

Effect of frequency content of seismic source load on Rayleigh and P waves in soil media with cavity

Hossein Rahnema¹, Sohrab Mirassi^{2*}

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

ABSTRACT

Knowledge of subsurface characteristics has always been of interest to Geotechnical and geological engineers, especially when there is a potential risk of occurrence of subsurface anomalies such as a cavity and sinkhole. Identification of these anomalies are become more difficult at higher depths due to the reduced resolution and accuracy of recorded data. It is therefore essential to evaluate the results of both Rayleigh (R) and longitudinal (P) waves, especially for cavity in high depth. In this paper, it is attempted to investigate the ability of R and P waves to detect cavities in different depths of soil media. Also, with regard to the effects of frequency content of source load on wave field domain, various types of source load such as Ricker wavelet with central frequency of 100, 50 and 20 Hz, hammer impact and short-time impact are used. The results show that the frequency content and predominant frequency of source load have a significant effects on penetration depth and wave field resolution. Furthermore, filtering methods and separating the R and P waves could be much helpful to identify cavities in shallow and high depth by considering the wave field of the R and P waves, respectively. Hence, based on the Finite Element Modeling results, most of the source load have a good, moderate and weak influence on the wave field of soil models with cavity at depth of 2, 6 and 10 meters, respectively. Also, in case of a soil model with cavity at depth of 20 meters, P-wave has a better resolution compared to R-wave which is almost indiscernible. Generally, it could be represent that the wave field of P-wave must be considered when the depth of the cavity is increased.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 March 2019

Revise Date: 01 June 2019

Accept Date: 02 June 2019

Keywords:

Source load
Frequency content
Rayleigh wave
P-wave
Cavity
Wave field

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.176403.1808

*Corresponding author: Sohrab Mirassi
Email address: S.mirasi@sutech.ac.ir

ارزیابی تأثیر محتوای فرکانسی بارهای لرزه‌ای به منظور شناسایی ناهنجاری‌های

زیرسطحی با استفاده از امواج رایلی و طولی

حسین رهنما^۱، سهراب میراثی^{۲*}

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

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

چکیده

آگاهی از خصوصیات زیرسطحی همواره مورد توجه مهندسان بوده است به خصوص زمانی که احتمال وجود مخاطرات ناشی از ناهنجاری‌های زیرسطحی همچون فروچاله یا حفره مدنظر باشد. شناسایی موقعیت این ناهنجاری‌ها در اعماق بیشتر به خاطر کاهش وضوح و دقت داده‌های برداشت‌شده هنوز موضوعی چالش‌برانگیز و نیازمند مطالعات بیشتر می‌باشد. در این مقاله با استفاده از روش اجزا محدود، تأثیر انواع بارهای لرزه‌ای به منظور شناسایی حفرات زیرسطحی مورد ارزیابی واقع شده است بارهای لرزه‌ای شامل ضربه چکش، ضربه سینوسی، ضربه کوتاه و بار ریکر با فرکانس‌های حداکثر ۱۰۰، ۵۰ و ۲۰ هرتز می‌باشند. به علاوه اینکه با روش‌های فیلتر کردن و جداسازی امواج در فضای میدان موج، توانایی امواج طولی و رایلی جهت شناسایی حفرات در اعماق ۲، ۶، ۱۰ و ۲۰ متر مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان دادند که محتوای فرکانسی و فرکانس غالب بار ارتعاشی، تأثیر قابل توجهی بر وضوح تصاویر و عمق نفوذ دارند. به عنوان مثال، بارهای لرزه‌ای ریکر ۱۰۰ هرتز، ضربه چکش و ضربه کوتاه با محتوای فرکانسی بالا برای شناسایی حفرات در عمق ۲ متر دارای وضوح خوب، عمق ۶ متر دارای وضوح متوسط، عمق ۱۰ متر دارای وضوح ضعیف‌تر می‌باشند و برای حفره در عمق ۲۰ متر امواج رایلی برگشتی به سختی قابل مشاهده بوده ولی در مقابل امواج طولی دارای وضوح و دقت بهتری هستند؛ حال آنکه بار لرزه‌ای با محتوای فرکانسی پایین همچون بار ریکر ۲۰ هرتز نتایج مناسب‌تری از وضعیت امواج طولی و رایلی بازگشتی از حفره در اعماق بیشتر را فراهم نموده است. به طور کلی می‌توان این‌گونه اظهار داشت که استفاده ترکیبی از امواج طولی رایلی و طولی و اعمال بار لرزه‌ای متناسب با عمق شناسایی حفره منجر به نتایج قابل قبولی می‌گردد.

کلمات کلیدی: حفره، امواج لرزه‌ای، موج رایلی، موج طولی، بار لرزه‌ای، محتوای فرکانسی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/JSCE.2019.176403.1808					
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.176403.1808	۱۴۰۰/۰۲/۳۰	۱۳۹۸/۰۲/۱۲	۱۳۹۸/۰۳/۱۲	۱۳۹۸/۰۳/۱۱	۱۳۹۷/۱۲/۲۵
سهراب میراثی S.mirasi@sutech.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

وجود ناهنجاری‌های زیرسطحی همانند حفره، فروچاله، لایه‌های ضعیف زیرسطحی، گسل، تونل که توسط انسان یا به صورت طبیعی ایجاد شده‌اند می‌توانند خطرات جدی برای جامعه داشته باشند. در این میان پدیده فروچاله که عموماً در اثر عواملی همچون افت سطح آب‌های زیرزمینی و پدیده کارست ایجاد می‌شوند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فروچاله‌ها به نوعی همان حفرات بزرگ هستند که عموماً در اعماق بیشتر قرار گرفته‌اند. آسیب‌های ناشی از رخداد فروچاله در مناطق مختلف دنیا و به خصوص در دشت‌های کشور ایران در حال گسترش و پدیدار شدن هستند که به عنوان نمونه می‌توان به فروچاله‌های دشت سورمق به قطر ۵۰ و عمق ۱۶ متر، دشت صفاشهر با عرض ۵۰ متر و عمق ۲۰ متر، دشت کبودرآهنگ همدان و دشت فسا با عرض ۲۰ متر و عمق نزدیک به ۱۰۰ متر اشاره نمود [۱ و ۲]. با توجه به خطرات و مشکلات متعددی که ناهنجاری‌های زیرسطحی می‌توانند برای انسان‌ها ایجاد نماید شناسایی ابعاد، عمق و موقعیت این ناهنجاری‌ها پیش از رخداد امری ضروری می‌باشد. شناسایی هر چه دقیق‌تر این پدیده می‌تواند در کنترل و جلوگیری از خطرات احتمالی آن‌ها نقش مؤثری ایفا نماید. نظر به توسعه و قابلیت روش‌های جدید لرزه‌ای در زمینه ژئوتکنیک، می‌توان از این روش‌ها متناسب با دقت و سرعت بالای آن‌ها استفاده نمود. بهره‌گیری از روش‌های جدیدی همچون روش‌های انعکاسی و انکساری و تحلیل چند ایستگاهی امواج سطحی^۱ با استفاده از امواج رایلی و طولی می‌تواند در جهت شناسایی تغییرات و ناهنجاری زیرسطحی^۲ بسیار مفید و کارآمد باشد [۳ و ۴].

برخورد و اثر متقابل امواج لرزه‌ای با حفره‌ها، فروچاله‌ها، سازه‌ها و تغییرات مشخصات مصالح در بسیاری موارد قابل شناسایی است و اجازه می‌دهد که از تحلیل‌های متفاوت مرتبط با دیگر داده‌ها به صورت مطمئن و با تفسیر درست، نتایج را به دست آورد [۵]. سرعت موج برشی ارتباط مستقیم با نسبت تنش به کرنش دارد که افزایش تنش در سقف حفره سبب افزایش در سرعت موج برشی می‌گردد پس می‌توان با مانیتور کردن وضعیت سرعت موج برشی وضعیت پتانسیل گسیختگی (تغییرات غیرخطی در کرنش نسبت به تنش) را مشخص نمود [۶، ۷ و ۸]. بر اساس مقایسه‌های اولیه صورت گرفته توسط امین نژاد و بوت [۹] روش‌های امواج رایلی بیش‌ترین پتانسیل را جهت تعیین ناهنجاری‌های زیرسطحی دارند. محدوده عمق مورد بررسی امواج سطحی بین ۳۰ تا ۴۰ متر یک محدودیت برجسته نیست از آنجایی که اکثر ناهنجاری‌ها در اعماق نزدیک سطح زمین رخ می‌دهند. حفرات موجب پخش انرژی امواج سطحی در فرکانس‌های مختلف می‌شود که سبب می‌شود طول موج‌ها به عمق هدف برگردانده شوند [۱۰]. به همین ترتیب امواج طولی نیز در برخورد با حفره و در یک فاصله خاص منبع تا گیرنده در محدوده متفاوت سرعت، انکسار پیدا می‌کنند [۸]. یکی از روش‌های استفاده‌شده در جهت شناسایی حفرات و فروچاله‌ها روش انکسار هست که دقت بالای داده‌های آن تأثیر زیادی بر نتایج خواهد داشت [۱۰].

در خصوص شناسایی حفره‌های زیرسطحی محققان مختلف از روش‌های متفاوتی استفاده نموده‌اند. به عنوان نمونه، ناصری مقدم و همکاران روشی بر اساس تحلیل کاهیدگی امواج رایلی جهت تعیین عمق و موقعیت حفره‌های زیرسطحی ارائه دادند [۱۲ و ۱۳]. ژیا و همکاران [۱۴] روشی را با توجه به شکست امواج رایلی برای مشخص نمودن موقعیت و عمق حفرات پیشنهاد دادند. چائی و همکاران [۱۵] و [۱۶] تأثیر منبع و عمق حفره را بر روی میدان موج با شبیه‌سازی عددی بررسی نمودند. شی [۱۷] تأثیر انتشار امواج سطحی بر روی قطعه لوله‌های مدفون جهت محاسبه جابجایی در اتصالات بتنی لوله‌های استوانه‌ای مورد ارزیابی قرار داد. شائو و همکاران [۱۸] با استفاده از S-transform به تعیین حفرات زیرسطحی پرداختند که فرمولاسیون زمان انتقال موج رایلی از فاصله بین مرز حفره و گیرنده را به فاصله بین ضربه (بار لرزه‌ای ریکر ۳۰ هرتز) و گیرنده تغییر دادند. در این راستا از فیلتر کردن داده‌ها در میدان فرکانس - عدد موج نیز بهره‌گیری شده است.

برای شناسایی حفره‌ها در عمق‌های مختلف باید از بارهای لرزه‌ای مناسب برای ارتعاش سطح زمین استفاده نمود. این در حالی است که امواج رایلی بخش زیادی از انرژی آزادشده را حمل می‌کنند و می‌تواند به طور مناسب برای شناسایی حفره‌های سطحی اعمال شود [۱۵]. شناسایی حفره عمیق، برای مثال، در عمق ۵۰ متر نیاز به اعمال بارهای لرزه‌ای با فرکانس‌های پایین می‌باشد که به صورت کلی ایجاد

¹ Multichannel analysis of surface waves

² Subsurface anomalies

بار لرزه‌ای با روش‌های اکتیو در فرکانس‌های پایین تا حدودی غیرممکن می‌باشد و می‌توان از روش‌های پسیو^۳ برای دستیابی به فرکانس‌های پایین استفاده نمود [۱۹ و ۲۰]. از آنجایی که بار لرزه‌ای تأثیر زیادی روی شناسایی حفره‌ها دارد می‌توان این‌گونه بیان نمود که انتشار و نفوذ امواج در عمق‌های مختلف به فرکانس غالب بار لرزه‌ای در محیط خاک مرتبط می‌شوند و نوع بار لرزه‌ای سبب تغییر وضوح میدان موج در امواج طولی و ریلی می‌گردد. بیشترین عمق نفوذ و طول موج امواج ریلی به فرکانس غالب بار لرزه‌ای مرتبط می‌شود؛ بنابراین در این مقاله سعی شده با اعمال بارهای لرزه‌ای مختلف، امواج برگشتی ریلی و طولی پس از برخورد با حفره شناسایی شوند. نظر به اینکه امواج طولی به خاطر انتشار کروی در تمام جهات در مقایسه با امواج ریلی دارای عمق نفوذ بیشتری هستند از این‌رو، می‌توان با اطمینان بیشتری اظهار داشت که می‌توان حفره‌های عمیق را با استفاده از امواج طولی شناسایی نمود. در این خصوص، تأثیر بارهای لرزه‌ای مختلف بر روی مدل‌های خاک با وجود حفره در عمق‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است این ارزیابی از طریق نمایش لحظه‌ای انتشار امواج ریلی و طولی در فضای میدان موج بعد از برخورد با حفره صورت پذیرفته است. جهت بهبود و افزایش وضوح امواج ریلی و طولی از روش‌های فیلتر کردن استفاده شده است. نتایج به دست آمده کمک بسزایی در درک و شناسایی بهتر انتشار امواج ریلی و طولی بعد از برخورد با ناهنجاری‌های زیرسطحی داشته است. کاهش وضوح و دقت امواج ریلی در اعماق زیاد و مزایای استفاده از امواج طولی در جهت شناسایی حفره‌های عمیق نیز در ادامه مورد بحث قرار داده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش اجزا محدود و مرزهای جاذب

روش اجزای محدود^۴ (FEM) به عنوان یک روش موفقیت‌آمیز در مسائل انتشار امواج بکار برده شده است [۲۱، ۲۲ و ۲۳]. شبیه‌سازی اجزای محدود برای بارهای ضربه‌ای روی سطح آزاد سبب برگشت انرژی قابل توجهی از طرف مرزهای اجزای نامحدود می‌شود [۲۴] بنابراین مرزهای اجزای نامحدود برای مدل‌سازی‌های پیچیده انتشار امواج در آزمایش‌های امواج سطحی برای محیط دو و سه‌بعدی مناسب نیستند. از سوی دیگر، مرزهای جاذب تحت عناوین لایه‌های جاذب با افزایش دمپینگ^۵ (ALID) و لایه تطابق کامل^۶ (PML) به نحو قابل ملاحظه‌ای اندازه محاسباتی و هندسی مدل عددی را کاهش می‌دهند [۲۵ و ۲۶]. در این مقاله، از لایه‌های جاذب افزایش دمپینگ (الید) به خاطر راحتی و فراهم بودن نحوه اعمال میرایی ریلی، استفاده شده است [۲۷ و ۲۸]. ضخامت الیدها و به‌نوعی طول الیدها پارامتر تأثیرگذار بر روی اختلاف نسبی امپدانس اجزا در مرز جاذب دارد [۲۹]؛ بنابراین، جهت میرا کردن موج‌ها در مرزهای سمت راست، چپ و مرز پایین، از چیدمان افزایشی دمپینگ لایه‌ها یا همان الید استفاده شده است. تعداد الیدها مطابق تحلیل‌های انجام شده ۲۰ عدد الید یک متری جهت جذب بهتر موج‌های رسیده انتخاب شده است. جهت شناسایی بهتر و تفکیک امواج طولی و ریلی و همچنین حذف تأثیر حوزه نزدیک، فاصله محل اعمال بار لرزه‌ای تا اولین ژئوفن ۱۲ متر در نظر گرفته شده است.

