

# 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 Jokar<sup>1</sup>, Hossein Rahnema<sup>2\*</sup>, Abdolhossein Baghlani<sup>3</sup>

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
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 (ABAOUS). 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



نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی – یژوهشی)

www.jsce.ir



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

سطحی و منحنی پراکندگی امواج سطحی مهدی هاشمی جوکار<sup>۱</sup>، حسین رهنما<sup>۲\*</sup>. عبدالحسین بغلانی<sup>۳</sup> 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

### چکیدہ

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 موجبرشی، 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 می ماییم: مشخصات لایهها با عمق افزایش مییابد (لایهها از بالا به پایین سخت د می شوند) و مشخصات لایهها با عمق کاهش و افزایش مییابد (لایهای ضعیف در بین دو لایه قوی تر 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 مدل سازی، دادههای لرزهای توسط ژئوفونها ثبت گردید و منحنی پراکندگی دادههای برداشت شده با استفاده از روش انتقال فرکانس-عددموج محاسبه گردید. سیس، 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 سست تر در بین لایههای سخت ر، منحنی پراکندگی دارای یک تقعر می اشد که باعث می شود در فرکانسهای کم، منحنی پراکندگی به سمت سرعت لایه سستتر میل کند و سپس در فرکانسهای بالاتر، به سرعت فازی لایه سطحی مجانب شود. شیب منحنی پراکندگی در فرکانسهای پایین نشاندهنده حضور لایههای با سرعتهای مختلف میهاشد 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 ژئوفنها 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.

الملكات طيفاني، المواج مستعملي براحلتاني، روش الجزء معملون، على فريد، فاطلته ركومون، مناهاي بالأكر							
	شناسه دیجیتال:					سابقه مقاله:	
doi:	10.22065/JSCE.2019.191481.1890	چاپ	انتشار أنلاين	پذيرش	بازنگری	دريافت	
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.191481.1890	14/.4/2.	۱۳۹۸/۰۶/۰۵	۱۳۹۸/۰۶/۰۵	۱۳۹۸/۰۵/۰۷	1398/06/08	
		حسين رهنما	*نویسنده مسئول:				
		پست الکترونیکی:					

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

#### ۱– مقدمه

در یک محیط ایزوتروپ، همگن و بینهایت، فقط امواج حجمی موجود میباشد؛ اما وقتی که مدل در هیچ جهتی به صورت بی نهایت نباشد، امواج طولی و برشی با یکدیگر ترکیب میشوند و امواج سطحی ایجاد می گردند [۱]. امواج سطحی آن دسته از امواجی 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 می شوند و دامنه آنها به صورت نمایی با عمق زوال می یابد. برخلاف امواج حجمی که در راستای قائم و افقی انتشار می یابند، امواج سطحی می شوند و دامنه آنها به صورت نمایی با عمق زوال می یابد. برخلاف امواج حجمی که در راستای قائم و افقی انتشار می یابند، امواج سطحی می شوند و دامنه آنها به صورت نمایی با عمق زوال می یابد. برخلاف امواج حجمی که در راستای قائم و افقی انتشار می یابند، امواج سطحی میشوند و دامنه آن ها به صورت نمایی با عمق زوال می یابد. برخلاف امواج حجمی که در راستای قائم و افقی انتشار می یابند، امواج سطحی می شوند و دامنه آن ها به صورت نمایی با عمق زوال می یابد. برخلاف امواج حجمی که در راستای قائم و افقی انتشار می یابند، امواج سطحی مناسب با <sup>30</sup> ر و کاهیدگی هندسی امواج سطحی هنداسی آن ها کمتر از امواج حجمی می باشد (کاهیدگی هندسی امواج سطحی مناسب با <sup>35</sup> ر و کاهیدگی هندسی امواج حجمی متناسب با <sup>11</sup> می باشند که ۲ فاصله از منبع می باشد) [۲]. بهطورکلی می توان گفت، در لرزشهای ثبت می نشده توسط لرزهنگارها، امواج سطحی به عنوان موج غالب می باشند [۳]. در چند دهه اخیر، امواج سطحی به صورت موفقیت آمیزی در تعیین مشخصات مکانیکی مواد تشکیل دهنده لایه های زیرسطحی، از قبیل سرعت موجبرشی، سرعت موج فشاری، نسبت و موفقیت آمیزی در تعیین مشخصات مکانیکی مواد تشکیل دهنده لایه های زیرسطحی، از قبیل سرعت موجبرشی، سرعت موج فشاری، نسبت و پواسون و چگالی حجمی، استفاده گردیده است [۴]. این مشخصات میتوانند در مقیاسهای میکرو ماید تعیین شناسایی خرابی مواد با پواسون و چگالی حجمی، استفاده گردید است [۴]. این مشخصات میتوانند در مقیاسهای میکرو مایند تعیین شناسایی خرابی مواد با سطحی فراموتی، مقاده گردید ای رازگیت می مواد با می میند می ماند تعیین مناسایی خرابی می و نواد با می رازی یا می می می رو زلزله استفاده گردند (۵, ۶].

