (عمق ۲/۷۵ متری از سطح زمین)، به

ژئوفوم و نیز ضخامت خاکریز سربار و وزن ماده‌ی منفجره در کاهش آثار ناشی از بار انفجاری بررسی شده است. به‌منظور بررسی اثر استفاده از ژئوفوم در کاهش آثار ناشی از بار انفجاری، از درصد کاهش^{۲۶} برای مقایسه‌ی نتایج استفاده شده است (رابطه‌ی ۵).

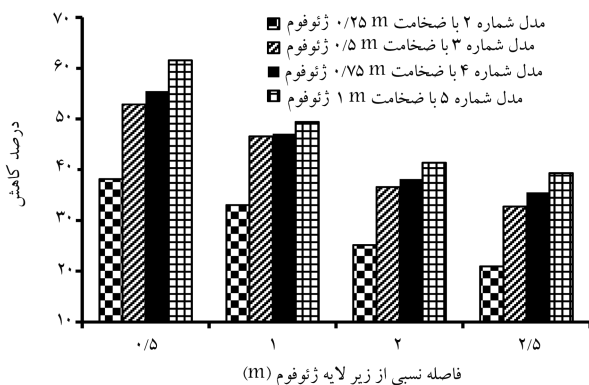
$$DF(\%) = \left(\frac{PP_0 - PP}{PP_0} \right) \times 100 \quad (5)$$

که در آن، DF درصد کاهش، PP_0 بیشینه‌ی فشار در نقطه‌ی موردنظر بدون استفاده از ژئوفوم و PP بیشینه‌ی فشار در همان نقطه در شرایط مسلح‌شده با ژئوفوم است. هر چه درصد کاهش بزرگ‌تر باشد، ژئوفوم اثر بیشتری در کاهش بار انفجاری دارد.

۱.۲.۳. اثر جرم مخصوص لایه‌ی ژئوفوم در کاهش آثار ناشی از بار انفجار برای بررسی اثر خواص فیزیکی ژئوفوم در کاهش بیشینه‌ی تنش ناشی از انفجار، سه مدل با شرایط هندسی و نقاط شاهد نشان داده‌شده در شکل ۶، در محیط نرم‌افزار آباکوس ساخته شده است (جدول ۴). در همه‌ی مدل‌ها، ارتفاع خاکریز سربار ۱/۵ متر، ضخامت لایه‌ی ژئوفوم ۰/۷۵ متر و وزن ماده‌ی منفجره ۱۰۰ کیلوگرم بوده

جدول ۶. ویژگی مدل‌های مورد استفاده در بررسی اثر ضخامت لایه‌ی ژئوفوم.

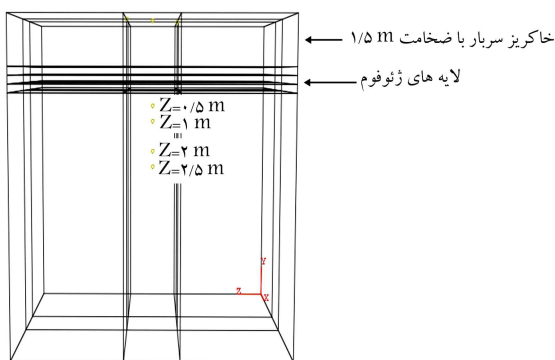
شماره‌ی مدل	ویژگی
۱	مدل صحت‌سنجی شده، بدون مانع ژئوفوم و به عنوان مدل مبنای مقایسه‌ی نتایج
۲	مانع ژئوفوم با ضخامت ۰٫۲۵ متر
۳	مانع ژئوفوم با ضخامت ۰٫۵ متر
۴	مانع ژئوفوم با ضخامت ۰٫۷۵ متر
۵	مانع ژئوفوم با ضخامت ۱ متر



جدول ۷. درصد کاهش بیشینه‌ی فشار در مدل‌ها با مانع ژئوفوم ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضخامت‌های مختلف.

فاصله‌ی نسبی از زیر لایه‌ی ژئوفوم (متر)	درصد کاهش مدل شماره‌ی			
	۵	۴	۳	۲
۰٫۵	۶۱٫۶	۵۵٫۵	۵۲٫۹	۳۸٫۲
۱	۴۹٫۴	۴۷٫۱	۴۶٫۶	۳۳٫۰
۲	۴۱٫۴	۳۸٫۲	۳۶٫۶	۲۵٫۲
۲٫۵	۳۹٫۳	۳۵٫۵	۳۲٫۷	۲۰٫۹

شکل ۸. درصد کاهش بیشینه‌ی فشار در نقاط شاهد متناظر مدل‌ها در بررسی اثر ضخامت لایه‌ی ژئوفوم.

