

تعیین سرعت موج برشی در لایه‌های رسوبات آبرفتی با به کارگیری اندازه‌گیری‌های میکروترمور

عباس قلندرزاده^{۱*} و علی کاوند^۲

^۱دانشیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۲دانشجوی دکتری مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

(تاریخ دریافت ۸۵/۲/۲، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۳/۱۷، تاریخ تصویب ۸۹/۶/۳۰)

چکیده

در این مقاله امکان به کارگیری میکروترمورها در تعیین سختی برشی اولیه یا سرعت موج برشی (V_s) در لایه‌های رسوبات آبرفتی بررسی خواهد شد. بدین منظور مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های میکروترمور در شهر بم صورت گرفته است. اندازه‌گیری‌های صورت گرفته هر دو روش اندازه‌گیری آرایه‌ای و تک نقطه‌ای را شامل می‌شوند. در ابتدا بر پایه خصوصیات پراکندگی^۱ امواج رایلی موجود در مولفه قائم میکروترمورها و با استفاده از آنالیز فرکانس- عدد موج منحنی‌های پراکندگی تجربی^۲ به دست آمده‌اند. در مرحله بعد با استفاده از تئوری انتشار امواج در محیط‌های لایه‌ای، منحنی‌های پراکندگی تئوری محاسبه شده و با استفاده از آنالیز معکوس^۳، پروفیل سرعت موج برشی در نقاط مورد نظر محاسبه شده است. در نهایت به منظور بررسی دقت نتایج حاصله، پروفیل‌های سرعت موج برشی بدست آمده از روش میکروترمورها، با نتایج سایر روشها همانند روش‌های درون چاهی^۴ و ژئوفیزیک سطحی مقایسه شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که پروفیل‌های V_s حاصله از روش میکروترمور از تطابق بسیار خوبی با نتایج سایر روش‌ها برخوردار است. بنابراین از اندازه‌گیری‌های میکروترمور می‌توان به عنوان یک روش کارا و قابل اعتماد در تخمین پروفیل V_s استفاده نمود. به علاوه روش میکروترمورها در تشخیص لایه‌های سست سطحی نتایج بهتری به دست داده است. میکروترمورها همچنین به خوبی توانستند تا لایه سست قرار گرفته در زیر یک لایه سخت را تشخیص دهند.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری‌های میکروترمور، اثرات ساختگاهی، سرعت موج برشی (V_s)، آنالیز فرکانس، عدد موج، منحنی پراکندگی امواج رایلی، آنالیز معکوس

مقدمه

می‌توان در زلزله سال ۱۹۹۰ منجیل در ایران مشاهده نمود [۱-۲]. روش‌های موجود در ارزیابی اثرات ساختگاهی را می‌توان به دو دسته تجربی و تئوری تقسیم نمود. روش تجربی مبتنی بر رکوردها و اندازه‌گیری‌های حرکت زمین می‌باشد، در حالی که روش تئوری بر پایه اطلاعات ژئوتکنیکی موجود استوار است که عمدتاً با روش‌های عددی صورت می‌گیرد. گرچه در دهه هفتاد و اوایل دهه هشتاد توجه خاصی به پیشبرد روش‌های عددی وجود داشت اما در سال‌های اخیر این مسئله کمی تعدیل شده است و تحقیقات بسیاری بر روی روش‌های آنالیز رکوردهای ثبت شده انجام گرفته است که همچنان نیز ادامه دارد. سرعت موج برشی (V_s) یکی از مهمترین پارامترهای کنترل کننده پاسخ دینامیکی خاک‌ها به شمار می‌رود، بنابراین برای ارزیابی اثرات ساختگاهی با استفاده از روش‌های تئوریک تحلیل پاسخ زمین و تعیین پهنه‌بندی خطر زلزله بایستی پروفیل سرعت موج برشی

با نگرشی بر زلزله‌های مخرب رویداده در ایران و جهان همانند زلزله Michoacan مکزیک (۱۹۸۵)، زلزله Loma Prieta کالیفرنیا (۱۹۸۹)، زلزله منجیل ایران (۱۹۹۰)، زلزله Kobe ژاپن (۱۹۹۵) و زلزله Kocaeli ترکیه (۱۹۹۹)، پتانسیل تأثیرگذاری زمین شناسی سطحی خاک بر حرکت قوی زمین و خرابی‌های ناشی از زلزله که اصطلاحاً اثرات ساختگاهی نامیده می‌شود، به خوبی مشخص می‌گردد. بنابراین تعیین اثر ساختگاه به عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل است که باید در مطالعات ریزپهنه‌بندی و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله و همچنین پیشگیری از وقوع خسارات شدید ناشی از اثرات ثانویه وقوع زلزله انجام گیرد.

تغییر در حرکت قوی زمین بر اثر تأثیر رسوب باعث گردیده است که بعضی محققان در ارزیابی میزان آسیب‌پذیری سازه‌ها در برابر زلزله، شرایط خاک محل را در درجه اول اهمیت قرار دهند که نمونه بارز آن را نیز

می‌رود. سهولت انجام اندازه‌گیریهای میکروترمور در سطح زمین و سرعت قابل توجه آن باعث گردیده است تا استفاده از این روش به خصوص در مطالعات ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهرها و نواحی پرجمعیت به عنوان ابزاری مناسب در دست مهندسين زلزله قرار گیرد. از کاربردهای متداول میکروترمورها در ارزیابی اثرات ساختگاهی که تاکنون بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است می‌توان به تعیین پریود غالب رسوب و همچنین میزان تشدید در رسوبات اشاره نمود. در کشور ایران اندازه‌گیری‌های میکروترمور تا کنون توسط محققین مختلف در مطالعات ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای به منظور تعیین پریود غالب رسوب و ضریب تشدید به کار گرفته شده است [۷-۶-۵]. با این حال در چند سال اخیر اندازه‌گیری‌های میکروترمور به طور موفقیت‌آمیزی برای تعیین ساختار برشی ساختگاه نیز بکار رفته است [۸]. این مورد یکی از جنبه‌های جدید کاربردهای میکروترمور در ارزیابی شرایط ساختگاهی به شمار می‌رود.

در مطالعه حاضر امکان به کارگیری میکروترمورها در تعیین پروفیل سرعت موج برشی ساختگاه بررسی خواهد شد. بدین منظور مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های میکروترمور در شهر بم صورت گرفته است. اندازه‌گیری‌های صورت گرفته هر دو روش اندازه‌گیری آرایه‌ای و تک نقطه‌ای را شامل می‌شوند. در ابتدا با استفاده از خصوصیات پراکندگی امواج رایلی موجود در مؤلفه قائم میکروترمورها و با استفاده از آنالیز فرکانس - عدد موج منحنی‌های پراکندگی تجربی به دست آمده‌اند. در مرحله بعد با استفاده از تئوری انتشار امواج در محیط‌های لایه‌ای، منحنی‌های پراکندگی تئوری محاسبه شده و با استفاده از آنالیز معکوس، پروفیل سرعت موج برشی در نقاط مورد نظر محاسبه شده است. در روش آنالیز معکوس با استفاده از یک فرایند تکراری مدل لایه‌های خاک به صورتی اصلاح می‌گردد که اختلاف بین منحنی‌های پراکندگی تجربی و تئوری حداقل گردد. در نهایت به منظور بررسی دقت نتایج حاصله، پروفیل‌های سرعت موج برشی به دست آمده از روش میکروترمورها، با نتایج سایر روش‌ها همانند روش‌های درون چاهی و ژئوفیزیک سطحی مقایسه شده‌اند.

