



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Estimation of the Soil Layers Thickness Using Multi-Chanel Analysis of Surface Waves and Surface Wave Dispersion Curve

Mehdi Hashemi Jokar¹, Hossein Rahnema^{2*}, Abdolhossein Baghlani³

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

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

3- Associated Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

ABSTRACT

One of the most interesting topics in the geotechnical and geophysical engineering is the use of surface waves to characterize the earth subsurface layers. In a vertically heterogeneous media, the phase velocity of the surface wave is a function of the frequency (the frequency-phase velocity relationship is called dispersion curve). The dispersion curve is calculated by the shear wave velocity, compressive velocity, density, and thickness of each of the layers, which their properties can be increasing or decreasing from the surface to the half-space. In this paper, horizontal soil layers were modelled using finite element method based software (ABAQUS). Due to the different layering specifications, the models are divided into two main types: the layers' characteristics increase with depth and the layers' characteristics decrease and increase with depth. An active impact source was used to create surface waves and the absorption layers with increasing damping (ALID) were applied to the model boundaries to prevent the wave reflection. Based on the gathered surface wave data, the dispersion curve was plotted using Frequency-Wavenumber Transfer method. In addition, the effects of different geophone offsets on the dispersion curve were investigated. The results showed that using the dispersion curve and phase velocity at high frequencies, the thickness of the surface layer can be calculated. Also, the slope of the dispersion curve at low frequencies indicates the number of the layers at different properties, and the steeper and closer to the vertical, means that a few number of layers are exist in the media. Furthermore, the effects of different geophone offsets were investigated and it was observed that geophone offsets should be limited to less than one-fourth of the layer depth in order to prevent the dispersion curve jumping to the higher modes. Furthermore, if the dispersion curve jumps to the higher modes at high frequencies, seismic data can be taken at a less geophones' offset or the dispersion curve frequency range limitation is only before jumping to higher modes.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 June 2019

Revise Date: 29 July 2019

Accept Date: 27 August 2019

Keywords:

Surface waves;
Dispersion curves;
Finite element method;
Layer thickness;
Geophone offsets;
Higher modes

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.191481.1890

*Corresponding author: Hossein Rahnema

Email address: rahnema@sutech.ac.ir

ارزیابی و تخمین ضخامت لایه‌های خاک با استفاده از تحلیل چند ایستگاهی امواج

سطحی و منحنی پراکندگی امواج سطحی

مه‌دی هاشمی جوکار^۱، حسین رهنما^{۲*}، عبدالحسین بغلانی^۳

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

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

۳- دانشیار گروه عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده

یکی از موضوعات موردعلاقه مهندسان ژئوتکنیک و ژئوفیزیک، استفاده از روش امواج سطحی در شناسایی لایه‌های زیرسطحی زمین می‌باشد. در محیطی که به‌صورت عمودی ناهمگن می‌باشد، سرعت فازی امواج سطحی تابعی از فرکانس می‌باشد. نمودار فرکانس در برابر سرعت فازی، منحنی پراکندگی نامیده می‌شود که این منحنی تابعی از سرعت موج‌پرسی، سرعت موج فشاری، چگالی و ضخامت هرکدام از لایه‌های زمین می‌باشد. در این مقاله، مدل‌سازی محیط خاک با لایه‌بندی افقی در نرم‌افزار اجزا محدود (آباکوس) ارائه گردیده و پاسخ لرزه‌ای محیط‌های خاک با لایه‌های افقی شبیه‌سازی شده است. با توجه به تفاوت در مشخصات لایه‌بندی محیط، مدل‌ها را به دو نوع اصلی تقسیم می‌نماییم: مشخصات لایه‌ها با عمق افزایش می‌یابد (لایه‌ها از بالا به پایین سخت‌تر می‌شوند) و مشخصات لایه‌ها با عمق کاهش و افزایش می‌یابد (لایه‌های ضعیف در بین دو لایه قوی‌تر قرار گرفته باشد). در این مدل‌ها، برای ایجاد امواج سطحی از منبع ضربه فعال استفاده گردید و برای مرزهای مدل نیز، از روش لایه‌های جاذب با میرایی افزایشی استفاده شد (بدین ترتیب، از ورود امواج برگشتی از مرزها به داخل مدل جلوگیری شد). پس از اتمام مدل‌سازی، داده‌های لرزه‌ای توسط ژئوفون‌ها ثبت گردید و منحنی پراکندگی داده‌های برداشت شده با استفاده از روش انتقال فرکانس-عدد موج محاسبه گردید. سپس، تاثیر فواصل مختلف ژئوفون‌ها در منحنی پراکندگی موردبررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که با استفاده از منحنی پراکندگی و سرعت فازی در فرکانس‌های بالا می‌توان ضخامت لایه سطحی را محاسبه نمود. همچنین، سرعت فازی در فرکانس‌های بالا متناسب با سرعت فازی لایه سطحی می‌باشد. در صورت وجود لایه سست‌تر در بین لایه‌های سخت‌تر، منحنی پراکندگی دارای یک تقعر می‌باشد که باعث می‌شود در فرکانس‌های کم، منحنی پراکندگی به سمت سرعت لایه سست‌تر میل کند و سپس در فرکانس‌های بالاتر، به سرعت فازی لایه سطحی معانج شود. شیب منحنی پراکندگی در فرکانس‌های پایین نشان‌دهنده حضور لایه‌های با سرعت‌های مختلف می‌باشد و هرچه شیب تندتر و به قائم نزدیک‌تر باشد، تعداد لایه‌های کمتری در محیط وجود دارد. برای محیط‌هایی که سختی‌شان از لایه‌های سطحی به لایه‌های پایین‌تر افزایش می‌یابد، منحنی پراکندگی به سمت راست (فرکانس‌های بالاتر) انتقال پیدا می‌کند. در ادامه تاثیر فواصل مختلف ژئوفون‌ها بررسی گردید و ملاحظه شد که فاصله ژئوفون‌ها باید به مقدار کمتر از یک‌چهارم عمق لایه محدود شود تا از پرش منحنی پراکندگی به مدهای بالاتر جلوگیری گردد. بعلاوه، در صورت مشاهده پرش منحنی پراکندگی به مدهای بالاتر در فرکانس‌های بالا، می‌توان، داده‌های لرزه‌ای را با فاصله کمتر ژئوفون‌ها برداشت نمود و یا اینکه، منحنی پراکندگی را فقط در محدوده فرکانسی قبل از پرش به مد بالاتر موردبررسی قرار داد.

کلمات کلیدی: امواج سطحی، منحنی پراکندگی، روش اجزا محدود، عمق لایه، فاصله ژئوفون، مدهای بالاتر

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.191481.1890	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.191481.1890	۱۴۰۰/۰۴/۳۰	۱۳۹۸/۰۶/۰۵	۱۳۹۸/۰۶/۰۵	۱۳۹۸/۰۵/۰۷	۱۳۹۸/۰۴/۰۳
حسین رهنما rahnama@sutech.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

در یک محیط ایزوتروپ، همگن و بی‌نهایت، فقط امواج حجمی موجود می‌باشد؛ اما وقتی که مدل در هیچ جهتی به صورت بی‌نهایت نباشد، امواج طولی و برشی با یکدیگر ترکیب می‌شوند و امواج سطحی ایجاد می‌گردند [۱]. امواج سطحی آن دسته از امواج هستند که در بین لایه‌های سطحی نزدیک به مرزهای دو محیط (به عبارتی، هر جا که سطح آزاد وجود داشته باشد) محدود شده و منتشر می‌شوند و دامنه آن‌ها به صورت نمایی با عمق زوال می‌یابد. برخلاف امواج حجمی که در راستای قائم و افقی انتشار می‌یابند، امواج سطحی تنها در دو بعد حرکت می‌کنند، به همین دلیل کاهیدگی هندسی آن‌ها کمتر از امواج حجمی می‌باشد (کاهیدگی هندسی امواج سطحی متناسب با $r^{-0.5}$ و کاهیدگی هندسی امواج حجمی متناسب با r^{-1} می‌باشند که r فاصله از منبع می‌باشد) [۲]. به‌طور کلی می‌توان گفت، در لرزش‌های ثبت‌شده توسط لرزه‌نگارها، امواج سطحی به‌عنوان موج غالب می‌باشند [۳]. در چند دهه اخیر، امواج سطحی به صورت موفقیت‌آمیزی در تعیین مشخصات مکانیکی مواد تشکیل دهنده لایه‌های زیرسطحی، از قبیل سرعت موج برشی، سرعت موج فشاری، نسبت پواسون و چگالی حجمی، استفاده گردیده است [۴]. این مشخصات می‌توانند در مقیاس‌های میکرو مانند تعیین شناسایی خرابی مواد با استفاده از امواج سطحی فراصوتی، مقیاس‌های بزرگ‌تر مانند شناسایی پوسته زمین و گوشته بالایی و همچنین کاربردهای نزدیک سطحی مانند تعیین مشخصات مکانیکی سازه‌های مهندسی و طراحی بهینه آن‌ها در مقابل حرکات دینامیکی و زلزله استفاده گردند [۵، ۶].

برداشت داده‌های لرزه‌ای به‌طور معمول، با یک منبع فعال سطحی و ثبت جبهه‌ی موج ناشی از آن صورت می‌گیرد. منبع مورد استفاده برای تولید امواج سطحی می‌تواند منبع ضربه‌ای باشد که در بیشتر مواقع می‌توان از چکش‌های کوچک برای تولید فرکانس‌های بالا و پرتاب وزنه برای تولید فرکانس‌های پایین استفاده نمود. برای ثبت ارتعاشات نیز از ژئوفون‌های قائم و افقی استفاده می‌شود که به دستگاه ثبت داده‌های دیجیتال متصل است. تعداد ژئوفون‌ها، فاصله‌ی آن‌ها و بازه‌های ثبت داده‌ها نیز برای یک داده‌برداری با کیفیت، دارای اهمیت بسیاری می‌باشد. در واقع داده‌برداری 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 [۷].