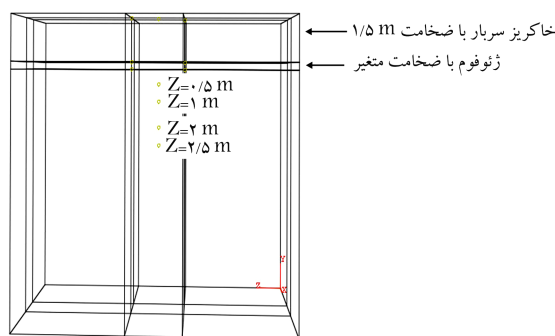


شکل ۹. شرایط هندسی مدل‌ها و مکان هندسی نقاط شاهد در بررسی اثر استفاده از چندلایه‌ی ژئوفوم.

با توجه به این نکته می‌توان ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی ژئوفوم را به دست آورد (جدول ۷).

۳.۲.۳. اثر استفاده از چند لایه‌ی ژئوفوم در کاهش آثار ناشی از بار انفجار برای بررسی اثر استفاده از چندلایه ژئوفوم در کاهش آثار ناشی از بار انفجار، مدل با شرایط هندسی و نقاط شاهد نشان داده شده در شکل ۹ در محیط نرم‌افزار آباکوس ساخته شده‌اند (جدول ۸). در همه‌ی مدل‌ها، ارتفاع خاکریز سربار ۱٫۵ متر، ژئوفوم از نوع ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و وزن ماده‌ی منفجره ۱۰۰ کیلوگرم بوده است، همچنین برای حذف اثر طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم، لایه‌ی ژئوفوم با طول و عرض بی‌نهایت مدل‌سازی شده است.

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل، در صورت استفاده از مدل‌های ۲ و ۳، به علت استفاده از لایه‌ی ژئوفوم، بیشینه‌ی فشار نسبت به مدل ۱ کاهش پیدا کرده است؛ اما در مدل ۳ نسبت به مدل ۲، به علت حذف ۰٫۲۵ متر لایه‌ی میانی ژئوفوم



شکل ۷. شرایط هندسی مدل‌ها و مکان هندسی نقاط شاهد در بررسی اثر ضخامت لایه‌ی ژئوفوم.

علت بیشتر بودن فشار ناشی از انفجار، بیشترین درصد کاهش رخ داده و با فاصله گرفتن از لایه‌ی ژئوفوم و کاهش مقدار فشار ناشی از انفجار، درصد کاهش مذکور کمتر شده است.

۳.۲.۳. اثر ضخامت لایه‌ی ژئوفوم در کاهش آثار ناشی از بار انفجار

برای بررسی اثر ضخامت لایه‌ی ژئوفوم در کاهش بیشینه‌ی تنش ناشی از انفجار، ۵ مدل با شرایط هندسی و نقاط شاهد نشان داده شده در شکل ۷ در محیط نرم‌افزار آباکوس ساخته شده‌اند (جدول ۶). در همه‌ی مدل‌ها، ارتفاع خاکریز سربار ۱٫۵ متر، ژئوفوم از نوع ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و وزن ماده‌ی منفجره ۱۰۰ کیلوگرم بوده است، همچنین برای حذف اثر طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم، لایه‌ی ژئوفوم با طول و عرض بی‌نهایت مدل‌سازی شده است. برای بررسی میزان اثرگذاری افزایش ضخامت لایه‌ی ژئوفوم در کاهش فشار ناشی از انفجار، درصد کاهش بیشینه‌ی فشار در مدل‌های مختلف مقایسه شده‌است (جدول ۷ و شکل ۸).

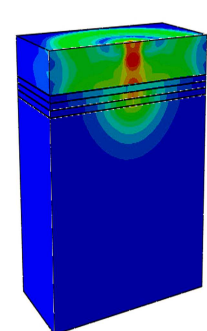
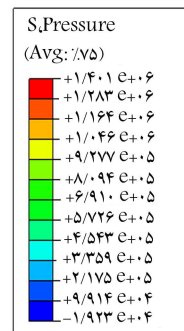
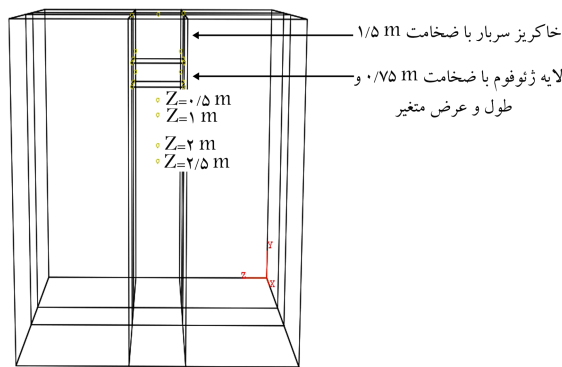
همان‌طور که مشخص است، با افزایش ضخامت لایه‌ی ژئوفوم، فشار در نقاط شاهد اندازه‌گیری نیز کاهش یافته است که در نقطه‌ی با فاصله‌ی نسبی ۰٫۲۵ متر از زیر لایه‌ی ژئوفوم، میزان تغییر فشار با افزایش ضخامت لایه‌ی ژئوفوم از ۰٫۲۵ متر به ضخامت ۰٫۷۵ متر بیشتر بوده است (بیشینه‌ی ۱۴٫۷٪) و با افزایش ضخامت لایه‌ی ژئوفوم از ۰٫۷۵ متر به ۱ متر، کمتر شده است (بیشینه‌ی ۶٫۱٪) که

