

## شناسایی عمق و ضخامت لایه ضعیف با استفاده از طیف سرعت فاز و منحنی پراکندگی نظری امواج رایلی

محمد مهدی مرادی<sup>۱</sup>، حسین رهنما<sup>۲</sup> و سهراب میراسی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

<sup>۲</sup> استادیار گروه عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۳۱)

### چکیده

شناسایی بی‌هنجاری زیرسطحی مانند وجود لایه ضعیف در اعماق و ضخامت‌های مختلف، نقش بسزایی در طراحی‌های مهندسی ایفا می‌کند. با شناسایی لایه‌های ضعیف می‌توان از مشکلات احتمالی جلوگیری کرد؛ لذا در این مقاله با توجه به گستردگی روش‌های شناسایی زیرسطحی، از روش تحلیل چندایستگاهی امواج سطحی استفاده شده است که بسیار سریع، راحت و بی‌نیاز از حفاری و تخریب است. در این راستا با شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس (Abaqus)، تأثیر تغییرات ضخامت و عمق قرارگیری لایه ضعیف با نتایج مدل خاک سه لایه نرمال مقایسه شده است. لایه‌های ضعیف در ضخامت‌های ۲، ۴ و ۸ متر و اعماق مدفون ۲، ۴ و ۸ متر از سطح زمین انتخاب و ارزیابی شده‌اند. در ادامه، نتایج خروجی هر کدام از مدل‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار متلب پردازش و طیف سرعت فاز و منحنی پراکندگی نظری امواج رایلی ترسیم شده است. نتایج نشان دادند وجود لایه ضعیف در هر عمق و ضخامتی موجب ایجاد پرش در طیف سرعت فاز امواج رایلی می‌شود با این تفاوت که با افزایش عمق مدفون لایه ضعیف، موقعیت پرش از فرکانس‌های بالاتر به فرکانس‌های پایین‌تر انتقال می‌یابد و تأثیر افزایش ضخامت لایه ضعیف به صورت افزایش تعداد پرش‌ها در طیف سرعت فاز مشاهده می‌شود. با انطباق طیف سرعت فاز و منحنی پراکندگی نظری امواج رایلی به وضوح مشخص شده است که طیف سرعت فاز از مداساسی به سمت مدهای بالاتر انتقال یافته است. دلیل این رخداد، آن است که مدهای بالاتر در برخی فرکانس‌های خاص انرژی بیشتری دارند. درک صحیح و در نظر گرفتن این تغییرات و اعمال آنها بر داده‌های ورودی تحلیل برگردان موجب شده است مقاطع سرعت موج برشی و طولی پذیرفتنی‌تر و دقیق‌تری حاصل شود.

**واژه‌های کلیدی:** لایه ضعیف، موج رایلی، طیف سرعت، منحنی پراکندگی نظری، پرش، امواج سطحی.

## ۱ مقدمه

وجود بی‌هنجاری‌های زیرسطحی همانند حفره، فروچاله، لایه‌های ضعیف زیرسطحی، گسل و تونل که انسان یا طبیعت آنها را ایجاد کرده‌اند، می‌تواند خطرهای جدی برای محیط زیست یا ساختگاه‌های پروژه‌های مهندسی به همراه داشته باشد (رهنما و میراثی، ۲۰۱۲، ۲۰۱۶). قرارگیری لایه ضعیف و سست بین دو لایه سخت از جمله بی‌هنجاری‌هایی است که پتانسیل نشست را افزایش می‌دهد و شناسایی ضخامت و عمق قرارگیری این لایه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شناسایی هرچه دقیق‌تر این پدیده می‌تواند در کنترل و جلوگیری از خطرهای احتمالی آنها نقش مؤثری ایفا کند. روش تحلیل امواج سطحی، روش لرزه‌ای غیرمخربی است که از سالیان دور تا به امروز جهت شناسایی مشخصات لایه‌های خاک و بی‌هنجاری‌های زیرسطحی استفاده می‌شود (نظریان و همکاران، ۱۹۸۳ و پارک و همکاران، ۱۹۹۶). نظر به توسعه و توانایی روش‌های جدید لرزه‌ای در زمینه ژئوتکنیک، می‌توان از آنها متناسب با دقت و سرعت زیادشان استفاده کرد.

هاشمی جوکار و همکاران (۱۴۰۰) ضخامت لایه‌های خاک را با استفاده از شبیه‌سازی آزمایش تحلیل چندایستگاهی امواج سطحی در نرم‌افزار آباکوس (Abaqus) ([www.simulia.com](http://www.simulia.com)) تخمین زدند و به این نتیجه رسیدند که شیب منحنی پراکندگی در فرکانس‌های پایین نشان‌دهنده وجود لایه‌هایی با سرعت‌های مختلف است و هرچه شیب تندتر باشد، تعداد لایه‌های کمتری در محیط وجود دارد. بر اساس یافته‌های آن پژوهش، منحنی پراکندگی در فرکانس‌های بالا به سرعت فاز لایه سطحی مجانب می‌شود و با استفاده از فرکانسی که در آن، منحنی پراکندگی به سرعت فاز لایه سطحی مجانب می‌شود، می‌توان عمق لایه سطحی خاک را محاسبه کرد. روی و جاکا (۲۰۱۷) با مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار پلاکسیس (Plaxis) و مطالعه پارامترهای سطحی خاک و

برداشت داده و اثر آن بر منحنی پراکندگی، نتیجه گرفتند هنگام استفاده از منبع موج غیرفعال در قیاس با منبع موج فعال و همچنین با افزایش سختی لایه نیم‌فضا، منحنی پراکندگی سرعت فاز بیشتری را نشان می‌دهد.

در پژوهش امین‌نژاد و بات (۲۰۰۳) مطرح شده است که روش‌های امواج رایلی بیشترین پتانسیل را جهت شناسایی بی‌هنجاری‌های زیرسطحی دارند. پارک و همکاران (۱۹۹۹) با توجه به پیوستگی فرکانس ارتعاش‌های ایجادشده در آزمایش امواج سطحی، فرکانس نوفه‌ها را تشخیص و با فیلتر کردن دامنه فرکانسی ارتعاشی، دقت منحنی پراکندگی و در نتیجه، مقطع سرعت موج برشی را افزایش دادند. به‌کارگیری روش‌های جدیدی همچون روش‌های انعکاسی و انکساری و تحلیل چندایستگاهی امواج سطحی با استفاده از امواج رایلی و طولی می‌تواند در جهت شناسایی تغییرات و بی‌هنجاری‌های زیرسطحی بسیار مفید و کارآمد باشد (کادوتو، ۲۰۱۵). مطالعات متعددی در راستای شناسایی بی‌هنجاری‌های زیرسطحی انجام شده است که می‌توان به تحقیقات اخیر میراثی و رهنما (۱۳۹۹ الف) اشاره کرد که با بررسی عددی و مدل‌سازی به روش اجزاء محدود (finite element method) مشخص کردند که کوتاه‌ترین طول موج و ضخامت لایه‌های سطحی خاک، تعیین‌کننده فاصله بین گیرنده‌ها است و همچنین طول آرایه گیرنده‌ها و دورافت باید بر اساس بزرگ‌ترین طول موج و عمق شناسایی انتخاب شود. هرچه تعداد ژئوفون‌ها بیشتر و فاصله بین آنها و گام فرکانسی انتخاب‌شده کمتر باشد، وضوح بهتری از منحنی پراکندگی سرعت فاز حاصل می‌شود (رهنما و دشتی، ۱۳۹۵ و رهنما و احسانی‌نژاد، ۱۳۹۶).

رهنما و همکاران (۲۰۲۰، ۲۰۲۱، ۱۴۰۱) در بررسی حفرات زیرسطحی، با انتقال داده‌های منکسر موج رایلی به حوزه فاصله و فرکانس و ترسیم نمودار انرژی نشان دادند

مدفون) بر فضای سرعت فاز و فرکانس نمایش داده شد. پس از آن صحت‌سنجی نتایج و منحنی‌های پراکندگی با نرم‌افزار پارک‌سایز (ParkSeis) ارزیابی شد. داده‌های به‌دست‌آمده در فضای طیف سرعت فاز و منحنی پراکندگی نظری امواج رایلی نمایش داده شده‌اند. مقاطع سرعت موج برشی و طولی نیز با استفاده از تحلیل برگردان استخراج شده است.

## ۲ مواد و روش‌ها

### ۲-۱ روش اجزاء محدود و مرزهای جاذب

روش اجزاء محدود روشی موفقیت‌آمیز است که در مسائل انتشار امواج به‌کار گرفته می‌شود (کاستینگز و همکاران، ۲۰۰۴؛ هسه و کاولی، ۲۰۰۶ و لو و رز، ۲۰۰۷). طبق پژوهش دروزدز (۲۰۰۸) شبیه‌سازی اجزاء محدود برای بارهای ضربه‌ای روی سطح آزاد سبب برگشت انرژی درخور توجهی از طرف مرزهای اجزاء نامحدود می‌شود؛ بنابراین مرزهای اجزاء نامحدود برای مدل‌سازی‌های پیچیده انتشار امواج در آزمایش‌های امواج سطحی برای محیط دو و سه بعدی مناسب نیستند. از سوی دیگر، مرزهای جاذب به نام‌های لایه‌های جاذب با افزایش میرایی (Absorbing Layers using Increasing Damping, ALID) و لایه تطابق کامل (Perfecting Matched Layers, PML) به نحو چشمگیری اندازه محاسباتی و هندسی مدل عددی را کاهش می‌دهند (راجاگوپال و همکاران، ۲۰۱۲). در این مقاله، به علت راحتی و فراهم بودن نحوه اعمال میرایی رایلی، از لایه‌های جاذب افزایش میرایی به جهت جذب و میراشدن انرژی امواج لرزه‌ای مطابق ضرایب میرایی جدول ۱ استفاده شده است (داوودی و همکاران، ۲۰۱۸ و لین و اشلاک، ۲۰۱۴). همچنین از دیدگاه اولسون (۲۰۱۲) ضخامت ALID و به‌نوعی طول ALID، پارامتری تأثیرگذار بر اختلاف نسبی امپدانس اجزاء در مرز جاذب است و به جهت میرا کردن موج‌ها در

در محل حفرة، تمرکز انرژی وجود دارد و در موقعیت پس از حفرة، نمودار انرژی دچار اغتشاش می‌شود. از طرفی، هرچه حفرة در اعماق پایین‌تری قرار گیرد، شکست امواج رایلی کمتر است (میرائی و رهنما، ۲۰۲۰). ایشان برای شناسایی حفرة‌ها و ناهمگنی‌های موجود در لایه‌های خاک با مدل‌سازی روش تحلیل چندکاناله امواج سطحی در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس به بررسی وجود حفرات زیرسطحی و حفرة‌های پر شده از بتن پرداختند و نشان دادند در اعماق کم، میزان شکست امواج رایلی ناشی از حفرة پر شده از بتن و حفرة در زیر زمین تفاوت چندانی ندارد، ولی هرچه حفرة از منبع ارتعاش دورتر باشد، شکست امواج رایلی انرژی کمتری دارد. وجود لایه‌های ضعیف و سست و همچنین حفرات در لایه‌بندی خاک، موجب پخش انرژی امواج سطحی در فرکانس‌های مختلف و حتی بی‌نظمی در منحنی پراکندگی می‌شود و سبب می‌شود طول موج‌ها به عمق هدف برگردانده شوند. علاوه‌براین وجود حفرة‌ها باعث تغییر مد اساسی از مد اول به مدهای بالاتر می‌شود (ایوانوف و همکاران، ۲۰۰۳ و کاتالینا اورازکو، ۲۰۰۳). سونگ و گو (۲۰۰۷) با مطالعه موردی لایه زیراساس یک جاده در شهر هنان (Henan) چین و مقایسه نتایج آزمایش و تحلیل امواج سطحی چندکاناله و نتایج گمانه‌های حفرة‌شده با استفاده از داده‌های مد منحنی پراکندگی، مقطع سرعت موج برشی لایه زیراساس را تعیین کردند.

