

مطالعه‌ی رفتار امواج صوتی ارسالی به یک نقب مدفون در خاک

امیرحسین روح‌زمین^۱، مهدی خرقانی^۲، محسن حاجی‌حسینی^{۳*}

۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۳. دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۴، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲

چکیده

در مقاله‌ی پیش‌رو سعی شده است که با استفاده از ارسال امواج صوتی، در قالب انفجار در هوای آزاد، به یک نقب (نقب) مدفون در خاک و اندازه‌گیری فشار امواج صوتی بازتابی به سطح و عبوری از سازه، عوامل مؤثر بر رفتار این امواج، نظیر وجود نقب، رفتار غیرخطی خاک، شرط مرزی مستهلک‌کننده‌ی انرژی، مدول کشسانی و چگالی خاک و اثر آن‌ها مورد تحلیل قرار گیرد. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشخص می‌شود که در حضور سازه‌ی زیرزمینی و با اعمال شرط مرزی مستهلک‌کننده‌ی انرژی، سطح فشار موج صوتی بازتابی کاهش می‌یابد. در رابطه با الگوسازی خاک نشان داده می‌شود که رفتار غیرخطی خاک تأثیر چندانی بر رفتار امواج صوتی ندارد و هر چه سختی خاک نیز کم‌تر باشد، اگر چه باعث استهلاک بیش‌تر انرژی می‌شود، اما به دلیل لرزش ایجادشده ناشی از همین استحکام کم، امواج عبوری از محیط را تقویت می‌کند. هم‌چنین مشاهده می‌شود که تغییرات سطح فشار در خاک‌های سخت‌تر نسبت به چگالی خاک بسیار حساس‌تر از خاک‌های نرم‌تر می‌باشد. با مقایسه‌ی نتایج این تحقیق با سایر داده‌ها، نشان داده شد که نحوه‌ی الگوسازی انفجار، خصوصیات هندسی الگو و به‌طور خاص، عمق دفن نقب دارای تأثیر قابل توجهی بر رفتار امواج صوتی بازتابی به سطح و عبوری از نقب، برای الگوهای مختلف خاک، می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: فشار موج صوتی، موج بازتابیده و تراگسیلیده، انفجار در هوای آزاد، سازه‌های زیرزمینی.

۱. مقدمه

کسب نمود و بعد از بهره‌برداری از آن محل، میزان و گستردگی آسیب‌دیدگی احتمالی مشخص گردد تا اقدامات مقتضی انجام گیرد. یکی از روش‌های موجود، استفاده از امواج صوتی و بررسی رفتار این امواج در ارسال و بازگشت از سازه‌های زیرزمینی می‌باشد. البته کاربرد این امواج تنها محدود به سازه‌های زیرزمینی نمی‌باشد. این امواج در مواردی نظیر بررسی نحوه‌ی احتراق در موتورها، آزمایش‌های غیرمخرب و پایش و کنترل مراحل مختلف ساخت و ساز قطعات مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱]. در رابطه با سازه‌های زیرزمینی نیز می‌توان اندازه، محل و سازوکار آسیب در نقب‌هایی (تونل‌هایی) که در عمق زیاد زمین اجرا گردیده‌اند را با استفاده از ترکیب امواج صوتی ارسالی و فرآیند آسیب وارده به سنگ‌های اطراف آن مورد بررسی قرار داد [۲]. هم‌چنین می‌توان با ارسال این امواج و تحلیل رفتار امواج بازگشتی، به بررسی میزان آسیب دیدگی سنگ‌های اطراف محل حفاری توسط دستگاه

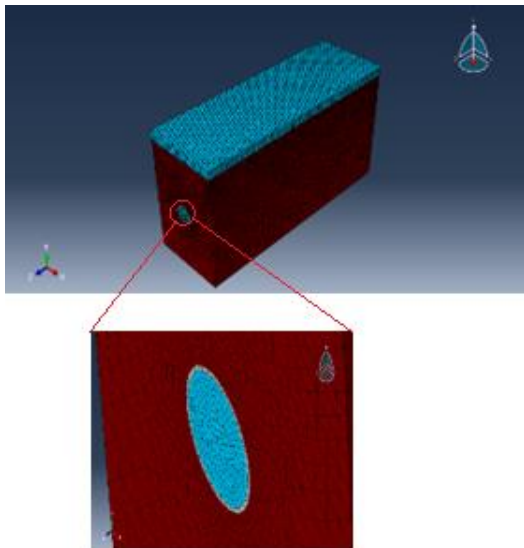
امروزه با توسعه‌ی شهرها و گسترش شهرنشینی و با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران، نیاز به طراحی و اجرای سازه‌های زیرزمینی و مدفون در تمامی زمینه‌ها از قبیل مترو، حمل‌ونقل بین شهری، خطوط انتقال آب و غیره، بیش از قبل احساس می‌گردد. با توجه به نوع کاربرد و بارهای وارده به این سازه‌ها و هم‌چنین به دلیل محدودیت در دسترسی و هزینه‌های بالای ناشی از آن، یکی از مشکلات تأثیرگذار در بحث سازه‌های زیرزمینی، مساله‌ی مکان‌یابی این نوع سازه‌ها قبل از احداث و کنترل سلامت و پایش آن‌ها بعد از بهره‌برداری می‌باشد. از این‌رو به روشی نیاز است تا بتوان بدون دسترسی مستقیم، از وجود سازه‌ی احتمالی مدفون قبل از اجرای پروژه اطلاعات

* نویسنده پاسخگو: m.hajihassani@urmia.ac.ir

خاک بر رفتار امواج صوتی بازتابی به سطح و عبوری از نقب و در نظر گرفتن طیف وسیعی از انواع خاک‌ها می‌باشد. هم‌چنین در این مقاله به اثر در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک نیز پرداخته شده است و نیاز یا عدم‌نیاز به در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک را مورد بررسی قرار داده است. سازه‌ی زیرزمینی مورد بررسی در این مقاله، نقب مترو می‌باشد که تحت اثر امواج صوتی ارسالی ناشی از انفجار در هوای آزاد قرار دارد. با اندازه‌گیری فشار امواج صوتی بازتابی به سطح و عبوری از نقب، تأثیر عوامل فوق بر رفتار امواج ارسالی مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که تمامی مراحل الگوسازی در نرم‌افزار عنصر متناهی آباکوس انجام می‌گیرد.

۲. تشریح مسأله

سازه‌ی زیرزمینی مورد بررسی، یک نقب مترو مدفون در خاک می‌باشد. الگوی که از این نقب در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد شامل لایه هوای سطحی، خاک اطراف نقب، پوشش نقب و هوای داخل نقب می‌باشد. الگوی سه‌بعدی عنصر متناهی نقب را می‌توان در شکل ۱ مشاهده نمود.



شکل ۱ الگوی عنصر متناهی نقب مدفون در خاک به همراه لایه‌ی هوای سطحی، هوای درون نقب و پوشش اطراف نقب.

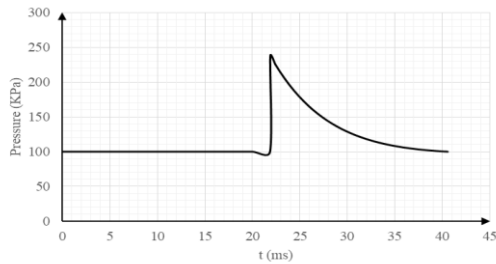
مشخصات هندسی الگوی نیز در شکل ۲ و جدول ۱ قابل رویت می‌باشند.

تی‌بی‌ام^۱ پرداخت [۳-۴]. تعیین موقعیت مکانی و درجه‌ی آسیب‌دیدگی پوشش بتنی اطراف نقب از دیگر کاربردهای امواج صوتی می‌باشد [۵]. تأثیر میزان رطوبت توده‌ی سنگ در فرآیند انفجار سنگ در فرآیند معدن‌کاری، بر میزان آسیب‌های وارده به سنگ نیز از دیگر موارد استفاده از این امواج می‌باشد [۶].

به‌منظور تحلیل و بررسی دقیق امواج صوتی بازتابی از سازه‌های زیرزمینی، نیاز است که اثر هر کدام از اجزا درگیر با موج صوتی نظیر بدنه‌ی سازه و خاک اطراف سازه و خصوصیات هندسی و فیزیکی آن‌ها، بر رفتار امواج صوتی مورد بررسی قرار گیرد. به‌عنوان نمونه در منبع [۷]، اثر انفجار ناشی از حملات هوایی و موشکی بر سازه‌های مدفون مورد بررسی قرار گرفته است و عواملی نظیر وزن خرج انفجاری و عمق سازه‌ی مدفون بر رفتار سازه، میزان تنش مؤثر، شتاب دیواره و غیره مورد بررسی قرار گرفته است. مدول کشسانی خاک، ضخامت لاینینگ و الگوی بتن استفاده شده در آن از دیگر مواردی می‌باشد که تأثیر آن‌ها بر رفتار امواج صوتی مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. بررسی خصوصیات خاک و اثر آن بر رفتار امواج صوتی برای یک لوله‌ی آهنی آب مدفون در خاک [۹-۱۰] نیز نمونه‌ای دیگر از مطالعات انجام‌شده در این زمینه می‌باشد. اندازه‌گیری خصوصیات خاک در محل نیز از دیگر روش‌های بررسی تأثیر خصوصیات خاک بر رفتار امواج صوتی می‌باشد [۱۱-۱۲]. سایر خصوصیات خاک، نظیر ساختار چندلایه‌ای خاک، از دیگر مواردی می‌باشد که اثر آن بر رفتار امواج صوتی مورد بررسی قرار گرفت [۱۳-۱۴].