جدول ۸. ویژگی مدل‌های مورد استفاده در بررسی اثر استفاده از چند لایه‌ی ژئوفوم.

شماره‌ی مدل	ویژگی
۱	مدل صحت‌سنجی شده، بدون مانع ژئوفوم و به‌عنوان مدل مبنا برای مقایسه‌ی نتایج استفاده شده است.
۲	یک لایه مانع ژئوفوم با ضخامت ۰/۷۵ متر
۳	دو لایه مانع ژئوفوم به ضخامت ۰/۲۵ متر و یک لایه‌ی ۰/۲۵ متری خاک رس بین آن‌ها

جدول ۹. درصد کاهش بیشینه‌ی فشار در بررسی اثر استفاده از چند لایه‌ی ژئوفوم.

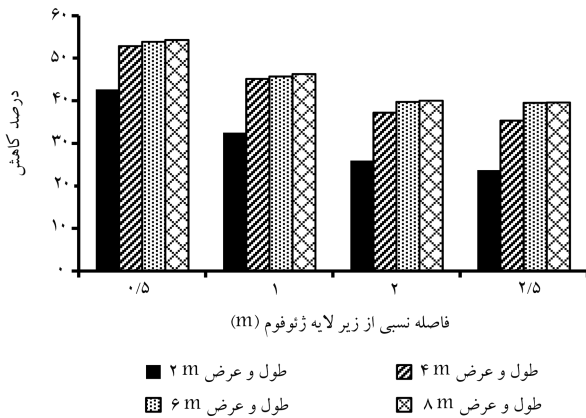
فاصله‌ی نسبی از زیر لایه‌ی ژئوفوم (متر)	درصد کاهش نسبت به نقطه‌ی متناظر در حالت استفاده از ژئوفوم	
	مدل ۲	مدل ۳
۰/۵	۵۵	۳۷
۱	۴۷	۲۴
۲	۳۸	۱۷
۲/۵	۳۶	۱۹



Step: Step-1
Increment 2843 : Step Time = 1/4001 E-02
Primary Var: S, Pressure

شکل ۱۱. شرایط هندسی مدل‌ها و مکان هندسی نقاط شاهد در بررسی اثر طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم.

شکل ۱۰. توزیع تنش در محیط خاک و ۲ لایه‌ی ژئوفوم در ۰/۱۴ ثانیه پس از انفجار.



شکل ۱۲. نمودار درصد کاهش بیشینه‌ی فشار در نقاط شاهد متناظر مدل‌ها در بررسی اثر طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم.

متر به ۸ متر، درصد کاهش به میزان ۱۱/۶٪ افزایش یافته است (جدول ۱۱). با افزایش طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم، میزان تغییرات پارامتر درصد کاهش کمتر شده است، به طوری که در عمق ۰/۵ متر از تراز کف لایه‌ی ژئوفوم با افزایش طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم از ۶ متر به ۸ متر، درصد کاهش فقط به میزان ۰/۴٪، افزایش پیدا کرده است (جدول ۱۱). در نتیجه با افزایش طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم به علت

و جایگزینی آن با ۰/۲۵ متر خاک رس، سختی کل لایه‌ی مسلح کننده بیشتر شده است و به دنبال آن، فشار در نقاط شاهد اندازه‌گیری، افزایش داشته و درصد کاهش نیز کمتر شده است (کمینه ۱۷٪) (جدول ۹).
با توجه به کانتورهای توزیع فشار در شکل ۱۰ مشخص است که به علت سختی ۰/۲۵ متر لایه‌ی میانی میان خاک رس نسبت به دو لایه‌ی ژئوفوم بالایی و پایینی، انتقال فشار ناشی از انفجار در لایه‌ی ژئوفوم بیشتر انجام شده است.

