



تعیین پارامترهای بهینه مدل اولیه در معکوس سازی منحنی های پاشندگی امواج سطحی در حوضه های عمیق (مطالعه موردی : شهر تهران)

سعید سلطانی^۱؛ ابراهیم حق شناس^۲ و غلام جوان دلویی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری زلزله شناسی، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

۲- دانشیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵

* نویسنده مسئول مکاتبات: javandoloei@iiees.ac.ir

چکیده

موضوع مدل سازی معکوس منحنی پاشندگی امواج سطحی مهم ترین و پیچیده ترین فرایند مطالعه ساختار سرعتی زمین به وسیله ارتعاشات محیطی است. عوامل متعددی باعث می شوند که پاسخ منحصر به فردی برای این مسائل وجود نداشته باشد. در این میان داشتن اطلاعات قبلی با هدف کاهش پاسخ های محتمل، مفید خواهد بود. در اغلب اوقات این اطلاعات در دسترس نیست و یا تنها بازه مشخصی از ساختار سرعتی را شامل می شود. بنابراین تعیین بهترین پارامترهای مدل اولیه برای شروع عملیات معکوس سازی که حداقل اطلاعات مورد نیاز برای توصیف لایه می باشند، یکی از عوامل تاثیر گذار در رسیدن به پاسخ مطمئن و قابل اعتماد است.

در این مقاله، تلاش برای ایجاد یک چارچوب نظام مند برای تعیین این مدل ها به کمک پژوهش های قبلی در این زمینه، مورد بررسی قرار خواهد گرفت و بهترین استراتژی و راهبرد برای انتخاب پارامترهای اولیه مدل، بدون داشتن هیچ گونه اطلاعات اضافی، معرفی خواهد شد. در ادامه با مطالعه موردی بر روی دو ساختمان یکی در غرب (پارک پردیسان) و دیگری شرق (استادیوم تختی) شهر تهران، میزان تفاوت ناشی از انتخاب صحیح این مدل ها بصورت کمی و کیفی بررسی می شود. نتایج حاصل از این مقاله تأثیر انتخاب پارامترهای مدل اولیه بر نتایج، تأثیر اطلاعات اضافی و اهمیت چگونگی حل مساله معکوس منحنی های پاشندگی امواج سطحی را به خوبی نشان می دهد. استفاده از این رهیافت در مدل سازی معکوس منحنی پاشندگی برای تولید مدل ساختار سرعت موج برشی در مناطق با توپوگرافی نسبتاً شدید همراه با آبرفت های عمیق، دستیابی به مدل نهائی قابل اعتماد را سریع تر فراهم می کند.

واژگان کلیدی

ارتعاشات محیطی
منحنی پاشش امواج سطحی
مدل سازی معکوس
آبرفت تهران
پروفیل سرعت موج برشی

۱- مقدمه

تعیین سرعت موج برشی به کمک معکوس سازی منحنی پاشندگی امواج سطحی به دلیل غیرمخرب بودن، امکان نفوذ به عمق های بیشتر و هزینه های اندک در مقایسه با روش های مستقیم برداشت مانند حفر گمانه، روز به روز بیشتر توجه محققان و کاربران حوزه های مهندسی ژئوفیزیک و ژئوتکنیک را جلب می نماید. در روش های آرایه ای غیرمخرب، علاوه بر اینکه چگونگی چیدمان نقاط برداشت در شبکه، شیوه برداشت داده و پردازش آن ها بر روی پاسخ نهایی تأثیرگذار است، داشتن استراتژی مناسب برای فرآیند مدل سازی معکوس منحنی های پاشندگی امواج سطحی بر روی پاسخ نهایی تأثیر به سزائی دارد.

برای حل این گونه مسائل در ابتدا الگوریتم های جستجوی محلی پیشنهاد شد (سوکو و همکاران ۲۰۱۰؛ فوتی و همکاران ۲۰۰۹). این الگوریتم ها با یک مدل اولیه ثابت آغاز می شوند و به دلیل داشتن سرعت بیشتر و به واسطه محدود بودن مدل های مستقیم تولید شده و نیاز کمتر به پردازش های سنگین، انتخاب ساده تری می باشند. اما مطالعات مختلف نشان می دهد جواب های به دست آمده از این رهیافت تنها یکی از جواب های ممکن برای مسئله هستند (سرکاتو، ۲۰۰۹). این مسئله ناشی از عدم یکتایی ذاتی در پاسخ منحنی های پاشندگی است به طوری که در حل مستقیم، تعداد زیادی پروفیل سرعتی متفاوت، منحنی پاشندگی یکسان تولید می کنند (حق شناس و همکاران، ۲۰۰۸؛ جوان دولوئی، ۱۳۸۰).

در این رهیافت ممکن است پاسخ در یک کمینه محلی از مقدار خطا که کمترین خطای ممکن نیست متوقف شود. علت اصلی مشکل، جستجو برای یافتن بهترین پاسخ تنها در حوالی همان مدل اولیه است. در این مورد صحت پاسخ را می توان با شروع از مدل های اولیه متفاوت بررسی نمود، اما وابستگی پاسخ نهایی به مدل اولیه باعث می شود تمامی پاسخ ها متأثر از تخمین ناصحیح مدل اولیه باشد.

رهیافت دیگر در حل مسائل معکوس سازی استفاده از الگوریتم های جستجوی سراسری است که در آن ها به جای مدل اولیه پارامترهای مدل تعریف شده و جستجو در کل فضای پارامتری برای یافتن مدل های تئوری ساختار زمین انجام می گیرد. در این روش مجموعه ای از پروفیل ها که دارای کمترین خطا بر مبنای تابع خطای معرفی شده باشند انتخاب می شوند. این مسئله باعث می شود عدم قطعیت مربوط به عدم یکتایی پاسخ در پاسخ نهایی نیز لحاظ گردد.

در دو دهه اخیر با افزایش قدرت پردازشگرها و کمتر شدن هزینه محاسبات، روش های مبتنی بر جستجوی سراسری پرتعدادتر شده اند (سوکو و همکاران، ۲۰۱۰). در این روش ها یک فضای احتمالاتی از توزیع پاسخ ها تعریف شده و سپس این فضای پارامتری به کمک یک الگوریتم جستجوی خاص نمونه برداری می شود. این الگوریتم ها توسط روش های

مختلف آماری مانند روش مونت کارلو محاسبه می شوند. پس از آن برای هر پروفیل نمونه برداری شده، پاسخ مستقیم محاسبه می شود و مقدار خطای آن با مدل تجربی بر مبنای تابع خطا محاسبه می شود (فوتی و همکاران، ۲۰۱۷).

چگونگی تعیین این فضای احتمالاتی به طور مستقیم با پارامتر بندی اولیه برای شروع عملیات معکوس سازی ارتباط دارد. این پارامترها که دست کم موارد لازم برای توصیف لایه می باشند شامل ضخامت، چگالی و دو پارامتر دیگر کشسان یعنی سرعت موج های طولی و برشی هستند و باعث می شوند مساله معکوس سازی امواج سطحی به یک مسئله معکوس سازی فرامعین تبدیل شود. به طور کلی وابستگی غیرخطی این مجهولات به یکدیگر، پیچیدگی مسئله معکوس سازی را افزایش می دهد.

علاوه بر این در حل معکوس، زمانی که هدف تعیین لایه های عمیق تر باشد، چگونگی تعیین لایه های سطحی و محدود کردن آنها توسط کاربر یا روش های ژئوفیزیکی سطحی بسیار تأثیرگذار هستند. بنابراین اگر لایه های سطحی به درستی انتخاب نشوند حل معکوس پیچیده تر خواهد شد. (کاکس و تیگو، ۲۰۱۶).

۲- روش های تعیین پارامترهای مدل اولیه

نخستین مطالعه جامع با هدف ارزیابی تأثیر پارامترها و استخراج احتمالی پارامترها در مدل سازی معکوس که به عنوان محدودکننده های مدل نهایی عمل کنند، توسط رنالیو و همکاران (۲۰۱۰) شروع شد. این مطالعه بر روی ۲۰ پروفیل سرعتی و برای لایه بندی های کم عمق واقع بر روی سنگ کف لرزه ای مربوط به پروژه نریس (NERIES) انجام شد. با توجه به این موضوع که یکی از مهمترین پارامترهای اولیه تعداد لایه ها می باشد، در ابتدا برای مدل های مصنوعی و در ادامه برای مدل های مربوط به ساختگاه های مطالعه شده در پروژه، لایه ها به شکل جدول (۱) تعریف شدند. با مقایسه میزان خطا در نتایج این پژوهش با گمانه های حفاری شده می توان دریافت در زمانی که قبل از شروع معکوس سازی تخمین اولیه مناسبی از عمق سنگ بستر وجود داشته باشد و عمق آخرین لایه برابر با عمق تخمینی صحیح لحاظ شود با شروع از مدل ساده یک لایه بر روی سنگ بستر و با افزایش تعداد لایه ها همواره تعداد لایه مناسب برابر با مقداری خواهد بود که در هر تلاش مقدار خطا نسبت به مقدار قبلی کمتر شده و شروع به ثابت شدن نماید.

در این پژوهش خاص، تخمین عمق با توجه به نوع ساختگاه مورد مطالعه که ساختگاهی کم عمق با امیدانس زیاد بین لایه و سنگ بستر بود به سادگی و توسط فرکانس طبیعی خاک محاسبه می شد.

جدول ۱: مدل‌های کم عمق استفاده شده در ۲۰ پروفیل سرعتی پروژه نریس (NERIES).

