

propagation to identify near Effect of subsurface cavity length on Rayleigh wave and far boundary of the cavity

Hossein Rahnema¹, Mahmood Rasekh², Sohrab Mirassi³

1- Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

2- M. Sc. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran..

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.

ABSTRACT

Subsurface identification in some cases requires seismic testing, especially when the goal is to identify anomalies at the site. Identifying and determining the dimensions of these anomalies is important because these cavities may be of considerable size and close to the ground. And cause irreversible risks by applying loading or any other changes in the soil environment. Seismic methods can also be used to identify aqueducts, mineral, oil and gas exploration. Due to various methods of identifying subsurface anomalies, in this paper, the multi-station surface wave analysis method is used, which is very fast and cost-effective. In this regard, by simulating in Abacus, finite element software environment, the effect of longitudinal dimensions of shallow subsurface cavities has been evaluated. The cavities are located at different lengths below the ground and the waves field in the time-offset and dispersion curves and graphs in the frequency-offset after the filter are examined. The obtained results in the time-distance showed that for a cavity with a length of 2, 4, 6 and 8 meters, the scattered waves are emitted from the far and near the face of the cavity with a longer time distance from each other in proportion to the increase in the length of the cavity. It can be concluded that the near and far boundary of cavity could be determined by using high resolution obtained data after filtering in time-distance domain, and more energy data in frequency-distance domain.

ARTICLE INFO

Receive Date: 15 August 2021

Revise Date: 13 November 2021

Accept Date: 25 November 2021

Keywords:

Longitudinal dimentions

Seismic waves

Rayleigh waves

Cavity

MASW

Dispersion curve

Wave field

F-K filter

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2021.299727.2530>

*Corresponding author: Sohrab Mirassi

Email address: S.mirasi@sutech.ac.ir

ارزیابی تاثیر طول حفره زیرسطحی^۱ بر انتشار امواج رابلی

جهت شناسایی مرز دور و نزدیک حفره

حسین رهنما^۱، محمود راسخ^۲، سهراب میراثی^{۳*}

۱- استادیار گروه عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک گروه عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

چکیده

شناسایی زیرسطحی در مواردی نیاز به آزمایشات لرزه‌ای دارد به خصوص زمانی که هدف، شناسایی حفرات در محل مورد نظر باشد شناسایی و تعیین ابعاد این حفرات از این بابت مورد اهمیت است که ممکن است این حفرات دارای اندازه قابل توجه و در نزدیکی سطح زمین باشند و با اعمال بارگذاری و یا هر گونه تغییرات دیگری در محیط خاک موجب ایجاد خطرات جبران ناپذیری گردد. از روش‌های لرزه‌ای می‌توان جهت شناسایی قنات، اکتشافات معدنی، نفت و گاز نیز بهره گرفت. با توجه به روش‌های گوناگون شناسایی حفرات زیرسطحی، در این مقاله از روش تحلیل چند ایستگاهی امواج سطحی استفاده شده است که بسیار سریع و مقرون به صرفه می‌باشد. در این راستا با شبیه سازی در محیط نرم افزار اجزا محدود اباکوس^۲ و بهره‌گیری از کدهای نوشته شده در متلب^۳، تاثیر ابعاد طولی حفره های کم عمق زیرسطحی مورد ارزیابی واقع شده است. حفره ها به طول‌های متفاوت در زیر سطح زمین قرار گرفته اند و میدان امواج در فضای زمان-فاصله و منحنی پراکندگی و نمودار ها در فضای فرکانس-فاصله بعد از فیلتر بررسی شده اند. نتایج به دست آمده در حوزه زمان-فاصله نشان دادند برای حفره به طول ۲، ۴، ۶ و ۸ متر امواج بازگشتی متناسب با افزایش طول حفره، از مرز دور و مرز نزدیک حفره با فاصله زمانی بیشتری از همدیگر منتشر می‌شوند و می‌توان مرزهای طولی حفره را از طریق امواج بازگشتی با وضوح بیشتر بعد از فیلتر در حوزه زمان-فاصله و انرژی بیشتر در فضای فرکانس-فاصله شناسایی نمود.

کلمات کلیدی: طول حفره، امواج لرزه‌ای، امواج رابلی، منحنی پراکندگی، میدان موج^۴، فیلتر.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2021.299727.2530	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.299727.2530	۱۴۰۱/۰۶/۳۱	۱۴۰۰/۰۹/۰۴	۱۴۰۰/۰۹/۰۴	۱۴۰۰/۰۸/۲۲	۱۴۰۰/۰۵/۲۴
				*نویسنده مسئول:		سهراب میراثی
				پست الکترونیکی:		S.mirasi@sutech.ac.ir

¹ Near surface cavities

² ABAQUS

³ MATLAB

⁴ Wavefield

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 دورتا 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)^۵ و روش آنالیز چندکاناله امواج سطحی (MASW)^۶، 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 وسیع-تری 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 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 آورده‌اند. 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 تاثیرگذار 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 تاثیر 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 شبیه‌سازی‌ها 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 شده‌اند. 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

⁵ Spectrul Analysis Surface Wave

⁶ Multichannel Analysis of Surface Waves

شناسایی حفره و درک و شناسایی بهتر انتشار امواج ریلی و طولی بعد از برخورد با حفرات زیرسطحی داشته است مضافاً اینکه می توان اظهار داشت ابعاد طولی حفره و مرز دور و نزدیک حفره با دقت مناسبی قابل تعیین می باشند.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- منحنی پراکندگی

موج ریلی در محیط نیم فضای الاستیک خطی، همگن و همسانگرد پراکنده نمی شود 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 موج ها وجود خواهد داشت. برای محیط های لایه ای، که دارای لایه های با مشخصات مختلف می باشند، موج های ریلی پراکنده می شوند. 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 پراکنشی گفته می شود.

از روش انتقال میدان موج برای به دست آوردن منحنی پراکندگی استفاده می گردد. یکی از این روش ها، روش انتقال فوریه دو بعدی می باشد که با دو بار اعمال تبدیل فوریه بر روی داده های برداشت شده، داده ها را از حوزه مکان-زمان ($X-t$)، به حوزه فرکانس-عدد موج ($f-k$)، تبدیل نمود. به عبارت دیگر، با اعمال یک مرتبه تبدیل فوریه زمانی بر روی داده های لرزه ای، داده ها در حوزه فرکانس-فاصله ($f-X$) به دست می آیند و با اعمال یک مرتبه تبدیل فوریه مکانی بر روی داده های حوزه ($f-X$)، داده ها به حوزه ($f-k$) انتقال می یابند. سپس، باید مقادیر فرکانس، f ، و عدد موج، k ، متناظر با حداکثر انرژی امواج سطحی به دست آیند و سرعت فاز V_p ، با استفاده از فرمول ($V_p=f/k$)، محاسبه گردد و در نهایت، با ترسیم فرکانس در برابر سرعت فاز، منحنی پراکندگی به دست خواهد آمد.

۲-۲- روش اجزا محدود و مرزهای جاذب

روش اجزای محدود^۸ (FEM) به عنوان یک روش موفقیت آمیز در مسائل انتشار امواج بکار برده شده است [۱۶-۱۸]. شبیه سازی اجزای محدود برای بارهای ضربه ای روی سطح آزاد سبب بازگشت انرژی قابل توجهی از طرف مرزهای اجزای نامحدود می شود [۱۹]. بنابراین مرزهای اجزای نامحدود برای مدل سازی های پیچیده انتشار امواج در آزمایش های امواج سطحی برای محیط دو و سه بعدی مناسب نیستند. از سوی دیگر، مرزهای جاذب تحت عناوین لایه های جاذب با افزایش میرایی^۹ (ALID) و لایه تطابق کامل^{۱۰} (PML) به نحو قابل ملاحظه ای اندازه محاسباتی و هندسی مدل عددی را کاهش می دهند [۲۰]. در این مقاله، از لایه های جاذب افزایش دمپینگ (الید) به خاطر راحتی و فراهم بودن نحوه اعمال میرایی ریلی^{۱۱}، استفاده شده است [۲۱، ۲۲]. ضخامت الیدها و به نوعی طول الیدها پارامتر تأثیرگذار بر روی اختلاف نسبی امیدانس اجزا در مرز جاذب دارد [۲۳]؛ بنابراین، جهت میرا کردن موج ها 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 موج های 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 ریلی، [CR]، می باشد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$[CR]=[M]+CK[K] \quad (1)$$

⁷ Phase velocity

⁸ Finite Element Method

⁹ Absorbing Layers using Increasing Damping

¹⁰ Perfectly Matched Layers

¹¹ Rayleigh damping

که $[M]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریسهای جرم و سختی و CM و CK به ترتیب ضرایب میرایی جرم و سختی میباشند. 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 اید استفاده شده است، به صورت تدریجی افزایش می یابند، این ضرایب به صورت مضربی از $1/5$ 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 اید و در نتیجه، بازگشت موج در مرز دولایه نشود.

۳-۲- 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 میباشند 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^{۱۲} گردد. بدین ترتیب ابعاد ماتریس قبل از تبدیل فوریه افزایش خواهد یافت [۲۵]. به طور کلی تبدیل دوگانه $f-k$ به صورت زیر است:

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

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.

$$u(x, t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(f, k) e^{i2\pi(ft-kx)} dk df \quad (3)$$

۴-۲- مشخصات مواد

روش اجزای محدود برای شبیه سازی انتشار امواج در محیط های الاستیک خطی استفاده شده است. نظر به اینکه سطح کرنش متناسب با آزمایشهای ژئوفیزیکی تقریباً خیلی کوچک میباشد بنابراین به صورت گسترده پذیرفته شده که تئوری الاستیک خطی یک چهارچوب سازگار برای تفسیر تستهای لرزه ای فراهم مینماید. با این وجود، پارامترهای کرنش-کوچک نقش قابل توجهی را برای محدوده وسیعی از مسائل ژئوتکنیک بازی میکند [۲۶، ۲۷]. در تست های لرزه ای همچون تحلیل چندایستگاهی امواج سطحی، کرنشهای الاستیک

¹² Zero padding

ایجاد شده کوچکتر از ۰,۰۰۱٪ میباشد؛ بنابراین میتوان در مدلسازی ها از محیط الاستیک خطی استفاده نمود. مشخصات محیط الاستیک خطی شامل مدول الاستیک، نسبت پواسون، جرم مخصوص و میرایی مصالح میباشد که در ادامه ارائه شده است [۲۸].