برداشت دادههای لرزهای بهطورمعمول، با یک منبع فعال سطحی و ثبت جبههی موج ناشی از آن صورت می گیرد. منبع مورداستفاده برای تولید امواج سطحی می تواند منبع ضربه ای باشد که در بیشتر مواقع می توان 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 می شود که به دستگاه ثبت دادههای دیجیتال متصل است. تعداد ژئوفونها، فاصلهی آنها و بازههای ثبت دادهها نیز برای یک داده برداری باکیفیت، دارای اهمیت بسیاری می باشد. درواقع داده برداری بایستی طوری طراحی گردد که اثرات امواج حجمی و امواج رایلی نشأت گرفته از 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.

- (م) ویبراتور حالت پایدار، اولین روشی است که برای شناسایی خاک مورداستفاده قرار گرفت [۸]. در این روش یک ویبراتور با فرکانس خاصی شروع به کار کردن می کند و امواج لرزهای تولید می کند که این امواج توسط یک گیرنده ثبت می شود. بسته به فرکانس ویبراتور، f، گیرنده ثبت می شود. بسته به فرکانس ویبراتور، f، گیرنده ثبت می مفاوتی قرار گیرد تا موج لرزهای ثبت شده را با فرکانس ویبراتور همفاز نشان دهد. این فرکانس ویبراتور، f، گیرنده باید در فاصلههای متفاوتی قرار گیرد تا موج لرزهای ثبت شده را با فرکانس ویبراتور همفاز نشان دهد. این فرکانس ویبراتور، می کند که این امواج توسط یک گیرنده ثبت می شود. بسته به فرکانس ویبراتور، می کند و اصلههای متفاوتی قرار گیرد تا موج لرزهای ثبت شده را با فرکانس ویبراتور همفاز نشان دهد. این فاصله ثبت شده همان طول موج، f، متناظر با f، خواهد بود. سپس، سرعت فازی با استفاده از رابطه  $f \cdot f = V$  قابل محاسبه می باشد. برای ترسیم منحنی پراکندگی، برداشت داده ها با فرکانس های دیگر ویبراتور باید تکرار شود تا نقاط بیشتری از فرکانس سرعت فازی به دست آید و بنابراین، این روش بسیار وقت گیر و هزینه بر می باشد.
- ۲- روش آنالیز طیفی امواج سطحی (SASW) برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ توسط نظریان و استوکه معرفی گردید. روش SASW، یکی از روش های غیر مخرب شناخته شده و پرکاربرد در بین مهندسی زلزله می باشد و باهدف کاهش زمان برداشت، از ایده اصلی روش ویبراتور حالت پایدار و تکنیک دوانسکی و همکاران (۱۹۷۲) استفاده می کند [۹]. در روش SASW، دو ژئوفون با فاصله مشخص (برابر با فاصله حالت پایدار و تکنیک دوانسکی و همکاران (۱۹۷۲) استفاده می کند [۹]. در روش SASW، دو ژئوفون با فاصله مشخص (برابر با فاصله حالت پایدار و تکنیک دوانسکی و همکاران (۱۹۷۲) استفاده می کند [۹]. در روش SASW، دو ژئوفون با فاصله مشخص (برابر با فاصله والین ژئوفون تا منبع لرزهای) قرار می گیرند تا داده های لرزه ای 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 می باشد، بنابراین، روش SASW نیز مانند روش ویبراتور حالت پایدار را زمان را زمانی را فرا می گیرند تا داده های لرزه ای 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 می باشد، بنابراین، روش SASW نیز مانند روش ویبراتور حالت پایدار بسیار زمان را زمان را زمای را شده بین دو ژئوفون می باشد، بنابراین، روش SASW نیز مانند روش ویبراتور حالت پایدار بسیار زمان را زمان را زمان می باشد بینار این می باشد می باشد می با می منحنی پراکندگی در می پایدار بسیار زمان را زمان می باشد.
- ۳- به دلیل برخی محدودیتهایی که روش SASW دارد، روش آنالیز چندکاناله امواج سطحی (MASW) توسط پارک و همکاران در سال
   ۳- به دلیل برخی محدودیتهایی که روش MASW دارد، روش آنالیز چندکاناله امواج سطحی (MASW) توسط پارک و همکاران در سال