۲-۲- مدل رفتاری

در این مقاله، روش اجزای محدود برای شبیه‌سازی انتشار امواج در محیط‌های 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 لرزه‌ای فراهم می‌نماید. با این وجود، پارامترهای کرنش-کوچک نقش قابل توجهی را برای محدوده وسیعی از مسائل ژئوتکنیک بازی می‌کند [۱۵ و ۳۰]. در تست‌های لرزه‌ای همچون تحلیل چندایستگاهی امواج سطحی، کرنش‌های الاستیک ایجاد شده کوچک‌تر از ۰.۰۰۱٪ می‌باشد؛ بنابراین می‌توان در مدل‌سازی‌ها از محیط الاستیک خطی استفاده نمود.

³ Passive

⁴ Finite-difference modeling

⁵ Absorbing Layers using Increasing Damping

⁶ Perfectly Matched Layer

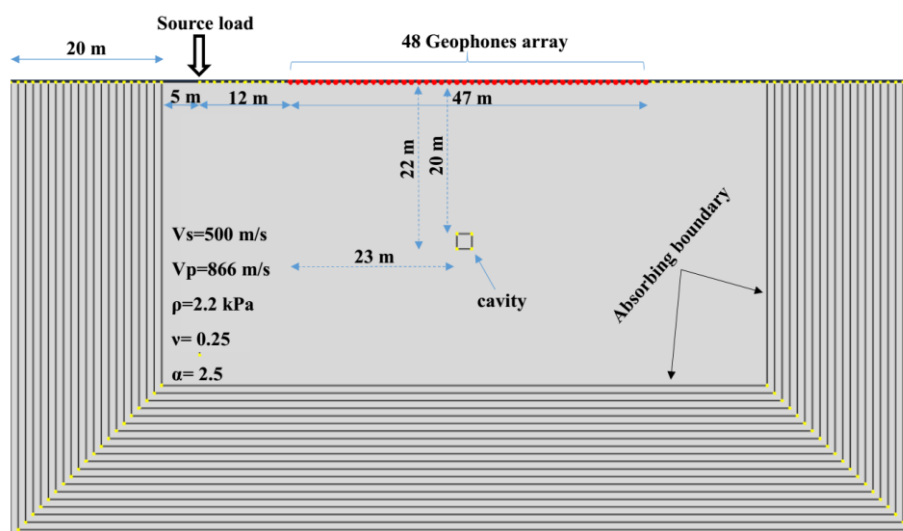
مشخصات محیط الاستیک خطی شامل مدول الاستیک، نسبت پواسون، جرم مخصوص و میرایی مصالح می‌باشند که در ادامه ارائه شده است [۱۳].

۳-۲- مدل سازی

تمام مدل سازی‌ها با استفاده از روش اجزای محدود در نرم افزار آباکوس^۷ نسخه 6.14 صورت پذیرفته است [۳۱]. ابعاد مدل‌های استفاده شده (خاک تک لایه) در این مقاله دارای عمق ۴۰ و طول ۸۰ متر می‌باشند و حفره به ابعاد ۲ در ۲ متر در عمق‌های مدفون ۲، ۶، ۱۰ و ۲۰ متر برای هر مدل در نظر گرفته شده است. به صورت کلی برای هر نوع بارگذاری چهار مدل مختلف در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه در شکل ۱ مدل خاک تک لایه با وجود حفره در عمق مدفون ۲۰ متر نمایش داده شده است. مرز نزدیک و دور حفره از گیرنده اول به ترتیب ۲۳ و ۲۵ می‌باشد. فاصله منبع تا گیرنده اول ۱۲ متر و تعداد گیرنده‌ها ۴۸ عدد با فاصله یک متر از همدیگر می‌باشند. میرایی اعمال شده به لایه‌های خاک به صورت میرایی رایلی در نظر گرفته شده است [۳۲] مشخصات خاک و حفره در جدول ۱ ارائه شده است [۱۴].

جدول ۱: مشخصات خاک و حفره مدل سازی شده

مصالح	سرعت موج برشی (m/s)	سرعت موج طولی (m/s)	مدول الاستیک (kPa)	وزن مخصوص (kg/m ³)	نسبت پواسون	ضرایب میرایی رایلی: آلفا (α)، بتا (β)
خاک	500	866	1.375E+9	2200	0.25	0.83, 0.000085
حفره	17	340	8.6E+3	10	0.498	3.2, 0.0009



شکل ۱: مشخصات مدل خاک تک لایه و موقعیت قرارگیری حفره و همچنین موقعیت بار و ژئوفن‌ها در سطح زمین

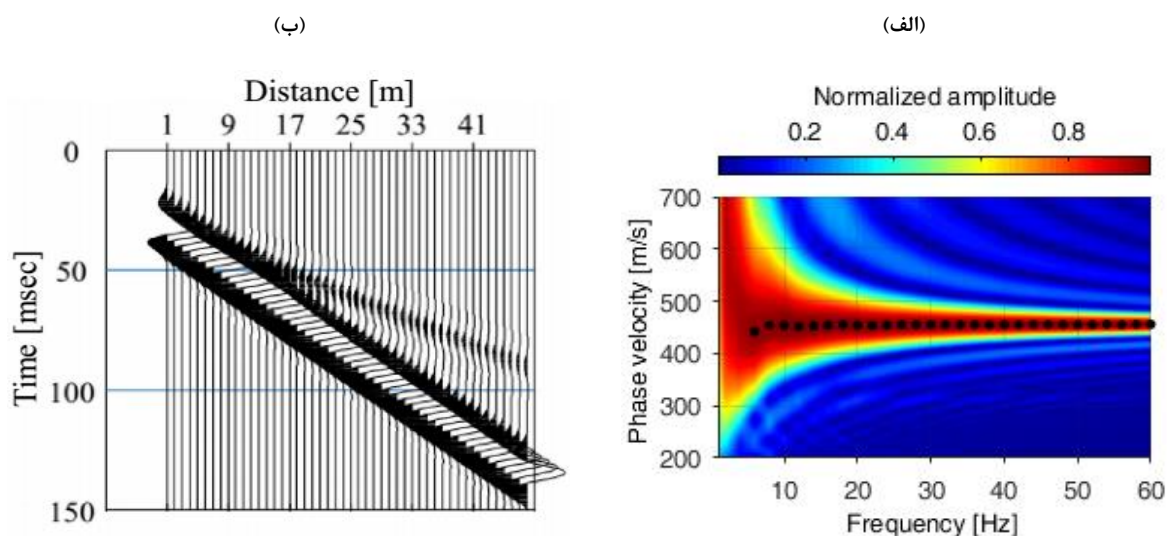
۴-۲- صحت سنجی

برای صحت سنجی خروجی نرم افزار آباکوس و کدهای نوشته شده در برنامه متلب^۸ از مدل شکل فوق (شکل ۱) در شرایط بدون حفره استفاده شده است با توجه به اینکه $V_R \approx 0.923V_R = 462$ پس می‌بایست برای خاک تک لایه منحنی پراکنش امواج رایلی با همین سرعت به دست بیاید که مطابق منحنی و طیف پراکنش امواج رایلی در شکل ۲-الف سرعت ۴۶۲ متر بر ثانیه به دست آمده است که نشان از

^۷ Abaqus 6.14

^۸ MATLAB

صحت مدل‌سازی‌ها و خروجی کدهای متلب دارد. در میدان موج نمایش داده شده در شکل ۲-ب امواج رایلی با دامنه بزرگ‌تر و سرعت کمتر در قسمت پایین و امواج طولی مستقیم^۹ با سرعت بیشتر و دامنه ضعیف‌تر در بالای امواج رایلی قابل مشاهده هستند.



شکل ۲: نتایج مدل خاک تک لایه: (الف) منحنی پراکندگی امواج رایلی؛ (ب) فضای میدان موج (فاصله-زمان)

۳- بحث و نتایج

در این مقاله از چهار مدل مختلف با قرار دادن حفره‌ها در عمق‌های ۲، ۶، ۱۰ و ۲۰ متر بهره‌گیری شده است. مشخصات مدل در شکل ۱ نمایش داده شده است. در بخش‌های زیر برای هر مدل، تأثیر بارهای لرزه‌ای ریکر (با فرکانس غالب ۱۰۰، ۵۰ و ۲۰ هرتز)، ضربه چکش، ضربه سینوسی و بار گذرا مورد ارزیابی قرار گرفته است. انتشار امواج طولی و رایلی برای هر مدل تحت اثر اعمال بار لرزه‌ای و حفره مدفون خاص در گام‌های زمانی متفاوت ارائه شده است. در ادامه از روش‌های فیلترینگ جهت جداسازی امواج رایلی و طولی استفاده شده تا موج‌های برگشتی بعد از برخورد با حفره به طرز بهتری قابل مشاهده و شناسایی باشند. از این‌رو توانایی امواج طولی و رایلی برای شناسایی حفره در عمق‌های مختلف مورد ارزیابی و مقایسه قرار داده شده است.

۳-۱- تأثیر بار لرزه‌ای ریکر با محتوای فرکانسی ۵۰ هرتز

بار لرزه‌ای ریکر (Ricker) به‌عنوان یکی از منابع لرزه‌ای فعال به‌صورت گسترده در مطالعات ژئوفیزیک استفاده می‌گردد بار ریکر در فضای زمان و فرکانس به‌صورت زیر بیان می‌شود (شکل ۳-الف):

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

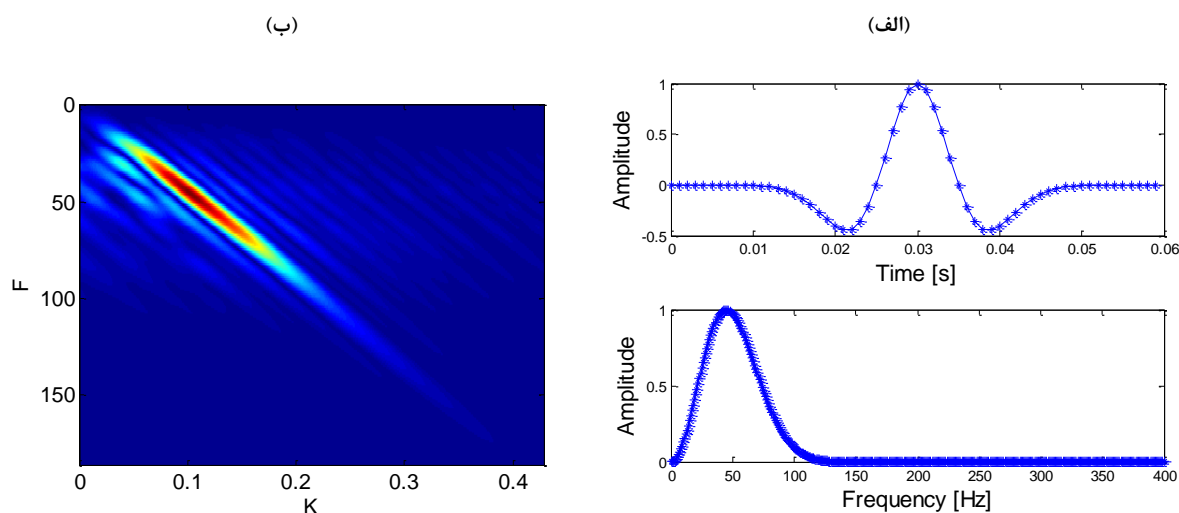
$$R(f) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{f^2}{f_M^3} e^{-\frac{f^2}{f_M^2}} \quad (2)$$

