

تخمین سرعت میانگین موج برشی V_{sz} و تراکمی V_{pz} با استفاده از رابطه طول موج - عمق حاصل از تحلیل امواج سطحی

ساسان قوامی^۱ و حمیدرضا سیاه‌کوهی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۹/۵/۷، پذیرش نهایی: ۹۹/۱۱/۵)

چکیده

سرعت موج برشی (V_s) در پروژه‌های مهندسی (همچون عمران، ژئوتکنیک و ژئوفیزیک) برای تعیین پارامترهای دینامیکی خاک و طبقه‌بندی آن استفاده می‌شود. میانگین سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر (V_{s30}) در ژئوتکنیک برای ارزیابی روانگرایی خاک و در مهندسی زلزله برای تعیین پیروید خاک، ضریب بزرگ‌نمایی ساختمان و تعیین کاهندگی کاربرد دارد. معمولاً سرعت میانگین موج برشی از مدل سرعت موج برشی حاصل از وارون منحنی پاشش، لرزه درون‌چاهی یا شکست مرزی به دست می‌آید. متأسفانه وارون‌سازی منحنی پاشش برای تخمین سرعت موج برشی بخش زمان بر فرایند تحلیل امواج سطحی است. در این مطالعه با ارائه روشی بدون نیاز به وارون منحنی‌های پاشش، نه تنها سرعت میانگین موج برشی (V_{sz}) بلکه سرعت میانگین موج تراکمی (V_{pz}) را به‌طور مستقیم از منحنی‌های پاشش، تا عمق نفوذ موج سطحی، تخمین می‌زنیم. برای این منظور نیازمند رابطه‌ای بین طول موج‌های مختلف موج سطحی و عمق‌های بررسی آنها هستیم. برآورد این رابطه نیاز به مدل سرعت موج برشی (مرجع) در منطقه مورد مطالعه دارد که می‌تواند از داده‌های چاه، پروفیل شکست مرزی یا از وارون منحنی پاشش به دست آید. با توجه به وابستگی مقادیر (V_{sz}) و حساسیت رابطه برآوردشده به نسبت پواسون در ادامه ضمن برآورد نسبت پواسون، پروفیل سرعت میانگین موج تراکمی تا عمق Z (V_{pz}) از پروفیل (V_{sz}) تخمین زده می‌شود. نتایج اعمال روش روی داده‌های لرزه‌ای واقعی و مصنوعی نشان داد که می‌توان سرعت میانگین موج برشی و تراکمی را با عدم قطعیت کمتر از ۱۰ درصد در ساختگاه‌هایی با تغییرات جانبی خیلی زیاد تخمین زد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز امواج سطحی، منحنی پاشش، رابطه طول موج-عمق، سرعت میانگین موج برشی، سرعت میانگین موج تراکمی.

۱. مقدمه

است، و در این راستا سرعت موج برشی لایه‌های نزدیک به سطح زمین (لایه‌های کم‌عمق خاک) یک پارامتر کلیدی است. تحلیل امواج سطحی روشی کارآمد برای تخمین مدل سرعت موج برشی در لایه‌های نزدیک به سطح زمین است و این مدل‌ها در حوزه‌های مختلف کاربردهای گسترده‌ای دارند (سوکو و همکاران، ۲۰۱۰). سرعت موج برشی (V_s) به‌عنوان یک پارامتر اساسی برای ارزیابی خواص دینامیکی خاک شناخته شده است. این پارامتر یکی از ویژگی‌های مهم در مهندسی خاک و سنگ است، زیرا رفتار آنها به شدت به مقاومت برشی‌شان بستگی دارد و همچنین در ژئوتکنیک نیز برای ارزیابی روانگرایی خاک به کار می‌رود. معمولاً از سرعت میانگین موج برشی تا عمق ۳۰ متر (V_{s30}) برای طبقه‌بندی لرزه‌ای

همه ساله زمین لرزه‌ها در سراسر جهان علاوه بر هزارها کشته و زخمی، آسیب به زیرساخت‌های ملی و محلی را نیز در پی دارند. بیشتر شهرها و مناطق پر جمعیت بر روی رسوبات نرم قرار دارند که مستعد تقویت امواج لرزه‌ای است (مورفی و شاه، ۱۹۸۸؛ برد، ۱۹۹۴). این پدیده معمولاً اثر ساختگاه یا بزرگ‌نمایی ساختگاه نامیده می‌شود، و بیانگر ارتباط دامنه موج لرزه‌ای و به تبع آن میزان تخریب با خصوصیات محلی خاک است. در نتیجه کاهش خطر زمین‌لرزه نیازمند مطالعه و بررسی خصوصیات کشسانی خاک ساختگاه‌ها است.

به دست آوردن خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های زیر ساختگاه‌ها در پروژه‌های مختلف مهندسی اعم از پروژه‌های عمرانی، ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی ضروری

ساختگاه‌ها (آیین‌نامه‌های استاندارد ۲۸۰۰ ایران، ۱۳۸۴ و BSSC، ۱۹۹۴) و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله استفاده می‌شود. استفاده‌های دیگر سرعت میانگین موج برشی در تعیین پیروید خاک (دابری و همکاران، ۲۰۰۰) به‌دست آوردن ضریب بزرگ‌نمایی ساختگاه (کرامر، ۱۹۹۶؛ کنو و کاتاوکا، ۲۰۰۰) و همچنین به‌دست آوردن قوانین تضعیف برای پیش‌بینی پارامترهای جنبش زمین در مطالعات خطر لرزه‌ای است (پاور و همکاران، ۲۰۰۸). سرعت میانگین موج برشی در تصحیح استاتیک امواج لرزه‌ای نیز کاربرد دارد (سوکو و همکاران، ۲۰۱۵). علاوه بر موارد فوق، در این مطالعه از سرعت میانگین موج برشی به‌دست آمده برای تخمین مدل سرعت موج تراکمی (V_p) و نسبت پواسون نیز استفاده می‌شود.

روش‌های امواج سطحی در کنار دیگر روش‌های مختلف درون‌چاهی (روش‌های تهاجمی) مانند پایین‌چاهی، بالاچاهی، بین‌چاهی (شرر، ۱۹۹۹) و سطحی (غیرتهاجمی) مانند برداشت‌های بازتابی یا انکساری برای به‌دست آوردن سرعت میانگین موج برشی استفاده می‌شوند (مولارگیا و کاستلارو، ۲۰۰۹). روش‌های امواج سطحی به‌طور گسترده دو دسته هستند. روش‌های فعال مانند روش آنالیز طیفی امواج سطحی (نازاریان و استوکو، ۱۹۸۴) و آنالیز چندکاناله امواج سطحی (پارک و همکاران، ۱۹۹۹)، که شامل یک چشمه لرزه‌ای فعال و گسترشی خطی از گیرنده‌ها برای ثبت ارتعاشات زمین، و روش‌های غیرفعال مانند ثبت نوفه‌های لرزه‌ای زمینه (خردلرزه‌ها) با استفاده از آرایه دوبعدی از گیرنده‌ها است (اودا و همکاران، ۲۰۱۹؛ یاماناکا و همکاران، ۲۰۱۹؛ اوکادا، ۲۰۰۳). روش‌های تهاجمی عموماً دقیق‌تر هستند، اما روش‌های امواج سطحی به‌طور گسترده‌تری برای برآورد سرعت میانگین موج برشی استفاده می‌شوند، زیرا در مقایسه با روش‌های تهاجمی کم‌هزینه و از لحاظ زمان به‌صرفه هستند و همچنین از محدودیت‌هایی که روش‌های انکساری از آن رنج می‌برند (وجود لایه‌های کم‌سرعت یا لایه‌های پنهان) به دور است.

روش‌های آنالیز امواج سطحی براساس پاشش امواج سطحی منتشر شده در یک محیط ناهمگن است. امواج سطحی در امتداد سطح زمین حرکت می‌کنند. در محیط‌های دارای لایه‌بندی، امواج سطحی پاششی هستند؛ یعنی سرعت انتشار هر مؤلفه فرکانسی متفاوت است، این ویژگی به نوبه خود عمق نفوذ امواج سطحی را در زمین نیز کنترل می‌کند (آکی و ریچاردز، ۲۰۰۲). در روش‌های تحلیل امواج سطحی همین خاصیت پاششی است که برای استخراج مدل سرعت موج برشی طی یک فرایند وارون‌سازی استفاده می‌شود (اولافسدوتیر و همکاران، ۲۰۱۸؛ وادلت و همکاران، ۲۰۰۴؛ استروویا، ۲۰۰۳). منحنی پاشش تجربی از داده‌های ثبت شده با روش‌های مختلفی به‌دست می‌آید (اولافسدوتیر و همکاران، ۲۰۱۸؛ لی و همکاران، ۲۰۱۶؛ سردیوکوف و همکاران، ۲۰۱۹؛ هایاشی و همکاران، ۲۰۱۵؛ پارک و همکاران، ۱۹۹۹؛ ایکدا و همکاران، ۲۰۲۰؛ اوکادا، ۲۰۰۳). ذکر این نکته مهم است که روش‌های تحلیل موج سطحی با استفاده از چشمه‌های طبیعی عمدتاً به‌دلیل بازه فرکانسی پایین سیگنال‌ها، عمق نفوذ بیشتری دارند؛ لذا لازم است در کنار روش‌های مبتنی بر چشمه‌های مصنوعی برای تکمیل عمق نفوذ از آنها استفاده شود (گوویا و همکاران، ۲۰۱۹).