تعداد ژئوفونها بیشتر از ۱۲ عدد میباشد و با فاصله مساوی در یک چیدمان خطی قرار می گیرند [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 بهطورکلی برابر با یک دوم طول موج حداکثر،  $\lambda_{max}$  میباشد،  $D_p = \frac{\lambda_{max}}{2}$  بیشترین فاصله بین ژئوفونها میباشد که برابر است با فاصله بین اولین و آخرین ژئوفون [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 می باشد)، متغیر می باشند و برای یک محیط با لایه های افقی، سرعت انتشار امواج رایلی ( $V_R$ ) تابعی از فرکانس (f) می باشد. به این ویژگی امواج سطحی، خاصیت پراکنشی گفته می شود. بنابراین، در محیط همگن، که دارای ویژگی مکانیکی یکسانی در تمامی محیط می باشد، امواج سطحی نیز دارای سرعت فازی یکسانی در تمامی فرکانس ها (و یا تمامی طول موجها ( $\Lambda$ )، زیرا  $f \cdot \Lambda = \sqrt{p}$ ) می باشند. اما در محیط های لایه ای، که هر لایه دارای خواص مکانیکی یکسانی در تمامی فرکانس ها (و یا تمامی طول موجها ( $\Lambda$ )، زیرا  $f \cdot \Lambda = \sqrt{p}$ ) می باشند. اما در محیطهای لایه ای، که هر لایه دارای خواص مکانیکی خاص خود می باشد، امواج سطحی سرعت هازی متفاوتی برای فرکانس های مختلف نشان می دهد و به عبارتی دیگر، امواج با مول موج مخالف متناسب با عمقی که نفوذ می کنند، سرعت فازی متفاوتی خواهند داشت. این بدان معناست که امواج با دوره تناوب مول موج مختلف متناسب با عمقی که نفوذ می کنند، سرعت فازی متفاوتی خواهند داشت. این بدان معناست که امواج با دوره تناوب بزرگ تر به دلیل اینکه به اعماق بیشتر نفوذ می کنند، سرعت فازی متفاوتی خواهند داشت. این بدان معناست که امواج با دوره تناوب بزرگ تر به دلیل اینکه به اعماق بیشتر نفوذ می کنند، از مواد با سرعت بالاتر عبور کرده و سریعتر حرکت می کنند. بنابراین می توان گفت که مر طول موج متناسب با سرعت فازی که وابسته به مشخصه مکانیکی لایه های عبوری موج می باشد، انتشار خواهد یافت. سرعت فازی تابعی بزرگ تر به دلیل اینکه به اعماق بیشتر نفوذ می کنند، سرعت فازی متفودی موج می باشد، انتشار خواهد یافت سرعت فازی تابعی از فرکانس می باشد و این طبیعت پراکنشی مواج حمود را میتوان با ترسیم فرکانس در برابر سرعت فازی نمایش داد و منحنی پراکندگی مر طول موج دی می می باند، در هر فرکانس می می واند چندین طول موج وجود داشته باشد. از به دست آورد. در محیط های غیرهمگن، که دارای لایه بندی خاص می باشند، در هر فرکانس می تواند چندین طول موج وجود داشته باشد. مر از بانس می تواند به صورت هرزمان حضورداشته باشند. بنابراین، برای هر فرکانس ممکن است سرعتهای منفاوتی وجود داشته باشد که هر یک از آنها مربوط به یک مد انتشار می باشد و می شرکان وی مروان و مورداشته باشند. بنابراین، انتشار امواج مورد هر می می نخ