با توجه به گسترش روزافزون به‌کارگیری روش‌های امواج سطحی و نظر به اینکه روش تحلیل امواج سطحی، روشی مؤثر و دقیق جهت شناسایی بی‌هنجاری‌های زیرسطحی (حفرة، تغییرات جانبی و لایه ضعیف) است؛ لذا در این مقاله محیط خاکی لایه‌بندی‌شده که تحت تأثیر تغییر پارامترهای عمق مدفون و ضخامت لایه ضعیف است، در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار متلب، منحنی پراکندگی ترسیم و تأثیر تغییرات پارامترهای لایه ضعیف (اعم از ضخامت لایه و عمق

مرزهای سمت راست، چپ و پایین، باید از چیدمان افزایشی میرایی لایه‌ها یا همان ALID استفاده کرد (راجاگوپال و همکاران، ۲۰۱۲). مطابق تحلیل‌های انجام‌شده، ده لایه ALID یک متری جهت جذب بهتر موج‌های رسیده انتخاب شده و مشخصات لایه‌ها کاملاً با محیط مجاورشان یکسان است (شکل ۱). فاصله منبع تا نزدیک‌ترین لایه ALID، ۱۰ متر فرض شده است تا اثر امواج بازگشتی به‌درستی از اثر امواج مستقیم تفکیک شود. میرایی مورد

استفاده در ALID از نوع میرایی رایلی است که به تدریج افزایش می‌یابد (میراثی و رهنما، ۱۳۹۹ ب). این ضرایب، متناسب با میرایی محیط خاک مدل‌شده برای هر ناحیه، به صورت مضربی از ۲ در حال افزایش هستند. این افزایش باید به گونه‌ای باشد که موجب تغییر شدید میرایی بین دو لایه ALID و در نتیجه، بازگشت موج در مرز دو لایه نشود (جدول ۱).

جدول ۱. مشخصات لایه‌های خاک.

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

## ۳-۲ مدل‌سازی

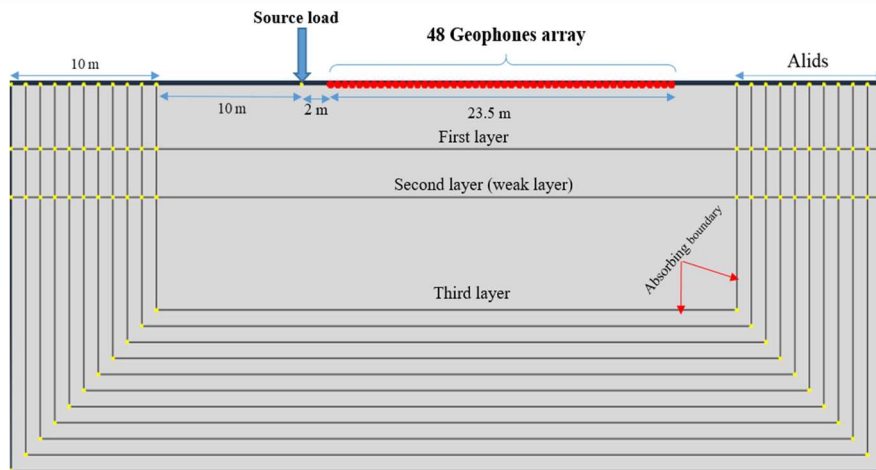
در این مقاله، از روش اجزاء محدود برای شبیه‌سازی انتشار امواج در محیط‌های کشسان خطی استفاده شده است. سطح کرنش متناسب با آزمایش‌های ژئوفیزیکی تقریباً خیلی کوچک است؛ بنابراین به صورت گسترده پذیرفته شده است که نظریه کشسانی خطی یک چهارچوب سازگار برای تفسیر آزمایش‌های لرزه‌ای فراهم می‌کند. با وجود این، پارامترهای کرنش - کوچک نقش در خور توجهی در محدوده وسیعی از مسائل ژئوتکنیک دارند (اتکینسون، ۲۰۰۰ و چای و همکاران، ۲۰۱۲). در آزمایش‌های لرزه‌ای همچون تحلیل چندایستگاهی امواج سطحی، کرنش‌های کشسان ایجادشده کوچک‌تر از ۰/۰۰۱ درصد است؛ بنابراین می‌توان در مدل‌سازی‌ها از محیط کشسان خطی استفاده کرد.

مدل‌های استفاده‌شده در این مقاله ۱۴ و طولشان ۴۰ متر است (شکل ۱). لایه‌ها کاملاً افقی هستند و تعداد ۴۸ ژئوفون به فاصله نیم متر از یکدیگر چیده شده‌اند. مشخصات لایه‌بندی خاک در جدول ۲ ارائه شده است. معمولاً برداشت داده‌های لرزه‌ای با یک منبع فعال سطحی و ثبت جبهه موج ناشی از آن صورت می‌گیرد. منبع مورد استفاده برای تولید امواج سطحی می‌تواند منبع ضربه‌ای باشد. در بیشتر مواقع از چکش‌های سبک‌تر برای تولید فرکانس‌های بالا و وزنه افتان برای تولید فرکانس‌های پایین می‌توان استفاده کرد. تعداد ژئوفون‌ها، فاصله آنها و بازه‌های ثبت داده‌ها نیز برای یک داده‌برداری با کیفیت اهمیت بسیاری دارد. همان‌طور که شونک و همکاران (۲۰۱۶) مشخص کردند، داده‌برداری باید طوری طراحی شود که اثر امواج حجمی و امواج رایلی نشست‌گرفته از منابع دیگر و نوفه‌ها را کاهش دهد به گونه‌ای که نسبت سیگنال به نوفه در حد پذیرفتنی باشد.

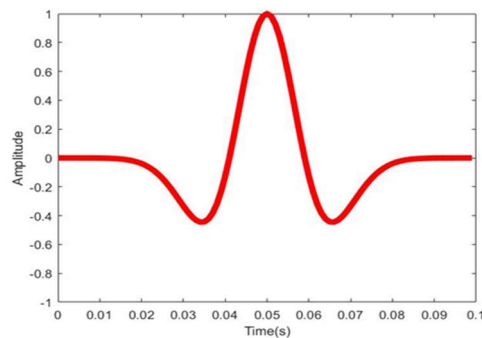
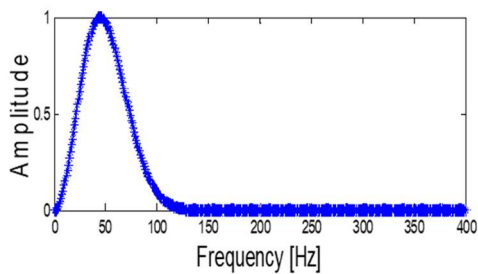
تمام مدل‌سازی‌ها با استفاده از روش اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس نسخه ۶/۱۴ صورت پذیرفته است. عمق

جدول ۲. مشخصات لایه‌بندی خاک.

میرایی (%)	نسبت پواسون	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	مدول کشسان (MPa)	سرعت موج طولی (m/s)	سرعت موج برشی (m/s)	مصالح
۲/۵	۰/۳۳	۱۸۰۰	۱۹۲۵۱۰	۴۰۰	۲۰۰	لایه اول
۲/۵	۰/۲۹	۱۷۵۰	۴۵۴۶۵	۱۹۰	۱۰۰	لایه دوم (لایه نرم)
۲/۵	۰/۳۳	۱۹۰۰	۴۵۴۸۶۰	۸۰۰	۴۰۰	لایه سوم



شکل ۱. مشخصات مدل خاک سه لایه و نحوه قرارگیری لایه‌ها و جزئیات مدل.



شکل ۲. موجک ریکر ۵۰ هرتز در فضای زمان و فرکانس.

با فرکانس مرکزی ۵۰ هرتز استفاده شده است که به آن موجک ریکر ۵۰ نیز گفته می‌شود. در شکل ۲ موجک لرزه‌ای یا ارتعاشی اعمال شده در سطح زمین با فرکانس مرکزی (غالب) ۵۰ هرتز نشان داده شده است که با جاگذاری مدت زمان موجک وارده بر محیط به‌دست آمده‌است. بار لرزه‌ای ریکر در فضای مکان و زمان

انرژی ضربه‌ای که برای ایجاد امواج سطحی استفاده می‌شود، باید طوری اعمال شود که محتوای فرکانسی لازم را برای نفوذ در تمامی لایه‌ها داشته باشد (موس، ۲۰۰۸). موجک لرزه‌ای ریکر که یکی از منابع لرزه‌ای فعال است، به‌صورت گسترده در مطالعات ژئوتکنیکی استفاده می‌شود. در این مقاله نیز از موجک لرزه‌ای وارد شده به سطح زمین

با رابطه زیر تعریف می‌شود (اشمزلزباخ و همکاران، ۲۰۱۵):

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

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

که  $t$ ،  $f$ ،  $f_M$  و  $R$  به ترتیب نشان‌دهنده زمان، فرکانس، فرکانس غالب و بار ریکر هستند.

در این روش پس از ثبت داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و خام که در فضای فاصله-زمان هستند، این داده‌ها با نرم‌افزار آباکوس برداشت و با تبدیل فوریه دوگانه، به فضای عدد موج-فرکانس منتقل می‌شوند. با تقسیم فرکانس بر عدد موج ( $V_{ph}=f/k$ ) سرعت فاز محاسبه و با نمایش داده‌های سرعت فاز برحسب فرکانس، منحنی و طیف پراکندگی ترسیم می‌شود. منحنی پراکندگی چند مد دارد که هر مد بیانگر یک تراز انرژی است. وجود هم‌زمان مدهای ارتعاشی بیانگر این است که در هر محدوده فرکانسی، داده‌های منحنی پراکندگی در یک تراز انرژی ویژه قرار دارند.

