



بررسی اثر ابعاد حفرات زیرزمینی بر میدان امواج در شبیه سازی عددی آزمایش لرزه ای چند

ایستگاهی امواج سطحی

حسین رهنما^۱، محمد مهدی مرادی^۲، محمود راسخ^۳، سهراب میراثی^۴

۱- استادیار گروه عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران (Rahnema@sutech.ac.ir)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک گروه عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران (Mm.moradi@sutech.ac.ir)

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک گروه عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران (Ma.Rasekh@sutech.ac.ir)

۴- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرکرد، شهرکرد، ایران (S.mirasi@sutech.ac.ir)

چکیده

شناخت مشخصات زیرسطحی خاک یک پروژه و شناسایی ناهنجاری زیر سطحی از جمله وجود لایه ضعیف و نرم، حفره و یا وجود یک عامل خارجی نهفته در خاک از مهمترین بخش یک طرح مهندسی می باشد. با توجه به روش های گوناگون شناسایی ناهنجاری های زیرسطحی، در این مقاله از روش تحلیل چند ایستگاهی امواج لرزه ای سطحی استفاده شده است که بسیار سریع، راحت و بدون نیاز به حفاری و تخریب محیط زیست می باشد. در این راستا با شبیه سازی در محیط نرم افزار اجزا محدود آباکوس^۱ و بهره گیری از کدهای نوشته شده در متلب، تاثیر وجود حفرات زیرزمینی و ابعاد آن ها مورد ارزیابی واقع شده است. حفره ها به طول های متفاوت در زیر سطح زمین قرار گرفته اند و میدان امواج در فضای زمان-فاصله، در فضای فرکانس-فاصله و منحنی پراکندگی و نمودار ها در فضای فرکانس-فاصله بعد از فیلتر بررسی شده اند. نتایج نشان دادند که در محل قرارگیری حفره، میدان امواج در فضای زمان-فاصله دچار اغتشاش و شکست می گردد که این موضوع در فضای فرکانس-فاصله موجب افزایش انرژی و متمرکز شدن انرژی در ناحیه قرارگیری حفره شده است.

کلمات کلیدی

- حفرات زیرزمینی
- آزمایش لرزه ای چند ایستگاهی
- میدان امواج
- فرکانس
- ناهنجاری زیرسطحی

¹ ABAQUS

Investigation of the effect of underground cavities dimensions on the wave field in numerical simulation of multi-station surface wave seismic experiments

Hossein Rahnema¹, Mohammad Mehdi Moradi², Mahmood Rasekh³, Sohrab Mirasi⁴

1-- Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz,
Iran.Rahnema@sutech.ac.ir

2- Master of Science Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of
Technology, Mm.moradi@sutech.ac.ir

3- - Master of Science Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of
Technology, Ma.Rasekh@sutech.ac.ir

4- Faculty Member, Department of Civil Engineering, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran, S.mirasi@sutech.ac.ir

KEYWORDS

- Cavity
- Multi-channel Seismic test
- Wave field
- Frequency
- Subsurface anomalies

ABSTRACT

Recognizing the subsurface characteristics of a project and identifying subsurface anomalies such as the presence of a weak and soft layer, cavities or the presence of an external factor embedded in the soil is the most important design of an engineering. Due to various methods for identifying subsurface anomalies, in this paper, the multi-station surface seismic wave analysis method is used, which is very fast, convenient and without the need for drilling and environmental degradation. In this regard, by simulating in Abacus finite element software environment and using the codes written in MATLAB, the impact of underground cavities and their dimensions have been evaluated. The cavities are located at different lengths below the ground and the field of waves in time-distance space, in frequency-distance space and scattering curves and graphs in frequency-distance space after the filter are studied. . The results showed that at the location of the cavity, the field of waves in the space-time space is disturbed and failed, which in the frequency-distance space has increased the amplitude of the wave in the area of the cavity.

۱ مقدمه

وجود مخاطرات ژئوتکنیکی ناشی از وجود پدیده‌های زیرسطحی همانند حفره، گسل، تونل که توسط انسان یا به صورت طبیعی به وجود آمده‌اند می‌توانند خطرات جدی برای محیط زیست و یا ساختگاه‌های پروژه‌های مهندسی داشته باشند. روش تحلیل امواج سطحی یک روش لرزه‌ای غیرمخرب می‌باشد که از سالیان دور تا به امروز به جهت شناسایی مشخصات لایه‌های خاک و حفرات زیر سطحی از این روش استفاده می‌گردد. روش تحلیل امواج لرزه‌ای سطحی به سه طریق انجام می‌شود. روش‌های امواج سطحی عبارت‌اند از روش آنالیز طیفی امواج سطحی (SASW)^۲ و روش آنالیز چندکاناله امواج سطحی (MASW)^۳، که با توجه به کارایی بهتر روش آنالیز چندکاناله امواج سطحی، در این مقاله از این روش استفاده گردیده است. استفاده از روش آنالیز چندکاناله امواج سطحی موجب افزایش سرعت انجام آزمایش شده که این امر باعث سریع‌تر شدن پردازش داده‌ها و قدرتمند شدن استفاده از روش امواج سطحی می‌شود. کاربردهای اولیه روش امواج سطحی چند ایستگاهی برای تعیین مشخصات نزدیک سطحی در دهه ۱۹۸۰ بوده است [۱، ۲]. اما در دهه ۱۹۹۰ کاربردهای وسیع‌تری پیدا کرد و امروزه از این روش برای کاربردهای نزدیک سطحی استفاده می‌شود. اغلب این روش با نام مخفف MASW (آنالیز چندایستگاهی موج‌های سطحی) شناخته می‌شود [۳].

تاکنون از روش‌های مختلفی در زمینه شناسایی حفره‌های زیرسطحی استفاده شده است که می‌توان به روش‌های امواج طولی انکسار یافته [۴]، تحلیل امواج سطحی بازگشتی [۵]، طیف چگالی توان [۶]، روش تحلیل طیفی امواج سطحی [۷]، تحلیل مکانی امواج