رسوبات را تا سنگ بستر لرزه ای به دست آورد. پروفیل V_s معمولاً در محل و با به کارگیری روش‌های ژئوفیزیک لرزه‌ای متداول همانند روش‌های انعکاسی^۵، انکساری^۶ و درون چاهی تعیین می‌شود. یکی دیگر از روش‌های تعیین پروفیل V_s در محل استفاده از روش‌های ژئوتکنیکی همانند انجام آزمایش‌های SPT یا CPT و استفاده از روابط تجربی بین مقادیر V_s و عدد SPT یا CPT می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی درون چاهی و یا ژئوتکنیکی برای تعیین پروفیل V_s خاک اکثراً نیازمند حفر گمانه است و لذا ممکن است امکان انجام آنها در تمامی موارد فراهم نباشد، به خصوص در مواردی که تعیین خواص رسوبات عمیق مد نظر است و یا منطقه وسیعی بایستی مورد مطالعه قرار گیرد همانند مطالعات ریزپهنه بندی شهرها. هزینه حفاری گمانه‌های عمیق برای روش‌های ژئوفیزیکی درون چاهی بسیار بالاست و به علاوه صحت نتایج به دست آمده توسط این روشها در اعماق زیاد بدلیل محدودیت‌های عملی اغلب مورد تردید بوده است [۳].

به منظور غلبه بر این مشکلات می‌توان از روش‌های مبتنی بر امواج سطحی استفاده نمود. روش‌های مبتنی بر امواج سطحی این امکان را فراهم می‌آورند که بتوان بدون حفر هیچگونه گمانه‌ای ساختار پروفیل V_s ساختگاه را به دست آورد. در میان سایر روش‌های سطحی همانند آزمایش‌های انعکاسی و انکساری، روش‌های مبتنی بر امواج سطحی قابل اعتمادتر به نظر می‌رسند و حتی قادر به شناسایی لایه‌های سست موجود در زیر یک لایه سخت نیز می‌باشند [۴]. به علاوه در آزمایش‌های انعکاسی و انکساری بایستی از منابع مصنوعی تحریک همانند انفجار یا لرزش استفاده نمود، در حالی که این امر در نواحی شهری با مشکلات فراوانی روبروست. همچنین ابعاد آرایه‌های مورد نیاز در این روش‌ها با توجه به عمق نفوذ مورد نظر ممکن است بزرگ باشد که به کارگیری آن را در نواحی پرجمعیت شهری با مشکل مواجه می‌کند.

اخیراً، به کارگیری امواج سطحی در میکروترمورها نیز به جامعه مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای معرفی گردیده است و برای تعیین ساختار موج برشی در ساختگاه و یا تعیین اثرات محلی ساختگاه به کار می‌رود. هم اکنون استفاده از اندازه‌گیری‌های میکروترمور در ارزیابی اثرات ساختگاهی به عنوان یکی از روش‌های بسیار موثر و سریع به شمار

فرایند تعیین پروفیل سرعت موج برشی

تعیین پروفیل V_s با استفاده از اندازه‌گیری میکروترمورها به صورت آرایه‌ای که روش سرعت فاز نیز نامیده می‌شود، از سه مرحله اصلی تشکیل می‌گردد:

۱- اندازه‌گیری و ثبت میکروترمورها به صورت آرایه‌ای در سطح زمین ۲- تعیین منحنی پراکندگی تجربی امواج رایلی با استفاده از آنالیز فرکانس - عدد موج مولفه قائم میکروترمورها ۳- تعیین پروفیل V_s با استفاده از آنالیز معکوس و با استفاده از منحنی پراکندگی تئوری امواج رایلی. در ادامه جزئیات هر یک از مراحل فوق تشریح می‌گردد.

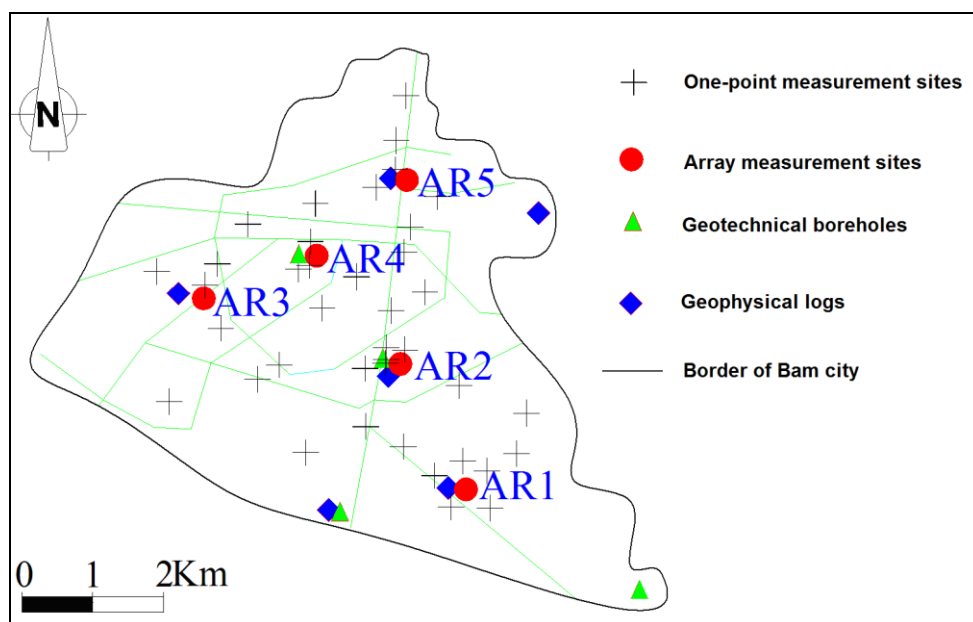
اندازه‌گیری‌های میکروترمو

اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده هر دو روش اندازه‌گیری به صورت آرایه‌ای و اندازه‌گیری به صورت تک نقطه‌ای را در بر می‌گیرد. داده‌های اندازه‌گیری شده در شهر بم در تعداد ۳۵ نقطه به روش تک‌نقطه‌ای و در پنج نقطه به روش آرایه‌ای ثبت شده‌اند. با این وجود در اینجا تنها داده‌های ثبت شده به روش آرایه‌ای مد نظر قرار می‌گیرد. در شکل (۱) نقشه نقاط اندازه‌گیری‌های میکروترمو، در سطح شهر بم نشان داده شده است. عملیات اندازه‌گیری در ساعات نیمه شب انجام گرفته است تا میزان نویز وارده به داده‌ها اعم از ترافیک و سایر

فعالیت‌های انسانی حداقل باشد.