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

در شکل ۳-الف بار لرزه‌ای یا ارتعاشی اعمال شده در سطح زمین با فرکانس مرکزی (غالب) ۵۰ هرتز نشان داده شده است [۳۳] و در شکل ۳-ب نتایج حاصل از رکوردهای ژئوفن‌های قرار گرفته در سطح زمین نمایش داده شده است که به‌تناسب داده‌های برداشت شده از فضای زمان-فاصله (time-offset) به فضای فرکانس-عدد موج (f-k) انتقال داده شده‌اند که دربرگیرنده مشخصات خاک و

⁹ Direct P-waves

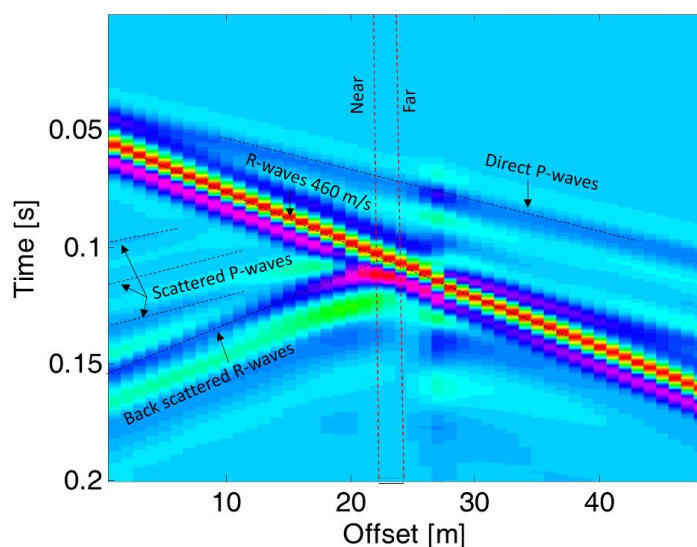
مشخصات بار اعمالی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین دامنه و انرژی به‌دست‌آمده مربوط به فرکانس ۵۰ هرتز و همان فرکانس غالب بار لرزه‌ای اعمال شده می‌باشد.



شکل ۳: بار لرزه‌ای ریکر ۵۰ هرتز در فضای: (الف) زمان و فرکانس و (ب) طیف فرکانس-عدد موج حاصل از برداشت ژئوفن‌ها

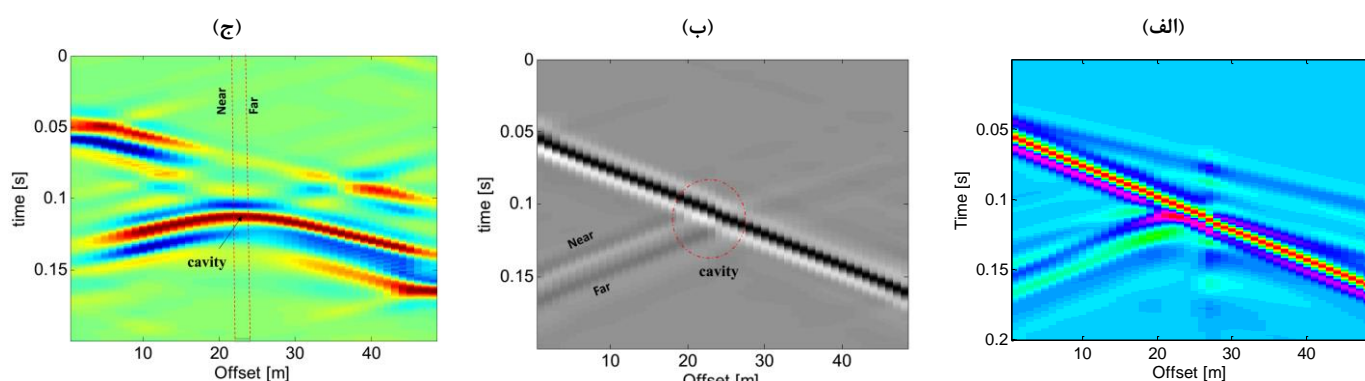
۳-۱-۱ حفره در عمق ۲ متر

در این قسمت حفره در عمق مدفون خاک ۲ متر قرار گرفته و در فاصله ۲۲ متری از گیرنده اول و ۳۴ متری از محل اعمال بار لرزه‌ای قرار دارد. با توجه به اینکه طول آرایه ژئوفن‌ها ۴۷ متر (۴۸ عدد گیرنده) می‌باشد تقریباً محل استقرار حفره در مرکز طولی آرایه ژئوفن‌ها می‌باشد. مرز اول (Near) و مرز دوم (Far) حفره در فاصله ۲۲ و ۲۴ متر از اولین گیرنده قرار دارند (شکل ۴). در شکل ۴ انرژی حداکثر تصویر مربوط به موج رایلی مستقیم می‌باشد که با رنگ قرمز و با سرعت حدود ۴۶۰ متر بر ثانیه مشخص شده است. امواج طولی مستقیم با سرعت بیشتر در بالاترین قسمت پدیدار شده است. جبهه امواج طولی، برشی و رایلی پس از برخورد با حفره مجدد برگشت داده می‌شوند و به‌عبارت‌دیگر خود حفره مانند یک منبع لرزه‌ای جدید عمل می‌کند و موج طولی، برشی و رایلی تولید می‌کند. در شکل ۴ امواج رایلی برگشتی (Backscattered R waves) که دارای انرژی بیشتر و با شیبی دقیقاً برابر اما مخالف انتشار یافته‌اند قابل شناسایی می‌باشند و امواج طولی برگشتی (Scattered P waves) نیز با شیبی مخالف و برابر با شیب موج طولی مستقیم قابل تشخیص می‌باشند.



شکل ۴: میدان امواج طولی و رایلی مستقیم و بازگشتی حاصل از برداشت گیرنده‌ها (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۲ متر

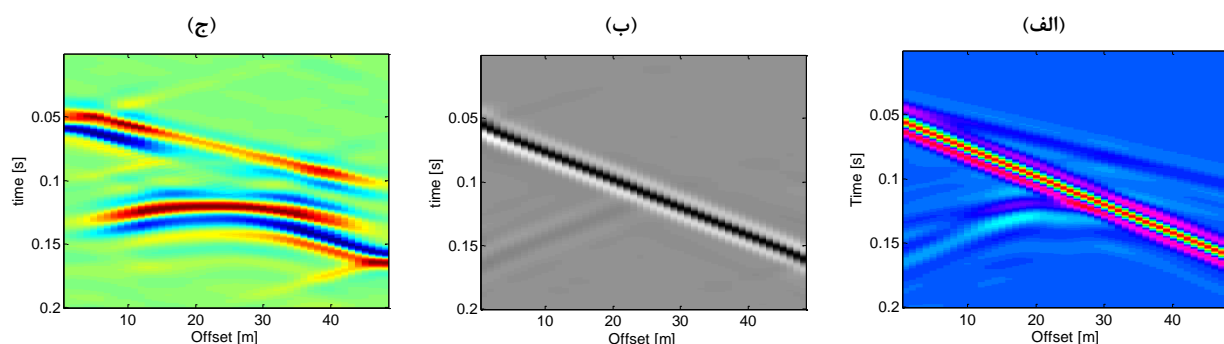
در شکل ۵-الف وضعیت میدان موج^{۱۰} (زمان-فاصله) نمایش داده شده که موج رایلی و طولی به وضوح مشخص می‌باشد اما در محل وجود حفره (فاصله ۲۲ تا ۲۴ متر) موج طولی برگشتی و رایلی با هم ترکیب شده‌اند که تشخیص مرز اول و دوم حفره و همچنین تفکیک امواج مقداری سخت می‌باشد. در این خصوص امواج را بر اساس سرعت موج رایلی (۴۶۲ متر بر ثانیه) و طولی (۸۶۶ متر بر ثانیه) فیلتر و جداسازی شده‌اند که در شکل ۵-ب تنها امواج رایلی مستقیم و برگشتی باقی مانده‌اند که به وضوح مرز اول و دوم حفره مشخص می‌باشد. در شکل ۵-ج صرفاً امواج طولی نمایش داده شده‌اند که نقطه پیک کمان جبهه موج برگشتی نشان‌دهنده محل حفره می‌باشند. علت پدیدار شدن امواج طولی به صورت کمان به این خاطر است که امواج طولی برگشتی در زمان سریع‌تر به گیرنده‌های بالای حفره و به تناسب در زمان دیرتری به گیرنده‌های دورتر از بالای حفره می‌رسند و به این ترتیب به صورت کمان در فضای زمان-فاصله (میدان موج) پدیدار می‌شوند.



شکل ۵: میدان امواج حاصل از برداشت گیرنده‌ها (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۲ متر: الف) قبل از فیلتر، ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، ج) امواج طولی بعد از فیلتر

۳-۱-۲- حفره در عمق ۶ متر

در شکل ۶-الف میدان موج^{۱۱} (زمان-فاصله) مربوط به حفره در عمق ۶ متر نمایش داده شده که امواج رایلی و طولی مستقیم به وضوح مشخص می‌باشد ولی امواج طولی و رایلی برگشتی به درستی قابل تفکیک نیستند که پس از فیلتر کردن امواج رایلی (شکل ۶-ب) و طولی (شکل ۶-ج)، موج‌های برگشتی و موقعیت حفره قابل شناسایی هستند.



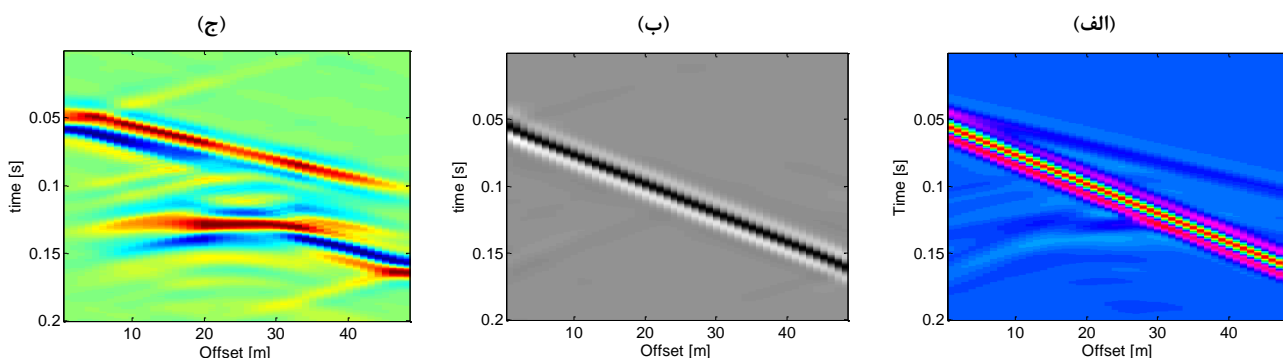
شکل ۶: میدان امواج حاصل از برداشت گیرنده‌ها (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۶ متر: الف) قبل از فیلتر، ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، ج) امواج طولی بعد از فیلتر

¹⁰ Wave field

¹¹ Wave field

۳-۱-۳- حفره در عمق ۱۰ متر

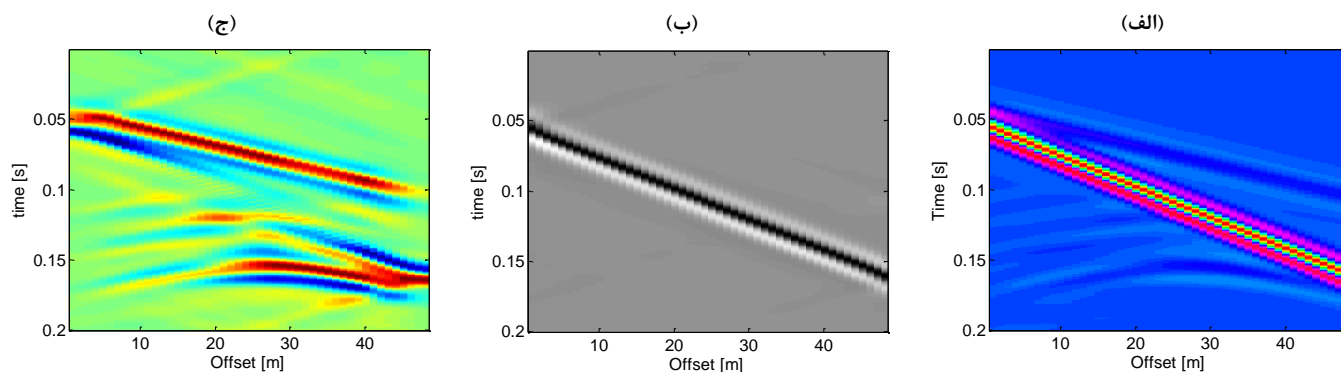
با افزایش عمق مدفون حفره به ۱۰ متر امواج رایلی ضعیف‌تر و امواج طولی قوی‌تر شده‌اند (شکل ۷-الف) پس از فیلتر کردن امواج رایلی و طولی مشاهده می‌شود که موج رایلی برگشتی به صورت ضعیف نمایان شده (شکل ۷-ب) ولی امواج طولی مستقیم و برگشتی (شکل ۷-ج) وضوح بهتری دارند.