² Spectrual Analysis Surface Wave

³ Multichannel Analysis of Surface Waves

سطحی اشاره نمود [۸]. در این راستا اسلون [۹، ۱۰] با ترکیب روش‌های شکست موج طولی، پراکندگی موج ریلی و سرعت بازتاب موج، مکان تقریبی حفره را بررسی نموده است. المالکی و منیر [۱۱] با استفاده از پروفیل سرعت دو بعدی و تاخیر در اولین زمان رسیدن موج طولی یا به عبارت دیگر ترکیب تحلیل امواج سطحی و امواج طولی، مکان یک حفره را بدست آورده اند. رهنما و همکاران به بررسی اثر وجود حفره در حالت انتشار موج ریلی و شکست و بازتاب امواج طولی پرداختند و با انجام مدلسازی عددی و آزمایش میدانی یک محیط دارای حفره، نشان دادند که با شکست و تغییر شیب در نمودار مسافت-زمان، می‌توان حفره را شناسایی کرد و برای موقعیت یابی محل دقیق حفره می‌بایست محل منبع ارتعاش را در دو طرف آرایه‌ی گیرنده‌ها در نظر گرفت [۱۲]. میراثی و رهنما با بررسی وجود حفرات در اعماق زیاد خاک همگن یک نیم فضا و یا محیط خاکی لایه بندی شده با مکانیسم انتشار امواج به این نتیجه رسیدند که با بررسی حرکت جبهه‌ی موج لرزه‌ای، با شکست و بازتاب جبهه موج P موقعیت حفرات را می‌توان شناسایی کرد و همچنین امواج ریلی صرفاً جهت شناسایی ناهمگنی‌های سطحی به کار می‌رود و به جهت شناسایی حفره در اعماق زیاد می‌بایست از منبع ارتعاش غیرفعال و یا منبع ارتعاش با فرکانس پایین استفاده نمود [۱۳]. رهنما و همکاران با استفاده از روش امواج سطحی و تحلیل داده‌های لرزه‌ای حاصل از آزمایشات صحرایی و مدلسازی عددی دریافتند که با روش همبستگی می‌توان محل قرارگیری حفره را تشخیص داد. در این روش برای وضوح بیشتر از توان دوم داده‌های لرزه‌ای استفاده شده است. نمودارهای همبستگی نشان داد که اندازه‌ی حفرات بر تغییرات این نمودارها تأثیرگذار است [۱۴]. شائو و همکاران با استفاده از روش موج ریلی منکسر شده و اعمال تغییرات روی معادله حرکت برای موج ریلی منکسر شده توسط ژیا و همچنین استفاده از روش S-transform تعمیم یافته مکان حفره را به دست آوردند [۱۵].

با توجه به گسترش روز افزون بکارگیری روش‌های امواج سطحی و نظر به اینکه روش آنالیز امواج سطحی یک روش موثر و دقیق به جهت شناسایی مخاطرات ژئوتکنیکی ناشی از وجود حفره، تغییرات جانبی و لایه ضعیف می‌باشد لذا در این مقاله سعی شده است به بررسی تأثیر ابعاد طولی حفرات زیر سطحی پرداخته شود و با شناسایی و تعیین ابعاد این حفرات، مخاطرات احتمالی ساختگاه به درستی پیش بینی شود. مدلسازی و شبیه سازی‌ها در نرم افزار آباکوس انجام شده و با استفاده از کدنویسی‌های انجام شده در برنامه متلب نتایج در فضای زمان-فاصله، حوزه فرکانس-فاصله و طیف پراکندگی امواج ریلی مورد نمایش و ارزیابی واقع شده اند. همچنین جهت بهبود و افزایش وضوح امواج ریلی و طولی از روش‌های فیلتر امواج مستقیم و بازگشتی استفاده شده است. نتایج به دست آمده کمک بسزایی در راسنای شناسایی حفره و در درک و شناسایی بهتر انتشار امواج ریلی و طولی بعد از برخورد با حفرات زیرسطحی داشته است مضافاً اینکه می‌توان اظهار داشت ابعاد طولی حفره و مرز دور و نزدیک حفره با دقت مناسبی قابل تعیین می‌باشند.

۲- روش‌شناسی تحقیق

موج ریلی در محیط نیم فضای الاستیک خطی، همگن و همسانگرد پراکنده نمی‌شود و سرعت انتشار آن فقط تابعی از خواص مکانیکی محیط است و تابعی از طول موج (λ) یا فرکانس (f) نیست؛ بنابراین تنها یک سرعت انتشار برای تمامی طول موج‌ها وجود خواهد داشت. برای محیط‌های لایه‌ای، که دارای لایه‌های با مشخصات مختلف می‌باشند، موج‌های ریلی پراکنده می‌شوند. این به این معنی است که سرعت انتشار امواج ریلی (V_R) تابعی از طول موج (λ) یا فرکانس (f) بوده و برای هر طول موج، سرعت خاصی وجود دارد. به این ویژگی امواج سطحی، خاصیت پراکندگی گفته می‌شود.

۲-۱- روش اجزای محدود و مرزهای جاذب

روش اجزای محدود^۴ (FEM) به عنوان یک روش موفقیت‌آمیز در مسائل انتشار امواج بکار برده شده است [۱۶، ۱۷ و ۱۸]. شبیه‌سازی اجزای محدود برای بارهای ضربه‌ای روی سطح آزاد سبب بازگشت انرژی قابل توجهی از طرف مرزهای اجزای نامحدود می‌شود [۱۹]. بنابراین مرزهای اجزای نامحدود برای مدل‌سازی‌های پیچیده انتشار امواج در آزمایش‌های امواج سطحی برای محیط دو و سه بعدی مناسب نیستند. از سوی دیگر، مرزهای جاذب تحت عناوین لایه‌های جاذب با افزایش میرایی^۵ (ALID) و لایه تطابق کامل^۶ (PML) به نحو قابل ملاحظه‌ای اندازه محاسباتی و هندسی مدل عددی را کاهش می‌دهند [۲۰]. در این مقاله، از لایه‌های جاذب افزایش

^۴ Finite Element Method

^۵ Absorbing Layers using Increasing Damping

^۶ Perfectly Matched Layers

دمپینگ (الید) به خاطر راحتی و فراهم بودن نحوه اعمال میرایی رایلی^۷، استفاده شده است [۲۲، ۲۱]. ضخامت الیدها و به نوعی طول الیدها پارامتر تأثیرگذار بر روی اختلاف نسبی امپدانس اجزا در مرز جاذب دارد [۲۳]؛ بنابراین، جهت میرا کردن موجها در مرزهای سمت راست، چپ و مرز پایین، از چیدمان افزایشی دمپینگ لایه ها یا همان الید استفاده شده است. تعداد الیدها مطابق تحلیل های انجام شده ۱۱ لایه الید یک متری جهت جذب بهتر موجهای رسیده انتخاب شده است. فاصله منبع تا نزدیک ترین لایه الید ۲۰ متر در نظر گرفته شده است تا اثر امواج بازگشتی به درستی با اثر امواج مستقیم تفکیک داده شوند. میرایی مورد استفاده در الید از نوع میرایی رایلی^۸، [CR]، میباشد که به صورت زیر تعریف می شود:

(۱)

$$[CR] = C[M] + CK[K]$$

که $[M]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریسهای جرم و سختی و CM و CK به ترتیب ضرایب میرایی جرم و سختی میباشد. CK به دلیل حساسیتی که در حل مسائل دینامیکی دارد، نیازمند بارگذاری با بازه های زمانی بسیار کوچک است که باعث افزایش زمان و صرف هزینه زیاد برای حل مسئله می شود، بنابراین، توصیه شده است که $CK=0$ در نظر گرفته شود [۲۴]. مقادیر CM که در این تحقیق برای لایه های الید استفاده شده است، به صورت تدریجی افزایش می یابند، این ضرایب به صورت مضربی از ۱/۵ و متناسب با میرایی محیط خاک مدل شده برای هر ناحیه در حال افزایش هستند و این افزایش باید به نحوی باشد که موجب تغییر شدید میرایی بین دولایه الید و در نتیجه، بازگشت موج در مرز دولایه نشود.

