

شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران

ارزیابی سافتار سرعتی موج برشی در غرب مشهد به روش آرایه

میکروترمورها (ReMi) و مقایسه آن با داده های درون گمانه ای

احسان رستمی (*)، دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله شناسی، دانشگاه تهران، enrostami@ut.ac.ir

ناصر حافظی مقدس، دکترای زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، h_moghads@yahoo.com

احمد سدیدخوی، دکترای زلزله شناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، asadid@ut.ac.ir

اصغر آزادی، دکترای زلزله شناسی، مهندسین مشاور زمین فیزیک پویا، asghar_azadi@yahoo.com

چکیده:

ارزیابی دقیق سرعت موج برشی لایه های کم عمق نقش مهمی در بررسی خطر زمین لرزه ایفا می کند. در این میان روش های آنالیز امواج سطحی به علت ارزانی و اثرات تخریبی کمتر کاربرد روز افزون پیدا کرده اند. جهت ارزیابی سرعت موج برشی در غرب شهر مشهد برداشت آرایه میکروترمورها در ۳ نقطه از شهر انجام پذیرفت و پس از پردازش و تفسیر، پروفیل سرعتی موج برشی و سرعت میانگین تا عمق ۳۰ متر محاسبه و با داده های دقیق درون گمانه ای مقایسه شد. با توجه به همخوانی نسبتاً خوب این داده ها با یکدیگر می توان مطالعات آرایه میکروترمورها را به عنوان روشی ارزان و غیر مخرب جایگزین روش های معمول مانند دانهول نمود.

واژه های کلیدی: امواج سطحی، سرعت موج برشی، آرایه میکروترمورها، دانهول

مقدمه :

پاسخ حوضه ای رسوبی به انرژی زمین لرزه ای بزرگ تابع عواملی چون نزدیکی به چشمه، ویژگی های گسیختگی، تمایز امپدانسی و ساختار حوضه و پارامترهای دینامیکی رسوبات نزدیک سطح دارد (Goto et.al, 2005). بسیاری از مطالعات نشان داده اند که تقویت و تشدید لرزه ای حرکت زمین به علت سرعت پایین موج برشی، عامل اصلی تخریب ساختمان ها به هنگام زلزله بوده است (Jaume, 2006). که این فاکتور در حوضه های رسوبی اهمیت بیشتری پیدا می کند (Borcherdt, 1970). سرعت موج برشی پارامتر بسیار مهمی در آیین نامه های ساختمانی است. به طور کلی مطالعات لرزه ای درون گمانه ای به عنوان استاندارد جهت برآورد سرعت موج برشی پذیرفته شده است اما حفاری و مطالعات جنبی آن گرانقیمت، وقت گیر و مخرب می باشد. وجود این مشکلات منجر به ابداع تکنیک های غیر مخرب و ارزان قیمت گردید. در این میان روش آنالیز چندکاناله امواج سطحی (MASW) به عنوان تکنیک غیر مخرب توسط park, 1998 معرفی شد که امکان بدست آوردن سرعت موج برشی بوسیله امواج سطحی رکورد شده توسط سنسورهای واقع در سطح را می دهد. در حقیقت وجود امواج رایی که در لایه های نزدیک به سطح حرکت می کنند مبنای اصلی این آنالیز است. در یک محیط لایه بندی شده ناهمگن امواج سطحی پاشیده می شوند، یعنی امواج رایی با طول موج (فرکانس) متفاوت یا سرعت های متفاوت حرکت می کنند. و این وابستگی سرعت (فاز یا گروه) به فرکانس نتیجه می دهد که امواج رایی با فرکانس های بالا (طول موج پایین) حاوی اطلاعاتی راجع به لایه های بالایی و امواج طول موج بالا را می توان برای ارزیابی لایه عمیق تر مورد استفاده قرار داد. روش MASW را هم برای برداشت های فعال

