

مدل سازی عددی تأثیر جنس مستهلک کننده در کاهش انرژی امواج ضربه‌ای در محیط خاک

پژوهشی

سینا فرجیان^۱؛ محمدیاسر رادان کوهپائی^{۲*}؛ سید احمد حسینی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد؛ پدافند غیرعامل، sinafarajian7@chmail.ir

۲- استادیار؛ مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، radan@mut.ac.ir

۳- استادیار؛ مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، hoseini@mut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۴/۱۳؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵

شماره صفحات: ۱۳۳ تا ۱۴۹

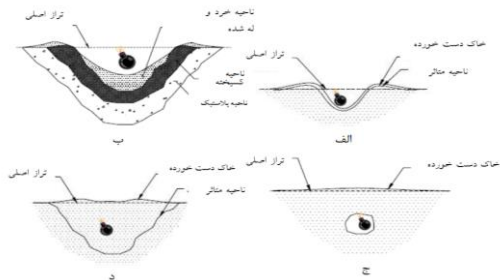
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2022.10959.1421

واژگان کلیدی	چکیده
اجزای مستهلک کننده ساندویچ پل آگزتیک ژئوفوم مدل سازی عددی رویه حل صریح آباکوس	سازه‌ها با شکل، جنس یا مصالح مختلف، رفتارهای متفاوتی در برابر امواج ضربه‌ای از خود نشان می‌دهند و درک صحیح عملکرد سازه در برابر این امواج می‌تواند در انتخاب شکل مناسب مصالح، مفید و مؤثر واقع شود. در این مطالعه، بررسی میزان کاهش انرژی امواج مکانیکی ضربه‌ای، بر روی سازه مستهلک کننده با جنس‌های متفاوت و با ضخامت مختلف بررسی شده است. مستهلک کننده‌هایی که امروزه در دنیا مورد توجه قرار گرفته و نتایج مطلوبی داشته‌اند، مدل سازی شده‌اند. خاک مورد استفاده در این مدل سازی، نوع ۵ در دسته بندی کد TM 5-855-1 ارتش آمریکا (<i>Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons</i>) است. مدل سازی با نرم افزار آباکوس (6.14 ABAQUS) انجام شده است که نسبت به سایر نرم افزارهای اجزاء محدود مشابه، به دلیل داشتن رویه‌های حل صریح و ضمنی، و دارا بودن مدل‌های رفتاری پیشرفته برای مواد مختلف، محبوب است. از نتایج مهم بدست آمده می‌توان به تأثیر مستهلک کننده ژئوفوم در کاهش ۶۰ درصدی و ساندویچ پل آگزتیک در کاهش ۵۰ درصدی انرژی موج منتشر شده در خاک، اشاره نمود. از جنبه‌های نوآورانه این پروژه می‌توان به بررسی میزان اثر مصالح نوین اشاره کرد. یکی دیگر از جنبه‌های نوآوری نسبت به مطالعات گذشته، بررسی همه این آثار در محیط ترکیبی مانند زمین است که از اجزای مختلف یعنی سنگ و خاک تشکیل شده است. این اجزاء هر کدام به واسطه پارامترها و خاصیت‌هایی که دارند، تأثیر خود را در انتشار امواج مکانیکی گذاشته و باعث ایجاد تفاوت‌ها می‌شوند.

۱- مقدمه	محافظت از سازه‌ها، زیرساخت‌های مهم و وسایل نقلیه
امروزه پیشرفت سلاح‌های دشمن، همچنین افزایش نفوذ و قدرت انفجار آن‌ها که باعث ایجاد امواج مکانیکی با قدرت‌های مختلفی می‌شود، سبب افزایش آسیب پذیری فضاهای مهم و حیاتی موجود در کشور شده است.	نظامی در برابر مواد منفجره و بمب‌های نسل جدید، به یک دغدغه مهم تبدیل شده است. به همین دلیل، کاهش آسیب پذیری این فضاها نیازمند در نظر گرفتن راهکارهایی برای محافظت از آن‌ها در برابر آثار سلاح‌های ذکر شده است.

* تهران؛ لویزان؛ خیابان شهید شعبانلو؛ دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ ساختمان شهید سلیمانی؛ طبقه چهارم؛ مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل؛ کدپستی: ۱۶۷۸۸۱۵۶۱۱؛ صندوق پستی: ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵؛ شماره تلفن: ۰۲۱-۲۲۹۷۰۲۹۹؛ داخلی: ۳۸۴۲۳؛ دورنگار: ۰۲۱-۲۲۹۵۰۵۳۰

تحت تأثیر انفجار بوده نیز با منحنی سیاه رنگ نمایش داده شده است. همچنین، هنگامی که منبع انفجار در عمق زیادی قرار گیرد به‌گونه‌ای که اثر خاصی بر روی سطح نداشته باشد، حفره‌ای تحت عنوان گودال زیرزمینی به وجود می‌آید (Farajian, 2021).



شکل ۱- اثرات انفجار بر روی زمین. الف) انفجار در عمق کم. ب) نواحی مربوط به انفجار در عمق کم. ج) انفجار گودال زیرزمینی. د) انفجار در عمق زیاد (Farajian, 2021)

امروزه، مواد سلولی مانند ساختار لانه‌زنبوری، فوم، ورق موجدار و کره توخالی فلزی، به‌طور گسترده در صنایع هوافضا و دفاعی به‌عنوان وسیله‌ای برای جذب انرژی، در اثر شکست (کاهش) شوک و ضربه، از طریق لهیدگی موضعی پیشرونده‌ی ساختار بسیار ریز خود تحت بارگذاری دینامیکی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساختارهای ساندویچی با هسته‌ی فلزی ساختار سلولی، درحالی‌که وزن سبک دارند، ظرفیت جذب انرژی خوبی از خود نشان داده‌اند؛ بنابراین، به‌عنوان جاذب انرژی در طیف گسترده‌ای از کاربردها از جمله شرایط بارگذاری شدید مانند انفجار و ضربه استفاده شده‌اند (Lan, et al., 2019).

مستهلک‌کننده‌هایی که به اهداف این طرح نزدیک‌تر بوده و جهت بررسی‌های نهایی و مدل‌سازی‌های موردنظر انتخاب شدند عبارت‌اند از: ساندویچ پنل‌های آگزتیک با جنس هسته متداول، ساندویچ پنل‌های لانه‌زنبوری با جنس هسته متداول، ساندویچ پنل با هسته فوم آلومینیوم، لمینت یا ساندویچ پنل پلیمری تقویت شده با هسته فیبر کربن، ژئوفوم و ساندویچ پنل با هسته فوم پلی‌اورتان (Farajian, 2021). آگزتیک‌ها ساختاری هستند که با هندسه خاصی که دارند، باعث ایجاد یک ضربه پواسن منفی می‌شوند. این ساختار در هنگام اعمال تنش کششی عمودی، برخلاف مواد

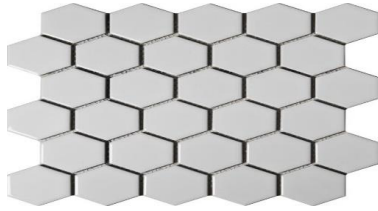
خاک از ترکیب ذره‌های با اندازه و شکل مختلف ساخته شده است که اسکلت خاک را تشکیل می‌دهند؛ که خلل و فرج آن با هوا و آب پر می‌شوند. در مکانیک خاک فرض بر این است که ذره‌های جامد تغییر شکل ندارند و فاز آبی خاک تراکم ناپذیر است؛ بنابراین، بار خارجی توسط اسکلت خاک و آب پشتیبانی می‌شود. تنش مؤثر (Effective Stress) برابر با متوسط تنش درون صفحه‌ای است که از توده خاک می‌گذرد و برابر با تنش مماسی بین ذره‌های جامد خاک نیست. تنش وارده به قسمت دارای خلل و فرج خاک که توسط هوا و آب پر شده است فشار منفذی (Pore Pressure) نامیده می‌شود. خاک نمی‌تواند در برابر کشش مقاومت کند، بنابراین تنش مؤثر نمی‌تواند کششی باشد. برای خاک غیراشباع، تنش مؤثر به صورت زیر تعریف می‌شود (Bishop, 1960):

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

که σ تنش کل، u_a فشار هوای منفذی، u_w فشار منفذی آب و χ فاکتوری وابسته به درجه اشباع است. برای خاک خشک $\chi=0$ و برای خاک اشباع $\chi=1$ است (Punmia & Jain, 2005).

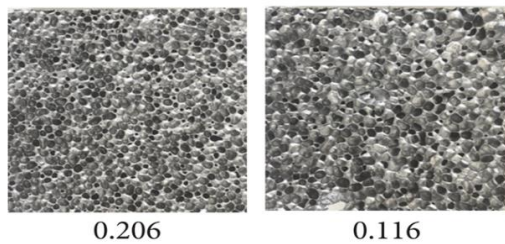
انفجار، پدیده‌ای با ماهیت تصادفی است که علاوه بر ایجاد اثراتی همچون شوک ناگهانی، امواج فشاری و کششی در محیط ایجاد نموده و سازه‌ها و موانع موجود در مسیر خود را تحت تأثیر قرار می‌دهد. انفجار از لحاظ محل وقوع نسبت به سطح زمین، به چند دسته تقسیم می‌شود که یکی از آن‌ها انفجار سطحی است. انفجار سطحی، انفجاری است که در سطح زمین و یا نزدیک به آن، رخ می‌دهد. در اثر بازتاب موج انفجار و تقویت آن در همان لحظات اولیه، موج واحدی به وجود می‌آید که فشار مبنای آن $1/8$ برابر فشار مبنای انفجار هوایی است. در این نوع انفجار، نیروی وارد بر سازه‌های سطح زمین و همین‌طور تکانه زمین که بر سازه زیرزمینی وارد می‌شود، اهمیت زیادی دارد (Regulations, 2016). مطابق با شکل ۱، در اطراف منبع انفجار می‌توان سه ناحیه خرد شده، گسیخته شده و ناحیه پلاستیک را متصور شد. ناحیه‌ای که در شکل، به صورت خاک دست خورده نشان داده شده است، دربرگیرنده مصالح خاکی روی سطح است که تحت تأثیر انفجار بوده است. انتهای ناحیه‌ای که

وابسته به نرخ، به صورت عددی مورد بررسی قرار می‌گیرند.