۲-۲- روش فیلتر فرکانس-عدد موج

داده های لرزه ای ثبت شده توسط ژئوفونها شامل تمامی میدان موج شامل موج حجمی، موج رایلی مستقیم و بازگشتی هستند. برای شناسایی حفرات لازم است که موج مستقیم را از داده های لرزه ای حذف کنیم و با تحلیل این امواج اطلاعاتی درباره مکان و ابعاد آن حفرات بدست آوریم. برای این منظور فیلتر فرکانس- زمان معرفی می گردد. داده های لرزه ای با استفاده از تبدیل دوگانه فوریه از حوزه ی زمان-فاصله به حوزه ی فرکانس- عدد موج تبدیل می شود.

فیلترهای کاهش امواج سطحی عموماً به دو صورت عمل میکنند. نوع اول که شامل فیلترهای فرکانسی هستند، بر اساس حذف بخشی از داده های نامطلوب میباشد که معمولاً در فضای فرکانس به کار می روند. نوع دیگری از این فیلترها بر مبنای برآورد نوفه عمل مینمایند و پس از بدست آوردن مدل نوفه و تفریق آن از داده به حذف نوفه میپردازند. نوع دوم فیلترها به دلیل اینکه نمیتوان امواج سطحی را در حین برداشت با آرایه ها به صورت کامل تضعیف کرد، در فضای زمان صورت میپذیرد. روش های پردازشی که به منظور تضعیف امواج سطحی بکار می روند، به عنوان تفکیک امواج سطحی و رخدادهای بازتابی از معیار فرکانس استفاده می شود. لازم به ذکر است که جهت کیفیت بهتر و حذف اثرات نوفه های ناشی از خود تبدیل فوریه در حوزه ی فرکانس، بهتر است که این داده ها قبل از تبدیل فوریه صفرافزونی^۸ گردد. بدین ترتیب ابعاد ماتریس قبل از تبدیل فوریه افزایش خواهد یافت [۲۵]. به طور کلی تبدیل دوگانه $f-k$ به صورت زیر است:

$$U(f, k) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t) e^{-i2\pi(ft-kx)} dx dt \quad (۲)$$

این تبدیل، میدان موج را به مؤلفه های ثابت فرکانس و عدد موج تبدیل میکند. بدین ترتیب داده های لرزه ای در حوزه ی فرکانس و عدد موج به صورت شدت انرژی برحسب تابعی از فرکانس و عدد موج تعریف می شود. پس میتوان برحسب میزان فرکانس و عدد موج یا سرعت برخی از داده ها را جدا ساخته و فیلتر نمود. پس از حذف داده های مورد نظر، میدان موج فیلتر شده با استفاده از معکوس تبدیل دوگانه دوباره به همان حوزه ی اولیه ی زمان - فاصله باز می گردد. رابطه (۳) رابطه معکوس دوگانه را نشان میدهد.

$$u(x, t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(f, k) e^{i2\pi(ft-kx)} dk df \quad (۳)$$

۲-۳- مدل سازی

⁷ Rayleigh damping

⁸ Zero padding

تمام مدل سازی ها با استفاده از روش اجزای محدود در نرم افزار آباکوس نسخه 6.14 صورت پذیرفته است [۲۷]. ابعاد مدل های استفاده شده در این مقاله دارای عمق ۲۵ و طول ۹۱ متر می باشند. نحوه قرارگیری لایه ها کاملاً افقی و تعداد ۹۵ ژئوفون که به فاصله نیم متر از یک دیگر چیده شده اند. فاصله محل قرارگیری منبع ارتعاش از مرز محیط مدل، جهت تفکیک بهتر امواج احتمالی بازگشتی از لایه های الید، ۲۰ متر می باشد. مشخصات لایه بندی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. فاصله منبع لرزه ای از اولین گیرنده ۲ متر، مرز نزدیک تمامی مدل ها در ۲۳/۵ متری از اولین گیرنده قرار دارد. حفره ها به طول های ۲، ۴، ۶ و ۸ متر و عمق مدفون ۱ متر و ارتفاع ۲ متر برای هر مدل در نظر گرفته شده است.

برداشت داده های لرزه ای به طور معمول، با یک منبع فعال سطحی و ثبت جبهه موج ناشی از آن صورت می گیرد. منبع مورد استفاده برای ثبت ارتعاشات نیز از ژئوفون های قائم استفاده شده که به دستگاه ثبت داده های دیجیتال متصل است. تعداد ژئوفون ها، فاصله آنها و بازه های ثبت داده ها نیز برای یک داده برداری با کیفیت، دارای اهمیت بسیاری می باشد. در واقع داده برداری بایستی طوری طراحی گردد که اثرات امواج حجمی و امواج رایی نشأت گرفته از منابع دیگر و نویزها را کاهش دهد؛ به طوری که نسبت سیگنال به نویز در حد قابل قبولی باشد [۵]. داده برداری گیرنده ها ۰/۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده و کل زمان برداشت داده ها ۰/۵ ثانیه می باشد. میرایی اعمال شده به لایه های خاک میرایی رایی در نظر گرفته شده است [۲۹]. مشخصات خاک و حفره در جدول شماره ۱ ارائه شده است [۳۰]. برای شبیه سازی امواج لرزه ای توابع زیادی پیشنهاد شده است که ویولت ریکر دارای شباهت بیشتری نسبت به دیگر توابع است [۳۱]. بار لرزه ای ریکر بعنوان یکی از منابع لرزه ای فعال به صورت گسترده در مطالعات ژئوتکنیکی استفاده می گردد. در این مقاله نیز از بار لرزه ای وارد شده به سطح زمین با فرکانس مرکزی ۵۰ هرتز استفاده شده است که به آن بار ریکر ۵۰ نیز گفته می شود [۳۲].

$$R(t) = (1 - 2\pi^2 f^2 t^2) e^{-\pi^2 f^2 t^2} \quad (6)$$

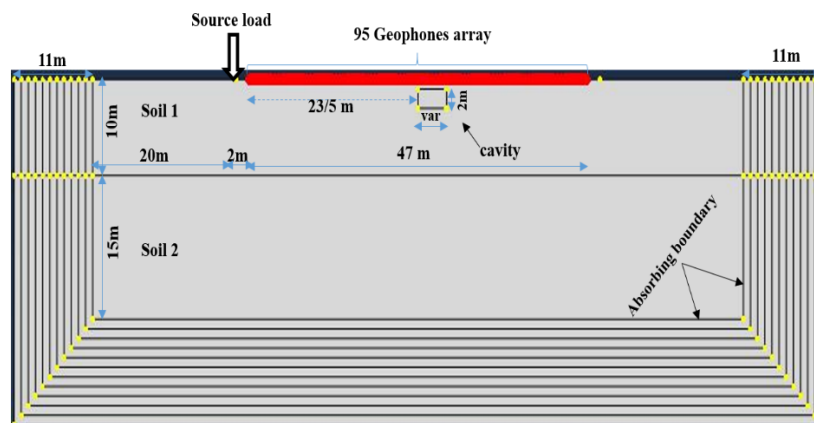
$$R(f) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{f^2}{f_M^3} e^{\frac{f^2}{f_M^2}} \quad (7)$$

که t, f, f_M و R به ترتیب نشانگر زمان، فرکانس، فرکانس غالب و بار ریکر می باشد.