### ۲-۳ صحت‌سنجی

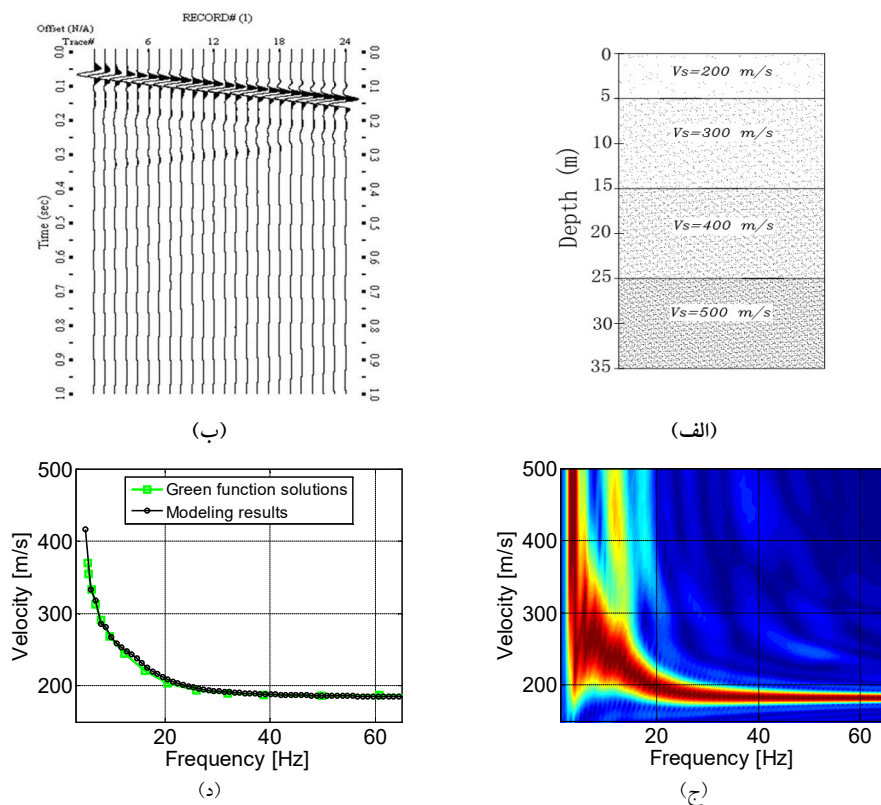
برای صحت‌سنجی خروجی نرم‌افزار آباکوس و کدهای نوشته‌شده در برنامه متلب، از مدل خاک چهار لایه با مقطع سرعت موج برشی مطابق شکل ۳-الف استفاده شده است (میراثی و همکاران، ۲۰۲۰ و میراثی، ۱۳۹۸). نتایج منحنی پراکندگی این مدل چهار لایه را که یون و ریکس (۲۰۰۹) در آزمایشی میدانی بررسی و مطالعه کردند، در شکل ۳-د ارائه شده است. این مقطع خاک چهار لایه در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد. داده‌های خام حاصل از منحنی پراکندگی با عنوان میدان امواج برحسب فاصله‌زمان در شکل ۳-ب دیده می‌شود. پس از برداشت داده‌های خام و مصنوعی و پردازش آنها در نرم‌افزار متلب، طیف سرعت امواج ریلی (شکل ۳-ج) رسم شد. نتایج، نشان از همخوانی پذیرفتنی منحنی پراکندگی حاصل از مدل‌سازی با

منحنی پراکندگی حاصل از نتایج یون و ریکس (۲۰۰۹) (تابع گرین) دارد. این موضوع بیانگر صحت مدل‌سازی‌ها و خروجی کدهای متلب است.

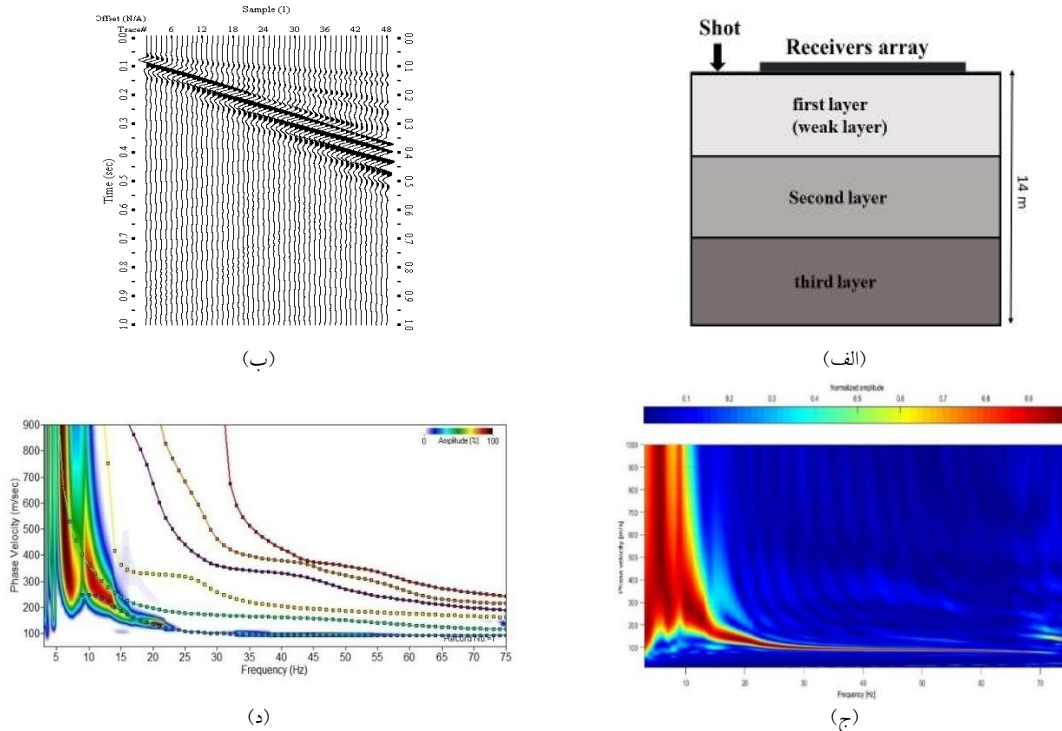
### ۳ بحث و نتایج

در این مقاله برای ارزیابی تأثیر وجود لایه ضعیف از مدل خاک سه لایه استفاده شده است و نتایج تغییر عمق و ضخامت لایه ضعیف بررسی می‌شوند. در بخش بررسی پارامتر عمق قرارگیری لایه ضعیف، یک لایه به ضخامت ۲ متر که سختی کمتری نسبت به لایه بالاتر و پایین‌تر خود دارد، در عمق‌های ۲، ۴ و ۸ متری از سطح زمین قرار داده شده است. همچنین جهت بررسی پارامتر ضخامت، از یک لایه ضعیف خاک به ضخامت‌های ۲، ۴ و ۸ متر در بین دو لایه استفاده شده است. مدل‌های مذکور خاک در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شدند تا به برداشت داده‌های خام منتهی شوند. سپس این داده‌های خام در نرم‌افزار متلب و پارک‌سایز نسخه ۳ ([www.parkseismic.com](http://www.parkseismic.com)) پردازش شدند تا طیف و منحنی پراکندگی ترسیم شوند. در وهله آخر، با تحلیل برگردان داده‌های منحنی پراکندگی در نرم‌افزار ژئوپسی (واتلت و همکاران، ۲۰۱۰)، مقطع سرعت انتشار موج برشی و سرعت انتشار موج طولی در خاک حاصل می‌شود. انطباق منحنی‌های نظری با طیف سرعت فاز امواج ریلی درک مناسب‌تری را از پراکندگی امواج به دلیل وجود لایه ضعیف فراهم کرده است. در ادامه، ابتدا تأثیر عمق‌های مختلف لایه ضعیف و سپس تأثیر ضخامت لایه ضعیف ارائه بررسی می‌شود.

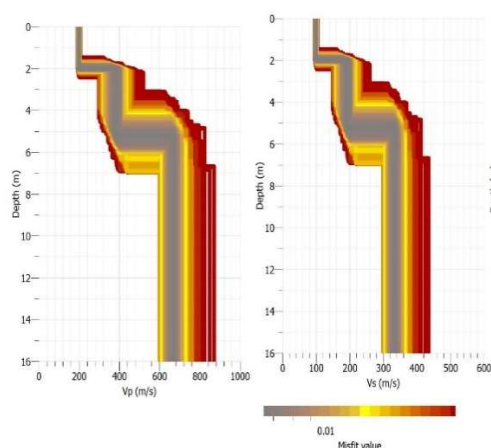
در این بخش محیطی سه لایه بررسی می‌شود که سختی لایه‌های آن نرمال است و با افزایش عمق، افزایش می‌یابد. لایه ضعیف، نخستین لایه است. مشخصات خاک طبق جدول ۲ است. در شکل ۳ میدان امواج برحسب فاصله-زمان، طیف پراکندگی و منحنی‌های پراکندگی تجربی و نظری حاصل از پردازش داده‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۳. صحت‌سنجی نتایج روش اجزاء محدود و کدهای متلب. (الف) مشخصات مدل خاک چهار لایه (یون و ریکس، ۲۰۰۹) (ب) میدان امواج حاصل از آزمایش تحلیل امواج سطحی در فضای فاصله- زمان (ج) طیف سرعت فاز امواج (د) مقایسه نتایج روش اجزاء محدود با نتایج تابع گرین.



شکل ۴. نتایج مدل‌سازی خاک سه لایه. (الف) نحوه قرارگیری لایه‌ها (ب) داده‌های مصنوعی و خام حاصل از برداشت گیرنده‌ها در فضای زمان- فاصله (ج) طیف سرعت فاز امواج رایلی (د) انطباق طیف سرعت فاز و منحنی‌های پراکندگی نظری امواج رایلی حاصل از نرم‌افزار پارک‌سایز.



شکل ۵. نتایج تحلیل برگردان (مقطع سرعت موج برشی و طولی).

الف طرح کلی محل قرارگیری لایه ضعیف در مدل خاک با لایه‌بندی سختی معکوس ترسیم شده است. مشخصات این مدل خاک سه لایه در جدول ۲ ارائه شده است. در این مدل، لایه نرم به ضخامت ۲ متر در زیر لایه اول به ضخامت ۲ متر قرار داده شده است. به عبارتی دیگر، لایه ضعیف در عمق مدفون ۲ متری قرار دارد. پس از تولید داده‌های مصنوعی (شکل ۶-ب)، تحلیل‌های چندایستگاهی امواج سطحی در نرم‌افزار متلب صورت پذیرفته و نتایج به صورت طیف سرعت فاز امواج رایلی در شکل ۶-ج نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت در فرکانس‌های بالا مربوط به لایه سطحی با سرعت موج برشی ۲۰۰ متر بر ثانیه است و سرعت‌های بیشتر در فرکانس‌های پایین مربوط به لایه سوم است. نظر به اینکه لایه ضعیف سرعت متفاوت‌تری دارد، تأثیر خود را به صورت ایجاد ناپوستگی و پرش در طیف سرعت فاز امواج رایلی نشان داده است. این پرش در فرکانس ۳۷ هرتز پدیدار شده است که به وضوح می‌توان آن را دید.

در شکل ۶-د طیف سرعت فاز امواج رایلی با منحنی پراکندگی نظری امواج رایلی به دست آمده از نرم‌افزار پارک‌سایز انطباق داده شده است. دو نکته شایان توجه در این شکل دیده می‌شود: (۱) همخوانی و مشابهت مناسبی بین

در این حالت طیف پراکندگی کاملاً یکنواخت است و بدون هیچ‌گونه پرشی در فرکانس‌های بالاتر به سرعت موج رایلی لایه اول مجانب شده است (شکل ۴). همان‌طور که در شکل ۴-د نمایان است، منحنی پراکندگی تجربی تطابق بسیار خوبی با منحنی پراکندگی نظری دارد. همچنین در نتایج تحلیل برگردان (شکل ۵) مشاهده می‌شود میزان ناهماهنگی نتایج کمتر از ۰/۰۱ درصد است. خطوط خاکستری‌رنگ نشان‌دهنده بیشترین دقت است و مقطع خاک به دست آمده همخوانی بسیار خوبی با پارامترهای اولیه خاک محیط دارد.