دستگاه ثبت میکروترمو از نوع سرعت سنج دیجیتال با فرکانس طبیعی 0.5 Hz بوده است. در شکل (۲) نمایی از دستگاه مورد استفاده نشان داده شده است. این دستگاه قابلیت برداشت لرزش‌های خفیف زمین با نرخ نمونه‌برداری‌های متفاوت و بازه‌های زمانی دلخواه را دارد. تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده در این روش علاوه بر تعدادی سنسور سه مؤلفه‌ای سرعت، از تقویت کننده‌ها، فیلترهای پایین گذر^۷، مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال^۸ و رایانه قابل حمل تشکیل می‌گردد.

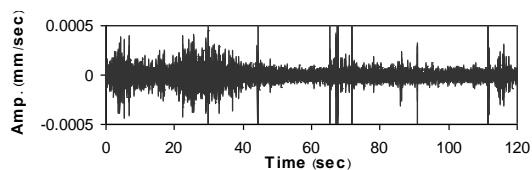
در شکل (۳) نیز چگونگی آرایش سنسورها در محل نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در این مورد خاص، پنج سنسور سه مؤلفه‌ای (یا تک مؤلفه‌ای قائم) بصورت دایره‌ای و در فواصل برابر از یکدیگر بر روی سطح زمین قرار گرفته‌اند. همچنین یک سنسور سه مؤلفه‌ای در مرکز دایره قرار گرفته است. یعنی بطور کلی ۸ یا ۱۸ مؤلفه حرکتی بطور همزمان ثبت می‌گردد. حرکت آنالوگ اندازه‌گیری شده توسط سنسورها تقویت و بصورت پایین گذر فیلتر شده و به صورت دسته داده‌های دیجیتال ۲۰۴۸ یا ۴۰۹۶ نقطه‌ای ذخیره می‌گردند. نرخ نمونه برداری^۹ با توجه به شرایط زمین‌شناختی و ابعاد آرایه می‌تواند از ۵۰ تا ۵۰۰ هرتز تغییر کند. در مطالعه حاضر از نرخ نمونه‌برداری ۱۰۰ هرتز استفاده شده است.



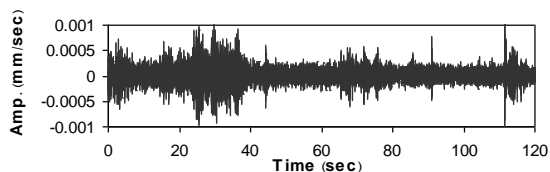
شکل ۱: موقعیت اندازه‌گیری‌های میکروترمو در شهر بم.

معمولا سرعت فاز C (نامیده می شود، دارای رابطه‌ای با طول موج (λ) و فرکانس (f) است که بصورت زیر بیان می شود:

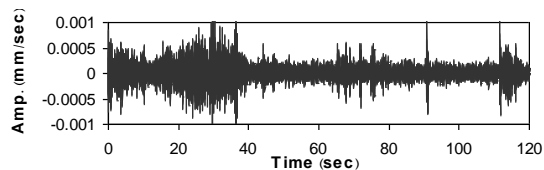
$$C = f\lambda \quad (1)$$



الف) مولفه قائم (Z)



ب) مولفه شمالی - جنوبی (N-S)



ج) مولفه شرقی - غربی (E-W)

شکل ۴: نمونه میکروترومورهای ثبت شده در ایستگاه شماره ۱ (نقطه ARI).

بنابراین در یک محیط لایه‌ای هر چه فرکانس کمتر باشد سرعت فاز بیشتر می شود. رابطه ای که در آن سرعت فاز نسبت به طول موج یا فرکانس تغییر می یابد، خاصیت پراکندگی نامیده می شود. خاصیت پراکندگی مختص امواج سطحی است که در سطح یک محیط لایه‌ای منتشر می شوند و در مورد امواج حجمی مشاهده نمی شود. منحنی که تغییرات سرعت فاز نسبت به طول موج یا فرکانس را نشان می دهد، منحنی پراکندگی نام دارد.

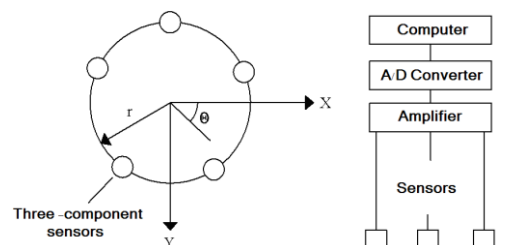
سرعت فاز امواج رایلی را می توان بصورت تجربی با استفاده از آنالیز فرکانس - عدد موج مولفه قائم میکروترومورها بدست آورد. آنالیز فرکانس - عدد موج برای اولین بار توسط Capon در سال ۱۹۶۹ به منظور تحلیل شبکه‌های لرزه نگاری بزرگ مقیاس به کار رفته است [۹]. با فرض وجود M سنسور که سنسور i ام در موقعیت X_i قرار گرفته است، طیف فرکانس - عدد موج، $P(f, \mathbf{K})$ ، بدین صورت تعریف می گردد:



شکل ۲: دستگاه ثبت میکروترومور به همراه سایر تجهیزات.

به منظور اندازه‌گیری میکروترومورها ابتدا لرزه سنج بر روی محل مورد نظر جاگذاری شده و سپس تراز می‌گردد. بایستی توجه شود که راستای جایگذاری دستگاه درست باشد. به طوری که فلش روی دستگاه سمت شمال را نشان دهد. با استفاده از قطب‌نما دستگاه دقیقا در جهت مورد نظر تنظیم می‌گردد. این موضوع بدین دلیل است که دستگاه حرکات خفیف زمین را در سه جهت شمال - جنوب (N-S)، شرق - غرب (E-W) و قائم (UD) رکورد نماید. بدین ترتیب جهت‌گیری تمامی آرایه‌های اندازه‌گیری به صورت شمالی - جنوبی بوده است. پس از برداشت داده‌ها در هر نقطه مختصات آن نیز توسط دستگاه GPS ثبت شده است.

در شکل (۴) نمونه‌ای از میکروترومورهای ثبت شده در ایستگاه شماره ۱ (نقطه ARI) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد داده‌های ثبت شده به صورت سه مولفه‌ای ثبت شده‌اند.



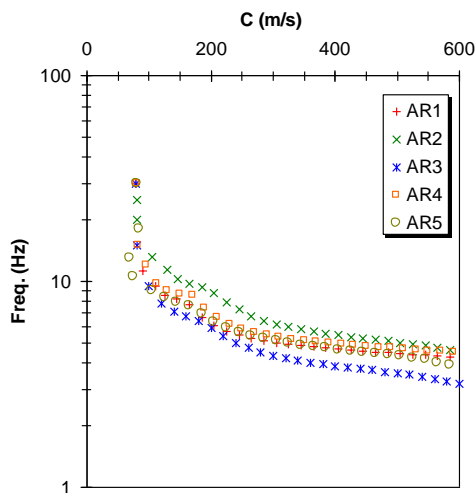
شکل ۳: نحوه اندازه‌گیری میکروترومورها در روش آرایه‌ای.

تعیین منحنی پراکندگی تجربی امواج رایلی

در یک محیط الاستیک لایه‌ای که سختی آن با افزایش عمق افزایش می یابد، هر چه طول موج بیشتر باشد سرعت انتشار موج نیز بیشتر است. سرعت موج که

بطور کامل به دست خواهد آمد.