۴.۲.۳. اثر طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم در کاهش آثار ناشی از بار انفجار
برای بررسی اثر طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم در کاهش آثار ناشی از بار انفجار، ۵ مدل با شرایط هندسی و نقاط شاهد نشان داده شده در شکل ۱۱ در محیط نرم افزار آباکوس ساخته شده‌اند (جدول ۱۰). در همه‌ی مدل‌ها، ارتفاع خاکریز سربار ۱/۵ متر، ژئوفوم از نوع ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب با ضخامت ۰/۷۵ متر، و وزن ماده‌ی منفجره ۱۰۰ کیلوگرم بوده است. برای بررسی تأثیر لایه‌بندی ژئوفوم در کاهش فشار ناشی از انفجار، درصد کاهش بیشینه‌ی فشار در مدل‌های مختلف مقایسه شده است (جدول ۱۱ و شکل ۱۲).

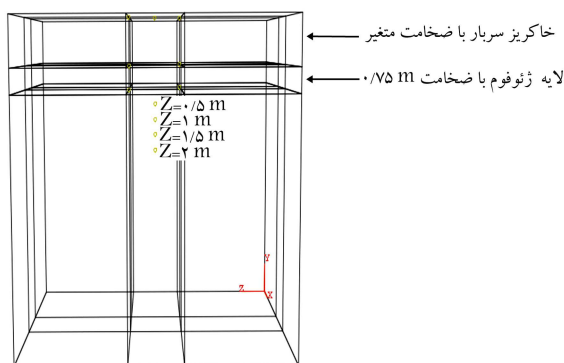
با توجه به نتایج حاصل از تحلیل، با افزایش طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم، درصد کاهش بیشینه‌ی فشار در نقاط شاهد نیز افزایش پیدا کرده است. به‌عنوان نمونه، در عمق ۰/۵ متر از تراز کف لایه‌ی ژئوفوم، با افزایش طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم از ۲

جدول ۱۰. ویژگی مدل‌های مورد استفاده در بررسی اثر استفاده از طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم.

شماره‌ی مدل	ویژگی
۱	مدل صحت‌سنجی شده، بدون مانع ژئوفوم و به‌عنوان مدل مبنا برای مقایسه‌ی نتایج
۲	ژئوفوم با طول ۲ متر و عرض ۲ متر
۳	ژئوفوم با طول ۴ متر و عرض ۴ متر
۴	ژئوفوم با طول ۶ متر و عرض ۶ متر
۵	ژئوفوم با طول ۸ متر و عرض ۸ متر

جدول ۱۱. درصد کاهش بیشینه‌ی فشار مدل‌ها در بررسی اثر طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم.

فاصله‌ی نسبی از زیر لایه‌ی ژئوفوم (متر)	درصد کاهش نسبت به نقطه‌ی متناظر در حالت طول و عرض (متر)			
	۸	۶	۴	۲
۰٫۵	۵۴٫۳	۵۳٫۹	۵۲٫۹	۴۲٫۷
۱	۴۶٫۳	۴۵٫۷	۴۵٫۱	۳۲٫۵
۲	۴۰٫۰	۳۹٫۷	۳۷٫۲	۲۶٫۰
۲٫۵	۳۹٫۶	۳۹٫۵	۳۵٫۳	۲۳٫۸



شکل ۱۳. شرایط هندسی مدل‌ها و مکان هندسی نقاط شاهد در بررسی اثر ضخامت لایه‌ی خاک سربار.

در ادامه، برای بررسی بهتر میزان اثرگذاری ضخامت خاکریز سربار لایه‌ی ژئوفوم در کاهش فشار ناشی از انفجار، به مقایسه‌ی درصد کاهش بیشینه‌ی فشار در مدل‌های ۳ الی ۵ در جدول ۱۳ پرداخته شده است. همچنین به دلیل شرایط خاص مدل ۲، بررسی آن به‌صورت جداگانه انجام شده است (جدول ۱۴). با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌ها مشخص شده است که با تغییر در ضخامت خاکریز سربار لایه‌ی ژئوفوم، درصد کاهش فشار، به میزان بیشینه‌ی ۸٪ تغییر یافته است، که این میزان تغییر برای نقاط دورتر حتی به صفر نیز رسیده است (جدول ۱۳)، در نتیجه به علت محدود بودن ضخامت خاکریز سربار لایه‌ی ژئوفوم، تغییر در ضخامت لایه‌ی ژئوفوم، اثر چندانی در کاهش بیشینه‌ی فشار ناشی از انفجار ندارد.