در مقاله‌ی پیش‌رو هدف، بررسی دقیق‌تر و جزئی‌تر موارد تأثیرگذار بر رفتار امواج صوتی ارسالی به سازه‌های زیرزمینی می‌باشد. در این مقاله تأثیر عواملی نظیر وجود و یا عدم‌وجود نقب، رفتار غیرخطی خاک، اعمال شرط مرزی مستهلک‌کننده‌ی انرژی، مدول کشسانی و چگالی خاک بر رفتار امواج صوتی بازتابی و عبوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از نکات جدیدی که در مقاله‌ی پیش‌رو وجود دارد، بررسی جداگانه‌ی اثر مدول کشسانی و چگالی

^۱ TBM; Tunnel Boring Machine



شکل ۳ تاریخچه زمانی فشار وارده به سطح خاک ناشی از انفجار ۵۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی در ارتفاع ۲۰ متری از سطح خاک.

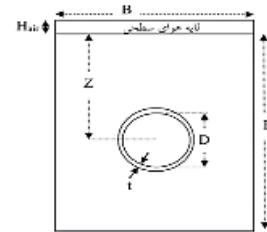
همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشخص می‌باشد، کل فرآیند انفجار به اندازه‌ی ۴۰ میلی‌ثانیه طول می‌کشد، اما برای بررسی و تحلیل دقیق امواج صوتی بازتابی و عبوری از نقب، مدت زمان تحلیل ۰/۵ ثانیه در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین به دلیل پایین بودن سطح فشار در فاز منفی (فشار کمتر از فشار جو) در مقایسه با فاز مثبت فشار، از این فاز چشم‌پوشی می‌شود.

برای بررسی تأثیر اجزا مختلف نقب مدفون در خاک بر رفتار امواج صوتی، نیاز است که بازه‌ی تقریباً گسترده‌ای از شاخصه‌های فیزیکی این اجزا در الگوی اصلی اعمال گردد. در جدول ۲ الگوهای متخلفی از خاک اطراف نقب که در تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد، ارائه گردیده است.

جدول ۲ خصوصیات و شاخصه‌های مکانیکی خاک.

الگوی خاک	مدول کشسانی (مگاپاسکال)	ضریب پواسون	زاویه‌ی اصطکاک	چسبندگی (کیلوپاسکال)
خاک I	۸۲۲۶۸	۰/۳	۳۵	۳۴۰
خاک II	۱۷۷۸۱۱	۰/۳	۳۳	۲۵۰
خاک III	۳۱۸۱۱۵	۰/۳	۳۰	۱۶۰
خاک IV	۱۰۷/۱	۰/۳	۳۰	۷۰
خاک V	۵۰/۰۰	۰/۳	۳۴	۱۰

این الگوهای خاک، که از آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله-استاندارد ۲۸۰۰ [۱۷] برداشت شده‌اند، بازه‌ی وسیعی از انواع خاک‌ها، از سنگ بسیار متراکم تا خاک بسیار سست را پوشش می‌دهند. لازم به ذکر است که به‌منظور بررسی اثر چگالی خاک بر رفتار امواج صوتی نیز برای هر مدول کشسانی خاک چهار مقدار چگالی در نظر گرفته می‌شود. این مقادیر عبارتند از: ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب.



شکل ۲ هندسه‌ی کلی الگو.

جدول ۱ خصوصیات هندسی الگوی مورد بررسی.

مشخصات هندسی	H_{air}	t	D	Z	H	B	L (طول الگو)
مقدار (متر)	۵	۰/۳۵	۹	۳۰	۶۰	۴۰	۱۲۰

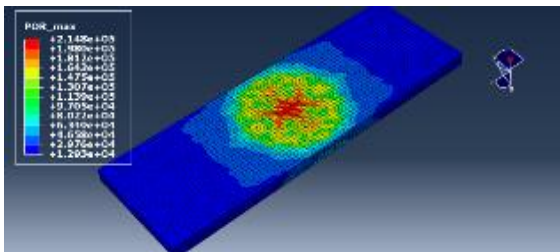
در این مقاله، برای ایجاد موج صوتی مناسب از یک انفجار در هوای آزاد استفاده می‌شود. این انفجار در ۲۰ متری زمین اتفاق می‌افتد و مواد منفجره‌ی آن دارای وزنی معادل ۵۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی می‌باشند. با استفاده از جداول و روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ی یوآف‌سی ۳-۳۴۰-۱۰۲ [۱۵] می‌توان تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار را براساس ارتفاع انفجار و وزن مواد منفجره محاسبه و در قالب موج برخوردی^۲ در نرم‌افزار آباکوس به سطح مشترک خاک و لایه هوای سطحی اعمال نمود [۱۶]. الگوسازی انفجار در نرم‌افزار آباکوس، در قالب موج برخوردی، این امکان را فراهم می‌سازد که انفجار را علاوه بر تاریخچه زمانی فشار، براساس تاریخچه زمانی شتاب ناشی از انفجار تعریف نمود. از طرفی دیگر، علی‌رغم محاسبات بیش‌تر نسبت به سایر روش‌های الگوسازی انفجار (مثل سی‌ان‌دابل‌یوایی پی^۳)، با اعمال بار انفجار از طریق موج برخوردی، می‌توان تمامی شاخصه‌های مربوط به انفجار (مثل زمان شروع انفجار، حداکثر فشار، زمان اتمام انفجار و راستای انفجار) را محاسبه نمود و کنترل بیش‌تری بر روی این شاخصه‌ها داشت. مضاف بر این، این نوع الگوسازی انفجار در آباکوس، الگوسازی لایه هوای سطحی را ممکن می‌سازد. در شکل ۳ این تاریخچه زمانی ارائه گردیده است.

¹ UFC 3-340-02

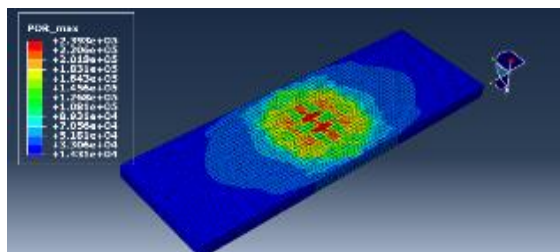
² Incident wave

³ CONWEP

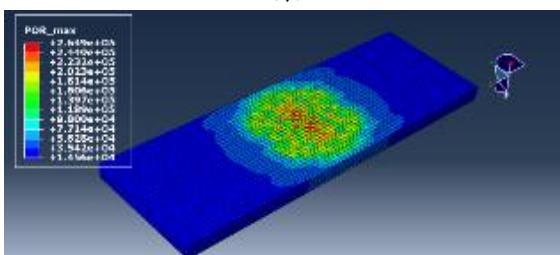
نیز در این دو الگو در نظر گرفته نمی‌شود تا در ادامه اثر اعمال این شرط نیز مورد بررسی قرار گیرد. در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب توزیع حداکثر فشار موج صوتی بازتابی به سطح بر پشت لایه‌ی هوای سطحی، برای الگو دارای نخب و الگوی بدون نخب ارائه گردیده است.



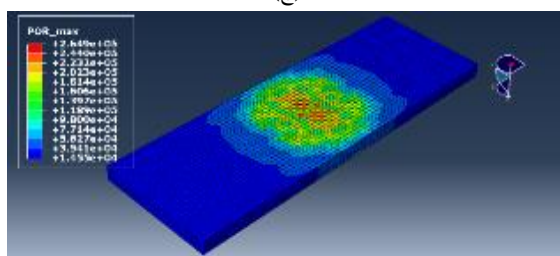
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۴ توزیع حداکثر فشار موج صوتی بازتابی به سطح در پشت لایه‌ی هوای سطحی و در الگو دارای نخب، خاک نوع I؛ (الف) ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ب) ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ج) ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (د) ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب.

بتن پوشش نخب نیز به‌عنوان یک ماده‌ی خطی و کشسان با چگالی ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول کشسانی ۳۷ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود. فرض رفتار خطی و کشسان بتن پوشش اطراف نخب بر مبنای فرض عدم ایجاد ترک در پوشش نخب در تمامی مدت تحلیل استوار می‌باشد. هوای داخل نخب و روی سطح خاک نیز به‌عنوان یک محیط صوتی با چگالی ۱/۱۱ کیلوگرم بر مترمکعب و مدول انبوهه ۱۳۴۰۰۰ پاسکال تعریف می‌گردد.