در این مطالعه به منظور تعیین منحنی‌های پراکندگی تجربی، برنامه‌ای با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و بر مبنای مبانی تئوری ذکر شده تهیه شده است. با استفاده از این برنامه می‌توان منحنی پراکندگی تجربی امواج رایلی را از داده‌های میکروترمو ر ثبت شده به روش آرایه‌ای بدست آورد. در اولین مرحله به منظور تعیین پروفیل V_s ، با استفاده از برنامه تهیه شده منحنی‌های پراکندگی تجربی در تمامی پنج نقطه مورد نظر بدست آورده شده است. این منحنی‌ها در شکل (۵) نشان داده شده اند.



شکل ۵: منحنی پراکندگی تجربی امواج رایلی در پنج نقطه اندازه‌گیری شده به روش آرایه‌ای.

تعیین منحنی پراکندگی تحلیلی امواج رایلی

بر خلاف محیط الاستیک همگن، امواج رایلی در یک محیط لایه‌ای مودهای انتشار مختلفی دارند و هر مود دارای سرعت‌های فاز متفاوتی است. این خواص امواج رایلی بوسیله Thomson (۱۹۵۰) و Haskell (۱۹۵۳) در روش ماتریس انتقالی^{۱۳} تعریف شده‌اند [۱۰-۱۱]. رابطه بین سرعت فاز (C_m) و عدد موج (K_m) برای مود اصلی یا سایر مودهای بالاتر امواج رایلی در یک فرکانس معین (f) بصورت ضمنی توسط روابط زیر بیان می‌شود:

$$\left(\frac{\dot{u}}{\dot{w}} \right)_m = \frac{J_{22} - J_{12}}{J_{11} - J_{21}} = \frac{J_{42} - J_{32}}{J_{31} - J_{41}} \quad (8)$$

$$F_R = (J_{12} - J_{22})(J_{31} - J_{41}) - (J_{11} - J_{21})(J_{32} - J_{42}) = 0 \quad (9)$$

در این روابط J_{ij} عبارتست از عناصر ماتریس J که توسط Haskell (۱۹۵۳) تعریف شده است و تابعی از V_p ، ρ ، H است و تابعی از

$$P(f, \mathbf{K}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M A_i^*(f, \mathbf{K}) A_j(f, \mathbf{K}) G_{ij}(f) \exp[i\mathbf{K} \cdot (\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j)] \quad (2)$$

در این رابطه * نمایانگر مزدوج مختلط، f فرکانس و \mathbf{K} عدد موج برداری بر حسب سیکل بر متر می باشد که بصورت زیر تعریف می گردد:

$$\mathbf{K} = |\mathbf{K}| \exp(i\theta) \quad (3)$$

در این رابطه θ عبارت است از آزمون عدد موج برداری که به صورت ساعتگرد نسبت به محور x اندازه گیری می‌شود (شکل ۳). در رابطه (۲) همچنین $G_{ij}(f)$ عبارتست از طیف ضربی^{۱۱} بین سنسور i ام و j ام، که بدین صورت بیان می‌شود:

$$G_{ij}(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_{in}(f) S_{jn}^*(f) \quad (4)$$

N عبارتست از تعداد کل بازه‌های بدون همپوشانی و S_{in} نمایانگر تبدیل فوریه داده‌های اندازه گیری شده در سنسور i ام و بازه n ام می‌باشد. برای روش معمولی $A_i(f, \mathbf{K}) = 1$ و برای روش با وضوح^{۱۲} بالا داریم:

$$A_i(f, \mathbf{K}) = \frac{\sum_{j=1}^M q_{ij}(f, \mathbf{K})}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_{ij}(f, \mathbf{K})} \quad (5)$$

که در آن $\{q_{ij}(f, \mathbf{K})\}$ معکوس ماتریس $\{\exp[i\mathbf{K}(\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j)G_{ij}(f)]\}$ می‌باشد. طیف f - \mathbf{K} فضای دو بعدی عدد موج $(K_x - K_y)$ ، برای هر فرکانس دلخواه ترسیم می‌گردد. مقدار ماکزیمم طیف f - \mathbf{K} اطلاعاتی را راجع به سرعت فاز و آزمون منبع موج بدست می‌دهد. در صورتیکه ماکزیمم طیف در فاصله $|\mathbf{K}_p|$ از مبدا و در فرکانس f رخ دهد، سرعت فاز و طول موج متناظر با استفاده از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$C = 2\pi f / |\mathbf{K}_p| \quad (6)$$

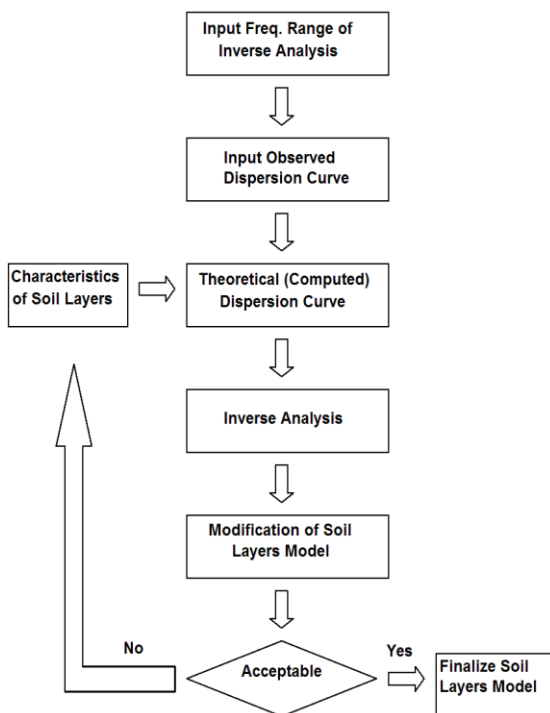
$$\lambda = 2\pi / |\mathbf{K}_p| \quad (7)$$

بدین ترتیب یک دسته مقادیر سرعت و طول موج به دست می‌آید که همان نقاط تشکیل دهنده منحنی پراکندگی تجربی است. با تکرار محاسبات بالا برای تمامی محدوده فرکانسی، منحنی پراکندگی تجربی امواج رایلی،

در این رابطه $\mathbf{P}_{I \times J}$ ، ماتریسی است دارای I سطر و J ستون که عناصر آن عبارتند از $\partial C_{si} / \partial a_j$.
 نیز ماتریسی است ستونی که عناصر آن عبارتند از $C_{ei} - C_{si}$. بعد از محاسبه بردار تصحیح، ماتریس $\mathbf{A}_{J \times J}$ با ماتریس $\mathbf{A}_{J \times J} + \Delta \mathbf{A}_{J \times J}$ جایگزین می‌گردد.
 این محاسبات تا جایی تکرار می‌شود که معادله حداقل مربعات (معادله ۱۰) تقریباً برابر صفر گردد یا به عبارتی اختلاف بین منحنی پراکندگی تئوری و تجربی حداقل شود. عناصر نهایی ماتریس $\mathbf{A}_{J \times J}$ به عنوان پارامترهای مجهول موجود در مدل خاک در نظر گرفته می‌شوند.