در مدلسازی امواج سطحی با نرم افزار آباکوس نیز نیاز به داشتن پارامترهای الاستیک خاک مانند مدول یانگ (E) و نسبت پواسون (μ) و همچنین چگالی (ρ) و نسبت میرایی رایلی (C_M) میباشد. (E) و (μ) را میتوان با استفاده از معادله های (۳) و (۴) محاسبه نمود.

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (4)$$

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (5)$$

۵-۲- مدل سازی

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 لید، 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 رایلی 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 ۰/۰۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده و کل زمان برداشت داده ها ۰/۵ ثانیه می باشد. میرایی اعمال شده به لایه های خاک میرایی رایلی 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].

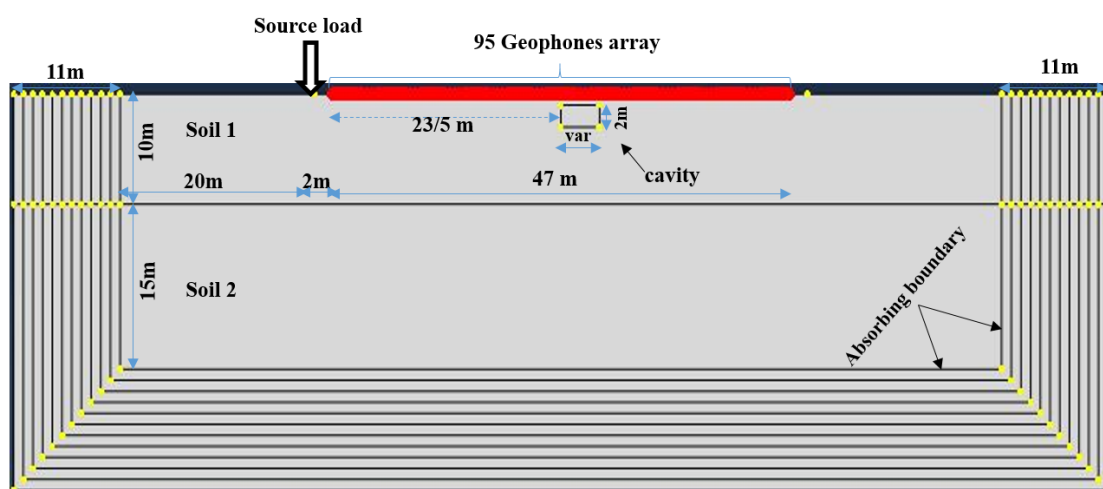
$$R(t) = (1 - 2\pi^2 f^2 t^2) e^{-\pi^2 f^2 t^2} \quad (6)$$

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

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

جدول ۱: مشخصات لایه بندی خاک

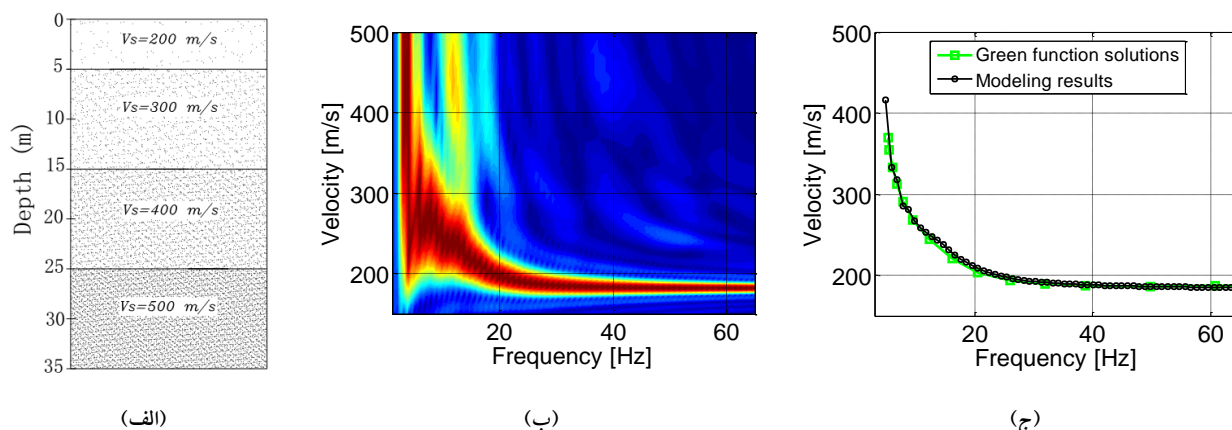
مصلح	سرعت موج برشی (m/s)	سرعت موج طولی (m/s)	مدول الاستیک (Mpa)	وزن مخصوص (kg/m ³)	نسبت پواسون	ضرایب میرایی رایلی: (CM)
خاک لایه اول	۲۰۰	۳۹۷/۰۴	۱۹۱۵۲۰	۱۸۰۰	۰/۳۳	۲/۵
خاک لایه دوم	۴۰۰	۷۹۴/۰۹	۸۰۸۶۴۰	۱۹۰۰	۰/۳۳	۲/۵
حفره	۱۷	۳۴۰	۸۶۶	۱۰	۰/۴۹۸	۲/۵



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

۲-۶- صحت سنجی

برای صحت سنجی خروجی نرم افزار آباکوس و کدهای نوشته شده در برنامه متلب از مدل خاک چهار لایه با پروفیل سرعت موج برشی مطابق شکل ۲-الف استفاده شده است [۳۳]. طیف سرعت امواج رایلی و منحنی پراکندگی مربوطه به ترتیب در شکل ۲-ب و شکل ۲-ج نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان از همخوانی قابل قبول منحنی پراکنش حاصل از نتایج مدلسازی با منحنی پراکنش حاصل از نتایج یون و ریکس (تابع گرین) دارد [۳۴]، که نشان از صحت مدلسازیها و خروجی کدهای متلب دارد.



شکل ۲. صحت سنجی نتایج روش اجزا محدود و کدهای متلب: (الف) مشخصات مدل خاک چهار لایه؛ (ب) طیف پراکندگی امواج؛ (ج) مقایسه نتایج روش اجزا محدود با نتایج تابع گرین [۳۴]

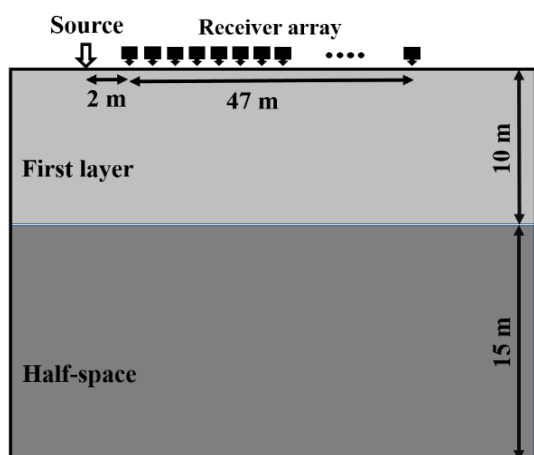
۳- بحث و نتایج

در این مقاله برای بررسی تاثیر تغییرات طول حفرات زیرسطحی، مطابق جدول فوق و شکل ۱ مشخصات لایه بندی خاک، نحوه قرارگیری لایه ها و جزئیات مدل برای شبیه سازی تعیین گردیده است. بدین منظور از ۵ مدل مختلف بهره گیری شده است. که یک مدل مربوط به حالت بدون وجود حفره و ۴ مدل مربوط با 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، ۶ 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 و بدین ترتیب خطای اندازه گیری در مقابل گیرنده های ۱۲-۲۴-۴۸ عددی کاهش خواهد یافت. در شکل ۱ مدل دولایه در نظر گرفته شده است که ضخامت لایه اول ۱۰ متر و ضخامت لایه دوم یا نیم فضا ۱۵ متر می باشد.

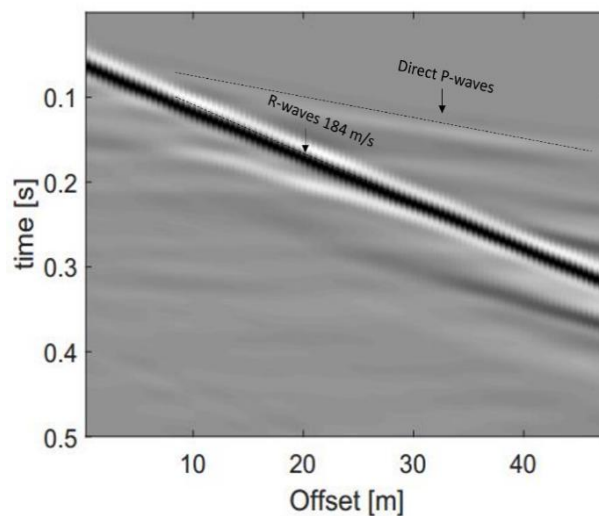
نتایج بدست آمده در فضای میدان موج، طیف پراکندگی، فیلتر داده های لرزه ای در حوزه زمان-فاصله و حوزه فرکانس-فاصله مربوط به هر مدل ترسیم گردیده و سپس نتایج حاصله مورد ارزیابی و مقایسه قرار داده شده است. در بخش های زیر ابتدا خاک دو لایه بدون وجود حفره و سپس تاثیر تغییر ابعاد طولی حفره مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- بررسی حالت بدون وجود حفره