اما در مدل ۲ که در آن ضخامت لایه‌ی خاک سربار ژئوفوم ۰٫۷۵ متر در نظر گرفته شده است، حین انفجار ماده‌ی منفجره با گسترش ابعاد چاله‌ی انفجاری، خاک سربار لایه‌ی ژئوفوم از بین رفته و فشار ناشی از انفجار مستقیماً روی لایه‌ی ژئوفوم و لایه‌ی خاک زیر آن وارد شده است (شکل ۱۴)، به طوری که بیشینه‌ی فشار در مدل ۲ نسبت به مدل ۱ افزایش یافته است (جدول ۱۴). در نتیجه، در انتخاب لایه‌ی خاکریز سربار لایه‌ی ژئوفوم باید توجه کرد که ضخامت لایه‌ی ژئوفوم، دست‌کم از عمق چاله‌ی انفجاری بیشتر باشد.

۴.۳. فرمول تجربی برای ضریب کاهش (DF)

در بخش حاضر، با توجه به مدل‌ها و نتایج به‌دست آمده در بخش ۴.۲.۳ با متغیر در نظر گرفتن طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم و ثابت فرض کردن بقیه‌ی متغیرها نظیر ضخامت لایه‌ی ژئوفوم و غیره، بهترین تابع‌نمایی^{۲۷} از نتایج جدول ۱۵ عبور داده شده است (شکل ۱۵). به این ترتیب، رابطه‌ی تجربی برای محاسبه‌ی ضریب کاهش بیشینه‌ی فشار در عمق مشخصی از زیر لایه‌ی ژئوفوم به‌دست آمده است.

جدول ۱۲. شرایط مدل‌ها برای بررسی اثر ضخامت خاکریز سربار لایه‌ی ژئوفوم.

شماره‌ی مدل	ویژگی
۱	مدل صحت‌سنجی شده، بدون مانع ژئوفوم و به‌عنوان مدل مبنا برای مقایسه‌ی نتایج استفاده شده است.
۲	ضخامت خاکریز سربار ۰٫۵ متر
۳	ضخامت خاکریز سربار ۱ متر
۴	ضخامت خاکریز سربار ۱٫۵ متر
۵	ضخامت خاکریز سربار ۲ متر

بزرگ‌تر شدن ابعاد لایه‌ی محافظتی، درصد کاهش مربوط به بیشینه‌ی فشار ناشی از انفجار افزایش پیدا کرده است. این تغییر در ضریب کاهش با بزرگ‌تر شدن ابعاد لایه‌ی مذکور ناملموس شده است و می‌توان طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم را با توجه به اهمیت و سایر ملاحظات اجرایی و بهره‌برداری، برای اقتصادی شدن پروژه به دست آورد.

۳.۳. اثر ضخامت لایه‌ی خاک سربار در کاهش آثار ناشی از بار انفجار

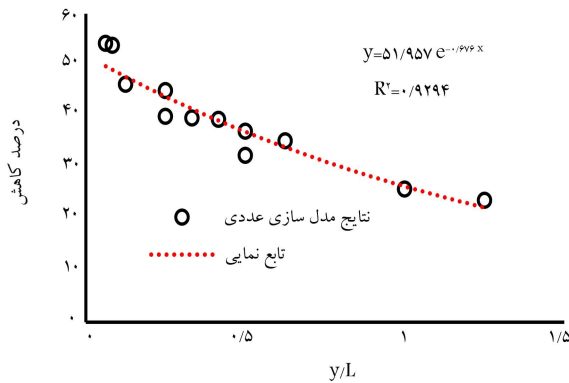
خاک سربار سازی مدفون و لایه‌ی محافظتی ژئوفوم نقش به‌سزایی در توزیع تنش ناشی از انفجار و انتقال آن به لایه‌های زیرین خود دارد. برای بررسی اثر ضخامت لایه‌ی ژئوفوم در استهلاک موج فشاری ناشی از انفجار، ۴ مدل با شرایط هندسی و نقاط شاهد نشان داده شده در شکل ۱۳ در محیط نرم‌افزار آباکوس ساخته شده‌اند (جدول ۱۲) که در همه‌ی آن‌ها ضخامت لایه‌ی ژئوفوم ۰٫۷۵ متر، ژئوفوم از نوع ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب، و وزن ماده‌ی منفجره ۱۰۰ کیلوگرم بوده است.

جدول ۱۳. درصد کاهش بیشینه فشار مدل‌ها در بررسی اثر ضخامت لایه‌ی خاک سربار.