شکل ۳- شماتیک ساختار لانه‌زنبوری (Farajian, 2021)

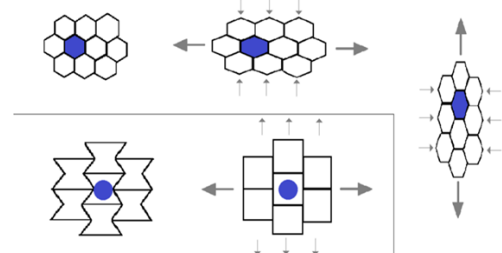
فوم‌های آلومینیومی سلول بسته (شکل ۴)، که در این بخش بررسی شده‌اند، توسط فرآیند فوم سازی انتقالی جسم مذاب ساخته می‌شوند. ماتریس آلیاژ Al (خلوص ۹۹/۷) در دمای حدود ۷۵۰ درجه سانتیگراد در ظرف مخصوص ذوب فلز، ذوب شد. هنگامی که درجه حرارت به ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت، ۳ درصد وزنی کلسیم با همزن با سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه، برای ۱۲۰ ثانیه به منظور افزایش ویسکوزیته ماده مذاب، به آن اضافه شد. سپس ۱/۲ درصد وزنی تیتانیوم هیدرید، به عنوان یک عامل فوم ساز، در دمای ۶۹۰ درجه سانتی‌گراد، با هم زدن با سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه، در مدت زمان ۱۵۰ الی ۲۰۰ ثانیه، به آن اضافه شد. سپس عمل اختلاط ۲۴۰ ثانیه دیگر ادامه و بعد ظرف ذوب از کوره خارج شده و تا دمای اتاق در هوا، سرد می‌شود. چگالی نسبی فوم (ρ)، با عنوان چگالی فوم آلومینیوم و چگالی ماتریس آلیاژ تعریف می‌شود و دامنه ۰/۱۶-۰/۲۴۵ را دربر می‌گیرد (Xu, et al., 2018).



شکل ۴- تصاویر فوم آلومینیومی با چگالی نسبی متفاوت (Xu, et al., 2018)

در سال‌های اخیر، کامپوزیت‌های پیشرفته از جنس فیبرهای پلیمری تقویت شده با کربن ($CFRP$)، با توجه به توسعه‌ی ساخت‌وساز در سراسر جهان به شدت محبوب شده و به وفور در امر مقاوم‌سازی ساختمان مورد استفاده قرار

معمول، در راستای عمود بر نیروی وارده، ضخیم‌تر می‌شوند. این خاصیت در کامپوزیت‌های لایه‌ای، فوم‌های پلیمری و فلزی دیده شده است. اکثر مواد شناخته شده برخلاف ساختار آگرتیک، وقتی تحت بارگذاری کششی قرار می‌گیرند و در یک جهت کشیده می‌شوند، تحت انقباض عرضی قرار گرفته و در راستای عمود بر نیروی وارده فشرده می‌شوند (به شکل ۲، توجه کنید). ضریب منفی پواسن از نظر تئوری مجاز است، اما به جز چند استثناء، در مواد واقعی مشاهده نشده است (Lan, et al., 2019).



شکل ۲- عملکرد سلول آگرتیک و لانه‌زنبوری تحت کشش (Farajian, 2021)

ساندویچ پنل فلزی، یک ساختار کامپوزیتی معمولی است که به طور گسترده برای اهدافی مانند ضربه و کاهش اثرات انفجار، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مواد سبک‌وزن از جمله فوم‌های فلزی و لانه‌زنبوری، به دلیل ظرفیت جذب عالی انرژی نسبت به تراکم جرمی (چگالی) کم، معمولاً به عنوان هسته یک ساندویچ پنل مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مقایسه با فوم‌های فلزی که میزان چگالی آن‌ها نسبتاً غالب بر قابلیت جذب انرژی است، ساختار لانه‌زنبوری (شکل ۳) فلزی دارای پیکربندی‌های تنظیم‌شده با مقیاسی متوسط هستند که می‌تواند برای کاربردهای خاص در جهت کاهش انرژی ضربه‌ای وارده، میرایی موج انفجاری و مقاومت بالستیکی، مناسب باشد. مکانیسم تغییر شکل/شکست (خرابی) و مکانیسم‌های جذب/اتلاف (پراکندگی) انرژی در ساندویچ پنل‌های لانه‌زنبوری فلزی، تحت بارهای دینامیکی، با استفاده از روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی مورد بررسی گسترده قرار گرفته است (Lan, et al., 2019).

پنل‌های ساندویچی توپر مورد بحث در این قسمت، از هسته‌های لانه‌زنبوری و با ساختاری فلزی، برای عملکردهای مقاومتی در برابر بارهای تکانشی (ایمپالسی) تشکیل شده‌اند. رفتارهای دینامیکی این ساختارها با در نظر گرفتن اثرات

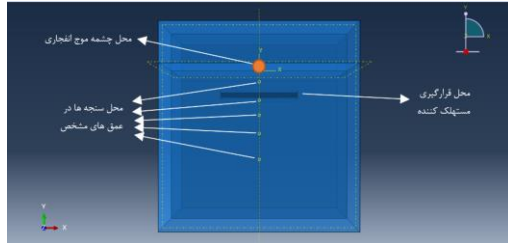
پلی‌اورتان، نوعی فوم متراکم با دانسیته بالا می‌باشد که با تزریق در قالب‌های مختلف، به شکل ابزارهای پیش‌ساخته با طرح‌های متنوع درآمده است. در مدل مورد بررسی (Jamil, et al., 2019)، نتایج آزمایشی و عددی پس از آزمایش انفجار بر روی پلی‌اورتان ترموپلاستیک با پایه پلی‌اتر (TPU) ارائه شده است. برای افزایش مقاومت در برابر انفجار و تغییر ضخامت سازه‌های ساندویچی با هسته TPU، از آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 به‌عنوان پوشش یا ورق سطح، استفاده شد. نتایج تجربی یک بهبود مقاومت در برابر انفجار، با افزودن ورق سطح به هسته TPU را نشان می‌دهند. افزایش ضخامت هسته TPU در ساندویچ پنل‌ها باعث افزایش مقاومت سازه در برابر انفجار می‌شود.

طرح استفاده از پنل‌های کامپوزیت آگرتیک (ACPs) که از هسته سلولی آگرتیک مقعر سه‌بعدی تشکیل شده‌اند، برای مقاومت در برابر انفجار پیشنهاد شده است (Imbalzano, et al., 2018). پاسخ سازه‌ای ساندویچ پنل‌های فیبر کربن در معرض بارگذاری انفجار، با استفاده از یک رویکرد تجربی و عددی یکپارچه مورد بررسی قرار گرفت (Hua, et al., 2014). نتایج تجربی نشان می‌دهد که سرعت میرایی موج در ساختار فولاد نرم تنها ۱۱/۳ درصد است، درحالی‌که سرعت میرایی موج در ساختار ساندویچی می‌تواند از ۹۰ درصد فراتر رود. اثرگذاری سطح مشترک بین ورق سطح و هسته در ساندویچ پنل‌ها، به وضوح یک عامل بسیار مهم در کاهش میزان موج است (Henrych, 1979). لان و همکارانش پاسخ دینامیکی پانل‌های ساندویچی استوانه‌ای شکل (خم) با هسته فوم آلومینیومی، هسته لانه زنبوری شش ضلعی و هسته لانه زنبوری آگرتیکی را به صورت عددی مقایسه کرده‌اند. مشخص شده است که پانل‌های استوانه‌ای با هسته‌های لانه زنبوری آگرتیکی عملکرد بهتری نسبت به هسته‌های فوم آلومینیومی و هسته‌های لانه زنبوری شش ضلعی معمولی در مقاومت در برابر بارهای انفجار دارند (Lan, et al., 2019). آمبالزانو و همکارانش طرح نوآورانه‌ی استفاده از پانل‌های کامپوزیت آگرتیکی را که از هسته سلولی آگرتیکی مقعر سه‌بعدی تشکیل شده‌اند، برای مقاومت در برابر انفجار پیشنهاد کردند. شبیه‌سازی عددی نشان داد که کاهش ۳۰ تا ۵۰ درصد افزایش در اتلاف (پراکنش) انرژی توسط آگرتیک‌ها

می‌گیرند. از مشخصات CFRP می‌توان به مقاومت بالای آن‌ها نسبت به وزن سبک آن اشاره کرد و از کاربردهای CFRP می‌توان تقویت سازه‌های بتنی، مقاوم‌سازی و بازسازی ساختمان، پل و سایر سازه‌های صنعتی و ساختمانی را نام برد. مقاوم‌سازی با استفاده از CFRP یکی از تکنیک‌های نوین در ترمیم، تعمیر و تقویت سازه‌هاست که به دلیل ویژگی‌های فیزیکی خود بسیاری از پیچیدگی‌های موجود در روش‌های سنتی مقاوم‌سازی را ندارد و ظهور آن سبب راه‌اندازی سیستم‌های جدیدی در صنعت ساختمان شد. الیاف CFRP با داشتن وزن و ابعاد کم در کنار مقاومت بالا، مشکل عدم امکان دسترسی و تغییر اعضای سازه‌ای حین مقاوم‌سازی را حل کرده است. در اجرای مقاوم‌سازی با الیاف FRP بدون افزودن بار اضافی و تغییر در معماری سازه، قادر به تقویت اعضای مورد نظر خواهد بود (Hua, et al., 2014).