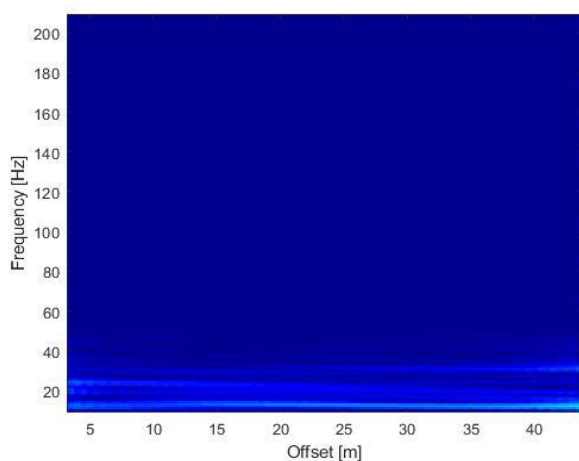
برای بررسی اثر وجود حفره ابتدا حالت بدون وجود حفره مورد بررسی قرار داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در شکل ۳-الف شکل شماتیک محیط با مشخصات مندرج در جدول شماره ۱ آورده شده است. در شکل ۳-ب فضای میدان امواج ترسیم شده است که امواج مستقیم رایلی، با توجه به اینکه $V_R \approx 0.92V_S$ ، سرعت موج رایلی 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 ۳-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 تقریبا برابر پخش شده اند، در واقع انرژی متمرکز شده ای در فاصله مشخصی دیده نمی شود. در شکل ۳-د طیف پراکندگی امواج ترسیم گردیده است که سرعت فازی امواج رایلی در برابر فرکانس به تصویر کشیده شده است.



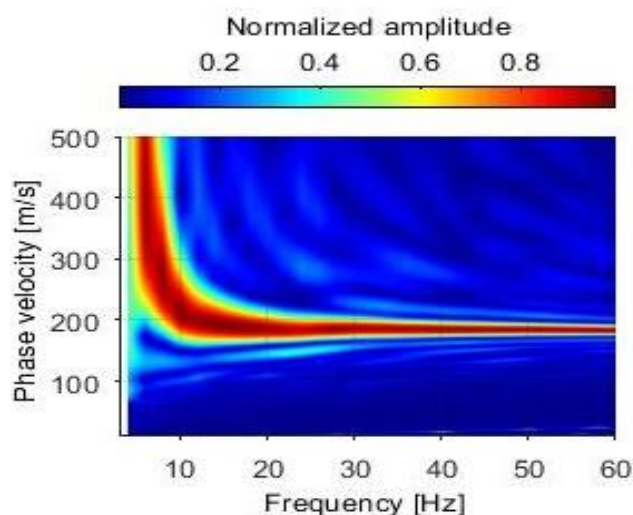
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

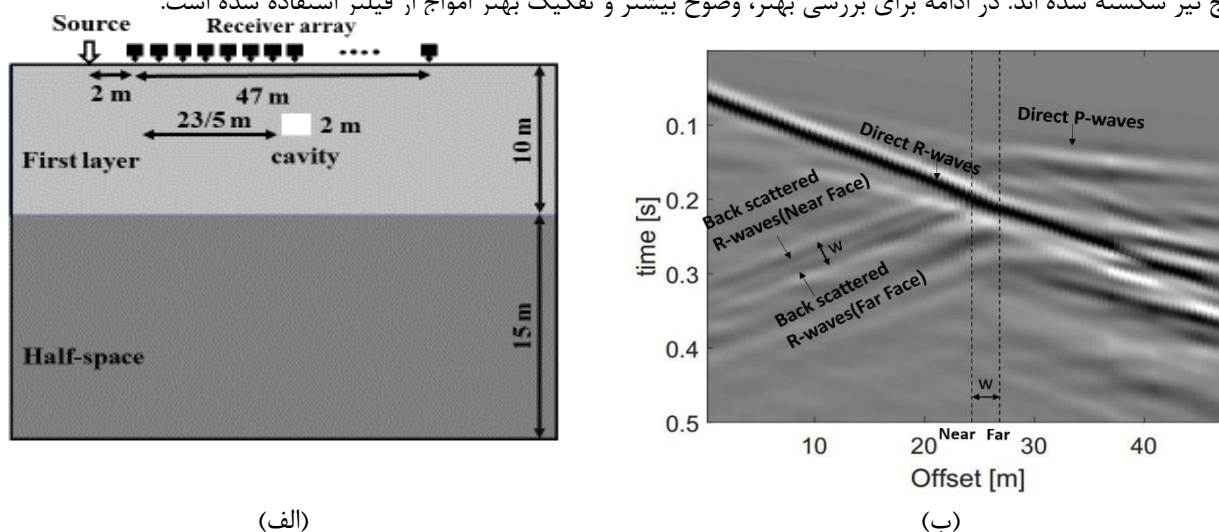
شکل ۳: نتایج به دست آمده برای مدل بدون حفره: (الف) شماتیک مدل، (ب) میدان امواج در فضای زمان - فاصله، (ج) فضای فرکانس - فاصله، (د) منحنی پراکندگی

۲-۳- تاثیر حفره به طول ۲ متر

در شکل ۴- 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 ۴-ب میدان امواج ترسیم گردیده است که محور افقی، مکان ژئوفون ها را نشان می‌دهد که از فاصله ۱ تا ۴۸ متری ترسیم شده است و محور قائم آن زمان ثبت داده های آزمایش می‌باشد. همانطور که در شکل ۴-ب مشاهده می‌شود حفره مانند منبع لرزه‌ای جدید امواج را منتشر

می‌کند. امواج رایلی بازگشتی^{۱۳} 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 می‌باشد. این امواج بازگشتی بعد از حفره هم وجود دارند ولی به دلیل تداخل با امواج مستقیم به وضوح قبل از حفره دیده نمی‌شوند. اگر اندازه طول حفره W1 باشد و فاصله امواج رایلی بازگشتی از مرز دور و نزدیک در صفحه ی میدان امواج W2 باشد. حاصل $\frac{W_1}{W_2}$ برای تمامی حالت های زیر مقداری ثابت است. از این رو محور های طولی و عمودی به طوری تنظیم گردیده است که این مقدار ثابت برابر ۱ باشد تا درک بهتری از تصاویر حاصل شود. همانطور که مشاهده می‌شود برداری با اندازه W در تمامی حالت ها با ابعاد مختلف در فاصله مرز دور و نزدیک حفره موازی بر محور فاصله ترسیم شده است که همان خط با همان اندازه در فضای میدان امواج در صفحه x-t، در حد فاصل امواج رایلی بازگشتی تصویر شده است.

زمانی که امواج مستقیم و امواج بازگشتی از محل حفره فاصله گرفته اند گیرنده های بالای حفره سرعت هایی را در آن زمان ها ثبت کرده اند که نشان از محبوس شدن انرژی دارد. در حالت بدون وجود حفره (شکل ۳-ب) مشاهده شد که امواج رایلی مستقیم (Direct R-waves) بدون هیچ شکستگی و انحرافی در میدان امواج با دامنه بیشتر نشان داده شده اند که این مسیر در حالت وجود حفره شکسته شده که نشان از وجود حفره با سرعت متفاوتی از لایه اول دارد و این شکستگی رو به پایین می‌باشد. امواج طولی مستقیم (Direct P-waves) با دامنه کمتر و سرعت بیشتر از امواج رایلی در بالای تصویر دیده می‌شود که در اثر وجود حفره در مرز نزدیک و دور حفره این امواج نیز شکسته شده اند. در ادامه برای بررسی بهتر، وضوح بیشتر و تفکیک بهتر امواج از فیلتر استفاده شده است.



(الف)

(ب)

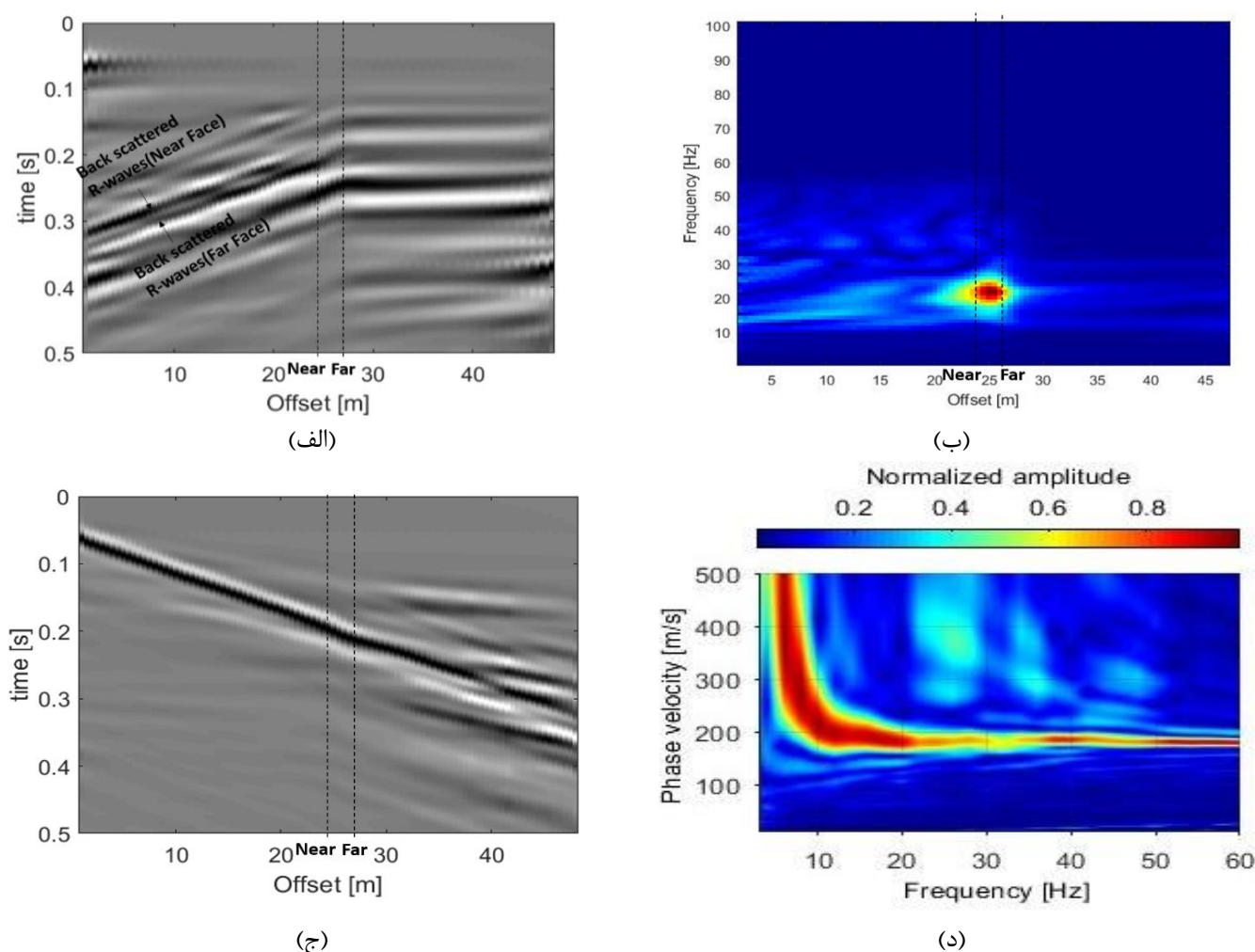
شکل ۴: نتایج مدل سازی برای خاک دو لایه با حفره به طول ۲ متر: (الف) شماتیک مسئله، (ب) میدان امواج در فضای زمان-فاصله قبل از فیلتر