در همه روش‌های تحلیل موج سطحی، مدل به‌دست آمده برای سرعت موج برشی کاملاً یک بعدی است و معمولاً به وسط پروفیل نسبت داده می‌شود؛ این بدان معنی است که در صورت وجود تغییرات جانبی، این روش‌ها مناسب نیستند و علاوه بر آن وارون امواج سطحی قویاً غیرخطی، بدو وضع و آمیخته معین (Mixdetermined) بوده و جواب نایکتایی دارد (سوکو و همکاران، ۲۰۱۰). بنابراین برای نمایش تغییرات جانبی سرعت موج برشی لازم است که در طول چندین پروفیل لرزه‌ای تعداد زیادی منحنی پاشش را در اختیار داشت و برای هر کدام از این منحنی‌های پاشش به‌طور جداگانه مسئله وارون را حل کرد که خود این مسئله باعث زمان‌بر بودن و عدم قطعیت بیشتر می‌شود. همچنین در تحلیل امواج سطحی اغلب به‌علت حساسیت

بین سرعت موج سطحی و سرعت موج برشی در یک محیط همگن) به سرعت موج برشی تبدیل کرد. آنها ثابت کرده‌اند که بین سرعت فاز در یک طول موج مشخص و سرعت میانگین موج برشی در یک عمق مشخص ارتباط قوی وجود دارد، که از این روابط می‌توان برای تبدیل مستقیم منحنی پاشش تجربی به یک مدل سرعت موج برشی استفاده کرد. لونگ و اونگ (۲۰۱۲) یک روش سرعت میانگین وزن‌دار را برای ارتباط سرعت میانگین موج برشی و سرعت فاز موج ریلی (منحنی پاشش) به کار بردند. رویکرد آنها مبنی بر ارزیابی سهم لایه‌های مختلف برای سرعت انتشار در یک طول موج خاص است که فاکتورهای وزن‌دار برای هر طول موج منتشر شده به‌عنوان تابعی از ضخامت لایه تعیین می‌شود. هانی و تسای (۲۰۱۵) یک رابطه دیکس گونه (Dix-type) را پیشنهاد دادند تا به‌طور مستقیم مقطع عمقی را از منحنی پاشش به‌دست آورند. رویکرد آنها مبتنی بر یک فرض ساده است که هر مؤلفه فرکانسی در یک نیم‌فضای همگن انتشار می‌یابد و سرعت‌های فاز توسط تقریب مرتبه‌اول ویژه تابعی از یک پروفیل سرعت ناهمگن محاسبه می‌شوند. همچنین برای به‌دست آوردن سرعت موج تراکمی (و نسبت پواسون) نیز مطالعات بسیاری صورت گرفته است. از آنجا که حساسیت منحنی پاشش امواج سطحی به موج تراکمی بسیار کم است از این رو وارون منحنی پاشش به‌تنهایی برای تخمین سرعت موج تراکمی قابل‌اعتماد نیست (شیا و همکاران، ۲۰۰۳). به‌همین دلیل در فرایند استاندارد وارون امواج سطحی، مقدار سرعت موج تراکمی (و نسبت پواسون) برای یک مدل زمین لایه‌ای به‌صورت یک فرض اولیه در نظر گرفته می‌شود و تنها سرعت موج برشی و ضخامت لایه‌ها تخمین زده می‌شود. با این وجود چندین تلاش برای تخمین مدل‌های سرعت موج تراکمی در لایه‌های نزدیک به سطح زمین، از منحنی‌های پاشش امواج سطحی انجام شده است که به‌طور خاص نقش مدهای بالاتر برای بهبود حساسیت وارون به سرعت موج تراکمی مورد بررسی قرار گرفته

کم منحنی پاشش به سرعت موج تراکمی، فقط سرعت موج برشی و ضخامت لایه‌ها در فرایند وارون به‌عنوان متغیر ناشناخته در نظر گرفته می‌شود و مقدار سرعت موج تراکمی (یا نسبت پواسون) بر اساس اطلاعات اولیه، فرض می‌شود. به‌همین خاطر تحلیل امواج سطحی از طریق فرایند وارون منحنی پاشش برای تخمین سرعت موج تراکمی مرسوم نیست.

ما در این مقاله برخلاف روش‌های مرسوم که سرعت میانگین موج برشی را تا عمق دلخواه از مدل‌های سرعت موج برشی حاصل از وارون منحنی پاشش، به‌دست می‌آورند؛ با استفاده از رابطه‌ای بین طول موج امواج سطحی و عمق نفوذ آنها که از یک مدل سرعت مرجع در طول پروفیل تعیین می‌شود، بدون نیاز به انجام فرایند وارون، به‌طور مستقیم سرعت میانگین موج برشی را از منحنی‌های پاشش تجربی در طول پروفیل تخمین می‌زنیم. علاوه بر این، به‌دلیل وابسته بودن رابطه طول موج-عمق تخمین زده شده به نسبت پواسون، در این مطالعه از این وابستگی استفاده کرده و از آن برای تخمین پروفیل سرعت میانگین موج تراکمی (V_{pz}) نیز استفاده می‌شود. ایده این مطالعه از کار سوکو و همکاران (۲۰۱۵)، کامینا و همکاران (۲۰۱۱) و بران و همکاران (۲۰۰۰) اقتباس شده است.

۲. تئوری

اکثر کارهای انجام شده برای به‌دست آوردن سرعت میانگین موج برشی و تراکمی، به این نحو بوده است که توسط روش‌های مختلف ژئوفیزیکی (روش‌های تهاجمی و غیرتهاجمی)، ابتدا پروفیل سرعت موج برشی را تخمین می‌زنند و سپس سرعت میانگین موج برشی را توسط فرمول (۱) به‌طور مستقیم از روی این پروفیل به‌دست می‌آورند. در مطالعات پیشین (بران و همکاران، ۲۰۰۰؛ کامینا و همکاران، ۲۰۱۱) نشان داده‌اند که می‌توان سرعت فاز مربوط به یک طول موج خاص از موج سطحی را به‌طور مستقیم با ضرب کردن آن در یک فاکتوری (نسبت

سرعت میانگین موج برشی (V_{sz}) تبدیل می‌کنیم. اکنون با در دست داشتن این دو منحنی، یعنی منحنی پاشش مدل مرجع (که نشانگر سرعت فاز بر حسب طول موج است) و سرعت میانگین موج برشی مرجع (که بیانگر سرعت میانگین V_s بر حسب عمق است)، می‌توان برای هر مقدار سرعت میانگین موج برشی دلخواه که آن را برابر سرعت با فاز می‌گیریم ($V_{sz} = V_{ph}$)، عمق (Z) و طول موج (λ) متناظرشان را از این دو منحنی به دست می‌آوریم. این عمل را برای مقادیر دیگر سرعت تکرار می‌کنیم تا برای هر سرعت جفت مقدار طول موج-عمق را به دست آوریم. جفت طول موج-عمق‌های به دست آمده را توسط یک برازش چند جمله‌ای تکه‌ای (Polynomial Piecewise) درون‌یابی می‌کنیم تا یک رابطه کلی طول موج بر حسب عمق به دست آوریم. این رابطه‌ای طول موج-عمق به دست آمده را به عنوان رابطه مرجع برای منطقه مورد مطالعه در نظر می‌گیریم. سپس توسط این رابطه تخمین زده شده و منحنی‌های پاششی که در طول چندین پروفیل برداشت شده است می‌توان تک تک منحنی‌های پاشش آنها را به طور مستقیم به سرعت میانگین موج برشی تبدیل کرد. همان‌طور که در معادله (۲) نشان داده شده است، نسبت پواسون و سرعت‌های لرزه‌ای با همدیگر ارتباط دارند:

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \quad (2)$$

از اینرو می‌توان گفت که نسبت پواسون یک فاکتور مقیاس غیرخطی بین سرعت موج تراکمی و سرعت موج برشی است. وجود تغییرات جانبی زیاد در نسبت پواسون عموماً به تغییرات شدید در ویژگی‌های ماتریکس (بافت) سنگ مربوط می‌شود، یا به بیان دیگر تغییرات مربوط به سرعت موج برشی و تراکمی سنگ است. این واقعیت مبنای کار ما برای تخمین سرعت میانگین موج تراکمی و نسبت پواسون است. رابطه طول موج-عمق برآورد شده برای منحنی پاشش مرجع به مقدار نسبت پواسون حساس بوده و ما از این حساسیت برای تخمین نسبت پواسون استفاده می‌کنیم؛ به این نحو که ما یک پروفیل عمودی از