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می گردد، مشخصات لایه های خاک و حفره در محیط خاکی مدل سازی شده طبق ذیل می باشد و در شکل ۱ نحوه قرارگیری لایه ها و حفره در محیط، نوه آرایش گیرنده ها، محل منبع لرزه ای و نحوه قرارگیری لایه های جاذب در مرز محیط مشاهده می گردد.

جدول ۱: مشخصات لایه بندی خاک

مصلاح	سرعت موج برشی (m/s)	سرعت موج طولی (m/s)	مدول الاستیک (Mpa)	وزن مخصوص (kg/m ³)	نسبت پواسون	ضرایب میرایی رایی: (CM)
خاک لایه اول	۲۰۰	۳۹۷/۰۴	۱۹۱۵۲۰	۱۸۰۰	۰/۳۳	۲/۵
خاک لایه دوم	۴۰۰	۷۹۴/۰۹	۸۰۸۶۴۰	۱۹۰۰	۰/۳۳	۲/۵
حفره	۱۷	۳۴۰	۸۶۶	۱۰	۰/۴۹۸	۲/۵



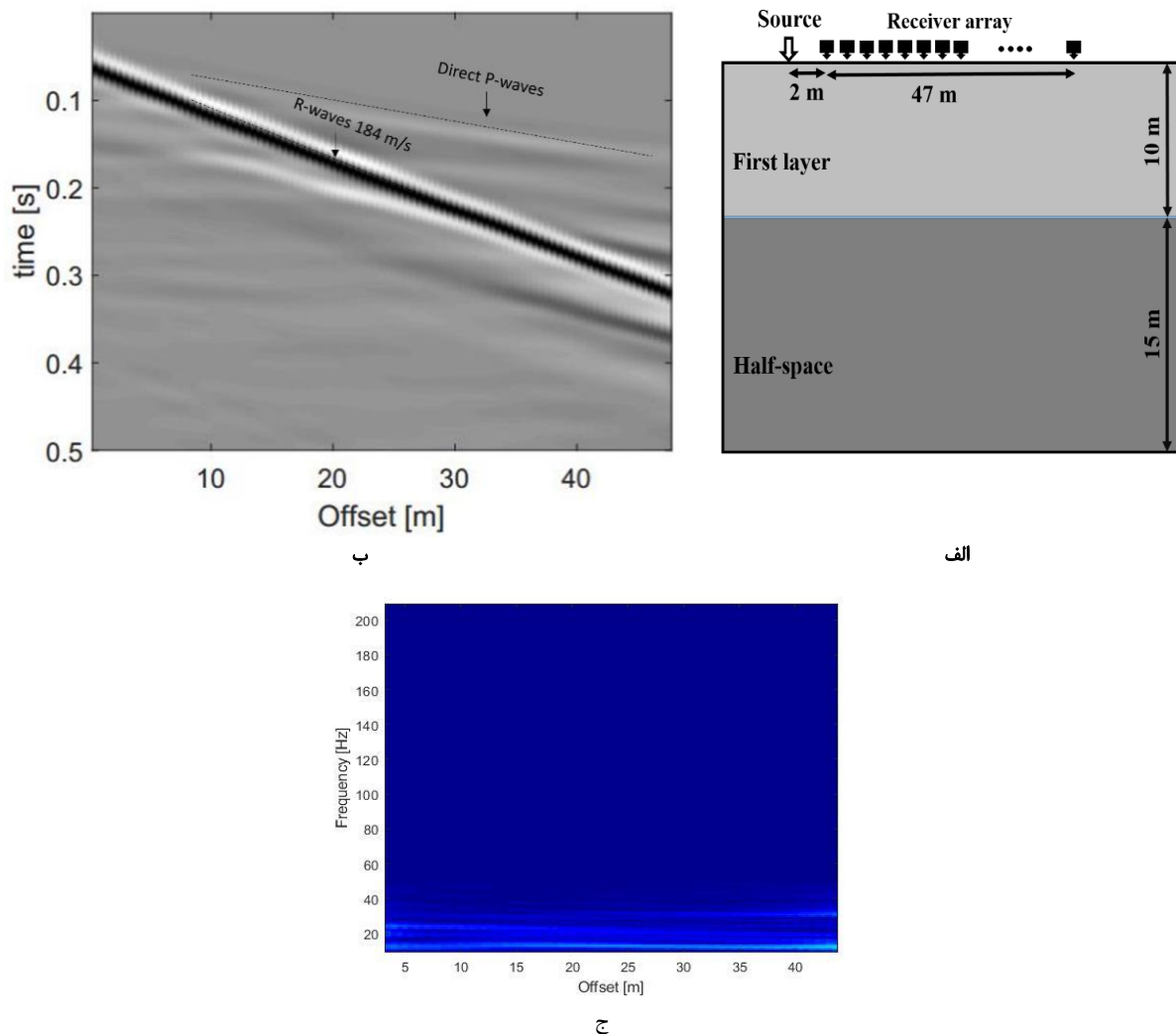
شکل ۱: مشخصات مدل خاک دو لایه و نحوه قرارگیری لایه ها و جزئیات مدل

۳-نتایج تحقیق

در این مقاله به جهت بررسی تاثیر تغییرات طول حفرات زیرسطحی، از ۴ مدل مختلف بهره گیری شده است. که یک مدل مربوط به حالت بدون وجود حفره و ۳ مدل مربوط به وجود حفره زیرسطحی است. در بخش بررسی حفره تو خالی، هر حفره با عمق مدفون یک متری و مرز نزدیک حفره ها در فاصله ی افقی ۲۳/۵ متری از اولین گیرنده قرار داده شده اند که این حفره ها به ترتیب با طول های ۲، ۴ و ۸ متری در شرایط یکسان بررسی شده اند. محل اعمال بار ریکر در راستای محور قائم، با فرکانس مرکزی ۵۰ هرتز جهت جلوگیری از ایجاد نوفه های نامناسب با اولین گیرنده ۲ متر در نظر گرفته شده است و تعداد گیرنده ها برای دقت بیشتر و اثر بهتر با تعداد ۹۵ ژئوفون و فاصله نیم متری قرار گرفته اند. نتایج بدست آمده در فضای میدان موج، طیف پراکندگی، فیلتر داده های لرزه ای در حوزه زمان-فاصله و حوزه فرکانس-فاصله مربوط به هر مدل ترسیم گردیده و سپس نتایج حاصله مورد ارزیابی و مقایسه قرار داده شده است. در بخش های زیر ابتدا خاک دو لایه بدون وجود حفره و سپس تاثیر تغییر ابعاد طولی حفره مورد بررسی قرار گرفته است.