مدل ۴	مدل ۳	مدل ۲	مدل ۱	سرعت موج اس	سرعت موج پی	ضخامت
تعداد لایه‌ها	تعداد لایه‌ها	تعداد لایه‌ها	تعداد لایه‌ها	۳۰۰	۷۰۰	۲۰ متر
پانزده لایه با ضخامت تعیین شده ده لایه دو متری و پنج لایه پنج متر	ده لایه با ضخامت یکسان ۵ متر	سه لایه با سرعت ثابت در هر لایه	دو لایه با افزایش خطی سرعت	۵۳۰	۱۳۰۰	۲۰ متر
مشخصات لایه‌ها	مشخصات لایه‌ها	مشخصات لایه‌ها	مشخصات لایه‌ها	۸۶۰	۱۸۰۰	سنگ بستر لرزه‌ای
150<Vs<3500 200<Vp<5000 Possion Ratio= 0.2-0.5	150<Vs<3500 200<Vp<5000 Possion Ratio= 0.2-0.5	150<Vs<3500 200<Vp<5000 Possion Ratio= 0.2-0.5	150<Vs<3500 200<Vp<5000 Possion Ratio= 0.2-0.5 Depth<100			

بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته باشد، اما مدل سرعتی بدست آمده از آن از اعتبار کمتری برخوردار است. بطور مثال ممکن است مدل سه لایه مربوط به یک حالت و مدل هفت لایه مربوط به حالت دیگری نتیجه نزدیکی داشته باشند در صورتیکه هر کدام از این لایه‌بندی‌ها در پاسخ نهایی می‌تواند نتایج متفاوتی بوجود آورد. این پژوهش نشان داد هر چند می‌توان در یک دسته‌بندی با کاهش یا افزایش پارامترها نتیجه بهتری بدست آورد، اما با تغییر حالت پارامتردهی (بطور مثال از خطی به توانی و ...) ممکن است معیارهای قبلی دیگر صادق نباشند.

پس از این مطالعات، نخستین روش تعیین سیستماتیک پارامترهای مدل یا روش "نسبت لایه‌بندی" به‌عنوان روشی نوین در معکوس‌سازی امواج سطحی در نبود اطلاعات اضافی معرفی شد (کاکس و تیگو، ۲۰۱۶). مهمترین فرض اولیه در این روش آن است که منحنی پاشندگی امواج سطحی در اعماق کم، تفکیک‌پذیری بهتری نسبت به اعماق زیاد دارد. در واقع روش "نسبت لایه‌بندی" تابعی را معرفی می‌کند که در آن ضخامت بالقوه هر لایه در مدل، مبتنی بر ضخامت بالقوه لایه بالایی آن می‌باشد. بدین منظور در ابتدا کمترین و بیشترین مقدار بالقوه مربوط به عمق لایه اول بصورت تجربی و از روی طول موج منحنی پاشندگی محاسبه می‌شود. این مقادیر کمینه و بیشینه طول موج از پاسخ آرایه که مرتبط با هندسه آن می‌باشد استخراج می‌شود. مقادیر ابتدا و انتهای لایه اول به ترتیب یک سوم و یک دوم کمترین طول موج قابل محاسبه در منحنی پاشندگی است. همچنین ضخامت لایه آخر بر مبنای تعریف پارامتر ضخامت تفکیک‌پذیری، بیان می‌شود که برابر با یک سوم یا یک دوم بیشترین طول موج قابل محاسبه در منحنی پاشندگی است. پارامتر دیگر فاکتور "نسبت لایه‌بندی" است که برای مرتبط‌کردن لایه‌ها به یکدیگر معرفی می‌شود. این مقدار تجربی بسته به حوضه مورد مطالعه و نظر کاربر متفاوت خواهد بود.

چگونگی تعیین لایه‌ها براساس روش نسبت لایه‌بندی را با یک مثال ساده می‌توان نشان داد (جدول ۲). در نمونه ارائه شده جدول (۱) کمترین مقدار طول موج ۶ متر و بیشترین مقدار آن ۱۵۰ متر در نظر گرفته شده است. این مقادیر به سادگی از روی منحنی تجربی بدست می‌آیند. علاوه بر آن فاکتور لایه‌بندی نیز در این مثال برابر ۲ در نظر گرفته شده است.

نکته مهم اجتناب از افزایش بی‌دلیل لایه‌ها پس از ثابت شدن مقدار خطا در این رهیافت می‌باشد، زیرا افزایش تعداد مجهولات باعث افزایش خطای واقعی و ایجاد واگرایی در تعیین عمق واقعی سنگ بستر خواهد شد. بنابراین در این روش فرایند معکوس‌سازی در دو مرحله پیشنهاد می‌شود. در مرحله اول تعداد لایه‌ها پس از تخمین عمق، محاسبه شده و در مرحله دوم برای تکمیل روش، سرعت موج برشی پارامترها در هر لایه به‌صورت خطی افزایش داده می‌شود. افزایش خطی به این دلیل پیشنهاد می‌شود که نتایج واقعی به‌دست آمده از گمانه‌ها نشان می‌دهد این نوع افزایش سرعت موج برشی متداول‌ترین نحوه توزیع سرعت در یک ساختار سرعتی کم‌عمق در مناطق رسوبی می‌باشد. البته هنگامی که تنها فرض افزایش خطی در فرایندسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، پاسخ نهایی احتمالاً واگرا شود. بنابراین این مسأله نیز باید با دقت فراوان برای هر لایه بررسی گردد.

در مطالعه جامع دیگری در این پروژه با هدف طبقه‌بندی سناریوهای مختلف پارامتربندی، حالت‌های ممکن پارامتری در گروه‌های مختلف تقسیم‌بندی شده و با افزایش درجه آزادی آن‌ها (تعداد مجهولات) سعی در شناسایی بهترین مدل انجام گرفته است (دی جیلیو، ۲۰۱۱).

حالت اول مجموعه‌ای از لایه‌ها با سرعت همگن از یک تا نه لایه می‌باشد. در حالت دوم لایه بالایی شامل پنج زیرلایه است که سرعت آن لایه به‌عنوان تابع توانی با عمق، افزایش می‌یابد و بر روی یک تا هشت لایه همگن با سرعت ثابت قرار گرفته است. حالت سوم متشکل از یک لایه در بالا که به پنج زیرلایه با تابع خطی افزایش سرعت به عمق تقسیم شده است. این لایه بر روی یک تا هشت لایه همگن با سرعت ثابت قرار گرفته است. حالت چهارم به مانند حالت اول شامل لایه‌های با سرعت همگن اما با توزیع ضخامت متفاوت در هر لایه به صورت $Z_i = a.b^i$ می‌باشد که در آن a و b مقادیری هستند که بر مبنای طول موج محاسبه می‌شوند. تعیین بهترین مدل براساس امتیاز نهایی برای هر کدام از این مدل‌ها توسط روش معیار داده آکایکه (akaike information criterion (AIC)) بدست می‌آید.

از پاسخ‌های بدست آمده از این روش می‌توان استنباط نمود که هر چند ممکن است پاسخ معیار برای یک مدل خاص در یک ساختگاه وضعیت

جدول ۲: مثالی از چگونگی بدست آوردن تابع "نسبت لایه بندی".

شماره لایه	تعیین مقدار کمینه ضخامت بالقوه لایه ها	تعیین مقدار بیشینه ضخامت بالقوه لایه ها
۱	$d_{\min 1} = \lambda_{\min} / 3$ $2 = 6 / 3$	$d_{\max 1} = \lambda_{\min} / 2$ $3 = 6 / 2$
۲	$d_{\min 2} = d_{\max 2-1} = d_{\max 1}$ 3	$d_{\max 2} = d_{\min 2} + E(\lambda_{\min} / 2)$ $9 = 3 + 2(3)$
۳	$d_{\min 3} = d_{\max 3-1} = d_{\max 2}$ 9	$d_{\max 3} = d_{\min 3} + E(d_{\max 3-1} - d_{\min 3-1})$ $21 = 9 + 2(9 - 3)$
۴	$d_{\min 4} = d_{\max 4-1} = d_{\max 3}$ 21	$d_{\max 4} = d_{\min 4} + E(d_{\max 4-1} - d_{\min 4-1})$ $45 = 21 + 2(21 - 9)$
نیم فضا	∞	∞

ارائه شده در شکل (۱) نقش گام اول در خصوص استفاده از فرم ظاهری منحنی برای تعیین تعداد لایه به خوبی مشهود است.

(ب) گام دوم - تخمین رابطه های فیزیکی بین سرعت های

انتشار موج برشی و موج سطحی

در گام دوم بهینه سازی پارامترهای مدل سازی استفاده از رابطه های فیزیکی یا تجربی بین سرعت فاز موج ریلی و سرعت موج برشی پیشنهادی، منطقی برای تخمین اولیه و واقع بینانه از سرعت موج برشی است. در این خصوص پژوهشگران رابطه های مختلف تجربی ارائه داده اند. برای مثال ژیا و همکاران (۱۹۹۹) تفاوت بین سرعت فاز موج ریلی و سرعت موج برشی را حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد برآورد کردند درحالی که استوکه (۲۰۰۴) رابطه (۱) را برای ارتباط سرعت موج ریلی و برشی پیشنهاد کرده است.

$$V_s = \frac{(1+\nu)}{(0.874+1.117\nu)} V_R \quad (1)$$

در این معادله کمیت V بیانگر نسبت پواسون است که با توجه به مقادیر مربوط به نسبت پواسون در خاک غیر اشباع (۰/۱۵ تا ۰/۳۵) تفاوت سرعت فاز موج ریلی و سرعت موج برشی برابر با ۶ تا ۱۱ درصد تخمین زده می شود.