است (برگم و سوکو، ۲۰۱۶؛ ارنست، ۲۰۰۸). نظرات متضادی بر روی حساسیت امواج سطحی به نسبت پواسون وجود دارد. فوتی (۲۰۰۲) نشان داد که اگر یک فرض اولیه‌ای اشتباهی برای مقدار نسبت پواسون در طول فرایند وارون امواج سطحی در نظر گرفته شود، این می‌تواند تأثیر بر کیفیت مدل سرعت موج برشی تخمین زده شده بگذارد. مطالعه‌های صورت گرفته برای تخمین نسبت پواسون یا سرعت موج تراکمی نبوده بلکه بیشتر هدف بررسی حساسیت عمق نفوذ به نسبت پواسون بوده است. سرعت میانگین موج برشی در عمق دلخواه Z به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V_{sz} = \frac{\sum n h_i}{\sum n V_{si}} \quad (1)$$

که در آن n تعداد لایه‌ها تا عمق Z است و h_i و V_{si} نیز به ترتیب ضخامت و سرعت موج برشی لایه i ام است. در این مقاله ما با یک رویکرد جدید الهام گرفته از کار سوکو و کمینا (۲۰۱۵)، پروفیل سرعت میانگین موج برشی و تراکمی را به طور مستقیم از منحنی پاشش تخمین می‌زنیم. برای این منظور ابتدا لازم است یک رابطه طول موج-عمق را از تحلیل یکی از منحنی‌های پاشش تجربی امواج سطحی در منطقه مورد مطالعه به دست آوریم و سپس به کمک این رابطه طول موج-عمق تخمین زده شده، که ما آن را به عنوان رابطه‌ای مرجع در نظر می‌گیریم، می‌توان به طور مستقیم منحنی‌های پاشش داده‌های برداشت شده در طول پروفیل‌های مختلف در منطقه را به سرعت میانگین موج برشی تبدیل کرد. برای اینکار نیازمند یک پروفیل سرعت موج برشی، به عنوان پروفیل مرجع از منطقه مورد مطالعه و منحنی پاشش مربوطه‌اش هستیم. لازم به ذکر است که این پروفیل مرجع می‌تواند از تحلیل (وارون‌سازی) یکی از منحنی‌های پاشش تجربی داده‌های برداشت شده، تخمین زده شود و یا در صورت موجود بودن از داده‌های چاه و یا از طریق لرزه‌نگاری شکست مرزی حاصل شود. حال در ادامه پروفیل سرعت موج برشی مرجع (V_s) را طبق رابطه (۱) به

کارایی روش پیشنهادی استفاده می‌کنیم. با استفاده از نرم‌افزار Sem2dpack (آمیورو، ۲۰۱۲) ابتدا داده‌برداری روی یک مدل زمین شش لایه مصنوعی که سرعت لایه‌ها در آن با عمق افزایش می‌یابد و همه لایه‌ها نسبت پواسون ثابت 0.33 دارند را شبیه‌سازی می‌کنیم (جدول ۱). در این داده‌برداری مصنوعی از ۴۷ عدد گیرنده به فاصله یک متر از هم و چشمه موجک ریکر به فاصله یک متری از گیرنده اول استفاده کرده‌ایم. همچنین فرکانس غالب چشمه استفاده شده ۲۰ هرتز است.

شکل موج‌های اموج ریلی ثبت شده و منحنی پاشش تجربی این داده‌ها که بروش $f-k$ به دست آمده است در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

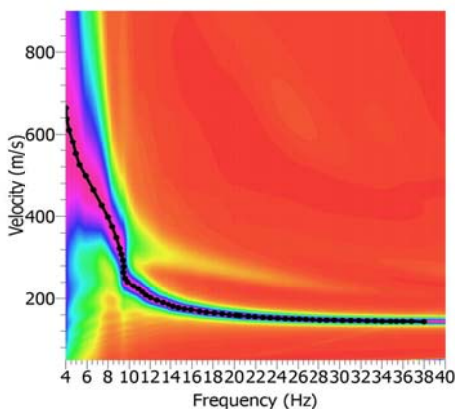
نسبت پواسون برای منحنی پاشش مرجع برآورد می‌کنیم، سپس به کمک رابطه (۳) سرعت میانگین موج برشی را به سرعت میانگین موج تراکمی به روشی که در ادامه بیان می‌شود، تبدیل خواهیم کرد. در این مقاله کارایی روش روی داده واقعی نشان داده می‌شود و همچنین با مدل‌های مصنوعی نشان داده می‌شود که روش معرفی شده برای مدل‌های زمینی که در آن سرعت موج برشی و ضخامت لایه‌ها دارای تغییرات جانبی زیادی هستند، قابل استفاده است.

۳. روش کار

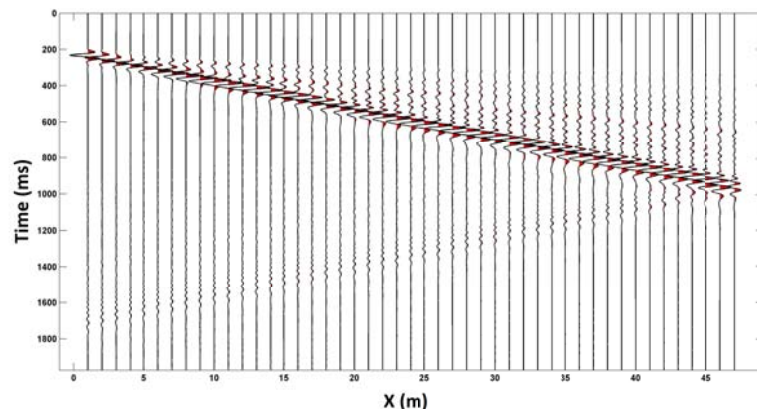
در این مقاله از چند مدل زمین مصنوعی برای بررسی

جدول ۱. پارامترهای مدل زمین شش لایه مصنوعی که روی آن داده‌برداری انجام شده است.

نسبت پواسون	سرعت موج تراکمی ($\frac{m}{s}$)	سرعت موج برشی ($\frac{m}{s}$)	عمق (m)	تعداد لایه‌ها
۰.۳۳	۳۰۰	۱۵۰	۳	۱
۰.۳۳	۴۰۰	۲۰۰	۷	۲
۰.۳۳	۶۰۰	۳۰۰	۱۱	۳
۰.۳۳	۸۰۰	۴۰۰	۱۶	۴
۰.۳۳	۱۱۰۰	۵۵۰	۲۱	۵
۰.۳۳	۱۶۰۰	۸۰۰	-	نیم فضا



(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) رکورد مصنوعی موج ریلی برای یک مدل زمین شش لایه. ب) منحنی پاشش تجربی داده‌های (الف) که با روش $f-k$ به دست آمده است.

به دست آمده در شکل ۲-ج به صورت ستاره خاکستری رنگ ترسیم و با برازش چند جمله ای تکه ای (منحنی Piecewise polynomial) درونیابی شده اند (منحنی سیاه رنگ شکل ۲-ج). با استفاده از این رابطه چند جمله ای، اکنون می توانیم به طور مستقیم سرعت میانگین موج برشی را از منحنی پاشش تجربی برای داده مصنوعی، بازیابی کنیم (پروفیل خط چین قرمز رنگ در شکل ۲-ب). حال در ادامه برای تحقق هدف بعدی این مطالعه، ما مدل سرعت میانگین موج تراکمی مربوط به مدل فرضی (منحنی آبی رنگ شکل ۲-ب) و رابطه طول موج-عمق به دست آمده (شکل ۲-ج) را به عنوان مرجع در نظر می گیریم و نشان می دهیم که این رابطه به نسبت پواسون حساس بوده و می توان از آن برای تخمین سرعت میانگین موج تراکمی (V_{pz}) استفاده کرد. برای رسیدن به این هدف ما، به کمک مدل سازی های پیشرو که در آنها مقدار V_s مدل فرضی (سرعت و ضخامت) را بدون تغییر حفظ می کنیم، ولی مقدار نسبت پواسون (σ) لایه های مدل را که برای همه لایه ها مقدار ثابتی در نظر گرفته شده بود به ترتیب از ۰/۱ تا ۰/۴۵ تغییر می دهیم و منحنی های پاشش تئوری مربوط به مقادیر مختلف نسبت پواسون را برای هر مدل سازی به طور جداگانه محاسبه می کنیم. سپس با استفاده از این منحنی های پاشش تئوری و سرعت میانگین موج برشی مدل، رابطه های طول موج-عمق برای هر مقدار از نسبت پواسون را محاسبه می کنیم. در شکل ۲-د، تمام روابط طول موج-عمق محاسبه شده (منحنی های خاکستری رنگ) به همراه رابطه ی طول موج-عمق تجربی مدل (منحنی قرمز رنگ) را نشان داده ایم. حال با مقایسه ی رابطه ی طول موج-عمق تجربی و محاسبه شده ها، می توان برای هر عمق، نسبت پواسون را تخمین زد. سپس طبق رابطه (۳)، می توان سرعت میانگین موج تراکمی (V_{pz}) را با استفاده از سرعت میانگین موج برشی (V_{sz}) و نسبت پواسون تخمین زده شده به دست آورد. در شکل ۲-ب مدل های V_{pz} واقعی و تخمین زده شده با هم مقایسه شده اند، که نشان می دهد این روش به خوبی V_{pz} را بر آورد