(active) و هم غیرفعال (passive) می توان اعمال نمود. روش فعال در باند فرکانسی حدود ۵-۷۰ هرتز اجازه شناسایی منحنی پاشندگی (سرعت فاز تجربی) را به ما می دهد و در بازه فرکانسی یاد شده حدودا تا عمق ۳۰ متر قابل بررسی است. در روش های غیر فعال خطی (ReMi) با توجه به عدم وجود چشمه فعال، فرکانس های پایین تر (۵-۱۵) برداشت می شوند. لذا وجود طول موج های بلندتر باعث دستیابی به عمق های بیشتر می شود (Louie, 2001). روش ReMi که Louie, 2001 پیشگام توسعه آن بود، شامل ۳ مرحله است ۱- محاسبه منحنی تجربی پاشندگی امواج رایلی، مرحله بعدی محاسبه عددی منحنی دیسپرژن ظاهری و نهایتا محاسبه سرعت موج برشی با استفاده از وارون سازی منحنی پاشندگی. در این مطالعه به منظور بررسی پروفیل سرعتی موج برشی به روش آرایه میکروترمورها (ReMi) تعداد ۳ نقطه در شهر مشهد انتخاب و تعداد مناسبی برداشت انجام گردید و نتایج داده ها با برداشت های درون گمانه ای انجام شده در همان منطقه مقایسه گردید.

مشخصات عمومی دشت مشهد

دشت مشهد در حد فاصل طول جغرافیایی ۲۰°، ۵۸' تا ۸°، ۶۰' شرقی و عرض جغرافیایی ۴۰°، ۳۵' تا ۳°، ۳۶' شمالی در شمال شرقی ایران واقع شده و از شمال به ارتفاعات هزار مسجد و از جنوب به ارتفاعات بینالود محدود می گردد. بافت و ضخامت رسوبات در شهر مشهد متأثر از رسوبگذاری مسیلهای فرعی جنوبی و جنوبغربی و باد می باشد. بافت خاک در سطح شهر تابعی از فاصله تا ارتفاعات و همچنین فاصله تا مسیلهای اصلی است. بررسی های انجام شده نشان میدهد که بطور کلی بافت خاک در سطح شهر مشهد از غرب به سمت شرق و همچنین از جنوب به سمت شمال ریز دانه تر می گردد.

مشخصات عمومی منطقه مورد مطالعه

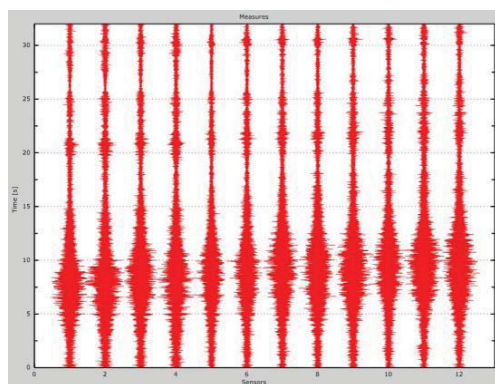
زمینهای غرب مشهد شامل اراضی الهیه، امامیه، قاسم آباد، آزاد شهر و بخشی از سجاد متأثر از رسوبگذاری مسیلهایی می باشد که از رخنمونهای دگرگونی ارتفاعات جنوبغرب مشهد سرچشمه می گیرد. مهمترین مسیلهای این قسمت کال شاندیز، چهل بازه و منزل آباد است. مسیلهای فوق سرشاخه های کشف رود می باشند که به تبعیت از شیب عمومی توپوگرافی با روند شمالشرقی به کشف رود می ریزند. با توجه به نزدیک بودن به ارتفاعات، نهشته های این قسمت عموماً شنی می باشد. در اطراف مسیل چهل بازه پهنه های ماسه ای وجود دارد که مربوط به زمان طغیان آن است

بحث:

برداشت داده ها

در این مطالعه پروفیل سرعتی موج برشی با استفاده از دو شیوه مطالعات لرزه ای درون گمانه ای (دان هول) و مطالعات لرزه ای سطحی (ReMi) مطالعه و نتایج با هم مقایسه شده اند. در روش درون گمانه ای پس از حفر گمانه با عمق مورد نظر، سنسور سه مولفه ای درون گمانه قرار می گیرد و با ایجاد امواج فشارشی و برشی در هر عمق، پروفیل سرعتی با استفاده از زمان رسید امواج درونی محاسبه می شود. در این روش معمولاً چشمه لرزه ای در سطح و در نزدیکی دهانه گمانه و گیرنده امواج در داخل، تمام طول گمانه را جاروب می کند. از این روش در محل هایی که نوفه (Noise) وجود دارد، استفاده می شود، زیرا با رفتن گیرنده به عمق از دامنه نوفه دریافتی توسط آن کاسته شده و بر کیفیت نگاشته ها افزوده می شود. این روش و سایر روش های درون گمانه ای مانند کراس هول گرچه به عنوان روش های استاندارد و نسبتاً دقیق پذیرفته شده اند اما هزینه بالای حفاری و اثرات مخرب زیست محیطی آن ها باعث شده است استفاده از روش های غیر مخرب و ارزان سطحی مورد توجه روز افرون قرار گیرد. برای این پژوهش متد آرایه میکروترمورها (ReMi) مورد استفاده قرار گرفت. روش