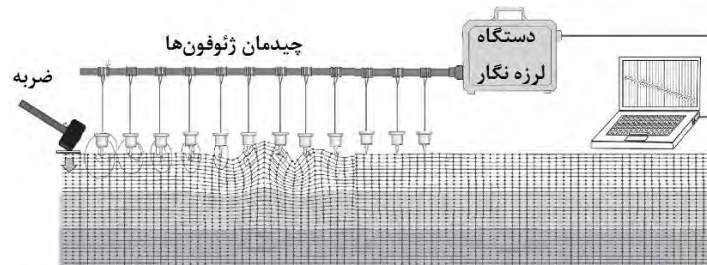
روش‌های امواج سطحی عبارت‌اند از روش ویبراتور حالت پایدار، روش آنالیز طیفی امواج سطحی (SASW) و روش آنالیز چندکاناله امواج سطحی (MASW) که در ادامه به توضیح این روش‌ها پرداخته می‌شود.

۱- روش ویبراتور حالت پایدار، اولین روشی است که برای شناسایی خاک مورد استفاده قرار گرفت [۸]. در این روش یک ویبراتور با فرکانس خاصی شروع به کار کردن می‌کند و امواج لرزه‌ای تولید می‌کند که این امواج توسط یک گیرنده ثبت می‌شود. بسته به فرکانس ویبراتور، f ، گیرنده باید در فاصله‌های متفاوتی قرار گیرد تا موج لرزه‌ای ثبت‌شده را با فرکانس ویبراتور هم‌فاز نشان دهد. این فاصله ثبت‌شده همان طول موج، λ ، متناظر با f ، خواهد بود. سپس، سرعت فازی با استفاده از رابطه $V_p = \lambda \cdot f$ قابل محاسبه می‌باشد. برای ترسیم منحنی پراکندگی، برداشت داده‌ها با فرکانس‌های دیگر ویبراتور باید تکرار شود تا نقاط بیشتری از فرکانس-سرعت فازی به دست آید و بنابراین، این روش بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشد.

۲- روش آنالیز طیفی امواج سطحی (SASW) برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ توسط نظریان و استوکه معرفی گردید. روش SASW، یکی از روش‌های غیر مخرب شناخته‌شده و پرکاربرد در بین مهندسی زلزله می‌باشد و باهدف کاهش زمان برداشت، از ایده اصلی روش ویبراتور حالت پایدار و تکنیک دوانسکی و همکاران (۱۹۷۲) استفاده می‌کند [۹]. در روش SASW، دو ژئوفون با فاصله مشخص (برابر با فاصله اولین ژئوفون تا منبع لرزه‌ای) قرار می‌گیرند تا داده‌های لرزه‌ای را ثبت نمایند. با توجه به اینکه برای ترسیم منحنی پراکندگی در روش SASW نیاز به انجام آزمایشات متعدد با فواصل مختلف بین دو ژئوفون می‌باشد، بنابراین، روش SASW نیز مانند روش ویبراتور حالت پایدار بسیار زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد.

۳- به دلیل برخی محدودیت‌هایی که روش SASW دارد، روش آنالیز چندکاناله امواج سطحی (MASW) توسط پارک و همکاران در سال ۱۹۹۹ معرفی گردید. روش MASW یکی از روش‌های غیر مخرب و پرکاربرد برای برداشت و آنالیز امواج سطحی می‌باشد که در آن

تعداد ژئوفون‌ها بیشتر از ۱۲ عدد می‌باشد و با فاصله مساوی در یک چیدمان خطی قرار می‌گیرند [۱۰]. ژئوفون‌ها باید داده‌های عمود را ثبت کنند، بنابراین، باید از عمود بودن ژئوفون‌ها اطمینان کافی به عمل آید. عمق نفوذ D_p در روش MASW به‌طور کلی برابر با یک‌دوم طول موج حداکثر، λ_{max} می‌باشد، $\lambda_{max} D_p = \frac{\lambda_{max}}{2}$ بیشترین فاصله بین ژئوفون‌ها می‌باشد که برابر است با فاصله بین اولین و آخرین ژئوفون [۸].



شکل ۱: دیاگرام شماتیک روش MASW [۸]

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منحنی پراکندگی

سرعت امواج رایلی به دلیل حضور گرادیان سرعت متوسط قائم (که متناسب با طول موج انتشار یافته می‌باشد)، متغیر می‌باشند و برای یک محیط با لایه‌های افقی، سرعت انتشار امواج رایلی (V_R) تابعی از فرکانس (f) می‌باشد. به این ویژگی امواج سطحی، خاصیت پراکندگی گفته می‌شود. بنابراین، در محیط همگن، که دارای ویژگی مکانیکی یکسانی در تمامی محیط می‌باشد، امواج سطحی نیز دارای سرعت فازی یکسانی در تمامی فرکانس‌ها (و یا تمامی طول موج‌ها (λ))، زیرا $V_p = \lambda \cdot f$ می‌باشند. اما در محیط‌های لایه‌ای، که هر لایه دارای خواص مکانیکی خاص خود می‌باشد، امواج سطحی سرعت‌های فازی متفاوتی برای فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد و به‌عبارتی دیگر، امواج با طول موج مختلف متناسب با عمقی که نفوذ می‌کنند، سرعت فازی متفاوتی خواهند داشت. این بدان معناست که امواج با دوره تناوب بزرگ‌تر به دلیل اینکه به اعماق بیشتر نفوذ می‌کنند، از مواد با سرعت بالاتر عبور کرده و سریع‌تر حرکت می‌کنند. بنابراین می‌توان گفت که هر طول موج متناسب با سرعت فازی که وابسته به مشخصه مکانیکی لایه‌های عبوری موج می‌باشد، انتشار خواهد یافت. سرعت فازی تابعی از فرکانس می‌باشد و این طبیعت پراکندگی امواج سطحی را می‌توان با ترسیم فرکانس در برابر سرعت فازی نمایش داد و منحنی پراکندگی را به دست آورد. در محیط‌های غیرهمگن، که دارای لایه‌بندی خاص می‌باشند، در هر فرکانس می‌تواند چندین طول موج وجود داشته باشد. بنابراین، برای هر فرکانس ممکن است سرعت‌های متفاوتی وجود داشته باشد که هر یک از آن‌ها مربوط به یک مد انتشار می‌باشند و مدهای متفاوتی می‌توانند به‌صورت هم‌زمان حضور داشته باشند. بنابراین، انتشار امواج سطحی در یک محیط غیرهمگن پدیده‌ای چند مدی می‌باشد. [۱].

داده‌های لرزه‌ای ثبت‌شده توسط دستگاه لرزه‌نگار و یا به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی، در حوزه زمان-مکان ($t - x$) می‌باشند که برای ترسیم منحنی پراکندگی حاصل از این داده‌ها، باید این داده‌ها به حوزه فرکانس-عدموج ($f - k$) انتقال داده شوند. روش انتقال $f - k$ بر پایه تبدیل فوریه دوبعدی بر روی داده‌های لرزه‌ای استوار می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، با اعمال یک‌مرتب‌به تبدیل فوریه زمانی بر روی داده‌های لرزه‌ای، داده‌ها در حوزه فرکانس-فاصله ($f - x$) به دست می‌آیند و با اعمال یک‌مرتب‌به تبدیل فوریه مکانی بر روی داده‌های حوزه $f - x$ ، داده‌ها به حوزه $f - k$ انتقال می‌یابند. سپس، باید مقادیر فرکانس، f ، و عددموج، k ، متناظر با حداکثر انرژی امواج سطحی به دست آیند و سرعت فازی، V_p ، با استفاده از فرمول $V_p = \frac{f}{k}$ ، محاسبه گردد و درنهایت، با ترسیم فرکانس در برابر سرعت فازی، منحنی پراکندگی به دست خواهد آمد.

۲-۲- روش اجزا محدود

روش اجزا محدود توانسته است به عنوان یک تکنیک با پتانسیل بسیار بالا در حل مسئله انتشار موج، به صورت موفقیت آمیزی بکار گرفته شود [۱۱-۱۴]. در این راستا، با استفاده از روش اجزا محدود و مدل سازی کرنش مسطح، مسئله ضربه و ژئوفون ها به خوبی قابل مدل سازی می باشد. نرم افزار آباکوس^۱ یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای بر پایه اجزا محدود می باشد که با دقت قابل قبولی برای مدل سازی مسائل مختلف، خصوصاً امواج سطحی و انتشار آن در محیط های ناهمگن، مورد استفاده قرار گرفته است [۴، ۱۰، ۱۵-۱۷]. در مراحل مختلف مدل سازی امواج سطحی با نرم افزار آباکوس، باید نکات خاصی مورد توجه قرار گیرند که در ادامه به این نکات و راه حل آنها اشاره شده است:

در تعیین مرزهای مدل باید به این نکته توجه نمود که از بازگشت موج به داخل مدل جلوگیری گردد؛ چراکه در واقعیت، هیچ گونه بازگشتی از نیم فضا به داخل مدل نخواهیم داشت و موج در مسیر خود به سمت بی نهایت انتشار می یابد. بنابراین، باید این مسئله در مدل سازی با نرم افزار به نحوی اعمال شود که از مدل سازی با ابعاد بزرگ و غیر ضروری پرهیز گردد. روش های مختلفی از قبیل ۱- المان بی نهایت [۱۸]؛ که فضای بی نهایت را با یک المان که از یک طرف به صورت باز می باشد معادل می کند، ۲- لایه های کاملاً سازگار^۲ (PML) [۱۵]؛ که موج در آن لایه به صورت نمایی زوال پیدا می کند، و ۳- لایه جاذب با میرایی افزایشی^۳ (ALID) [۱۰، ۱۵، ۱۶]؛ که از لایه هایی با افزایش میرایی به صورت تدریجی استفاده می شود، برای مدل کردن فضای بی نهایت ارائه گردیده است؛ اما از بین این سه نوع مرزهای جاذب، المان بی نهایت و PML دارای برخی مشکلات و یک سری محدودیت هایی در حوزه فرکانس می باشند و قادر به جذب تمام انرژی نمی باشند و تنها ALID است که توانسته به صورت کامل انرژی را جذب نماید و از برگشت انرژی به داخل المان جلوگیری نماید [۱۵]. بنابراین، در این تحقیق از روش ALID برای مدل سازی مرزهای جاذب استفاده شده است.