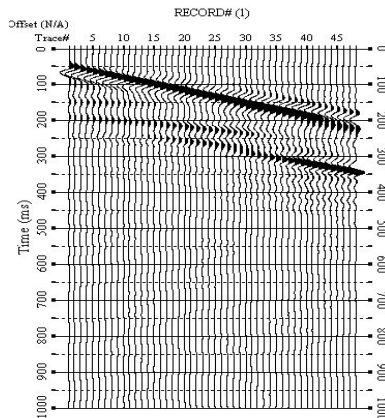
### ۳-۱ تأثیر عمق قرارگیری لایه ضعیف

#### ۳-۱-۱ لایه ضعیف در عمق ۲ متر

در مباحث ابتدایی نظریه انتشار امواج لرزه‌ای در محیط خاکی به طور صریح و واضح ذکر شده است که سرعت انتشار امواج ارتباط مستقیمی با سختی محیط دارد؛ یعنی در محیط خاکی با سختی کمتر، امواج با سرعت کمتر و در محیط خاکی سخت‌تر، امواج با سرعت بیشتری منتشر می‌شوند. خاک با لایه‌بندی سختی معکوس نیز خاکی است که با افزایش عمق خاک، سختی آن کاهش یابد یا یک لایه نرم خاک میان دو لایه سخت به دام بیفتد. در شکل ۶-

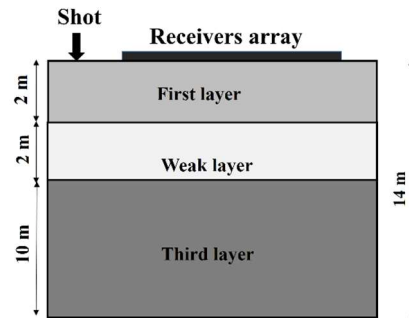


قرار گرفته است و می‌توان این‌گونه بیان کرد که به دلیل وجود لایه ضعیف، انرژی به سمت مدهای بالاتر حرکت کرده است؛ لذا می‌توان از داده‌های قرار گرفته در مدهای بالاتر جهت افزایش دقت و وضوح نتایج تحلیل برگردان و تعیین مقطع سرعت موج برشی خاک استفاده کرد.

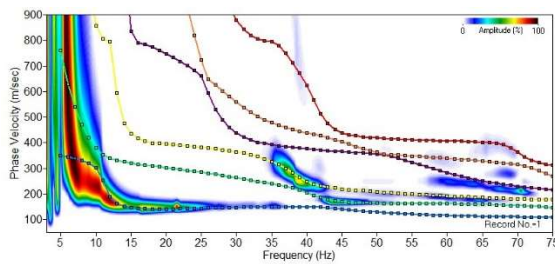


(ب)

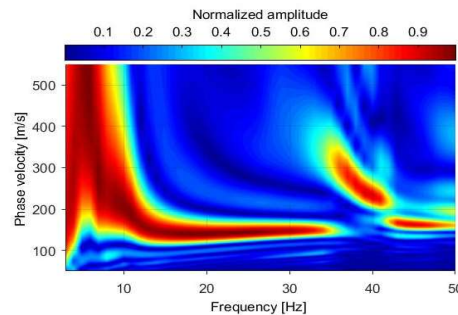
طیف سرعت فاز حاصل از نرم‌افزار پارک‌سایز (شکل ۶-د) و طیف سرعت فاز به دست آمده از کدهای متلب (شکل ۶-ج) وجود دارد؛ ۲) مد سوم (زرد رنگ) با پرش ایجاد شده همخوانی دارد. در واقع انرژی طیف سرعت فاز از مد اساسی به مدهای بالاتر انتقال یافته و در مسیر مد سوم



(الف)



(د)



(ج)

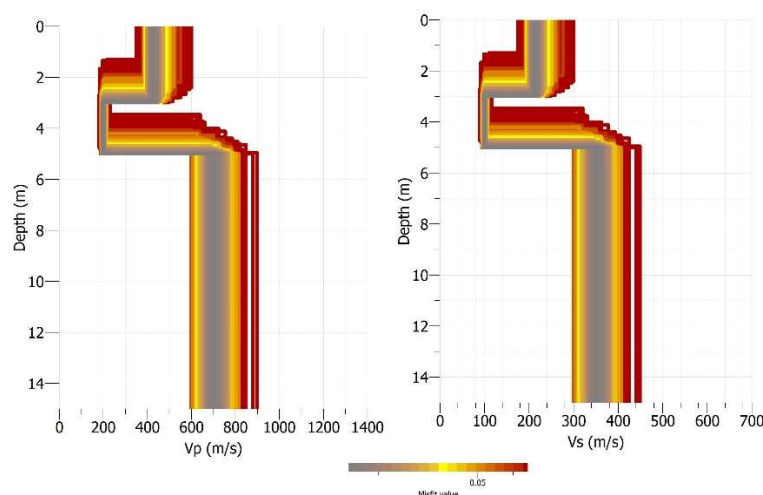
شکل ۶. نتایج مدل‌سازی خاک سه لایه. (الف) نحوه قرارگیری لایه‌ها (ب) داده‌های مصنوعی و خام حاصل از برداشت گیرنده‌ها در فضای زمان-فاصله (ج) طیف سرعت فاز امواج رایلی (د) انطباق طیف سرعت فاز و منحنی‌های پراکندگی نظری امواج رایلی حاصل از نرم‌افزار پارک‌سایز.

شده‌اند. تحلیل برگردان یا وارون‌سازی نتایج در نرم‌افزار دینور بر اساس الگوریتم همسایگی (Neighbourhood Algorithm) انجام گرفته است. الگوریتم همسایگی یکی از زیرمجموعه‌های روش تحلیل یادگیری ماشین (Machine Learning) است که طی آن، عملیات برگردان داده‌های مد اساسی منحنی پراکندگی را پردازش می‌کند و تعداد زیادی مقطع خاک تولید می‌شود، اما مقطعی پذیرفته و در نهایت، انتخاب می‌شود که ناهماهنگی کمتری دارد. برخی نتایج

نمودارهای فوق نشان دادند مدل‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار آباکوس و تحلیل داده‌ها با استفاده از کدهای متلب تا چه اندازه شکل‌های ارزشمندی را فراهم کرده‌اند. در ادامه، با استفاده از تحلیل برگردان، مقطع سرعت موج برشی و طولی در اعماق مختلف تعیین شده است (شکل ۷). برای تعیین موقعیت، ضخامت و سرعت لایه ضعیف از داده‌های طیف سرعت فاز امواج رایلی استفاده شده است. داده‌ها در نرم‌افزار دینور/ژنوپسی (Dinver/Geopsy) تحلیل

به دست آمده، همخوانی خوبی با مقطع اولیه خاک سه لایه در شکل ۶- الف دارد. در جدول ۳ نتایج تحلیل برگردان و مقطع اصلی خاک مقایسه شده است.

تحلیل برگردان در قالب مقطع سرعت موج برشی در شکل ۷ ارائه شده است. میزان ناهماهنگی داده‌ها کمتر از ۰/۰۱ درصد است و خطوط خاکستری رنگ نشان‌دهنده بیشترین دقت است. در نهایت، می‌توان اظهار داشت مقطع خاک



شکل ۷. نتایج تحلیل برگردان (مقطع سرعت موج برشی و طولی).

جدول ۳. مقایسه نتایج تحلیل برگردان و مقطع اصلی خاک.

پارامترها شماره لایه	عمق اصلی لایه (از تراز سطح زمین)	عمق حاصل از تحلیل برگردان	سرعت موج برشی اصلی لایه	سرعت موج برشی حاصل از تحلیل برگردان
لایه اول	۰-۲	۰-۳	۲۰۰	۱۸۰-۲۸۰
لایه دوم	۲-۴	۳-۵	۱۰۰	۹۰-۱۳۰
لایه سوم	۴-۱۴	۵-۱۴	۴۰۰	۳۰۰-۴۵۰

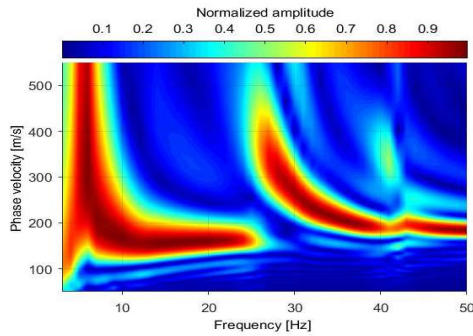
در شکل ۸- ج منحنی‌های پراکندگی نظری امواج رایلی بر طیف سرعت فاز انطباق داده شده است. بر این اساس می‌توان رخداد پرش را در محدوده فرکانس ۲۷ هرتز مشاهده کرد که نشان‌دهنده انرژی و دامنه بیشتر مدهای بالاتر در محدوده فرکانس یادشده است و موجب می‌شود طیف سرعت فاز دچار پرش و حرکت از مد اساسی به مدهای بالاتر شود. بین طیف سرعت فاز حاصل از نرم‌افزار پارک‌سایز (شکل ۸- ج) و طیف سرعت فاز به دست آمده از کدهای متلب (شکل ۸- ب) همخوانی پذیرفتنی دیده

### ۳-۱-۲ لایه ضعیف در عمق ۴ متر

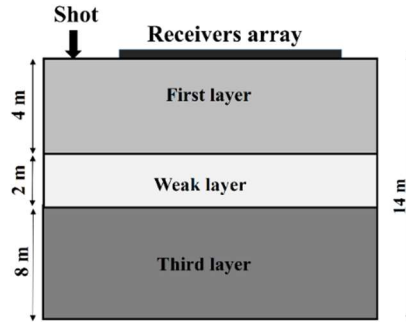
در این قسمت، لایه ضعیف در عمق ۴ متری از سطح زمین و زیر لایه اول با عمق مدفون ۴ متر قرار گرفته است (شکل ۸- الف). طیف سرعت فاز حاصل از مدل‌سازی و تحلیل داده‌ها در برنامه متلب در شکل ۸- الف نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که طیف سرعت فاز در محدوده فرکانسی ۲۷ هرتز دچار یک پرش و ناپیوستگی بزرگ‌تر از حالت قبل شده است. این پرش به علت وجود لایه ضعیف در عمق ۴ متری است.

می‌شود. تحلیل برگردان به صورت مقطع سرعت موج برشی در شکل ۹ ارائه شده است. خطوط خاکستری رنگ نشان‌دهنده بیشترین دقت نتایج است. مقطع خاک به دست آمده همخوانی خوبی با مقطع اولیه خاک سه لایه در شکل ۸-الف از خود نشان می‌دهد. در جدول ۴ نتایج تحلیل برگردان و مقطع اصلی خاک مقایسه شده است.