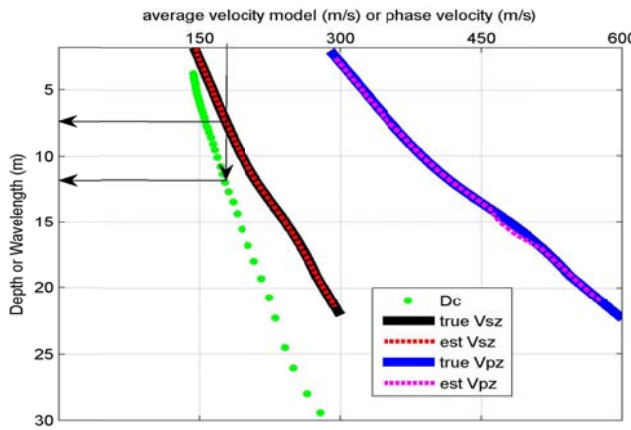
روش پیشنهادی نیازمند یک مدل سرعت موج برشی به عنوان مدل مرجع برای شروع است. با وجود اینکه این مدل سرعت را ما در جدول ۱ داریم ولی برای اینکه ادامه روند کار روی این داده های مصنوعی شبیه به روند کار روی داده واقعی باشد، از اطلاعات سرعتی جدول ۱ استفاده نکردیم. ما مدل سرعت برشی یک بعدی مرجع برای داده مصنوعی را از وارون منحنی پاشش تجربی داده های مصنوعی (شکل ۱-ب) با به کارگیری الگوریتم همسایگی (سامبریج، ۱۹۹۹) به دست آوردیم و به عنوان مدل سرعت موج برشی مرجع (V_s) در نظر گرفتیم (شکل ۲-الف). همان طور که قبلاً هم گفته شد، در عمل این مدل سرعتی می تواند توسط داده های چاه و یا از وارون یکی از منحنی های پاشش داده های میدانی برداشت شده به دست آید. در شکل ۲-الف مدل سرعت موج تراکمی مرجع (V_p) برای زمین فرضی هم نشان داده شده است که از مدل سرعت موج برشی مرجع (V_s) با فرض نسبت پواسون ثابت ۰/۳۳ برای همه لایه ها، تعیین شده است. شکل ۲-ب پروفیل سرعت میانگین موج برشی مرجع (منحنی سیاه رنگ) را بر حسب عمق که با استفاده از مدل سرعت موج برشی مرجع حاصل از وارون و رابطه (۱) به دست آمده و همچنین منحنی پاشش تجربی داده مصنوعی (منحنی نقطه ای سبز رنگ) را به صورت تابعی از طول موج نشان می دهد. توجه داشته باشید که محور قائم هم نشانگر عمق و هم بیانگر طول موج برای این دو کمیت هست. حال از روی این دو منحنی، برای هر مقدار از سرعت میانگین موج برشی (V_{sz}) می توان عمق مربوطه و پاشش، طول موج مربوطه را به دست آورد. یعنی برای هر سرعت فاز دلخواه و همان مقدار سرعت میانگین موج برشی (V_{sz}) می توان مقدار جفت طول موج (λ -عمق (z)) را به دست آورد (به فلش ها در شکل ۲-ب دقت کنید). پس برای مقادیر مختلف V_{sz} برابر با سرعت فاز، مجموعه ای از مقدار جفت طول موج (λ -عمق (z)) را به دست می آوریم. مقدار جفت طول موج-عمق های

در دنیای واقعی هرگاه بخواهیم منطقه‌ای با وسعت زیادی را مطالعه کنیم بدون شک ویژگی کشسانی لایه‌ها دارای تغییر جانبی خواهند بود. در ادامه برای مدل‌سازی این واقعیت فرض می‌کنیم لایه‌ها در مدل زمین مصنوعی جدول (۱) دارای تغییرات جانبی سرعت موج برشی، سرعت موج تراکمی و ضخامت باشند و ما علاوه بر داده‌های مصنوعی تک پروفیل لرزه‌ای که در بالا آن را بررسی کردیم، داده‌های امواج سطحی مصنوعی در امتداد پروفیل‌های دیگر روی مدل زمین فرضی برداشت و بررسی می‌کنیم.

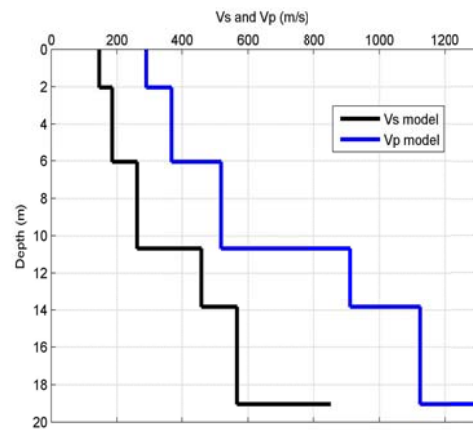
کرده است. (منحنی خط‌چین صورتی‌رنگ شکل ۲-ب).

$$V_{pz} = V_{sz} \sqrt{\frac{2(\sigma_z - 1)}{2\sigma_z - 1}} \quad (۳)$$

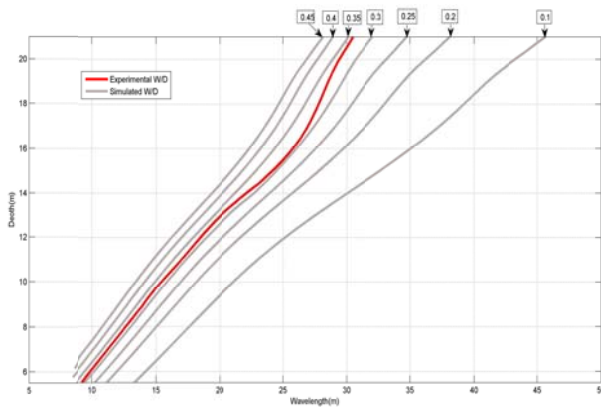
تاکنون ما نشان دادیم که اگر رابطه طول‌موج-عمق را بتوان به‌دست آورد، توسط این رابطه می‌توان سرعت میانگین موج برشی را به‌طور مستقیم از منحنی پاشش به‌دست آورد و سپس با توجه به حساس بودن این رابطه به نسبت پواسون، می‌توان نسبت پواسون را تخمین زد و سپس سرعت میانگین موج تراکمی را نیز برآورد کرد.



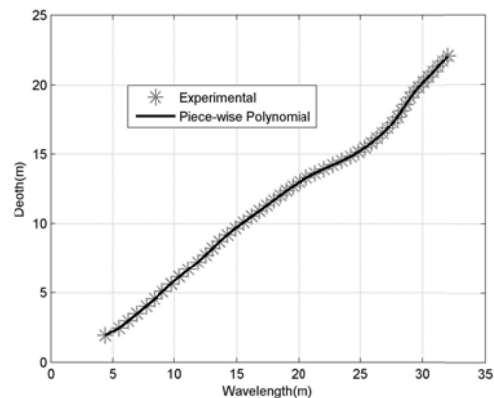
(ب)



(الف)



(د)