برای شبیه‌سازی شرایط مرزی الگو، جابه‌جایی در راستای عمود بر کناره‌های الگو و تمامی درجات آزادی جابه‌جایی در کف الگو نیز محدود می‌شود. شرایط مرزی مستهلک‌کننده‌ی انرژی انتهای دور الگو نیز، همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر گردید، به‌عنوان یکی از متغیرهای مؤثر بر امواج صوتی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در الگوهایی که دارای چنین شرط مرزی می‌باشند از میراگرهای لایزمر^۱ [۱۸] استفاده می‌گردد. ضریب این میراگرها با توجه به خصوصیات مکانیک محیطی که به آن اعمال می‌شوند نظیر چگالی، مدول کشسانی و ضریب پواسون مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

۳. نتایج

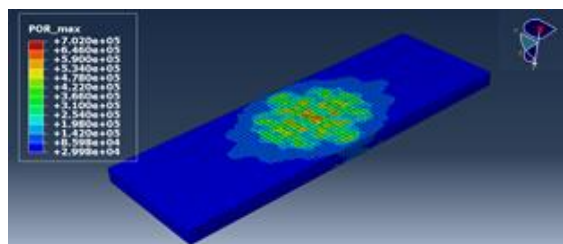
در این قسمت به بررسی اثر متغیرهای ذکر شده بر رفتار امواج صوتی بازتابی به سطح و عبوری از نخب پرداخته می‌شود. ابتدا اثر وجود نخب بر رفتار امواج صوتی بازتابی به سطح مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور یک بار الگو بدون نخب و بار دیگر به همراه نخب، تحت بار انفجار تحلیل می‌گردد و موج بازتابی به سطح برای دو الگوی مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرد. در هر دو الگو از خاک I (سنگ بسیار متراکم) برای هر چهار مقدار چگالی ذکر شده و در حالت خطی و کشسان استفاده می‌شود؛ به این معنی که زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی مشخص شده در جدول ۱ برای آن در نظر گرفته نمی‌شود (در ادامه اثر رفتار غیرخطی خاک نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد). هم‌چنین، شرط مرزی انتهای دور مستهلک‌کننده‌ی انرژی

^۱ Lysmer damper

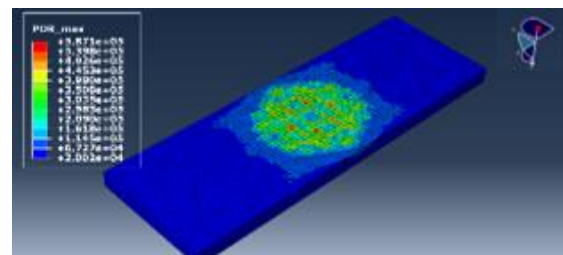
کاهش می‌یابد. اما به دلیل وجود نقب و گستردگی آن، امواج صوتی بازگشتی به سطح در محدوده‌ی وسیع‌تری بازتاب می‌یابند و توزیع فشار گسترده‌تری مشاهده می‌گردد.

رفتار غیرخطی خاک عامل دیگری است که اثر احتمالی آن بر رفتار امواج صوتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از تمامی خاک‌هایی که در جدول ۲ ارائه گردیده است استفاده می‌شود. این خاک‌ها یک‌بار به صورت خطی (بدون در نظر گرفتن زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی) و یک‌بار به عنوان یک ماده‌ی غیرخطی الگو می‌شود و نتایج حاصله با یکدیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرد. به دلیل تعدد الگوهای مورد بررسی برای مقایسه‌ی نتایج تنها به حداکثر مقادیر فشار صوتی بازتابی و عبوری از نقب اکتفا می‌گردد و نتایج حاصل از الگوهای شامل خاک با رفتار خطی و غیرخطی، در قالب نمودارهای میله‌ای ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است که در تمامی الگوهای این بخش، از میراگرهای لایزمر به عنوان شرط مرزی مستهلک‌کننده‌ی انرژی، که در انتهای دور پوشش بتنی و خاک اعمال می‌شوند، استفاده می‌گردد. در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب میزان حداکثر فشار امواج صوتی بازتابی به سطح و عبوری از نقب، برای الگوهای شامل خاک‌های خطی و غیرخطی و برای تمامی مقادیر چگالی خاک، در قالب نمودارهای میله‌ای، نشان داده شده است.

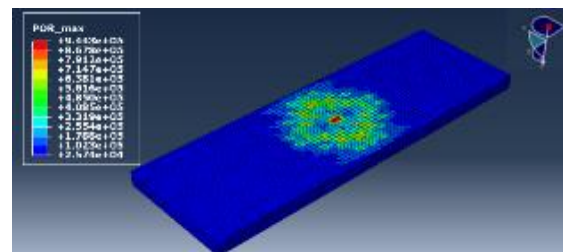
با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که با فرض رفتار غیرخطی خاک، در مقادیر متفاوت مدول کشسانی و چگالی، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در میزان فشار موج صوتی بازتابی به سطح ایجاد نمی‌گردد. این روند اما برای امواج صوتی عبوری از نقب به‌طور کامل صادق نمی‌باشد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد با کاهش مدول کشسانی خاک، تفاوت فشار میان الگو با خاک خطی و غیرخطی افزایش می‌یابد. این اختلاف فشار برای تمامی مقادیر چگالی سنگ کاملاً متراکم، خاک بسیار متراکم (خاک II) و خاک متوسط تا نرم (خاک III) کم‌تر از ۱ درصد، برای خاک متوسط تا نرم (خاک IV) بین ۲ تا ۶ درصد و برای خاک کاملاً نرم (خاک V) بین ۱۱ تا ۲۵ درصد می‌یابد. دلیل این افزایش اختلاف فشار را می‌توان کاهش سختی خاک و وارد شدن سریع‌تر خاک به



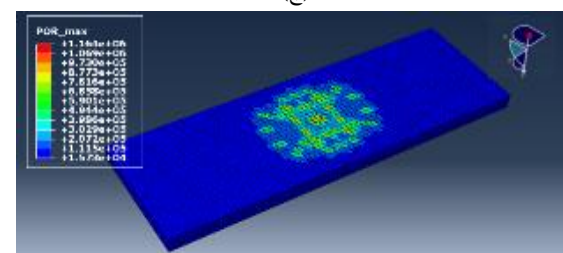
(الف)



(ب)



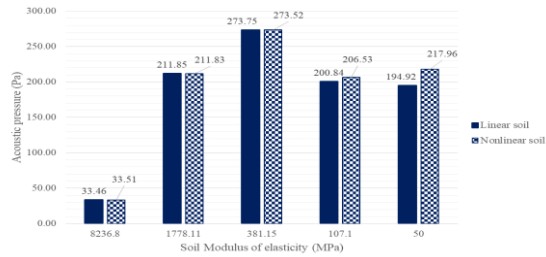
(ج)



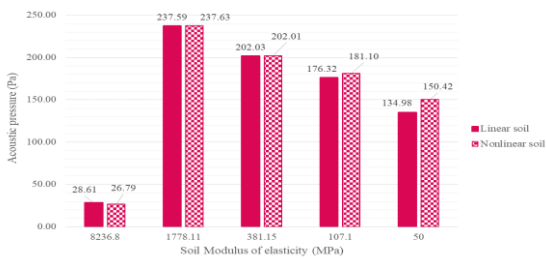
(د)

شکل ۵ توزیع حداکثر فشار موج صوتی بازتابی به سطح در پشت لایه‌ی هوای سطحی و در الگوی بدون نقب، خاک نوع I؛ (الف) ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ب) ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ج) ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (د) ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب.

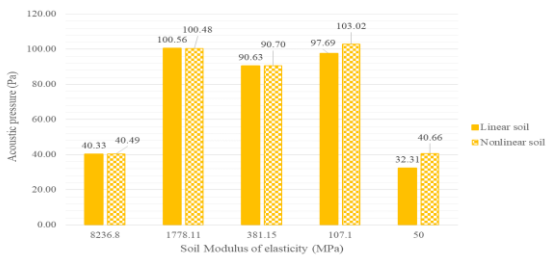
همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌گردد با اضافه نمودن نقب به الگو شامل توده‌ی سنگ بسیار متراکم (خاک I)، برای تمامی مقادیر چگالی خاک، میزان حداکثر فشار موج صوتی بازتابی به سطح کاهش و گستردگی محدوده‌های با فشار بالا (که با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند) افزایش می‌یابد. بخشی از انرژی عبوری از سطح که به نقب می‌رسد صرف ایجاد تغییر شکل و جابه‌جایی در دیواره‌ی نقب می‌گردد و به همین نسبت فشار موج صوتی بازتابی به سطح و مقدار حداکثر آن نیز



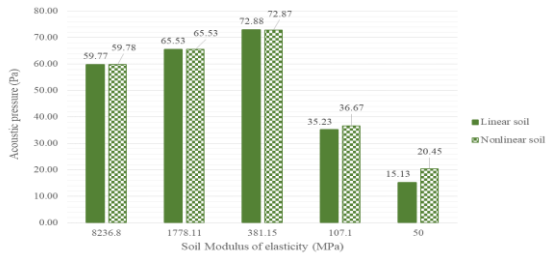
(الف)



(ب)



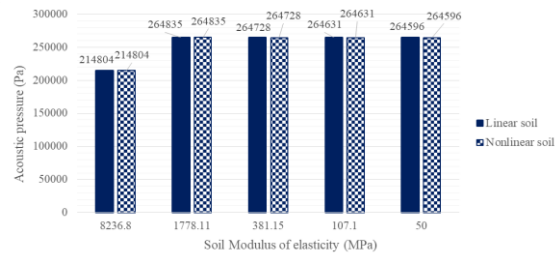
(ج)



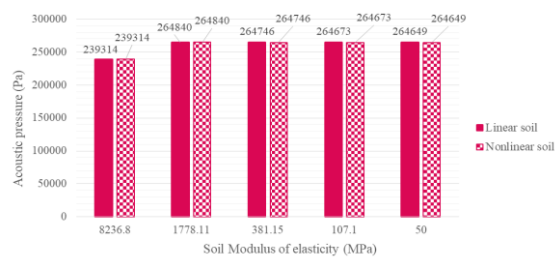
(د)

شکل ۷ حداکثر فشار موج صوتی عبوری از نقب برای الگوهای شامل خاک با رفتار خطی و غیرخطی؛ (الف) ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ب) ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ج) ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (د) ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب.