1	$H_1, \rho_1, V_{P1}, V_{S1}$
2	$H_2, \rho_2, V_{P2}, V_{S2}$
3	$H_3, \rho_3, V_{P3}, V_{S3}$
⋮	
N	$\infty, \rho_N, V_{PN}, V_{SN}$

شکل ۶: مدل لایه‌های خاک در فرایند آنالیز معکوس.



شکل ۷: الگوریتم مورد استفاده در آنالیز معکوس.

V_s ، C_m یا K_m می‌باشند [۱۰]. $\left(\frac{\dot{u}}{\dot{w}}\right)_m$ عددی مختلط است و معرف نسبت دامنه سرعت افقی به قائم ذره در سطح زمین است. بدین ترتیب با داشتن خواص لایه‌های خاک شامل ضخامت، چگالی، سرعت موج برشی و سرعت موج طولی و با استفاده از معادله (۸) یا (۹) می‌توان منحنی پراکندگی امواج رایلی را برای لایه بندی دلخواه خاک به دست آورد. تعیین تئوریک منحنی پراکندگی تئوری یکی از مراحل اصلی فرایند آنالیز معکوس به شمار می‌رود.

فرآیند آنالیز معکوس در روش اندازه‌گیری آرایه‌ای

اگر سرعت‌های فاز به دست آمده از اندازه‌گیری‌های میکروتومور (C_{ei})، برای I فرکانس مختلف معلوم باشد، هدف نهایی آنالیز معکوس عبارتست از یافتن مدل لایه‌های خاک بصورتی که معادله حداقل مربعات به صورت زیر را ارضاء نماید:

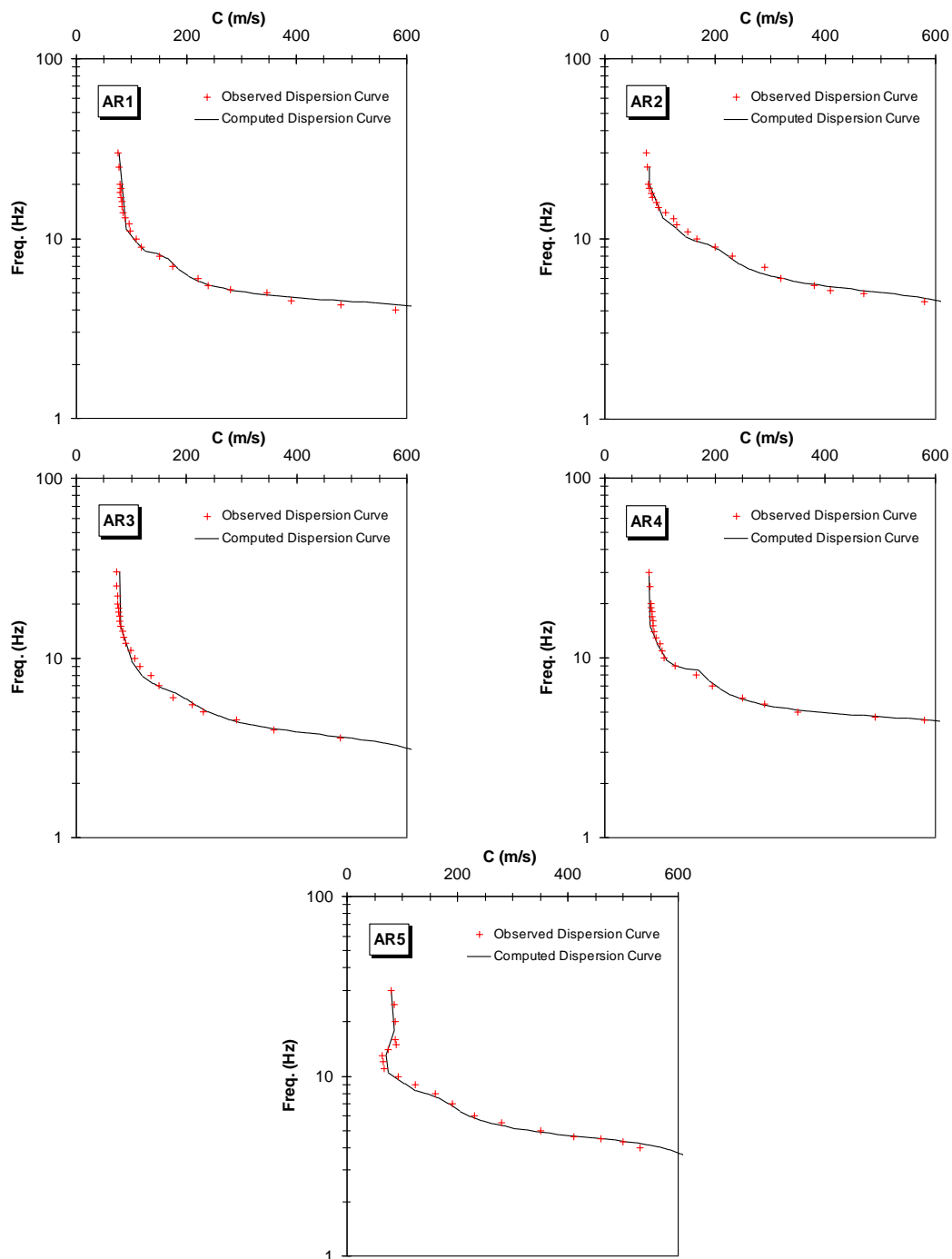
$$S = \sum_{i=1}^I (C_{ei} - C_{si})^2 = \min \quad (10)$$

در این رابطه C_{si} عبارت است از سرعت فاز تئوریک امواج رایلی که با استفاده از معادلات (۸) یا (۹) بدست می‌آید. معادله (۱۰) را می‌توان توسط روش‌های بهینه‌سازی غیر خطی حل نمود [۱۲].

در فرآیند آنالیز معکوس فرض می‌شود که مدل لایه‌های خاک به صورت افقی بوده و مطابق شکل (۶) از N لایه تشکیل شده است. به دلیل اثرات ناچیز چگالی و سرعت موج P لایه‌ها بر خواص پراکندگی، مقادیر این پارامترها در ابتدا معین فرض شده و تنها پارامتر سرعت موج برشی یا هر دو پارامتر سرعت موج برشی و ضخامت لایه‌ها مجهول فرض می‌شوند. بنابراین تعداد کل مجهولات (J) عبارت است از N یا ۲N-۱. الگوریتم مورد استفاده در آنالیز معکوس در شکل (۷) ارائه شده است.