فاصله‌ی نسبی از زیر لایه‌ی ژئوفوم (متر)	درصد کاهش نسبت به نقطه‌ی			درصد کاهش مدل‌ها نسبت به یکدیگر	
	مدل ۵	مدل ۴	مدل ۳	مدل ۵ نسبت به مدل ۴	مدل ۳ نسبت به مدل ۴
۰٫۵	۵۷	۵۶	۴۸	+۸	+۱
۱	۵۱	۴۷	۴۶	+۲	+۴
۱٫۵	۴۳	۴۳	۴۳	+۱	۰
۲	۳۹	۳۹	۳۹	۰	۰

جدول ۱۴. درصد کاهش بیشینه فشار در مدل ۲.

فاصله‌ی نسبی از زیر لایه‌ی ژئوفوم (متر)	بیشینه‌ی فشار در مدل (مگاپاسکال)		درصد کاهش در مدل ۲
	۱	۲	
۰٫۵	۴٫۱۱۰	۴٫۶۷۷	-۱۳٫۸
۱	۲٫۶۴۵	۳٫۵۹۷	-۳۶٫۰
۱٫۵	۲٫۰۶۲	۲٫۱۲۵	-۳٫۱
۲	۱٫۵۱۷	۱٫۶۳۴	-۷٫۷



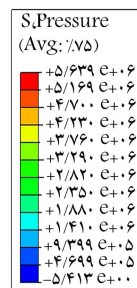
شکل ۱۵. رابطه‌ی تجربی حاصل از نتایج مدل سازی عددی.

(رابطه‌ی ۶)

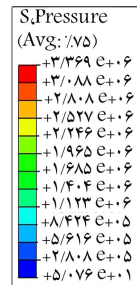
$$DF(\%) = 51.957e^{-0.676 \frac{y}{L}} \quad (6)$$

که در آن، DF ضریب کاهش بیشینه فشار (درصد)، y فاصله‌ی نسبی از تراز کف لایه‌ی ژئوفوم (متر) و L طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم (متر) است. لازم به ذکر است که شرایط استفاده از رابطه‌ی ۶، شامل ژئوفوم مربع‌شکل با ضخامت 0.75° متر و جرم مخصوص 8° کیلوگرم بر مترمکعب، وزن ماده‌ی منفجره‌ی 10° کیلوگرم و ارتفاع خاکریز سربار 1.5 متر است. در جدول ۱۵، y ، L و DF مشابه متغیرهای موجود در رابطه‌ی ۶ هستند. در ادامه، به منظور بررسی صحت و دقت رابطه‌ی ۶، به مقایسه‌ی نتایج مدل سازی عددی و رابطه‌ی تجربی پیشنهادی پرداخته شده است، که با توجه به دقت موردانتظار در پروژه‌های اجرایی، می‌توان از رابطه‌ی ۶ در روند طراحی استفاده کرد (جدول ۱۶).

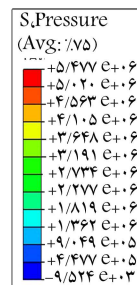
مشابه رابطه‌ی ۶ که در بخش کنونی بیان شد، می‌توان برای بقیه‌ی حالت‌های استفاده از لایه‌ی مساح‌کننده‌ی ژئوفوم نیز روابطی برای محاسبه‌ی ضریب کاهش به دست آورد و در دستورات عمل‌ها و آیین‌نامه‌های مرتبط استفاده کرد. این‌گونه روابط برای محاسبه‌ی فاصله‌ی کمینه‌ی ایمن (y_{min}) و یا کمینه‌ی طول و عرض ایمن (L_{min}) برای لایه‌ی ژئوفوم هنگامی که ضریب کاهش مشخصی (DF) مدنظر



Step: Step-1
Increment 171 .Step Time = 2/0018 E-03
Primary Var: S, Pressure



Step: Step-1
Increment 487 .Step Time = 4/002 E-03
Primary Var: S, Pressure



Step: Step-1
Increment 1339 .Step Time = 6/001 E-03
Primary Var: S, Pressure

شکل ۱۴. گسترش فشار و هندسه‌ی چاله‌ی انفجاری در مدل ۲.

جدول ۱۵. مقادیر ضریب کاهش (DF) برای مدل‌های مختلف.

$L = 8$		$L = 6$		$L = 4$		$L = 2$		y
DF	$\frac{y}{L}$	DF	$\frac{y}{L}$	DF	$\frac{y}{L}$	DF	$\frac{y}{L}$	
۵۴٫۳	۰٫۰۶۳	۵۳٫۹	۰٫۰۸۳	-	-	-	-	۰٫۵
۴۶٫۳	۰٫۱۲۵	-	-	۴۵٫۱	۰٫۲۵۰	۳۵٫۵	۰٫۵۰۰	۱
۴۰٫۰	۰٫۲۵۰	۳۹٫۷	۰٫۳۳۲	۳۷٫۲	۰٫۵۰۰	۲۶٫۰	۱٫۰۰۰	۲
-	-	۳۹٫۵	۰٫۴۱۷	۳۵٫۳	۰٫۶۲۵	۲۳٫۸	۱٫۲۵۰	۲٫۵

جدول ۱۶. بررسی صحت و دقت رابطه‌ی تجربی پیشنهادی.