(ج) گام سوم: تخمین عمق نفوذ موج سطحی با استفاده از

طول موج تعیین عمق نفوذ امواج سطحی

در آرایه ها می توان به کمک منحنی پاشندگی و رابطه بین طول موج و عمق نفوذ، عمق لایه سنگ بستر را تخمین زد. بطور معمول عمق نفوذ در روش های آرایه ای برابر با $\lambda/2.5$ تعریف می شود. یعنی اگر بیشینه طول موج قابل دسترس (که بر مبنای پاسخ آرایه و مبتنی بر هندسه آن تعیین می شود) ۵۰۰ متر باشد، اطلاعات بدست آمده از معکوس سازی تا عمق ۲۰۰ متری قابل استناد خواهد بود. این مسئله در لایه بندی تدریجی در زیر ساختگاه هایی که امپدانس بین لایه ها و سنگ بستر مشخص نباشد و فرکانس طبیعی ساختگاه به آسانی قابل محاسبه نباشد، حائز اهمیت است (شکل ۱).

در این مثال نمونه فرایند انتخاب لایه ها بصورت خودکار در لایه چهارم متوقف می شود زیرا مقدار عمق بدست آمده برای این لایه (۴۵ متر) تقریباً برابر ضخامت تفکیک پذیری ($150/3=50$ متر) می باشد.

نتایج امیدوار کننده این روش در یکی از ساختگاه های مربوط به پروژه اینترپاسیفیک، به ویژه در شرایط عدم دسترسی به اطلاعات اضافی، بیانگر قابلیت این روش در تعیین سیستماتیک مقادیر مربوط به پارامترهای مدل است؛ زیرا تنها اطلاعات مورد نیاز برای تعیین پارامترها از خود منحنی پاشندگی تجربی بدست می آید (گاروفالو و همکاران، ۲۰۱۶).

۲-۱ بهبود پارامترهای مدل به کمک مشاهدات و روابط

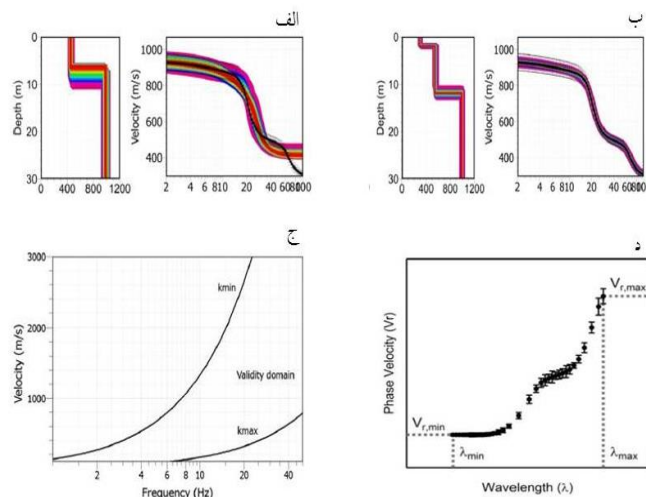
تجربی

برای بهینه سازی پارامتربندی مدل در نبود اطلاعات اضافی از قبیل داده های مرتبط با مقاطع زمین شناسی، گمانه ها و آزمایشات سطحی؛ می توان از منحنی پاشندگی به عنوان یک محدود کننده مدل با انتخاب قیده های معقول استفاده کرد. بهینه سازی پارامترهای مدل بدست آمده توسط یکی از روش های معرفی شده در قسمت قبل در سه گام متوالی پیشنهاد می شود:

الف) گام اول - مشاهده فرم ظاهری منحنی پاشندگی برای

تعیین تعداد لایه:

بیشتر تعداد نقاط عطف قابل مشاهده بر روی منحنی پاشندگی امواج سطحی با تعداد لایه های ساختار زمین شناختی محدوده مورد مطالعه، ارتباط مستقیم دارد. بنابراین در گام اول مشاهده شکل ظاهری منحنی و تخمین تعداد نقاط عطف تا حدودی در تعیین تعداد لایه ها کمک موثری می نماید. پس از تعیین تقریبی تعداد لایه ها و اجرای فرایند معکوس سازی، اگر منحنی تجربی و منحنی تولید شده در فرکانس های پایین دارای تطابق خوبی بودند و در فرکانس های بالا تطابق خوبی نداشته باشند، دلیلی بر عدم تخمین درست سرعت لایه های کم عمق است. بنابراین با اضافه نمودن یک لایه کم سرعت در عمق کم، افزایش تطابق بهتر منحنی تجربی و مصنوعی تا حدودی فراهم می شود. مطابق نمونه



شکل ۱: الف) تعیین نادرست تعداد لایه‌ها (دو لایه) و عدم تطابق مدل تجربی و مدل تئوری در فرکانس‌های بالا، ب) تعیین درست لایه‌ها (۳ لایه) و تطابق مدل‌های تجربی و تولید شده (فوتی و همکاران ۲۰۱۷)، ج) تعیین بیشینه و کمینه سرعت فاز موج ریلی با توجه به مقادیر کمینه و بیشینه عدد موج بدست آمده از پاسخ تئوری آرایه، پایین چپ و د) تعیین کمینه و بیشینه طول موج بر اساس کمینه و بیشینه سرعت فاز موج ریلی.

ویژگی‌های ژئوتکنیکی مصالح مانند سرعت موج برشی بدست نمی‌دهد. علاوه بر این بدلیل ناهمگنی موجود در آبرفت‌های شهر تهران، امکان تصمیم‌گیری در رابطه با خواص ژئوتکنیکی خاک بسیار دشوار است. مطالعات ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای تهران بزرگ توسط جایکا (۲۰۰۰) و مطالعات تکمیلی ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای در جنوب و شمال تهران توسط جعفری و همکاران (۱۳۸۱ و ۱۳۸۳)، اولین مطالعات مربوط به تعیین خواص این آبرفت‌ها و اثرات ساختگاه در تهران بوده‌اند. اولین مطالعه جامع و تجربی اثر ساختگاه در تهران توسط حق‌شناس (۲۰۰۵) به انجام رسید. در این مطالعه شبکه‌ای مشتمل بر ۱۳ ایستگاه لرزه‌نگاری به مدت ۵ ماه در نقاط مختلف شهر تهران نصب گردید و ۲ ایستگاه به‌عنوان مرجع بر روی سنگ قرار گرفت. علاوه بر آن، حدود ۶۰ برداشت تک ایستگاهی نیز در مناطق مختلف شهر انجام گرفته است. این مطالعه بر مبنای روش نسبت طیفی (ایستگاه مرجع) به کمک داده‌های ثبت‌شده در شبکه موقت لرزه‌نگاری و همچنین روش H/V می‌باشد. بر خلاف انتظار، نتایج بدست‌آمده پدیده تشدید قابل ملاحظه دامنه در یک محدوده پهن فرکانسی را نشان می‌دهد. دلایلی که به کمک آن می‌توان این پدیده را توصیف کرد وجود سنگ بستر سخت در زیر آبرفت‌های بسیار ضخیم و یا اثرات دو و سه‌بعدی ناشی از ساختار پیچیده هندسه حوضه آبرفتی تهران می‌باشد. اثبات هرکدام از این فرضیه‌ها مستلزم شناخت ساختار عمیق آبرفت‌های شهر تهران است. با این حال درستی وجود آبرفت عمیق با گرادیان تدریجی سرعت در مطالعات بعدی نیز تا حدود زیادی به اثبات رسیده است (میرجلیلی ۱۳۸۶، شعبانی ۱۳۸۹، فضولی ۱۳۹۳).

بنابراین هم بر مبنای مشاهدات زمین‌شناسی و هم بر اساس مطالعات ژئوتکنیکی غیرتخریبی شهر تهران به احتمال زیاد دارای یک آبرفت ضخیم با امپدانس بسیار کم بین لایه‌ها می‌باشد. همین مسئله انجام

پس از بررسی اولیه منحنی پاشندگی و تعیین تعداد لایه‌های مناسب، سرعت موج برشی و عمق نفوذ تخمینی می‌توان پارامترهای مدل را با دقت مناسبی تعیین نمود.

در مرحله بعد انتخاب بازه مناسب سرعتی برای الگوریتم جستجوی سراسری حائز اهمیت است. انتخاب بازه کوچک برای پارامترها باعث محدود شدن فضای احتمالاتی مورد بررسی می‌شود و از طرف دیگر انتخاب بازه خیلی بزرگ باعث افزایش بیش از حد زمان محاسبات و همچنین کاهش احتمال رسیدن به کمینه اصلی در تابع خطا خواهد شد. معمولاً راهکار مناسب برای انتخاب بازه بر مبنای تجربه و شروع از بازه نسبتاً بزرگ و کاهش آن با توجه به نتایج بدست‌آمده برای هر مرحله، سعی و خطا خواهد بود.

۳- تعیین پارامترهای مدل اولیه برای ساختگاه عمیق

در شهر تهران

۳-۱ پیشنهاد اولیه بر مبنای زمین‌شناسی و مطالعات گذشته

شهر تهران با توجه به موقعیت زمین‌شناختی و اهمیت استراتژیک آن، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. این شهر به مانند بسیاری از شهرها و مراکز جمعیتی جهان بر روی نهشته‌های آبرفتی عمیق قرار دارد و مطالعات مختلفی برای شناخت ساختار آبرفت‌های آن صورت گرفته است. بیشتر این مطالعات تا به امروز بر پایه مفاهیم زمین‌شناسی بوده است.

اولین و مهمترین مطالعه توسط ریین (۱۹۶۶)، این نهشته‌ها را بر حسب سن به چهار سری A، B، C و D طبقه‌بندی می‌کند. این نوع طبقه‌بندی مزایایی مانند امکان ارزیابی اولیه آبرفت‌ها، شناخت شرایط تشکیل و تفکیک بر اساس زمان تشکیل را دارد اما اطلاعات مفیدی در خصوص

اولین قسمت پردازش قبل از تفسیر منحنی پاشندگی امواج سطحی مربوط به همگن بودن خاک در محل برداشت آرایه است. زیرا فرض اولیه در روش های آرایه ای این است که امواج تخت به طور یکسان به تمامی ایستگاه ها می رسند. این مسأله مخصوصاً در ساختگاه هایی مانند ساختگاه PRD که دارای عوارض توپوگرافی مشخص و دارای احتمال یک بعدی نبودن ساختگاه است بیشتر حائز اهمیت است.