یکی از جدیدترین محصولات از گروه ژئوسنتتیک، ژئوفوم نام دارد. ژئوفوم، مصالح فومی است که در حوزه‌ی ژئوتکنیک استفاده می‌شود. بیشترین ژئوفوم مورد استفاده، پلی‌استایرن انبساطی و ژئوفوم اکستروود شده می‌باشند. در کاربردهای ژئوتکنیکی، این مصالح به‌طور سنتی برای عایق گرمایی زمین و همچنین پرکننده‌ای سبک، در طول بیش از سی سال گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ اما کاربردهای ژئوتکنیکی، به استفاده از این مصالح برای کاهش فشار جانبی خاک در برابر دیوارها، و مصالح ضربه‌گیر برای میرایی ارتعاش و صوت توسعه داده شده است. ژئوفوم‌ها در قطعه‌های بزرگ و سبک ساخته می‌شوند و در سازه‌های خاکی یا سنگفرش‌ها به‌عنوان عایقی در برابر گرما و حرارت عمل می‌کنند. فوم‌ها اصولاً به‌عنوان پرکننده فضاهای خالی و درزه‌ها به کار می‌روند. با توجه به قابلیت‌هایی که تولیدکنندگان به فوم‌ها داده‌اند، این فوم‌ها افزایش حجمی تا ۶۰ برابر در فضای آزاد دارند و می‌توانند به عنوان عایق رطوبت و حرارت نیز عمل کنند، همچنین دارای خواص بارپذیری بالا نیز هستند. کاربرد ژئوفوم اغلب در زیر سنگ‌چین‌های اجرا شده بر روی خاک‌های نرم و سست، در زیرسازی جاده، به عنوان زیرسازی برای لایه رویه‌ی باند فرودگاه و سیستم‌های راه‌آهن که دائماً در معرض انبساط و انقباض قرار می‌گیرند، هست (Horvath, 1995).

ابعاد پیش‌فرض در نظر گرفته شده برای مستهلک‌کننده ۱۰متر در ۱۰متر و به ضخامت ۱ متر است.



شکل ۵- جایگذاری مستهلک‌کننده در مدل و محل سنجش‌های در نظر گرفته‌شده (Farajian, 2021)

در جدول ۱، مدل‌های ایجاد شده با مشخصات و توضیحات مربوطه ارائه شده است.

۲-۲- مدل ماده انفجار

در این مطالعه، پدیده انفجار در محیط‌های زیرزمینی با استفاده از روش کوپل اویلری-لاگرانژی (CEL)، در محیط نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. برای مواد منفجره، هوا و خاک المان‌های اویلری در نظر گرفته شده‌اند و برای مستهلک‌کننده‌ها، از المان‌های لاگرانژی، جهت تعریف سازه استفاده شده است. از حلگر صریح (Explicit) نرم‌افزار آباکوس، به منظور تحلیل‌های عددی استفاده شد. انفجار مورد بررسی در این مطالعه، انفجار سطحی است. با توجه به اطلاعات موجود وزن سرچنگی موشک‌های متعارف هوا به سطح، به‌طور معمول بین مقادیر ۳۶۰ تا ۱۵۰۰ کیلوگرم است؛ که با توجه به این مساله بیشترین مقدار وزن سرچنگی احتمالی برای تهدیدات سطحی، ۲۰۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته می‌شود تا بحرانی‌ترین حالت بررسی شود. همچنین پارامترهای استفاده شده در ماده انفجاری به شرح جدول ۲، است.

۲-۳- تعریف مشخصات مصالح و روش کسر

حجمی در روش اویلری

در روش اویلری، مش‌بندی ثابت است و مصالح مربوط به بخش‌های مختلف مدل، درون این مش‌بندی ثابت، می‌توانند حرکت کنند؛ بنابراین کل محدوده مورد نظر برای مسئله، توسط یک قطعه اویلری تعریف می‌شود. سپس محل اولیه قرارگیری مصالح مربوط به بخش‌های مختلف مدل، تعریف

در مقایسه با پانل‌های یکپارچه معادل، تحت بارهای انفجار به‌دست آمد (Imbalzano, et al., 2018). احمدی و همکارانش در یک مطالعه، به بررسی تجربی و عددی بارگذاری فشاری به صورت شبه استاتیک، روی سه سازه آگرتیک و یک سازه غیرآگرتیک پرداخته‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، سازه‌های آگرتیک به نسبت سازه لانه‌زنبوری که سازه‌ای غیرآگرتیک است، عملکرد به‌مراتب بهتری در جذب انرژی از خود نشان داد (Najafi, et al., 2020).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- توصیف شرایط محیط مدل‌سازی شده

در مطالعه حاضر، هدف، بررسی تأثیر جنس مستهلک‌کننده در خاک است. برای بررسی بهتر، مقایسه‌ای بین مستهلک‌کننده‌های مختلف نیز انجام شد. در بخش مربوط به جنس مستهلک‌کننده‌ها، ضخامت آن‌ها نیز بررسی شده است. ضخامت‌هایی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند، ۰/۵ متر، ۱ متر و ۲ متر است که در ژئوفوم به دلیل عملکرد بهتر و بررسی دقیق‌تر، ضخامت ۱/۵ متر نیز بررسی شد؛ همچنین به منظور کاهش اثر محیط بر انرژی موج منتشر شده، خاک مورد بررسی از نوع رس با رطوبت بالا انتخاب شد. این خاک یکی از خاک‌هایی است که کمترین توانایی دمپ انرژی را دارد؛ یا به عبارت دیگر موج انفجاری را به راحتی از خود عبور می‌دهد. همین‌طور جانمایی مستهلک‌کننده درون خاک به گونه‌ای انتخاب شد که بیشترین اثرپذیری را نسبت به انرژی وارده داشته باشد (شکل ۵).

در محیط خاک، ۵ سنجح اندازه‌گیری در عمق‌های ۱/۵، ۴، ۶، ۸/۵ و ۱۲ متری خاک قرار داده شده‌اند. دلیل انتخاب این نقاط بررسی بیشترین تأثیرگذاری و همچنین بررسی تنش‌های بالا است، زیرا با افزایش عمق مقدار تنش کاهش پیدا می‌کند و بخشی از تأثیر مستهلک‌کننده قابل ردیابی نخواهد بود؛ همچنین مستهلک‌کننده در مدل، در عمق سه متری قرار گرفته تا بتواند بیشترین بازدهی را داشته باشد؛ زیرا مطابق با مدل‌سازی‌های انجام شده، هرچه قدر به خرج انفجاری نزدیک باشد بیشتر جلوی انتشار حباب تنش را می‌گیرد و تنش کاهش می‌یابد. با توجه به حساسیت سنجی انجام شده برای ابعاد محیط مورد مطالعه،

می‌شوند. به‌عنوان مثال محدوده قرارگیری ماده منفجره در قطعه اوپلری، توسط روش کسر حجمی اوپلری (EVF) مربوطه تعریف می‌شود؛ بنابراین نرم‌افزار، المان‌هایی را که در قطعه اوپلری متناظر با ماده منفجره هستند را شناسایی کرده و مصالح مربوطه را به آن اختصاص خواهد داد (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2015).

جدول ۱- دسته‌بندی مدل‌ها (Farajian, 2021)

شماره مدل	کد	جنس	ابعاد (m)	ضخامت (m)	فاصله از خرج (m)	توضیحات
۱	Main	-----	-----	-----	-----	محیط خاک بدون مستهلک‌کننده
۲	Air-Gap	Air	۱۰×۱۰	۱	۳	ترانشه هوا
۳	1.1.3m	CFRP	۱۰×۱۰	۱	۳	مستهلک‌کننده CFRP
۴	1.1.3m	AL Foam	۱۰×۱۰	۱	۳	مستهلک‌کننده فوم آلومینیوم
۵	1.1.3m	PU Foam	۱۰×۱۰	۱	۳	مستهلک‌کننده پلی‌اورتان
۶	1.1.3m	HC	۱۰×۱۰	۱	۳	مستهلک‌کننده ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری
۷	1.1.3m ²	HC	۱۰×۱۰	۱	۳	سلول واحد ۲۰ سانتی‌متری
۸	1.1.3m	AUX	۱۰×۱۰	۱	۳	مستهلک‌کننده ساندویچی با هسته آگرتیک
۹	1.1.3m ²	AUX	۱۰×۱۰	۱	۳	سلول واحد ۲۰ سانتی‌متری
۱۰	2.2.3m ²	AUX	۱۰×۱۰	۱	۳	نسبت طول به عرض ۲ به ۱ در سلول واحد
۱۱	1.1.3m	GeoFoam	۱۰×۱۰	۱	۳	مستهلک‌کننده ژئوفوم EPS12

* هر واحد ۶ ضلعی تشکیل‌دهنده سازه

جدول ۲- مشخصات JWL ماده برای TNT انفجار (Davies, 1994)

Density (kg/m ³)	D (m/s)	Energy Dens (Mpa)	A (Gpa)	B (Gpa)	R1	R2	ω
۱۶۳۰	۶۹۳۰	۳/۶۸	۳۷۳/۸	۳/۷۴۷	۴/۱۵	۰/۹	۰/۳۵