شکل ۵-الف حاصل کسر امواج شکل ۴-ب از امواج ۵-ج است، در این حالت مشاهده می‌گردد امواج رایلی و امواج طولی بازگشتی با وضوح بیشتری دیده می‌شوند یا به عبارتی خطوط مربوط به امواج بازگشتی به دلیل داشتن دامنه بالاتر نسبت به دیگر امواج، دارای وضوح بهتر می‌باشد که این موضوع نشان از تاثیر خوب فیلتر در وضوح تصاویر و در عین حال تفکیک امواج دارد. شکستگی که در این خطوط در زمان های مختلف دیده می‌شود اثر مرزهای حفره هستند که در شکل ۴-ب با وضوح کمتری دیده می‌شوند. این شکستگی در مرز دور در این حالت از فیلتر بهتر نمایان شده، ولی در شکل ۵-ج شکستگی در مرز نزدیک بهتر دیده می‌شود. از شکل ۵-ج میتوان استنباط کرد که در خطوط امواج رایلی مستقیم و امواج طولی مستقیم شکستگی وجود دارد و قابل توجه است که این شکستگی و یا پرش رو به پایین ناشی از حضور حفره است. در شکل ۵-الف و شکل ۵-ج از فیلتر فرکانس- عدد موج استفاده گردیده است. بدین گونه که ابتدا با استفاده از تبدیل فوریه دو بعدی امواج از حوزه زمان - فاصله به حوزه فرکانس- عدد موج انتقال می‌یابند و با استفاده از حذف بخشی از فرکانس ها و عدد

¹³ Back scattered R-waves

موج متناظر با آن فیلتر انجام می‌شود. سپس با استفاده از تبدیل معکوس دو بعدی فوریه داده‌های فیلتر شده به حوزه زمان-مکان تبدیل می‌شوند.

در شکل ۵-ب امواج بازگشتی در فضای زمان - فاصله در شکل ۵-الف 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 می‌شود که نشان از حضور حفره و بیانگر ابعاد طولی حفره و محل دقیق آن می‌باشد. در شکل ۵-د منحنی پراکندگی امواج ترسیم گردیده، که با مقایسه در حالت بدون وجود حفره در فرکانس های ۱۲ تا ۱۸ پرشی کوچک رو به بالا در طیف پراکندگی مشاهده شده است و همچنین در فرکانس های ۲۰ تا ۵۰ انرژی و دامنه کمتر امواج رایلی در طیف پراکندگی نمایان شده است.

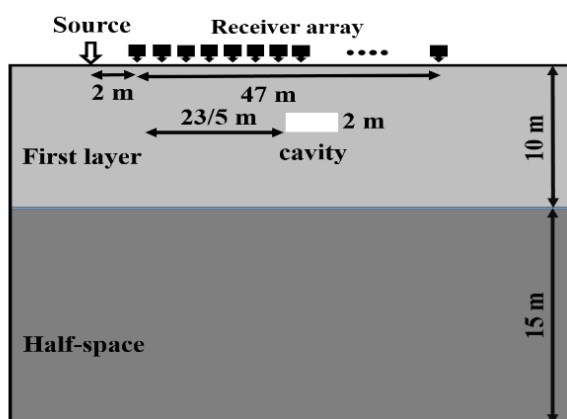


شکل ۵: نتایج مدل سازی برای خاک دو لایه با حفره به طول ۲ متر: (الف) میدان امواج در فضای زمان-فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم، (ب) فضای فرکانس - فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم، (ج) میدان امواج بعد از فیلتر امواج بازگشتی، (د) منحنی پراکندگی

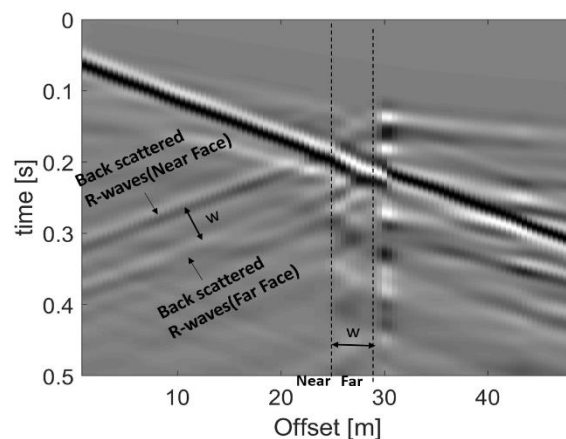
۳-۲-۲- حفره توخالی به طول ۴ متر

در این قسمت از حفره به طول ۴ متر و ارتفاع ۲ متر استفاده شده است. در شکل ۶-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.

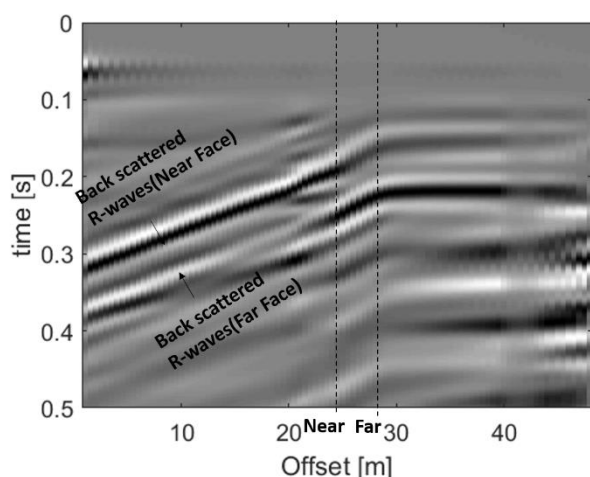
در شکل ۶-ج تغییر سرعت که در شکل به صورت شکستگی ایجاد شده در مرز دور در زمان های متفاوت مشخص است و در شکل ۶-ه شکستگی در مرز نزدیک مشاهده می شود. شکل ۶-د حوزه فرکانس-فاصله را نشان می دهد. در قسمتی که حفره وجود دارد فرکانس ها با انرژی بیشتر متمرکز شده است که با رنگ قرمز و نارنجی در حد فصل مرز دور و نزدیک مشخص شده اند. و طیف پراکندگی در شکل ۶-و نشان می دهد در فرکانس ۱۲ تا ۲۰ پرش رو به بالا اتفاق افتاده و در فرکانس ۲۰ پرش رو به پایین در طیف پراکندگی رخ داده است.



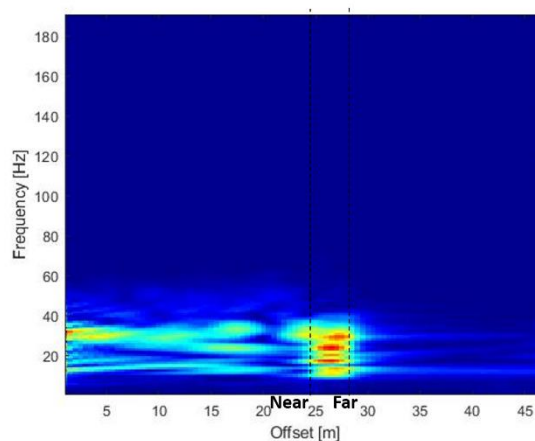
(الف)



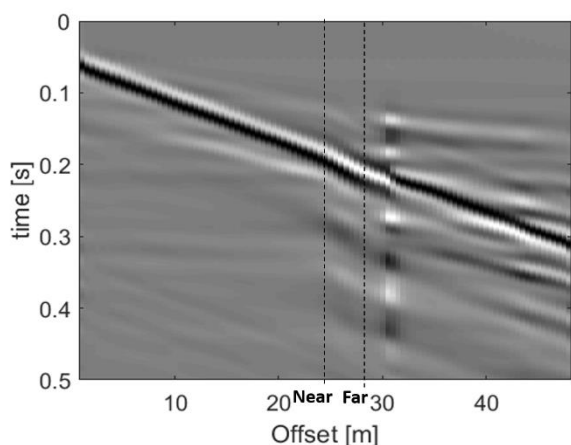
(ب)