برای بررسی این مسأله می توان از روش H/V استفاده نمود. اگر منحنی H/V مربوط به تمامی ایستگاه ها هم شکل یا دارای تفاوت های جزئی باشند، ساختگاه یک بعدی و همگن خواهد بود. در غیر این صورت به منظور کنترل کیفیت منحنی های پاشندگی، پاسخ ها باید در حضور و عدم حضور ایستگاه متفاوت بررسی شوند. شکل (۳) زیر منحنی های H/V مربوط به این ساختگاه را نشان می دهد. با توجه به اینکه یکی از ایستگاه ها دارای تفاوت روشنی بوده، بنابراین منحنی پاشندگی باید در هر دو حالت بود و نبود این ایستگاه مورد بررسی قرار گیرد. از مشاهده پاسخ منحنی پاشندگی در این دو حالت می توان نتیجه گرفت این مسأله تاثیر چندانی در پاسخ این آرایه ندارد، بنابراین می توان از اثرات آن ایستگاه صرف نظر کرد.

قدم بعدی برای استخراج مدل های پارامتری، استخراج مناسب مقادیر منحنی پاشندگی می باشد. شکل (۴) نمایش لگاریتمی منحنی در فضای سرعت-فرکانس و چگونگی استخراج منحنی مناسب را نشان می دهد. با توجه به شکل ظاهری منحنی که یک نمودار تدریجی بدون هیچ گونه نقطه عطف ریاضی است در مورد تعداد لایه ها نمی توان نظر قطعی داد. این مسأله با توجه به پیش بینی های موجود در رابطه با آبرفت های شهر تهران و بر مبنای مطالعات گذشته دور از انتظار نیست. برای لایه بندی پارامترهای مدل در این گونه خاک، پیشنهاد می شود همواره تعداد لایه ها از مقدار کم شروع شده و سپس با افزایش آن ها تا زمان دستیابی به کمترین خطا فرایند معکوس سازی ادامه یابد.

عملیات معکوس سازی و چگونگی انتخاب پارامترهای مدل برای ساختگاه های موجود در شهر تهران را مشکل می نماید.

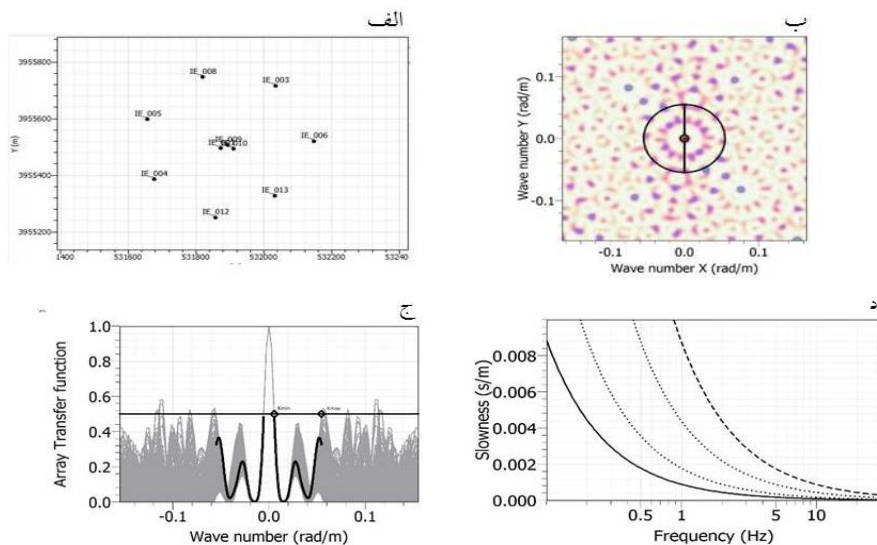
هر چند چنین ساختگاه هایی بسیار کم مورد مطالعه قرار گرفته اند اما بصورت مرسوم پیشنهاد می شود در این گونه موارد تعداد لایه ها یا زیر لایه ها را افزایش داده و در کنار آن با تحمیل محدودیت های منطقی مانند افزایش ضخامت به صورت تصاعد هندسی یا افزایش خطی یا توانی سرعت در لایه به مدل مناسب پارامتری دست یافت.

۳-۲ آماده سازی و پردازش داده ها

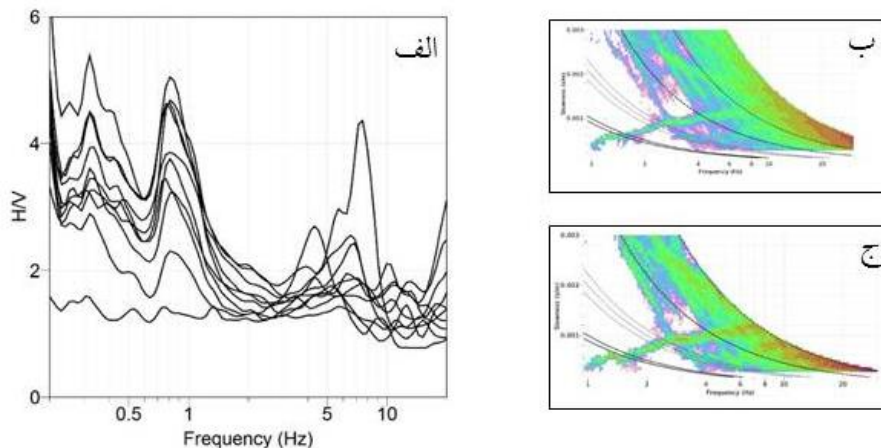
ساختگاه انتخابی به منظور مطالعه اولیه روش های بیان شده، ساختگاه PRD در حوالی پارک پردیسان در مرکز شهر تهران انتخاب شده است. توپوگرافی پیچیده در مجاورت گسل پردیسان و نبود اطلاعات کافی از مطالعات قبلی، ضرورت انجام بررسی های تعیین مدل را بیش از سایر نقاط برجسته می کند. چیدمان شبکه آرایه در این محل که از دو دایره تو در تو متشکل از ۳ و ۷ دستگاه لرزه نگار تشکیل شده است. چیدمان و مقطع عرضی تابع انتقال آرایه با هدف مشاهده کمینه و بیشینه پاسخ آرایه مطابق شکل (۲) نمایش داده شده است. کمینه پاسخ عدد موج به عرض L

لب اصلی (Main lobe) (مرکزی) پرتو تابع انتقال وابسته است و بیشینه عدد موج بر مبنای اولین لب کناری که شدت بالای ۵۰ درصد دارد، محاسبه می شود. این مقادیر از این جهت حائز اهمیت می باشند که در بازه های فرکانسی دیگر ممکن است شدت پاسخ لب کناری به حدی برسد که قابل تمایز با لب اصلی نباشد.

به علاوه بازه فرکانسی قابل استفاده از داده مشاهداتی منحنی پاشندگی وابسته به مقدار کمینه و بیشینه آن می باشد. این پارامتر اساسی در تعیین مدل خود وابسته به هندسه و چگونگی چیدمان شبکه آرایه ای است.



شکل ۲: الف) چینش شبکه آرایه PRD، ب) پاسخ آرایه در فضای عدد موج، ج) مقطع عرضی تابع انتقال آرایه با بیشینه و کمینه عدد موج قابل محاسبه بیشینه و کمینه عدد موج قابل محاسبه بر حسب فرکانس.

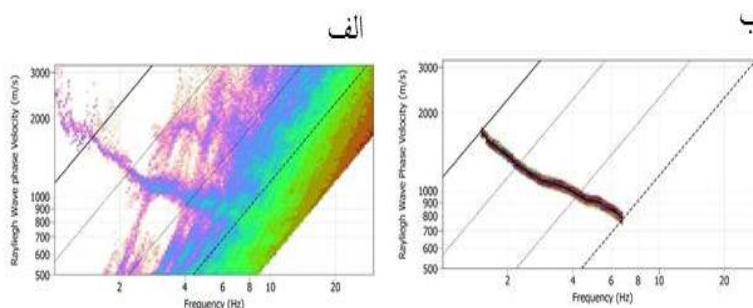


شکل ۳: الف) منحنی های H/V برای تمامی ایستگاه‌های موجود در آرایه، ب) منحنی پاشندگی امواج سطحی با حضور تمامی ایستگاه‌ها، ج) منحنی پاشندگی امواج سطحی پس از حذف ایستگاه متفاوت.

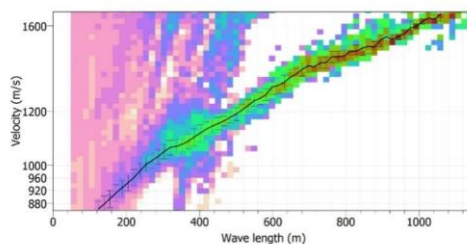
$$d_s = \frac{\lambda}{2.5} \quad (2)$$

کمینه و بیشینه سرعت فاز موج ریلی در محدوده کمینه و بیشینه عدد موج برابر با ۸۶۰ و ۱۶۸۰ متر بر ثانیه می‌باشند (شکل ۴). بر همین اساس محدوده طول موج قابل بازیابی در این بازه سرعتی برابر با ۱۲۰ تا ۱۰۵۰ متر محاسبه می‌شود (شکل ۵). با توجه به رابطه ۲ عمق نفوذ این آرایه برای تعیین سرعت موج برشی از ۴۸ تا ۴۲۰ متر خواهد بود.