برای حل معادله (۱۰) مقادیر اولیه پارامترهای مجهول (a_1, a_2, \dots, a_j) ، به صورت ماتریس ستونی $\mathbf{A}_{J \times J}$ نشان داده می‌شوند. بنابراین بردار تصحیح برای $\mathbf{A}_{J \times J}$ ، عبارتست از $\Delta \mathbf{A}_{J \times J}$ که با استفاده رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mathbf{P}_{I \times J} \Delta \mathbf{A}_{J \times J} = \mathbf{C}_{I \times J} \quad (11)$$



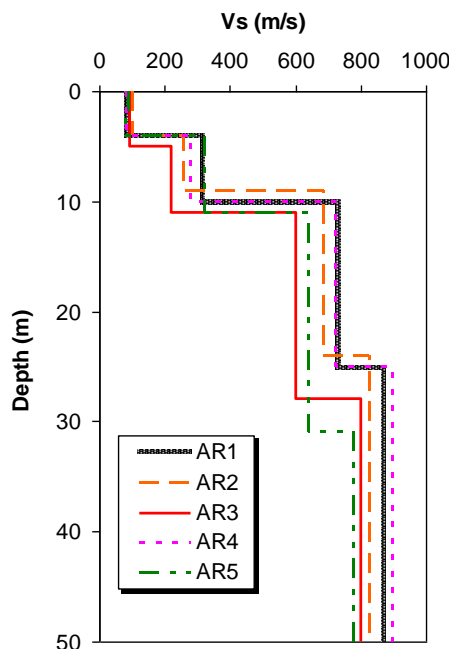
شکل ۸: مقایسه منحنی‌های پراکندگی تئوری و تجربی.

بدین منظور برنامه‌ای با استفاده از نرم‌افزار MATLAB تهیه شده است. در ابتدا منحنی پراکندگی تجربی و پارامترهای اولیه لایه‌های خاک شامل ضخامت، چگالی، سرعت موج برشی و سرعت موج طولی در لایه‌ها به برنامه معرفی و سپس در طی فرایند آنالیز معکوس، پارامترهای مدل انتخابی به گونه‌ای اصلاح می‌شوند که میزان اختلاف بین منحنی پراکندگی تجربی و تئوری حداقل گردد.

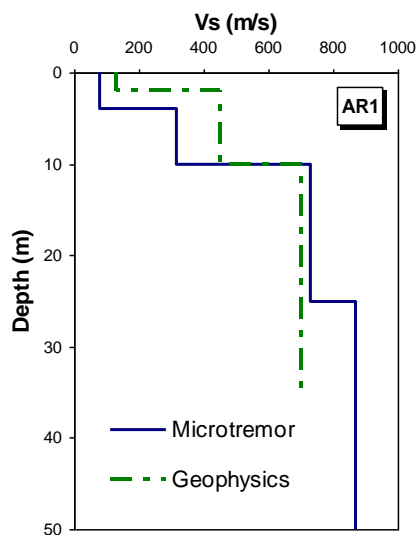
تعیین پروفیل V_s در نقاط اندازه‌گیری شده به روش آرایه‌ای

همان‌گونه که ذکر گردید داده‌های میکروترمور در پنج نقطه در سطح شهر بم به روش آرایه‌ای اندازه‌گیری شده‌اند. با استفاده از داده‌های ثبت شده در پنج نقطه مورد نظر پروفیل V_s در این نقاط محاسبه شده است.

AR2، پروفیل به دست آمده از آنالیز معکوس داده‌های میکروترمور، سازگاری بیشتری را با نتایج آزمایش درون چاهی داشته است. به طور کلی اختلافات جزئی بین نتایج میکروترمورها و ژئوفیزیک با نتایج آزمایش درون چاهی به این دلیل است که آزمایش درون چاهی مقادیر V_s را به طور پیوسته می‌دهد، در حالی که هر دو روش میکروترمور و ژئوفیزیک سطحی مقادیر متوسط V_s را در لایه‌های خاک بدست می‌دهند. در واقع می‌توان گفت که در بین این سه روش، آزمایش درون چاهی قابل اعتمادترین روش به شمار می‌رود.



شکل ۹: پروفیل‌های V_s به دست آمده از آنالیز معکوس در نقاط اندازه‌گیری شده به روش آرایه‌ای.



شکل ۱۰: مقایسه پروفیل‌های V_s به دست آمده از آنالیز معکوس با نتایج سایر روش‌های تعیین پروفیل V_s .

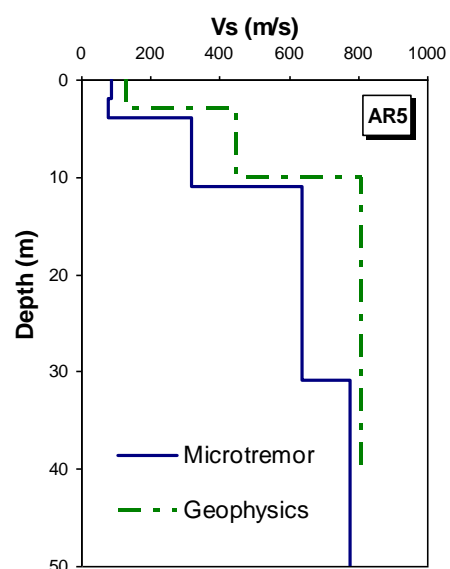
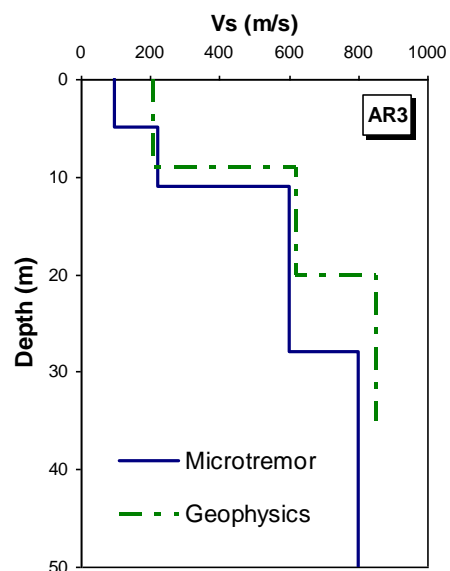
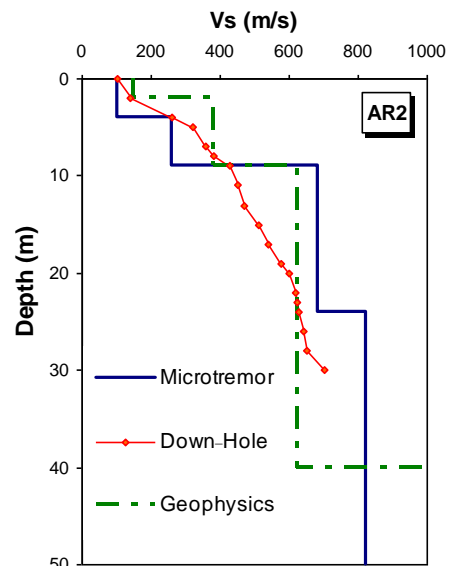
مطالعات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی در شهر بم عموماً نشان می‌دهند که تغییرات خواص لایه‌های خاک با عمق در بیشتر نواحی این شهر چندان پیچیده نیست [۱۳]. بصورتی که در اغلب نواحی شهر سه یا چهار لایه با خواص مختلف قابل تشخیص است. بنابراین مدل تحلیلی خاک در تمامی نقاط فرض شده است که از چهار لایه افقی تشکیل شده که بر یک محیط نیم نامحدود قرار گرفته‌اند. با این وجود در نقطه AR5 به منظور بررسی لایه‌ها با دقت بیشتر، مدل خاک به صورت پنج لایه‌ای فرض شده است. در فرایند آنالیز معکوس هم سرعت موج برشی و هم ضخامت لایه‌ها مجهول فرض شده‌اند. بنابراین تعداد کل پارامترهای مجهول در نقطه AR5 برابر ۹ و در بقیه نقاط برابر ۷ بوده است. در شکل (۸) منحنی‌های پراکندگی تئوری (بر مبنای مدل نهایی لایه‌های خاک) با منحنی‌های پراکندگی تجربی مقایسه شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌گردد دو منحنی از تطابق خوبی برخوردارند که نشان دهنده صحت آنالیز معکوس می‌باشد. نتایج به دست آمده از آنالیز معکوس شامل پارامترهای نهایی مدل لایه‌های خاک در جدول (۱) ارائه شده است. پروفیل‌های سرعت موج برشی در پنج نقطه اندازه‌گیری شده به روش آرایه‌ای نیز در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. در محاسبه پاسخ ساختگاه لایه‌ای با سرعت موج برشی بیشتر از 750 m/s عموماً به عنوان سنگ بستر لرزه‌ای در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود پروفیل‌های به دست آمده در تمامی نقاط به سنگ بستر لرزه‌ای رسیده‌اند و تا عمق حدود ۵۰ متری ادامه دارند. این امر نشان می‌دهد که با استفاده از اندازه‌گیری‌های میکروترمور می‌توان خواص رسوبات عمیق را نیز به دست آورد. با توجه به هزینه بالای حفاری‌های ژئوتکنیکی و همچنین اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی در اعماق زیاد، از اندازه‌گیری‌های میکروترمور می‌توان به عنوان یک روش جایگزین اقتصادی و عملی برای تعیین خواص رسوبات عمیق نیز استفاده نمود.