۲-۴- المان بندی و شرایط مرزی مدل

با توجه به اینکه تغییرشکل‌ها و تنش‌ها، در نزدیکی محل انفجار بیشتر است، اندازه المان‌ها در این محدوده کوچک‌تر انتخاب شده است و با افزایش فاصله از محل انفجار، اندازه المان‌ها بزرگ‌تر شده است؛ همچنین از آنجایی که برای تعریف بخش‌های مختلف مسئله، از روش کسر حجمی استفاده می‌شود، لازم است تا در محدوده قرارگیری ماده منفجره، المان‌های ریزتری استفاده شده باشد؛ تا محاسبه حجم ماده منفجره دقیق‌تر صورت بپذیرد. برای انجام این تحقیق از مدل‌های سه‌بعدی استفاده شده است. المان‌های

اوپلری با استفاده از المان‌های هشت‌گره‌ای EC3D8R مدل‌سازی شده است و المان‌های لاگرانژی از المان‌های هشت‌گره‌ای C3D8R ساخته شده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت‌های انجام شده (Farajian, 2021)، ابعاد المان‌های اوپلری ۰/۴ متر تا ۰/۱ متر و ۰/۵ متر تا ۰/۲ متر، از فاصله دورتر تا فاصله نزدیک‌تر نسبت به خرج انفجاری، در نظر گرفته شده‌اند؛ همچنین ابعاد المان‌های لاگرانژی که شامل هسته و ورق سطح مستهلک‌کننده می‌شود، به تناسب ابعاد و ضخامت این المان، بین ۰/۰۶ متر و ۰/۰۸ متر انتخاب شده

آن با استفاده از مدل الاستو پلاستیک دراکر - پراگر/کپ (elasto-plastic Drucker - Prager Cap model) مدل‌سازی شده است (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2015). خصوصیات خاک رسی استفاده شده در جدول ۳، نشان داده شده است.

جدول ۳- خصوصیات خاک رسی (Farajian, 2021)

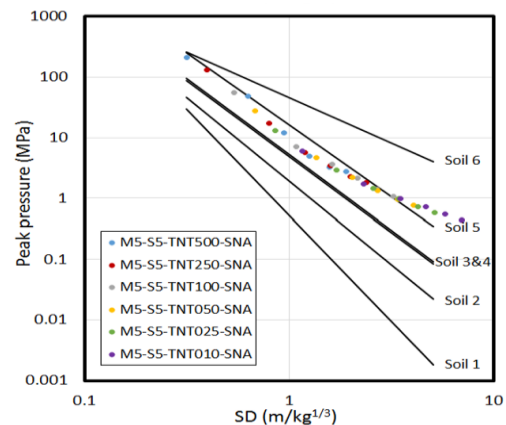
پارامتر	نماد	مقدار
Young Modulus	E	۷۸۲/۶۲ MPa
Poisson's Ration	ν	۰/۴۷
Density	ρ	۱۸۷۲ kg/m ³
Material Cohesion	c	۸۵/۰۴ kPa
Material angle of friction	ϕ	۲۸/۵۹
Cap eccentricity parameter	R	۰/۱
Initial cap yield surface position	ϵ_v	۰/۰
Transition surface radius parameter	a	۰/۰
		۱ MPa ۰/۰۰
Cap hardening behavior		۲۷/۱ MPa ۰/۰۱
(stress, plastic volumetric strain)		۷۳۵ MPa ۰/۰۲
		MPa ۰/۰۳
		۱۹۹۰۰

اکثر مستهلک‌کننده‌ها در این مطالعه به صورت سازه ساندویچی مدل شده‌اند. جنس ورق سطح‌های این ساندویچ پنل فلزی است. مشخصات مدل متریال فلز مورد استفاده در این پروژه با بررسی‌های انجام شده انتخاب شده تا بتواند دو فاکتور تأثیرگذار در جذب و میرایی انرژی را به خوبی به نمایش بگذارد. دلیل تأثیرگذاری این دو فاکتور، شکل‌پذیری و سختی ماده است. از مدل Johnson-Cook در مدل‌سازی این ماده استفاده شده است. در بررسی‌های انجام شده، مقایسه‌ای بین این مدل و یک مدل مصالح با سختی بیشتر نیز انجام شد تا اثر شکل‌پذیری بیشتر مشخص شود. پارامترها به شرح جدول ۴، است.

تا در راستای ضخامت ورق سطح، ۴ ردیف المان ایجاد شود تا تنش‌های ایجاد شده در آن به درستی قابل بررسی باشد. در این پژوهش ورق سطح ساندویچ پنل مستهلک‌کننده‌ها و هسته آن‌ها به صورت *solid* و هسته آگزتیک و لانه‌زنبوری به صورت *shell* مدل شده است. با توجه به اینکه نرم‌افزار آباکوس در تحلیل‌های *CEL*، شرایط مرزی مناسبی برای مدل‌سازی مسائل متقارن ندارد، بنابراین کل هندسه مسئله مورد مطالعه مدل‌سازی شد؛ همچنین به منظور اجتناب از انعکاس در نواحی مرزی از شرایط مرزی بدون بازتاب (*Non-reflecting boundary condition*)، روی مرزهای جانبی و مرز بالایی مدل استفاده شده است.

۲-۵- تعیین مدل رفتاری مصالح

تغییرات تنش فشاری با فاصله مقیاس شده، برای خاک تیپ ۵ مطابق با استاندارد *TM 5-855*، در شکل ۶، آمده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، به ازای مواد منفجره با وزن‌های مختلف، نتایج مقادیر تنش فشاری در فواصل مقیاس شده مختلف، در خاک مورد اشاره، با تقریب خوبی در محدوده توصیه شده توسط استاندارد *TM* قرار گرفته است.



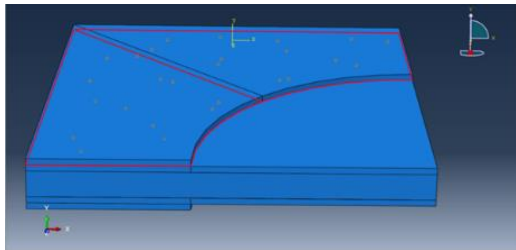
شکل ۶- مقایسه نتایج تنش فشاری به دست آمده از مدل‌سازی عددی خاک تیپ ۵ با مقادیر توصیه شده توسط (Farajian, 2021) *TM 5-855*

خاک در نظر گرفته شده، خاک رسی است که رفتار

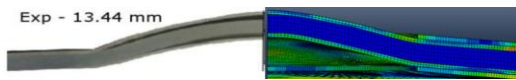
جدول ۴- پارامترهای جانسون کوک فلز مورد استفاده برای مستهلک‌کننده (Lesuer, 2000)

$\rho(kg / m^3)$	$E(GPa)$	ν	$A(MPa)$	$B(MPa)$	n	C	m	$\dot{\epsilon}_0$
۲۷۴۰	۷۳/۰۹	۰/۳۳	۳۴۹	۴۲۶	۰/۷۳	۰/۰۰۸۳	۱	۰/۰۰۱

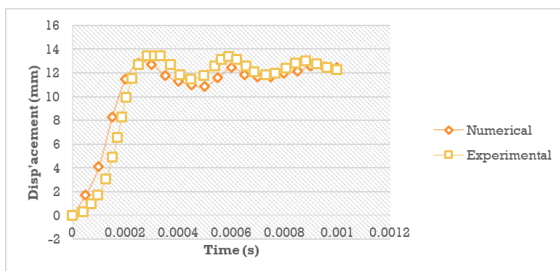
ساختار ساندویچی شکل، می‌تواند تاثیر بسزایی در جلوگیری از ایجاد آسیب‌های حاصل از امواج مکانیکی داشته باشد. پس از انجام تحلیل توسط حلگر صریح در نرم‌افزار آباکوس، نتایج با تقریب خوبی (خطای کمتر از ۱۰ درصد) نسبت به مدل آزمایش شده در مقاله حاصل شد (شکل ۸ و شکل ۹).



شکل ۷- شماتیک مدل ساخته شده از ساندویچ پنل و اعمال اتصال Tie در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۸- تغییر شکل ساندویچ پنل در آزمایش (چپ) و مدل‌سازی عددی (راست) از نمای روبرو



شکل ۹- مقایسه تغییر شکل حاصل از اعمال بار انفجاری در کار آزمایش و مدل‌سازی عددی

در این نمودار به وضوح تغییرات ایجاد شده دیده می‌شود و تطابق آن با کار آزمایشگاهی نشان داده شده است. روند بالا در مقاله Lan و همکارانش (Lan, et al., 2019)

۳- صحت سنجی و حساسیت سنجی

۳-۱- صحت سنجی

برای اطمینان از صحت مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، نیاز به انجام صحت سنجی مقالات در حوزه مستهلک‌کننده‌های مورد استفاده در این مقاله است. در این بخش از میان مقالات صحت سنجی شده، دو مقاله مهمی که مدل شدند، بررسی می‌شود:

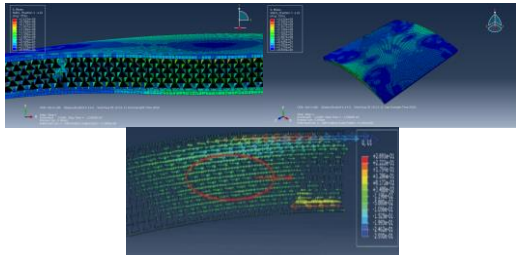
➤ پاسخ انفجار پنل‌های ساندویچی پلی‌اورتان آلومینیوم/ترموپلاستیک- کار آزمایشی و تحلیل عددی (Jamil, et al., 2019)

در مقاله مورد بررسی، نتایج آزمایش و مدل‌سازی عددی، پس از آزمایش انفجار در پلی‌اورتان ترموپلاستیک با پایه‌ی پلی‌اتر، ارائه شده است. از آلیاژ آلومینیوم-2024 $T3(AA)$ به‌عنوان ورق سطح برای تقویت مقاومت در برابر انفجار در سازه‌های ساندویچی با هسته TPU با ضخامت‌های مختلف، استفاده شد. شبیه‌سازی عددی پاسخ انفجار پنل‌های TPU با تبدیل رژیم بارگذاری مواد منفجره اعمال شده به پنل‌ها، به یک بارگذاری پالس فشاری ساده، انجام شد. هدف از این مطالعه بررسی TPU تحت بارگذاری ضربه شدید، یعنی انفجار در هوا بود.