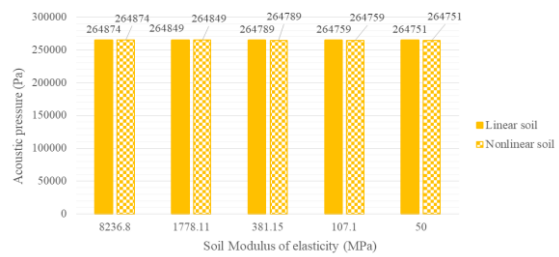
فشار موج بازتابی به سطح ندارد؛ در حالی که به دلیل مدفون بودن نقب و اندرکنش زیادی که بین پوشش نقب و توده‌ی خاک اطراف وجود دارد، اثر رفتار غیرخطی خاک بر امواج صوتی عبوری بیشتر می‌باشد. هدف از بررسی تأثیر رفتار غیرخطی خاک بر امواج صوتی بازتابی و عبوری، ارزیابی امکان استفاده از خاک با رفتار خطی، به‌منظور کاهش زمان تحلیل، می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده گردید، تنها برای خاک کاملاً نرم



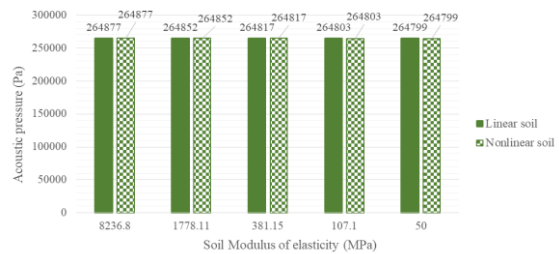
(الف)



(ب)



(ج)

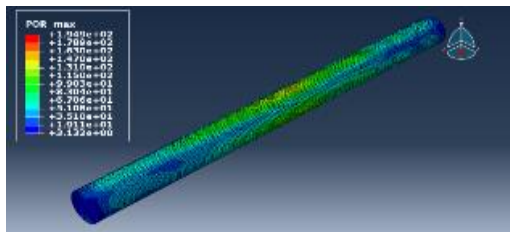


(د)

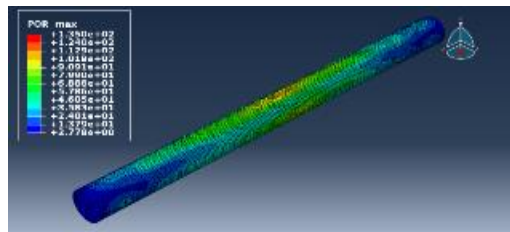
شکل ۶ حداکثر فشار موج صوتی بازتابی به سطح برای الگوهای شامل خاک با رفتار خطی و غیرخطی؛ (الف) ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ب) ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ج) ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (د) ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب.

محدوده‌ی غیرخطی دانست. هم‌چنین مشاهده می‌شود در الگوهای دارای اختلاف فشار، میزان فشار موج عبوری برای خاک غیرخطی بیش از خاک خطی می‌باشد. دلیل این امر، افزایش ارتعاشات ذرات خاک ناشی از ورود خاک به محدوده‌ی غیرخطی و کاهش سختی آن و متعاقباً، تقویت امواج عبوری از خاک می‌باشد. از طرفی به دلیل این که در رفت و برگشت امواج به سطح، استهلاک انرژی زیادی اتفاق می‌افتد، رفتار غیرخطی خاک تأثیر چندانی بر میزان

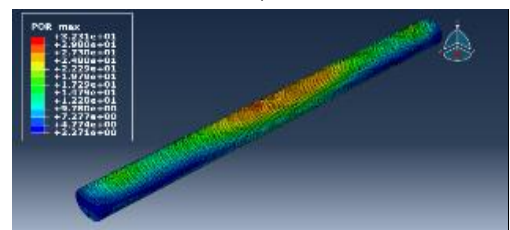
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، علی‌رغم این که برای تمامی مقادیر چگالی خاک ۷ میزان فشار موج صوتی عبوری از نقب برای خاک غیرخطی، در تمامی طول تحلیل، بیش از میزان فشار برای خاک خطی می‌باشد، اما روند تغییراتی که فشار موج صوتی عبوری در هر دو الگوی خطی و غیرخطی در طول تحلیل دارد، بسیار شبیه به یکدیگر می‌باشد. حال می‌بایست توزیع فشار در لایه‌ی هوای داخل نقب را نیز برای رفتار خطی و غیرخطی خاک مورد مقایسه و بررسی قرار داد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ توزیع فشار موج صوتی عبوری از نقب برای الگو شامل خاک ۷ با رفتار خطی و غیرخطی الگو می‌گردد.



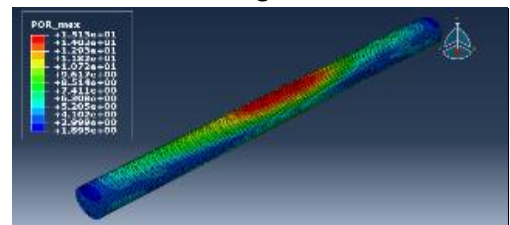
(الف)



(ب)



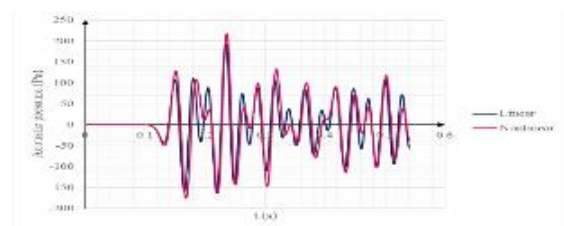
(ج)



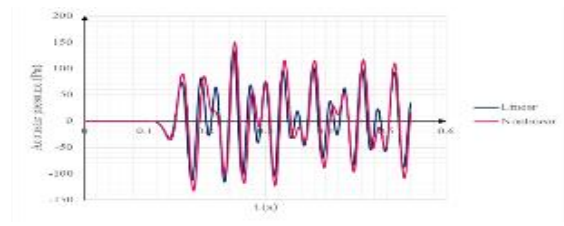
(د)

شکل ۹ توزیع حداکثر فشار موج صوتی عبوری از نقب بر لایه هوای داخلی برای الگوی شامل خاک ۷ با رفتار خطی؛ (الف) ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ب) ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ج) ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (د) ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب.

و برای موج صوتی عبوری می‌باشد که میزان فشار برای خاک خطی و غیرخطی تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. از این‌رو نیاز است که امکان استفاده از این نوع خاک نیز در حالت خطی مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس، علاوه بر مقدار حداکثر فشار موج، تغییرات آن در زمان و توزیع مقادیر حداکثر فشار نیز در حالت خطی و غیرخطی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در شکل ۸ می‌توان تاریخچه زمانی فشار موج صوتی عبوری از نقب را، در نقطه‌ی حداکثر فشار، برای چهار مقدار چگالی خاک بسیار نرم (خاک ۷) و در حالت خطی و غیرخطی مشاهده نمود.



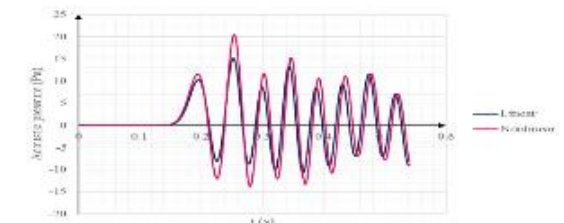
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

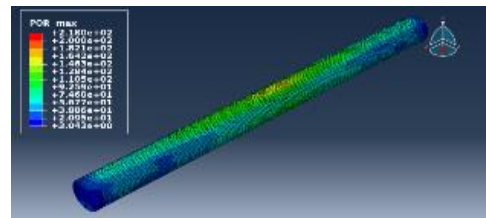
شکل ۸ تاریخچه زمانی فشار موج صوتی عبوری از نقب در نقاط حداکثر فشار برای الگو شامل خاک بسیار نرم با رفتار خطی و غیرخطی؛ (الف) ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ب) ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ج) ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (د) ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب.