روش ALID از چندین لایه (بیش از ۸ لایه) با ضخامت مشخص (معمولاً یک متر) تشکیل گردیده است. مشخصات لایه های ALID کاملاً برابر با محیط مجاورشان می باشد، با این تفاوت که این لایه ها به ترتیب که از مدل دور می شوند، مقدار میرایی آنها افزایش می یابد. میرایی مورد استفاده در ALID از نوع میرایی رایلی^۴، $[C_R]$ ، می باشد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$[C_R] = C_M[M] + C_K[K]$$

که $[M]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس های جرم و سختی و C_M و C_K به ترتیب ضرایب میرایی جرم و سختی می باشند. C_K 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 $C_K = 0$ در نظر گرفته شود [۱۰]. مقادیر C_M که در این تحقیق برای لایه های ALID استفاده شده است، در جدول ۱ ارائه شده است. همان طور که در جدول ۱ ملاحظه می شود، این ضرایب به صورت مضرری از دو 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 دو لایه ALID و در نتیجه، بازگشت موج در مرز دو لایه نشود.

جدول ۱: مقادیر ضریب میرایی جرم (C_M) استفاده شده برای لایه های ALID

لایه های ALID									
لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	لایه ۴	لایه ۵	لایه ۶	لایه ۷	لایه ۸	لایه ۹	لایه ۱۰
۴	۸	۱۶	۳۲	۶۴	۱۲۸	۲۵۶	۵۱۲	۱۰۲۴	۲۰۴۸

^۱ ABAQUS

^۲ Perfectly Matched Layers

^۳ Absorbing Layers using Increasing Damping

^۴ Rayleigh damping

بار ضربه‌ای که برای ایجاد امواج سطحی استفاده می‌شود، باید به صورتی اعمال گردد که محتوای فرکانسی به اندازه لازم برای نفوذ در تمامی لایه‌ها را دارا باشد. بنابراین، از یک نیروی ضربه‌ای که به صورت بار مستطیلی با مدت زمان اعمال بار برابر با $40 \mu s$ که دارای محتوای فرکانسی از 5 تا 100 هرتز می‌باشد، استفاده گردید [10].

۳-۲- مشخصات مواد

خاک رفتار غیرخطی و برگشت‌ناپذیری دارد اما در کرنش‌های بسیار کوچک، رفتار تنش-کرنش رابطه‌ای نسبتاً خطی دارد. بنابراین در نظر گرفتن رفتار الاستیک خطی برای مدل‌سازی خاک منطقی به نظر می‌رسد. سطح کرنش متناظر با آزمایش‌های ژئوفیزیکی، بسیار کوچک است و در نتیجه استفاده از تئوری الاستیک خطی برای تفسیر آزمایش‌های لرزه‌ای امری پذیرفتنی می‌باشد. همچنین، پارامترهای کرنش کوچک، نقش مهم و اساسی در محدوده وسیعی از مسائل ژئوتکنیکی بازی می‌کنند [10، 19]. برای ترسیم منحنی پراکندگی امواج سطحی نیاز به داشتن مشخصات خاک از قبیل سرعت موج فشاری (V_p)، سرعت موج برشی (V_s)، چگالی (ρ) و ارتفاع (h)، در هر لایه می‌باشد. در مدل‌سازی امواج سطحی با نرم‌افزار 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 معادله‌های (1) و (2) محاسبه نمود.

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (1)$$

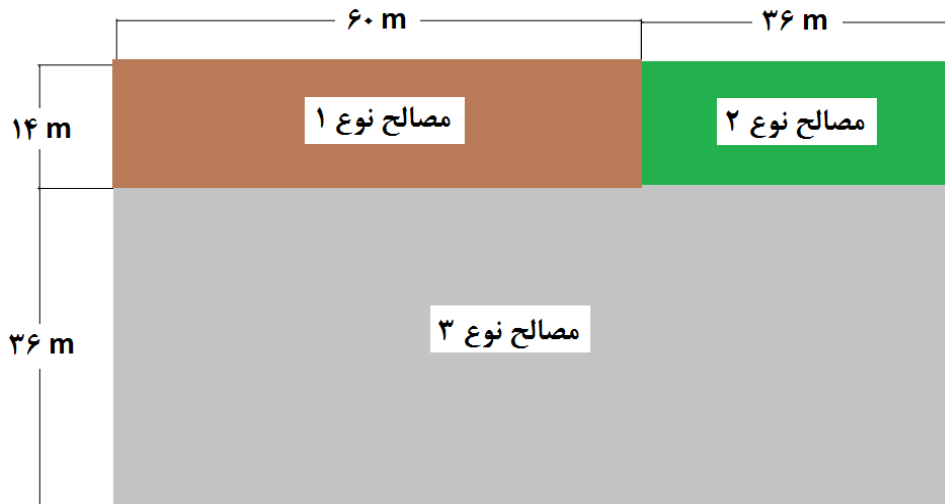
$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2)$$

۴-۲- صحت سنجی نرم‌افزار

به منظور صحت سنجی نرم‌افزار آباکوس در مدل‌سازی امواج سطحی، از داده‌های آزمایشگاهی هاشمی جوکار و همکاران در سال 2019 استفاده گردید [4]. آن‌ها امواج سطحی را در ساحل شهر تریسته^۵ واقع در کشور ایتالیا در امتداد L4 برداشت کرده‌اند. ساحل مورد نظر در امتداد L4 در فاصله 0 تا 96 متری جنوب-شمال، از سه نوع خاک تشکیل شده است که به صورت لایه‌بندی افقی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. آن‌ها داده‌های امواج سطحی در امتداد L4 را به وسیله ژئوفون‌های با فواصل 3 متر و مدت زمان 2 ثانیه با فواصل داده‌برداری 0/25 میلی‌ثانیه برداشت نموده‌اند. مشخصات مصالح تشکیل‌دهنده و هندسه امتداد L4 در شکل 2 و جدول 2 ارائه شده است [4].

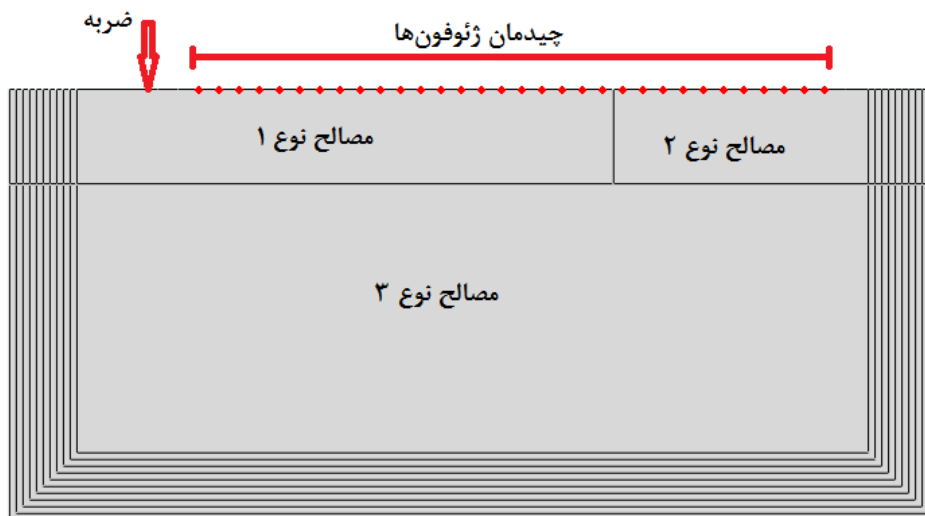
جدول 2: مشخصات مصالح تشکیل‌دهنده امتداد L4 واقع در ساحل تریسته کشور ایتالیا [4]

مشخصات مصالح					نوع مواد
μ	E (kN/m ²)	ρ (kg/m ³)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	
0/32	180000	1700	200	390	مصالح نوع 1
0/28	60000	1600	120	220	مصالح نوع 2
0/32	16250000	1900	1800	3500	مصالح نوع 3