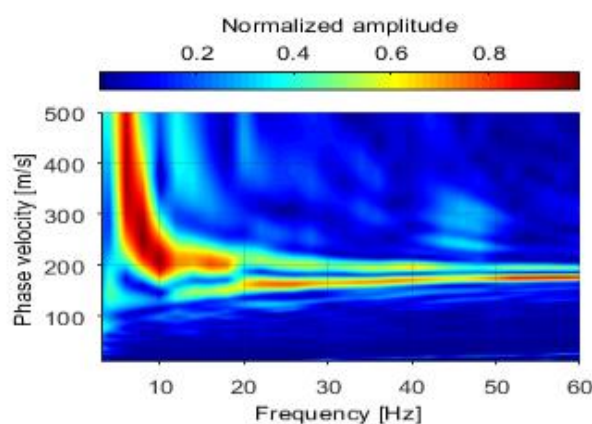
(ج)



(د)



(ه)

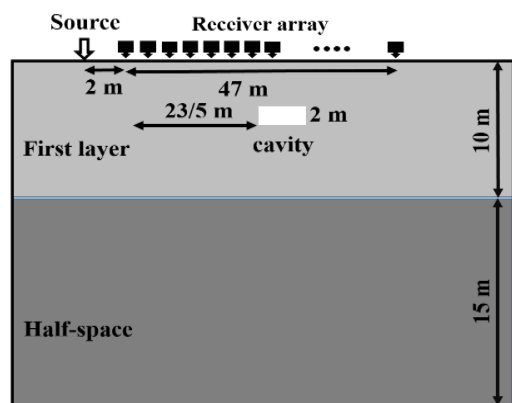


(و)

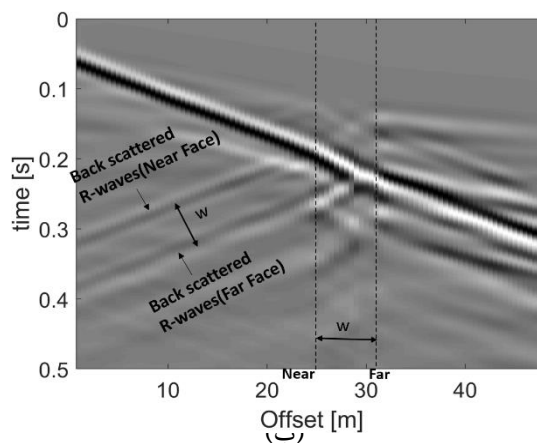
شکل ۶: نتایج مدل سازی برای خاک دو لایه با حفره به طول ۴ متر: الف) شماتیک مسئله، ب) میدان امواج در فضای زمان-فاصله قبل از فیلتر، ج) میدان امواج در فضای زمان-فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم، د) فضای فرکانس - فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم، ه) میدان امواج بعد از فیلتر امواج بازگشتی، و) منحنی پراکندگی

۳-۲-۳- حفره توخالی به طول ۶ متر

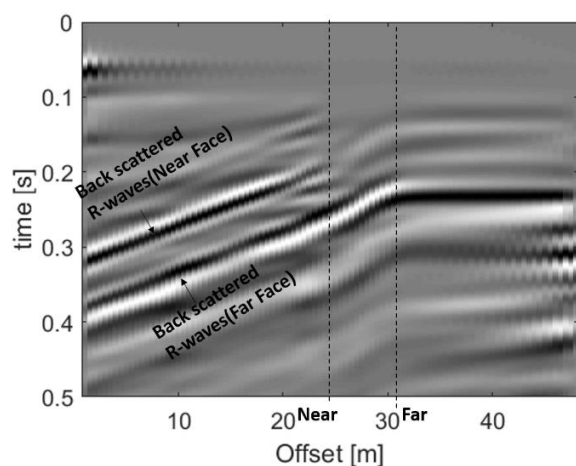
در این قسمت از حفره به طول ۶ متر و ارتفاع ۲ متر استفاده شده. شکل ۷-الف شماتیک مسئله را بیان میکند که مانند قسمت های قبل مرز نزدیک در $23/5$ متری از اولین گیرنده قرار دارد. در شکل ۷-ب با افزایش طول حفره تو خالی امواج بازگشتی نیز با تاخیر زمانی بیشتری با سرعت های یکسان و برابر سرعت رایلی مستقیم مشاهده می شود. با افزایش طول حفره در این قسمت، به تناسب افزایش طول در مقایسه با حفره های به طول ۲ و ۴ متر فاصله امواج بازگشتی نیز از یکدیگر بیشتر شده است. 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 ۷-ج تغییر سرعت که در شکل به صورت شکستگی ایجاد شده در مرز دور در زمان های متفاوت مشخص است و در شکل ۷-ه شکستگی در مرز نزدیک مشاهده می شود. همچنین شکستگی موج بازگشتی در مرز نزدیک در شکل ۷-د مشاهده می شود. در حوزه فرکانس-فاصله نیز به خوبی در قسمتی که حفره وجود دارد فرکانس ها با انرژی بیشتر متمرکز شده است. و طیف پراکندگی در شکل ۷-و نشان می دهد در فرکانس ۳ تا ۳۰ پرش رو به بالا اتفاق افتاده و طیف پراکندگی به دو قسمت تبدیل بالا و پایین تبدیل شده است.



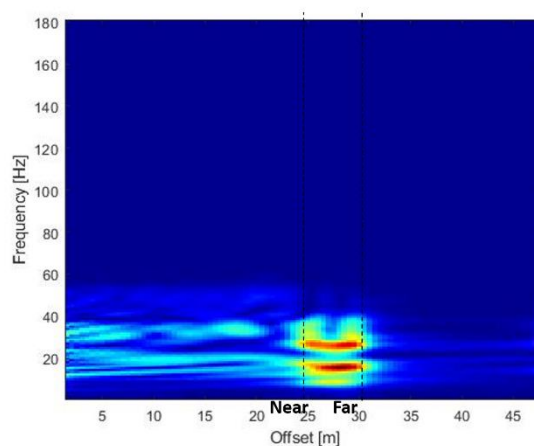
(الف)



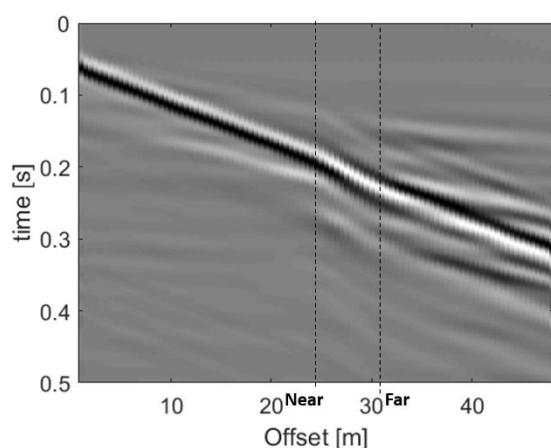
(ب)



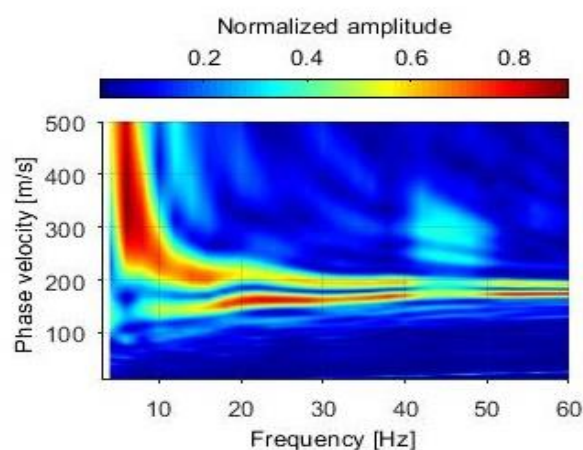
(ج)



(د)



(ه)

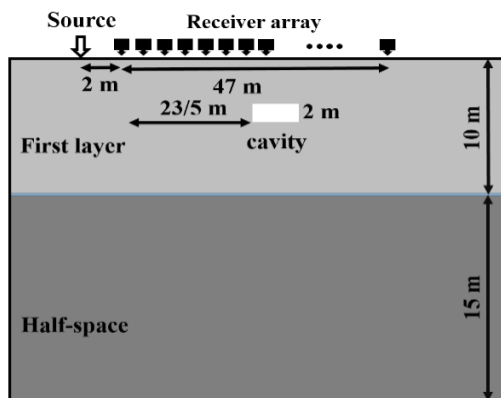


(و)

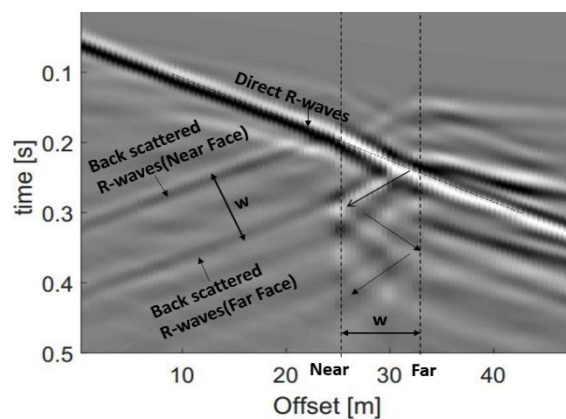
شکل ۷: نتایج مدل سازی برای خاک دو لایه با حفره به طول ۶ متر: الف) شماتیک مسئله، ب) میدان امواج در فضای زمان-فاصله قبل از فیلتر، ج) میدان امواج در فضای زمان-فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم، د) فضای فرکانس - فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم، ه) میدان امواج بعد از فیلتر امواج بازگشتی، و) منحنی پراکندگی