شکل ۷: میدان امواج حاصل از برداشت گیرنده‌ها (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۱۰ متر: الف) قبل از فیلتر، ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، ج) امواج طولی بعد از فیلتر

۳-۱-۴- حفره در عمق ۲۰ متر

بر اساس نتایج امواج رایلی و طولی مشاهده گردید که با افزایش عمق حفره از ۲ متر به عمق ۶ و ۱۰ متر میزان توانایی تشخیص موقعیت حفره با استفاده از امواج رایلی ضعیف‌تر شده است (شکل ۸-الف). حال آنکه، با افزایش عمق مدفون حفره به ۲۰ متر موج رایلی تقریباً محوشده (شکل ۸-ب) ولی امواج طولی همچنان موقعیت حفره را نشان می‌دهند (شکل ۸-ج).

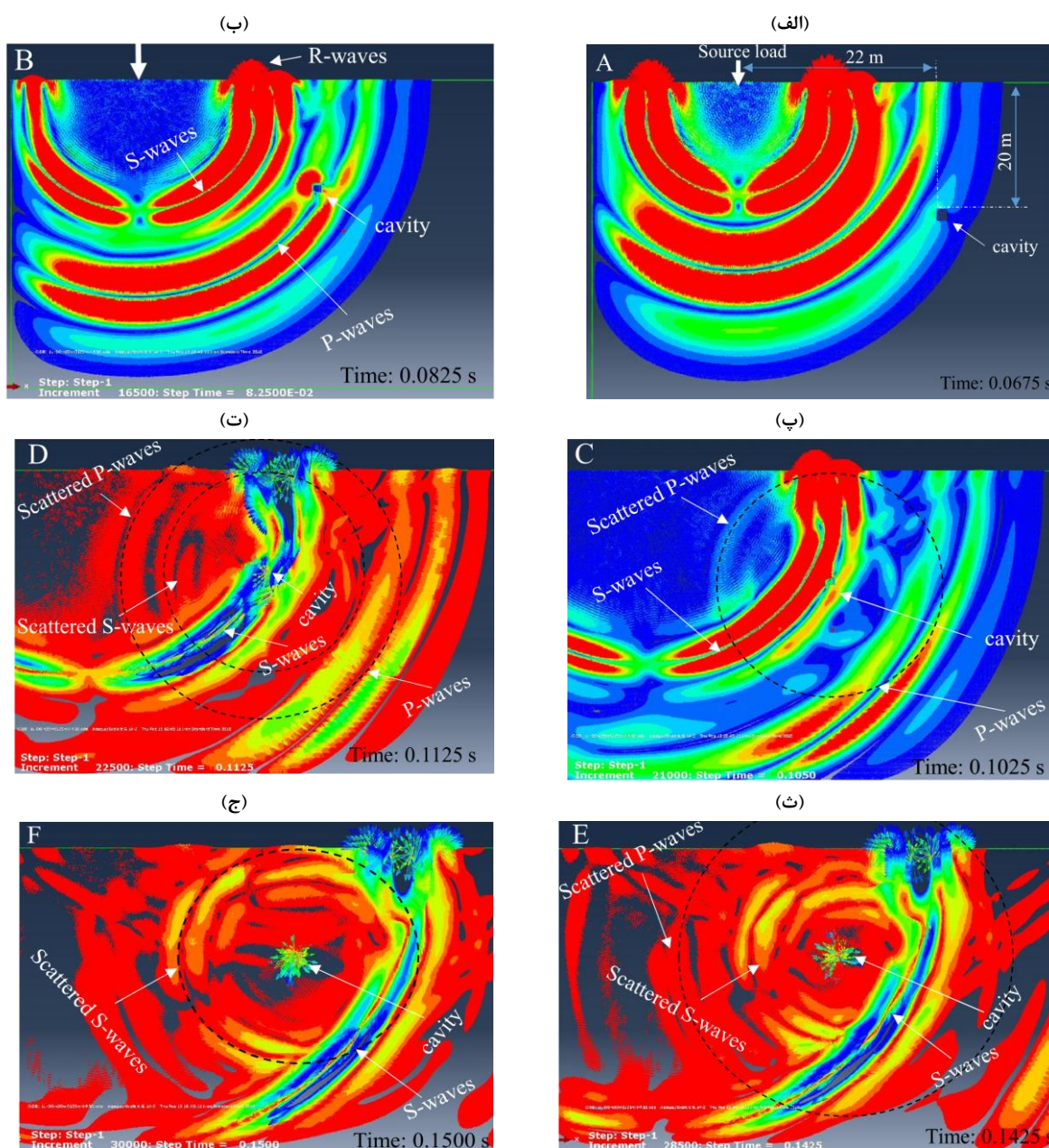


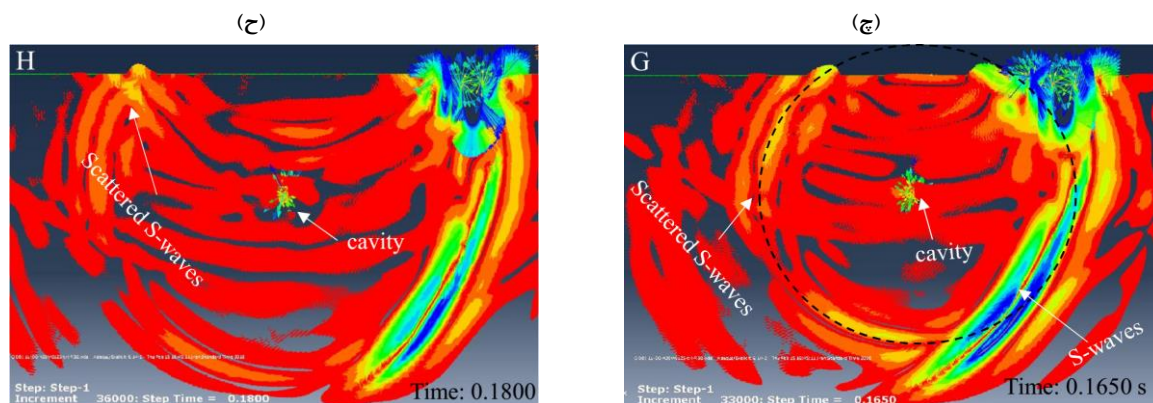
شکل ۸: میدان امواج حاصل از برداشت گیرنده‌ها (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۲۰ متر: الف) قبل از فیلتر، ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، ج) امواج طولی بعد از فیلتر

در ادامه با ارائه تصاویر لحظه‌ای انتشار امواج در خاک تک لایه در زمان‌های قبل و بعد از برخورد جبهه امواج با حفره (در عمق ۲۰ متر) به تشریح وضعیت امواج برگشتی پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود پس از وارد کردن بار ارتعاشی، امواج در خاک به صورت هم‌جانبه انتشار می‌یابند که جبهه موج اول مربوط به موج طولی مستقیم با دارا بودن بیشتری سرعت (۸۶۶ متر بر ثانیه) و جبهه موج دوم مربوط به موج برشی با سرعت کمتر (۵۰۰ متر بر ثانیه) می‌باشد. در شکل ۹-ب وضعیت قرارگیری جبهه امواج طولی، برشی و رایلی قابل تشخیص می‌باشد که در زمان ۰/۰۸۲۵ ثانیه جبهه امواج طولی با حفره برخورد داشته است. در شکل ۹-ج در زمان ۰/۱۰۲۵ ثانیه امواج طولی برگشتی پس از برخورد با حفره با دایره خط‌چین مشخص شده‌اند. به عبارت دیگر خود حفره همانند یک منبع لرزه‌ای جدید سبب انتشار امواج طولی و برشی جدید می‌گردد. این امواج طولی برگشتی اولیه ناشی از حفره مطابق تصویر ۹-پ در

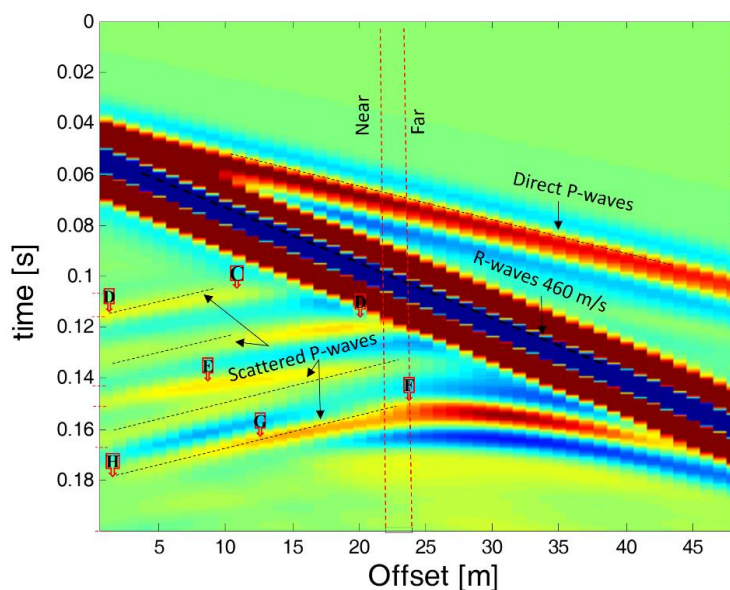
زمان ۰/۱۰۲۵ ثانیه به گیرنده‌های بالای حفره و مطابق تصویر ۹-ت در زمان ۰/۱۱۲۵ به گیرنده اول (سمت چپ) رسیده است. زمان و مکان نقاط ذکر شده فوق با نام C و D روی تصویر شکل ۱۰ علامت گذاری شده است. همچنین در شکل ۹-ت امواج برشی برگشتی اولیه نیز به سطح زمین بالای حفره برخورد نموده‌اند که سبب ایجاد یک مسیر موج برگشتی دیگر می‌گردد که با علامت D در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در ادامه پس از برخورد جبهه موج برشی ناشی از بار ارتعاشی در سطح زمین به حفره، شاهد امواج طولی و برشی برگشتی ثانویه از خود حفره خواهیم بود این امواج طولی برگشتی ثانویه ناشی از حفره مطابق تصویر ۹-ث در زمان ۰/۱۴۲۵ ثانیه به گیرنده‌های سمت چپ بالای حفره رسیده است. زمان و مکان نقطه ذکر شده فوق با نام E روی تصویر شکل ۱۰ علامت گذاری شده است. در نهایت امواج برشی ثانویه برگشتی باقی می‌مانند که با بیشترین انرژی در شکل ۹-ج نمایش داده می‌شوند و تقریباً در زمان ۰/۱۵ ثانیه به ژئوفن قرار گرفته بالای حفره رسیده و ثبت شده‌اند که در شکل ۱۰ با نشانه F نشان داده شده است و در ادامه همین مسیر موج توسط ژئوفن‌های سمت چپ حفره در زمان‌های دیرتر ثبت شده‌اند که در شکل ۹-چ و ۹-ح نشان داده شده و با نشانه G و H در شکل ۱۰ مشخص شده است.





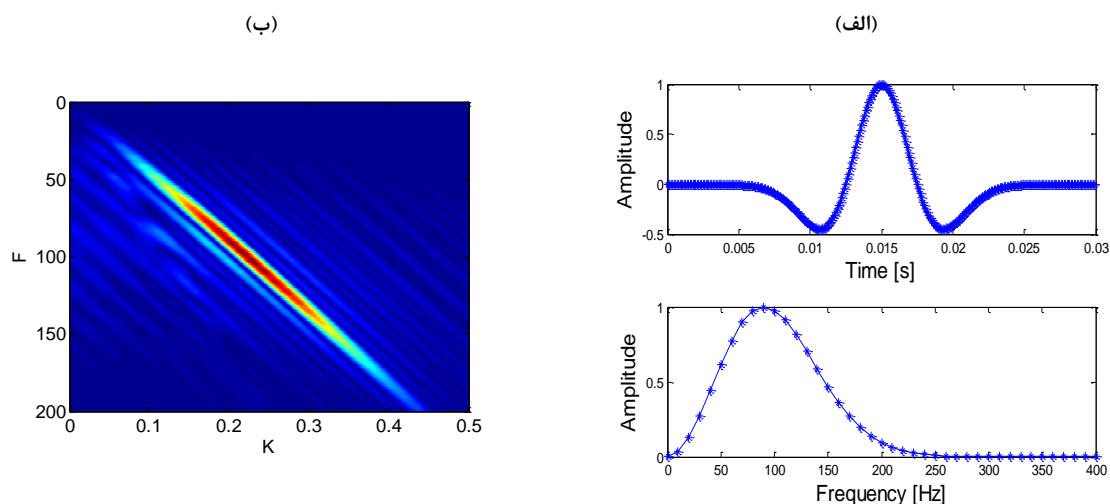
شکل ۹: تصاویر لحظه‌ای انتشار امواج ناشی از اعمال بار لرزه‌ای روی سطح زمین: الف) موقعیت حفره، بار لرزه‌ای و امواج تولیدشده، ب) جبهه امواج طولی، برشی و رألی در زمان 0.1825 ثانیه و برخورد جبهه امواج طولی با حفره، پ) وضعیت امواج برگشتی پس از برخورد با حفره (با دایره خط‌چین) و در حال ثبت شدن در سطح زمین و برخورد امواج برشی با حفره، ت) وضعیت امواج برشی برگشتی اولیه و رسیدن به سطح زمین در قسمت بالای حفره، ث) وضعیت امواج طولی و برشی برگشتی ثانویه از حفره در اثر برخورد موج برشی با حفره، ج) وضعیت امواج برشی برگشتی پس از برخورد با حفره (با دایره خط‌چین) و در حال ثبت شدن در سطح زمین، چ) ادامه وضعیت انتشار امواج برشی برگشتی پس از برخورد با حفره (با دایره خط‌چین) و در حال ثبت شدن در سطح زمین، ح) ادامه وضعیت انتشار امواج برشی برگشتی پس از برخورد با حفره (با دایره خط‌چین) و در حال ثبت شدن توسط اولین ژئوفن‌ها



شکل ۱۰: افزایش میزان وضوح میدان امواج حاصل از برداشت گیرنده‌ها (فضای زمان-فاصله) به‌خصوص امواج طولی برگشتی پس از برخورد با حفره در عمق ۲۰ متر، حروف درج‌شده روی شکل مربوط به تصاویر هم‌اسم نمایش داده‌شده در شکل ۹ می‌باشد.