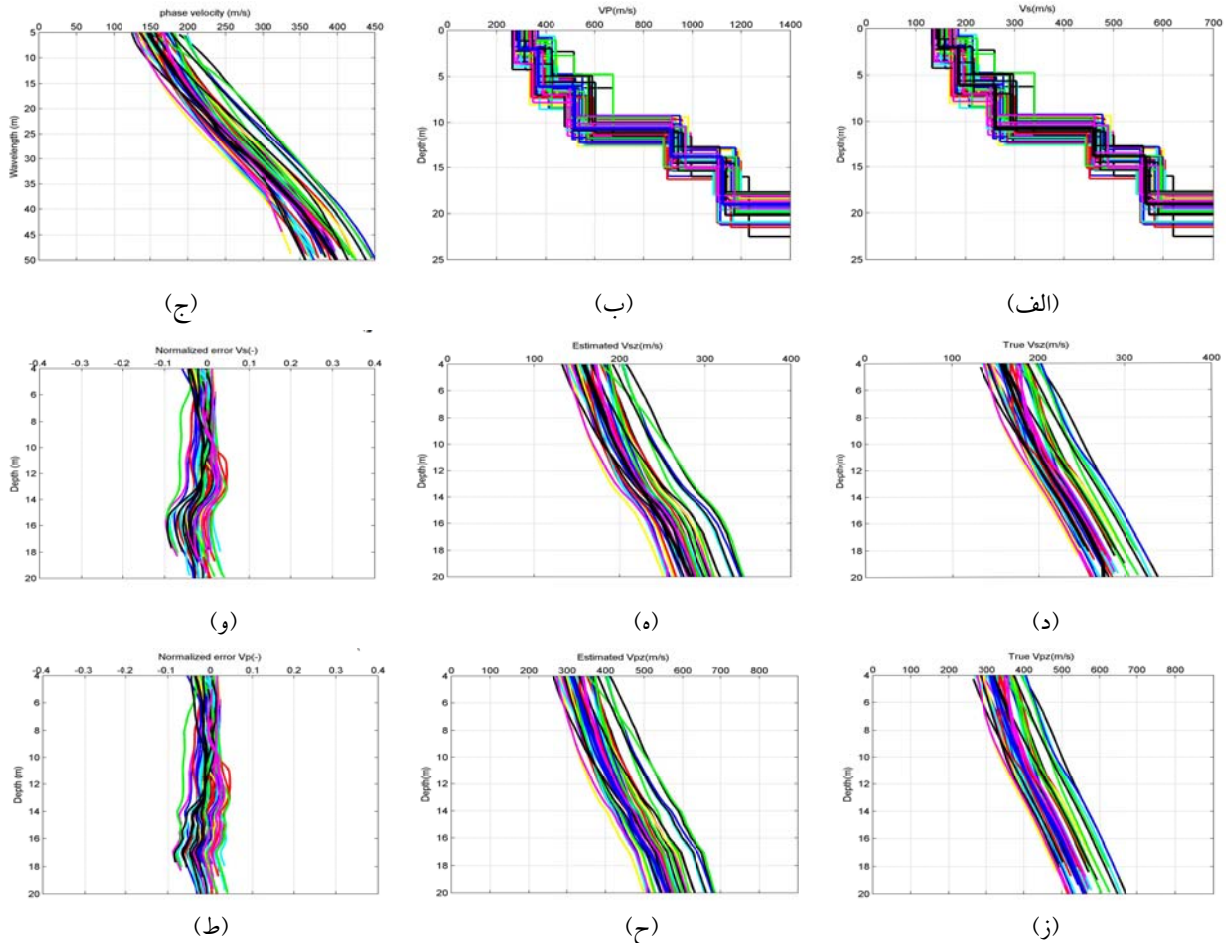


(ج)

شکل ۲. الف) مدل سرعت موج برشی V_s و تراکمی V_p زمین فرضی (منحنی پله‌ای سیاه‌رنگ و آبی‌رنگ). ب) سرعت میانگین موج برشی V_{sz} و تراکمی V_{pz} برای زمین فرضی (منحنی سیاه‌رنگ و آبی‌رنگ)، منحنی پاشش داده مصنوعی DC (منحنی نقطه‌ای سبزرنگ)، سرعت میانگین موج برشی و تراکمی تخمین زده شده (منحنی خط‌چین قرمز رنگ و صورتی‌رنگ). مقادیر محور عمودی برای سرعت موج برشی نشانگر عمق است و برای سرعت فاز نشانگر طول‌موج است. ج) رابطه طول‌موج-عمق (ستاره‌های خاکستری‌رنگ) و برازش چندجمله‌ای تکه‌ای (منحنی سیاه‌رنگ). د) رابطه طول‌موج-عمق برای مدل مرجع (منحنی قرمز رنگ) و دیگر رابطه‌های تئوری که توسط مقادیر مختلف نسبت پواسون به‌دست آمده است (منحنی‌های خاکستری که مقادیر پواسون در بالای نمودار آورده شده است).

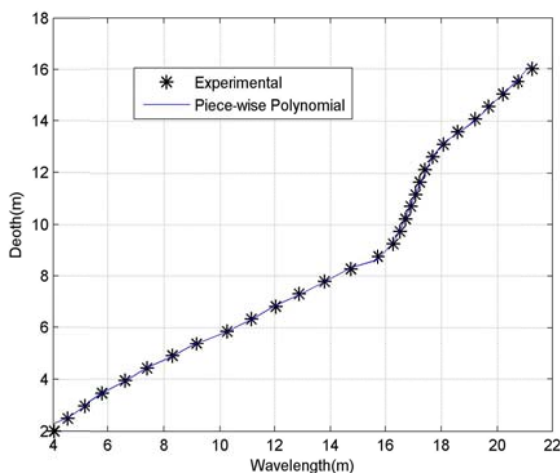
آبی‌رنگ شکل ۳-الف و ۳-ب) ایجاد کردیم و در شکل ۳-ج منحنی‌های پاشش مربوطه آنها را نشان داده‌ایم. سرعت میانگین موج برشی V_{sz} و تراکمی V_{pz} واقعی آنها (شکل ۳-د و ۳-ز) را با سرعت میانگین موج برشی و تراکمی تخمین زده شده (شکل ۳-ه و ۳-ح) با استفاده از رابطه طول‌موج-عمق مقایسه می‌کنیم. در شکل ۳-و و ۳-ط توزیع خطای تخمین بر حسب عمق را نشان دادیم. از روی این نمودار می‌توان فهمید که خطا در تخمین سرعت میانگین موج برشی و تراکمی کمتر از ۱۰ درصد است. بنابراین روش ارائه شده قادر است در حضور تغییرات جانبی خیلی زیاد، سرعت میانگین موج برشی و تراکمی را با دقت قابل قبول با به‌کارگیری تک رابطه طول‌موج-عمق برآورد شده، بازسازی کند.

برای تعیین سرعت میانگین موج برشی و تراکمی این برداشت‌ها لازم نیست که منحنی پاشش آنها را وارون کنیم، می‌توانیم سرعت میانگین موج برشی (V_{sz}) همه این پروفیل‌ها را با استفاده از رابطه طول‌موج-عمق برآورد شده مرجع، تخمین بزنیم و سپس در ادامه از روی این رابطه، نسبت پواسون را تخمین بزنیم و از آن برای تخمین سرعت میانگین موج تراکمی (V_{pz}) استفاده کنیم. این نشان می‌دهد که روش پیشنهادی چقدر کار تحلیل داده‌های امواج سطحی را راحت کرده و زمان پردازش را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. برای شبیه‌سازی وجود تغییرجانبی در لایه‌ها، مجموعه ۴۶ مدل سرعت موج برشی (V_s) و تراکمی (V_p) متفاوت، با ایجاد آشفتگی تصادفی در مدل مرجع (منحنی پررنگ سیاه و



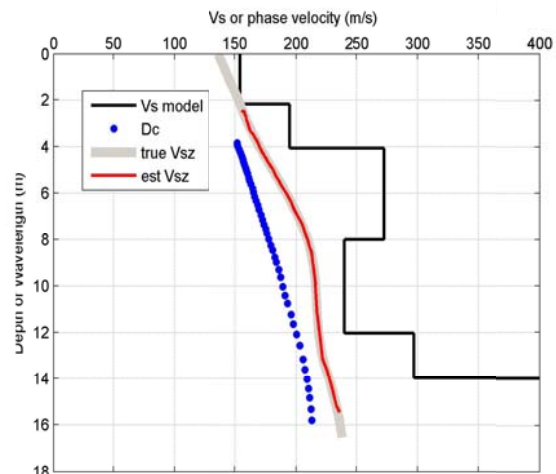
شکل ۳. الف) و ب) نمایش تمام مدل‌های سرعت موج برشی و تراکمی مصنوعی. ج) منحنی‌های پاشش مربوط به تمام مدل‌های سرعت موج برشی مصنوعی؛ د) و ز). سرعت میانگین موج برشی و تراکمی واقعی تمام مدل‌های مصنوعی در قسمت الف و ب. ه) و ح) سرعت میانگین موج برشی و تراکمی تخمین زده شده با رابطه‌ای طول‌موج-عمق نشان داده شده در شکل ۲-ج. در همه شکل‌ها مقادیر مدل مرجع با خط توپر سیاه‌رنگ و آبی‌رنگ نشان داده شده است. و) خطای نرمال شده تخمین سرعت‌های میانگین موج برشی بر حسب عمق، ط) خطای نرمال شده تخمین سرعت‌های میانگین موج تراکمی بر حسب عمق.

همچون مثال قبل بدون تغییر مقدار V_s مدل فرضی مقدار نسبت پواسون (σ) لایه‌های مدل را که مقدارش برای همه لایه‌ها ثابت فرض شده بود از $0/1$ تا $0/45$ تغییر می‌دهیم و منحنی‌های پاشش تئوری مربوط به مقادیر مختلف نسبت پواسون را از طریق مدل‌سازی پیشرو محاسبه می‌کنیم. سپس با استفاده از این منحنی‌های پاشش تئوری و سرعت میانگین موج برشی مدل، رابطه‌های طول‌موج-عمق برای مقادیر مختلف نسبت پواسون را محاسبه می‌کنیم. در شکل ۵-الف، تمام روابط طول‌موج-عمق محاسبه شده (منحنی‌های خاکستری رنگ) به همراه رابطه‌ی طول‌موج-عمق تجربی مدل (منحنی قرمز رنگ) نشان داده شده‌اند. حال همانند مدل قبلی، با مقایسه رابطه طول‌موج-عمق تجربی و محاسبه شده‌ها، می‌توان برای هر عمق، نسبت پواسون را تخمین زد سپس طبق رابطه (۳)، می‌توان سرعت میانگین موج تراکمی (V_{pz}) را با استفاده از سرعت میانگین موج برشی (V_{sz}) و نسبت پواسون تخمین زده شده به دست آورد. در شکل ۵-ب مدل‌های V_{pz} واقعی و تخمین شده با هم مقایسه شده‌اند.