مدول کشسانی و چگالی خاک، دیگر شاخصه‌ی تأثیرگذار بر رفتار امواج صوتی بازتابی به سطح و عبوری از نقب می‌باشد که در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور می‌توان از نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۶ و ۷ استفاده نمود. با توجه به شکل ۶، می‌توان مشاهده نمود که برای تمامی مقادیر مدول کشسانی خاک، با افزایش چگالی خاک، میزان فشار موج صوتی بازتابی به سطح افزایش می‌یابد. این روند افزایش برای خاک I (سنگ بسیار متراکم) نمود بیش‌تری نسبت به سایر خاک‌ها دارد. دلیل این امر را می‌توان در اثرات متناقض افزایش چگالی خاک بر فشار موج بازتابی دانست که در قسمت بعد در رابطه با آن توضیحات بیش‌تری ارائه می‌گردد.

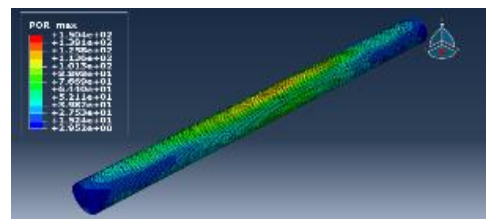
از دیگر نکاتی که می‌توان در شکل ۶ مشاهده نمود، کاهش کلی فشار امواج صوتی بازتابی با کاهش مدول کشسانی خاک و برای یک مقدار ثابت چگالی خاک می‌باشد. دو مورد استثنا در این روند دیده می‌شود که مربوط به مقادیر چگالی خاک ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و برای خاک I می‌باشد. با افزایش چگالی خاک، این ناهماهنگی نیز برطرف می‌شود و در چگالی‌های خاک ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب مشاهده می‌شود که به صورت مطلق با کاهش مدول کشسانی خاک، میزان فشار موج صوتی بازتابی به سطح نیز کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار نیز همان تأثیرات متناقض افزایش مدول کشسانی و چگالی بر میزان فشار موج صوتی بازتابی می‌باشد که با افزایش سختی خاک از یک طرف ضریب بازتاب میان خاک و هوا افزایش می‌یابد و از طرفی دیگر، میزان ارتعاشات خاک و در نتیجه تقویت امواج عبوری از آن دچار کاهش می‌گردد که در این زمینه در قست بعد توضیحات بیش‌تری ارائه می‌گردد.

اولین نکته‌ی قابل توجه در شکل ۷، تغییر روند فشار امواج صوتی عبوری از نقب با تغییر چگالی خاک، در مقادیر متفاوت مدول کشسانی خاک می‌باشد. در الگوی حاوی خاک I (با مدول کشسانی ۸۲۳۶/۸ مگاپاسکال) مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی خاک، حداکثر فشار موج صوتی عبوری از نقب افزایش می‌یابد. اما این روند نه تنها

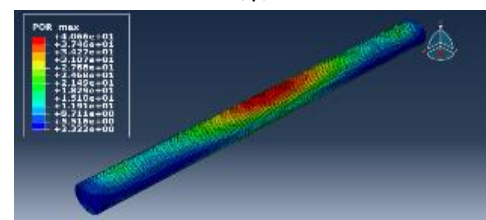
با مقایسه‌ی شکل‌های ۹ و ۱۰ که به ترتیب نشان دهنده‌ی توزیع فشار صوتی عبوری از نقب برای خاک ۷ با رفتار خطی و غیرخطی می‌باشند، می‌توان مشاهده نمود که اگر چه رفتار غیرخطی خاک باعث اختلاف در میزان حداکثر فشار می‌گردد، اما برای تمامی مقادیر چگالی این نوع خاک، الگو و نحوه‌ی توزیع فشار صوتی، با تقریب خوبی ثابت می‌باشد. از این‌رو با توجه به شکل‌های ۶ تا ۱۰ می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که حتی خاک ۷ را، که دارای کم‌ترین میزان سختی می‌باشد، می‌توان به‌عنوان یک ماده‌ی خطی در نظر گرفت و در الگوهای مختلف به‌کار برد.



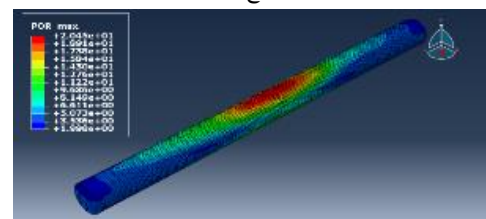
(الف)



(ب)



(ج)



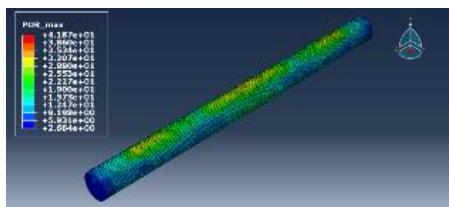
(د)

شکل ۱۰ توزیع حداکثر فشار موج صوتی عبوری از نقب بر لایه‌ی هوای داخلی برای الگو شامل خاک ۷ با رفتار غیرخطی؛ (الف) ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ب) ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ج) ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (د) ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب.

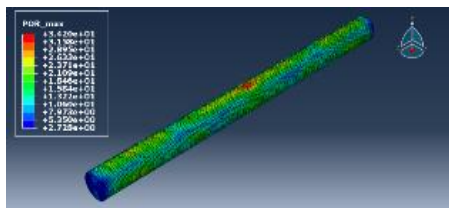
اجازه‌ی بازگشت این امواج به دستگاه را ندهند. حال اثر این شرط مرزی بر رفتار امواج صوتی بازتابی و عبوری اطراف نقب، در هر سه راستا اعمال می‌گردند تا امواج منتقل شده به مرزهای دور دستگاه را مستهلک سازند و مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، ابتدا توزیع فشار موج صوتی بازتابی برای خاک I و در هر چهار مقدار چگالی خاک و در حالتی که میراگرها به الگوی اعمال گردیده است، در شکل ۱۱ ارائه می‌گردد و با شکل ۴، که مربوط به الگوی فاقد شرط مرزی مستهلک‌کننده‌ی انرژی است، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. سپس در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ همین مقایسه برای هوای داخل نقب و موج صوتی عبوری از آن انجام می‌گیرد.

برای سایر الگوها، که دارای خاک با سختی کم‌تر می‌باشند، مشاهده نمی‌گردد بلکه عکس این روند صادق می‌باشد. به‌طور مثال در الگوی شامل خاک II (با مدول کشسانی ۱۷۷۸/۱۱ مگاپاسکال)، کاهش چگالی خاک به‌صورت نسبی و در سایر الگوها به‌صورت مطلق، با کاهش حداکثر فشار موج صوتی عبوری همراه می‌باشد.

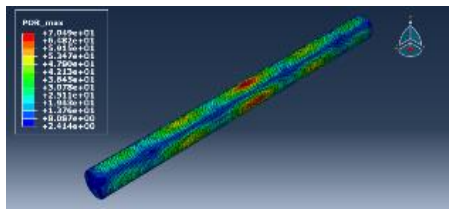
یکی دیگر از موارد مورد بررسی در این پژوهش سازوکار استهلاک انرژی در انتهای دور الگو و تأثیر آن بر رفتار امواج صوتی می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، در الگوی اخیر از میراگرهای لایزر به‌عنوان شرط مرزی مستهلک‌کننده‌ی انرژی استفاده گردید. این میراگرها در راستای طولی الگو و در انتهای دور توده‌ی خاک و پوشش



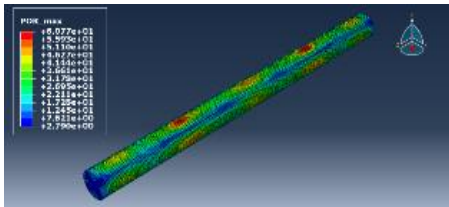
(الف)



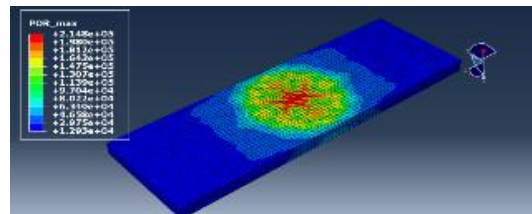
(ب)



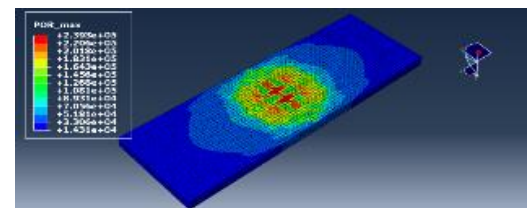
(ج)



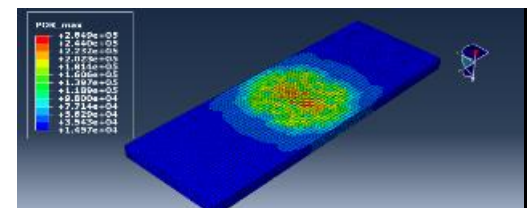
(د)