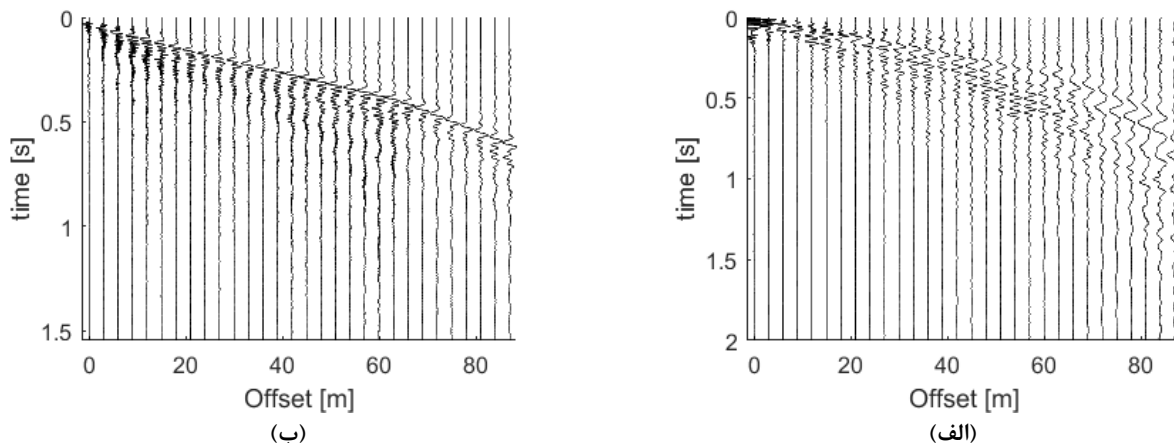
شکل ۲: هندسه داده‌های آزمایشگاهی برداشت‌شده توسط هاشمی جوکار و همکاران (۲۰۱۹) در امتداد L4 واقع در ساحل تریسته کشور ایتالیا [۴]

در این تحقیق، هندسه مدل آزمایشگاهی امتداد L4 در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی گردید (شکل ۳). همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد، در اطراف مدل از مرز جاذب ALID استفاده شده است و چیدمان ژئوفون‌ها نیز شامل ۳۲ عدد ژئوفون با فاصله ۳ متر از یکدیگر می‌باشد. داده‌ها در مدت‌زمان ۲ ثانیه با فواصل داده‌برداری ۰/۲۵ میلی‌ثانیه برداشت‌شده است. برای ایجاد امواج سطحی، از بار ضربه‌ای مستطیلی با مدت‌زمان اعمال بار ۰/۰۴ میلی‌ثانیه استفاده شده است.

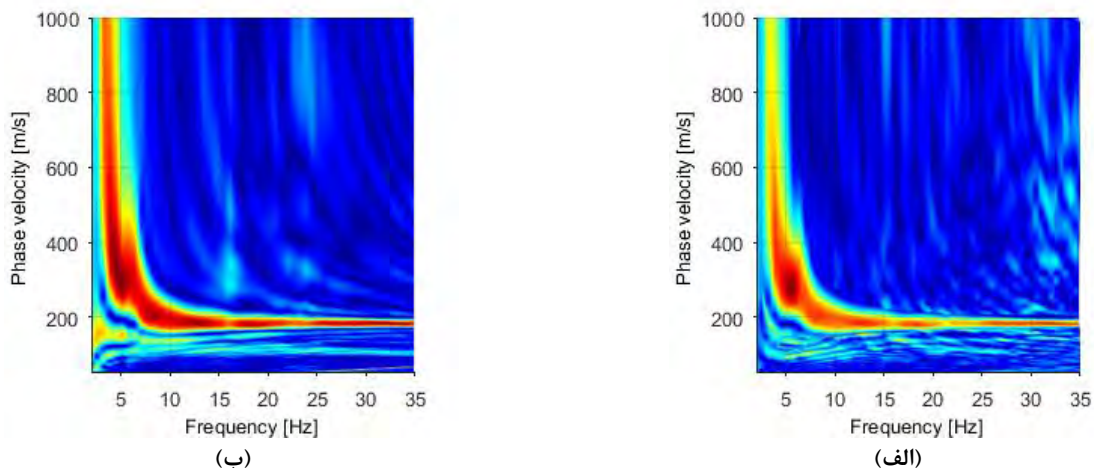


شکل ۳: شکل شماتیک صحت‌سنجی مدل چهار لایه آباکوس به همراه لایه‌های ALID، ضربه و ژئوفون‌ها

نمودار داده‌های لرزه‌ای برداشت‌شده در امتداد L4 توسط هاشمی جوکار و همکاران (۲۰۱۹) به همراه داده‌های لرزه‌ای ثبت‌شده به‌وسیله مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس، در شکل ۴ ارائه شده است. شکل ۵ نشان‌دهنده منحنی پراکندگی به‌دست‌آمده از داده‌های آزمایشگاهی هاشمی جوکار و همکاران (۲۰۱۹) و داده‌های حاصل از مدل‌سازی توسط نرم‌افزار آباکوس می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۴ و شکل ۵ ملاحظه می‌شود، نمودار داده‌های لرزه‌ای و منحنی پراکندگی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار آباکوس به‌خوبی با نمودار داده‌های لرزه‌ای و منحنی پراکندگی به‌دست‌آمده از داده‌های برداشت‌شده توسط هاشمی جوکار و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد. این تطابق نشان‌دهنده آن است که نرم‌افزار آباکوس به‌صورت موفقیت‌آمیزی قادر به مدل‌سازی امواج سطحی و انتشار امواج در محیط‌های لایه‌ای می‌باشد.



شکل ۴: داده‌های لرزه‌ای برداشت‌شده در امتداد L4 به دست آمده: (الف) توسط هاشمی جوکار و همکاران (۲۰۱۹) [۴] و (ب) ثبت‌شده در مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس



شکل ۵: منحنی پراکندگی به دست آمده از داده‌های لرزه‌ای برداشت‌شده در امتداد L4: (الف) توسط هاشمی جوکار و همکاران (۲۰۱۹) [۴] و (ب) ثبت‌شده در مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس

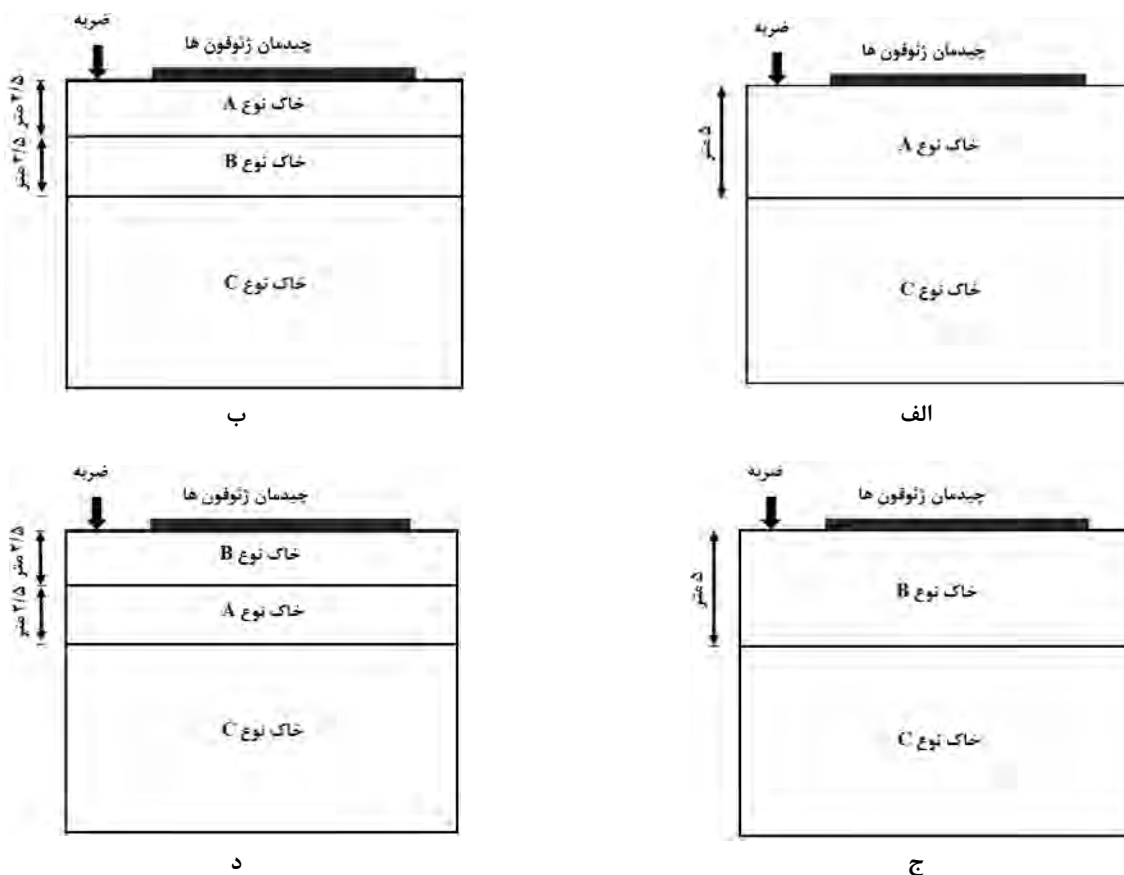
۳- مدل‌سازی عددی و ارزیابی نتایج

در این بخش، مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است. در مدل‌سازی لایه‌های خاک، از سه نوع خاک با مشخصات مختلف و نام‌های: خاک نوع A، خاک نوع B و خاک نوع C، استفاده گردید که مشخصات آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. چهار ترکیب مختلف از لایه‌های خاک در نظر گرفته شد که به صورت زیر می‌باشند: مدل شماره ۱: خاک یک‌لایه نوع A با ضخامت ۵ متر قرار گرفته بر روی نیم‌فضا (خاک نوع C)، مدل شماره ۲: خاک دولایه شامل یک لایه خاک نوع A و یک لایه خاک نوع B با ضخامت هر لایه ۲/۵ متر قرار گرفته بر روی نیم‌فضا (خاک نوع C)، مدل شماره ۳: خاک یک‌لایه نوع B با ضخامت ۵ متر قرار گرفته بر روی نیم‌فضا (خاک نوع C) و مدل شماره ۴: خاک دولایه شامل یک لایه خاک نوع B و یک لایه خاک نوع A با ضخامت هر لایه ۲/۵ متر قرار گرفته بر روی نیم‌فضا (خاک نوع C). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در مدل شماره ۱، ۲ و ۳، سختی لایه‌ها از بالا به پایین افزایش می‌یابد و در مدل شماره ۴، خاک سست‌تر در بین دو لایه سخت‌تر قرار دارد. در شکل ۶، مشخصات هندسی و ترتیب قرارگیری لایه‌های مدل‌های شماره ۱ تا ۴ نشان

داده شده است. در اطراف مرزهای مدل از ۱۰ لایه ALID استفاده گردید که مقادیر ضریب میرایی جرم (C_M) آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، ضربه مورد استفاده برای ایجاد امواج سطحی در این ۴ مدل، بار ضربه‌ای مستطیلی شکل می‌باشد که در بخش ۰ توضیح داده شده است. به منظور بررسی تاثیر فاصله ژئوفون‌ها در ترسیم منحنی پراکندگی این مدل‌ها، ژئوفون‌ها با فواصل ۰/۳۷/۵، ۰/۷۵/۵، ۰/۱۱۲/۵ و ۰/۱۵۰/۵ سانتی‌متر قرار داده شد و داده‌برداری در مدت‌زمان ۱ ثانیه با فاصله زمانی ۰/۱۲۵ میلی‌ثانیه انجام گرفت.