۴-۲-۳- حفره توخالی به طول ۸ متر

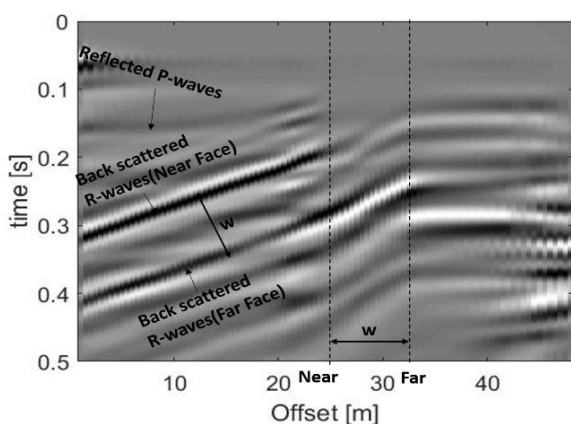
در این قسمت از حفره به طول ۸ متر و ارتفاع ۲ متر استفاده شده و در شرایط یکسان با حالت بدون وجود حفره و حفره با طول ۲ متر قابل مقایسه است. در شکل ۸-ب با افزایش طول حفره تو خالی امواج بازگشتی نیز با تاخیر زمانی بیشتری با سرعت های یکسان و برابر سزعت رایلی مستقیم مشاهده می شود. همچنین امواج مستقیم طولی دچار 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 ۸-ج تغییر سرعت که در شکل به صورت شکستگی ایجاد شده در مرز دور در زمان های متفاوت مشخص است و در شکل ۸-ه شکستگی در مرز نزدیک مشاهده می شود. همچنین شکستگی موج بازگشتی در مرز نزدیک در شکل ۸-د نمایانگر شده است. در حوزه فرکانس - فاصله نیز به خوبی در قسمتی که حفره وجود دارد فرکانس ها با انرژی بیشتر متمرکز شده است. و طیف پراکندگی در شکل ۸-و نشان می دهد در فرکانس ۳ تا ۳۰ پرش رو به بالا اتفاق افتاده است و طیف پراکندگی به دو قسمت بالا و پایین تبدیل شده است.



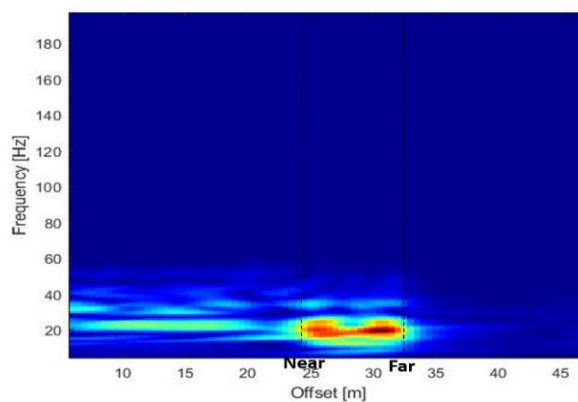
(الف)



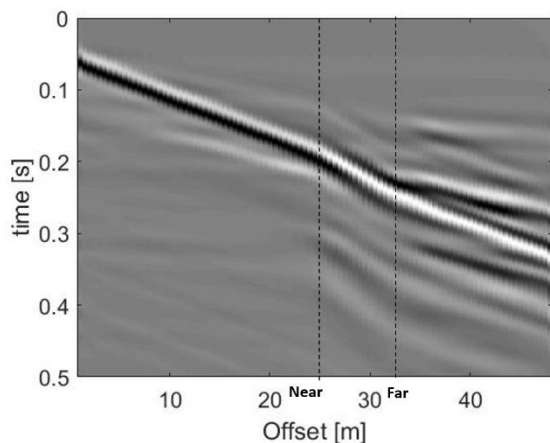
(ب)



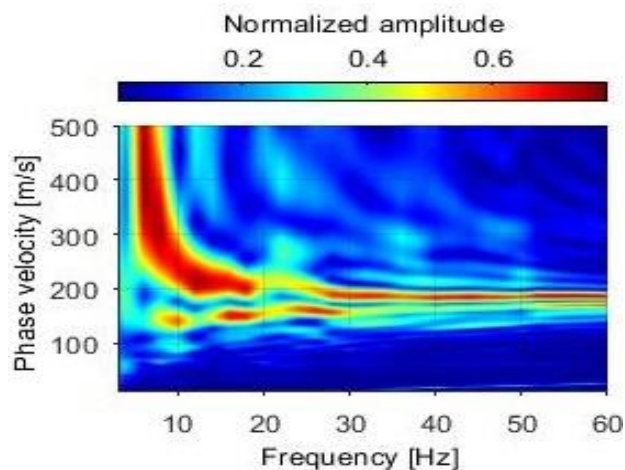
(ج)



(د)



(ه)



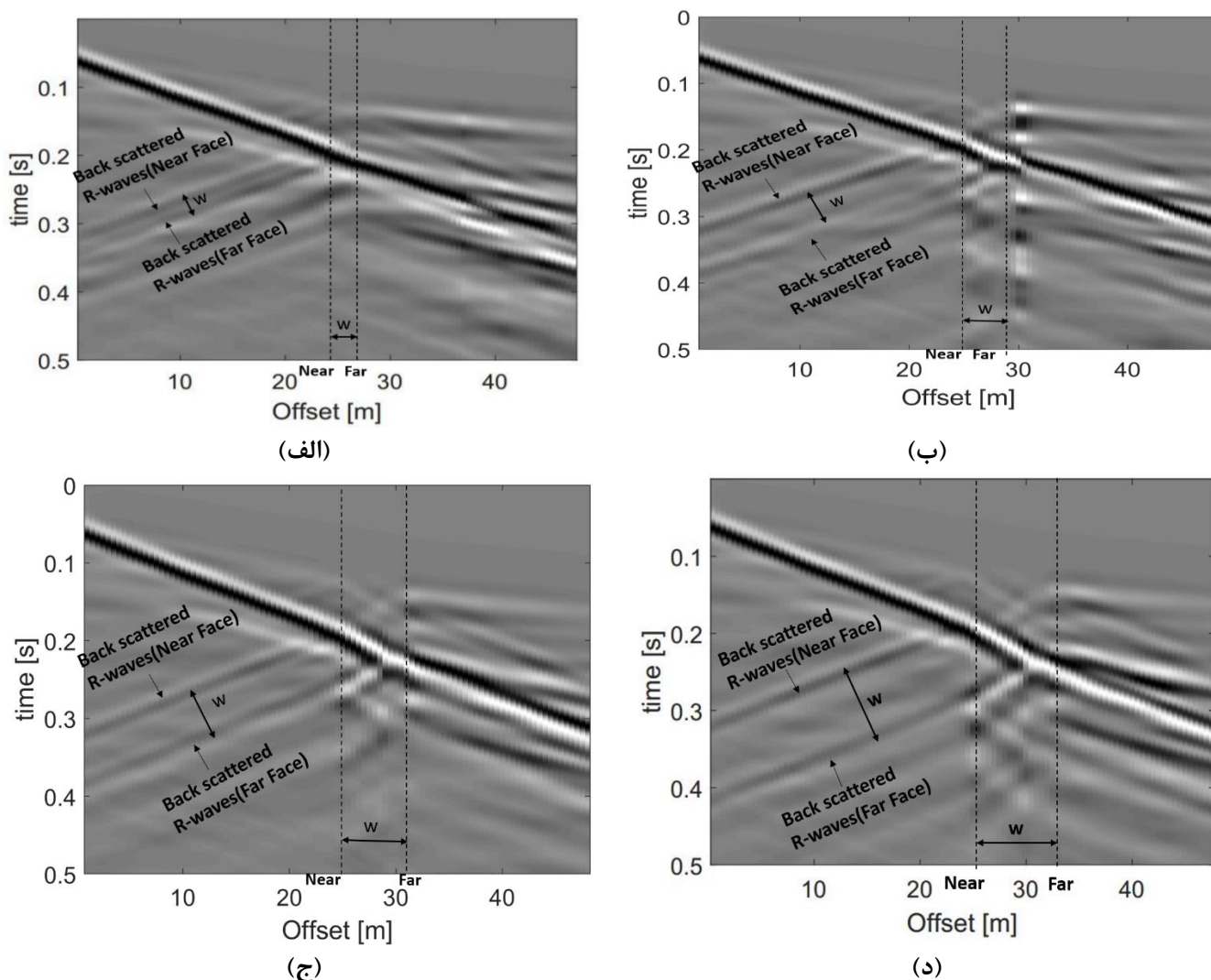
(و)

شکل ۸: 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) میدان امواج در فضای زمان-فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم، (د) فضای فرکانس - فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم، (ه) میدان امواج