در شکل (۱۰) پروفیل‌های V_s به دست آمده از آنالیز معکوس در چهار نقطه از محل‌های اندازه‌گیری شده به روش آرایه‌ای، با نتایج به دست آمده از سایر روش‌ها مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که پروفیل‌های به دست آمده از آنالیز معکوس در تمامی موارد سازگاری خوبی با نتایج سایر روش‌ها دارند. در نقطه

جدول ۱: پارامترهای نهایی مدل لایه های خاک به دست آمده از آنالیز معکوس.

Array point	Layer No.	Thickness (m)	Density (ton/m ³)	V _p (m/s)	V _s (m/s)
AR1	۱	۴	۱/۹	۱۵۰	۸۰
	۲	۶	۱/۹	۵۹۰	۳۱۵
	۳	۱۵	۱/۹	۱۳۶۵	۷۳۰
	۴	-	۱/۹	۱۶۳۰	۸۷۰
AR2	۱	۴	۱/۹	۱۹۰	۱۰۰
	۲	۵	۱/۹	۴۸۵	۲۶۰
	۳	۱۵	۱/۹	۱۲۸۰	۶۸۵
	۴	-	۱/۹	۱۵۴۵	۸۲۵
AR3	۱	۵	۱/۹	۱۷۵	۹۵
	۲	۶	۱/۹	۴۱۰	۲۲۰
	۳	۱۷	۱/۹	۱۱۲۰	۶۰۰
	۴	-	۱/۹	۱۵۰۰	۸۰۰
AR4	۱	۴	۱/۹	۱۶۰	۸۵
	۲	۵	۱/۹	۵۲۵	۲۸۰
	۳	۱۵	۱/۹	۱۳۵۵	۷۲۵
	۴	-	۱/۹	۱۶۸۵	۹۰۰
AR5	۱	۲	۱/۹	۱۷۰	۹۰
	۲	۲	۱/۹	۱۵۰	۸۰
	۳	۷	۱/۹	۶۰۰	۳۲۰
	۴	۲۰	۱/۹	۱۲۰۰	۶۴۰
	۵	-	۱/۹	۱۴۶۰	۷۸۰

در مورد لایه های سطحی نیز نتایج میکروترمورها سازگاری بیشتری را با نتایج روش درون چاهی داراست و به خوبی لایه های سست تر سطحی را شناسایی نموده است. Towhata و همکاران (۲۰۰۴) به منظور شناخت خصوصیات لایه های سطحی تعدادی آزمایش های سوئدی^{۱۴} در سطح شهر بم انجام داده اند که در دو نقطه در محل آرایه های میکروترموور واقع شده اند [۱۵]. مقادیر حاصله از این آزمایشات می تواند به عنوان مبنایی برای ارزیابی نتایج بدست آمده در لایه های سطحی باشد. به منظور مقایسه بهتر نتایج به دست آمده از روش های مختلف برای لایه های سطحی، داده های حاصله از هر یک از روش ها در نقطه AR2، در شکل (۱۱) ارائه شده اند. همانطور که ملاحظه می گردد، نتایج دو روش درون چاهی و میکروترمورها به نتایج آزمایشات سوئدی نزدیک تر هستند. به طور کلی نتایج به دست آمده نشان می دهد که پروفیل های V_s حاصله از روش میکروترموور از تطابق بسیار خوبی با نتایج سایر روش ها برخوردار هستند و بنابراین می توان از اندازه گیری های میکروترموور به عنوان یک روش



ادامه شکل ۱۰: مقایسه پروفیل های V_s به دست آمده از آنالیز معکوس با نتایج سایر روش های تعیین پروفیل V_s.

نتایج آزمایش های سوئدی نیز وجود این لایه نرم را به اثبات می‌رساند (شکل ۱۲). تشخیص لایه نرم قرار گرفته در زیر لایه سخت، یکی دیگر از قابلیت‌های روش میکروترمور به شمار می‌رود.

نتیجه‌گیری

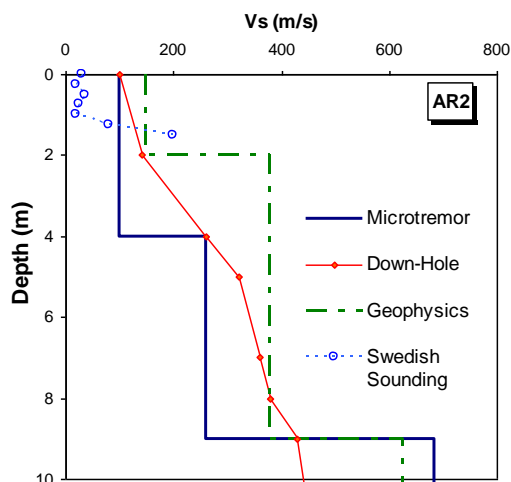
تعیین پروفیل سرعت موج برشی در آبرفت یکی از مراحل اساسی در مطالعات پهنه‌بندی لرزه‌ای، تحلیل پاسخ ساختمانگه و ارزیابی پتانسیل روانگرایی به شمار می‌رود. بنابراین تعیین پروفیل V_s نقش مهمی را در ارزیابی و کاهش خطرات زلزله داراست.