جدول ۳: مشخصات مصالح مورد استفاده برای مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

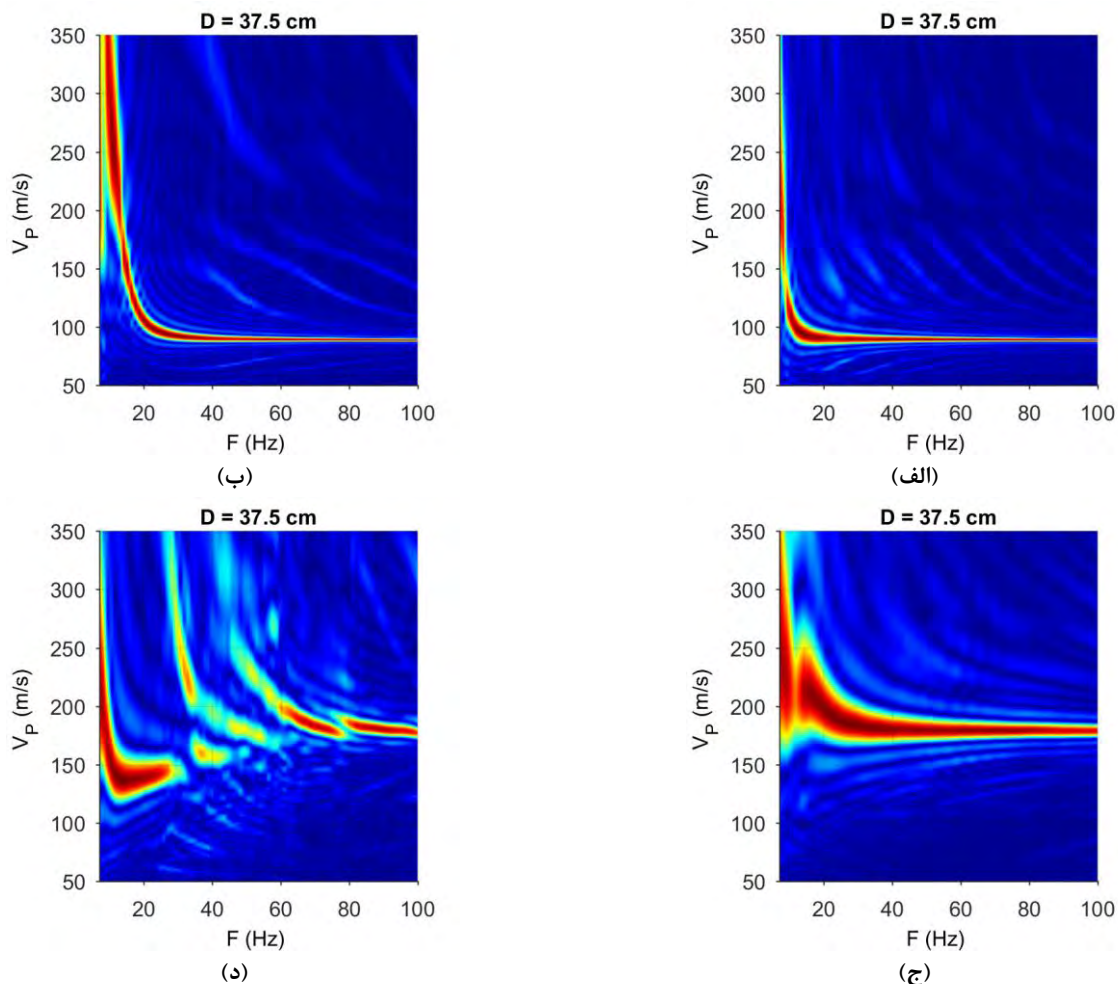
مشخصات						مصالح
C_M	μ	E (kN/m ²)	ρ (kg/m ³)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	
۲/۵	۰/۳۳	۵۰۶۶۶/۷	۱۹۰۰	۱۰۰	۲۰۰	خاک نوع A
۲/۵	۰/۳۳	۲۰۲۶۶۶/۷	۱۹۰۰	۲۰۰	۴۰۰	خاک نوع B
۲/۵	۰/۳۳	۴۵۶۰۰۰/۱۰	۱۹۰۰	۳۰۰	۶۰۰	خاک نوع C



شکل ۶: مشخصات هندسی و مصالح مدل‌های الف: مدل شماره ۱، ب: مدل شماره ۲، ج: مدل شماره ۳ و د: مدل شماره ۴

برای ترسیم منحنی پراکندگی مربوط به هر مدل، داده‌های لرزه‌ای ثبت شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. با استفاده از روش انتقال $f - k$ ، داده‌های لرزه‌ای از حوزه $t - x$ به حوزه $f - k$ انتقال داده شدند و منحنی پراکندگی ترسیم گردید. در شکل ۷ منحنی پراکندگی مدل‌های شماره ۱ تا ۴ برای ژئوفون‌های با فاصله برابر با ۰/۳۷/۵ سانتی‌متر ارائه شده است (منحنی پراکندگی برای فواصل ۰/۷۵/۵، ۰/۱۱۲/۵، ۰/۱۵۰/۵ و ۰/۱۸۷/۵ سانتی‌متر در شکل‌های پ ۱ تا پ ۴ در پیوست ارائه شده است). همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، مقادیر حداکثر منحنی پراکندگی در شکل ۷، با رنگ قرمز مشخص می‌باشد و با انتخاب نقاط حداکثر فرکانس و سرعت فازی مربوطه، منحنی