۳-۳-۳- ارزیابی نتایج

۳-۳-۳-۱- میدان امواج قبل از فیلتر

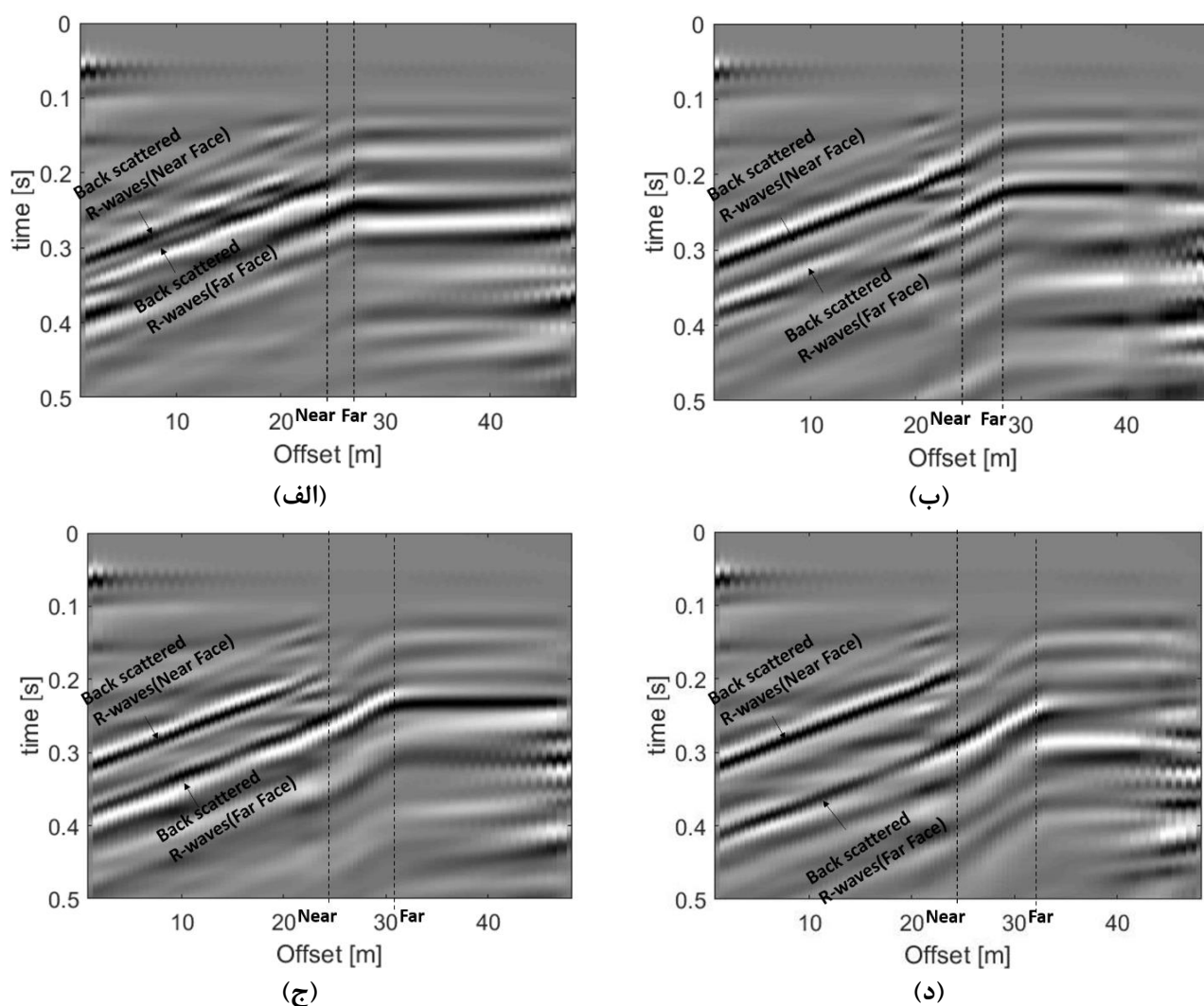
هرچه ابعاد طولی حفره بزرگ تر باشد امواج رایلی بازگشتی نیز به همان تناسب از مرز دور و نزدیک حفره بازگشت داده می‌شوند. از این رو محور های طولی و عمودی به طوری تنظیم گردیده است که این مقدار ثابت $\frac{W_1}{W_2}$ برابر ۱ باشد تا درک بهتری از تصاویر حاصل شود. همانطور که مشاهده می‌شود خطی با اندازه W در تمامی حالت ها با ابعاد مختلف در فاصله مرز دور و نزدیک حفره در روی محور فاصله کشیده شده است که همان خط با همان اندازه در فضای میدان امواج در صفحه $t-x$ در حدفاصل مرز دور و نزدیک حفره تصویر شده است. در تمامی حالت های (الف) تا (د) که ابعاد طولی حفره از ۲، ۴، ۶ و ۸ متر تشکیل شده است در شکل ۹ مشاهده می‌شود، فاصله امواج رایلی بازگشتی مرز دور و نزدیک حفره به تناسب با بزرگ شدن ابعاد طولی حفره نیز زیاد می‌شود و در تمامی حالات فاصله مرز دور و نزدیک حفره و امواج بازگشتی آن در تصویر نسبتی ثابت دارند که در اینجا به دلیل تنظیم محور ها با هم برابر می‌باشند. لازم به ذکر است وضوح کم تصویر امواج بازگشتی در تمامی حالت ها مشاهده می‌شود که در ادامه جهت بالا بردن وضوح تصاویر از فیلتر کردن امواج استفاده شده است.



شکل ۹: ارزیابی نتایج مدل‌سازی در فضای زمان - فاصله قبل از فیلتر: (الف) حفره به طول ۲ متر، (ب) حفره به طول ۴ متر، (ج) حفره به طول ۶ متر، (د) حفره به طول ۸ متر

۲-۳-۳- میدان امواج بعد از فیلتر

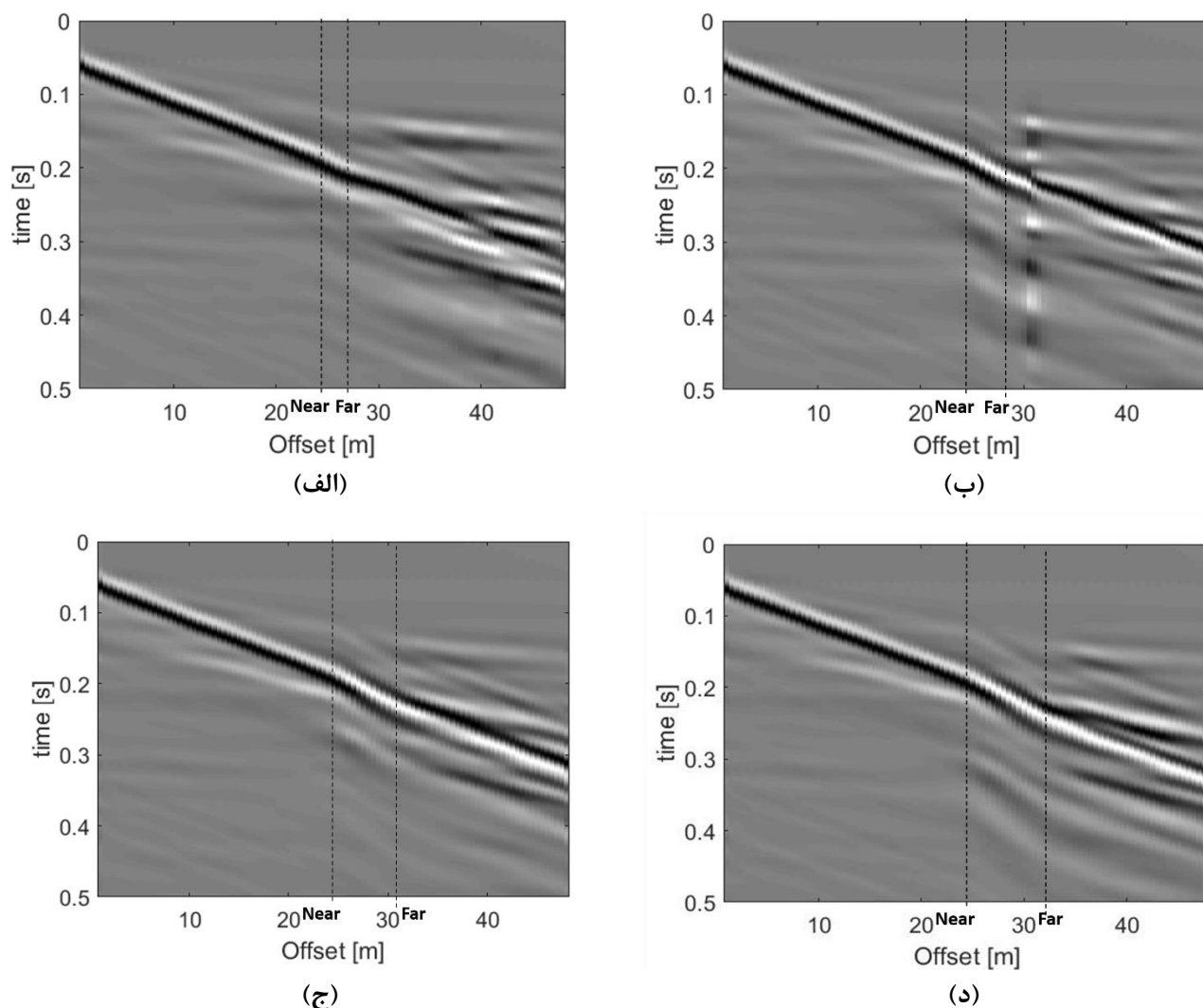
امواج بازگشتی در فضای میدان موج با حضور امواج مستقیم که دامنه های بالاتری را شامل می شوند، وضوح کمتری دارند و برای بالاتر بردن وضوح نیاز به فیلتر امواج داریم تا امواج بازگشتی با دامنه های کمتر با وضوح بیشتری دیده شوند. در این مورد نیز برای وضوح بیشتر تصاویر و نیز تفکیک بهتر امواج از فیلتر استفاده گردیده است. در شکل ۱۰-الف که حفره با طول ۲ متر می باشد مرز دور حفره در فاصله ۲۶/۵ متری قرار دارد که در همان مکان در زمان های مختلف بازگشت امواج در نواحی شکستگی به خوبی بیانگر مرز دور حفره است. شکستگی ضعیف و کوچکی هم در مکان مرز نزدیک اتفاق افتاده است. در شکل ۱۰-ب، ج و د که امواج رایلی بازگشتی بعد از فیلتر را برای حفره ها ۴، ۶ و ۸ متری و مرز دور در فاصله ی ۲۸/۵، ۳۰/۵ و ۳۲/۵ متری را نشان میدهد، نیز از روی شکستگی، مرز نزدیک و مخصوصا مرز دور به وضوح قابل تشخیص است. در این حالت امواج بازگشتی با دامنه های بیشتر و تصویر مشکی رنگ نشان از وضوح بالا جهت تشخیص این امر دارد.