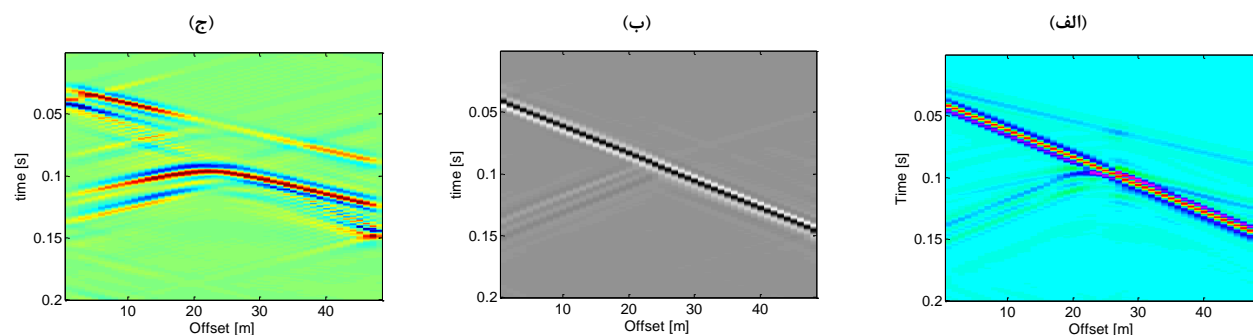
۳-۲- تأثیر بار لرزه‌ای با محتوای فرکانسی ریکر ۱۰۰ هرتز

در شکل ۱۱-الف وضعیت بار ریکر ۱۰۰ هرتز در فضای زمان و فرکانس نمایش داده‌شده است [۱۵ و ۱۶]. طیف انرژی فرکانس-عدد موج ($f-k$) به‌دست‌آمده از ثبت داده‌های گیرنده‌ها در سطح زمین برای خاک تک لایه در شکل ۱۱-ب نمایش داده‌شده است که نشان از فرکانس غالب ۱۰۰ هرتز برای این نوع بارگذاری می‌باشد. وجود بیشترین انرژی در فرکانس ۱۰۰ هرتز بیانگر این مفهوم است که فرکانس غالب داده‌های به‌دست‌آمده از خاک متأثر از نوع بار ارتعاشی اعمال‌شده در سطح زمین می‌باشند. بار ۱۰۰ هرتز با محتوای فرکانسی بالا و دقت بیشتر، توانایی بهتری جهت شناسایی حفرات سطحی با استفاده از امواج طولی را دارد.



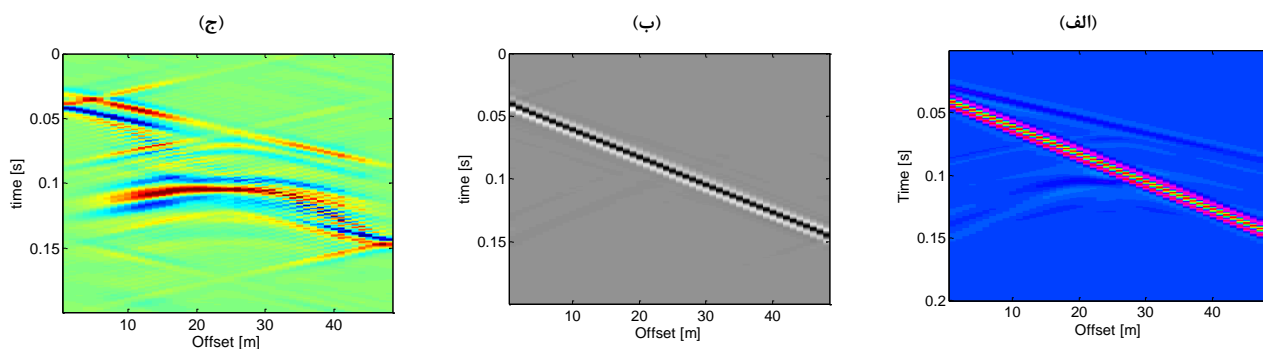
شکل ۱۱: بار لرزه‌ای ریکر ۵۰ هرتز در فضای الف) زمان و فرکانس و ب) طیف فرکانس-عدد موج حاصل از برداشت ژئوفن‌ها

در شکل ۱۲-الف بار ریکر ۱۰۰ هرتز دقت و وضوح بهتری برای حفره مدفون در عمق ۲ متر را فراهم آورده است به طوری که مرز اول و دوم حفره به وضوح در نتایج فیلتر شده امواج رایلی (شکل ۱۲-ب) و طولی (شکل ۱۲-ج) قابل تعیین می‌باشد. به همین ترتیب برای حفره مدفون در عمق ۶ متر، امواج رایلی و طولی برگشتی ناشی از حفره قابل مشاهده می‌باشند (شکل ۱۳-الف، ب و ج)؛ اما در عمق ۱۰ متر شرایط متفاوت می‌شود و امواج رایلی ضعیف‌تر و به تناسب برگشت امواج قابل مشاهده نیست. البته به صورت ضعیف امواج رایلی برگشتی در تصویر مشاهده می‌شود که مربوط به امواج طولی و برشی برگشتی از حفره می‌باشند که به سطح زمین برخورد و مجدد در مسیر حرکت به سمت چپ سبب تشکیل جبهه امواج رایلی شده‌اند (شکل ۱۴-ب). در نهایت در عمق ۲۰ متر امواج رایلی هیچ‌گونه برگشتی ندارند و تنها از طریق امواج طولی می‌توان موقعیت حفره را شناسایی نمود (شکل ۱۵).



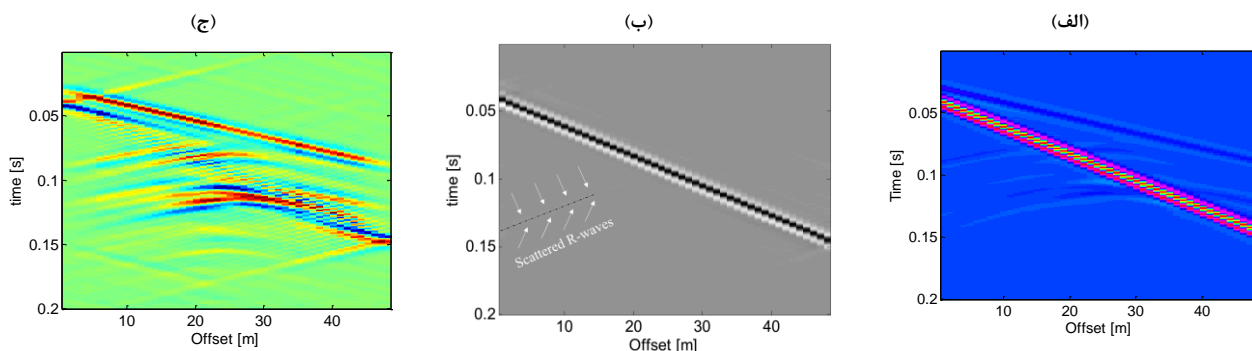
شکل ۱۲: میدان امواج (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۲ متر: الف) قبل از فیلتر، ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، ج) امواج طولی بعد از

فیلتر



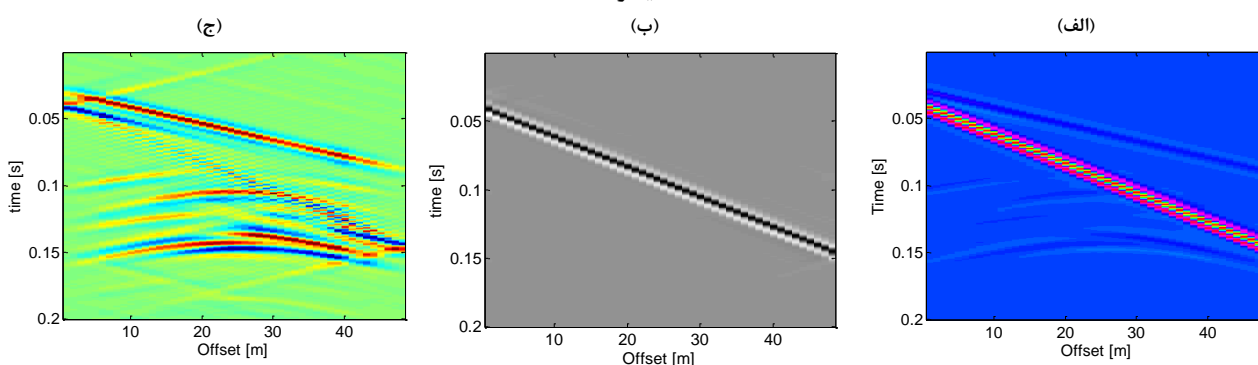
شکل ۱۳: میدان امواج (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۶ متر: الف) قبل از فیلتر، ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، ج) امواج طولی بعد از

فیلتر



شکل ۱۴: میدان امواج (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۱۰ متر: الف) قبل از فیلتر، ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، ج) امواج طولی بعد از

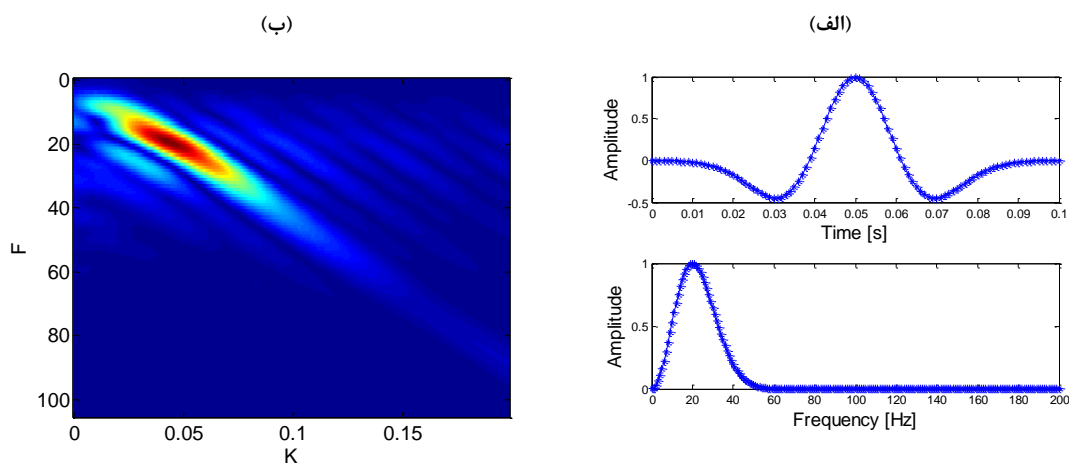
فیلتر



شکل ۱۵: میدان امواج (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۲۰ متر: الف) قبل از فیلتر، ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، ج) امواج طولی بعد از فیلتر

۳-۳- تأثیر بار لرزه‌ای با محتوای فرکانسی ریکر ۲۰ هرتز

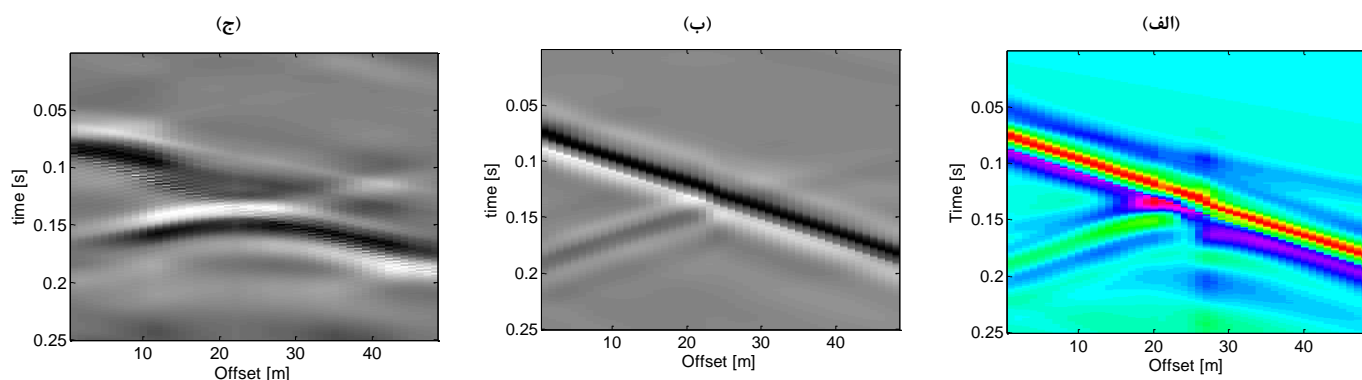
در شکل ۱۶-الف وضعیت بار ریکر ۲۰ هرتز در فضای زمان و فرکانس و در شکل ۱۶-ب طیف انرژی فرکانس-عدد موج (f-k) نمایش داده شده است. این بار با محتوای فرکانس پایین‌تر و طول موج بلندتر برای نفوذ در اعماق بیشتر استفاده می‌شود. همان‌گونه که دیگر محققان از بار قایم ریکر ۳۰ هرتز^{۱۲} برای مرتعش کردن مدل و شناسایی زیرسطحی استفاده نمودند [۱۸، ۳۵ و ۳۶].