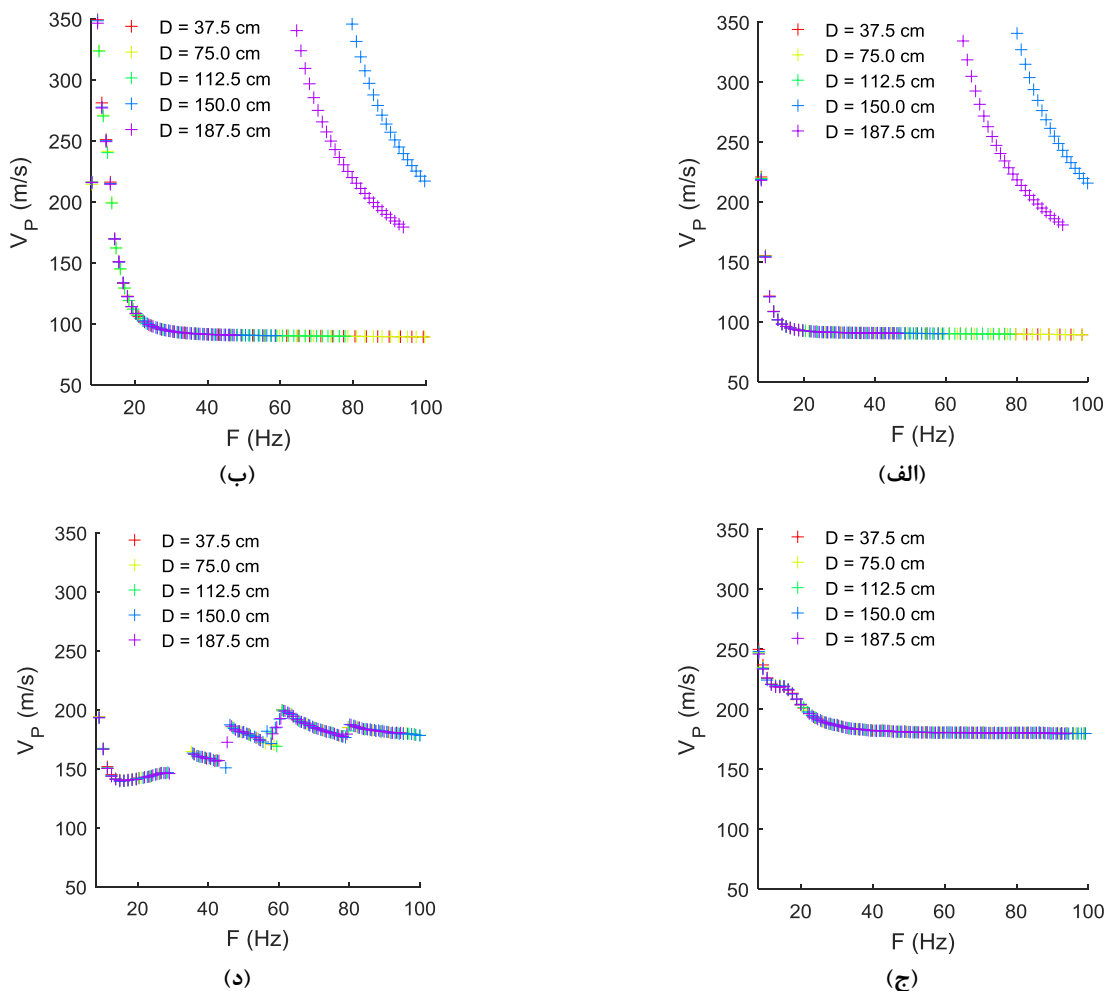
پراکندگی ترسیم می‌گردد. در شکل ۷ (الف)، منحنی پراکندگی مدل شماره ۱ تا فرکانس حدود ۱۰ هرتز، با شیب نسبتاً قائم پایین می‌آید و سپس در سرعت ۹۳ متر بر ثانیه، به حالت افقی می‌رسد. اما در شکل ۷ (ب) که منحنی پراکندگی مدل شماره ۲ ارائه شده است، منحنی پراکندگی با شیب نسبتاً کمتری نسبت به مدل شماره ۱ پایین می‌آید و در فرکانس حدود ۲۱ هرتز به سرعت ۹۱ متر بر ثانیه می‌رسد و افقی می‌گردد. این مقدار تفاوت در دو منحنی پراکندگی شکل ۷ (الف) و (ب)، به دلیل حضور لایه خاک نوع B در مدل شماره ۲ می‌باشد که به دلیل سخت‌تر بودن نسبت به خاک نوع A، فرکانس‌های بالاتری را دربر می‌گیرد و موجب می‌شود که منحنی پراکندگی به سمت راست (فرکانس‌های بالاتر) منتقل گردد. در شکل ۷ (ج) که منحنی پراکندگی مدل شماره ۳ ارائه شده است، به دلیل حضور لایه ۵ متری خاک نوع B، نمودار با شیب ملایم‌تری نسبت به حالت قائم پایین می‌آید و در فرکانس حدود ۳۰ هرتز به سرعت ۱۸۳ متر بر ثانیه می‌رسد و افقی می‌گردد (رفتاری نسبتاً مشابه با شکل ۷ (الف) و (ب)). شکل ۷ (د) مربوط به منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ می‌باشد و ملاحظه می‌گردد که رفتاری بسیار متفاوت‌تر نسبت به سه مدل دیگر دارد. به طوری که ابتدا منحنی پراکندگی به سمت سرعت کمتر از ۱۸۰ متر بر ثانیه حرکت می‌کند و به سرعت حدود ۱۳۵ متر بر ثانیه می‌رسد (تاثیر لایه خاک نوع A) و سپس حالت صعودی می‌گیرد و در فرکانس حدود ۷۵ هرتز به سرعت ۱۸۰ متر بر ثانیه می‌رسد و حالت افقی پیدا می‌کند؛ که این رفتار متفاوت در منحنی پراکندگی مدل شماره ۴، به دلیل حضور لایه خاک نوع A در بین دو لایه خاک نوع B و C می‌باشد.



شکل ۷: منحنی پراکندگی ترسیم شده برای ژئوفون‌های با فاصله ۳۷/۵ سانتی‌متر و مدل‌های: (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲، (ج) شماره ۳ و (د) شماره ۴.

در شکل ۸، منحنی پراکندگی مدل‌های شماره ۱ تا ۴ برای ژئوفون‌های با فواصل ۳۷/۵، ۷۵/۰، ۱۱۲/۵، ۱۵۰/۰ و ۱۸۷/۵ سانتی‌متر ترسیم گردیده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، برای مدل‌های شماره ۱ و ۲، منحنی پراکندگی در فرکانس‌های بالا به سرعت فازی خاک نوع A (۹۲ متربرثانیه) مجانب شده است و در واقع سرعت فازی خاک نوع A (که دارای سست‌ترین مشخصات در مدل‌ها می‌باشد) بر منحنی پراکندگی حاکم می‌باشد. منحنی پراکندگی مدل شماره ۳ نیز در فرکانس‌های بالا به سرعت فازی خاک نوع B (۱۸۳ متربرثانیه) مجانب شده است (در مدل شماره ۳، خاک نوع B دارای سست‌ترین مشخصات در این مدل می‌باشد). این مقادیر به دست آمده برای سرعت فازی، مطابق با ۹۳٪ سرعت موج برشی (مطابق با نتایج به دست آمده توسط فوتی و همکاران (۲۰۱۵)) برای $v = 0.33$ می‌باشد [۸]. خاک نوع A و خاک نوع B می‌باشد. همچنین می‌توان گفت که منحنی پراکندگی مدل‌هایی که در آن‌ها سختی لایه‌های خاک از بالا به پایین افزایش می‌یابد، در فرکانس‌های بالا به سرعت فازی لایه بالایی (لایه سطحی) مجانب می‌شوند.

در شکل ۸ (د) که نشان‌دهنده منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ می‌باشد، ملاحظه می‌گردد که منحنی پراکندگی در فرکانس‌های کم، میل به نزدیک شدن به سرعت فازی خاک نوع A دارد و این باعث شده است که یک تقعر در منحنی پراکندگی ایجاد شود. همچنین در این شکل ملاحظه می‌گردد که منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ نیز در فرکانس‌های بالا به سرعت فازی لایه قرارگرفته در سطح (خاک نوع B) مجانب شده است (مانند سه مدل دیگر). بنابراین می‌توان گفت که سرعت فازی لایه سطحی مهم‌ترین سرعت فازی است که در فرکانس‌های بالا، منحنی پراکندگی را احاطه می‌کند و به آن مجانب می‌شود.



شکل ۸: منحنی پراکندگی ترسیم‌شده برای ژئوفون‌های با فواصل ۳۷/۵، ۷۵/۰، ۱۱۲/۵، ۱۵۰/۰ و ۱۸۷/۵ سانتی‌متر: (الف): مدل شماره ۱، (ب): مدل شماره ۲، (ج): مدل شماره ۳ و (د): مدل شماره ۴.

با مقایسه منحنی پراکندگی مدل‌های شماره ۱ و ۲ (شکل ۸ (الف) و (ب))، ملاحظه می‌شود که با حضور لایه‌ای از خاک نوع B در مدل شماره ۲، منحنی پراکندگی در فرکانس‌های کم به سمت راست شیفت پیدا می‌کند و فرکانسی که منحنی پراکندگی به سرعت فازی لایه سطحی مجانب می‌شود، افزایش می‌یابد. بنابراین با استفاده از رابطه سرعت موج برشی، طول موج و فرکانس ($\lambda = \frac{v}{f}$) و همچنین رابطه بین طول موج و عمق نفوذ ($D_p = \frac{\lambda}{2}$)، می‌توان عمق لایه را به دست آورد. برای مثال، منحنی پراکندگی مدل شماره ۱، تقریباً در فرکانس ۱۰ هرتز به سرعت فازی خاک نوع A (۹۲ متر بر ثانیه) مجانب می‌شود که با ضریب تبدیل سرعت فازی به سرعت موج برشی (v)^{-۱} ۰/۹۳، سرعت موج برشی ۹۸ متر بر ثانیه به دست می‌آید. بنابراین، عمق لایه بالایی حدود ۴/۹ متر به دست می‌آید که عمق مدل شده برابر با ۵ متر می‌باشد؛ و برای مدل شماره ۲، که در فرکانس حدود ۲۱ هرتز به سرعت فازی خاک نوع A مجانب می‌شود، عمق لایه بالایی حدود ۲/۳۳ متر به دست می‌آید که عمق مدل شده آن برابر با ۲/۵ متر می‌باشد.

با بررسی تاثیر فاصله ژئوفون‌ها بر منحنی‌های پراکندگی ارائه شده در شکل ۸، ملاحظه می‌شود که در مدل‌های شماره ۱ و ۲ برای فاصله ژئوفون بیشتر از ۱۱۲/۵ سانتی‌متر، منحنی پراکندگی در فرکانس‌های بالا به مدهای بالاتر منتقل می‌شود. بنابراین، دقت منحنی پراکندگی در فواصل بیشتر از حدود $\frac{1}{4}$ عمق لایه (۵ متر) کاهش می‌یابد. اما، در مدل‌های شماره ۳ و ۴ تغییر چندانی در اثر افزایش فاصله ژئوفون‌ها ایجاد نمی‌شود و پرش به مدهای بالاتر در فواصل ژئوفون بزرگ‌تر از $\frac{1}{4}$ عمق لایه اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، برای حالتی که لایه بالایی (سطح زمین) از خاک نوع A (که سرعت موج برشی آن کمتر از دو نوع خاک دیگر است) تشکیل شده باشد، نسبت به حالتی که لایه بالایی (سطح زمین) از خاک نوع B (که سرعت موج برشی آن بیشتر از خاک نوع A است) تشکیل شده است، انتقال به مدهای بالاتر در فرکانس‌های پایین‌تری صورت می‌گیرد. این بدان معناست که فاصله ژئوفون‌ها باید با توجه به سرعت موج برشی و محدوده فرکانسی مورد نیاز برای نفوذ در عمق مدل تعیین گردد. بنابراین، ضخامت لایه و سرعت موج برشی تعیین‌کننده فاصله ژئوفون‌ها می‌باشد. به عنوان نتیجه می‌توان گفت که منحنی‌های پراکندگی مدل‌های شماره ۳ و ۴ (که دارای خاک با سرعت موج برشی بیشتر در لایه‌های بالایی می‌باشند)، در مقایسه با منحنی پراکندگی مدل‌های شماره ۱ و ۲ (که دارای خاک با سرعت موج برشی کمتر در لایه‌های بالایی می‌باشند) حساسیت کمتری نسبت به افزایش فاصله ژئوفون‌ها دارند؛ که این ممکن است به دلیل فرکانس تشدید چندلایه‌ای باشد که در حالت لایه‌بندی مختلف، تغییر می‌کند. چراکه، خاک نوع A به دلیل ضعیف‌تر بودن، نسبت به خاک نوع B فرکانس تشدید به نسبت پایین‌تری دارد.