همچنین بنابر مقادیر مشاهده شده سرعت فاز موج ریلی از روی منحنی (استوکه و همکاران، ۲۰۰۴)، می‌توان سرعت موج برشی لایه‌های میانی را در حدود ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متر بر ثانیه تخمین زد. همچنین با دانستن سرعت فاز می‌توان به کمک رابطه میان طول موج و عمق، (در نمایش سرعت فاز - طول موج)، عمق نفوذ لایه‌ها را در محدوده سرعتی مشخص شده بدست آورد. برای این منظور مقدار طول موج در مقادیر کمینه و بیشینه سرعت محاسبه شده و مقادیر کمترین و بیشترین عمق قابل دسترس در آن محدوده توسط رابطه (۲) محاسبه شود (فوتی ۲۰۱۷).



شکل ۴: الف) منحنی پاشندگی موج ریلی برای ایستگاه PRD، ب) پیک کردن منحنی و فیلتر کردن داده‌های ناخواسته برای بدست آوردن منحنی مناسب.



شکل ۵: تعیین عمق نفوذ منحنی پاشندگی به کمک تعیین مقادیر مربوط به بیشینه و کمینه طول موج در بازه مربوط به کمینه و بیشینه سرعت فاز موج ریلی.

۳-۳ استخراج پارامترهای مدل بدون اطلاعات اضافی

در حالت کلی همواره پیشنهاد می شود برای دستیابی به سرعت موج برشی در اعماق کم (زیر ۵۰ متر) از روش های ژئوفیزیکی مانند MASW و برای دستیابی به حوزه های عمیق (بالای ۵۰۰ متر) از آرایه هایی با قطر و تعداد دستگاه بیشتر و یا در صورت امکان از روش های مبتنی بر انرژی زلزله ها استفاده شود. با این حال در این مرحله فرض بر این است که به غیر از منحنی پاشندگی اطلاعات دیگری برای فرایند معکوس سازی و دستیابی به سرعت موج برشی وجود ندارد.

مدل های مورد بررسی به ترتیب بصورت TG-DG4-DG3-DG2-DG1-RN برای مدل های معرفی شده توسط رنالی (۲۰۱۰) و دی جیلیو (۲۰۱۰) و تاگوته (۲۰۱۶)، روش نسبت لایه بندی، معرفی می شوند. پارامترهای ابتدایی برای هر یک از این روش ها با توجه به نتایج حاصل از منحنی پاشندگی و با اعمال شرایط گفته شده به هر یک از مدل ها تعریف می شوند.

تعداد لایه ها در مدل های RN و DG مشخص نیست، با این حال با توجه به تدریجی بودن خاک در شهر تهران نیاز به انتخاب لایه های نسبتاً زیاد برای رسیدن به مدل واقعی تر خواهد بود، زیرا انتخاب تعداد

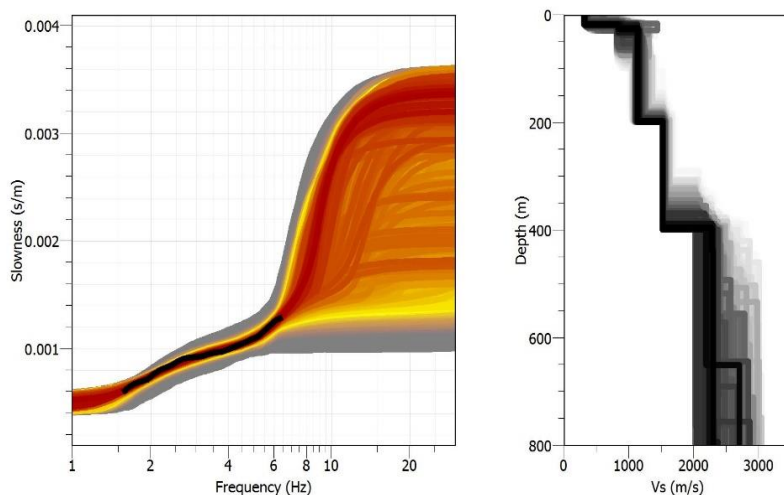
لایه های کم باعث ناتوانی عملیات معکوس سازی در تعیین لایه بندی مناسب خواهد شد. با توجه به روابط ذکر شده تعداد مناسب لایه ها، ۵ لایه خواهد بود. از این تعداد، ۴ لایه بر اساس مقادیر طول موج و لایه آخر بر مبنای عمق حدودی بدست آمده از مطالعات قبلی به عنوان عمق سنگ بستر انتخاب شده است. لایه ها می توانند بصورت همگن یا همراه با زیرلایه های خطی، خطی افزایشی، خطی کاهشی و یا توانی تعریف شوند.

همچنین مقادیر مربوط به نسبت پواسون و چگالی به دلیل تاثیر اندکی که در نتایج نهایی خواهند داشت در تمامی مدل ها ثابت در نظر گرفته می شوند. مقدار نسبت پواسون ۰/۲ تا ۰/۵ و چگالی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب خواهد بود. سرعت موج فشاری مرتبط با سرعت موج برشی و بنا بر مقدار نسبت پواسون محاسبه می شود.

پارامترهای هر یک از مدل ها در جداول ۳ تا ۸ نشان داده شده اند. همچنین در شکل های ۶ تا ۱۱ تعیین پارامترها به همراه معکوس سازی منحنی پاشندگی و پروفیل مربوط به هر کدام از روش ها نمایش داده شده اند.

جدول ۳: تعیین پارامترها برای مدل رنالی (۲۰۱۰).

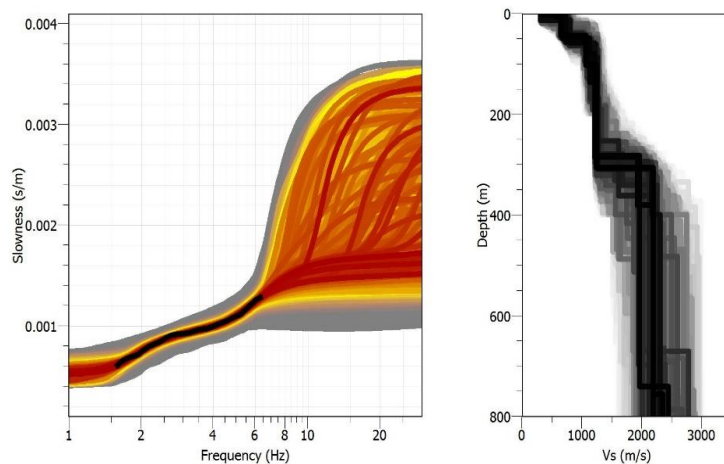
مدل RN	نوع لایه	زیرلایه	عمق / ضخامت	سرعت
لایه اول (سطحی)	همگن	۰	عمق: ۳۰ متر	۳۰۰-۸۰۰
لایه دوم	همگن	۰	عمق: ۱۰۰ متر	۸۰۰-۱۵۰۰
لایه سوم	همگن	۰	عمق: ۲۰۰ متر	۱۰۰۰-۲۵۰۰
لایه چهارم	همگن	۰	عمق: ۴۰۰ متر	۱۵۰۰-۳۵۰۰
لایه پنجم	همگن	۰	عمق: ۱۲۰۰ متر	۲۰۰۰-۳۵۰۰
مدل RN مرحله دوم	نوع لایه	زیرلایه	عمق / ضخامت	سرعت
لایه اول (سطحی)	خطی	۵	عمق: ۳۰ متر	۳۰۰-۶۰۰
لایه دوم	خطی	۲	عمق: ۱۰۰ متر	۵۰۰-۸۰۰
لایه سوم	خطی	۲	عمق: ۲۰۰ متر	۸۰۰-۱۲۰۰
لایه چهارم	خطی	۲	عمق: ۴۰۰ متر	۱۲۰۰-۱۵۰۰
لایه پنجم	خطی	۲	عمق: ۱۲۰۰ متر	۱۵۰۰-۲۵۰۰
			عمق: ۴۰۰ متر	۲۵۰۰-۳۰۰۰
			عمق: ۱۲۰۰ متر	۳۰۰۰-۳۵۰۰
			عمق: ۲۵۰۰-۳۵۰۰	



شکل ۶: معکوس‌سازی منحنی پاشندگی و پروفیل سرعت موج برشی برای مدل رنالیبر (۲۰۱۰).

جدول ۴: تعیین پارامترها برای مدل دی جیلیو ۱ (۲۰۱۰).

مدل DG1	نوع لایه	زیر لایه	عمق / ضخامت	سرعت
لایه اول (سطحی)	همگن	۰	عمق: ۵۰ متر	۳۰۰-۸۰۰
لایه دوم	همگن	۰	عمق: ۱۰۰ متر	۶۰۰-۱۲۰۰
لایه سوم	همگن	۰	عمق: ۲۰۰ متر	۱۰۰۰-۲۰۰۰
لایه چهارم	همگن	۰	عمق: ۴۰۰ متر	۱۲۰۰-۳۰۰۰
لایه پنجم	همگن	۰	عمق: ۸۰۰ متر	۱۵۰۰-۳۵۰۰

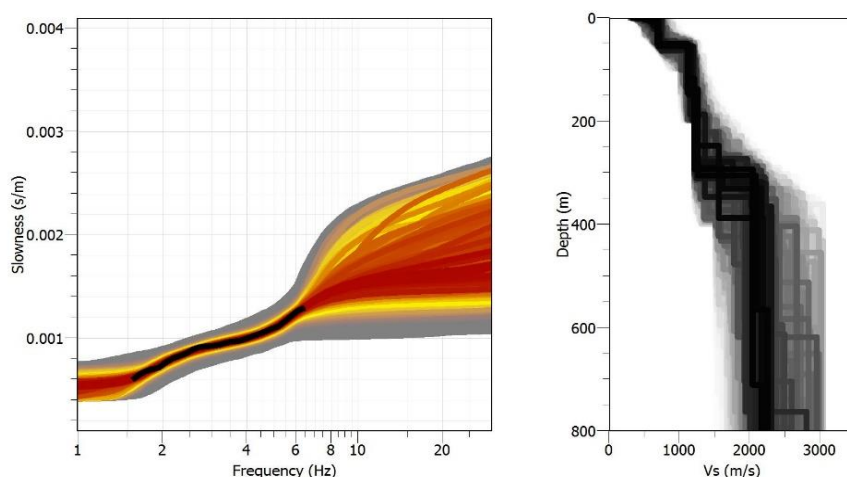


شکل ۷: معکوس‌سازی منحنی پاشندگی و پروفیل سرعت موج برشی برای مدل دیجیلیو ۱ (۲۰۱۰).