دادههای لرزهای ثبتشده توسط دستگاه لرزهنگار و یا بهدستآمده از مدلسازی عددی، در حوزه زمان-مکان (x - x) میباشند که برای f - k انتهال داده شوند. روش انتهال f - k) ترسیم منحنی پراکندگی حاصل از این دادهها، باید این دادهها به حوزه فرکانس-عددموج (f - k) انتهال داده شوند. روش انتهال f - k بر پایه تبدیل فوریه دوبعدی بر روی دادههای لرزهای استوار میباشد. به عبارت دیگر، با اعمال یک مرتبه تبدیل فوریه زمانی بر روی دادههای لرزهای الرزهای الرزهای المان ال می باید این دادهها به حوزه فرکانس-عددموج (f - k) انتهال داده شوند. روش انتهال f - k بر پایه تبدیل فوریه دوبعدی بر روی دادههای لرزهای الستوار میباشد. به عبارت دیگر، با اعمال یک مرتبه تبدیل فوریه زمانی بر روی دادههای لرزهای در این ال روی دادههای حوزه f - x می ایند و با اعمال یک مرتبه تبدیل فوریه مکانی بر روی داده می حزه f - x بر پایه تبدیل فوریه مکانی بر روی داده مای حوزه f - x می ایند و با اعمال یک مرتبه تبدیل فوریه مکانی بر روی داده مای حوزه f - x داده ال روی داده مای حوزه f - x می ایند و با اعمال یک مرتبه تبدیل فوریه مکانی بر روی داده می حوزه و معای در این ال روی داده ای حدوزه و با اعمال یک مرتبه تبدیل فوریه مکانی بر روی داده می حوزه و به مراه ای در حوزه فر کانس-فاصله (f - x) به دست می آیند و با اعمال یک مرتبه تبدیل فوریه مکانی بر روی داده می حوزه و مروه می مراد و با عمال یک مرتبه تبدیل فوریه مکانی در روی داده می حوزه و مروه ای مراد می ایند. 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  $\frac{f}{k} = v_p$ ، 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 بهعنوان یک تکنیک با پتانسیل بسیار بالا در حل مسئله انتشار موج، بهصورت موفقیت آمیزی بکار گرفته شود [۱۱–۱۴]. در این راستا، با استفاده از روش اجزا محدود و مدلسازی کرنش مسطح، مسئله ضربه و ژئوفونها بهخوبی قابل مدلسازی میائل می مسئله نرمافزار آباکوس یکی از قدرتمندترین نرمافزارهای بر پایه اجزا محدود می باشد که با دقت قابل قبولی برای مدلسازی مسائل می باشد. نرمافزار آباکوس یکی از قدرتمندترین نرمافزارهای بر پایه اجزا محدود و مدلسازی کرنش مسطح، مسئله ضربه و ژئوفونها بهخوبی قابل مدلسازی می مسائل می از آباکوس ایک از قدرتمندترین نرمافزارهای بر پایه اجزا محدود می باشد که با دقت قابل قبولی برای مدلسازی مسائل می باندن می بانی مدل از مسائل محدود می باشد که با دقت قابل قبولی برای مدلسازی مسائل مختلف، خصوصاً امواج سطحی و انتشار آن در محیطهای ناهمگن، مورداستفاده قرار گرفته است [۴, ۱۰, ۱۵–۱۷]. در مراحل مختلف مدلسازی امواج سطحی با نرمافزار آباکوس، باید نکات خاصی موردتوجه 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، هیچگونه بازگشتی از نیم-فضا به داخل مدل نخواهیم داشت و موج در مسیر خود به سمت بینهایت انتشار می یابد. بنابراین، باید این مسئله در مدلسازی با نرمافزار به نحوی اعمال شود که از مدلسازی با ابعاد بزرگ و غیرضروری پرهیز گردد. روشهای مختلفی از قبیل ۱- المان بینهایت [۱۸]؛ که فضای بینهایت را با یک المان که ازیکطرف بهصورت باز می باشد معادل می کند، ۲- لایههای کاملا سازگار<sup>۲</sup> (PML) [۵۵]؛ که موج در آن لایه بهصورت نمایی زوال پیدا می کند، و ۳- لایه جاذب با میرایی افزایشی<sup>۳</sup> (ALID) [۰۰, ۱۰, ۱۶]؛ که از لایههایی با افزایش میرایی بهصورت تدریجی استفاده می شود، برای مدل کردن فضای بینهایت ارائه گردیده است؛ اما از بین این سه نوع مرزهای جاذب، المان بینهایت و PML دارای برخی مشکلات و یک سری محدودیتهایی در حوزهی فرکانس می باشند و قادر به جذب تمام انرژی نمی باشند و تنها DLI است که توانسته بهصورت کامل انرژی را جذب نماید و از برگشت انرژی به داخل المان جلوگیری نماید [۱۵].

روش ALID از چندین لایه (بیش از ۸ لایه) با ضخامت مشخص (معمولاً یک متر) تشکیل گردیده است. مشخصات لایههای ALID کاملاً برابر با محیط مجاورشان می باشد، با این تفاوت که این لایهها به ترتیب که از مدل دور می شوند، مقدار میرایی آنها افزایش می ابد. میرایی مورداستفاده در ALID از نوع میرایی رایلی<sup>۴</sup>، [*C*<sub>R</sub>]، می باشد که به صورت زیر تعریف می شود:

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

که [M] و [X] و [X] به ترتیب ماتریسهای جرم و سختی و  $C_M$  و  $X^2$  به ترتیب ضرایب میرایی جرم و سختی میباشند.  $C_R$  به دلیل حساسیتی که در حل مسائل دینامیکی دارد، نیازمند بارگذاری با بازههای زمانی بسیار کوچک است که باعث افزایش زمان و صرف هزینه زیاد برای حل مسئله میشود، بنابراین، توصیهشده است که  $0 = X^2$  در نظر گرفته شود [۱۰]. مقادیر  $T_M$  که در این تحقیق برای لایههای ALID استفادهشده است، در جدول ۱ ارائهشده است. همانطور که در جدول ۱ ملاحظه میشود، این ضرایب بهصورت مضربی 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 دولایه ALID و درنتیجه، بازگشت موج در مرز دولایه نشود.

			-						•••	
لايەھاى ALID										
لايه ۱۰	لايه ۹	لايه ۸	لايه ۷	لايه ۶	لايه ۵	لايه ۴	لايه ۳	لايه ۲	لايه ۱	
2068	1.74	۵۱۲	708	١٢٨	54	٣٢	18	٨	۴	ضریب میرایی رایلی ( <b>C</b> _M)

ALID جدول ۱: مقادیر ضریب میرایی جرم ( $\mathcal{C}_M$ ) استفاده شده برای لایه های

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> ABAQUS

<sup>2</sup> Perfectly Matched Layers

<sup>3</sup> Absorbing Layers using Increasing Damping

<sup>4</sup> Rayleigh damping

بار ضربهای که برای ایجاد امواج سطحی استفاده میشود، باید به صورتی اعمال گردد که محتوای فرکانسی بهاندازه لازم برای نفوذ در تمامی لایهها را دارا باشد. بنابراین، از یک نیروی ضربهای که بهصورت بار مستطیلی با مدتزمان اعمال بار برابر با ۴۰ µ۲ که دارای محتوای فرکانسی از ۵ تا ۱۰۰ هرتز میباشد، استفاده گردید [۱۰].