۴- نتیجه‌گیری

امواج سطحی به دلیل خاصیت پراکنشی که دارند، می‌توانند در تحقیقات مهندسی ژئوتکنیک و ژئوفیزیک برای تعیین مشخصات خاک مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله، ابتدا توانایی نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس برای مدل‌سازی امواج سطحی ارزیابی شد و مورد صحت سنجی قرار گرفت. سپس، مدل‌های مختلفی در نرم‌افزار آباکوس ساخته شد و داده‌های امواج سطحی که به وسیله ضربه ایجاد شده بودند، توسط ژئوفون‌ها ثبت گردیدند. منحنی پراکندگی امواج سطحی برای لایه‌بندی‌های متفاوت (افزایش سختی خاک از لایه بالا به پایین و یا وجود لایه سست در بین دو لایه سخت‌تر) ترسیم گردید. در ادامه، تاثیر فواصل ژئوفون‌ها بر منحنی پراکندگی امواج سطحی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت که نتایج زیر به دست آمد:

الف- نتایج مدل‌هایی که سختی لایه‌ها از بالا به پایین افزایش می‌یابد:

- برای لایه‌هایی که از بالا به پایین سختی‌شان افزایش می‌یابد، منحنی پراکندگی به سمت راست (فرکانس‌های بالاتر) انتقال پیدا می‌کند.
- شیب منحنی پراکندگی در فرکانس‌های پایین نشان‌دهنده حضور لایه‌های با سرعت‌های مختلف می‌باشد و هرچه شیب تندتر و نزدیک‌تر به قائم باشد، تعداد لایه‌های کمتری در محیط وجود دارد.

• منحنی پراکندگی محیط‌هایی که دارای لایه سطحی متشکل از خاک سست می‌باشند، به ازای افزایش فاصله ژئوفون‌ها تا مقدار $\frac{1}{4}$ عمق لایه سطحی واکنش نشان نمی‌دهند. اما با افزایش بیشتر فاصله ژئوفون‌ها، منحنی پراکندگی در فرکانس‌های بالا به مدهای بالاتر انتقال می‌یابد.

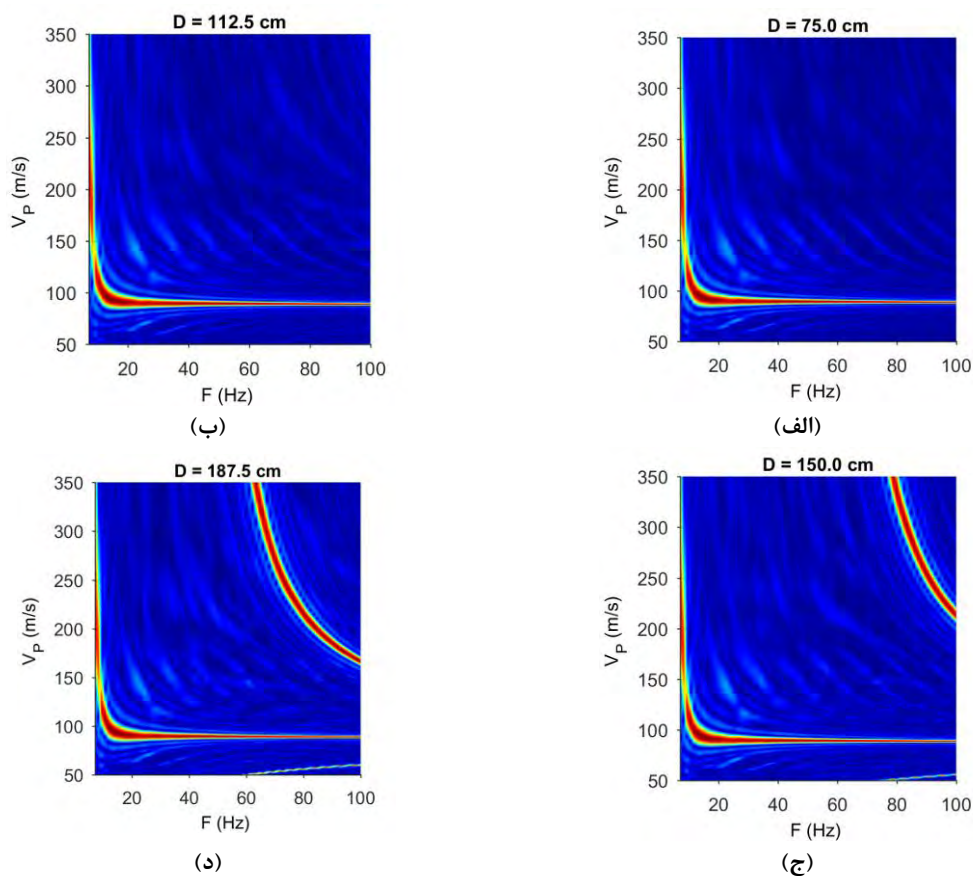
ب- نتایج مدل‌هایی که لایه ضعیف‌تر در بین لایه‌های سخت‌تر قرار گرفته باشد:

• برای محیط‌هایی که لایه ضعیف‌تر در بین لایه‌های سخت‌تر قرار گرفته باشد، منحنی پراکندگی در فرکانس‌های کم به سمت سرعت فازی لایه ضعیف‌تر میل پیدا می‌کند و سپس به سمت سرعت فازی لایه سطحی برمی‌گردد که یک تقعر در منحنی پراکندگی ایجاد می‌کند. در این نوع لایه‌بندی‌ها، منحنی پراکندگی به مدهای بالاتر انتقال پیدا می‌کند که موجب می‌شود منحنی پراکندگی به صورت دندان‌های و پرشی به مدهای بالاتر باشد.

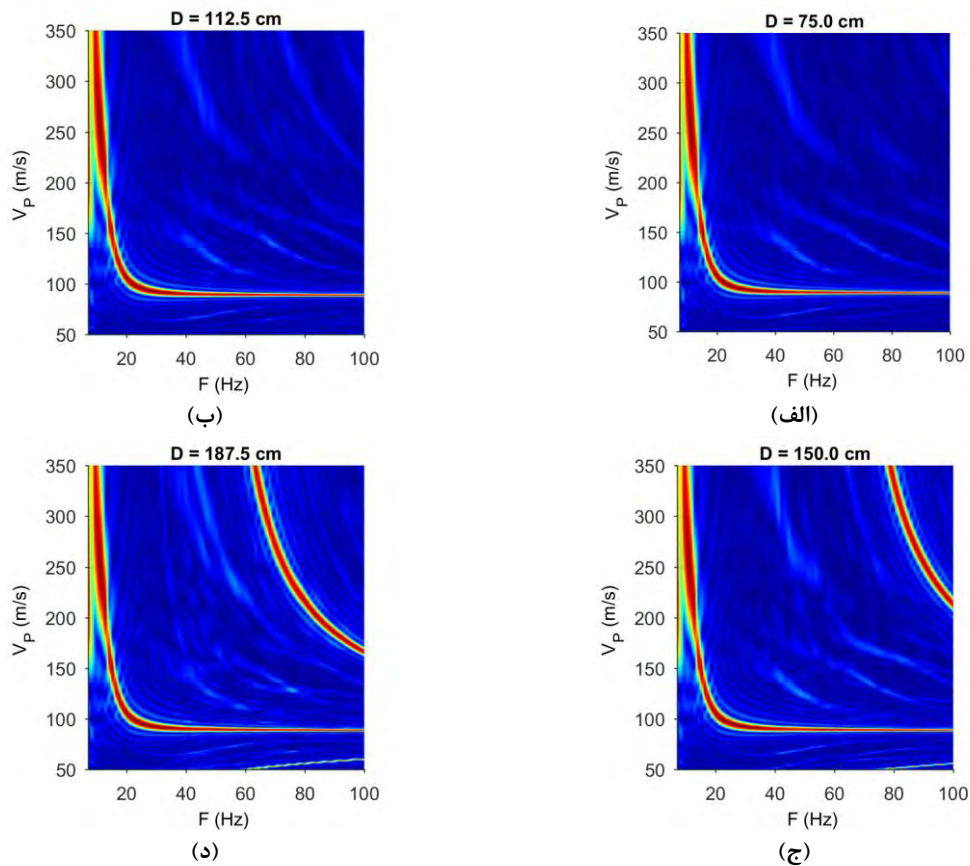
ج- نتایج مشترک بین هر دو نوع لایه بندی:

• منحنی پراکندگی در فرکانس‌های بالا، به سرعت فازی لایه بالایی (سطحی) مجانب می‌شود.
 • عمق لایه سطحی با استفاده از فرکانسی که منحنی پراکندگی به سرعت فازی لایه سطحی مجانب می‌شود، قابل محاسبه می‌باشد.
 • در حالتی که در منحنی پراکندگی، پرش به مد بالاتر مشاهده می‌شود، نمودار تا لحظه پرش کاملاً منطبق بر منحنی پراکندگی بدون پرش می‌باشد و داده‌های آن قابل قبول می‌باشد. در این حالت می‌تواند دو راهکار مدنظر قرار داده شود: ۱- برداشت داده‌های امواج سطحی با فاصله کمتر ژئوفون‌ها و ۲- محدود کردن منحنی پراکندگی به محدوده فرکانسی قبل از پرش به مد بالاتر.