برای بررسی اثر وجود حفره ابتدا حالت بدون وجود حفره مورد بررسی قرار داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در شکل ۲-الف شکل شماتیک محیط با مشخصات مندرج در جدول شماره ۱ آورده شده است. در شکل ۲-ب فضای میدان امواج ترسیم شده است که امواج مستقیم رایلی، با توجه به اینکه $V_R \approx 0.92 V_S$ ، سرعت موج رایلی ۱۸۴ متر بر ثانیه در حوزه زمان-فاصله مشاهده شده است.

همچنین امواج P با سرعت بالاتر از امواج S و امواج رایلی ایجاد شده اند. در شکل ۲-ج نتایج در فضای فرکانس-فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم ترسیم شده که مشاهده می شود در تمامی فاصله ها فرکانس ها با دامنه های تقریباً برابر پخش شده اند، در واقع انرژی متمرکز شده ای در فاصله مشخصی دیده نمی شود. در شکل ۲-د طیف پراکندگی امواج ترسیم گردیده است که سرعت فازی امواج رایلی در در برابر فرکانس به تصویر کشیده شده است.

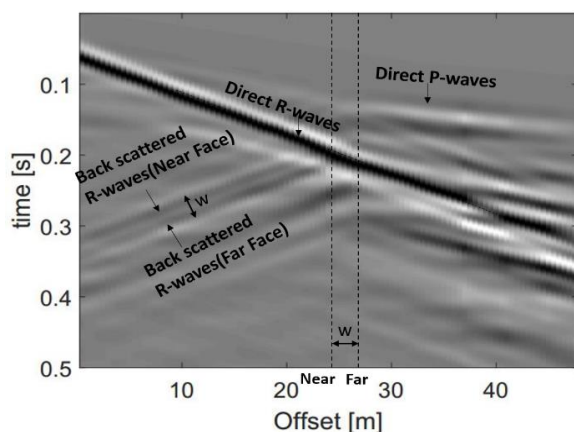


شکل ۱- نتایج به دست آمده برای مدل بدون حفره: الف) شماتیک مدل، ب) میدان امواج در فضای زمان - فاصله، ج) فضای فرکانس - فاصله،

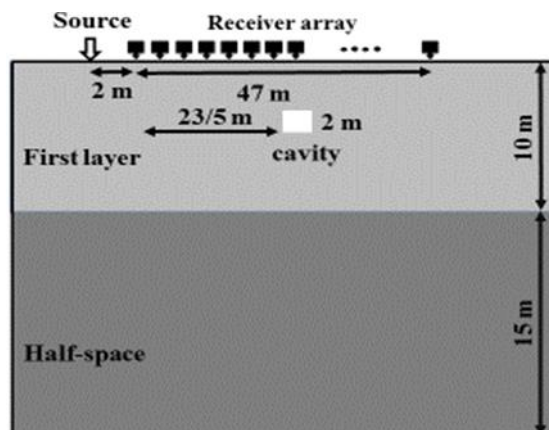
۳-۱- تأثیر حفره به طول ۲ متر

در شکل ۳- الف شماتیک مسئله ترسیم شده است که مرز نزدیک حفره در فاصله افقی ۲۳/۵ متری از اولین گیرنده قرار گرفته است. تمامی شرایط مساله با حالت بدون حفره یکسان در نظر گرفته شده است و فقط در همان محیط حفره قرار داده است. حفره به شکل مستطیلی در فضای دو بعدی به طول ۲ متر و ارتفاع ۲ متر در عمق مدفون یک متری از سطح زمین مدلسازی شده است. در شکل ۳-ب میدان امواج ترسیم گردیده است که محور افقی، مکان ژئوفون ها را نشان می دهد که از فاصله ۱ تا ۴۸ متری ترسیم شده است و محور قائم آن زمان ثبت داده های آزمایش می باشد. همانطور که در شکل ۳-ب مشاهده می شود حفره مانند منبع لرزه ای جدید امواج را منتشر می کند. امواج راییلی بازگشتی^۹ از حفره در دو مسیر موازی نشان داده شده اند، که مسیر امواج بالایی مربوط به مرز نزدیک و مسیر پایینی مربوط به مرز دور حفره می باشد. همچنین مشاهده می گردد که در موقعیت حفره، میدان امواج دچار یک شکستگی و تغییر شیب شده است. در شکل ۳- ج امواج بازگشتی در فضای زمان - فاصله در شکل ۵-ج به حوزه فرکانس - فاصله با استفاده از تبدیل فوریه یک بعدی تبدیل شده است که در این شکل انرژی بیشتری در فرکانس ۱۵-۲۵ و فاصله افقی ۲۴/۵ تا ۲۶/۵ متر مشاهده می شود که نشان از حضور حفره و بیانگر ابعاد طولی حفره و محل دقیق آن می باشد.

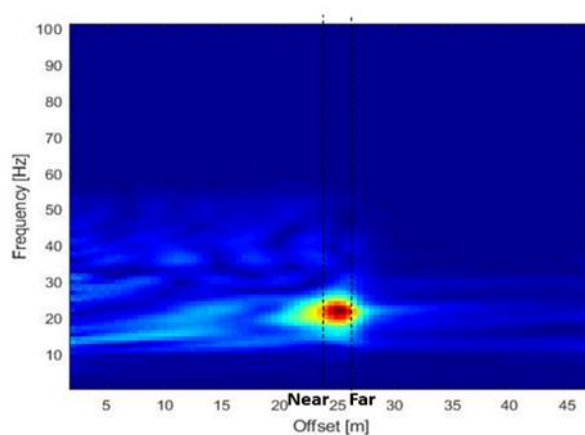
^۹ Back scattered R-waves



ب



الف

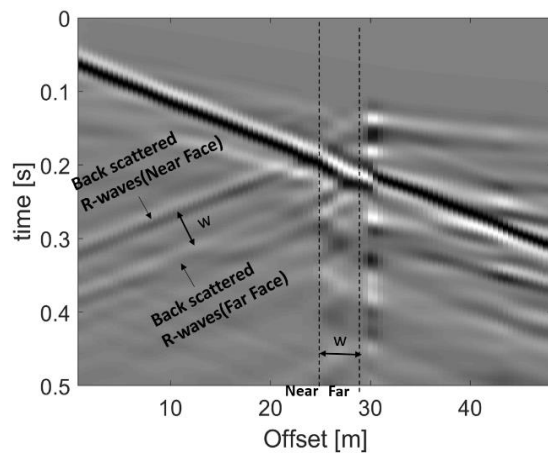


ج

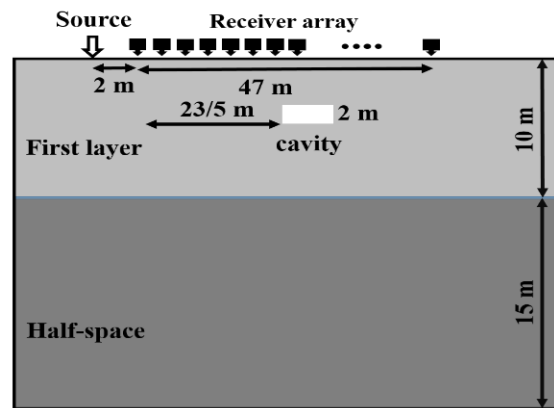
شکل ۲- نتایج مدل سازی برای خاک دو لایه با حفره به طول ۲ متر: الف) میدان امواج در فضای زمان-فاصله قبل از فیلتر ب) فضای فرکانس - فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم

۲-۳- حفره توخالی به طول ۴ متر

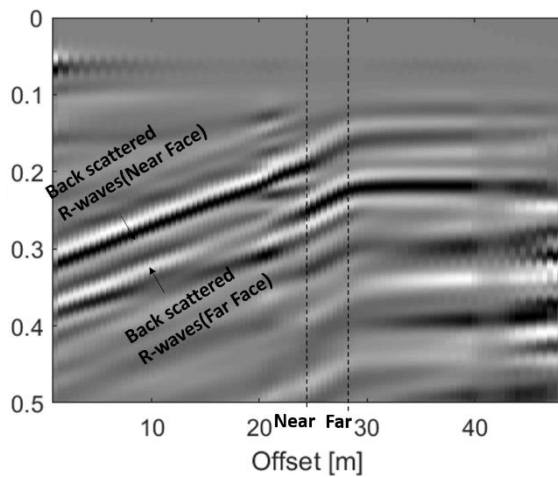
در این قسمت از حفره به طول ۴ متر و ارتفاع ۲ متر استفاده شده است. در شکل ۴-ب با افزایش طول حفره تو خالی امواج بازگشتی نیز با تاخیر زمانی بیشتری با سرعت های یکسان و برابر سرعت رایلی مستقیم مشاهده می شود. همچنین در این قسمت فاصله زمانی که در امواج برگشتی مشاهده می شود نیز متناسب با ابعاد طولی حفره در این صفحه می باشد. امواج مستقیم طولی دچار شکست شده اند و در بالای حفره سرعت های متفاوتی از امواج توسط گیرنده ها ثبت گردیده و محبوس شدگی بین مرز دور و نزدیک مشاهده می شود که به صورت رفت و برگشت در فاصله افقی مرز نزدیک و دور حفره در فضای زمان-فاصله در زمان های متفاوت، بعد از رسیدن موج رایلی مستقیم مشاهده می شود. در شکل ۴-د تغییر سرعت که در شکل به صورت شکستگی ایجاد شده در مرز دور در زمان های متفاوت مشخص است. شکل ۴-ج حوزه فرکانس-فاصله را نشان می دهد. در قسمتی که حفره وجود دارد فرکانس ها با انرژی بیشتر متمرکز شده است که با رنگ قرمز و نارنجی در حد فصل مرز دور و نزدیک مشخص شده اند.



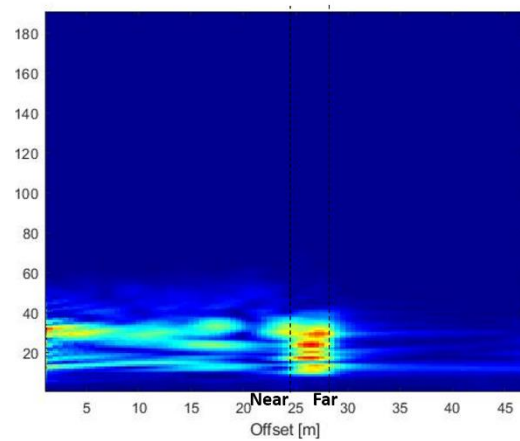
ب



الف



د

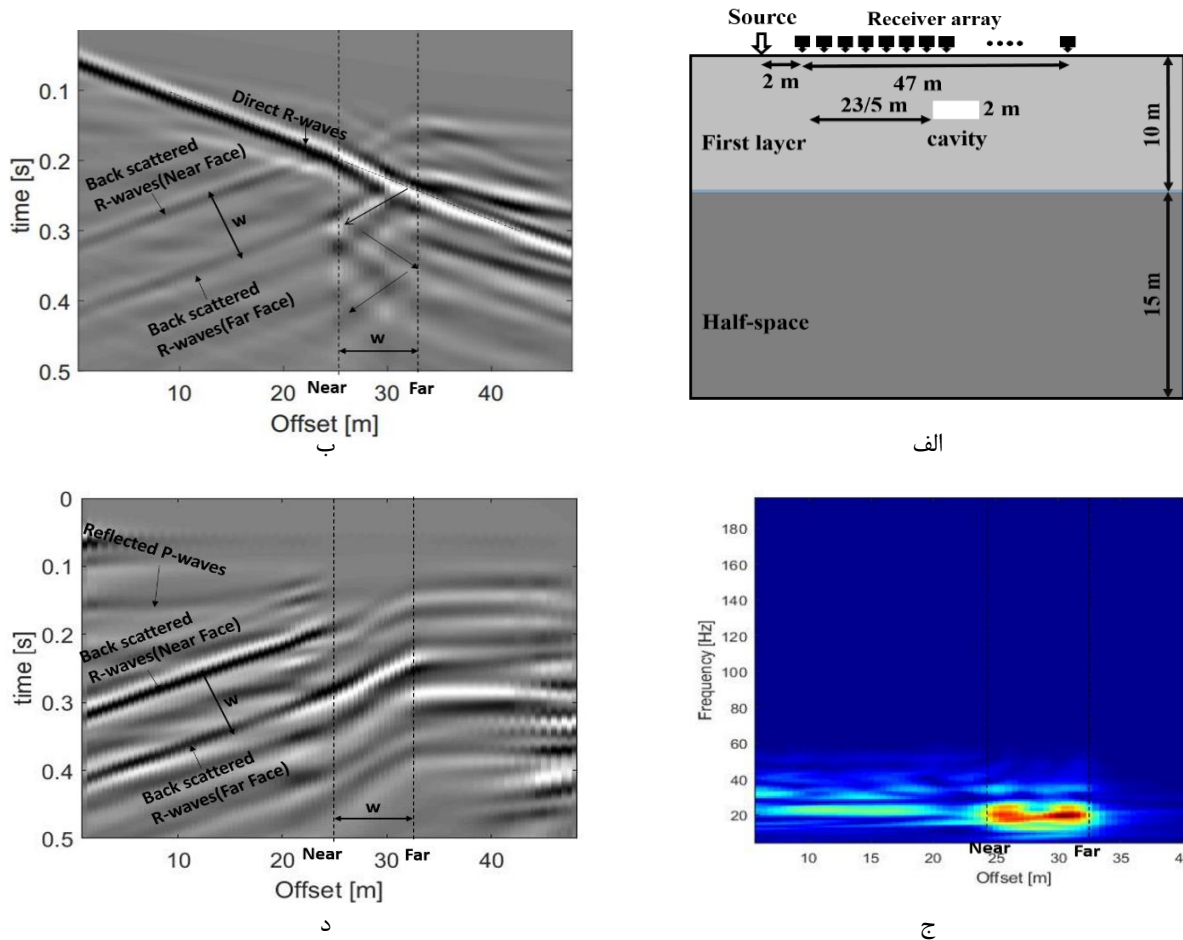


ج

شکل ۴- نتایج مدل سازی برای خاک دو لایه با حفره به طول ۴ متر: الف) شماتیک مسئله، ب) میدان امواج در فضای زمان-فاصله قبل از فیلتر، ج) فضای فرکانس - فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم، د) میدان امواج بازگشتی در فضای زمان-فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم،