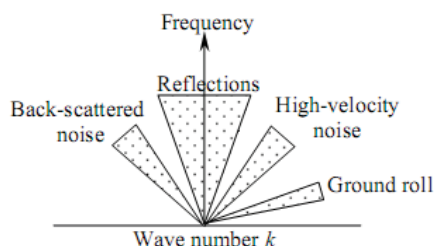
آرایه میکروترموورها در سال ۲۰۰۲ توسط لویی ارائه شد. مزیت این روش استفاده از تجهیزات معمولی و ارزان قیمت برداشت شکست مرزی (refraction) و عملیات صحرایی سریع با نیروی کار اندک می باشد. در مقایسه با برداشت های معمول خردلرزه ها نیز این روش نیازی به محیط آرام لرزه ای ندارد و لذا برداشت های شبانه نیز حذف می شوند. در این مطالعه با استفاده از ژئوفون های با فرکانس بحرانی ۴/۵ هرتز و آرایه خطی ۱۲ کاناله با فاصله ژئوفون های ۴ متر استفاده و در هر برداشت تعداد ۲۰ رکورد ۳۲ ثانیه ای با فرکانس نمونه برداری ۲ میلی ثانیه و بهره تقویت ۳۶ دسی بل نویز محیطی برداشت شد. مطالعات نشان می دهد تغییر بهره اولیه تغییرات خاصی در نتیجه داده ها ندارد (Louie, 2001). در مناطقی که سکوت لرزه ای حاکم بود از ضربه پتک در فواصل خاص و موازی آرایه استفاده گردیده است. به علت استفاده از آرایه خطی انرژی هایی که در راستای آرایه نباشند به صورت مایل به آرایه خواهند رسید و لذا هنگام بررسی طیف فرکانس کندی احتمال پیک کردن سرعت های ظاهری بالاتر از حد واقعی وجود دارد (Louie, 2001, Roma, 2002, strobria, 2011). برای کاهش این خطا داده ها که سعی شده جهت آرایه تا حد امکان موازی با نویز شناخته شده باشد (مثلا مواری با خیابان، شکل ۱) (Louie, 2001).



شکل ۱) یک نمونه از برداشت داده ها کنار بلوار وکیل آباد و همزمان با عبور مترو

پردازش و تفسیر داده ها

جهت محاسبه منحنی پاشیدگی تجربی داده های بدست آمده بدون اعمال هیچ نوع فیلتر از فضای زمان - مکان به فرکانس عدد موج برده می شوند. متد $f-k$ نوعی تبدیل فوریه دو بعدی روی داده های زمان و مکان است. علت این کار عموماً جداسازی زمین غلت ها از سایر امواج لرزه ای و عموماً حذف آن ها است (شکل ۲).



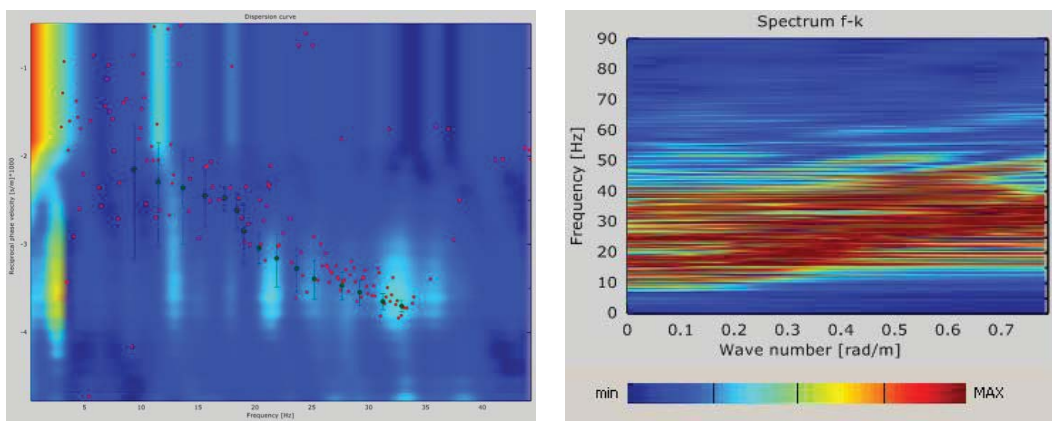
شکل ۲) جدایش رخداد های مختلف لرزه ای در فضای $f-k$ (Fotti, 2001)