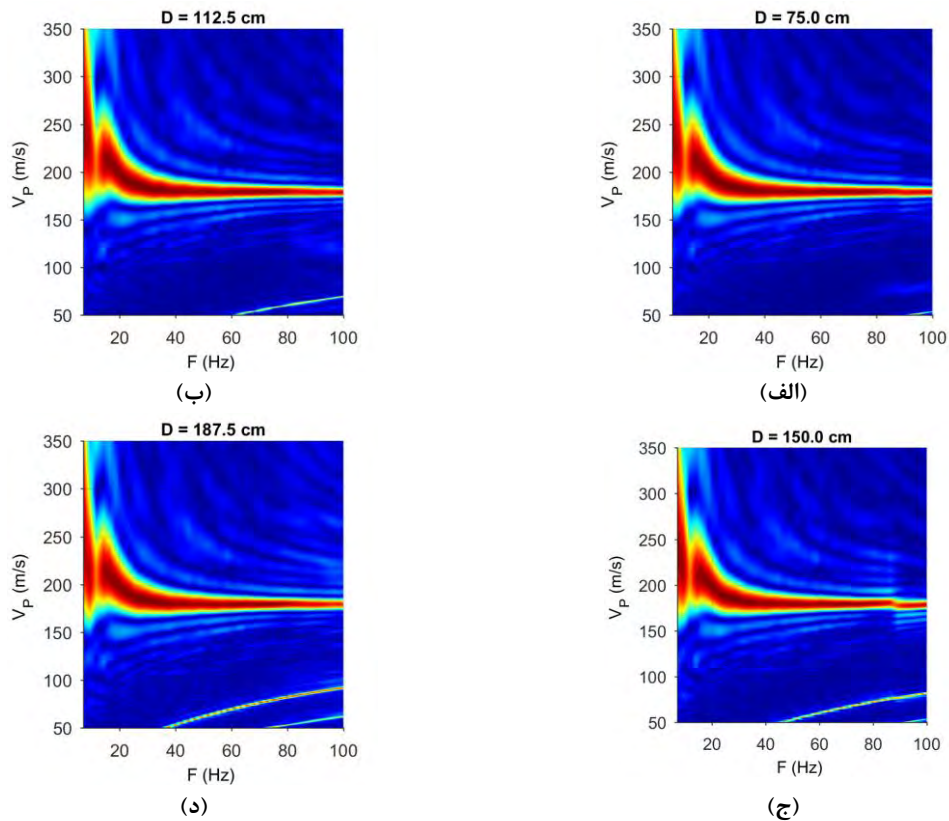
پیوست



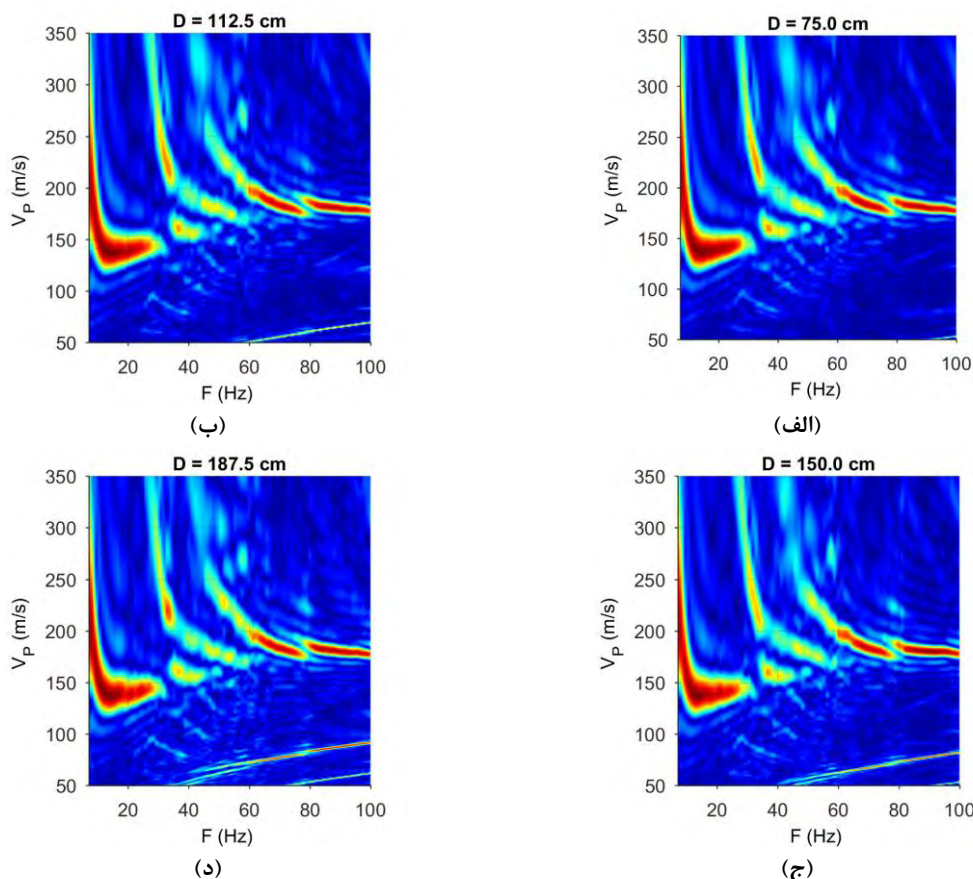
شکل پ ۱: منحنی پراکندگی مدل شماره ۱ برای ژئوفون‌های با فاصله: (الف) ۰/۷۵، (ب) ۵/۱۱۲، (ج) ۰/۱۵۰ و (د) ۵/۱۸۷ سانتی‌متر.



شکل پ ۲: منحنی پراکندگی مدل شماره ۲ برای ژئوفون‌های با فاصله: (الف) ۰/۷۵، (ب) ۵/۱۱۲، (ج) ۰/۱۵۰ و (د) ۵/۱۸۷ سانتی‌متر.



شکل پ ۳: منحنی پراکندگی مدل شماره ۳ برای ژئوفون‌های با فاصله: (الف) ۰/۷۵، (ب) ۵/۱۱۲، (ج) ۰/۱۵۰ و (د) ۵/۱۸۷ سانتی‌متر.



شکل ب ۴: منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ برای ژئوفون‌های با فاصله: (الف) ۰/۷۵، (ب) ۵/۱۱۲، (ج) ۰/۱۵۰ و (د) ۵/۱۸۷ سانتی‌متر.

مراجع

- [1] Aki, K. and P.G. Richards, Quantitative seismology. 2002.
- [2] Anderson, J.G., Strong-motion seismology. INTERNATIONAL GEOPHYSICS SERIES, 2003. 81(B): p. 937-966.
- [3] Pei, D., Modeling and inversion of dispersion curves of surface waves in shallow site investigations. Vol. 68. 2007.
- [4] Hashemi Jokar, M., J. Boaga, L. Petronio, M.T. Perri, C. Strobba, A. Affatato, R. Romeo, and G. Cassiani, Detection of lateral discontinuities via surface waves analysis: a case study at a derelict industrial site. Journal of Applied Geophysics, 2019: p. 65-74.
- [5] Scales, J.A. and A.E. Malcolm, Laser characterization of ultrasonic wave propagation in random media. Physical Review E, 2003. 67(4): p. 046618.
- [6] Strobba, C., J. Boaga, G. Cassiani, M. Hashemi Jokar, and P. Primiero, Integrated seismic characterization for deep engineering targets: active and passive surface waves, reflection and refraction near-surface modelling from a single acquisition. International Conference on Engineering Geophysics, Al Ain, United Arab Emirates, 2017.
- [7] Schwenk, J.T., S.D. Sloan, J. Ivanov, and R.D. Miller, Surface-wave methods for anomaly detection. Geophysics, 2016. 81(4): p. EN29-EN42.

- [8] Foti, S., C.G. Lai, G.J. Rix, and C. Strobbia, Surface wave methods for near-surface site characterization. 2015: CRC Press.
- [9] Neducza, B., Stacking of surface waves. *Geophysics*, 2007. 72(2): p. V51-V58.
- [10] Hashemi Jokar, M., H. Rahnema, J. Boaga, G. Cassiani, and C. Strobbia, Application of Surface Waves for Detecting Lateral Variations: Buried Inclined Plane. *Near Surface Geophysics*, 2019: p. 1-45.
- [11] Lowe, M., R. Challis, and C. Chan, The transmission of Lamb waves across adhesively bonded lap joints. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000. 107(3): p. 1333-1345.
- [12] Hesse, D. and P. Cawley, Surface wave modes in rails. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006. 120(2): p. 733-740.
- [13] Castaings, M., C. Bacon, B. Hosten, and M. Predoi, 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.
- [14] 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*, 2000. 107(4): p. 1945-1955.
- [15] Drozd, M.B., Efficient finite element modelling of ultrasound waves in elastic media. 2008, Imperial College London.
- [16] Lin, S., Advancements in active surface wave methods: modeling, testing, and inversion. 2014.
- [17] ABAQUS v6.14, S., Abaqus Analysis User's Guide. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, www.simulia.com, 2014.
- [18] Motamed, R., K. Itoh, S. Hirose, A. Takahashi, and O. Kusakabe. Evaluation of wave barriers on ground vibration reduction through numerical modeling in ABAQUS. in *Proceedings of the SIMULIA Customer Conference 2009*. 2009.
- [19] Atkinson, J., Non-linear soil stiffness in routine design. *Géotechnique*, 2000. 50(5): p. 487-508.