#### ۲-۳- مشخصات مواد

خاک رفتار غیرخطی و برگشتناپذیری دارد اما در کرنشهای بسیار کوچک، رفتار تنش-کرنش رابطهای نسبتا خطی دارد. بنابراین در نظر گرفتن رفتار الاستیک خطی برای مدلسازی خاک منطقی به نظر می سد. سطح کرنش متناظر با آزمایشهای ژئوفیزیکی، بسیار کوچک است و درنتیجه استفاده از تئوری الاستیک خطی برای تفسیر آزمایشهای لرزهای امری پذیرفتنی می باشد. همچنین، پارامترهای کرنش کرنش کرنش متناظر با آزمایش می بازی می نقش مهم و اساسی در محدوده وسیعی از مسائل ژئوتکنیکی بازی می کنند [۱۹, ۱۰]. برای ترسیم منحنی پراکندگی امواج سطحی کوچک، نقش مهم و اساسی در محدوده وسیعی از مسائل ژئوتکنیکی بازی می کنند [۱۹, ۱۰]. برای ترسیم منحنی پراکندگی امواج سطحی کوچک، نقش مهم و اساسی در محدوده وسیعی از مسائل ژئوتکنیکی بازی می کنند [۱۹, ۱۰]. برای ترسیم منحنی پراکندگی امواج سطحی نیاز به داشتن مشخصات خاک از قبیل سرعت موج فشاری ( $V_p$ )، سرعت موج برشی (s)، چگالی (p) و ارتفاع (h)، در هر لایه می باشد. در مدلسازی امواج ساخی مدلسازی امواج ساخی (h) و نسبت پواسون ( $\mu$ )) و می مندند (h) و نسبت میرایی ( $\mu$ ) و نسبت پواسون ( $\mu$ )) و می مندند ( $\mu$ ) و نسبت میرایی ( $\mu$  و نسبت می منحنی پراکندگی امواج ساخی مدل از و می مندن (h) و ارتفاع (h) و نسبت پواسون ( $\mu$ )) و می مندند ( $\mu$ ) و نسبت میرایی ( $\mu$  می است ( $\mu$ ) و نسبت پواسون ( $\mu$ )) و می منه در ( $\mu$ ) و نسبت میرایی رایلی (m) می باشد. E و  $\mu$  را می توان با استفاده از معادلههای (h) و نسبت می مید

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

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

#### ۲-۴- صحت سنجی نرمافزار

بهمنظور صحت سنجی نرمافزار آباکوس در مدلسازی امواج سطحی، از دادههای آزمایشگاهی هاشمی جوکار و همکاران در سال ۲۰۱۹ استفاده گردید [۴]. آنها امواج سطحی را در ساحل شهر تریسته<sup>۵</sup> واقع در کشور ایتالیا در امتداد L4 برداشت کردهاند. ساحل موردنظر در امتداد L4 در فاصله ۰ تا ۹۶ متری جنوب-شمال، از سه نوع خاک تشکیل شده است که بهصورت لایهبندی افقی در کنار یکدیگر قرار گرفتهاند. آنها دادههای امواج سطحی در امتداد L4 را به وسیله ژئوفونهای با فواصل ۳ متر و مدتزمان ۲ ثانیه با فواصل دادهبرداری ۲/۲۵ میلی ثانیه برداشت نمودهاند. مشخصات مصالح تشکیل دهنده و هندسه امتداد L4 در شکل ۲ و جدول ۲ ارائه شده است [۴].

			<b>0</b>	07	•
μ	<i>E</i> (kN/m²)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	<b>V</b> (m/s)	<b>V</b> <sub>p</sub> (m/s)	نوع مواد
• /٣٢	١٨٠٠٠	١٢٠٠	۲۰۰	۳۹۰	مصالح نوع ۱
•/۲٨	۶۰۰۰۰	18	17.	77.	مصالح نوع ۲
۰/۳۲	1870	19	۱۸۰۰	۳۵۰۰	مصالح نوع ۳

جدول ۲: مشخصات مصالح تشکیل دهنده امتداد L4 واقع در ساحل تریسته کشور ایتالیا [۴]



<sup>5</sup> Trieste



شکل ۲: هندسه دادههای آزمایشگاهی برداشت شده 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 می گردد، در اطراف مدل از مرز جاذب ALID استفاده شده است و چیدمان ژئوفونها نیز شامل ۳۲ عدد ژئوفون با فاصله ۳ متر از یکدیگر می باشد. دادهها در مدتزمان ۲ ثانیه با فواصل داده برداری ۰/۲۵ میلی ثانیه برداشت شده است. برای ایجاد امواج سطحی، از بار ضربه ای مستطیلی با مدتزمان اعمال بار ۰/۰۴ میلی ثانیه استفاده شده است.