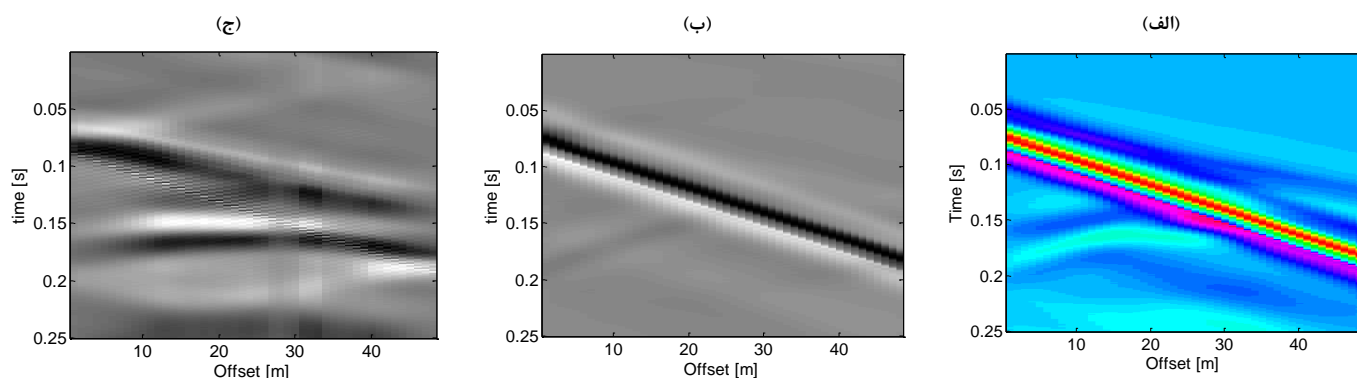
شکل ۱۶: نمایش بار لرزه‌ای ریکر ۵۰ هرتز در فضای الف) زمان و فرکانس و ب) طیف فرکانس-عدد موج حاصل از برداشت ژئوفن‌ها

¹² 30 Hz Ricker wavelet

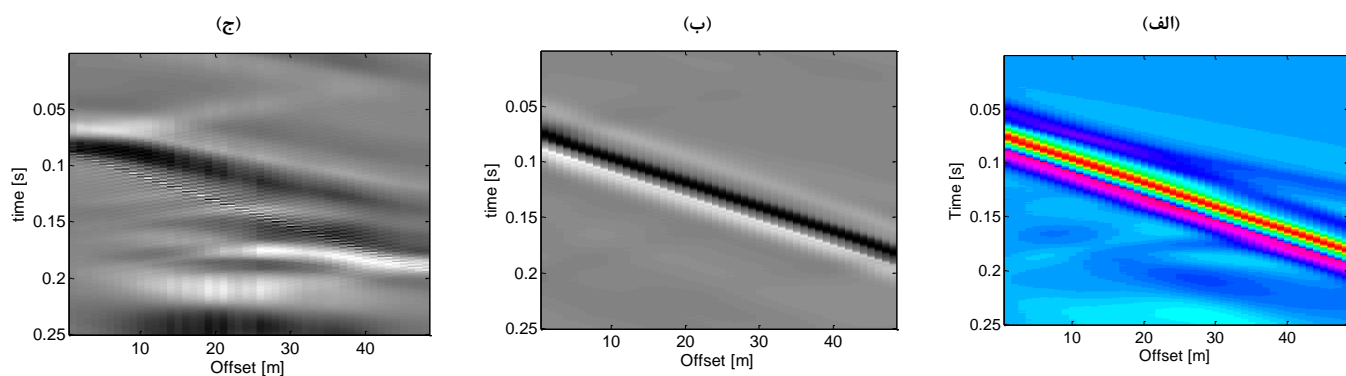
بار ریکر ۲۰ هرتز دقت و وضوح مناسبی برای شناسایی حفره مدفون در عمق ۲ متر و ۶ متر را نشان داده است (شکل ۱۷). همچنین برای حفره مدفون در عمق ۱۰ متر، امواج رایلی و طولی برگشتی ناشی از حفره قابل مشاهده می‌باشند (شکل ۱۸) اما در عمق ۲۰ متر نتایج تغییر کرده‌اند به نحوی که مشاهده امواج رایلی سخت می‌شود ولی همچنان موج طولی برگشتی قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۱۹) لازم به ذکر است در این بخش و بخش‌های بعدی جهت منسجم کردن مقاله صرفاً تصاویر مهم و ضروری نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود بار ریکر ۲۰ هرتز با طول موج بلندتر می‌تواند در اعماق بیشتری نفوذ نماید و به تناسب می‌توان از نتایج امواج رایلی و طولی برای شناسایی حفره استفاده نمود.



شکل ۱۷: میدان امواج (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۲ متر: (الف) قبل از فیلتر، (ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، (ج) امواج طولی بعد از فیلتر



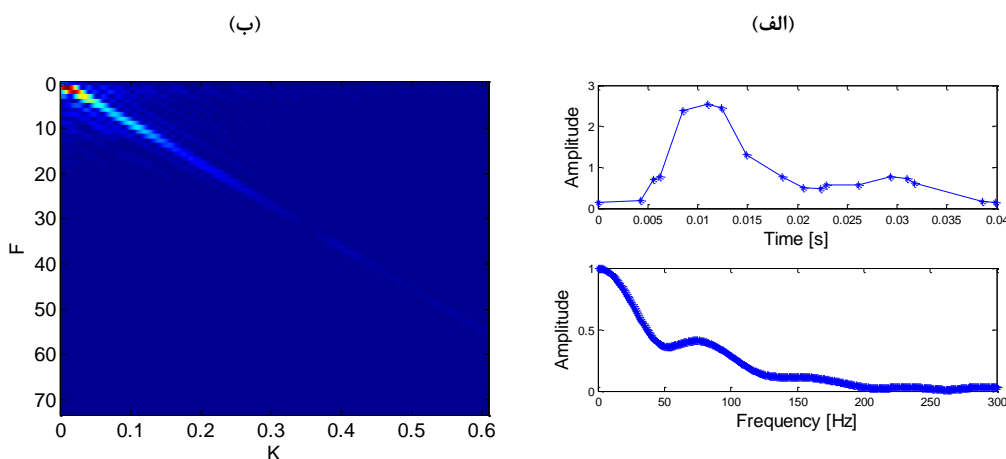
شکل ۱۸: میدان امواج (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۱۰ متر: (الف) قبل از فیلتر، (ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، (ج) امواج طولی بعد از فیلتر



شکل ۱۹: میدان امواج (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۲۰ متر: (الف) قبل از فیلتر، (ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، (ج) امواج طولی بعد از فیلتر

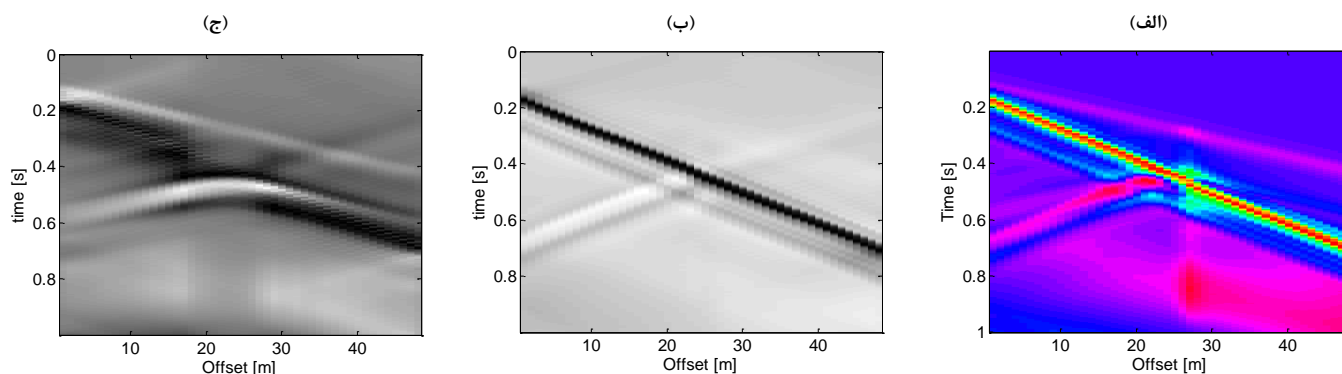
۳-۴- تأثیر بار لرزه‌ای با محتوای فرکانسی ضربه چکش

بار چکش به‌عنوان بار متمرکز گذرا توسط Goble و همکاران در سال ۱۹۸۰ ارائه شده است این بار بر اساس نمودار نیرو-زمان در شکل ۲۰ نمایش داده شده است [۳۷]. محققان مختلفی از ضربه بار چکش برای ارزیابی تأثیر کوبش شمع بر خاک زیرین در نرم‌افزار آباکوس استفاده نموده‌اند [۳۸ و ۳۹]. بار ارتعاشی با عنوان ضربه چکش^{۱۳} که تقریباً در اکثر آزمایش‌های لرزه‌ای غیر مخرب مانند تحلیل چندگانه امواج سطحی^{۱۴} استفاده می‌شود این بار لرزه‌ای جهت شناسایی‌های ژئوتکنیکی در عمق‌های نزدیک سطح زمین کاربرد دارد. نظر به اینکه در شناسایی عمق‌های سطحی بخصوص موارد ژئوتکنیکی، فرکانس‌های ۱۰ تا ۳۵ هرتز بیشتر موردنیاز می‌باشد لذا محتوای فرکانسی این بار برای فرکانس‌های زیر ۵۰ هرتز مناسب هست.



شکل ۲۰: بار ضربه چکش در فضای (الف) زمان و فرکانس و (ب) طیف فرکانس-عدد موج حاصل از برداشت ژئوفن‌ها

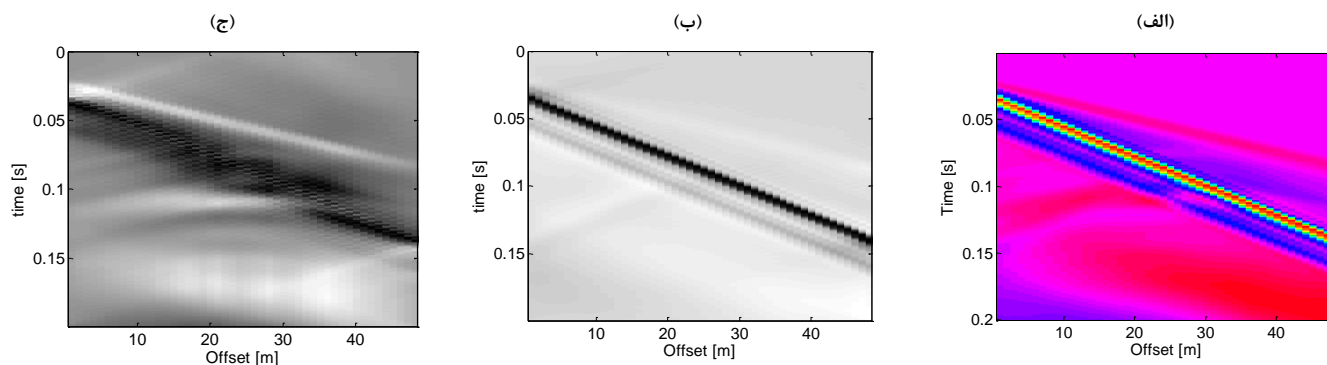
نتایج مربوط به حفره در عمق ۲ و ۱۰ متر در شکل ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است. بار لرزه‌ای چکش با انرژی بالا، دارای دقت و وضوح بسیار خوبی می‌باشد که به‌راحتی می‌توان با استفاده از امواج رایلی و طولی برگشتی، حفره‌های مدفون در عمق ۲ و ۶ متر را شناسایی نمود. همچنین برای حفره مدفون در عمق ۱۰ متر، امواج رایلی و طولی برگشتی ناشی از حفره قابل تشخیص می‌باشند (شکل ۲۲)؛ اما در عمق ۲۰ متر صرفاً امواج طولی برگشتی قابل مشاهده می‌باشد؛ بنابراین، بار لرزه‌ای چکش می‌تواند از گزینه‌های مناسب جهت تولید امواج رایلی و طولی برای شناسایی‌های زیرسطحی باشد.