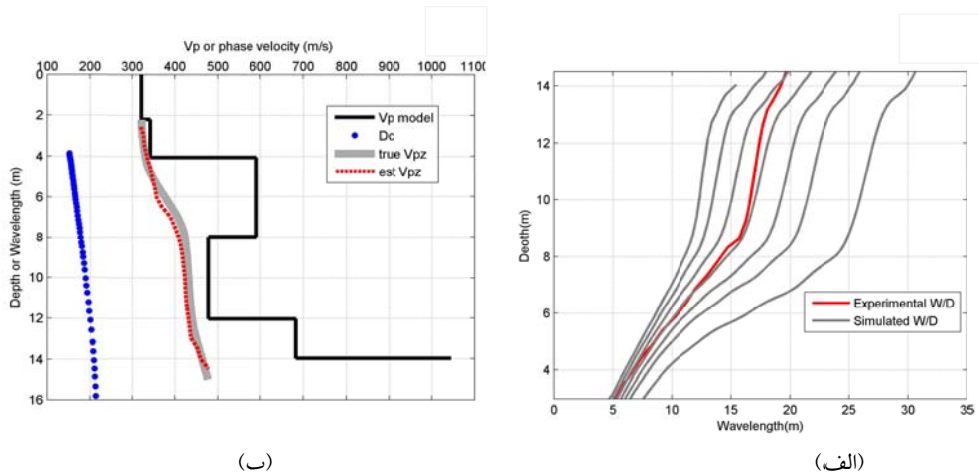
(ب)

در ادامه ما دو نمونه دیگر از مدل‌های مصنوعی را بررسی می‌کنیم که یکی از آنها دارای لایه کم‌سرعت است و برای تمایز لایه‌های مقدار نسبت پواسون را ثابت ($0/33$) در نظر گرفتیم و دیگری دارای لایه‌های با نسبت پواسون متغیر است. در شکل ۴-الف سرعت موج برشی مدل مرجع حاصل از وارون منحنی پاشش (منحنی پله‌ای سیاه‌رنگ)، میانگین سرعت موج برشی مدل مرجع حاصل از فرمول (۱) (منحنی خاکستری رنگ) و منحنی پاشش تجربی مربوطه را به‌عنوان تابعی از طول‌موج نیز نشان می‌دهیم (منحنی نقطه‌ای آبی رنگ). همانند مدل قبلی برای هر مقدار سرعت مقدار جفت طول‌موج-عمق را تعیین می‌کنیم. جفت طول‌موج-عمق‌های به دست آمده را در شکل ۴-ب به صورت ستاره سیاه رنگ ترسیم کرده‌ایم و مانند مثال قبلی توسط برازش چندجمله‌ای تکه‌ای درون‌یابی شده‌اند (منحنی آبی رنگ شکل ۴-ب). اکنون با استفاده از این رابطه طول‌موج-عمق، می‌توان به‌طور مستقیم سرعت میانگین موج برشی را از منحنی پاشش تجربی بازیابی کرد (پروفیل خط‌چین قرمز رنگ در شکل ۴-الف).



(الف)

شکل ۴. الف) مدل کم‌سرعت موج برشی V_s زمین فرضی (منحنی پله‌ای سیاه رنگ)، سرعت میانگین موج برشی V_{sz} برای زمین فرضی (منحنی خاکستری رنگ)، منحنی پاشش داده مصنوعی DC (منحنی نقطه‌ای آبی رنگ)، سرعت میانگین موج برشی تخمین زده شده (منحنی خط‌چین قرمز رنگ). مقادیر محور عمودی برای سرعت موج برشی نشانگر عمق است و برای سرعت فاز نشانگر طول موج است. ب) رابطه طول‌موج-عمق (ستاره‌های سیاه رنگ) و برازش چندجمله‌ای تکه‌ای (منحنی آبی رنگ).



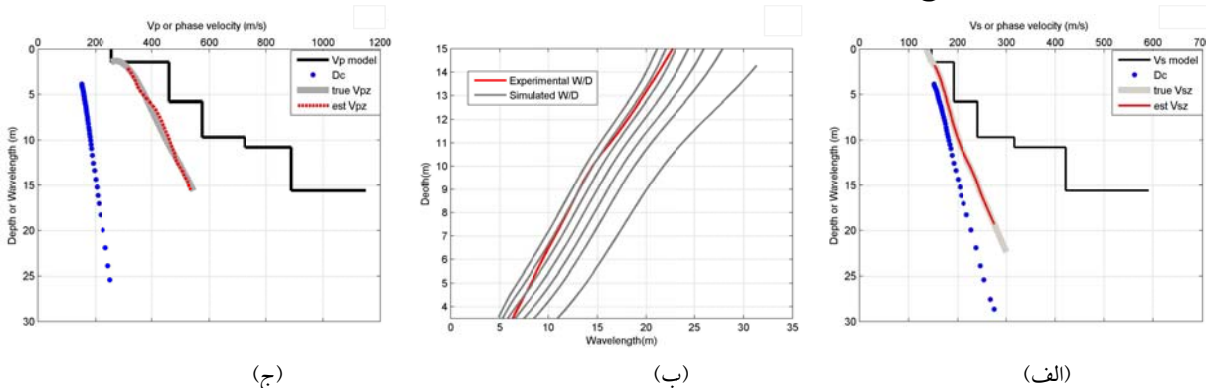
(ب)

(الف)

شکل ۵. الف) رابطه طول-موج-عمق برای مدل مرجع (منحنی قرمز رنگ) و دیگر رابطه‌های تئوری که توسط مقادیر مختلف نسبت پواسون به دست آمده است (منحنی‌های خاکستری رنگ)، ب) مدل کم‌سرعت موج تراکمی V_p (منحنی پله‌ای سیاه رنگ) زمین فرضی. سرعت میانگین موج تراکمی V_{pz} برای زمین فرضی (منحنی خاکستری رنگ)، منحنی پاشش داده مصنوعی DC (منحنی نقطه‌ای آبی رنگ)، سرعت میانگین موج تراکمی تخمین زده شده (منحنی خط چین قرمز رنگ). مقادیر محور عمودی برای سرعت موج برشی نشانگر عمق است و برای سرعت فاز نشانگر طول موج است.

آوردیم و سپس سرعت میانگین موج برشی را تخمین زدیم (منحنی قرمز رنگ شکل ۶-الف). در ادامه با استفاده از مدل سازی پیشرو، منحنی‌های پاشش و رابطه‌های طول-موج-عمق تئوری را برای تخمین نسبت پواسون به دست آوردیم (شکل ۶-ب). در انتها توسط این نسبت پواسون و رابطه (۳)، سرعت میانگین موج برشی را به سرعت موج تراکمی تبدیل کردیم. در شکل ۶-ج مدل‌های V_{pz} واقعی و تخمین زده شده با هم مقایسه شده‌اند.

در مدل آخر برخلاف مدل‌های قبل که برای همه لایه‌ها نسبت پواسون را ثابت (۰/۳۳) در نظر گرفتیم، نسبت پواسون را برای لایه‌ها از بازه ۰/۱ تا ۰/۴۵ به صورت متغیر فرض شده‌اند (منحنی پله‌ای سیاه رنگ شکل ۶-الف). در ادامه همانند تمامی مدل‌های قبل ابتدا منحنی پاشش را برآورد کردیم (منحنی نقطه‌ای آبی رنگ شکل ۶-الف) و سپس از روی این منحنی و مدل سرعت میانگین موج برشی مرجع (منحنی خاکستری رنگ شکل ۶-الف)، رابطه طول-موج-عمق مربوطه را به دست



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۶. الف) مدل سرعت موج برشی V_s زمین فرضی (منحنی پله‌ای سیاه رنگ)، سرعت میانگین موج برشی V_{sz} برای زمین فرضی (منحنی خاکستری رنگ)، منحنی پاشش داده مصنوعی DC (منحنی نقطه‌ای آبی رنگ)، سرعت میانگین موج برشی تخمین زده شده (منحنی خط چین قرمز رنگ). مقادیر محور عمودی برای سرعت موج برشی نشانگر عمق است و برای سرعت فاز نشانگر طول موج است. ب) رابطه طول-موج-عمق برای مدل مرجع (منحنی قرمز رنگ) و دیگر رابطه‌های تئوری که توسط مقادیر مختلف نسبت پواسون به دست آمده است (منحنی‌های خاکستری رنگ). ج) مدل سرعت موج تراکمی V_p (منحنی پله‌ای سیاه رنگ) زمین فرضی. سرعت میانگین موج تراکمی V_{pz} برای زمین فرضی (منحنی خاکستری رنگ)، منحنی پاشش داده مصنوعی DC (منحنی نقطه‌ای آبی رنگ)، سرعت میانگین موج تراکمی تخمین زده شده (منحنی خط چین قرمز رنگ). مقادیر محور عمودی برای سرعت موج برشی نشانگر عمق است و برای سرعت فاز نشانگر طول موج است.