شکل ۳: شکل شماتیک صحت سنجی 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 نشان دهنده منحنی پراکندگی بهدستآمده از دادههای آزمایشگاهی هاشمی جوکار و همکاران (۲۰۱۹) و دادههای حاصل از مدلسازی توسط نرمافزار آباکوس میباشد. همان طور 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 نشان دهنده آن است که نرمافزار آباکوس به مورت موفقیت آمیزی قادر به مدل سازی امواج سطحی و انتشار امواج در محیطهای لایه میباشد.



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



شکل ۵: منحنی پراکندگی بهدستآمده 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 بهصورت زیر می باشند: مدل شماره ۱: خاک یکلایه نوع A با ضخامت ۵ متر قرارگرفته بر موی نیم-فضا (خاک نوع C)، مدل شماره ۱: خاک یکلایه نوع A با ضخامت ۵ متر قرارگرفته بر روی نیم-فضا (خاک نوع C)، مدل شمال یک لایه خاک نوع A و یک لایه خاک نوع B با ضخامت ۵ متر قرارگرفته بر روی نیم-فضا (خاک نوع C)، مدل شماره ۲: خاک یکلایه نوع A با ضخامت ۵ متر قرارگرفته بر روی نیم-فضا (خاک نوع C)، مدل شماره ۲: خاک یک لایه خاک نوع B با ضخامت ۵ متر قرارگرفته بر روی نیم-فضا (خاک نوع C)، مدل شماره ۲: خاک یکلایه نوع A با ضخامت هر لایه ۲/۵ متر قرارگرفته بر روی نیم-فضا (خاک نوع C)، مدل شماره ۳: خاک یک لایه خاک نوع A با ضخامت هر لایه ۲/۵ متر مرارگرفته بر روی نیم-فضا (خاک نوع C)، مدل شماره ۳: خاک یکلایه نوع A با ضخامت هر لایه ۲/۵ متر قرارگرفته بر روی نیم-فضا (خاک نوع C)، مدل شماره ۳: خاک یک لایه خاک نوع A با ضخامت ۵ متر قرارگرفته بر روی نیم-فضا (خاک نوع C) و مدل شماره ۴: خاک دولایه شامل یک لایه خاک نوع A با ضخامت ۵ متر قرارگرفته بر روی نیم-فضا (خاک نوع C) مدل شماره ۴: خاک یک میم منود کا نوع A با ضخامت هر لایه ۲/۵ متر قرارگرفته بر روی نیم-فضا (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 کام متر قرارگرفته بر روی نیم-فضا (خاک نوع C) مدل شماره ۴، توی نوع C). ممان طور که ملاحظه می شود، در مدل شماره ۱، ۲ و ۳، سختی لایه ها از بالا به پایین افزایش می یابد و در مدل شماره ۴، خاک سماره ۴، خاک سماره ۲، ۲ و ۳، سختی لایه ها از بالا به پایین افزایش می در مدل شماره ۴، خاک ساره ۴، خاک سان در بین دو لایه سخاص می شود، در مدل می مره ۵، ۲ و ۳، سختی لایهها از بالا به پایین افزایش می در مدل شماره ۴، خاک سان در بین دو لایه سختی قرار گیری لایههای مدل های مدل هاره ۱۰ و ۲۰ مدل مداره ۴ نمان در بین دو لایه مدل مداره ۵، مشخصات هندسی و ترتیم و ترم مدل های مدل مره مدل هماره ۴، خاک مدل های مدل مدل هماره ۲، مدل مدل هماره ۱۰ و ۲۰ مدل هماره ۴ مدل های مدل های مدل های مدل همان

داده شده است. در اطراف مرزهای مدل از ۱۰ لایه ALID استفاده گردید که مقادیر ضریب میرایی جرم (**C**<sub>M</sub>) آنها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، ضربه مورداستفاده برای ایجاد امواج سطحی در این ۴ مدل، بار ضربه ای مستطیلی شکل میباشد که در بخش ۰ توضیح داده شده است. به منظور بررسی تاثیر فاصله ژئوفون ها در ترسیم منحنی پراکندگی این مدل ها، ژئوفون ها با فواصل ۳۷/۵، ۷۵/۰، ۱۱۲/۵، ۱۱۲/۰ ۱۵۰/۰ و ۱۸۷/۵ سانتی متر قرار داده شد و داده برداری در مدت زمان ۱ ثانیه با فاصله زمانی ۱۱۲۵ میلی ثانیه انجام گرفت.

	مشخصات						
C <sub>M</sub>	μ	E (kN/m <sup>2</sup> )	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	<b>V</b> s (m/s)	<b>V</b> p (m/s)	مصالح	
۲/۵	۰ /۳۳	5.666/V	19	۱۰۰	۲۰۰	خاک نوع A	
۲/۵	۰ /۳۳	7.7888/1	19	۲۰۰	4	خاک نوع B	
۲/۵	۰ /۳۳	408/.	19	٣٠٠	۶۰۰	خاک نوع C	