جدول ۵: تعیین پارامترها برای مدل دیجیلیو ۲ (۲۰۱۰).

مدل DG2	نوع لایه	زیر لایه	عمق / ضخامت	سرعت
لایه اول (سطحی)	تابع توانی	۵	عمق: ۵۰ متر	۳۰۰-۶۰۰
لایه دوم	همگن	۰	عمق: ۱۰۰ متر	۵۰۰-۸۰۰
لایه سوم	همگن	۰	عمق: ۲۰۰ متر	۶۰۰-۱۲۰۰
لایه چهارم	همگن	۰	عمق: ۴۰۰ متر	۱۰۰۰-۲۰۰۰
لایه پنجم	همگن	۰	عمق: ۸۰۰ متر	۱۵۰۰-۳۵۰۰

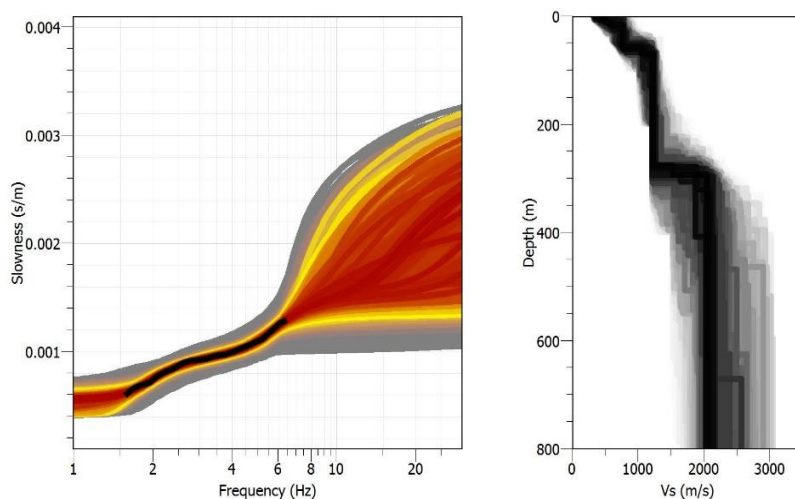
سلطانی و همکاران، تعیین پارامترهای بهینه مدل اولیه در معکوس سازی منحنی های پاشندگی امواج سطحی در حوضه های عمیق ، صفحات ۳۳۳-۳۴۸.



شکل ۸: معکوس سازی منحنی پاشندگی و پروفیل سرعت موج برشی برای مدل دیجیلو ۲ (۲۰۱۰).

جدول ۶: تعیین پارامترها برای مدل دیجیلو ۳ (۲۰۱۰).

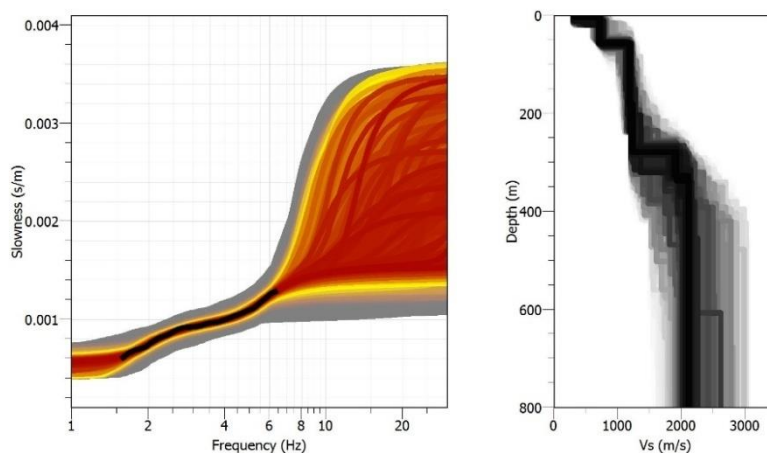
سرعت	عمق / ضخامت	زیرلایه	نوع لایه	مدل DG3
۳۰۰-۶۰۰	عمق: ۵۰ متر	۵	خطی	لایه اول (سطحی)
۵۰۰-۸۰۰	عمق: ۱۰۰ متر	۰	همگن	لایه دوم
۶۰۰-۱۲۰۰	عمق: ۲۰۰ متر	۰	همگن	لایه سوم
۱۰۰۰-۲۰۰۰	عمق: ۴۰۰ متر	۰	همگن	لایه چهارم
۱۲۰۰-۳۰۰۰	عمق: ۸۰۰ متر	۰	همگن	لایه پنجم



شکل ۹: معکوس سازی منحنی پاشندگی و پروفیل سرعت موج برشی برای مدل دیجیلو ۳ (۲۰۱۰).

جدول ۷: تعیین پارامترها برای مدل دیجیتال ۴ (۲۰۱۰).

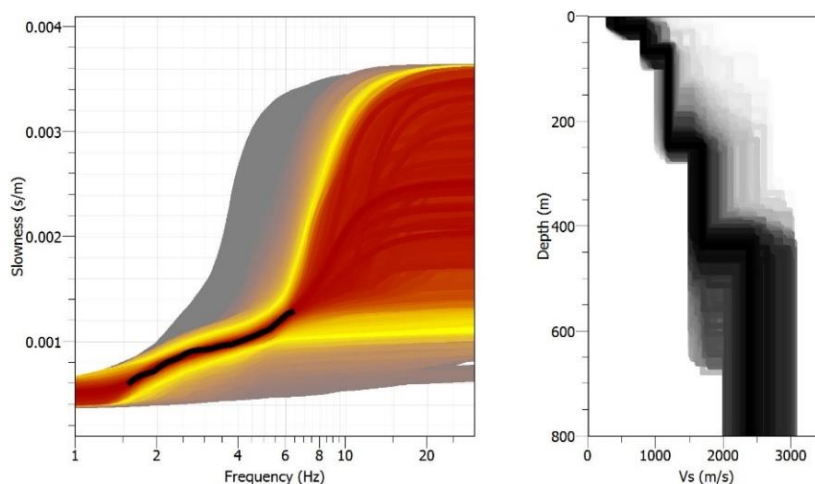
مدل DG4	نوع لایه	زیر لایه	عمق / ضخامت	سرعت
لایه اول (سطحی)	همگن	۰	عمق: ۲۰ متر	۳۰۰-۸۰۰
لایه دوم	همگن	۰	ضخامت: ۱۲۰ متر	۶۰۰-۱۲۰۰
لایه سوم	همگن	۰	ضخامت: ۲۴۰ متر	۱۰۰۰-۲۰۰۰
لایه چهارم	همگن	۰	ضخامت: ۴۲۰ متر	۱۲۰۰-۳۰۰۰
لایه پنجم	همگن	۰	ضخامت: ۸۴۰ متر	۱۵۰۰-۳۵۰۰



شکل ۱۰: معکوس‌سازی منحنی پاشندگی و پروفیل سرعت موج برشی برای مدل دیجیتال ۴ (۲۰۱۰).

جدول ۸: تعیین پارامترها برای مدل تاگوئه (۲۰۱۶).

مدل TG	نوع لایه	زیر لایه	عمق / ضخامت	سرعت
لایه اول (سطحی)	خطی	۵	عمق لایه: ۴۰ متر	۳۰۰-۸۰۰
لایه دوم	همگن	۰	ضخامت: ۲۰ متر	۶۰۰-۱۰۰۰
لایه سوم	همگن	۰	ضخامت: ۱۲۰ متر	۸۰۰-۱۵۰۰
لایه چهارم	همگن	۰	ضخامت: ۲۴۰ متر	۱۰۰۰-۲۰۰۰
لایه پنجم	همگن	۰	ضخامت: ۷۸۰ متر	۲۰۰۰-۳۵۰۰



شکل ۱۱: معکوس‌سازی منحنی پاشندگی و پروفیل سرعت موج برشی برای مدل تاگوئه (۲۰۱۶).

جدول ۹: نتایج آزمایش ژئوفیزیک سطحی به روش شکست مرزی در محل آرایه PRD.

طول و عرض جغرافیایی	عمق	جنس لایه ها	سرعت موج فشاری	سرعت موج برشی
۵۱,۳۵۳۵۸۰	۵	GP	۶۰۰	۳۶۰
۳۵,۷۴۰۳۴۸	۲۵	GM	۱۳۳۰	۷۶۰

۴- بررسی و تفسیر نتایج

نتایج اولیه در این ساختگاه نشان می دهد استفاده تنها از منحنی پاشندگی بدون داشتن اطلاعات اضافی، باعث وابستگی شدید پاسخ به مدل پارامتری اولیه خواهد شد بطوری که تباین سرعتی عمیق در پروفیل اول در ۴۰۰ متر، در پروفیل دوم تا پنجم در ۳۰۰ متر و در پروفیل ششم در ۲۵۰ متر و ۴۰۰ متر اتفاق افتاده است (شکل ۶ تا ۱۱). این مساله ناشی از این واقعیت است که در زمانی که اطلاعات اضافی در مطالعه معکوس سازی منحنی های پاشندگی وجود نداشته باشد منحنی در قسمت هایی که ورودی مشخصی ندارد به سمت مقادیر مدل اولیه همگرا می شود. انتخاب پارامتر اولیه خوب تا حد زیادی این مساله را کاهش می دهد اما همواره باید سعی نمود از اطلاعات اضافی دیگر نیز در فرایند معکوس سازی بهره برد.