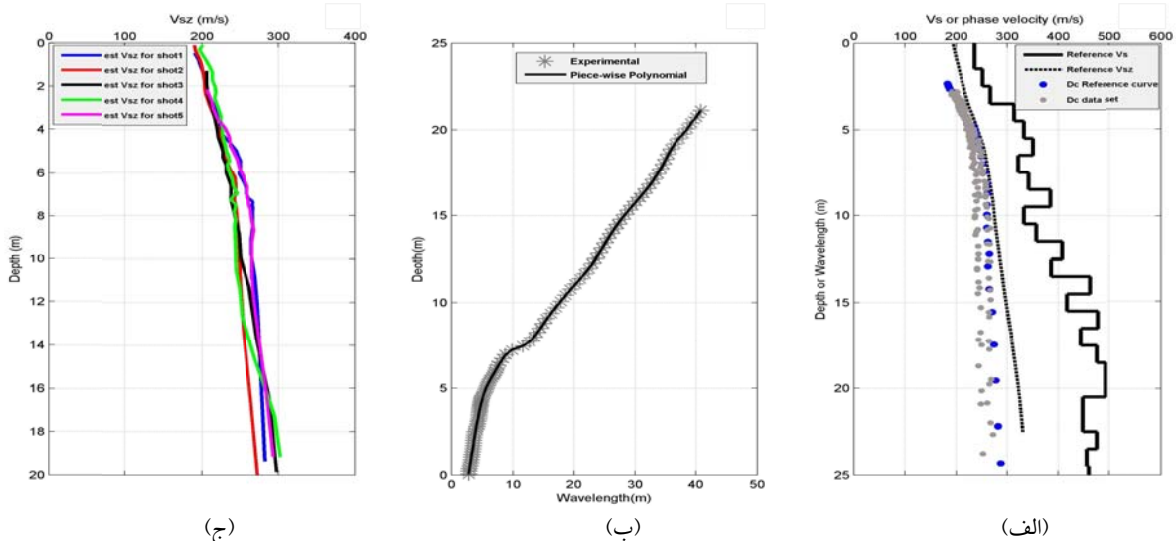
۴. اعمال روش بر روی داده واقعی

داده واقعی به کار رفته در منطقه ای از ایالت کالیفرنیا برای به دست آوردن مدل سرعت موج برشی برداشت شده است. در این منطقه که داده برداری به روش آنالیز چندکاناله امواج سطحی (MASW) انجام شده، از شش چشمه و تعداد ۴۸ گیرنده به فاصله یک متر از هم استفاده شده است. موقعیت چشمه ها به این صورت است که چشمه اول، دوم و سوم در سمت چپ پروفیل به ترتیب به فواصل ده، پنج و یک متری از گیرنده اول هستند و چشمه چهارم در وسط پروفیل و چشمه های پنج و ششم نیز به ترتیب به فاصله های یک و پنج متری از آخرین گیرنده در سمت راست پروفیل هستند.

در منطقه مورد نظر (در فاصله ای دورتر از پروفیل) توسط نگاربرداری صوتی مدل سرعت موج برشی را نیز به دست آورده اند که ما از این مدل سرعت، به عنوان مدل سرعت موج برشی مرجع استفاده کردیم (منحنی پله ای سیاه رنگ شکل ۷-الف) و سپس طبق فرمول (۱) آنرا به سرعت میانگین موج برشی مرجع تبدیل کردیم (منحنی سیاه رنگ شکل ۷-الف). در ادامه برای هر کدام از رکوردهای چشمه مشترک منحنی پاشش را به دست آوردیم و به

مکان چشمه در طول پروفیل نسبت دادیم (منحنی های نقطه ای خاکستری رنگ شکل ۷-الف). منحنی پاشش برآورد شده برای چشمه اول که در فاصله ده متری از اولین گیرنده بود را به عنوان منحنی پاشش مرجع در نظر گرفتیم (منحنی نقطه ای آبی رنگ شکل ۷-الف).

حال همانند روش اعمال شده بر روی داده های مصنوعی، از روی دو منحنی سرعت میانگین موج برشی مرجع و منحنی پاشش مرجع برای هر مقدار از سرعت فاز (برابر با سرعت میانگین موج برشی V_{sz}) می توان مقدار جفت طول موج-عمق را به دست آورد، لذا برای مقادیر مختلف سرعت، مجموعه ای از مقدار جفت طول موج (λ) - عمق ها (z) را به دست آوردیم (ستاره های خاکستری رنگ شکل ۷-ب). سپس جفت طول موج-عمق های به دست آمده را با برازش چندجمله ای تکه ای (Piecewise polynomial) درونیابی کرده ایم (منحنی سیاه رنگ شکل ۷-ب). اکنون با استفاده از این رابطه چندجمله ای، منحنی های پاششی که در طول پروفیل برآورد کرده بودیم را به طور مستقیم به سرعت میانگین موج برشی تبدیل کردیم (پروفیل های نشان داده شده در شکل ۷-ج برای هر چشمه).



شکل ۷. الف) مدل سرعت موج برشی V_s حاصل از چاه (منحنی پله ای سیاه رنگ). ب) سرعت میانگین موج برشی V_{sz} برای مدل مرجع (منحنی سیاه رنگ)، منحنی پاشش مرجع حاصل از چشمه اول (منحنی نقطه ای آبی رنگ)، منحنی های پاشش حاصل از دیگر چشمه ها در طول پروفیل (منحنی های نقطه ای خاکستری رنگ). مقادیر محور عمودی برای سرعت موج برشی نشانگر عمق است و برای سرعت فاز نشانگر طول موج است. ج) مدل های تخمین شده سرعت میانگین موج برشی برای چشمه های مختلف در طول پروفیل.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود سرعت‌های میانگین برشی تخمین زده شده به‌خوبی تغییرات جانبی در سرعت میانگین برشی را که متأثر از تغییرات جانبی سرعت برشی لایه‌ها در طول پروفیل است، نشان می‌دهد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله ما نشان دادیم که تغییرات سرعت میانگین موج برشی و تراکمی که برای پروژه‌های ژئوتکنیک و مهندسی زلزله و تصحیح استاتیک داده‌های لرزه‌ای کاربرد دارند را می‌توان بدون نیاز به وارون‌سازی همه منحنی‌های پاشش امواج ریلی ثبت شده در طول پروفیل، به‌طور مستقیم از این منحنی‌ها تخمین زد، به این نحو که با در نظر گرفتن سرعت میانگین موج برشی در هر عمق و سرعت فاز موج سطحی در طول موج نظیر آن، می‌توان یک رابطه‌ای بین پروفیل سرعت موج برشی و منحنی پاشش به‌دست آورد که تابعی از طول موج و عمق است. کارایی این رویکرد با محاسبه رابطه طول موج-عمق برای یک مدل شناخته شده ارزیابی شد و سپس با استفاده از آن، سرعت میانگین موج برشی به‌طور مستقیم از دیگر منحنی‌های پاشش در طول پروفیل تخمین زده شد. نشان داده شد که این رابطه قادر است بدون نیاز به وارون‌سازی منحنی‌های پاشش، برای برآورد سرعت میانگین برشی در مکان‌های دیگری که منحنی‌های پاشش امواج سطحی در آنجا موجود است، استفاده شود. از آنجا که رابطه طول موج-عمق به‌دست آمده به نسبت پواسون حساس بوده از این رابطه برای تخمین نسبت پواسون لایه‌ها استفاده شد و در ادامه مدل‌های سرعت میانگین موج برشی را به مدل‌های سرعت میانگین موج تراکمی تبدیل کردیم. نتایج نشان می‌دهد که سرعت میانگین موج برشی

و تراکمی را می‌توان با عدم قطعیت کمتر از ۱۰ درصد برای داده‌های مصنوعی با تغییرات جانبی بسیار زیاد تخمین زد. این روش نیازمند دانستن یک مدل سرعت موج برشی مرجع است. در صورتی که در دسترس نباشد، می‌توان از زمان اولین رسیدهای رکورد یکی از پروفیل‌ها تعیین شود یا منحنی پاشش یکی از پروفیل‌ها وارون شود تا مدل سرعت برشی مرجع به‌دست آید. در این روش فقط یکی از منحنی‌های پاشش نیاز به وارون شدن دارد تا مدل سرعت برشی مرجع به‌دست آید. البته اگر اطلاعات سرعت موج برشی از یک چاه یا از طریق زمان اولین رسیدها در دست باشد، می‌توان از این مدل استفاده کرد و نیازی به وارون‌سازی منحنی پاشش نخواهد بود.

با اعمال روش بر روی داده‌های واقعی، ما نشان دادیم که بدون نیاز به فرایند وارون‌سازی توانستیم مدل‌های سرعت میانگین موج برشی را به‌طور مستقیم از منحنی‌های پاششی که در طول پروفیل برآورد کرده بودیم، تخمین بزنیم. رویکرد ارائه شده می‌تواند در مطالعات برآورد خطر لرزه‌ای، هنگامی که تعداد زیادی از سایت‌ها نیاز به طبقه‌بندی بر اساس V_{s30} دارند، کاربرد داشته باشد. در این حالت رابطه طول موج-عمق برای منطقه تخمین زده می‌شود و سپس V_{s30} را به‌طور مستقیم از منحنی‌های پاشش محلی موجود می‌توان به‌دست آورد.

مراجع

آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰ ایران، ۱۳۸۴، کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

- Aki, K. and Richards, P. G., 2002, Quantitative seismology, Second Edition, University Science Books.
 Ampuero, J. P., 2012, A Spectral Element Method tool for 2D wave propagation and earthquake source dynamics. California Institute of Technology Seismological Laboratory.
 Bard, P.-Y., 1994, Effects of surface geology on

- ground motion: recent results and remaining issues, In Proc. of the 10th European Conf. on Earthquake Engineering, Vienna, 305-323.
 Bergamo, P. and Socco, L. V., 2016, P- and S-wave velocity models of shallow dry sand formations from surface wave multimodal inversion: Geophysics, 81, no. 4, R197-R209, doi: 10.1190/geo2015-0542.1.