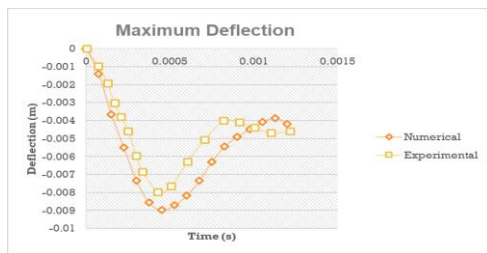
پنل‌های ساندویچی با ورق سطح‌های ساخته شده از آلیاژ آلومینیوم $2024-T3$ و TPU به‌عنوان ماده اصلی هسته، ایجاد شد. ورق سطح‌های آلیاژ آلومینیوم $2024-T3$ (ضخامت ۱/۲ میلی‌متر) با استفاده از اتصال Tie برای ساخت پنل‌های ساندویچ با سه ضخامت هسته‌ای ۵، ۱۰ و ۲۰ به هسته TPU متصل شدند (شکل ۷).

بعد از مدل‌سازی و اعمال بار انفجاری به روش کانوپ (Conwep)، موج انفجار رسیده به مقطع مورد نظر، باعث ایجاد تغییر شکل و تشکیل کانتور تنش مشخصی شد. تنش‌های ایجاد شده متاثر از جنس مستهلک‌کننده مورد استفاده، یعنی پلی‌اورتان با کاهش زیادی همراه بوده است. نتایج بیانگر این موضوع است که پلی‌اورتان به عنوان یک فوم جاذب انرژی به همراه ورق سطح با جنس مشخص با

در این بررسی اثر جمع شدگی ماده مشاهده می‌شود (شکل ۱۲) که از ضریب پواسون منفی هسته آگرتیک ایجاد می‌شود و به دلیل وجود انحنا در ساختار هندسی پنل و همچنین سختی ورق سطح پشتی، تقویت می‌شود. در نمودار شکل ۱۳، به وضوح تغییرات ایجاد شده دیده می‌شود و تطابق آن با کار آزمایشگاهی نشان داده شده است.



شکل ۱۲- جریان جمع شدگی مواد در ناحیه برخورد موج انفجار



شکل ۱۳- مقایسه تغییر شکل حاصل از اعمال بار انفجاری در کار آزمایش و مدل‌سازی عددی

۳-۲- حساسیت سنجی ابعاد

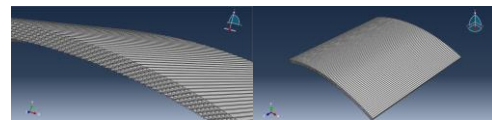
برای به دست آورد ابعاد بهینه، خاک تپ ۵ را به صورت تک لایه، تحت بار انفجار سطحی به میزان ۲۰۰۰ کیلوگرم قرار داده و نتایج بیشینه فشار برای قسمت میانی لایه‌ی خاک، استخراج شد. برای آنالیز حساسیت ابعاد، ارتفاع و عرض خاک را ثابت و به مقدار ۳۰ متر در نظر گرفته و طول خاک برای ۳ حالت ۲۰، ۳۰ و ۵۰ متر مدل‌سازی شد تا بهینه‌ترین طول خاک برای ادامه روند مدل‌سازی مشخص شود. نتایج این مقایسه در شکل ۱۴ دیده می‌شود.

همان‌طور که در نمودار شکل ۱۴، مشخص است، مقادیر بیشینه فشار حاصل از انفجار برای طول‌های ۳۰ متر و ۵۰ متر بسیار به هم نزدیک است؛ لذا ابعاد بهینه برای خاک مدل‌سازی در نرم‌افزار، به صورت ۳۰×۳۰×۳۰ متر انتخاب شد.

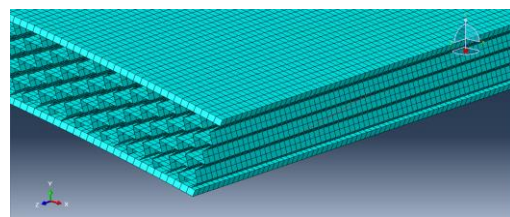
نیز انجام شده که به صورت خلاصه به مراحل و نتایج به دست آمده در آن‌ها می‌پردازیم.

➤ بررسی مقایسه‌ای مقاومت ساندویچ پنل‌های استوانه‌ای شکل (خم) با هسته فوم آلومینیومی و هسته لانه‌زنبوری آگرتیک در برابر انفجار (Lan, et al., 2019)

پاسخ دینامیکی ساندویچ پنل‌های استوانه‌ای با هسته آگرتیک، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفتند. از مدل‌های عددی کالیبره شده برای شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی پنل‌های استوانه‌ای در معرض بارهای انفجاری استفاده می‌شود. با توجه به مطالعات پارامتری، این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش انحنا و ضخامت ورق سطح، مقاومت پنل‌ها با هسته آگرتیک، به وضوح در برابر انفجار افزایش یافته است. این ساختار در حالت ایجاد فشار جانبی، در راستای عمود بر نیروی وارده، به صورت فشرده درآمده و در هنگام کشش، گسترش می‌یابد. با چنین رفتار مکانیکی، این ساختار عملکردهای پیشرفته‌ای را در مقاومت برابر شکستگی، مقاومت در برابر تورفتگی، مدول برشی و جذب لرزش نشان می‌دهند؛ بنابراین، در سال‌های اخیر، مواد و سازه‌های آگرتیک برای اهداف محافظتی، مورد بررسی قرار گرفته است. نمایی از پنل آگرتیک مدل‌سازی شده و مدل مش بندی شده آن بترتیب در شکل ۱۰ و شکل ۱۱، آمده و نتایج به دست آمده از این مقایسه به شرح شکل ۱۲ و شکل ۱۳، است که با دقت خوبی (بیشتر از ۹۰ درصد) به دست آمد.

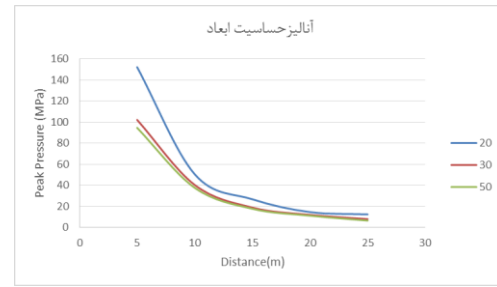


شکل ۱۰- پنل آگرتیک استوانه‌ای ایجاد شده در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۱۱- شماتیک مدل مش بندی شده

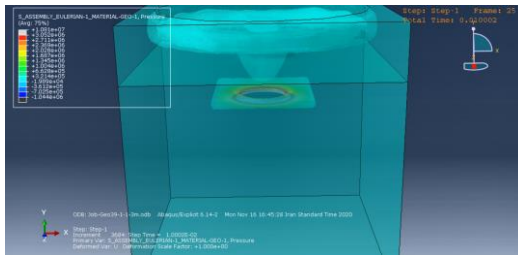
یک مستهلک کننده است. این پارامتر باعث ایجاد تفاوت‌های زیاد در عملکرد و همچنین گستره زیادی از کاهش انرژی‌ها در مستهلک کننده‌ها می‌شود. دلیل انتخاب این مستهلک کننده‌ها در پروژه حاضر با جنس مربوط به خود، عملکرد خوب آن‌ها در پژوهش‌های چند سال اخیر است که هر کدام در جایگاه خود مقاومت خوبی در زمینه بارهای مکانیکی و انفجاری داشته‌اند.



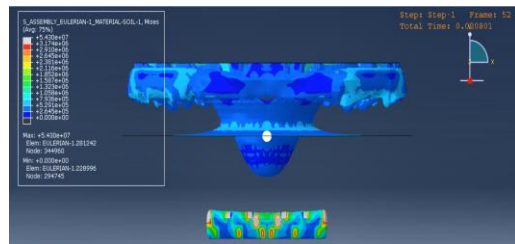
شکل ۱۴- مقایسه بیشینه فشار به منظور آنالیز حساسیت ابعاد برای حالت خاک نوع ۵ (Farajian, 2021)

۴- بحث و نتیجه گیری

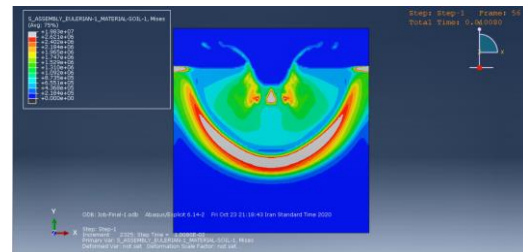
در این مطالعه محیط مورد بررسی، یک محیط خاک رسی می‌باشد. مستهلک کننده‌های مورد بررسی در این مطالعه، در محیط بیرون از خاک عملکرد خوبی داشته‌اند که به آن پرداخته شد. در تحلیل اول، انتشار موج در خاک، بدون در نظر گرفتن مستهلک کننده مدل‌سازی شده است (شکل ۱۵). هدف از این آنالیز به دست آوردن کانتور تنش و ماکزیمم فشار رسیده به نقاط مشخص شده در عمق‌های ۱/۵، ۴، ۶، ۸/۵ و ۱۲ متر از محل ایجاد بار انفجاری است؛ تا در ادامه شرایط مقایسه با مدل‌های دارای مستهلک کننده فراهم شود.