شکل ۱۰: ارزیابی نتایج مدلسازی در فضای زمان - فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم: الف) حفره به طول ۲ متر، ب) حفره به طول ۴ متر، ج) حفره به طول ۶ متر، د) حفره به طول ۸ متر

شکل زیر حاصل تفریق میدان امواج قبل از فیلتر و میدان امواج بعد از فیلتر امواج مستقیم است. در واقع در اینجا نیز امواج بازگشتی که گیرنده های قبل از حفره از سمت چپ آن ها را دریافت می کردند فیلتر شده اند تا تغییرات میدان امواج در اثر وجود حفرات

به ابعاد طولی ۲، ۴، ۶ و ۸ متر بعد از مرز نزدیک مشاهده شود. شکستگی امواج ریلی مستقیم رو به بالا مشاهده می‌شود که در مکان افقی مرز نزدیک روی داده است که این شکستگی در مرز دور به شکل تورفتگی یا رو به پایین نشان داده شده است. در شکل ۱۱-الف که مربوط به حفره با طول ۲ متر است در مکان افقی ۲۶/۵ متر، شکل ۱۱-ب، ج و د مربوط به حفره با طول ۴، ۶ و ۸ متر در مکان افقی ۲۸/۵، ۳۰/۵ و ۳۲/۵ متری شکستگی رو به پایین مشاهده می‌شود.

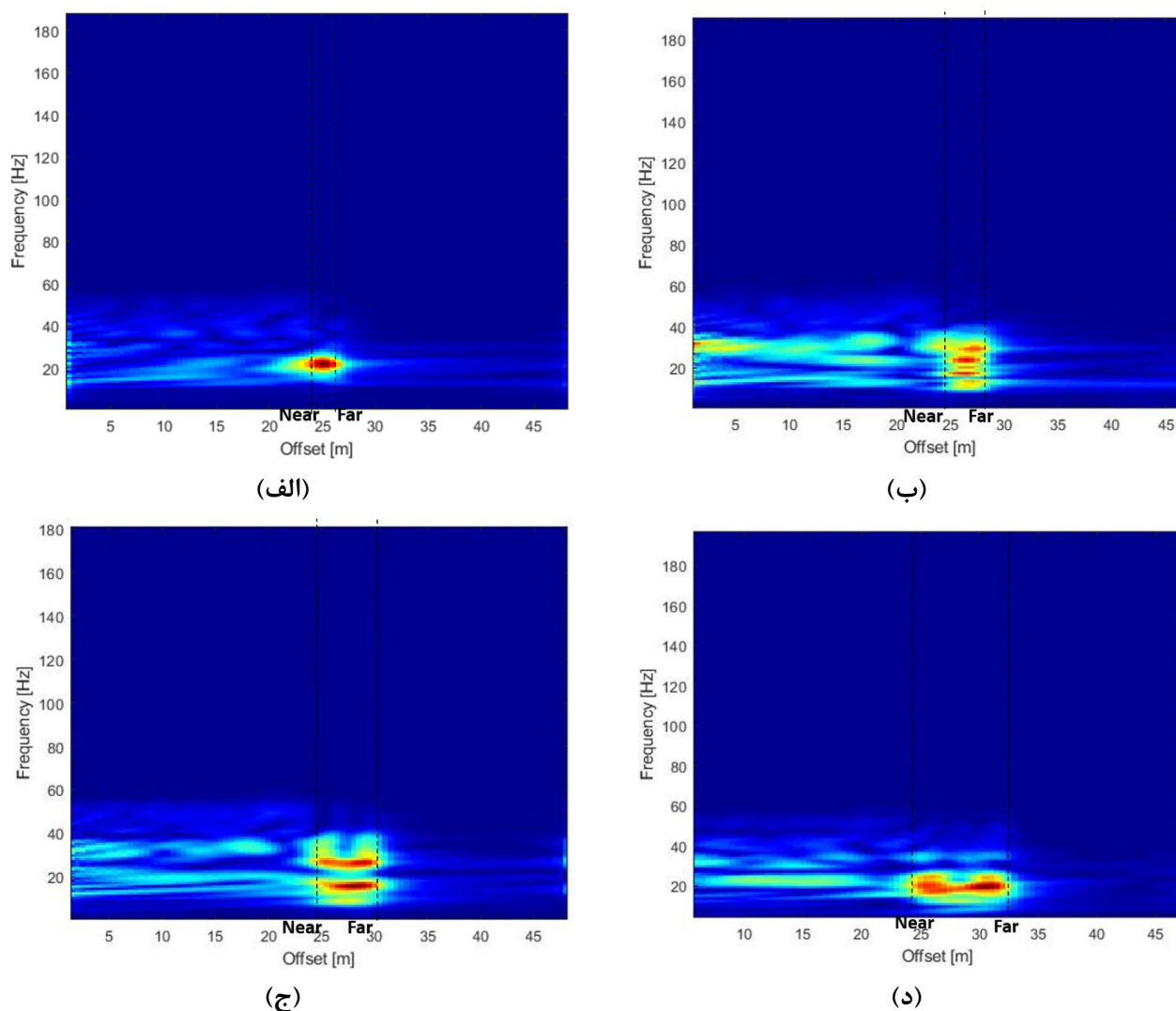


شکل ۱۱: ارزیابی نتایج مدل‌سازی در فضای زمان - فاصله بعد از فیلتر امواج بازگشتی: الف) حفره به طول ۲ متر، ب) حفره به طول ۴ متر، ج) حفره به طول ۶ متر، د) حفره به طول ۸ متر

۳-۳-۳- حوزه فرکانس - فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم

تصاویر نشان داده شده در شکل ۱۲ داده‌های فیلتر شده امواج ریلی مستقیم هستند. که پس از فیلتر در حوزه فرکانس - فاصله و تبدیل به حوزه زمان - فاصله، سپس با تبدیل فوریه یک بعدی از حوزه زمان - فاصله به حوزه فرکانس - فاصله تبدیل شده اند. در فاصله ی افقی که حفره وجود دارد فرکانس های مربوط به آن دارای انرژی بیشتری هستند. در حفره ها به طول های ۶ و ۸ متر تمرکز انرژی بیشتر در مرزهای حفره دیده می‌شوند و می‌توان گفت تمرکز انرژی در مرزهای حفره‌های مستطیلی بیشتر از مرکز حفره هستند. در شکل های زیر برای حفره های با طول ۲، ۴، ۶ و ۸ متری در حدفاصل مرز دور و نزدیک حفره ها انرژی و دامنه زیاد فرکانسی با رنگ قرمز و

نارنجی مشاهده می‌شود. طول‌های بدست آمده از تحلیل‌های این بخش برای شکل‌های موجود در شکل ۱۲، با تقریب بسیار زیادی به ترتیب برابر ۲، ۴، ۶ و ۸ متر حاصل شده است. از این رو این روش برای تعیین ابعاد طولی حفره‌های سطحی مناسب می‌باشد.



شکل ۱۲: ارزیابی نتایج مدل‌سازی در فضای فرکانس - فاصله بعد از فیلتر امواج مستقیم: الف) حفره به طول ۲ متر، ب) حفره به طول ۴ متر، ج) حفره به طول ۶ متر، د) حفره به طول ۸ متر

نتیجه گیری

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 ۴ مدل حفره دار با ارتفاع برابر ۲ متر و طول‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ متری شبیه‌سازی شده‌اند. مقایسه نتایج حاصله در فضای زمان-فاصله قبل از فیلتر، در فضای فرکانس-فاصله و فضای زمان-فاصله بعد از فیلتر و طیف پراکندگی امواج رایلی انجام شده است. ارزیابی نتایج حاصله نشان دادند که:

- بهره‌گیری ترکیبی و همزمان از نتایج امواج رایلی و طولی جهت درک و شناخت بهتر وضعیت حفرت زیرسطحی می‌تواند بسیار مفید و کارآمد باشد.

- نسبت فاصله امواج بازگشتی رایلی به فاصله مرز دور و نزدیک حفره مقدار ثابتی است. محل تقاطع برخورد امواج طولی و رایلی مستقیم با امواج طولی و رایلی بازگشتی مرزهای حفره را بیان می‌کند.
- امواج رایلی مستقیم دامنه‌های بیشتری از امواج رایلی بازگشتی دارند و در امواج رایلی بازگشتی نیز امواجی که از مرز نزدیک حفره بازگشت داده می‌شوند دامنه بیشتر از امواج رایلی منتشر شده از مرز دور دارند. نتایج نشان دادند فیلتر کردن امواج کارایی بالایی جهت بالا بردن وضوح و تفکیک امواج مستقیم و بازگشتی دارند.
- محل شکستگی امواج در فضای میدان موج، مرزهای حفره را نشان می‌دهند، زمانی که امواج مستقیم فیلتر می‌شوند محل شکستگی امواج رایلی بازگشتی مرز نزدیک و به خصوص مرز دور حفره را به خوبی نشان می‌دهد و زمانی که امواج بازگشتی فیلتر می‌شوند مرز نزدیک حفره به خوبی نمایان می‌شود و شکستگی رو به پایین ناشی از حضور حفره در مسیر میدان امواج رایلی مستقیم متناسب با طول حفره در مرز نزدیک و سپس شکستگی رو به بالا در مرز دور رخ داده است.
- پس از فیلتر امواج مستقیم، امواج بازگشتی در فضای فرکانس-مکان محل و ابعاد طولی حفره را به خوبی نشان می‌دهند. 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.
- طیف پراکندگی با حضور حفره در فرکانس‌های مشخصی دچار پرش، جداشدگی و تغییر دامنه در فرکانس‌های مختلف می‌شود که هرچه طول حفره بزرگتر باشد اختلالات بیشتری را بوجود می‌آورد. بدین صورت که برای حفره به طول‌های بالاتر از ۴ متر منحنی پراکندگی به دو قسمت تبدیل شده است و در سرعت فازی پایین تری فرکانس‌ها با انرژی بیشتری نمایان گردیده است.

مراجع

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. 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.
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. Nasserri-Moghaddam, 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.
33. Mirassi, S., H. Rahnema, and A. Eshaghi, *Evaluation of surface wave components for identification of subsurface cavities using 2D and 3D finite element modeling method*. Journal Of Research on Applied Geophysics, 2020. **6**(2): p. 219-233.
34. Yoon, S. and G.J. Rix, *Near-field effects on array-based surface wave methods with active sources*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009. **135**(3): p. 399-406.