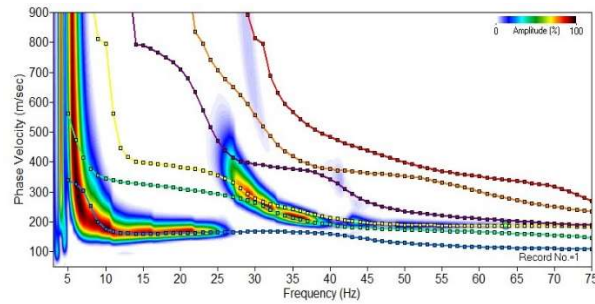
در ادامه، با استفاده از تحلیل برگردان، مقطع سرعت موج برشی و طولی در اعماق مختلف تعیین می‌شود. برای تعیین موقعیت، ضخامت و سرعت لایه ضعیف از داده‌های طیف سرعت فاز امواج رایلی استفاده شده است. تحلیل داده‌ها در نرم‌افزار دینور/ژئوپسی انجام شده است. برخی نتایج



(ب)

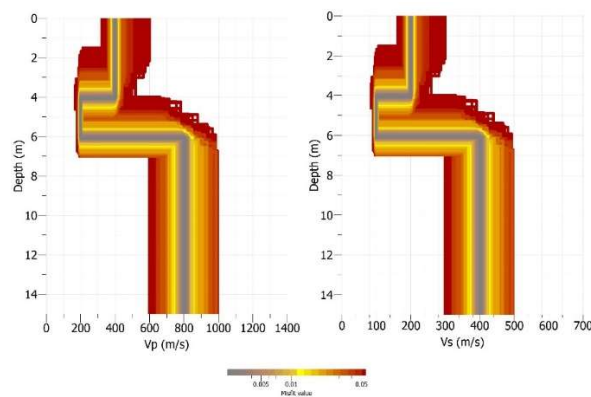


(الف)



(ج)

شکل ۸. نتایج مدل‌سازی خاک سه لایه. (الف) نحوه قرارگیری لایه‌ها (ب) طیف سرعت فاز امواج رایلی (ج) انطباق طیف سرعت فاز و منحنی‌های پراکندگی نظری امواج رایلی حاصل از نرم‌افزار پارک‌سایز.



شکل ۹. نتایج تحلیل برگردان (مقطع سرعت موج برشی و طولی).

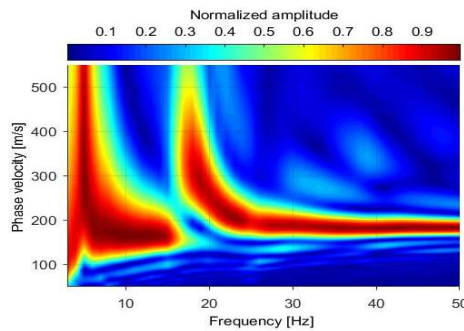
جدول ۴. مقایسه نتایج تحلیل برگردان و مقطع اصلی خاک.

پارامترها شماره لایه	عمق اصلی لایه (از تراز سطح زمین)	عمق حاصل از تحلیل برگردان	سرعت موج برشی اصلی لایه	سرعت موج برشی حاصل از تحلیل برگردان
لایه اول	۰-۴	۰-۴	۲۰۰	۱۵۰-۳۰۰
لایه دوم	۴-۶	۴-۷	۱۰۰	۱۰۰-۱۳۰
لایه سوم	۶-۱۴	۷-۱۴	۴۰۰	۳۰۰-۵۰۰

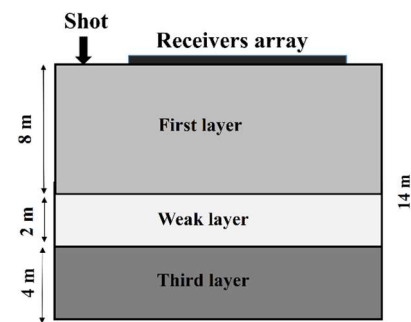
۳-۱-۳ لایه ضعیف در عمق ۸ متر

موقعیت قرارگیری لایه ضعیف در شکل ۸-الف نمایش داده شده است. در این قسمت لایه ضعیف زیر لایه اول و در ۸ متری از سطح زمین واقع است. طیف سرعت فاز امواج رایلی حاصل از مدل سازی و تحلیل داده ها در برنامه متلب در شکل ۱۰-الف نمایش داده شده است. مشاهده می شود که طیف سرعت فاز در محدوده فرکانسی ۱۷ هرتز دچار یک پرش و ناپیوستگی شده است. بدیهی است با افزایش عمق لایه ضعیف، پرش حاصل از تأثیر لایه

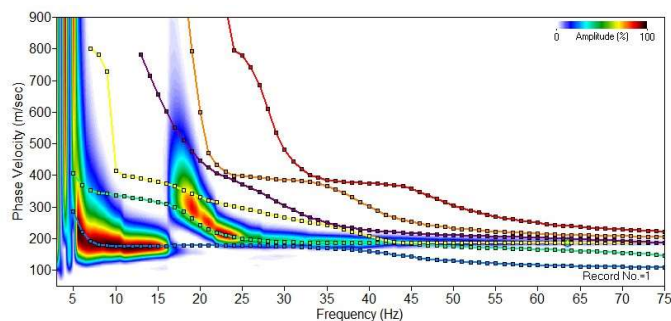
ضعیف، در فرکانس های پایین تری نسبت به موارد قبلی پدیدار شده است. در شکل ۱۰-ج منحنی های پراکندگی نظری امواج رایلی بر طیف سرعت فاز انطباق داده شده است. بر این اساس می توان رخداد پرش را در محدوده فرکانسی ۱۷ هرتز مشاهده کرد که نشان دهنده انرژی و دامنه زیاد مدهای بالاتر در محدوده فرکانس یاد شده است. بین طیف سرعت فاز حاصل از نرم افزار پارک سائز (شکل ۱۰-ج) و طیف سرعت فاز به دست آمده از کدهای متلب (شکل ۱۰-ب) همخوانی خوبی دیده می شود.



(ب)

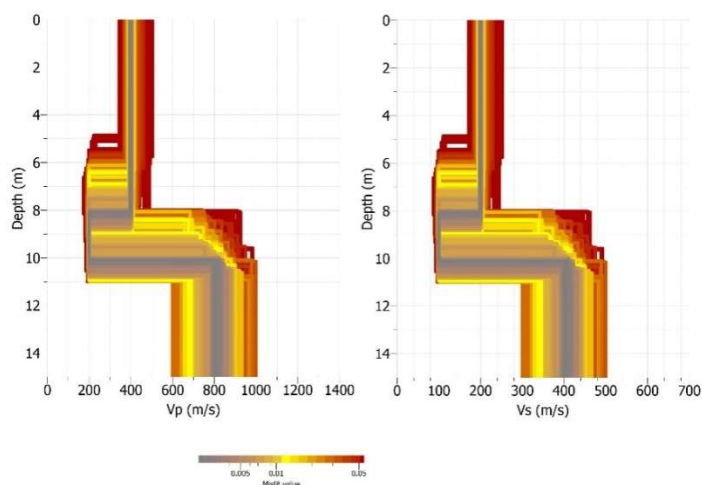


(الف)



(ج)

شکل ۱۰. نتایج مدل سازی خاک سه لایه. (الف) نحوه قرارگیری لایه ها (ب) طیف سرعت فاز امواج رایلی (ج) برازش طیف سرعت فاز و منحنی های پراکندگی نظری امواج رایلی حاصل از نرم افزار پارک سائز.



شکل ۱۱. نتایج تحلیل برگردان (مقطع سرعت موج برشی و طولی).

جدول ۵. مقایسه نتایج تحلیل برگردان و مقطع اصلی خاک.

پارامترها شماره لایه	عمق اصلی لایه (از تراز سطح زمین)	عمق حاصل از تحلیل برگردان	سرعت موج برشی اصلی لایه	سرعت موج برشی حاصل از تحلیل برگردان
لایه اول	۰-۸	۰-۸	۲۰۰	۱۸۰-۲۸۰
لایه دوم	۸-۱۰	۷-۱۱	۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰
لایه سوم	۱۰-۱۴	۱۱-۱۴	۴۰۰	۳۲۰-۵۲۰

برای سه مدل متفاوت با ضخامت ۲، ۴ و ۸ متر در نرم افزار آباکوس مدل سازی شده اند. مدل، سه لایه خاک دارد که مشخصات لایه های اول و سوم و همچنین لایه ضعیف در جدول ۲ ارائه شده است. گفتنی است مشخصات مدل سازی و نتایج لایه ضعیف به ضخامت ۲ متر، در واقع همان مشخصات لایه ضعیف در عمق ۲ متر است که در بخش قبلی در شکل ۶ و برگردان آن در شکل ۷ ارائه شده است.

### ۳-۲-۱ لایه ضعیف به ضخامت ۴ متر

در این قسمت ضخامت لایه ضعیف، ۴ متر فرض شده است. این لایه بین دو لایه با سختی بیشتر قرار گرفته است (شکل ۱۲-الف). در طیف سرعت فاز امواج رایلی (شکل ۱۲-ب)، دو پرش در محدوده های فرکانسی متفاوت رخ داده است. در شکل ۱۲-ج منحنی های پراکندگی نظری امواج رایلی بر طیف سرعت فاز انطباق داده شده است و می توان

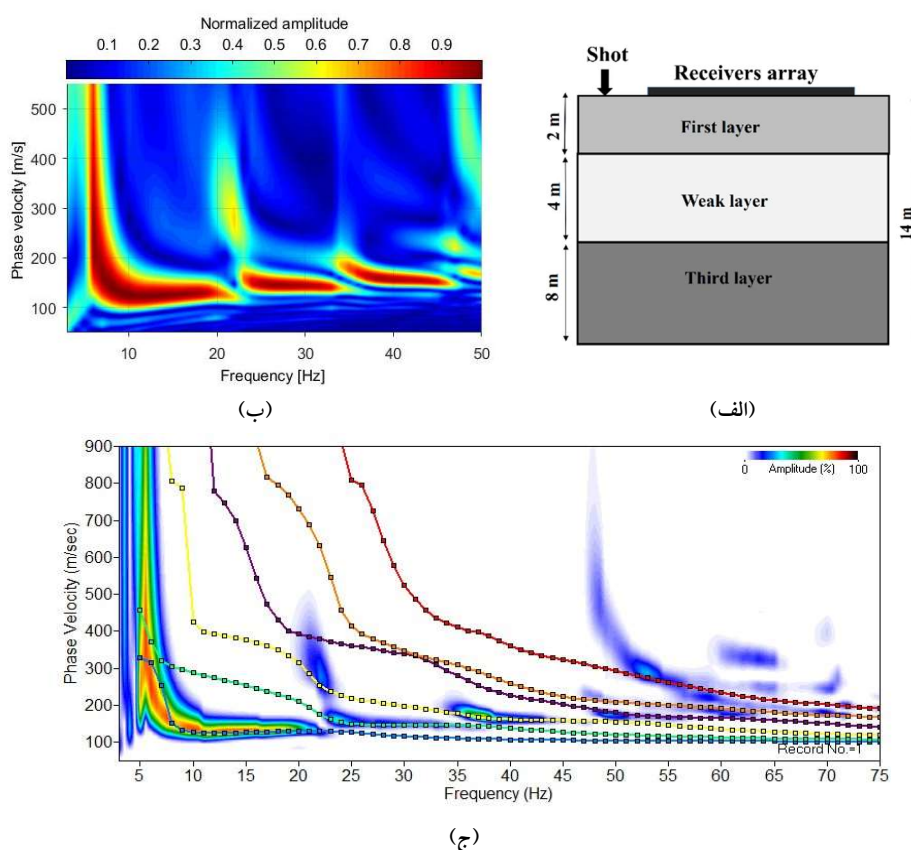
در ادامه، با استفاده از تحلیل برگردان، مقطع سرعت موج برشی و طولی در اعماق مختلف محاسبه شده است (شکل ۱۱). خطوط خاکستری رنگ نشان دهنده بیشترین دقت نتایج است. در شکل ۱۰-الف مقطع خاک به دست آمده همخوانی خوبی با مقطع اولیه خاک سه لایه دارد. در جدول ۵ نتایج تحلیل برگردان با مقطع اصلی خاک مقایسه شده است.