قدر مطلق درصد اختلاف	DF (%)		$\frac{y}{L}$
	(مدل‌سازی عددی)	(رابطه‌ی ۶)	
۱٫۵	۴۶٫۴۲	۴۵٫۷۲	۰٫۱۶۷
۹٫۷	۴۷٫۷۵	۵۲٫۸۷	۰٫۱۲۵
۲٫۸	۴۳٫۸۸	۴۲٫۶۹	۰٫۲۵۰
۶٫۳	۴۲٫۰۶	۳۹٫۵۹	۰٫۳۱۳

باشد، استفاده می‌شود، که می‌تواند در طراحی بهینه‌ی خاکریزهای مقاوم در برابر انفجار کارآمد باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، اثر استفاده از لایه‌ی ژئوفوم و تغییر ویژگی‌های لایه‌ی ژئوفوم در کاهش بیشینه‌ی فشار توسعه‌یافته ناشی از بارگذاری انفجار در خاکریز سربرابر روی سازه‌های زیرزمینی بررسی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی ژئوفوم، می‌تواند بیشینه‌ی فشار توسعه‌یافته در خاکریز سربرابر روی سازه‌های زیرزمینی را به‌طور چشم‌گیری کاهش دهد، که این میزان کاهش حتی به حدود ۶۱٪ هم در مدل‌های مختلف رسیده است. در مورد تغییر در ویژگی‌های لایه‌ی ژئوفوم و اثر آن در تغییر درصد کاهش (DF) می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- با کاهش جرم مخصوص لایه‌ی ژئوفوم، بیشینه‌ی فشار ناشی از انفجار در زیر لایه‌ی ژئوفوم کاهش یافته است، به‌طوری‌که تغییر در جرم مخصوص لایه‌ی ژئوفوم از ۱۱۰ به ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بیشینه‌ی ۱۰٪ باعث تغییر در درصد کاهش (DF) شده است.
- با افزایش ضخامت لایه‌ی ژئوفوم، بیشینه‌ی فشار ناشی از انفجار در زیر لایه‌ی ژئوفوم کاهش یافته است، به‌طوری‌که میزان تغییر درصد کاهش (DF)، با تغییر

ضخامت لایه‌ی ژئوفوم از ۲۵٪ متر به ضخامت ۵٪ متر بیشتر بوده است (بیشینه‌ی ۱۴٫۷٪) و با افزایش ضخامت لایه‌ی ژئوفوم از ۵٪ متر به ۷۵٪ و ۱ متر کمتر شده است (بیشینه‌ی ۶٫۱٪).

- در صورت حذف ۲۵٪ متر لایه‌ی میانی ژئوفوم و جایگزین کردن آن با ۲۵٪ متر لایه‌ی خاک رسی در لایه‌ی ۷۵٪ متری ژئوفوم، سختی کل لایه افزایش یافته و درصد کاهش (DF) به میزان ۱۸٪ کاهش یافته است.
- با افزایش طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم، درصد کاهش (DF)، بیشتر شده است، به‌عنوان نمونه در عمق ۵٪ متر از تراز کف لایه‌ی ژئوفوم با افزایش طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم از ۲ متر به ۸ متر، درصد کاهش (DF) به میزان ۱۱٫۶٪ افزایش پیدا کرده است که این تغییر در درصد کاهش (DF) با بزرگ‌تر شدن ابعاد ناملموس‌تر شده است.

- با افزایش ضخامت خاکریز سربرابر لایه‌ی ژئوفوم از ۱ متر به ۲ متر، درصد کاهش (DF) به میزان ۹٪ افزایش کرده است، که این میزان برای نقاط دورتر حتی به زیر ۱٪ و صفر نیز رسیده است؛ در نتیجه، تغییر در ضخامت خاکریز سربرابر لایه‌ی ژئوفوم، اثر چندانی در ضریب کاهش (DF) ندارد.

- در پایان نیز با توجه به نتایج به‌دست آمده برای حالتی که از ژئوفوم با ضخامت ۷۵٪ متر و جرم مخصوص ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ماده‌ی منفجره با وزن ۱۰۰ کیلوگرم و خاکریز سربرابر با ارتفاع ۱٫۵ متر استفاده شود، رابطه‌ی برای محاسبه‌ی ضریب کاهش (DF) به‌دست آمده است، که در طراحی خاکریزهای دفاعی هوشمند کارایی دارد.