شکل ۶: مشخصات هندسی و مصالح مدل های 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 ثبتشده مورد تجزیهوتحلیل 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 ۳۷/۵ سانتیمتر ارائهشده است (منحنی پراکندگی برای فواصل ۷۵/۰ ۱۱۲/۵ مدل ۱ و ۱۸۷/۵ سانتیمتر در شکلهای پ۱ تا پ۴ در پیوست ارائهشده 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 می گردد. در شکل ۷ (الف)، منحنی پراکندگی مدل شماره ۱ تا فرکانس حدود ۱۰ هرتز، با شیب نسبتا قایم پایین می آید و سپس در سرعت ۹۳ متر بر ثانیه، به حالت افقی می رسد. اما در شکل ۷ (ب) که منحنی پراکندگی مدل شماره ۲ ارائه شده است، منحنی پراکندگی با شیب نسبتا کمتری نسبت به مدل شماره ۱ پایین می آید و در فرکانس حدود ۲۱ هرتز به سرعت ۹۱ متر بر ثانیه می رسد و افقی می گردد. این مقدار تفاوت در دو منحنی پراکندگی شکل ۷ (الف) و (ب)، به دلیل حضور لایه خاک نوع B در مدل شماره ۲ می باشد که به دلیل سخت تر بودن نسبت به خاک نوع A، فرکانس های بالاتری را دربر می گیرد و موجب می شود که منحنی پراکندگی به سمت راست (فرکانس های بالاتر) منتقل گردد. در شکل ۷ (ج) که منحنی پراکندگی مدل شماره ۳ ارائه شده است، به دلیل حضور لایه کا خاک نوع B، نمودار با شیب ملایم تری نسبت به حالت قائم پایین می آید و در فرکانس حدود ۳۰ هرتز به سرعت ۹۱ متر برانیه می رسد و فاقی می گردد (فتاری نسبتا مشابه با شکل ۷ (الف) و (ب)). شکل ۷ (د) مربوط به منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ می باشد و ملاحظه می گردد که رفتاری نسبتا مشابه با شکل ۷ (الف) و (ب)). شکل ۷ (د) مربوط به منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ می باشد و ملاحظه می گردد که رفتاری نسبتا مشابه با شکل ۷ (الف) و (ب)). شکل ۷ (د) مربوط به منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ می باشد و ملاحظه می گردد که رفتاری بسبتا مشابه با شکل ۷ (الف) و (ب)). شکل ۷ (د) مربوط به منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ می باشد و ملاحظه می گردد که رفتاری بسبتا مشابه با شکل ۷ (الف) و (ب)). شکل ۷ (د) مربوط به منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ می باشد و ملاحظه می گردد که رفتاری بسبتا مشابه با شکل ۷ (الف) و (ب). شکل ۷ (د) مربوط به منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ می باشد و ملاحظه می گردد که رفتاری بسبتا می می می می در در الفی و دارد. به طوری که ابتدا منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ می باشد و در خانس می مربر ثانیه حرکت می کند و به سرعت حدود ۱۳۵ متربر ثانیه می سد (تاثیر لایه خاک نوع A) و سپس حالت صعودی می گیرد و در فرکانس حدود ۷۵ هر تر به سرعت ۱۸۰ متربر ثانیه می رسد و حالت افقی پیدا می کند؛ که این رفتار مناوت در منحنی پراکندگی مدل شماره ۴، به



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



صاحبامتياز

در شکل ۸، منحنی پراکندگی مدلهای شماره ۱ تا ۴ برای ژئوفونهای با فواصل ۳۷/۵، ۷۵/۰، ۱۱۲/۱، ۱۱۲/۰ و ۱۸۷/۵ سانتیمتر ترسیم گردیده است. همان طور 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 درواقع سرعت فازی خاک نوع A (که دارای سست رین 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 سست ترین مشخصات در این مدل میباشد). این مقادیر بهدست آمده برای سرعت فازی، مطابق با ۹۳٪ سرعت موجبرشی (مطابق با نتایج به دست آمده توسط فوتی و همکاران (۲۰۱۵) برای = ۷ و 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 می باید، در فرکانسهای بالا به سرعت فازی لایه بالایی (لایه سطحی) مجانب میشود.

در شکل ۸ (د) که نشاندهنده منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ میباشد، ملاحظه می گردد 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 می گردد که منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ نیز در فرکانسهای بالا به سرعت فازی لایه قرار گرفته در سطح (خاک نوع B) مجانب شده است (مانند سه مدل دیگر). بنابراین میتوان گفت که سرعت فازی لایه سطحی مهم ترین سرعت فازی است که در فرکانسهای بالا، منحنی پراکندگی را احاطه می کند و به آن مجانب می شود.



شکل ۸: منحنی پراکندگی ترسیمشده برای ژئوفونهای با فواصل ۳۷/۵، ۷۵/۰، ۱۱۲/۵، ۱۵/۰ و ۱۸۷/۵ سانتیمتر: (الف): مدل شماره ۱، (ب): مدل شماره ۲، (ج): مدل شماره ۳ و (د): مدل شماره ۴.