### ۳-۲ تحلیل تأثیر ضخامت لایه ضعیف

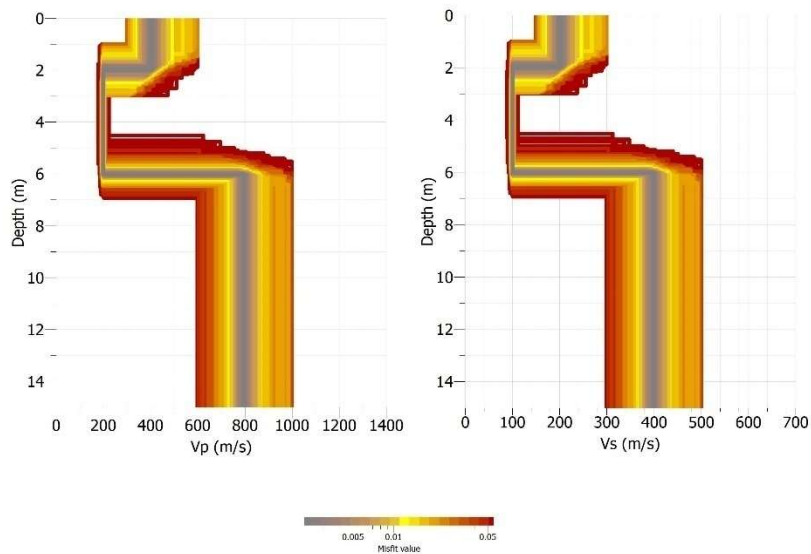
میزان ضخامت لایه ضعیف یکی از مهم ترین پارامترها در شناسایی ساختارهای زیرسطحی است و عاملی مهم و اثرگذار در میزان نشست های احتمالی لایه بندی خاک با سختی معکوس است. در این بخش به ارزیابی و مقایسه ضخامت های مختلف لایه ضعیف پرداخته شده است. این لایه ضعیف بین دو لایه سخت قرار دارد. لایه های ضعیف

(ب) همخوانی خوبی مشاهده می‌شود. برای تعیین موقعیت، ضخامت و سرعت لایه ضعیف از داده‌های طیف سرعت فاز امواج رایلی استفاده شده است. با استفاده از تحلیل برگردان، مقطع سرعت موج برشی و طولی در اعماق ترسیم شده است (شکل ۱۳). خطوط خاکستری‌رنگ نشان‌دهنده بیشترین دقت نتایج است. مقطع خاک به دست آمده همخوانی خوبی با مقطع اولیه خاک سه لایه دارد (شکل ۱۲-الف). در جدول ۶ نتایج تحلیل برگردان با مقطع اصلی خاک مقایسه شده است.

علت رخداد هر دو پرش را دقیقاً بر اساس مدهای ارائه شده مشاهده کرد. اولین پرش از مد اساسی به مد اول، در فرکانس ۲۴ هرتز و دومین پرش، در فرکانس نزدیک به ۳۵ هرتز از مد اول به مد دوم طیف سرعت فاز پدیدار شده است. محدوده‌های فرکانسی ۲۴ و ۳۵ هرتز نشان‌دهنده انرژی و دامنه بیشتر مدهای بالاتر در محدوده فرکانسی هستند که موجب می‌شود طیف سرعت فاز دچار پرش و حرکت از مد اساسی به مدهای بالاتر شود. بین طیف سرعت فاز حاصل از نرم‌افزار پارک‌سایز (شکل ۱۲-ج) و طیف سرعت فاز به دست آمده از کدهای متلب (شکل ۱۲-



شکل ۱۲. نتایج مدل‌سازی خاک سه لایه. (الف) نحوه قرارگیری لایه‌ها (ب) طیف سرعت فاز امواج رایلی (ج) انطباق طیف سرعت فاز و منحنی‌های پراکندگی نظری امواج رایلی حاصل از نرم‌افزار پارک‌سایز.



شکل ۱۳. نتایج تحلیل برگردان (مقطع سرعت موج برشی و طولی).

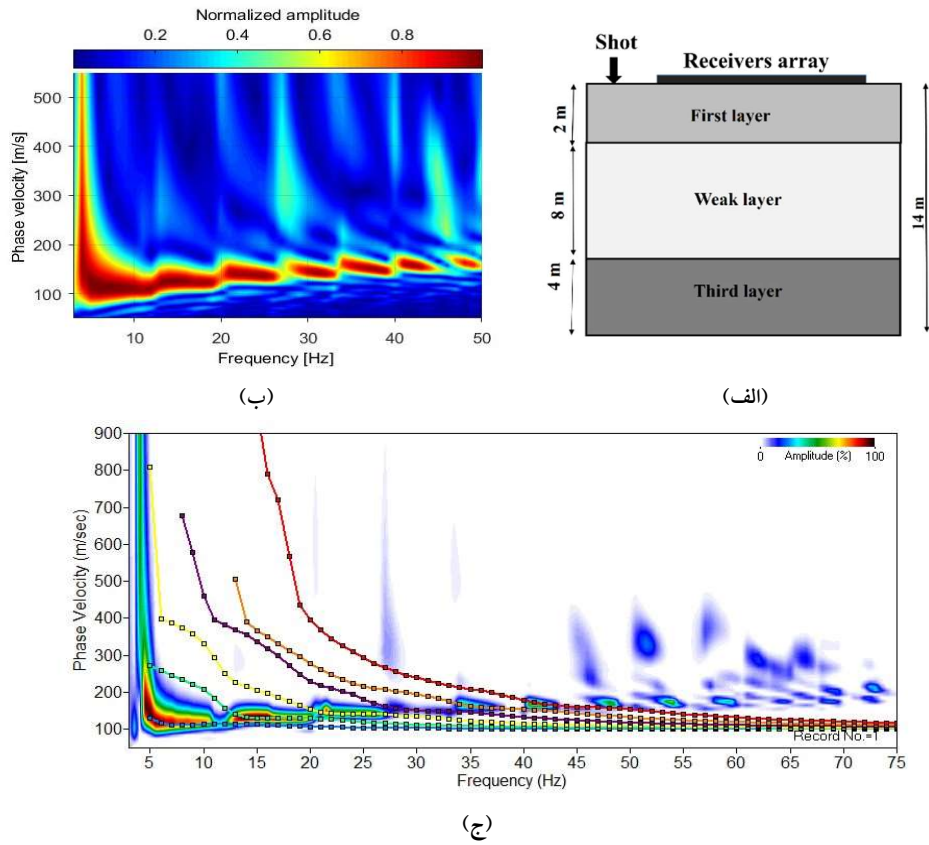
جدول ۶. مقایسه نتایج تحلیل برگردان و مقطع اصلی خاک.

پارامترها شماره لایه	عمق اصلی لایه (از تراز سطح زمین)	عمق حاصل از تحلیل برگردان	سرعت موج برشی اصلی لایه	سرعت موج برشی حاصل از تحلیل برگردان
لایه اول	۰-۲	۰-۳	۲۰۰	۱۰۰-۳۰۰
لایه دوم	۲-۶	۱-۷	۱۰۰	۹۰-۱۱۰
لایه سوم	۶-۱۴	۷-۱۴	۴۰۰	۳۰۰-۵۰۰

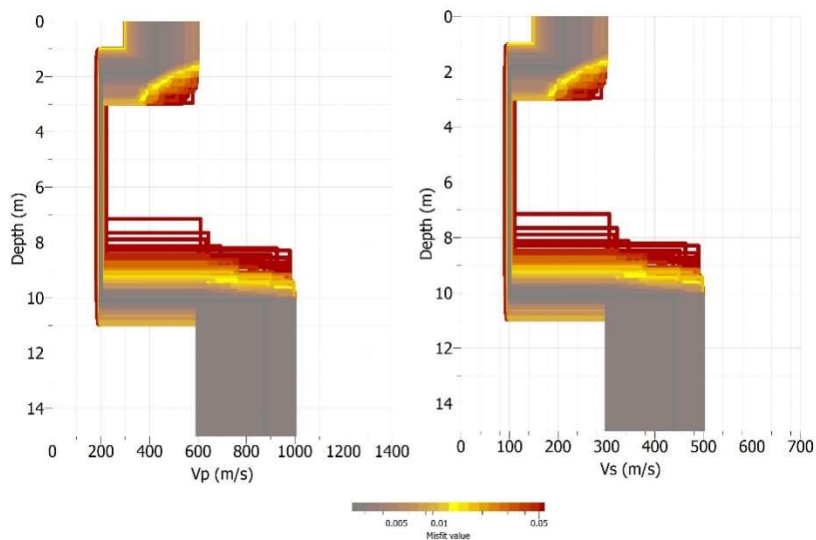
فرکانسی ذکر شده در مدهای بالاتر نسبت به مد قبلی، انرژی و دامنه بیشتری دارند که موجب می شود طیف سرعت فاز دچار پرش و حرکت بین مدها شود. بین طیف سرعت فاز حاصل از نرم افزار پارک سائیز (شکل ۱۴-ج) و طیف سرعت فاز به دست آمده از کدهای متلب (شکل ۱۴-ب) همخوانی خوبی مشاهده می شود. با استفاده از تحلیل برگردان، مقطع سرعت موج برشی و طولی در اعماق ترسیم شده است (شکل ۱۵). خطوط خاکستری رنگ نشان دهنده بیشترین دقت نتایج است. مقطع خاک به دست آمده همخوانی خوبی با مقطع اولیه خاک سه لایه دارد (شکل ۱۴-الف). در جدول ۷ نتایج تحلیل برگردان با مقطع اصلی خاک مقایسه شده است.