- Brown, L. T., Diehl, J. G. and Nigbor, R. L., 2000, A simplified procedure to measure average shear-wave velocity to a depth of 30 meters (VS;30): Presented at the 12th World Conference on Earthquake Engineering.
- BSSC, 1994, NEHRP Recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings, part I: Provisions, Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- Comina, C., Foti, S., Boiero, D. and Socco, L. V., 2011, Reliability of VS;30 evaluation from surface waves tests: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137, 579–586, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000452.
- Dobry, R., 2000, New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions, earthquake spectra, 16(1), 41-67.
- Ernst, F., 2008, Multi-mode inversion for P-wave velocity and thick nearsurface layers: 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, EAGE, Extended Abstracts, A13, doi: 10.3997/2214-4609.20146236.
- Foti, S. and Strobbia, C., 2002, Some notes on model parameters for surface wave data inversion: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems SAGEEP, SE16, doi: 10.4133/1.2927179.
- Gouveia, F., Gomes, R. C. and Lopes, I., 2019, Shallow and in depth seismic testing in urban environment: A case study in Lisbon Miocene stiff soils using joint inversion of active and passive Rayleigh wave measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 169, 199-213.
- Haney, M. M. and Tsai, V. C., 2015, Non perturbational surface-wave inversion: A Dix-type relation for surface waves: *Geophysics*, 80, no. 6, EN167–EN177, doi: 10.1190/geo2014-0612.1.
- Hayashi, K., Craig, M., Kita, T. and Inazaki, T., 2015, CMP spatial autocorrelation analysis of multichannel passive surface-wave data. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015 (pp. 2200-2204). Society of Exploration Geophysicists.
- Ikeda, T., Tsuji, T., Konishi, C. and Saito, H., 2020, Extracting surface wave dispersion curves from two-station microtremor analysis in heterogeneous ambient noise wavefield. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2020. Society of Exploration Geophysicists, 3442-3446.
- Konno, K. and Kataoka, S., 2000, New method for estimating the average s-wave velocity of the ground, Proceedings of the 6th International Conference on Seismic Zonation, Palm Springs, California, November, 2000.
- Kramer, S.L., 1996, Geotechnical earthquake engineering, Pearson Education India.
- Leong, E. C. and Aung, A. M.W., 2012, Weighted average velocity forward modelling of Rayleigh surface waves: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, 218–228, doi: 10.1016/j.soildyn.2012.07.030.
- Li, P., Zhang, K., Zhang, Y. and Yan, Z., 2016, Near-surface shear-wave velocity estimation based on surface-wave inversion. *The Leading Edge*, 35(11), 940-945.
- Mulargia, F., Castellaro, S., 2009, Experimental uncertainty on the Vs(z) profile and seismic soil classification. *Seismol. Res. Lett.* 80 (6), 985-988.
- Murphy, J. R. and Shah H. K., 1988, An analysis of the effects of site geology on the characteristics of near-field Rayleigh waves, *Bull. Seism. Soc. Am.* 78, 64-82.
- Nazarian, S. and Stokoe, K. H., 1984, In-situ shear wave velocity from spectral analysis of surface waves. In: Eighth World Conference on Earthquake Engineering, 3, 31-38.
- Oda, Y., Hauser, E. C. and Gilliland, S., 2019, S-wave velocity structure using microtremor array measurements: a case study at Huffman Dam, OH, US. In The 13th SEGJ International Symposium, Tokyo, Japan, 12-14 November 2018. Society of Exploration Geophysicists and Society of Exploration Geophysicists of Japan, 347-350.
- Okada, H., 2003, The Microtremor Survey Method. Society of Exploration Geophysicists, USA.
- Olafsdottir, E. A., Erlingsson, S. and Bessason, B., 2018, Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(2), 217-233.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 63 (3), 800-808.
- Power, M., Chiou, B. S. J., Abrahamson, N. A., Bozorgnia, Y., Shantz, T., and Roblee, C., 2008, An overview of the NGA project, *Earthquake Spectra*, 24, 3–21.
- Sambridge, M., 1999, Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—I. Searching 833 a parameter space: *Geophysical Journal International*, 138, 479–494
- Scherrer, E. F., 1999, Static corrections for seismic reflection surveys. ISBN 1-56080-080-1.
- Serdyukov, A. S., Yablokov, A. V., Duchkov, A. A., Azarov, A. A. and Baranov, V. D., 2019, Slant f-k transform of multichannel seismic

- surface wave data. *Geophysics*, 84(1), A19-A24.
- Socco, L. V., Foti, S. and Boiero, D., 2010, Surface wave analysis for building near surface velocity models: Established approaches and new perspectives: *Geophysics*, 75, no. 5, 75A83–75A102, doi: 10.1190/1.3479491.
- Socco, L. V. and C. Comina, 2015, Approximate direct estimate of S-wave velocity model from surface wave dispersion curves: 21st Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, A09.
- Socco, L. V., Mabyalaht, G. and Comina, C., 2015, Robust static estimation from surface wave data. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015. Society of Exploration Geophysicists, 5222-5227.
- Strobbia, C., 2003, Surface wave methods: acquisition, processing and inversion.
- Wathelet, M., Jongmans D. and Ohrnberger, M., 2004, Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements, *Near Surface Geophysics* 2, 211-221.
- Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B. and Tian, G., 2003, Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes: *Journal of Applied Geophysics*, 52, 45–57, doi: 10.1016/S0926-9851(02)00239-2.
- Yamanaka, H., Cimoto, K., Miyake, H., Korenaga, M., Tsuno, S. and Senna, S., 2019, Estimation of S-wave velocity structure around Fujikawa fault zone, Japan, from microtremor and earthquake records for seismic hazard assessment. In The 13th SEGJ International Symposium, Tokyo, Japan, 12-14 November 2018. Society of Exploration Geophysicists and Society of Exploration Geophysicists of Japan, 463-466.

Estimation of average shear V_{sz} and compressional V_{pz} waves velocities using wavelength-depth relation obtained from surface waves analysis

Ghavami, S.¹ and Siahkoochi, H. R.^{2*}

1. M.Sc. Student, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 28 July 2020, Accepted: 24 Jan 2021)

Summary

Shear wave velocity (V_s) and its average based on travel time from the surface to a depth of 30 m, is known as (V_{s30}) are often used in engineering projects to determine soil parameters, evaluate the dynamic properties of the soil and classify it. This quantity is directly related to the important property of soil and rock, i.e., their shear strength. The average shear wave velocity is used in geotechnics to assess soil liquefaction and in earthquake engineering to determine soil period, site amplification coefficient, and determination of attenuation. Usually, the average shear wave velocity is obtained from shear wave refraction survey, PS logging or from shear wave velocity profile obtained by inversion of experimental dispersion curve of surface waves. Surface wave analysis is one of the methods for estimating the profile of shear wave velocity, but inverting of dispersion curve is a time-consuming part of this process and also, the inverse problem has a non-unique solution. This becomes more evident when the goal is to determine a two- or three-dimensional shear wave velocity model.

This study provides a method to estimate directly the average shear wave velocity (V_{sz}) as well as the average compressional wave velocity (V_{pz}) from dispersion curves of surface waves without the need to invert the dispersion curves. For this purpose, we need to exploit the relation between surface wave wavelength and investigation depth. Estimating the wavelength-depth relationship requires access to a shear wave velocity model (a reference model) in the study area, which can be obtained from well data, refraction seismic profiles, or by inverting one of the experimental surface wave dispersion curves.

The V_{sz} is then estimated directly from dispersion curve using the wavelength-depth relationship. In addition, due to the dependence of the value of V_{sz} to Poisson's ratio and the sensitivity of the estimated wavelength-depth relationship to this ratio, we estimate the Poisson's ratio profile and average compressional velocity (V_{pz}) for the study area, from the V_{sz} .

For a given range of Poisson's ratio values, theoretical dispersion curves of the synthetic earth models are determined by forward modeling. Then using these dispersion curves and estimated average shear wave velocity of the model, the wavelength-depth relationship corresponding to each Poisson's ratio is determined. In the next step by comparing experimental and estimated wavelength-depth relationships, one can estimate the Poisson's ratio at each depth. Then the average compressional wave velocity (V_{pz}) is estimated using the V_{sz} and the Poisson's ratios.

We evaluated the performance of the proposed method by applying on both real MASW seismic data set from USA and synthetic seismic data. The synthetic data collected over synthetic earth model and showed that the average shear and compression waves velocities are estimated with uncertainty of less than 10% in layered earth model with very large lateral variations in shear and compression waves velocities.

According to the results, the proposed method can be used to take the non-destructive advantages of the surface wave method in engineering, geotechnical, and earthquake engineering projects to get the average shear wave velocity V_{sz} .

Keywords: surface waves analysis; dispersion curve, wavelength-depth relationship; average shear wave velocity; average compressive wave velocity.

* Corresponding author:

hamid@ut.ac.ir