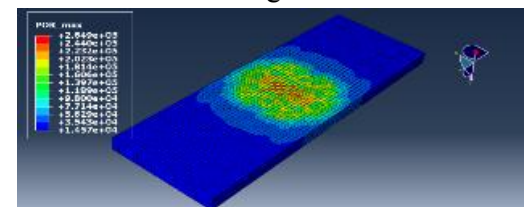
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

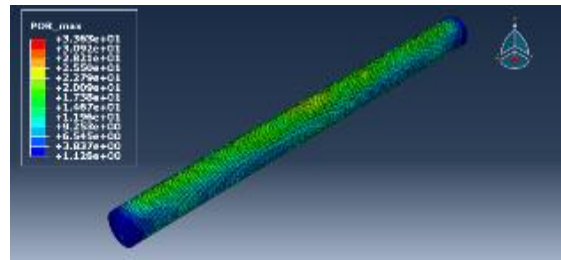
شکل ۱۲ توزیع حداکثر فشار موج صوتی عبوری از نقب بر لایه‌ی هوای داخل نقب برای الگوی شامل خاک I و فاقد شرط مرزی انتهایی دور؛ (الف) ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ب) ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ج) ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (د) ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب.

شکل ۱۱ توزیع حداکثر فشار موج صوتی بازتابی در پشت لایه‌ی هوای سطحی برای الگوی شامل خاک I و شرط مرزی انتهایی دور؛ (الف) ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ب) ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ج) ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (د) ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب.

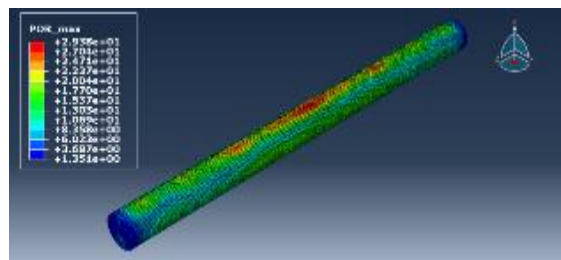
هم‌چنین نکته‌ی دیگری که در این رابطه می‌بایست در نظر گرفته شود، ماهیت موج بازتابی به سطح می‌باشد. درصد بسیار زیاد مقادیر فشار موج صوتی بازتابی به سطح که در تمامی شکل‌ها نشان داده شده است، مربوط به بازتاب موج انفجار برخوردی به سطح می‌باشد و میزان موج بازتابی از نقب درصد کمی از این مقدار فشار را به خود اختصاص داده است. اگر چه که اعمال میراگرهای لایزمر تأثیر چندانی بر میزان فشار موج صوتی بازتابی نداشته‌اند، اما تأثیر آن بر امواج صوتی عبوری از نقب بسیار واضح می‌باشد. با مقایسه‌ی شکل‌های ۱۲ و ۱۳ می‌توان مشاهده نمود که اعمال شرط مرزی مستهلک‌کننده‌ی انرژی در تمامی مقادیر چگالی خاک I باعث کاهش میزان فشار موج صوتی عبوری از نقب گردیده است. دلیل اصلی این امر، استهلاک انرژی ناشی از ارتعاش پوشش بتنی اطراف نقب می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر گردید یکی از عوامل اصلی تقویت امواج صوتی عبوری از نقب، ارتعاشات ایجادشده در محیط خاک و پوشش بتنی اطراف نقب می‌باشد که با اعمال میراگرهای لایزمر، انرژی این ارتعاشات مستهلک شده و از دستگاه خارج می‌گردد.

۴. بحث

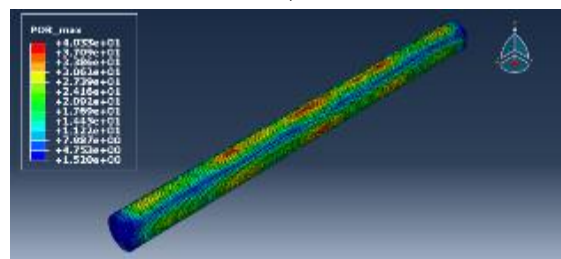
در قسمت پیشین اثر اضافه نمودن سازه‌ی زیرزمینی، رفتار غیرخطی خاک، چگالی و مدول کشسانی خاک و سازوکار استهلاک انرژی، بر رفتار امواج صوتی در قالب منحنی‌ها، نمودارها و هم‌چنین توزیع مقادیر حداکثر فشار امواج صوتی ارائه گردید. در این قسمت به تفسیر این نتایج پرداخته می‌شود. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، با اضافه شدن نقب و خروج انرژی از سامانه توسط پوشش نقب، فشار امواج صوتی بازتابی به سطح کاهش قابل توجهی را تجربه نمود. از طرفی دیگر مشاهده شد که به دلیل کم بودن بار وارده به سامانه، ناشی از انفجار، نیازی به الگوسازی غیرخطی خاک احساس نشد و الگوسازی خاک با رفتار خطی، برای این الگو خاص کفایت می‌نمود. نتایج مربوط به بررسی اثر چگالی و مدول کشسانی خاک بر رفتار امواج صوتی اما نیاز به تحلیل و موشکافی بیشتر دارد. همان‌طور که مشاهده شد برای تمامی مقادیر مدول



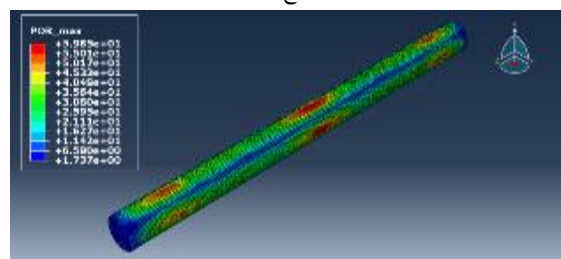
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۳ توزیع حداکثر فشار موج صوتی عبوری از نقب بر لایه‌ی هوای داخل نقب برای الگوی شامل خاک I و شرط مرزی انتهایی دور؛ (الف) ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ب) ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (ج) ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، (د) ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب.

با مقایسه‌ی شکل‌های ۴ و ۱۱، می‌توان مشاهده نمود که با اضافه نمودن شرط مرزی مستهلک‌کننده‌ی انرژی در انتهای دور الگو، تفاوت چندانی در میزان فشار موج صوتی بازتابی به سطح مشاهده نمی‌گردد. دلیل این امر را می‌توان فاصله‌ی زیاد نقب از سطح زمین دانست که باعث می‌شود موج برخوردی به دیواره‌ی پوشش نقب در مسیر بازگشت مستهلک شود و در عمل تفاوت چندانی در سطح فشار موج بازتابی مشاهده نشود.

می‌باشد. در خاک‌های نرم‌تر و با چگالی کم‌تر، به دلیل غلبه‌ی اثر تقویتی افزایش ارتعاشات بر اثر کاهش ضریب بازتاب بین خاک و هوا، مشاهده می‌شود که الگوی حاوی خاک I، از فشار صوتی بازتابی کم‌تری برخوردار می‌باشد. اما با افزایش چگالی خاک، اثر تقویتی ارتعاش خاک بر امواج صوتی بازتاب کاهش می‌یابد و در مقادیر چگالی بالاتر خاک، این افزایش بازتاب ناشی از افزایش ضریب بازتاب بین خاک و هوا باعث می‌شود که الگوی حاوی خاک I، از فشار موج صوتی بازتابی بیش‌تری نسبت به سایر الگوها برخوردار گردد. از قبل مشخص است که با کاهش چگالی و سختی خاک، میزان ارتعاشات ایجاد شده در دستگاه افزایش می‌یابد و افزایش ارتعاشات هر کدام از اجزا دستگاه، به معنی تقویت امواج عبوری از دستگاه می‌باشد. از طرفی دیگر، با کاهش چگالی و سختی (مدول کشسانی) خاک، میزان ضریب بازتاب میان خاک و بتن پوشش نقب افزایش می‌یابد. افزایش ضریب بازتاب به این معنی می‌باشد که میزان موج عبوی از پوشش نقب دچار کاهش می‌گردد.