### ۳-۲-۲ لایه ضعیف به ضخامت ۸ متر

در این قسمت ضخامت لایه ضعیف ۸ متر فرض شده است (شکل ۱۴-الف). در طیف سرعت فاز (شکل ۱۴-ب) مشاهده می شود اولین پرش در فرکانس ۱۳ هرتز پدیدار شده است. در یک بازه فرکانسی مشخص (۰ تا ۴۵ هرتز) در طیف سرعت فاز شش پرش در فرکانسهای مختلف وجود دارد. در شکل ۱۴-ج منحنیهای پراکندگی نظری امواج رایلی بر طیف سرعت فاز انطباق داده شده است. بر این اساس به وضوح می توان پرشهای مختلفی را مشاهده کرد که بین مدهای مختلف جابه جا می شوند. پرشها در فرکانسهای ۱۳، ۲۱، ۲۷، ۳۴، ۴۰ و ۴۶ هرتز رخ داده اند و از مد اصلی به مدهای بالاتر حرکت کرده اند. محدودههای



شکل ۱۴. نتایج مدل‌سازی خاک سه لایه. (الف) نحوه قرارگیری لایه‌ها (ب) طیف سرعت فاز امواج رایلی (ج) انطباق طیف سرعت فاز و منحنی‌های پراکندگی نظری امواج رایلی حاصل از نرم‌افزار پارک‌سایز.



شکل ۱۵. نتایج تحلیل برگردان (مقطع سرعت موج برشی و طولی).



جدول ۷. مقایسه نتایج تحلیل برگردان و مقطع اصلی خاک.

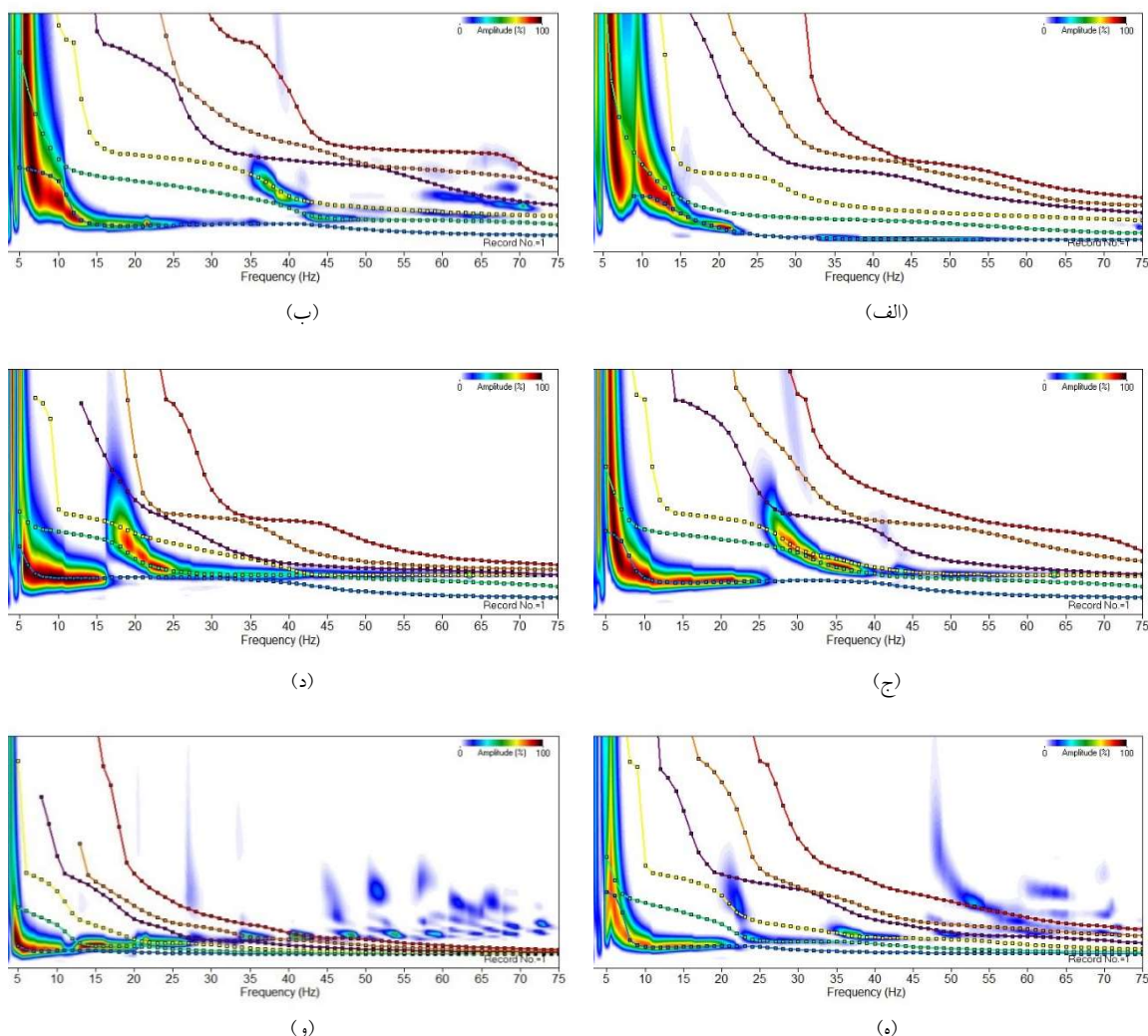
پارامترها شماره لایه	عمق اصلی لایه (از تراز سطح زمین)	عمق حاصل از تحلیل برگردان	سرعت موج برشی اصلی لایه	سرعت موج برشی حاصل از تحلیل برگردان
لایه اول	۰-۲	۰-۳	۲۰۰	۱۰۰-۳۰۰
لایه دوم	۲-۱۰	۱-۱۱	۱۰۰	۹۰-۱۱۰
لایه سوم	۱۰-۱۴	۱۱-۱۴	۴۰۰	۳۰۰-۵۰۰

### ۳-۳ ارزیابی نتایج

مشاهده کرد. به وضوح مشخص است که در فرکانس‌های مذکور به دلیل اینکه مدهای بالاتر از انرژی بیشتری برخوردار هستند، طیف سرعت فاز از مد اساسی به مدهای بالاتر انتقال یافته است، درحالی که در مدل خاک بدون لایه ضعیف، طیف سرعت فاز تنها روی مد اساسی قرار گرفته است و مدهای بالا تأثیرگذار نبوده‌اند (شکل ۱۶- الف). تأثیر ضخامت‌های لایه ضعیف به مقدار ۲، ۴ و ۸ متر به ترتیب در شکل‌های ۱۶- ب، ۱۶- ه و ۱۶- و نمایش داده شده است. تغییرات افزایش ضخامت لایه ضعیف در تعداد پرش‌ها و ناپیوستگی‌ها در فرکانس‌های مشخصی پدیدار شده است. اولین پرش در طیف سرعت برای لایه‌های ضعیف به ضخامت‌های ۲، ۴ و ۸ متر به ترتیب در فرکانس‌های ۳۷، ۲۳ و ۱۳ هرتز رخ داده است. همچنین تعداد پرش‌های بیشتری برای ضخامت ۸ متر نسبت به ۲ متر ایجاد شده است. این تعداد پرش برای لایه ضعیف به ضخامت ۸، ۴ و ۲ متر به ترتیب برابر با ۶، ۲ و ۱ است. شناسایی موقعیت پرش‌ها و جابه‌جایی آنها به مدهای بالاتر در شکل‌های ارائه شده نشان‌دهنده نوعی از بی‌هنجاری زیرسطحی است که با اعمال دقیق داده‌ها در تحلیل‌های گام بعد به خصوص تحلیل‌های برگردان، به نتایج مناسب‌تری منجر می‌شود که نمونه آن وجود لایه ضعیف در زیر سطح زمین است.

در این بخش نتایج تأثیر عمق و ضخامت لایه ضعیف بر طیف سرعت فاز و منحنی پراکندگی نظری امواج رایلی مقایسه و ارزیابی و با شرایط اولیه خاک نرمال یعنی بدون وجود لایه ضعیف مقایسه شده است. نتایج تأثیر عمق لایه ضعیف (در اعماق ۲، ۴ و ۸ متر) و تأثیر ضخامت لایه ضعیف (به ضخامت ۲، ۴ و ۸ متر) در شکل ۱۶ ارائه شده است.

جهت بررسی تأثیر پارامتر عمق قرارگیری لایه ضعیف، از مقایسه طیف‌های سرعت فاز در شکل ۱۶ می‌توان دریافت که هرچه عمق قرارگیری لایه ضعیف بیشتر شود، پرش و ناپیوستگی در فرکانس‌های پایین‌تری از طیف سرعت امواج رایلی ایجاد می‌شود. با در نظر گرفتن شرایط اولیه خاک بدون وجود لایه ضعیف در شکل ۱۶- الف، مشاهده می‌شود به علت وجود لایه‌های ضعیف در اعماق ۲، ۴ و ۸ متر، به ترتیب پرش‌هایی در فرکانس‌های ۳۷، ۲۷ و ۱۷ هرتز در طیف سرعت پدیدار شده است (شکل‌های ۱۶- ب، ۱۶- ج و ۱۶- د) که این تغییرات کاهش فرکانس به رابطه بین فرکانس و عمق مدفون لایه ضعیف (طول موج) بازمی‌گردد. هرچه عمق مدفون لایه ضعیف بیشتر باشد، تأثیرش در فرکانس‌های پایین‌تر طیف سرعت پدیدار می‌شود و چنانچه لایه ضعیف در اعماق سطحی قرار گیرد، تأثیرش را بر فرکانس‌های بالاتر طیف سرعت فاز می‌توان



شکل ۱۶. انطباق طیف سرعت فاز و منحنی پراکندگی نظری امواج رایلی برای مدل خاک سه لایه در حالت (الف) نرمال و بدون لایه ضعیف (ب) وجود لایه ضعیف در عمق ۲ متر (ج) وجود لایه ضعیف در عمق ۴ متر (د) وجود لایه ضعیف در عمق ۸ متر (ه) وجود لایه ضعیف با ضخامت ۴ متر (و) وجود لایه ضعیف با ضخامت ۸ متر.

#### ۴ نتیجه‌گیری

امروزه امواج سطحی به دلیل خاصیت پراکندگی که دارند، به جهت شناسایی بی‌هنگاری‌های زیرسطحی و همچنین تعیین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک کاربرد فراوانی دارند. در این مقاله با بهره‌گیری از مدل‌سازی‌های مختلف در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس و پردازش داده‌ها در محیط نرم‌افزار متلب و به روش تحلیل امواج سطحی، به ارزیابی تأثیر ضخامت و عمق لایه‌های ضعیف در میان دو

لایه سخت پرداخته شده و موقعیت و دلایل رخداد پرش‌های متفاوت در تصاویر انطباقی طیف سرعت فاز و منحنی پراکندگی نظری امواج رایلی بررسی شده است. گفتنی است نتایج ارائه شده در این مقاله از جمله طیف سرعت فاز و منحنی‌های نظری پراکندگی امواج رایلی که از کدنویسی در متلب حاصل شده‌اند، با نتایج نرم‌افزارهای علمی و تجاری روز دنیا مانند MASWaves و پارک‌سایز ارزیابی و صحت‌سنجی شده است.

## منابع

رهنما، ح.، احسانی نژاد، ل.، ۱۳۹۶، شناسایی حفره‌های سطحی زمین با استفاده از روش انتقال توأم زمان فرکانس موج سطحی منکسر شده: کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، تهران، ایران.

رهنما، ح.، دشتی، ف.، ۱۳۹۵، بررسی پارامترهای مؤثر بر وضوح منحنی پراکندگی امواج سطحی در شناسایی لایه‌بندی زمین: دومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، تهران، ایران.