شکل ۱۶- کانتور ایجاد شده در محیط مدل بعد از انفجار



شکل ۱۷- شماتیک انفجار در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۱۵- کانتور تنش خاک در زمان ۰/۰۱ ثانیه

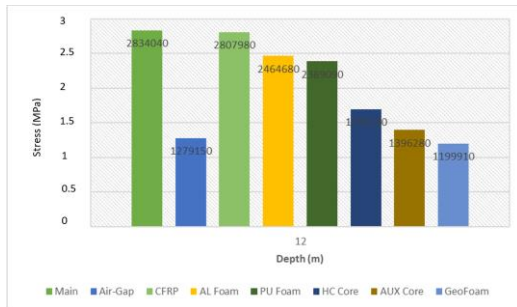
نکته مهم در مدل‌سازی آن‌ها در این پروژه، جایگذاری آن‌ها در خاک است و بررسی آن‌ها در یک محیط ترکیبی است. طبق مطالعات انجام شده در این زمینه در مقالات مختلف، نتایج نشان می‌دهد که در اکثر مواقع، هرچقدر مستهلک کننده به خرج انفجاری نزدیک باشد، کاهش بیشتری در انرژی موج اتفاق می‌افتد. از این رو برای بررسی جنس مستهلک کننده‌ها، عمق سه متری برای جایگذاری آن در خاک، در نظر گرفته شده است. در ادامه نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها ارائه شده است.

۴-۱- تحلیل نتایج مدل‌سازی

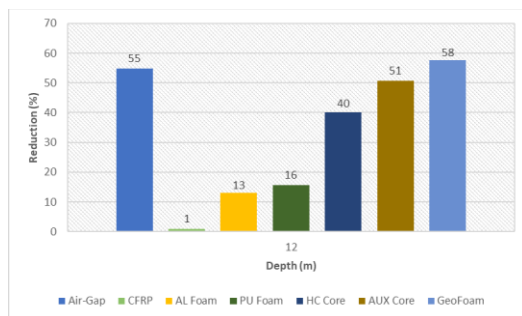
نمودارهای شکل ۱۸ و شکل ۱۹، مقایسه اثر جنس مستهلک کننده‌های آگرتیک و لانه‌زنبوری بر تنش ایجاد شده را در اعماق مختلف نشان می‌دهند. از آنجا که این ساختارها در بررسی‌های جداگانه ای برای انتخاب ابعاد بهینه سلول واحد هر ساختار مدل‌سازی شدند، از مدل‌های برتر

ابعاد کلی مستهلک کننده، ۱۰ متر در ۱۰ متر و ضخامت ۱ متر می‌باشد؛ که درون محیط اویلری، که متشکل از هوا و خاک و ماده انفجاری است، جایگذاری شده است. ضخامت ۱ متر مستهلک کننده، شامل ۷۰ سانتی‌متر ضخامت هسته ساندویچ پنل و ۳۰ سانتی‌متر ضخامت مجموع دو ورق سطح است. کانتور ایجاد شده در محیط مدل بعد از انفجار، در شکل ۱۶ و شماتیک انفجار در شکل ۱۷، نشان داده شده است.

می‌توان گفت پارامتر جنس، مهم‌ترین بخش در مورد



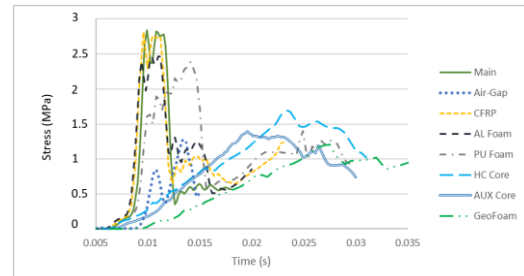
شکل ۲۰- نمودار مقایسه تأثیر جنس مستهلک‌کننده بر بیشینه تنش در عمق ۱۲ متری



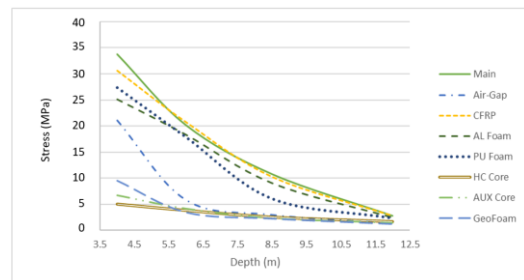
شکل ۲۱- نمودار درصد کاهش انرژی موج انفجاری با توجه به جنس مستهلک‌کننده در عمق ۱۲ متری

با توجه به شکل ۱۸، سه موردی که عملکرد ضعیف دارند، هنگامی که موج انرژی به مستهلک‌کننده رسیده، با کمترین تغییرات و بلافاصله از آن‌ها عبور کرده است؛ که بررسی زمان تنش، این موضوع را مشخص می‌کند. موجی که به مستهلک‌کننده می‌رسد، درون ساختار آن دچار بازتاب شده و نموداری مطابق شکل ارائه می‌دهد؛ اما در ۳موردی که عملکرد بهتر داشته‌اند، به وضوح مشاهده می‌شود که موج درون مستهلک‌کننده درگیر شده و با گذشت زمان بیشتری نسبت به سه مورد ضعیف‌تر، از این مستهلک‌کننده‌ها عبور می‌کند. این موضوع به عواملی چون چگالی کمتر، شکل‌پذیری بیشتر، ضریب پواسون منفی و همین‌طور ایجاد ناپیوستگی و فضای متخلخل بیشتر، مربوط می‌شود؛ که در موارد بالا مشهود است. در این بررسی، بهترین عملکرد برای ژئوفوم *EPS12* است که کاهش انرژی در حدود ۵۸ درصد دارد. بعد از آن پنل آگرتیک با کاهش ۵۱ درصدی قرار می‌گیرد. ژئوفوم به‌عنوان یکی از بهترین مستهلک‌کننده‌ها در محیط‌هایی مانند خاک شناخته

این بررسی‌ها در مدل‌سازی حاضر استفاده شده است. به عبارت دیگر بهترین ساختار درونی پنل‌های آگرتیکی و لانه‌زنبوری در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۸- نمودار تاریخچه زمان تنش ایجاد شده در عمق ۱۲ متری خاک با اعمال مستهلک‌کننده با جنس‌های مختلف در عمق سه متری

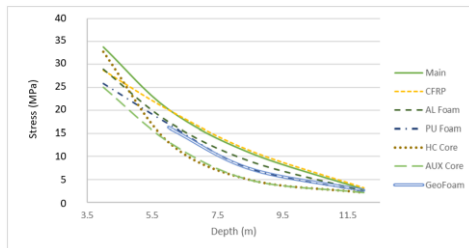


شکل ۱۹- نمودار مقایسه بیشینه تنش ایجاد شده در هر مدل در عمق‌های مختلف با توجه به جنس مستهلک‌کننده

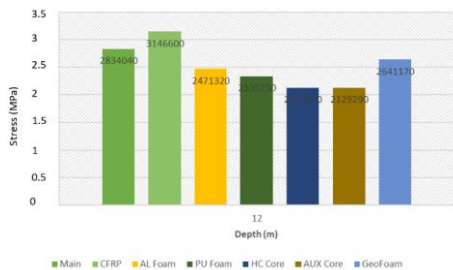
از بین ژئوفوم *EPS12* و *EPS39*، مدل اول انتخاب شده که نتایج بهتری از بررسی آن حاصل شده است. نتایج نشان می‌دهد که ترانشه در این مدل‌سازی با شرایط موجود، نتیجه خوبی دارد. دلیل این موضوع، ایجاد یک محیط کاملاً متفاوت نسبت به محیط خاک است. این موضوع باعث ایجاد یک شکاف در پیوستگی خاک می‌شود و از آنجایی که ذرات هوا نسبت به خاک، پیوستگی و تراکم کمتری دارد، کمک به انتقال انرژی موج نمی‌کند و در نتیجه انرژی منتقل شده کاهش می‌یابد (شکل ۲۰).

در مستهلک‌کننده‌های مورد استفاده با ابعاد پیش‌فرض یعنی 10×10 در ضخامت ۱ متر، ضعیف‌ترین عملکردها به ترتیب برای *CFRP*، فوم آلومینیوم و فوم پلی‌اورتان و بهترین عملکرد مربوط به مستهلک‌کننده ژئوفوم، آگرتیک و لانه‌زنبوری است (شکل ۲۱).

بخش بعد و با افزایش ضخامت پنل مستهلک‌کننده، مشخص خواهد شد که کاهش ضخامت به عملکرد آن کمک خواهد کرد یا خیر. آگزتیک و لانه‌زنبوری عملکرد تقریباً یکسانی داشته‌اند. دلیل یکسان بودن این موضوع، این است که با کاهش ضخامت پنل آگزتیک و با توجه به شدت موج رسیده به آن، مستهلک‌کننده عملاً فرصت و قدرت ایجاد ضریب پواسون منفی را در ساختار خود نداشته و به صورت یک ساندویچ پنل با هسته سلولی معمولی عمل می‌کند. سلول واحد‌های کمتر نیز عامل این موضوع می‌باشد. کاهش در لانه‌زنبوری هم به دلیل کمتر شدن فضاهای خالی بین سلول واحد و کاهش ناپیوستگی در خاک می‌باشد. ولی هر دو در مقایسه با بقیه مستهلک‌کننده‌ها با ضخامت ۰/۵ متر، عملکرد خوبی داشته‌اند (شکل ۲۴ و شکل ۲۵). نکته قابل توجه در این بخش عملکرد بسیار ضعیف ژئوفوم است که مشخص می‌کند که داشتن ضخامت مناسب، یکی از مهم‌ترین پارامترها برای اثربخشی خوب در ژئوفوم است؛ لذا در زمان استفاده از آن، باید با در نظر گرفتن شرایط موجود، با ضخامت بالا مورد استفاده قرار بگیرد.