شکل ۲۱: میدان امواج (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۲ متر: (الف) قبل از فیلتر، (ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، (ج) امواج طولی بعد از فیلتر

¹³ Impact load

¹⁴ MASW



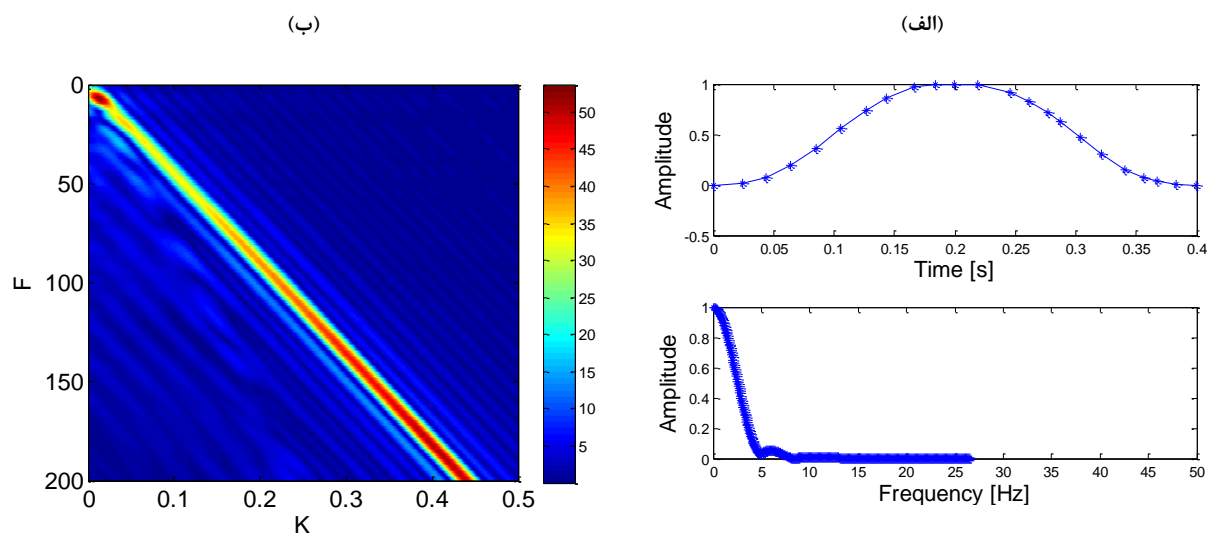
شکل ۲۲: میدان امواج (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۱۰ متر: الف) قبل از فیلتر، ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، ج) امواج طولی بعد از فیلتر

۳-۵- تأثیر بار لرزه‌ای چکش با محتوای سینوسی

تئوری ضربه برای ارائه دقیق‌تر نیروی پالس توسط هرتز ارائه شده است [۴۰ و ۴۱]. این نیروی پالس می‌تواند به‌عنوان تابع زمان-نیرو به‌صورت نیروی سینوسی نیم‌پریود با ماکزیمم دامنه F_{max} برای یک بازه زمانی t_c باشد. به این منظور تابع نیرو-زمان به‌عنوان نیم‌سیکل سینوسی مکعبی (HSC) برای نمایش بار ضربه مطابق فرمول زیر در لحاظ شده است.

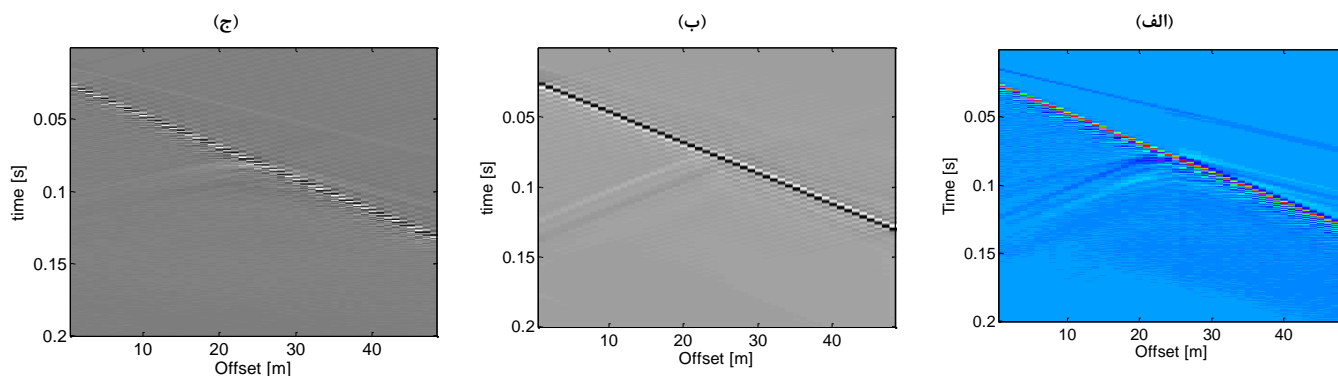
$$HSC \quad f(t) = F_{max} \sin^3 \frac{\pi t}{t_c} \quad (3)$$

بار چکش به‌صورت سینوسی در حوزه زمان و فرکانس در شکل ۲۳ نمایش داده شده است. هرچند که در طیف انرژی در فضای فرکانس-عدد موج (f-k) این بار در فرکانس‌های زیر ۵ هرتز و فرکانس‌های بالا انرژی قابل توجهی ایجاد نموده است.

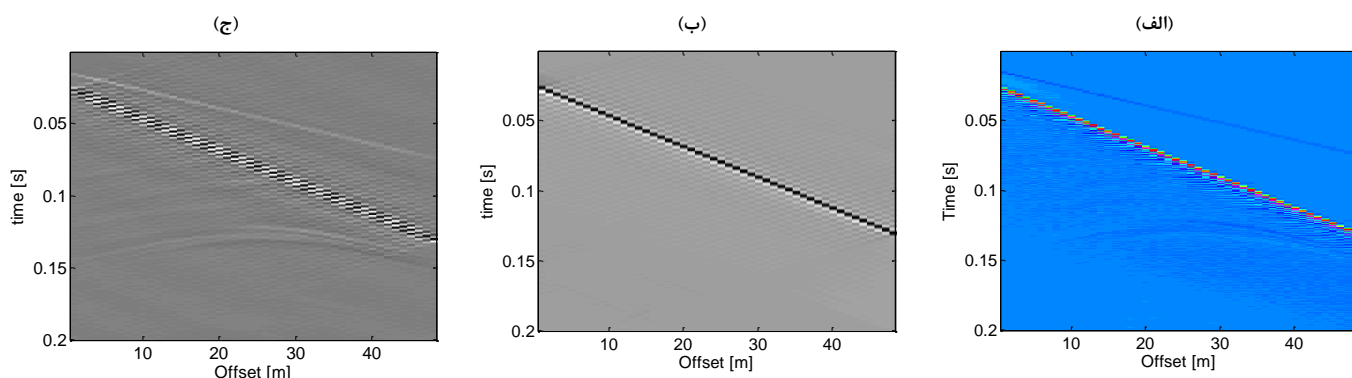


شکل ۲۳: نمایش بار لرزه‌ای ریکر ۵۰ هرتز در فضای الف) زمان و فرکانس و ب) طیف فرکانس-عدد موج حاصل از برداشت ژئوفن‌ها

بار چکش سینوسی دقت و وضوح عالی برای نمایش امواج رایلی و طولی برگشتی جهت شناسایی حفره در عمق ۲ متر حاصل نموده است (شکل ۲۴). به‌تناسب این دقت در عمق ۶ متر کاهش داشته است و برای حفره مدفون در عمق ۱۰ متر، امواج رایلی و طولی برگشتی ناشی از حفره دارای وضوح کم و به‌سختی قابل مشاهده هستند. نهایتاً در عمق ۲۰ متر صرفاً امواج طولی برگشتی قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۲۵). به صورت کلی می‌توان این‌گونه بیان کرد که استفاده از بار چکش سینوسی در شناسایی‌های حفرات سطحی و کم‌عمق مناسب‌تر می‌باشد.



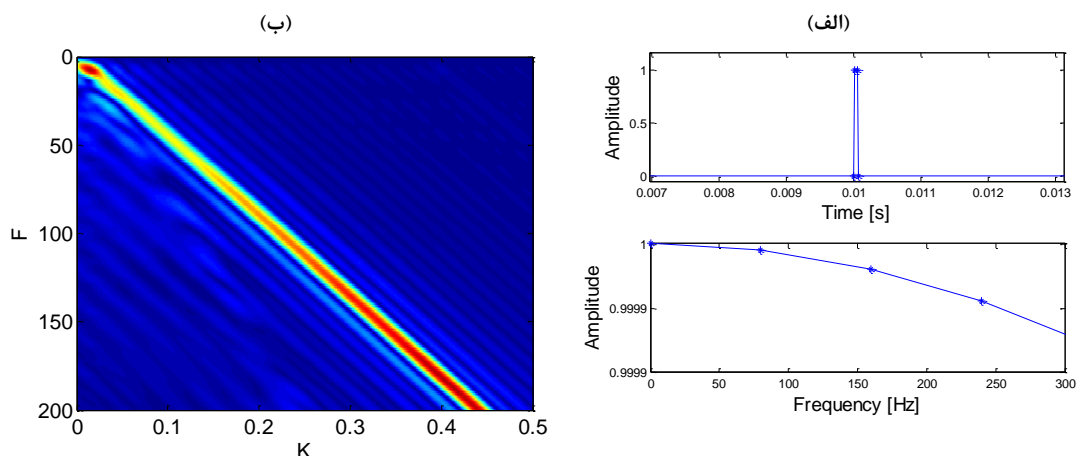
شکل ۲۴: میدان امواج (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۲ متر: (الف) قبل از فیلتر، (ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، (ج) امواج طولی بعد از فیلتر



شکل ۲۵: میدان امواج (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۲۰ متر: (الف) قبل از فیلتر، (ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، (ج) امواج طولی بعد از فیلتر

۳-۶- تأثیر بار لرزه‌ای با محتوای ضربه کوتاه^{۱۵}

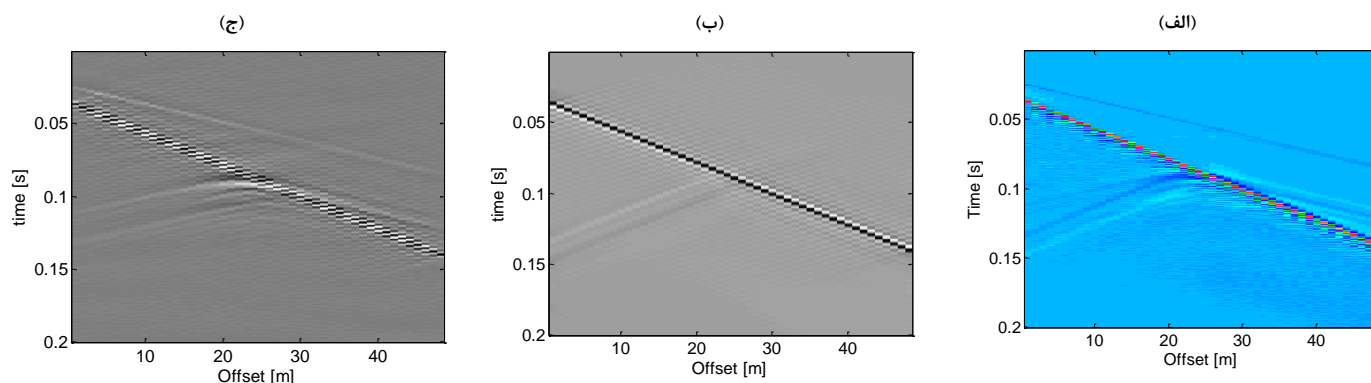
ضربه گذرا به صورت قایم بر روی سطح مدل اجزای محدود اعمال می‌گردد. این بار ضربه‌ای جهت کمک به حداقل رساندن مسائل با فرکانس بالا ایجاد شده که توسط بارهای ناگهانی نقطه‌ای شناخته می‌شود [۴۲]. بار ضربه‌ای نشان داده شده در شکل ۲۶ به خاطر اینکه در مدت زمان خیلی کوچک (dt) اعمال می‌شود دربرگیرنده فرکانس‌های بالا می‌باشد و می‌توان اظهار داشت که چون در قسمت مثبت نمودار زمان-دامنه اعمال می‌شود در تمام محدوده فرکانس‌ها دارای حداکثر انرژی هست.



شکل ۲۶: نمایش بار لرزه‌ای با محتوای ضربه کوتاه در فضای (الف) زمان و فرکانس و (ب) طیف فرکانس-عدد موج حاصل از برداشت ژئوفن‌ها

¹⁵ transient impact

بار گذرا همانند بار چکش سینوسی با دقت و وضوح خوبی موقعیت مرز اول و دوم حفره را از طریق امواج رایلی و طولی برگشتی جهت شناسایی حفره در عمق ۲ را حاصل نموده است (شکل ۲۷). ولی برای حفره مدفون در عمق ۶ و ۱۰ متر، امواج رایلی برگشتی ضعیف تر شده اند و در عمق ۲۰ محو شده اند و صرفاً امواج طولی برگشتی با وضوح مناسبی قابل مشاهده می باشد. پس بار گذرا یا ضربه کوتاه در عمق های سطحی مناسب می باشد ولی برای شناسایی حفره در اعماق بیشتر به خاطر کاهش رزولوشن و انرژی امواج رایلی چندان مناسب نمی باشد.