رهنما، ح.، راسخ، م.، میراثی، س.، ۱۴۰۱، ارزیابی تأثیر طول حفره زیرسطحی بر انتشار امواج رایلی جهت شناسایی مرز دور و نزدیک حفره: مهندسی سازه و ساخت، ۹(۶)،

doi:10.22065/jsce.2021.299727.2530

میراثی، س.، رهنما، ح.، ۱۳۹۹ الف، ارزیابی تأثیر پارامترهای برداشت در وضوح تصاویر پراکنش در روش تحلیل چندایستگاهی امواج سطحی: مهندسی عمران، ۳۶/۲(۴/۱)، ۳-۱۳،

doi:10.24200/j30.2019.53491.2551

میراثی، س.، رهنما، ح.، ۱۳۹۹ ب، بهبود عملکرد لایه‌های جاذب با میرایی افزایشی در مدل‌سازی عددی انتشار امواج سطحی به روش اجزاء محدود: مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۱۳(۲)، ۱۳-۲۶.

میراثی، س.، ۱۳۹۸، شناسایی فرونشست و فروچاله در زمین با استفاده از روش چندایستگاهی امواج لرزه‌ای: پایان نامه دکتری ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی شیراز.

هاشمی جوکار، م.، رهنما، ح.، بغلانی، ع.، ۱۴۰۰، ارزیابی و تخمین ضخامت لایه‌های خاک با استفاده از تحلیل چندایستگاهی امواج سطحی و منحنی پراکندگی امواج سطحی: مهندسی سازه و ساخت، ۸(۴)، ۲۶۷-۲۸۲.

وجود یک لایه ضعیف در میان لایه‌بندی خاک باعث ایجاد اغتشاش در فضای سرعت و فرکانس می‌شود. این اغتشاش باعث تغییر تراز انرژی داده‌ها (مدهای ارتعاشی) در محدوده فرکانسی خاص می‌شود و تأثیر خود را به صورت ناپیوستگی و پرش در منحنی پراکندگی نمایان می‌کند. ارزیابی نتایج نشان داد با افزایش عمق قرارگیری لایه ضعیف، پرش در طیف پراکندگی از فرکانس‌های بالا به سمت فرکانس‌های پایین حرکت می‌کند و این نتیجه همخوانی خوبی با این مطلب دارد که نتایج طیف پراکندگی در فرکانس‌های بالا مربوط به لایه‌های سطحی و نتایج طیف پراکندگی در فرکانس‌های پایین مربوط به لایه‌های عمیق است. مطابق نتایج، در اثر وجود لایه ضعیف در اعماق ۲، ۴ و ۸ متر به ترتیب پرش‌هایی در فرکانس‌های ۳۷، ۲۷ و ۱۷ هرتر در طیف سرعت فاز پدیدار شده است که کمترین فرکانس پرش مربوط به عمیق‌ترین لایه ضعیف است. همچنین تعداد پرش برای لایه ضعیف به ضخامت ۸، ۴ و ۲ متر به ترتیب برابر با ۶، ۲ و ۱ است که نشان از تعداد پرش‌های بیشتری برای ضخامت ۸ متر نسبت به ۲ متر است. با دقت در این نتایج می‌توان اظهار داشت با افزایش ضخامت لایه ضعیف، دو نوع تغییر در طیف سرعت امواج رایلی ایجاد شده است. اولین تغییر در تعداد پرش‌ها و دومین تغییر، فرکانس‌هایی است که این‌گونه پرش‌ها در آنها مشاهده شده است. علاوه بر آن، موقعیت رخداد پرش‌ها در طیف سرعت فاز با حرکت انرژی از مد اساسی به مدهای بالاتر تطابق دارد که ناشی از انرژی و دامنه بیشتر مدهای بالا در محدوده‌های فرکانسی خاص است. شناسایی دقیق این تغییرات در طیف سرعت و تطبیق آن با منحنی‌های نظری موجب افزایش دقت محاسبات در تحلیل‌های برگردان می‌شود. در واقع در نظر گرفتن داده‌های مربوط به پرش در طیف سرعت فاز و اعمال آنها موجب پدیدار شدن لایه ضعیف در مقاطع خاک به دست آمده از تحلیل‌های برگردان می‌شود.

- Abaqus, v6.14, S., 2014, Abaqus Analysis User's Guide: Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, www.simulia.com, 2014.
- Aminedjad, B., and 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 non-destructive geophysical imaging technology, unpublished report.
- Atkinson, J. H., 2000, Non-linear soil stiffness in routine design: *Géotechnique*, **50**(5), 487–508.
- Castaigns, M., Bacon, C., Hosten, B., and 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.
- Catalina Orozco, M., 2003, Inversion method for Spectral Analysis of Surface Wave (SASW): Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology.
- Chai, H. Y., Phoon, K. K., Goh, S. H., and 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.
- chwenk, J. T., Sloan, S. D., Ivanov, J., and Miller, R. D., 2016, Surface-wave methods for anomaly detection: *Geophysics*, **81**(4), EN29–EN42.
- Coduto, D. P., 2015, *Foundation Design: Principles and Practices*: Pearson, (Second edition), Prentice Hall, Inc.
- Davoodi, M., Pourdeilami, A., Jahankhah, H., and 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.
- Drozd, M. B., 2008, Efficient finite element modelling of ultrasound waves in elastic media: □Doctoral dissertation, Imperial College London.
- Hesse, D., and Cawley, P., 2006, Surface wave modes in rails: *The Journal of the Acoustical Society of America*, **120**(2), 733–740.
- Ivanov, J., Miller, R. D., Park, C. B., and Ryden, N., 2003, Seismic search for underground anomalies: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1223–1226.
- Lin, S., and Ashlock, J. C., 2014, Multimode Rayleigh wave profiling by hybrid surface and borehole methods: *Geophysical Journal International*, **197**(2), 1184–1195.
- Luo, W., and 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.
- Mirassi, S., Rahnema, H., Eshaghi, A., 2020, Evaluation of surface wave components for identification of subsurface cavities using 2D and 3D finite element modeling method: *Journal of Research on Applied Geophysics*, **6**(2), 219–233, magiran.com/p2199518.
- Mirassi, S., and Rahnema, H., 2020, Deep cavity detection using propagation of seismic waves in homogenous half-space and layered soil media: *Asian Journal of Civil Engineering*, **21**, 1431–1441, <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00288-2>.
- Moss, R. E. S., 2008, Quantifying measurement uncertainty of thirty-meter shear-wave velocity: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**(3), 1399–1411.
- Nazarian, S., Stokoe II, K. H., and Hudson, W. R., 1983, Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems: *Transportation Research Record No. 930*.
- Olsson, D., 2012, Numerical simulations of energy absorbing boundaries for elastic wave propagation in thick concrete structures subjected to impact loading: MSc. thesis, Umeå University.
- Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., 1996, Multi-channel analysis of surface waves using Vibroseis (MASWV): *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, Society of Exploration Geophysicists, 68–71.
- Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface waves: *Geophysics*, **64**(3), 800–808.
- Rahnema, H., and Mirasi, S., 2012, Seismic and geotechnical study of land subsidence and vulnerability of rural buildings: *International Journal of Geosciences*, **3**(04), 878.
- Rahnema, H., and Mirassi, S., 2016, Study of land subsidence around the city of Shiraz: *Scientia Iranica, Transaction A, Civil Engineering*, **23**(3), 882.
- Rahnema, H., Ehsaninezhad, L., Dashti, F., and Talebi, G., 2020, Detection of subterranean cavities and anomalies using multichannel analysis of surface wave: *Geomechanics and Geoengineering*, **17**(1), 206–219.
- Rahnema, H., Mirassi, S., and Dal Moro, G., 2021,

- Cavity effect on Rayleigh wave dispersion and P-wave refraction: *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **20**(1), 79-88.
- Rajagopal, P., Drozd, M., Skelton, E. A., Lowe, M. J., and 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.
- Roy, N., and Jakka, R. S., 2017, Near-field effects on site characterization using MASW technique: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **97**, 289-303.
- Song, X., and Gu, H., 2007, Utilization of multimode surface wave dispersion for characterizing roadbed structure: *Journal of Applied Geophysics*, **63**(2), 59-67.
- Schmelzbach, C., Jordi, C., Sollberger, D., Doetsch, J., Kaufmann, M., Meijer, W. Y. and Horstmeyer, H., 2015, Understanding the impact of karst on seismic wave propagation-a multi-method geophysical study: 77th EAGE Conference and Exhibition-Workshops, **2015**(1), 1-5. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Wathelet, M., Bard, P. Y., Chatelain, J. L., et al., 2010, Geopsy on-line documentation, available at <http://www.geopsy.org/wiki> (last accessed October 2019).
- Yoon, S. and Rix, G. J., 2009, Near-field effects on array-based surface wave methods with active sources: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(3), 399-406.

## Detecting the depth and thickness of weak layer in soil media using phase velocity spectrum and theoretical dispersion curve of rayleigh wave

Mohammad Mahdi Moradi<sup>1</sup>, Hosein Rahnema<sup>2</sup> and Sohrab Mirasi<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> M. Sc. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

(Received: 04 January 2022, Accepted: 20 April 2022)

### Summary

The presence of subsurface anomalies such as cavities, sinkholes, weak subsurface layers, faults, or tunnels that are man-made or natural can pose serious risks to the environment or engineering project. One of the anomalies is weak or loose layer between two hard layers which increases the settlement potential, so detecting the subsurface anomalies such as void and weak layer at different depths and thicknesses plays an important role in engineering designs. In this paper, the multi-channel analysis of surface waves (MASW) is used. It is fast and comfortable among the various methods for identifying subsurface anomalies. In this regards, the effect of weak layer between hard soil layers is evaluated by using the finite element method in Abaqus and MATLAB software. The effect of depth and thickness of weak layer on the phase velocity spectrum and theoretical dispersion curve of Rayleigh (R) wave is compared. Different thicknesses (2, 4 & 8 meters) and depths (2, 4 & 8 meters) for weak layers are considered. In the following, the output results of each simulation are processed in MATLAB software by using the MASW method.

The results showed that the presence of jumps in phase velocity spectrum in high and low frequencies are related to the existence of weak layer. The location of the jump is moved to the low frequencies of the phase velocity spectrum and also shifted to higher modes of theoretical dispersion curve of R-wave due to the increasing depth of weak layer. For example, the jumps are accrued at the frequencies of 37, 27 and 17 Hz in the phase velocity spectrum due to the presence of the weak layer at depths of 2, 4 and 8 meters, respectively. This event is caused by the more energy of the higher modes at special frequencies related to the depth of the weak layer. By increasing the thickness of the weak layer, the number of jumps is increased in the phase velocity spectrum and the phase velocity spectrum is shifted from fundamental mode to the first, second and other modes at the location of each jump. The number of jumps for a weak layer with a thickness of 8, 4 and 2 meters is equal to 6, 2 and 1, respectively, which indicates a higher number of jumps for a thickness of 8 meters. Considering these changes in inversion analysis gives rise to more acceptable S and P wave velocity profiles.

**Keywords:** MASW, phase velocity spectrum, weak layer depth, higher mode, Rayleigh waves, jump

---

\*Corresponding author:

sohrab.mirasi@yahoo.com