حفره توخالی به طول ۸ متر

در این قسمت از حفره به طول ۸ متر و ارتفاع ۲ متر استفاده شده و در شرایط یکسان با حالت بدون وجود حفره و حفره به طول ۲ متر قابل مقایسه است. در شکل ۵-ب با افزایش طول حفره تو خالی امواج بازگشتی نیز با تاخیر زمانی بیشتری با سرعت های یکسان و برابر سزعت راییلی مستقیم مشاهده می شود. همچنین امواج مستقیم طولی دچار شکست شده اند و در بالای حفره سرعت های متفاوتی از امواج توسط گیرنده ها ثبت گردیده و محبوس شدگی نیز بین مرز دور و نزدیک مشاهده می شود. در شکل ۵-د تغییر سرعت که در شکل به صورت شکستگی ایجاد شده در مرز دور در زمان های متفاوت مشخص است و در حوزه فرکانس - فاصله نیز به خوبی در قسمتی که حفره وجود دارد فرکانس ها با انرژی بیشتر متمرکز شده است.



شکل ۵- نتایج مدل سازی برای خاک دو لایه با حفره به طول ۸ متر: (الف) شماتیک مسئله، (ب) میدان امواج در فضای زمان-فاصله قبل از فیلتر، (ج) فضای فرکانس - فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم، (د) میدان امواج بازگشتی در فضای زمان-فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله با بهره‌گیری از مدلسازی‌های مختلف در محیط نرم افزار اجزا محدود آباکوس و پردازش داده‌ها در محیط نرم افزار متلب و با استفاده از روش تحلیل امواج سطحی به ارزیابی تاثیر ابعاد طولی حفره پرداخته شده است. بدین ترتیب ۳ مدل حفره دار با ارتفاع برابر ۲ متر و طول‌های ۲، ۴، ۸ متری و یک مدل دو لایه بدون حفره شبیه سازی شده است. مقایسه نتایج حاصله در فضای زمان-فاصله و در فضای فرکانس-فاصله انجام شده است. ارزیابی نتایج حاصله نشان دادند که:

- ✓ محل شکستگی امواج در فضای میدان موج، محل دقیق مرزهای حفره را نشان می‌دهند. حفره در فضای میدان امواج همانند یک منبع لرزه ای جدید عمل می‌کند و باعث پدید آمدن امواج بازگشتی می‌شود. که با فیلتر کردن میدان موج، تاثیر اندازه حفره بسیار محسوس تر می‌باشد. به نحوی که هرچه حفره بزرگتر باشد میزان شکستگی امواج بزرگتر است.
- ✓ محل حفره در فضای فرکانس-مکان بسار محسوس می‌باشد و در محل قرار گیری حفره انرژی بیشتری متمرکز می‌باشد. بدین ترتیب که برای حفره به طول ۲، ۴، ۶ و ۸ متر با شروع مرز نزدیک در فاصله ۲۳/۵ متری از اولین گیرنده، به ترتیب در فواصل ۲۴/۵ متری تا ۲۶/۵، ۲۸/۵، ۳۰/۵ و ۳۲/۵ متری، فرکانس با انرژی بالا محدوده قرارگیری حفره و ابعاد آن را به درستی بیان می‌کند.

۵ مراجع

- McMechan, G.A. and M.J. Yedlin, *Analysis of dispersive waves by wave field transformation*. Geophysics, 1981. **46**(6): p. 869-874.
- Gabriels, P., R. Snieder, and G. Nolet, *In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves*. Geophysical prospecting, 1987. **35**(2): p. 187-196.
- Park, C.B., R.D. Miller, and J. Xia, *Multichannel analysis of surface waves*. Geophysics, 1999. **64**(3): p. 800-808.
- Walters, S.L., R.D. Miller, and J. Xia. *Near surface tunnel detection using diffracted P-waves: A feasibility study*. in *2007 SEG Annual Meeting*. 2007. OnePetro.
- Schwenk, J.T., et al., *Surface-wave methods for anomaly detection*. Geophysics, 2016. **81**(4): p. EN29-EN42.
- Phillips, C., G. Cascante, and J. Hutchinson. *Detection of underground voids with surface waves*. in *13th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. 2000. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Rahnema, H. and R.B. Bijari, *3D numerical modeling of multi-channel analysis of surface wave in homogeneous and layered concrete slabs*. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018. **8**(1): p. 161-170.
- Phillips, C., G. Cascante, and D.J. Hutchinson, *Evaluation of horizontal homogeneity of geomaterials with the distance analysis of surface waves*. Canadian Geotechnical Journal, 2004. **41**(2): p. 212-226.
- Sloan, S., et al., *Depth estimation of voids using backscattered surface waves*, in *SEG technical program expanded abstracts 2016*. 2016, Society of Exploration Geophysicists. p. 2362-2366.
- Sloan, S.D., et al., *Void detection using near-surface seismic methods*, in *Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar*. 2010, Society of Exploration Geophysicists, American Geophysical Union p. 201-218.
- Almalki, H. and K. Munir, *Efficiency of seismic attributes in detecting near-surface cavities*. Arabian Journal of Geosciences, 2013. **6**(8): p. 3119-3126.