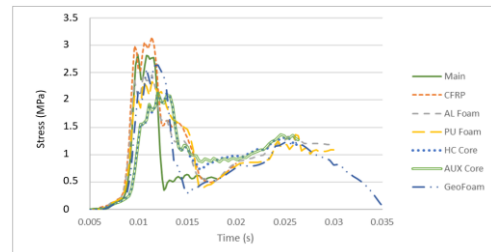
شکل ۲۳- نمودار مقایسه بیشینه تنش ایجاد شده در هر مدل در عمق‌های مختلف با توجه به ضخامت ۰/۵ متری مستهلک‌کننده



شکل ۲۴- نمودار مقایسه تأثیر ضخامت ۰/۵ متری مستهلک‌کننده در کاهش انرژی موج انفجاری

می‌شود. در بخش بعد به مقایسه‌ی ضخامت پنل مستهلک‌کننده پرداخته شده است. ضخامت پنل‌ها نسبت به بخش قبل کمتر شده و به ۰/۵ متر رسیده است. جنس و ابعاد مستهلک‌کننده‌ها و سلول واحد آن‌ها نسبت به مقایسه قبل ثابت در نظر گرفته شده است تا مقایسه‌ای نسبت به ضخامت ۱ متری آن‌ها نیز انجام شود. پیش‌بینی می‌شود که با کاهش ضخامت میزان کاهش انرژی توسط مستهلک‌کننده‌ها نیز کم شود. در ادامه به بررسی نتایج پرداخته می‌شود.

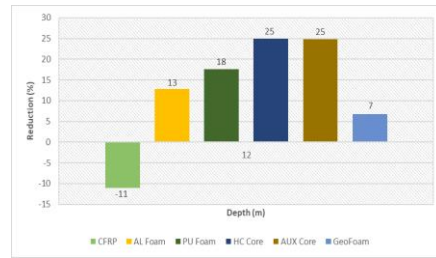
در نمودارهای شکل ۲۲ و شکل ۲۳، نتایج قابل توجهی به دست آمده است. به جز فوم پلی‌اورتان بقیه مستهلک‌کننده‌ها با کاهش ضخامت، در دمپ انرژی نیز عملکرد ضعیف‌تر داشته‌اند. بدترین حالت ممکن در یک مستهلک‌کننده، این است که باعث تشدید میزان انرژی مستهلک‌کننده شود که این موضوع در CFRP با ضخامت ۰/۵ متری رخ داده است. این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش سرعت عبور موج از مستهلک‌کننده رخ داده باشد که نیاز به بررسی‌های تکمیلی دارد.



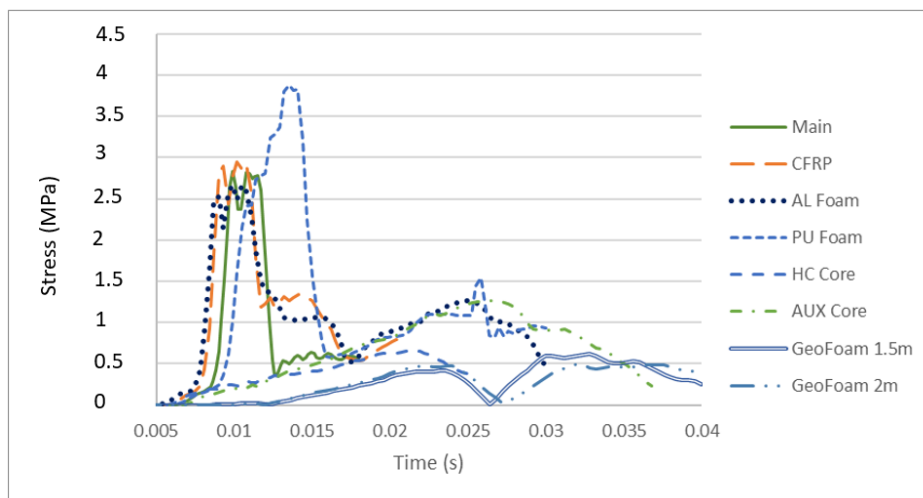
شکل ۲۲- نمودار تاریخچه زمان تنش ایجاد شده در عمق ۱۲ متری خاک با اعمال مستهلک‌کننده با جنس‌های مختلف با ضخامت ۰/۵ متری

در فوم آلومینیوم نیز کاهش دمپ انرژی رخ داده است که طبیعی است؛ اما در کل گزینه مناسبی برای انتخاب بین مستهلک‌کننده‌ها نمی‌باشد. فوم پلی‌اورتان با توجه به ساختاری که دارد، با توجه به چگالی و عملکردی که در ساختار شیمیایی خود دارد، با کمتر شدن ضخامت خود عملکرد بهتری داشته است. دلیل این موضوع مربوط به ساختار فوم است که با کاهش ضخامت و رسیدن به حد بهینه خود، عملکرد بهتری خواهد داشت. این موضوع در

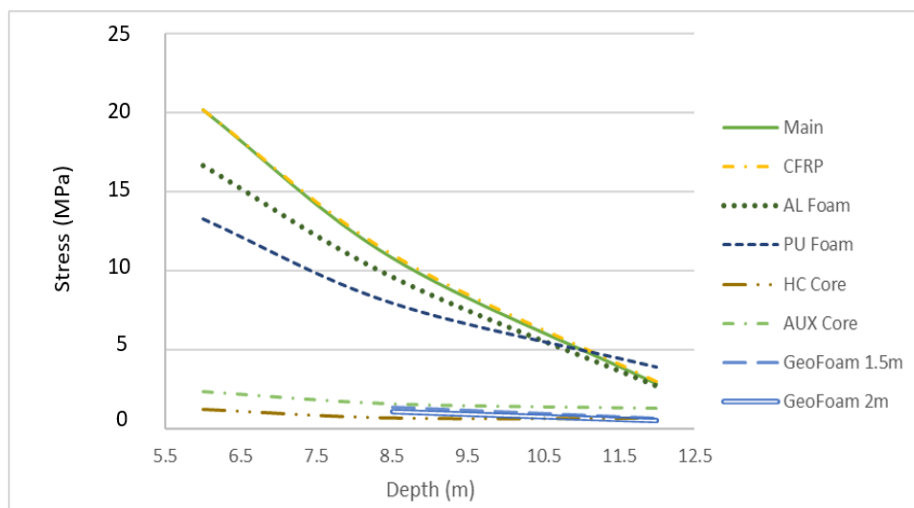
در ادامه با افزایش ضخامت پنل مستهلک‌کننده‌ها به بررسی این پارامتر پرداخته شده است. ضخامت هر پنل به ۲ متر افزایش داده شده است. در این بخش با نتایج به دست آمده، می‌توان در نتایج حاصل شده از بخش قبل، اطمینان حاصل کرد. نتایج در نمودارهای شکل ۲۶ و شکل ۲۷، ارائه شده است.



شکل ۲۵- نمودار درصد کاهش انرژی موج انفجاری با توجه به ضخامت ۰/۵ متری مستهلک‌کننده



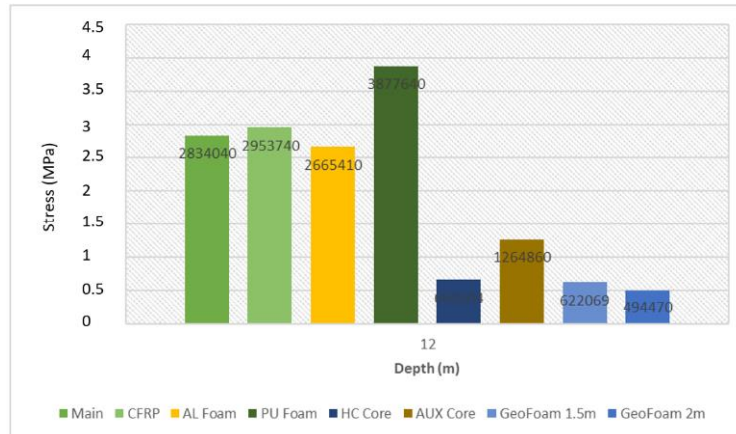
شکل ۲۶- نمودار تاریخچه زمان تنش ایجاد شده در عمق ۱۲ متری خاک با اعمال مستهلک‌کننده با جنس‌های مختلف با ضخامت ۲ متری



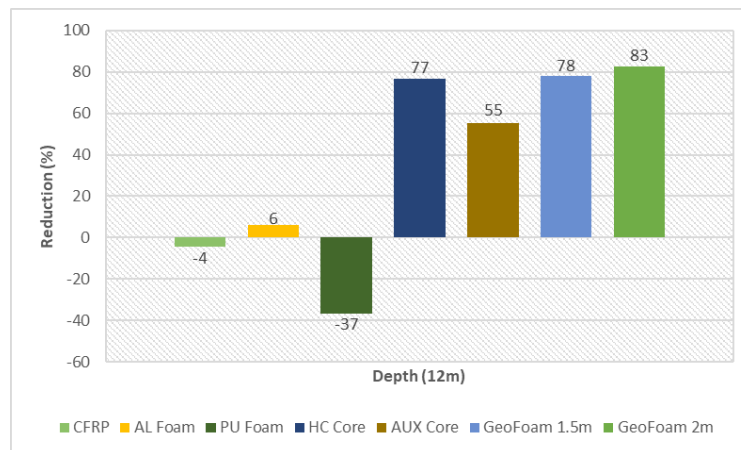
شکل ۲۷- نمودار مقایسه بیشینه تنش ایجاد شده در هر مدل در عمق‌های مختلف با توجه به ضخامت دو متری مستهلک‌کننده

نکته قابل توجه در این بخش عملکرد خوب لانه‌زنبوری است. در شکل ۲۸ و شکل ۲۹، مقایسه این پارامتر به نمایش درآمده است.