اثر تغییر در چگالی و مدول کشسانی خاک بر امواج عبوری از نقب نیز برای خاک‌های مختلف یکسان نمی‌باشد. در الگوی شامل خاک I به دلیل سختی زیاد خاک، با کاهش چگالی، تغییرات بسیار کمی در افزایش ارتعاشات دستگاه و به تبع تقویت موج صوتی عبوری از نقب ایجاد می‌گردد. از طرفی دیگر، برای این نوع خاک کاهش چگالی با افزایش ضریب بازتاب میان خاک و بتن پوشش و متعاقباً کاهش حداکثر فشار موج عبوری از نقب همراه می‌باشد. اما در سایر الگوها، به دلیل سختی کم‌تر خاک، اثر عامل تقویتی افزایش ارتعاشات دستگاه بسیار بیش‌تر از الگوی حاوی خاک I می‌باشد. این عامل تا جایی تأثیرگذار می‌باشد که مشاهده می‌شود برای الگوی دارای خاک III (با مدول کشسانی ۳۸۱/۱۵ مگاپاسکال) نه تنها با افزایش چگالی خاک، حداکثر فشار موج عبوری از نقب کاهش می‌یابد بلکه برای مقدار ثابت چگالی خاک، الگوی حاوی خاک III نسبت به الگوهای دیگر دارای بیش‌ترین مقدار فشار موج صوتی عبوری از نقب می‌باشد. دلیل حداکثر بودن فشار موج عبوری از نقب در الگوی اخیر (الگوی با خاک III) برای اکثر مقادیر چگالی خاک، حتی

کشسانی خاک، با افزایش چگالی خاک، میزان فشار موج صوتی بازتابی به سطح افزایش می‌یابد. این روند افزایش برای خاک I (سنگ بسیار متراکم) نمود بیش‌تری نسبت به سایر خاک‌ها دارد. دلیل این امر را می‌توان در اثرات متناقض افزایش چگالی خاک بر فشار موج بازتابی دانست. با افزایش چگالی خاک، از یک طرف ضریب بازتاب میان خاک و هوای سطحی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی افزایش میزان فشار موج بازتابی می‌باشد و از طرف دیگر، میزان ارتعاشات ناشی از انفجار در سطح خاک کاهش می‌یابد. این ارتعاشات خود عامل تغییر در میزان فشار موج صوتی می‌باشد. هر چه سختی و پیوستگی الگو کم‌تر باشد، ارتعاشات ذرات آن بیش‌تر و متعاقباً موج عبوری از آن محیط تقویت می‌گردد و فشار آن افزایش می‌یابد. اما در خاک I که دارای سختی بسیار زیادی می‌باشد، عملاً ارتعاشات خاک با مقادیر چگالی متفاوت بر میزان موج بازتابی به سطح تأثیر چندانی ندارد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در مقادیر کم چگالی خاک (۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، میزان حداکثر فشار موج بازتابی برای الگوی حاوی خاک I، کم‌تر از سایر الگوهای حاوی خاک‌های با سختی کم‌تر می‌باشد. اما با افزایش چگالی خاک و متعاقب آن، افزایش نسبی ضریب بازتاب میان خاک و هوا، مشاهده می‌شود که حداکثر فشار بازتابی برای الگوی حاوی سنگ متراکم با نرخ بیش‌تری نسبت به سایر الگوها، که حاوی خاک نرم‌تری هستند، افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که برای مقادیر چگالی خاک ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب مشاهده می‌شود که حداکثر فشار بازتابی برای خاک I بیش‌تر از سایر الگوها می‌باشد. این روند افزایش فشار موج بازتابی با افزایش چگالی خاک، در سایر الگوهای دارای خاک نرم‌تر (مدول کشسانی کم‌تر) نیز دیده می‌شود، اما شدت این افزایش به مراتب کم‌تر از خاک I می‌باشد. در این الگوها به دلیل کاهش سختی خاک، عامل ارتعاش خاک نیز بر میزان فشار موج بازتابی اثرگذار می‌باشد و با اثر معکوسی که نسبت به اثر ضریب بازتاب میان خاک و هوا دارد، باعث می‌شود که تغییرات فشار موج بازتابی در خاک‌های نرم‌تر با نرخ کم‌تری اتفاق افتد. رفتار امواج بازتابی به سطح با تغییر در مدول کشسانی خاک نیز تابع این رفتار متناقض

الگو اعمال شد، در صورتی که در منبع [۸] با استفاده از روش سی‌ان‌دابلویایی پی، بار انفجار به الگو اعمال می‌شود. از دیگر تفاوت‌ها می‌توان به فشار موج صوتی بازتابی به سطح و میزان آن اشاره نمود. در پژوهش پیش‌رو، فشار موج بازتابی به سطح نشان داده شده در نتایج، شامل تمامی امواج بازتابی به سطح می‌باشد که امواج بازتابی از سطح خاک را نیز شامل می‌شود. اما در منبع [۸] تنها امواج بازتابی از سطح نقب مدفون در خاک لحاظ شده است. مقادیر چگالی خاک نیز از دیگر تفاوت‌های موجود میان نتایج این دو پژوهش می‌باشد. در مقاله‌ی پیش‌رو، برای هر مقدار مدول کشسانی خاک، چهار مقدار چگالی در نظر گرفته شد تا در کنار بررسی اثر سختی خاک، اثر چگالی خاک نیز بر رفتار امواج صوتی مورد بررسی قرار گیرد. همین یکسان‌نبودن چگالی خاک نیز باعث می‌شود مقایسه‌ی نتایج دو پژوهش اندکی دشوار گردد. اما عامل اصلی ایجاد تفاوت در نتایج این دو پژوهش، عمق دفن نقب می‌باشد. در تحقیق پیش‌رو فاصله‌ی مرکز سطح مقطع نقب تا سطح زمین برابر با ۳۰ متر می‌باشد در صورتی که در منبع [۸]، این فاصله ۶۲۵ متر در نظر گرفته شده است. در پژوهش ذکر شده، دلیل بیش‌تر شدن میزان حداکثر فشار موج بازتابی به سطح برای الگوی شامل خاک نوع IV نسبت به سایر الگوها، زیاد بودن میزان ضریب بازتاب میان این نوع خاک و بتن نقب، نسبت به سایر خاک‌ها عنوان شده است. حال با افزایش قابل توجه عمق دفن نقب در پژوهش پیش‌رو، مشاهده می‌شود که به دلیل فاصله‌ی زیاد نقب و سطح خاک، عملاً ضریب بازتاب میان خاک و بتن پوشش نقب اثر چندانی بر میزان فشار امواج بازتابی به سطح ندارد و بیش‌تر امواج بازتابی از سطح نقب در مسیر بازگشت به سطح زمین مستهلک می‌شوند، در صورتی که برای عمق دفن کم‌تر نقب، میزان استهلاک امواج بازتابی بسیار کم‌تر می‌باشد و ضریب بازتاب میان خاک و بتن بر رفتار امواج بازتابی به سطح و میزان فشار آن‌ها، تأثیر بیش‌تری دارد. در رابطه با موج عبوری از نقب نیز مشاهده می‌شود که در پژوهش پیش‌رو، اگر چه که برای مقادیر مختلف چگالی خاک، روند ثابتی وجود ندارد، اما در هیچ‌کدام از مقادیر چگالی خاک روندی مشابه با منبع [۸] مشاهده نمی‌شود. در این

نسبت به خاک‌های با سختی کم‌تر نظیر خاک IV (با مدول کشسانی ۱۰۷/۱ مگاپاسکال) و خاک V (با مدول کشسانی ۵۰ مگاپاسکال)، استهلاک موج عبوری از خاک‌های با سختی بسیار کم می‌باشد. سختی بسیار کم خاک، باعث می‌شود که مقداری از انرژی موج عبوری از خاک، صرف ایجاد تغییر شکل و جابه‌جایی ذرات خاک گردد و متعاقباً موج عبوری از نقب مستهلک‌شده و دارای فشار کم‌تری گردد. حال اگر سختی خاک بسیار کاهش یابد، این اثر مستهلک‌کننده‌ی خاک نرم بر اثر تقویتی افزایش ارتعاشات خاک سایه می‌اندازد و باعث می‌شود که کاهش زیاد مدول کشسانی خاک، منجر به کاهش حداکثر فشار موج عبوری از نقب گردد. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص می‌باشد، برای مقادیر متفاوت چگالی خاک، با کاهش مدول کشسانی خاک، در ابتدا یک روند افزایشی تا خاک III دیده می‌شود، اما با کاهش بیش‌تر مدول کشسانی خاک، روند افزایش فشار موج عبوری متوقف می‌گردد و به یک روند کاهشی تبدیل می‌شود. در منبع [۸] نیز اثر تغییرات چگالی و مدول کشسانی خاک بر رفتار امواج صوتی بازتابی به سطح و عبوری از نقب، تحت اثر بار انفجار، مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش چهار نوع خاک با مدول کشسانی مشابه با خاک‌های نوع I تا IV، اما با مقادیر چگالی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بر این اساس، با کاهش سختی خاک، حداکثر فشار موج عبوری از نقب و حداکثر فشار موج بازتابی به سطح به صورت کلی کاهش می‌یابد. تنها استثنا مربوط به الگوی شامل خاک IV می‌باشد که از روند کلی پیروی نمی‌کند و میزان حداکثر موج بازتابی به سطح برای آن از سایر الگوها بیش‌تر می‌باشد. در صورتی که براساس نتایج حاصله در پژوهش پیش‌رو نشان داده شد که روند تغییرات حداکثر مقدار فشار امواج صوتی بازتابی و عبوری با تغییر در مدول کشسانی خاک، در مقادیر مختلف چگالی خاک، ثابت نمی‌باشد. در رابطه با تفاوت نتایج حاصله در پژوهش پیش‌رو و منبع [۸] می‌توان چندین عامل را ذکر نمود. اولین تفاوت در میزان بار انفجار و نحوه‌ی الگوسازی انفجار در نرم‌افزار آباکوس می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد در این تحقیق تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار در قالب روش موج برخوردی به

فشار موج صوتی بازتابی به سطح و میزان فشار موج عبوری از نقب به میزان اندکی تحت تأثیر رفتار غیرخطی خاک قرار داشتند، به گونه‌ای که می‌توان به منظور کاهش زمان تحلیل، با توجه به میزان بار وارده ناشی از انفجار، از خاک با رفتار خطی استفاده نمود.