بر طبق نتایج به دست آمده در این مطالعه پروفیل‌های V_s حاصله از روش میکروترمور از تطابق بسیار خوبی با نتایج سایر روش‌ها برخوردار است. بنابراین می‌توان از اندازه‌گیری‌های میکروترمور به عنوان یک روش قابل اعتماد در تخمین پروفیل V_s استفاده نمود. از طرفی با توجه به هزینه بالای روش‌های متداول تخمین پروفیل V_s نظیر روش‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی، اندازه‌گیری‌های میکروترمور به عنوان یک روش جایگزین مناسب، سریع و اقتصادی به شمار می‌روند.

تخمین پروفیل V_s با استفاده از میکروترمورها تا اعماقی بیشتر از عمق قابل دسترسی در اکثر روش‌های معمول نظیر گمانه‌های ژئوتکنیکی یا سایر روش‌های ژئوفیزیکی امکان‌پذیر است. از طرفی بایستی توجه نمود که حفر گمانه‌های ژئوتکنیکی در اعماق زیاد بسیار گرانقیمت است.

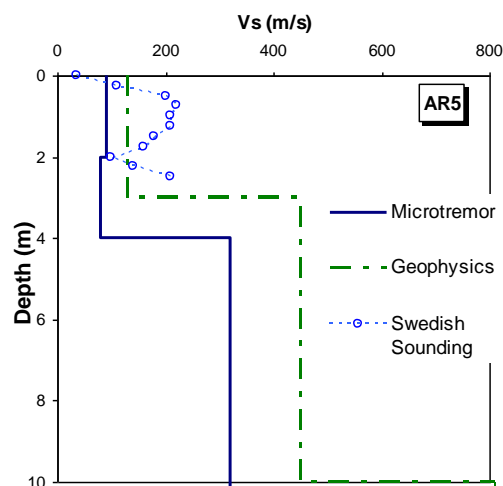
روش میکروترمورها در شناخت لایه‌های سست سطحی نتایج بهتری به دست داده است. این لایه‌ها در سایر روش‌ها نظیر روش‌های ژئوفیزیکی به دلیل تغییرات ناچیز، عمدتاً نادیده گرفته می‌شوند. این مورد را می‌توان به عنوان یکی از مزایای روش میکروترمور برشمرد. میکروترمورها به خوبی توانستند تا لایه سست قرار گرفته در زیر یک لایه سخت را تشخیص دهند. این امر در روش‌های ژئوفیزیک سطحی قابل دسترسی نیست.

قابل اعتماد در تخمین پروفیل V_s استفاده نمود.



شکل ۱۱: مقایسه پروفیل‌های V_s به دست آمده از روش‌های مختلف برای لایه‌های سطحی در نقطه AR2.

به علاوه همان‌طور که در شکل (۱۲) ملاحظه می‌شود، در نقطه AR5 نتایج به دست آمده از آنالیز معکوس میکروترمورها وجود یک لایه سست را در زیر یک لایه سخت‌تر سطحی، نشان می‌دهد. در حالی که روش ژئوفیزیک قادر به تشخیص این لایه سست نبوده است. دلیل این امر این است که در روش ژئوفیزیک انکساری یک لایه نرم در زیر لایه سخت‌تر به عنوان لایه‌ای منفرد عمل نمی‌کند و بنابراین عمق لایه بزرگتر از مقدار واقعی به دست می‌آید [۱۶].



شکل ۱۲: مقایسه پروفیل‌های V_s به دست آمده از روش‌های مختلف برای لایه‌های سطحی در نقطه AR5.

مراجع

- 1 - Haeri, S. M. and Kholafae, M. (1994). "Local site effects in the city of Rasht during Manjil earthquake of June 20 1990, Iran." *Proc. Of 2nd Int. Conf. on Earthquake Resistance Construction and Design*. PP. 109-116, Balkama, Rotterdam.
- 2 - Haeri, S.M., (1993). "Recent studies on the Manjil earthquake and geotechnical concern." *Invited paper, 3rd Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Missouri, Rolla, USA.
- 3 - Apostolidis, A., Raptakis, D., Roumelioti, Z., and Kyriazis, P., (2004). "Determination of S-wave velocity structure using microtremors and spac method applied in Thessaloniki." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 24, PP. 49-67.
- 4 - Tokimatsu, K., (1995). "Geotechnical site characterization using surface waves." *Proc., First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Tokyo, Japan.
- 5 - Ghalandarzadeh, A., and Motamed, R., (2005). "Microtremor measurements, An effective tool for site effect evaluations." *Journal of Faculty of Engineering*, Vol. 38, No. 6, PP. 777-790 (in Farsi).
- 6 - Haeri, S.M., and Hajjaliloo, M., (1998). "Seismic microzonation of Tabriz city by means of microtremor measurements." *12th Iranian Geophysics Conference*, Tehran, Iran (in Farsi).
- 7 - Haeri, S.M., and Sharafi, H., (2006). "Seismic microzonation of Kermanshah city." *12th International Congress of Civil Engineering*, Tehran, Iran (in Farsi).
- 8 - Kavand, A., Ghalandarzadeh, A., Tabatabaie, S., (2006). "Determination of shear wave velocity profile of sedimentary deposits in Bam city (southeast of Iran) using microtremor measurements." *ASCE Geotechnical Special Publication (GSP)*, No.149, PP. 196-203.
- 9 - Capon, J., (1969). "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis." *Proc., IEEE*, Vol. 57, No. 8, PP. 1408-1418.
- 10 - Haskell, N.A., (1953). *The dispersion of surface waves on multi-layered media*. Bulletin of seismological society of America, Vol. 43, No. 1, PP. 17-34.
- 11 - Thomson, W.T., (1950). "Transmission of elastic waves through a stratified soil medium." *Journal of Applied Physics*, Vol. 21, PP. 89-93.
- 12 - Dorman, J., Ewing, M., (1962). "Numerical inversion of seismic surface wave dispersion data and crust-mantle structure in New York- Pennsylvania area." *J. Geophys. Res.*, Vol. 67, No. 13, PP. 5227-5241.
- 13 - Ghalandarzadeh, A., Tabatabaie, S., Salamat, A.S., (2005). *Development of earthquake design spectrum for Bam city using earthquake records and geotechnical conditions of the city*. BHRC (in Farsi).
- 14 - Askari, A., Azadi, M., Ghayamghamian, M.R., (2004). "Preliminary Seismic Microzonation of Bam." *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE)*, Vol. 5, No. 4, PP. 69-80.
- 15 - Towhata, I., Ghalandarzadeh, A., Shahnazari, H., Mohajeri, M. and Shafiee A., (2004). "Seismic behavior of local soil and foundations in Bam city during 2003 Bam earthquake in Iran." *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ*. Vol. 79, PP. 69-80.
- 16 - Redpath, B.B., (1973). *Seismic refraction exploration for engineering site investigations*. Technical report E-73-4, U.S. Army corps of engineers waterways experimental station.

واژه‌نامه انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Dispersion characteristics
 - 2- Observed dispersion curve
 - 3- Inverse analysis
 - 4- Down-Hole
 - 5- Reflection
 - 6- Refraction
 - 7- Lowpass filters
 - 8- A/D Converter
 - 9- Sampling rate
 - 10-Phase velocity
 - 11-Cross spectrum
 - 12-Resolution
 - 13-Transfer matrix method
 - 14-Swedish weight sounding
-