این اطلاعات اضافی بطور کلی عبارتند از: داده های زلزله، نگارهای گمانه ای، آزمایشات تعیین سرعت موج فشاری و فرکانس تشدید یا منحنی H/V.

۴-۲ استخراج پارامترهای مدل همراه با اطلاعات اضافی

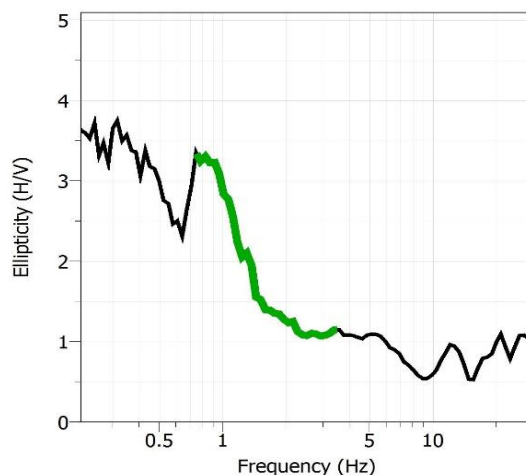
برای کم کردن عدم قطعیت پروفیل های سرعتی، استفاده از اطلاعات اضافی اشاره شده اجتناب ناپذیر است. در این مرحله به منظور تدقیق کردن لایه های سطحی از داده های مربوط به آزمایشات ژئوفیزیک سطحی به روش شکست مرزی مربوط به ریز پهنه بندی شمال شهر تهران استفاده شده است (جعفری و همکاران، ۱۳۸۰). نتایج این آزمایش در محل آرایه لرزه ای مورد مطالعه (ایستگاه PRD) تا عمق ۲۵ متر به صورت جدول (۹) می باشد.

شایان ذکر است، سرعت موج فشاری اگر چه در فرایند معکوس سازی سرعت موج برشی پارامتر تاثیرگذاری نیست اما با در اختیار داشتن مقادیر مربوط به آن می توان تفاوت میان خاک های غیراشباع با سرعت کم موج فشاری و خاک های اشباع با سرعت زیاد موج فشاری را بدست آورد و از آن به عنوان پارامتر محدودکننده معکوس سازی استفاده کرد. همچنین با توجه به شکل ۱۲، منحنی H/V بیضی واری در محل آرایه

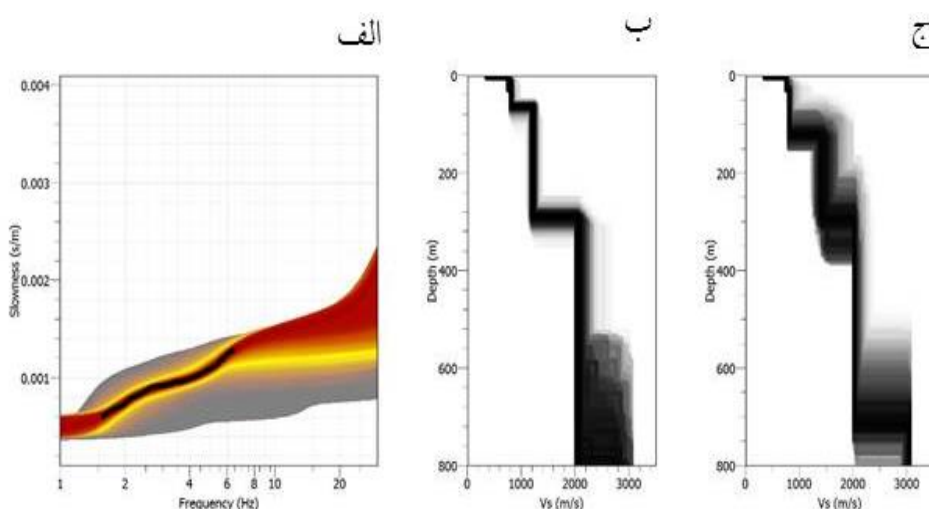
دارای قله در فرکانس ۰/۸ هرتز می باشد. معمولاً، اگر منبع چشمه ارتعاشات در نزدیکی و یا داخل لایه ی رسوبی قرارگرفته باشد، می توان قله ی منحنی نسبت H/V را به بیضی واری مد اصلی امواج ریلی نسبت داد. در منحنی بیضی واری محدوده ی فرکانسی قله تا کمینه اول در منحنی های نسبت طیفی، یعنی فاصله ی بین محو شدن مؤلفه ی قائم تا محو شدن مؤلفه ی افقی به عنوان بخش قابل اطمینان و قابل استفاده در عملیات معکوس سازی تعریف می شود (هوبیگر ۲۰۰۹). بر همین اساس از یال سمت راست منحنی بیضی واری می توان به عنوان یک داده محدود کننده به جهت استفاده در عملیات معکوس سازی استفاده کرد.

۴-۱ تفسیر نتایج

شکل (۱۳) نتایج مربوط به معکوس سازی توسط مدل نهایی همراه با اضافه کردن اطلاعات اضافی را نشان می دهد. همان طور که در شکل منحنی پاشندگی مشخص شده است، استفاده از اطلاعات اضافی باعث محدودتر شدن مدل های مستقیم و کمتر شدن عدم قطعیت در پاسخ معکوس سازی منحنی شده است. از طرفی با توجه به اینکه تعیین دقیق لایه های سطحی می تواند بر روی نتیجه معکوس سازی در لایه های عمیق تر تاثیرگذار باشد، شاهد این موضوع هستیم که مقداردهی دقیق لایه های سطحی به کمک نتایج آزمایش ژئوفیزیک سطحی باعث تغییر در رفتار لایه های عمیق تر شده است و دو تباین ضعیف سرعتی در عمق ۲۵۰ و ۴۰۰ متری تبدیل به یک تباین قوی تر سرعتی در عمق ۳۰۰ متری شده است. با این حال در عمق های خیلی زیاد عدم قطعیت بالا همچنان به چشم می خورد. این مشکل با اضافه کردن قله فرکانس تشدید و منحنی بیضی واری موج ریلی تا حد زیادی برطرف می شود. با اضافه کردن این دو پارامتر ورودی، یک تباین سرعتی مشخص در عمق ۷۵۰ متری آشکار می شود که با شواهد زمین شناسی مربوط به سازند A در شهر تهران همخوانی نسبتاً خوبی دارد (شکل ۱۳).



شکل ۱۲: منحنی بیضی‌واری مربوط به ایستگاه ۰۱۳ آرایه PRD.



شکل ۱۳: الف) معکوس‌سازی منحنی پاشندگی با مدل TG و اطلاعات مربوط به آزمایش ژئوفیزیک سطحی ب) پروفیل سرعت موج برشی مربوط به معکوس‌سازی منحنی پاشندگی، ج) پروفیل سرعت موج برشی با اضافه نمودن فرکانس تشدید و منحنی بیضی‌واری موج ریلی به مدل اولیه.

مقادیر بزرگ‌تری دارد، انتخاب شد. تعیین تعداد لایه‌ها در این ساختگاه از روش سیستماتیک و دو لایه روی سنگ بستر بر مبنای مقادیر طول موج محاسبه شد. نتایج مربوط به معکوس‌سازی منحنی پاشندگی و پروفیل مربوط در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

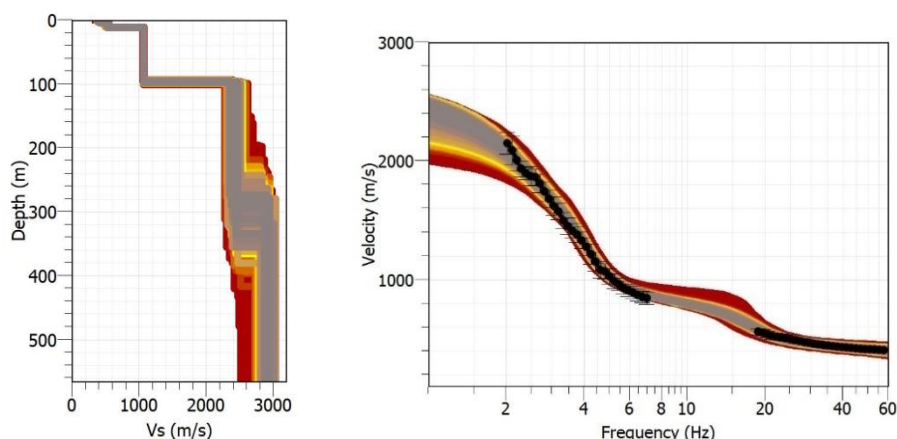
در این مرحله برای راستی‌آزمایی پروفیل سرعتی می‌توان منحنی بیضی‌واری مدل سرعت نهایی را محاسبه نموده (خط سیاه) و در بازه‌ی فرکانس منحنی پاشندگی، با بیضی‌واری محاسبه‌شده از آرایه مقایسه کرد. این مقایسه زمانی که مدل سرعتی در اعماق زیاد خطای زیادی داشته باشد، در فرکانس‌های پایین قابل‌بازایی نخواهد بود. شکل ۱۵ نشان می‌دهد انتخاب لایه‌ها توسط مفروضات اشاره شده و فرایند معکوس‌سازی از دقت بالایی برخوردار بوده و دو منحنی تجربی و مدل شده بر اساس مدل سرعتی دارای هم‌پوشانی مناسبی می‌باشند.