شکل ۲۷: میدان امواج (فضای زمان-فاصله) برای حفره در عمق ۲ متر: (الف) قبل از فیلتر، (ب) امواج رایلی بعد از فیلتر، (ج) امواج طولی بعد از فیلتر

۳-۷- مقایسه نتایج

در این مقاله، شش نمونه بار لرزه ای با شرایط مختلف که در مطالعات اخیر توسط محققان مختلف استفاده شده مورد ارزیابی قرار گرفته شده است (جدول ۲). در ابتدا، برای حفره مدفون در عمق ۲ متر تمامی بارها نتایج خوبی ارائه دادند که البته برای تشخیص دقیق تر مرز اول و دوم و همچنین تشخیص هندسه حفره بارهای لرزه ای ریکر ۱۰۰ هرتز، ضربه چکش و ضربه کوتاه دقت بهتری داشته اند. سپس، برای حفره در عمق ۶ متر بارهای لرزه ای ریکر ۵۰ و ضربه چکش دقت مناسبی داشته اند. در ادامه، برای حفره در عمق ۱۰ متر تقریباً تمامی بارها به صورت ضعیف امواج رایلی را ایجاد نموده اند و تنها بار ریکر ۱۰۰ هیچ گونه امواج رایلی را نتوانسته ایجاد نماید؛ و در نهایت برای حفره در عمق ۲۰ متر (دو برابر شدن عمق در مقایسه با عمق ۱۰ متر) نتایج متفاوت تر شدند و در اکثر مدل ها، امواج رایلی محو شده اند و یا با نتایج خیلی ضعیف پدیدار شده اند (بار ریکر ۲۰ هرتز). البته در عمق ۲۰ متر به علت ضعیف شدن امواج رایلی، امواج طولی برگشتی دارای دقت قابل توجهی بودند و برای بارهای لرزه ای که دارای فرکانس بالاتری هستند نتایج بهتری حاصل نموده اند. لازم به ذکر است که بار ریکر ۲۰ هرتز با فرکانس پایین و به تناسب ایجاد طول موج بلندتر سبب پدیدار شدن امواج رایلی هر چند به صورت ضعیف در فضای میدان موج برای عمق ۲۰ متر شده اند. در جدول زیر به صورت کیفی، توانایی و تأثیر انواع بارها در جهت شناسایی حفرات مدفون در عمق ۲، ۶، ۱۰ و ۲۰ متر بیان شده است.

جدول ۲: مقایسه بارهای لرزه ای مختلف برای مدل ها با حفره مدفون در عمق ۲، ۶، ۱۰ و ۲۰ متر

حفره در عمق ۲۰ متر		حفره در عمق ۱۰ متر		حفره در عمق ۶ متر		حفره در عمق ۲ متر		نوع بار لرزه ای
امواج طولی	امواج رایلی	امواج طولی	امواج رایلی	امواج طولی	امواج رایلی	امواج طولی	امواج رایلی	
خوب	-	خوب	-	خوب	ضعیف	عالی	عالی	ریکر ۱۰۰ هرتز
خوب	-	متوسط	ضعیف	خوب	خوب	خوب	خوب	ریکر ۵۰ هرتز
ضعیف	خیلی ضعیف	ضعیف	ضعیف	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	ریکر ۲۰ هرتز
خوب	-	ضعیف	ضعیف	خوب	خوب	عالی	عالی	ضربه چکش
خوب	-	متوسط	خیلی ضعیف	متوسط	ضعیف	خوب	عالی	ضربه چکش سینوسی
خوب	-	متوسط	خیلی ضعیف	ضعیف	ضعیف	عالی	عالی	ضربه کوتاه

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به ارزیابی تأثیر محتوای فرکانسی انواع بارهای لرزه‌ای جهت شناسایی حفرات زیرسطحی با استفاده از امواج رایلی و طولی پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان دادند که:

- بارهای لرزه‌ای ریکر ۱۰۰ هرتز، ضربه چکش و ضربه کوتاه با محتوای فرکانسی بالا دارای بیشترین دقت در جهت شناسایی حفرات سطحی در حدود ۲ متر می‌باشند؛ و بارهای لرزه‌ای ریکر ۵۰ هرتز و ضربه چکش دقت و وضوح مناسبی در راستای شناسایی حفرات در اعماق ۶ و ۱۰ متر داشته‌اند. در عمق‌های بیشتر در حدود ۲۰ متر تنها بار ریکر ۲۰ هرتز با محتوای فرکانس پایین توانسته نتایجی قابل قبولی را فراهم نماید.
- محتوای فرکانسی و فرکانس غالب بار لرزه‌ای بر وضوح نتایج حاصله امواج طولی و رایلی در راستای شناسایی حفرات سطحی و عمیق تأثیر قابل توجهی دارند. همچنان که بار ریکر ۱۰۰ هرتز در اعماق سطحی و بار ریکر ۲۰ هرتز در اعماق بیشتر نتایج مناسب و قابل قبولی را فراهم نموده‌اند.
- با فیلتر کردن و جداسازی امواج رایلی از امواج طولی می‌توان به نحو مناسب‌تری ناهنجاری‌های زیرسطحی را شناسایی و دقت و وضوح تصاویر را افزایش داد.
- در عمق‌های زیاد به علت ضعیف شدن انرژی و دامنه امواج رایلی، امواج طولی دارای دقت و وضوح مناسب‌تری هستند. همچنان که در عمق‌های کمتر هم می‌توان در کنار امواج رایلی از امواج طولی نیز جهت شناسایی حفره زیرسطحی استفاده نمود؛ بنابراین بهره‌گیری ترکیبی و هم‌زمان از نتایج امواج رایلی و طولی جهت درک و شناخت بهتر وضعیت ناهنجاری‌های زیرسطحی می‌تواند بسیار مفید و کارآمد باشد.

مراجع

- [1] Rahnema, H., & Mirasi, S. (2012). Seismic and geotechnical study of land subsidence and vulnerability of rural buildings. *International Journal of Geosciences*, 3(04), 878.
- [2] Rahnema, H., & Mirassi, S. (2016). Study of land subsidence around the city of Shiraz. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, 23(3), 882.
- [3] Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808.
- [4] Coduto, D. P. (2015). *Foundation design: principles and practices*. Pearson. (Second edition), Prentice Hall, Inc.
- [5] Miller, R. D., Ivanov, J., Xia, J., Peterie, S. L., & Sloan, S. L. (2010). Seismic investigations of subsidence hazards. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010* (pp. 3769-3773). Society of Exploration Geophysicists.
- [6] Sloan, S. D., Nolan, J. J., Broadfoot, S. W., McKenna, J. R., & Metheny, O. M. (2013). Using near-surface seismic refraction tomography and multichannel analysis of surface waves to detect shallow tunnels: A feasibility study. *Journal of Applied Geophysics*, 99, 60-65.
- [7] Sloan, S. D., Peterie, S. L., Ivanov, J., Miller, R. D., McKenna, J. R., Bradford, J. H., & Holliger, K. (2010). Void detection using near-surface seismic methods. *Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar: SEG Geophysical Developments Series*, 15, 201-218.
- [8] Sloan, S. D., Peterie, S. L., Miller, R. D., Ivanov, J., Schwenk, J. T., & McKenna, J. R. (2015). Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques. *Geophysics*, 80(5), EN127-EN135.
- [9] Aminnedjad, B., & Butt, S. D. (2003). *Imaging Abandoned Underground Mines and Assessing Geotechnical Hazards Research Project, Phase 1 Final Report – Assessment of State of the Art for Nondestructive Geophysical Imaging Technology*, unpublished report.
- [10] Ivanov, J., Miller, R. D., Park, C. B., & Ryden, N. (2003). Seismic search for underground anomalies. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2003*, (pp. 1223-1226), Society of Exploration Geophysicists.

- [11] Steiakakis, E., Lazaropoulos, A., Vafidis, A., Agioutantis, Z., & Kritikakis, G. (2017). Determination of shear wave velocities in sediment deposits. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1-11.
- [12] Nasser-Moghaddam, A., Cascante, G., & Hutchinson, J. (2005). A new quantitative procedure to determine the location and embedment depth of a void using surface waves. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 10(1), 51-64.
- [13] Nasser-Moghaddam, A., Cascante, G., Phillips, C., & Hutchinson, D. J. (2007). Effects of underground cavities on Rayleigh waves—Field and numerical experiments. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 27(4), 300-313.
- [14] Xia, J., Nyquist, J. E., Xu, Y., Roth, M. J., & Miller, R. D. (2007). Feasibility of detecting near-surface feature with Rayleigh-wave diffraction. *Journal of Applied Geophysics*, 62(3), 244-253.
- [15] Chai, H. Y., Phoon, K. K., Goh, S. H., & Wei, C. F. (2012). Some theoretical and numerical observations on scattering of Rayleigh waves in media containing shallow rectangular cavities. *Journal of Applied Geophysics*, 83, 107-119.
- [16] Chai, H. Y., Goh, S. H., Phoon, K. K., Wei, C. F., & Zhang, D. J. (2014). Effects of source and cavity depths on wave fields in layered media. *Journal of Applied Geophysics*, 107, 163-170.
- [17] Shi, P. (2015). Surface wave propagation effects on buried segmented pipelines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(4), 440-451.
- [18] Shao, G. Z., Tsoflias, G. P., & Li, C. J. (2016). Detection of near-surface cavities by generalized S-transform of Rayleigh waves. *Journal of Applied Geophysics*, 129, 53-65.
- [19] Park, C. B., Miller, R. D., Rydén, N., Xia, J., & Ivanov, J. (2005). Combined use of active and passive surface waves. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10(3), 323-334.
- [20] Morikawa, H., Sawada, S., & Akamatsu, J. (2004). A method to estimate phase velocities of Rayleigh waves using microseisms simultaneously observed at two sites. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(3), 961-976.
- [21] Castaings, M., Bacon, C., Hosten, B., & Predoi, M. V. (2004). Finite element predictions for the dynamic response of thermo-viscoelastic material structures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(3), 1125-1133.
- [22] Hesse, D., & Cawley, P. (2006). Surface wave modes in rails. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(2), 733-740.
- [23] Luo, W., & Rose, J. L. (2007). Phased array focusing with guided waves in a viscoelastic coated hollow cylinder. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(4), 1945-1955.
- [24] Drozd, M. B. (2008). Efficient finite element modelling of ultrasound waves in elastic media (Doctoral dissertation, Imperial College London). Imperial College London.
- [25] Rajagopal, P., Drozd, M., Skelton, E. A., Lowe, M. J., & Craster, R. V. (2012). 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*, 51, 30-40.
- [26] Davoodi, M., Pourdeilami, A., Jahankhah, H., & Jafari, M. K. (2018). Application of perfectly matched layer to soil-foundation interaction analysis. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 753-768.
- [27] Lin, S., & Ashlock, J. C. (2014). Multimode Rayleigh wave profiling by hybrid surface and borehole methods. *Geophysical Journal International*, 197(2), 1184-1195.
- [28] Lin, S., & Ashlock, J. C. (2016). Surface-wave testing of soil sites using multichannel simulation with one-receiver. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 87, 82-92.
- [29] Olsson, D. (2012). Numerical simulations of energy absorbing boundaries for elastic wave propagation in thick concrete structures subjected to impact loading. Thesis, Umeå University.
- [30] Atkinson, J. H. (2000). Non-linear soil stiffness in routine design. *Gèotechnique*, 50(5), 487-508.

- [31] Shirzad Shahrivar, M., Gholi Zadeh, A. (2017). Numerical investigation of soil and buried structures using finite element analysis. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 3(4): 97-104. doi: 10.22065/jsce.2016.41241.
- [32] Abbasi Karafshani, S., Ardakani, A. Yakhchalian, M. (2016). 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*, 2(4), pp. 117-130.
- [33] Schmelzbach, C., Jordi, C., Sollberger, D., Doetsch, J., Kaufmann, M., Meijer, W. Y. & Horstmeyer, H. (2015, June). Understanding the impact of karst on seismic wave propagation-a multi-method geophysical study. In 77th EAGE Conference and Exhibition-Workshops.
- [34] Willem Ynze, Meijer. 2014. Numerical modeling for seismic exploration with karstic subsurface structures. Master of Science Thesis, Delft University of Technology, ETH Zurich, RWTH Aachen University
- [35] Zeng, C., Xia, J., Miller, R. D., & Tsoflias, G. P. (2011). Application of the multiaxial perfectly matched layer (M-PML) to near-surface seismic modeling with Rayleigh waves. *Geophysics*, 76(3), T43-T52.
- [36] Xu, Y., Xia, J., & Miller, R. D. (2007). Numerical investigation of implementation of air-earth boundary by acoustic-elastic boundary approach. *Geophysics*, 72(5), SM147-SM153.
- [37] Goble, GC. Rausche, F. and Likinis, GE. (1980). the analysis of pile driving: a state-of-the-art. *Proceedings of the 1st International Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles*. Stockholm, Sweden, pp. 131–161.
- [38] Khoubani, A., & Ahmadi, M. M. (2014). Numerical study of ground vibration due to impact pile driving. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 167(1), 28-39.
- [39] Serdaroglu, MS. (2010). Nonlinear Analysis of Pile Driving and Ground Vibrations in Saturated Cohesive Soils Using the Finite Element Method. PhD dissertation, University of Iowa, Iowa City, IA USA.
- [40] Hunter, S. C. (1957). Energy absorbed by elastic waves during impact. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 5(3), 162-171.
- [41] McLaskey, G. C., & Glaser, S. D. (2010). Hertzian impact: Experimental study of the force pulse and resulting stress waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(3), 1087-1096.
- [42] Lin, S. (2014). Advancements in active surface wave methods: modeling, testing, and inversion. PhD dissertation, Citeseer.