12. Rahnema, H., S. Mirassi, and G. Dal Moro, *Cavity effect on Rayleigh wave dispersion and P-wave refraction*. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2021. **20**(1): p. 79-88.
13. Mirassi, S. and H. Rahnema, *Deep cavity detection using propagation of seismic waves in homogenous half-space and layered soil media*. Asian Journal of Civil Engineering, 2020. **21**(8): p. 1431-1441.
14. Rahnema, H., et al., *Detection of subterranean cavities and anomalies using multichannel analysis of surface wave*. Geomechanics and Geoengineering, 2020: p. 1-14.
15. Shao, G.-z., G.P. Tsoflias, and C.-j. Li, *Detection of near-surface cavities by generalized S-transform of Rayleigh waves*. Journal of Applied Geophysics, 2016. **129**: p. 53-65.
16. Castaings, M., et al., *Finite element predictions for the dynamic response of thermo-viscoelastic material structures*. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004. **115**(3): p. 1125-1133.
17. Hesse, D. and P. Cawley, *Surface wave modes in rails*. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006. **120**(2): p. 733-740.
18. Luo, W. and J.L. Rose, *Phased array focusing with guided waves in a viscoelastic coated hollow cylinder*. The Journal of the Acoustical Society of America, 2007. **121**(4): p. 1945-1955.
19. Drozd, M.B., *Efficient finite element modelling of ultrasound waves in elastic media*. 2008, Imperial College London.
20. Rajagopal, P., et al., *On the use of absorbing layers to simulate the propagation of elastic waves in unbounded isotropic media using commercially available finite element packages*. Ndt & e international, 2012. **51**: p. 30-40.
21. Davoodi, M., et al., *Application of perfectly matched layer to soil-foundation interaction analysis*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018. **10**(4): p. 753-768.
22. Lin, S. and J.C. Ashlock, *Multimode Rayleigh wave profiling by hybrid surface and borehole methods*. Geophysical Journal International, 2014. **197**(2): p. 1184-1195.
23. Olsson, D., *Numerical simulations of energy absorbing boundaries for elastic wave propagation in thick concrete structures subjected to impact loading*. 2012.
1. McMechan, G.A. and M.J. Yedlin, *Analysis of dispersive waves by wave field transformation*. Geophysics, 1981. **46**(6): p. 869-874.
2. Gabriels, P., R. Snieder, and G. Nolet, *In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves*. Geophysical prospecting, 1987. **35**(2): p. 187-196.
3. Park, C.B., R.D. Miller, and J. Xia, *Multichannel analysis of surface waves*. Geophysics, 1999. **64**(3): p. 800-808.
4. Walters, S.L., R.D. Miller, and J. Xia, *Near surface tunnel detection using diffracted P-waves: A feasibility study*. in 2007 SEG Annual Meeting. 2007. OnePetro.
5. Schwenk, J.T., et al., *Surface-wave methods for anomaly detection*. Geophysics, 2016. **81**(4): p. EN29-EN42.
6. Phillips, C., G. Cascante, and J. Hutchinson. *Detection of underground voids with surface waves*. in 13th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. 2000. European Association of Geoscientists & Engineers.
7. Rahnema, H. and R.B. Bijari, *3D numerical modeling of multi-channel analysis of surface wave in homogeneous and layered concrete slabs*. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018. **8**(1): p. 161-170.
8. Phillips, C., G. Cascante, and D.J. Hutchinson, *Evaluation of horizontal homogeneity of geomaterials with the distance analysis of surface waves*. Canadian Geotechnical Journal, 2004. **41**(2): p. 212-226.
9. Sloan, S., et al., *Depth estimation of voids using backscattered surface waves*, in SEG technical program expanded abstracts 2016. 2016, Society of Exploration Geophysicists. p. 2362-2366.
10. Sloan, S.D., et al., *Void detection using near-surface seismic methods*, in Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar. 2010, Society of Exploration Geophysicists, American Geophysical Union p. 201-218.
11. Almalki, H. and K. Munir, *Efficiency of seismic attributes in detecting near-surface cavities*. Arabian Journal of Geosciences, 2013. **6**(8): p. 3119-3126.

12. Rahnema, H., S. Mirassi, and G. Dal Moro, *Cavity effect on Rayleigh wave dispersion and P-wave refraction*. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2021. **20**(1): p. 79-88.
13. Mirassi, S. and H. Rahnema, *Deep cavity detection using propagation of seismic waves in homogenous half-space and layered soil media*. Asian Journal of Civil Engineering, 2020. **21**(8): p. 1431-1441.
14. Rahnema, H., et al., *Detection of subterranean cavities and anomalies using multichannel analysis of surface wave*. Geomechanics and Geoengineering, 2020: p. 1-14.
15. Shao, G.-z., G.P. Tsoflis, and C.-j. Li, *Detection of near-surface cavities by generalized S-transform of Rayleigh waves*. Journal of Applied Geophysics, 2016. **129**: p. 53-65.
16. Castaings, M., et al., *Finite element predictions for the dynamic response of thermo-viscoelastic material structures*. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004. **115**(3): p. 1125-1133.
17. Hesse, D. and P. Cawley, *Surface wave modes in rails*. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006. **120**(2): p. 733-740.
18. Luo, W. and J.L. Rose, *Phased array focusing with guided waves in a viscoelastic coated hollow cylinder*. The Journal of the Acoustical Society of America, 2007. **121**(4): p. 1945-1955.
19. Drozd, M.B., *Efficient finite element modelling of ultrasound waves in elastic media*. 2008, Imperial College London.
20. Rajagopal, P., et al., *On the use of absorbing layers to simulate the propagation of elastic waves in unbounded isotropic media using commercially available finite element packages*. Ndt & e international, 2012. **51**: p. 30-40.
21. Davoodi, M., et al., *Application of perfectly matched layer to soil-foundation interaction analysis*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018. **10**(4): p. 753-768.
22. Lin, S. and J.C. Ashlock, *Multimode Rayleigh wave profiling by hybrid surface and borehole methods*. Geophysical Journal International, 2014. **197**(2): p. 1184-1195.
23. Olsson, D., *Numerical simulations of energy absorbing boundaries for elastic wave propagation in thick concrete structures subjected to impact loading*. 2012.
24. Jokar, M.H., et al., *Application of surface waves for detecting lateral variations: buried inclined plane*. Near Surface Geophysics, 2019. **17**(5): p. 501-531.
25. Yilmaz, Ö., *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*. 2001: Society of exploration geophysicists.
26. Chai, H.-Y., et al., *Some theoretical and numerical observations on scattering of Rayleigh waves in media containing shallow rectangular cavities*. Journal of Applied Geophysics, 2012. **83**: p. 107-119.
27. Atkinson, J., *Non-linear soil stiffness in routine design*. Géotechnique, 2000. **50**(5): p. 487-508.
28. Nasser-Moghadam, A., et al., *Effects of underground cavities on Rayleigh waves—Field and numerical experiments*. Soil dynamics and earthquake engineering, 2007. **27**(4): p. 300-313.
29. Abbasi Karafshani, S., A.A. Ardakani, and M. Yakhchalian, *Comparison between the Effects of Near-and Far-Fault Ground Motions on the Seismic Response of a Soil-Pile-Structure System*. Journal of Structural and Construction Engineering, 2016. **2**(4): p. 117-130.
30. Xia, J., et al., *Feasibility of detecting near-surface feature with Rayleigh-wave diffraction*. Journal of applied geophysics, 2007. **62**(3): p. 244-253.
31. Gholamy, A. and V. Kreinovich. *Why Ricker wavelets are successful in processing seismic data: Towards a theoretical explanation*. in 2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Engineering Solutions (CIES). 2014. IEEE.
32. Mirassi, S. and H. Rahnema, *Effect of frequency content of seismic source load on Rayleigh and P waves in soil media with cavity*. Journal of Structural and Construction Engineering, 2019.