B با مقایسه منحنی پراکندگی مدلهای شماره ۱ و ۲ (شکل ۸ (الف) و (ب))، ملاحظه می شود که با حضور لایه ای از خاک نوع در مدل شماره ۲، منحنی پراکندگی در فرکانسهای کم به سمت راست شیفت پیدا می کند و فرکانسی که منحنی پراکندگی به سرعت فازی لایه سطحی مجانب می شود، افزایش می یابد. بنابراین با استفاده از رابطه سرعت موج برشی، طول موج و فرکانس ( $\frac{v}{f} = x$ ) و همچنین

با بررسی تأثیر فاصله ژئوفونها بر منحنیهای پراکندگی ارائهشده 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 1 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 1 عمق لایه اتفاق میافتد. بهعبارتدیگر، برای حالتی که لایه ژئوفونها ایجاد نمیشود و پرش به مدهای بالاتر در فواصل ژئوفون بزرگتر از 1 عمق لایه اتفاق میافتد. بهعبارتدیگر، 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 فرکانسهای پایینتری صورت میگیرد. این بدان معناست که فاصله ژئوفونها باید با توجه به سرعت موج برشی و محدوده فرکانسی موردنیاز برای نفوذ در عمق مدل تعیین گردد. بنابراین، ضخامت لایه و سرعت موجبرشی تعیین کننده فاصله ژئوفونها میاشد. بهعنوان موردنیاز برای نفوذ در عمق مدل تعیین گردد. بنابراین، ضخامت لایه و سرعت موجبرشی تعیین کننده فاصله ژئوفونها باید با موردنیاز برای نفوذ در معق مدل تعیین گردد. بنابراین، ضخامت لایه و سرعت موجبرشی تعیین کننده فاصله ژئوفونها میاشد. بهعنوان می باشند)، در مقایسه با منحنی هراکندگی مدلهای شماره ۳ و ۴ (که دارای خاک با سرعت موج برشی کمتر در لایههای بالایی می باشند)، در مقایسه با منحنی هراکندگی مدلهای شماره ۳ و ۲ (که دارای خاک با سرعت موج برشی کمتر در لایههای بالایی می باشد. حساسیت کمتری نسبت به افزایش فاصله ژئوفونها دارند؛ که این ممکن است به دلیل فرکانس تشدید سیستم چندلایهای باشد که در پایین تری دارد.

# ۴- نتیجهگیری

امواج سطحی به دلیل خاصیت پراکنشی که دارند، میتوانند در تحقیقات مهندسی ژئوتکنیک و ژئوفیزیک برای تعیین مشخصات خاک مورداستفاده 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 بهوسیله ضربه ایجادشده 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 سختر) ترسیم گردید. در ادامه، تاثیر فواصل ژئوفونها بر منحنی پراکندگی امواج سطحی موردبررسی و تحلیل قرار گرفت که نتایج زیر به دست آمد:

الف- نتايج مدل هايي كه سختي لايهها از بالا به پايين افزايش مييابد:

- برای لایه هایی که از بالا به پایین سختی شان افزایش می یابد، منحنی پراکندگی به سمت راست (فرکانس های بالاتر) انتقال پیدا می کند.
- 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  $rac{1}{4}$ عمق لایه سطحی واکنش نشان نمیدهند. اما با افزایش بیشتر فاصله ژئوفونها، منحنی پراکندگی در فرکانسهای بالا به مدهای بالاتر انتقال مییابد.

ب- نتایج مدل هایی که لایه ضعیفتر در بین لایههای سخت تر قرارگرفته 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 می شود منحنی پراکندگی به صورت دندانه ای 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 می شود.
- عمق لايه سطحي با استفاده از فركانسي كه منحني پراكندگي به سرعت فازي لايه سطحي مجانب مي شود، قابل محاسبه مي باشد.
- در حالتی که در منحنی پراکندگی، پرش به مد بالاتر مشاهده می شود، نمودار تا لحظه پرش کاملا منطبق بر منحنی پراکندگی بدون پرش می باشد و دادههای آن قابل قبول می باشد. در این حالت می تواند دو راهکار مدنظر قرار داده شود: ۱- برداشت دادههای امواج سطحی با فاصله کمتر ژئوفون ها و ۲- محدود کردن منحنی پراکندگی به محدوده فرکانسی قبل از پرش به مد بالاتر.

پيوست



شکل پ۱: منحنی پراکندگی مدل شماره ۱ برای ژئوفونهای با فاصله: (الف) ۷۵/۰ (ب) ۱۱۲/۵ (ج) ۱۵۰/۰ و (د) ۱۸۷/۵ سانتیمتر.







شکل پ۳: منحنی پراکندگی مدل شماره ۳ برای ژئوفونهای با فاصله: (الف) ۷۵/۰، (ب) ۱۱۲/۵، (ج) ۱۵۰/۰ و (د) ۱۸۷/۵ سانتیمتر.





شکل پ۴: منحنی پراکندگی مدل شماره ۴ برای ژئوفونهای با فاصله: (الف) ۷۵/۰ (ب) ۱۱۲/۵ (ج) ۱۵۰/۰ و (د) ۱۸۷/۵ سانتی متر.

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. Strobbia, 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] Strobbia, 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, 2 :(f))(1) ... vp. 1945-1955.

[15] Drozdz, 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., Proidence, 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.