۳-۴ راستی‌آزمایی روش‌های تعیین مدل اولیه

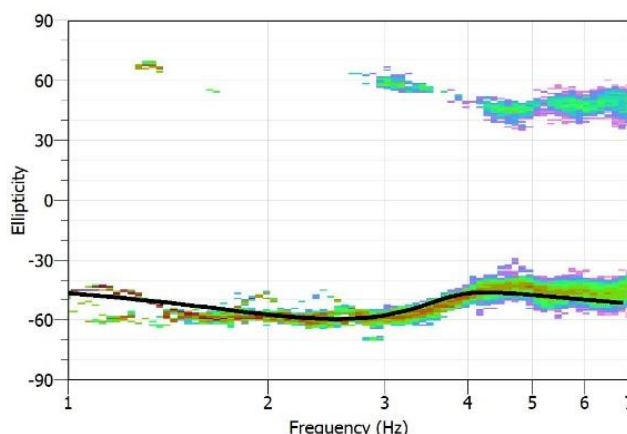
در مطالعات تجربی در ساختگاه عمیق، به‌علت محدودیت کمینه عدد موج نمی‌توان درستی امپدانس عمیق را مستقیماً از روی منحنی پاشندگی محاسبه کرد. برای نشان‌دادن درستی فرایند تعیین مدل اولیه برای معکوس‌سازی بر مبنای روش‌های تجربی، باید ساختگاهی مورد بررسی قرار گرفته شود که در محدوده فرکانسی منحنی پاشندگی به سنگ بستر رسیده باشد.

در این حالت اگر محل سنگ بستر با استفاده از منحنی پاشندگی و مدل اولیه مناسب به درستی معکوس‌سازی شده باشد می‌توان به کمک محاسبه مستقیم بیضی‌واری از روی مدل نهایی بدست آمده و مقایسه آن با بیضی‌واری تجربی، درستی مدل نهایی را مشخص کرد.

بدین منظور ساختگاه TKH در شرق تهران و در مجاورت کوه‌های سه پایه که عمق ضخامت در آن کم بوده و فرکانس طبیعی سنگ بستر



شکل ۱۴: راست) معکوس سازی منحنی های پاشندگی بدست آمده از آزمایش ژئوفیزیکی MASW و آرایه چپ) پروفیل سرعت موج برشی برای ایستگاه TKH.



شکل ۱۵: مدل محاسبه شده نهائی در مقایسه با مدل مستقیم (خط ممتد مشکی) در ایستگاه TKH.

آرایه ای ارتعاشات محیطی (مطالعه موردی در شهر تهران)، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ۱۳۹۳. میرجلیلی، م.، "کاربرد روش آرایه ای خرد لرزه ها در تعیین پروفیل سرعت موج برشی لایه های تحت الارضی در یک سایت نمونه"، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ۱۳۸۶.

Cercato, M., (2009), addressing non-uniqueness in linearized multichannel surface wave inversion: Geophysical Prospecting, 57, 27-47.

Cox B.R, Teague D.P (2016). Layering ratios: a systematic approach to the inversion of surface wave data in the absence of A-priori information. Geophys J Int 207:422-438.

Di Giulio G, Savvaidis A, Ohrnberger M, Wathlet M, Cornou C, Knapmeyer Endrun B, Renalier F, Theodoulidis N, Bard P-Y. (2012). Exploring the model space and ranking a best class of models in surface wave. Dispersion inversion: application at European strong-motion sites. Geophysics 77(3):B1147-66

Foti, S., C. Comina, D. Boiero, and L. V. Socco, (2009).

منابع

جعفری، م. ک. و همکاران "مطالعات تکمیلی ریز پهنه بندی ژئوتکنیک لرزه ای جنوب تهران". پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ۱۳۸۱.

جعفری، م. ک. و همکاران "مطالعات تکمیلی ریز پهنه بندی لرزه ای شمال شهر تهران"، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ۱۳۸۳.

جوان دلویی، غ.، تابع انتقال گیرنده لرزه ای و کاربرد آن در محاسبه ساختار پوسته و جبه بالائی"، پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، سال چهارم، شماره چهارم، زمستان ۸۰، تهران، ص ۲۱-۲۸، ۱۳۸۰.

شعبانی، ا.، "بهینه سازی روش خود همبستگی مکانی برای تعیین مدل سرعت در مطالعه اثر ساختگاه" موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۹.

فضولی، م.، " بررسی ویژگی های لرزه ای آبرفت های عمیق با تحلیل

- Single station determination of Rayleigh wave ellipticity by using the random decrement technique (RayDec), *Geophysical Research Letter*, 36 L14303
- JICA (2000). Study on Seismic Microzoning of the Greater Tehran Area. Centre for Earthquake and Environmental Studies, Islamic Republic of Iran
- Renalier F, Jongmans D, Savvaidis A, Wathelet M, Endrun B, Cornou C. (2010). Influence of parameterization on inversion of surface wave dispersion curves and definition of an inversion strategy for sites with a strong Vs contrast. *Geophysics* 75(6):B197–209.
- Socco L.V.; Foti S.; Boiero D. (2010). Surface wave analysis for building near surface velocity models: established approaches and new perspectives. In: *GEOPHYSICS*, vol. 75 n. 5, 75A83- 75A102. - ISSN 0016-8033
- Stokoe, K.H., Joh, S.H., Woods, R.D. (2004). Some Contributions on In Situ Geophysical Measurements to Solving Geotechnical Engineering Problems, 2nd International Conference on Site Characterization, Porto, Portugal, September.
- Xia, J., R. D. Miller, and C. B. Park, (1999a). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves: *Geophysics*, 64, 691–700
- Non-uniqueness in surface wave inversion and consequences on seismic site response analyses: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 982–993
- Foti, S., F. Hollender, F. Garofalo, D. Albarello, M. W. Asten, P.-Y. Bard, C. Comina, C. Cornou, B. Cox, G. Di Giulio, et al. (2017). Guidelines for the good practice of surface wave analysis: A product of the InterPACIFIC project, *Bull. Earthq. Eng.* doi: 10.1007/s10518-017-0206-7
- Garofalo F, Foti S, Hollender F, Bard PY, Cornou C, Cox BR, Ohrnberger M, Sicilia D, Asten M, Di Giulio G, Forbriger T, Guillier B, Hayashi K, Martin A, Matsushima S, Mercerat D, Poggi V, Yamanaka H (2016a). InterPACIFIC project: comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part I: Intra-comparison of surface wave methods. *Soil Dyn Earthq Eng* 82:222–240
- Haghshenas, E. (2005). Condition géotechnique et aléa sismique local à Téhéran, PhD Thesis, Joseph Fourier University, Grenoble (France), p. 288
- Haghshenas, E., Bard, P.-Y., Teodulidis, N., (2008). Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio, *Bulletin of Earthquake Eng.*, v6, 75-108.
- Hobiger, M. Bard, P.-Y. Cornou, C. Le Bihan, N. (2009)

Determination of the optimal initial parametrization for inversion of surface wave dispersion curves in deep basins (Case study: Tehran)

Saeed Soltani¹, Ebrahim Haghshenas² and Gholam Javan-Doloei^{2*}

1- PhD Student in Seismology, IIEES & Josef Fourier University, Grenoble, France.

2- Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran.

Received: 1 January 2020; Accepted: 13 February 2021

Corresponding author: Javandoloei@iiees.ac.ir

Keywords

Dispersion curves
Surface waves
Inverse modeling
Tehran alluvium
Shear velocity model

Extended Abstract

Summary

In this paper, we examined the influence of initial parametrization in the inversion of surface wave dispersion curves. First, the steps for choosing the most desirable parameters are described. Then, the influence of parametrization is investigated using two experimental approaches and also a systematic approach to find a consistent solution. The final results show that suitable values for initial parameters considering some basic principles and local site conditions can reduce the uncertainty in the final results. However, this uncertainty also strongly depends on a-priori information that could be implemented in the parametrization and also the inversion process.

Introduction

Global search algorithms like the neighborhood algorithm, which is implemented in the software for inversion of surface wave dispersion curves need reliable parametrization values. These algorithms are defined with the initial set of model parameters. In these methods, searching to find the best profiles in the initial parameters space leads to a set of profiles with the lowest error based on the misfit function. The influence of these parametrizations is widely discussed by many authors over the years. All these methods unanimously agreed that the rational estimation of bedrock, besides the number of layers, is a decisive parameter for choosing initial conditions. However, it is not easy to find some permanent solution to define the model parameters because the values strongly depend on the site. Such studies indicate the importance of accurate and correct determination of these parameters in future studies.

Methodology and Approaches

The goal of inversion of surface wave dispersion curves is to retrieve the shear wave velocity profiles. Generally, extracting shear wave velocity needs reliable information all over the frequency band, which is not provided in most case studies. The model parameters could constraint the final results with a limited frequency band. In such a situation, a reasonable estimation of the model parameters reduces the uncertainty. In this study, some crucial concepts to check the reliability of model parameters are reviewed. In this regard, the influence of local site conditions like the past geological studies and some initial observations based on the shape of dispersion curves and the wavelengths are examined. We have also investigated the influence of three different methods to retrieve model parameters. Finally, the effect of presence or absence the a-priori information in the same array has been studied.

Results and Conclusions

The experimental and also systematic approaches, used in this study, for the parametrization in the inversion of surface wave dispersion curves are very powerful tools to estimate model parameters in blind studies or the regions that are studied for the first time where no information about the site is available. Preliminary results of different approaches show the strong dependence of the results on the initial model parameters especially in deep parts where the wavelengths of surface waves are not enough to provide information in these parts. Constraining the deep parts, adding some information like stratigraphic logs, H/V resonance peak frequency or any other information could converge the final results in which the existence of a-priori information in the accuracy of final results is very important.