۴) با تغییر در سختی و استحکام خاک، از یک طرف میزان ارتعاشات ذرات خاک و از طرف دیگر، ضریب بازتاب میان خاک و هوا و خاک و بتن پوشش نقب تغییر می‌کند. تغییر در هر دو عامل ذکر شده، اثرات متناقضی بر رفتار امواج صوتی عبوری از نقب و بازتابی به سطح دارد. از این رو نیاز است که در بررسی اثر سختی و استحکام خاک بر رفتار امواج صوتی، این اثرات متناقض مورد توجه و الگوهای بیش‌تری از خاک مورد بررسی قرار گیرند.

۶. تقدیر و تشکر

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه ارومیه تقدیر و تشکر می‌گردد.

فهرست منابع

- [1] A. Dhale, F. Khan, "Application of acoustic emission technique in various field," International Journal of Engineering Research and Development, vol. 7, no. 10, pp. 80-85, 2013.
- [2] Z. Kang, Y. Yu, H. Wen, "Damage evolution of rock and acoustic emission study about deepdiversion tunnel in the pxcavation process," Advanced Materials Research, vol. 366, pp. 243-246, 2012.
- [3] W. Cheng, W. Wang, S. Huang, P. Ma, "Acoustic emission monitoring of rockbursts during TBM-excavated headracetunneling at Jinping II hydropower station," Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, vol. 5, no. 6, pp. 486-494, 2013.
- [4] M. Hu, H. Zhou, Y. Zhang, C. Zhang, Y. Gao, D. Hu, J. Lu, "Acoustic emission monitoring on damage evolution of surrounding rock during headrace tunnel excavation by TBM," European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol. 23, no. 10, pp. 1248-1264, 2019.
- [5] A. Bloodworth, Z. Zhou, "Acoustic emission testing of fibre reinforced concrete tunnel lining samples," 7th International symposium on sprayed- Modern Use of Wet Mix Sprayed

پژوهش دلیل روند نزولی حداکثر فشار موج عبوری از نقب با کاهش مدول کشسانی خاک، استهلاک زیادتر انرژی با کاهش سختی خاک عنوان شده است. اما در پژوهش پیش رو، همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر گردید، کاهش مقدار مدول کشسانی و چگالی خاک، دارای اثرات متناقضی می‌باشد که استهلاک بیش‌تر امواج عبوری نیز جزئی از آن می‌باشد و افزایش ارتعاشات ذرات خاک و تقویت موج عبوری از خاک و هم‌چنین تغییر در میزان ضریب بازتاب میان خاک و بتن نیز از دیگر آثار کاهش سختی خاک می‌باشد که در پژوهش پیش‌رو به تفصیل برای مقادیر متفاوت چگالی و مدول کشسانی خاک، این آثار متناقض مورد بررسی قرار گرفت.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی خصوصیات و مشخصات مکانیکی یک دستگاه سازه‌ی زیرزمینی بر امواج صوتی ارسالی به آن پرداخته شد. این دستگاه، شامل سازه‌ی زیرزمینی (در این جا نقب)، توده‌ی خاک اطراف سازه، هوای روی سطح و هوای درون سازه می‌باشد که با ارسال امواج صوتی به آن و تحلیل امواج صوتی بازتابی به سطح و عبوری از نقب، می‌توان اقداماتی در رابطه با مکان‌یابی و پایش سلامت سازه‌ی زیرزمینی انجام داد. از این رو نیاز است که تأثیر شاخصه‌های مکانیکی اجزایی از این دستگاه که با امواج صوتی ارسالی اندرکنش دارند، بر این امواج مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله تأثیر وجود نقب، رفتار غیرخطی خاک، خصوصیات مکانیکی خاک نظیر مدول کشسانی و چگالی و اعمال شرط مرزی مستهلک‌کننده‌ی انرژی، بر امواج صوتی بازتابی به سطح و عبوری از نقب مورد بررسی قرار گرفت و موارد زیر مشاهده گردید.

- ۱) با اضافه نمودن نقب به الگو، سطح فشار بازتابی به سطح و گستردگی مناطق دارای فشار زیاد کاهش یافت.
- ۲) با در نظر گرفتن شرط مرزی مستهلک‌کننده‌ی انرژی در میزان فشار موج صوتی بازتابی به سطح تفاوت چندانی ایجاد نمی‌گردد، اما فشار موج صوتی عبوری از نقب کاهش می‌یابد.
- ۳) برای اکثریت انواع خاک مورد بررسی در این مقاله،

- emission characteristics of sandstone rockburst with different moisture contents,"
- surface wave speed measurements," ISMA2014 (including USD2014): The International Symposium on Musical Acoustics, pp. 1991-2006, 2014.
- [14] B. Han, et al., "3D dynamic soil-structure interaction in layered, fluid-saturated, poroelastic half-space," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 120, pp. 113-126, 2019.
- [15] Z.F. Meng, et al., "Study on the pressure characteristics of shock wave propagating across multilayer structures during underwater explosion," *Shock and Vibration*, vol. 2, pp. 1-19, 2019.
- [16] U.S. Department of the Army, "Structures to resist the effects of accidental explosions," *Technical Manual*, vol. 5, pp. 1300, 1990.
- [17] Documentation, Abaqus, and User Manual, "Version 6.12." Dassault Systemes, 2010.
- [18] Building and Housing Research Center (BHRC), *Standard for seismic design of buildings: Standard No. 2800*, 3rd edition, pp. 19, 2010.
- [19] J. Lysmer, L. Kuhlemeyer, "Finite dynamic model for infinite media," *Eng. Mech.*, vol. 95, no. 4, pp. 859-877, 1969.
- Concrete for Underground Support, Oslo: Tekna, pp. 98-11, 2014.
- [6] X. Sun, H. Xu, L. ZHENg, M. He W. Gong, "An experimental investigation on acoustic
- [7] *Technological Sciences*, vol. 59, no. 10, pp. 1549-1558, 2016.
- [8] P. Safa, M.H. Taghavi Parsa, "Analysis of the surface explosion effects on underground tunnels," *Passive Defense Quarterly*, vol. 8, no. 1, pp. 1-12, 2017, (In Persian).
- [9] S.R. Massah, M.M. Torabipour, "Effects of acoustic waves on buried tunnel structures under an impact load," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. vol. 16, no. 10, pp. 175003, 2016.
- [10] R. Long, M. Lowe, P. Cawley, "Attenuation characteristics of the fundamental modes that propagate in buried iron water pipes," *Ultrasonics*, vol. 41, no. 7, pp. 509-519, 2003.
- [11] R. Long, et al. "The effect of soil properties on acoustic wave propagation in buried iron water pipes," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, vol. 615, no. 1, pp. 1310-1317, 2002.
- [12] R. Jones, "In-situ measurement of the dynamic properties of soil by vibration methods," *Geotechnique*, vol. 8, no. 1, pp. 1-21, 1958.
- [13] M. Iodice, E. Rustighi, J. Muggleton, "Comparison of soil excitation methods for

(Research Article)
Study of the acoustic wave behavior sent to a buried tunnel

A.H. Roohezamin¹, M. Kharghani², M. Hajihassani^{*3}

1. Faculty of Civil Engineering, KN Toosi University of Technology

2. Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch

3. Faculty of Engineering, Urmia University

Abstract

In the present study, by sending acoustic waves to an underground tunnel, as a free air explosion, and measuring the pressure level of the reflected waves to the surface and the transmitting waves to the interior space of the structure, the effects of the parameters, such as tunnel existence, soil nonlinear behavior, energy dissipated boundary conditions, soil density and modulus of elasticity are analyzed. Based on the results, it is observed that in the presence of the tunnel and by assigning the wave dissipated boundary conditions to the far ends of the model, the pressure level of the acoustic wave is reduced. Furthermore, it is resulted that the effect of the soil nonlinearity is negligible. It is illustrated that for the softer soils, although the energy dissipation is increased, because of the growth in vibrations due to the lack of soil solidity, the transmitted waves are amplified. Moreover, it is shown that the pressure level for the stiffer soils is more sensitive to the soil density variation than the softer ones. By comparing the present results with results extracted from the similar papers, it is concluded that the way the explosion modeled, the geometric properties of the tunnel section and the most important of all, the buried depth of the tunnel have significant effects on the behavior and trend of the reflected and transmitted acoustic waves for different models of soil around the tunnel.

Keywords: Acoustic wave pressure, Reflected and transmitted wave, Free air explosion, Underground structures.

pp. 104-117 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: m.hajihassani@urmia.ac.ir