در نتایج ارائه شده، تفسیر بخش قبل تأیید شده و مستهلک‌کننده‌ی پلی‌اورتان با افزایش ضخامت، عملکرد بسیار ضعیفی از خود نشان داده است و باعث تشدید انرژی موج انفجاری شد که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲۸- نمودار مقایسه تأثیر ضخامت دو متری مستهلک‌کننده در کاهش انرژی موج انفجاری



شکل ۲۹- نمودار درصد کاهش انرژی موج انفجاری با توجه به ضخامت دو متری مستهلک‌کننده

چگالی افزایشی در مرکز پنل ایجاد شده که موج راحت‌تر عبور می‌کند؛ اما بهترین عملکرد در این بخش مربوط به دو ضخامت ۱/۵ و ۲ متری ژئوفوم می‌باشد که به ترتیب ۷۸ و ۸۳ درصد دمپ انرژی انفجاری داشته‌اند. با توجه به مطالب گفته شده در بخش قبل، هرچقدر ضخامت ژئوفوم بیشتر باشد، عملکرد بهتری خواهد داشت؛ لذا راهکار پیشنهادی، استفاده از ژئوفوم و ساختار لانه‌زنبوری با ضخامت بالا می‌باشد.

در مقایسه ضخامت ۲ متری ساختار آگزتیک و ضخامت ۲ متری ساختار لانه‌زنبوری، عملکردهای متفاوتی مشاهده می‌شود. دلیل این موضوع این است که همانطور که قبلاً اشاره شد، ساختار لانه‌زنبوری در خاک یک ناپیوستگی ایجاد می‌کند. بین سلول واحد این ساختار، فضای خالی وجود دارد که با برخورد موج به مستهلک‌کننده، این فضاها در اطراف بزرگ‌تر شده و این ناپیوستگی بیشتر می‌شود که باعث کاهش انرژی موج انفجاری تا ۷۶ درصد می‌شود. در آگزتیک نیز با توجه به عملکرد ضریب پواسون منفی، یک

۲-۴- نتیجه‌گیری

- ۱- ترانسه هوا در این بررسی با شرایط موجود به دلیل ایجاد یک شکاف در پیوستگی خاک می‌شود، نتیجه خوبی دارد.
- ۲- در بررسی جنس مستهلک‌کننده‌های مورد استفاده، با ابعاد پیش‌فرض 10×10 در ضخامت ۱ متر، ضعیف‌ترین عملکردها به ترتیب برای CFRP، فوم آلومینیوم و فوم پلی‌اورتان است.
- ۳- در بین مستهلک‌کننده‌ها، بهترین عملکرد مربوط به مستهلک‌کننده ژئوفوم، آگرتیک و لانه‌زنبوری است.
- ۴- از میان مستهلک‌کننده‌های برتر در بررسی جنس، بهترین عملکرد برای ژئوفوم EPS12 است که کاهش انرژی در حدود ۵۸ درصد دارد. بعد از آن پنل آگرتیک با کاهش ۵۱ درصدی قرار می‌گیرد.
- ۵- به جز فوم پلی‌اورتان بقیه مستهلک‌کننده‌ها با کاهش
- ضخامت، در دمپ انرژی نیز عملکرد ضعیف‌تر داشته‌اند.
- ۶- با کاهش ضخامت پنل مستهلک‌کننده، آگرتیک‌ها به دلیل سلول واحد‌های کمتر، عملکرد تقریباً یکسانی با مستلک‌کننده لانه‌زنبوری داشته‌اند.
- ۷- در ضخامت ۲ متری ساختار آگرتیک و ضخامت ۲ متری ساختار لانه‌زنبوری، عملکردهای متفاوتی مشاهده می‌شود. به دلیل ایجاد ناپیوستگی بیشتر در محیط، لانه‌زنبوری باعث کاهش انرژی موج انفجاری تا ۷۶ درصد می‌شود.
- ۸- بهترین عملکرد در بررسی ضخامت مستهلک‌کننده‌ها، مربوط به دو ضخامت $1/5$ و ۲ متری ژئوفوم است که به ترتیب ۷۸ و ۸۳ درصد دمپ انرژی انفجاری داشته‌اند.

۵- مراجع

- Bishop, A. W. (1960). *The principles of effective stress*. Norges Geotekniske Institutt.
- Dassault Systèmes Simulia Corp. (2015). *ABAQUS: Version 6.14 User's Manual*. Providence, RI, USA.
- Davies, M. C. (1994). *Dynamic Soil-structure Interaction Resulting from Blast Loading*. International Conference on Centrifuge Modelling (Centrifuge), (pp. 319-324). Rotterdam, Netherlands: Singapore.
- Farajian, S. (2021). *Modeling the effect of material and distance of the damper on attenuation of mechanical waves in the ground*. Tehran: Malek Ashtar University of technology.
- Henrych, J. (1979). *The Dynamics of Explosion and its use*. Amsterdam: Elsevier Science Publisher.
- Horvath, J. (1995). *Geofoam geosynthetic*. N.Y., U.S.A.: Horvath Engineering, P.C.,.
- Hua, Y., Akula, P., & Gu, L. (2014). *Experimental and numerical investigation of carbon fiber sandwich panels subjected to blast loading*. Composites Part B: Engineering.
- Imbalzano, G., Linforth, S., Ngo, T., Lee, P., & Tran, P. (2018). *Blast Resistance of Auxetic and Honeycomb Sandwich Panels: Comparisons and Parametric Designs*. Composite Structures.
- Jamil, A., Guan, Z., Cantwell, W., Zhang, X., Langdon, G., & Wang, Q. (2019). *Blast response of aluminium/thermoplastic polyurethane sandwich panels — experimental work and numerical analysis*. International Journal of Impact Engineering.
- Lan, X., Feng, S., Huang, Q., & Zhou, T. (2019). *A comparative study of blast resistance of cylindrical sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores*. Aerospace Science and Technology.

Lesuer, D. (2000). Experimental investigations of material models for Ti- 6 Al-4V titanium and 2024-T3 aluminum. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory.

Najafi, M., Ahmadi, H., & Liaghat, G. (2020). Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption in Auxetic Structures under Quasi-static Loading. MODARES MECHANICAL ENGINEERING.

Punmia, B., & Jain, A. (2005). Soil mechanics and foundations. Firewall Media.

Regulations, O. o. (2016). Chapter Twenty-One National Building Regulations: Passive Defense. Tehran: Ministry of Roads and Urban Development, Road, Housing and Urban Development Research Center.

Xu, J., Liu, J., Gu, W., Liu, X., & Cao, T. (2018). Shock Wave Attenuation Characteristics of Aluminum Foam Sandwich Panels Subjected to Blast Loading. Shock and Vibration.

Numerical modeling of the effect of different attenuator elements on the reduction of energy of shock waves in soil environment

S. Farajian¹; M. Y. Radan^{2*}; S. A. Hosseini³

1- MSc in Passive Defense; Malek Ashtar University of Technology, sinafarajian7@chmail.ir

2- Assistant Professor; Malek Ashtar University of Technology, radan@mut.ac.ir

3- Assistant Professor; Malek Ashtar University of Technology, hoseini@mut.ac.ir

Received: 4 Jul 2021; Accepted: 6 Mar 2022

DOI: 10.22044/tuse.2022.10959.1421

Keywords

Attenuator elements
Numerical modeling
Auxetic sandwich panel
Geofoam
Explicit solution procedure
Abaqus

Extended Abstract

Summary

In this study, the amount of energy reduction of impulsive mechanical waves on the attenuator elements with different materials and different thicknesses has been investigated. The effect of attenuator elements on the reduction of the energy of the shock waves in a soil medium has been investigated through modeling. The soil model, employed in this study, is chosen from the U.S.

Army TM 5-855-1 soil classification as Type 5 that is considered as highly saturated clay.

Introduction

Structures having different shapes or materials show different behaviors against shock waves, and correct understanding of the performance of these structures against the waves can be useful and effective in choosing the appropriate shape or materials of the structures.

Methodology and Approaches

With the increasing development of software and hardware facilities in recent decades, the use of finite element software in solving engineering science problems has had significant progress. In this regard, software packages such as ABAQUS, FLAC and ANSYS have been developed and used. The ABAQUS software, compared to other similar finite element software, due to its explicit and implicit solution procedures, has advanced and diverse behavioral models for different materials such as metals, rubber, concrete, soil, stone, fluids and ability to quick development of models with complex geometry. Therefore, this software has attracted the attention of many researchers in the past few years, and thus, it has been used in this modeling study.

Results and Conclusions

One of the important results in this study is effect of geofoam and auxetic sandwich panel in reducing by 60% and 50% of the emitted wave energy in the soil, respectively. One of the innovative aspects of this research is the study of the effect of new materials. Another innovation in this research, compared to previous studies, is the study of the effect in a composite environment, such as the earth, which is composed of different components such as rock and soil. These components, due to their parameters and properties, have different effects on the propagation of mechanical waves.