واضح است که با افزایش ضخامت، کاهش جرم مخصوص و افزایش طول و عرض لایه‌ی ژئوفوم و نیز افزایش ضخامت خاکریز سربرابر لایه‌ی ژئوفوم می‌توان اضافه‌ی فشار ناشی از انفجار را به صفر و ضریب کاهش (DF) را به ۱ رساند، ولی در پروژه‌های اجرایی با در نظر گرفتن شرایط خاص پروژه، نظیر سطح تنش مورد انتظار بعد از مسلح‌سازی و نمودار اندرکنش هزینه و فایده، می‌توان مقدار بهینه‌ی برای هر یک از متغیرهای مذکور به دست آورد تا ملاحظات فنی و اقتصادی طرح برآورده شود.

پانوشته‌ها

1. Wang
2. De

3. Ibrahim
4. Ansys autodym
5. Ulgen and Toygar
6. Naggar and Alzawi
7. Abaqus

8. Plaxis
9. Finite Difference Method
10. Flac 2D
11. Helwany
12. Nagy and et.al.
13. Geostatic Stress
14. load
15. partitioning
16. reduced integration
17. hourglass control
18. Ouellet
19. general contact
20. hard contact
21. frictionless contact
22. interaction
23. surface blast
24. Explicit
25. TM 5-855-1
26. decay percent
27. exponential function

منابع (References)

1. Sahfi, M.A., Khosravi, F. and Shamsai, F. "Passive defense considerations in exccuting an underground project", Master's Dissertation Passive Defense Engineering Trends Designing, Imam Hossein Comprehensive University (2012).
2. Wang, J.G., Sun, W. and Anand, S. "Numerical investigation on active isolation of ground shock by soft porous layers", *Sound and Vibration*, **321**(3-5), pp. 492-509 (2009).
3. Darabi Mahboub, M., Nayeri, A. and Mirzeynali Yazdi, H. "Analyzing the effect of cavity in soil layer on response of embedded structure against air blast-wave", Master's Dissertation Passive Defense Engineering Trends Secure Structures, Malek Ashtar University (2012).
4. De, A., Morgante, A.N. and Zimmie, T.F. "Numerical and physical modeling of geofoam barriers as protection against effects of surface blast on underground tunnels", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(1), pp. 1-12 (2016).
5. De, A. and Zimmie, T. F. "Effects of Surface Explosion on underground tunnel and potential mitigation measures", *Transportation Infrastructure Geotechnology*, **3**(2), pp. 74-90 (2016).
6. Wang, J.G., Sun, W. and Anand, S. "Numerical investigation on active isolation of ground shock by soft porous layers", *Sound and Vibration*, **321**(3-5), pp. 492-509 (2008).
7. Ibrahim, A., Ahmad, F., Hassan, Z.A. and et al. "Strength of expanded polystyrene (EPS)-sand as lightweight material in geotechnical engineering", *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, **9**, pp. 566-577 (2017).
8. Ulgen, D. and Toygar, O. "Screening effectiveness of open and in-filled wave barriers: A full-scale experimental study", *Construction and Building Materials*, **86**, pp. 12-20 (2015).
9. Alzawi, A. and Hesham El Naggar, M. "Full scale experimental study on vibration scattering using open and in-filled (GeoFoam) wave barriers", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(3), pp. 306-317 (2011).
10. Gholizdeh, A. and Rajabi, M. "Immunization of concrete structures buried against explosion", *Passive Defense Science and Technology*, **3**, pp. 167-179 (2014).
11. Aghajani, A. and Khosravi, F. "Study of the effect of soil overload on behavior of buried safe structure subject to explosion load", Master's Dissertation Passive Defense Engineering Trends Secure Structures, Malek Ashtar University (2011).
12. Seyedan, M.J. and Seyedi Hosseininia, E. "Significance of soil compaction on blast resistant behavior of underground structures: A parametric study", *Civil Engineering Infrastructures Journal*, **48**(2), pp. 359-372 (2015).
13. ABAQUS User's Manuals, Version 6.14 (2014).
14. Helwany, S. "Applied soil mechanics with ABAQUS' applications", Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons (2007).
15. Nagy, N., Mohamed, M. and Boot, J.C. "Nonlinear numerical modeling for the effects of surface explosions on buried reinforced concrete structures", *Geomechanics and Engineering*, **2**(1), pp. 1-18 (2010).
16. Ouellet, S., Cronin, D. and Worswick, M. "Compressive response of polymeric foams under quasi-static medium and high strain rate conditions", *Polymer Testing*, **25**(6), pp. 731-743 (2006).