از آنجاییکه زمین غلت ها عموماً با امواج ریلی ترکیب می شوند لذا در فواصل خاص از چشمه امواج ریلی پدیده غالب در امواج لرزه ای هستند.

جدول (۱) سهم امواج مختلف لرزه ای در انرژی حامل (Fotti,2001)

نوع موج	درصد انرژی
ریلی	۶۷
برشی	۲۶
فشاری	۷

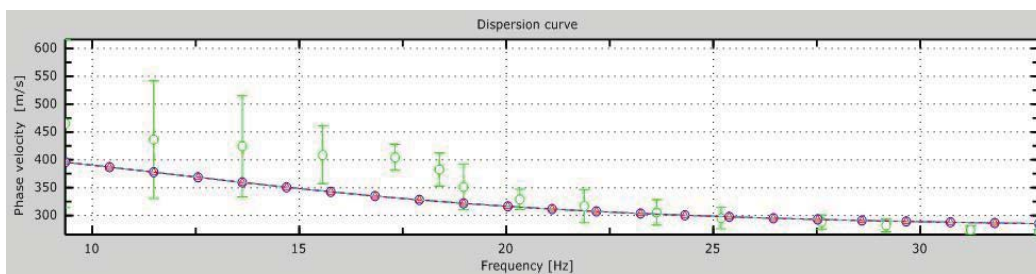
در نتیجه متد f-k ابزاری قدرتمند برای جداسازی امواج سطحی از سایر فازها و محاسبه منحنی دیسپرزین تجربی خواهد بود. در مرحله بعد منحنی دیسپرزین تجربی روی طیف فرکانس-کندی قرار می گیرد تا سرعت های فاز مناسب روی این فضا پیک شوند (Roma,2001) شکل (۳). به هنگام پیک کردن طیف فرکانس کندی سعی می شود حد پایین طیف پیک شود تا مشکل وجود سرعت های ظاهری برطرف گردد (Louie,2001).



شکل (۳) راست: طیف f-k یکی از برداشت های انجام شده، چپ: منحنی پاشندگی تجربی مربوط که روی طیف فرکانس کندی قرار گرفته است

محاسبه منحنی پاشندگی تئوری

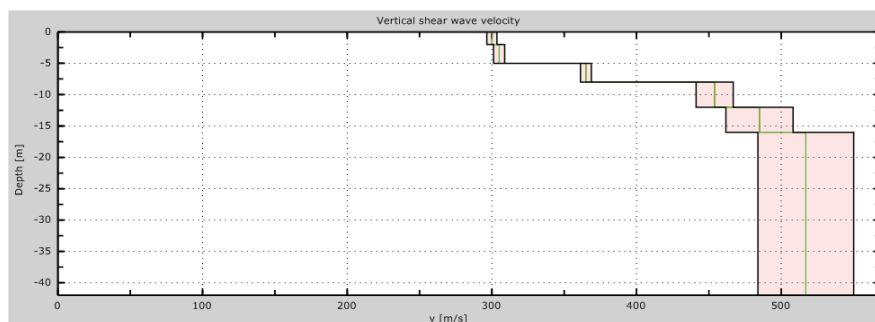
برای محاسبه منحنی پاشیدگی تئوری (عددی) از متد Roma,2001 استفاده شده است. این روش شامل اعمال تبدیل فوریه یک بعدی روی تابع گرین نیم فضای لایه بندی شده سیستم جهت محاسبه طیف f-k است. پس از محاسبه طیف f-k عددی، بقیه مراحل جهت محاسبه منحنی دیسپرزین عددی مانند محاسبه منحنی پاشیدگی تجربی خواهد بود (roma,2001) (شکل ۴)



شکل ۴) منحنی پاشیدگی تجربی (سبز رنگ) و عددی (قرمز رنگ)، مشاهده می شود که در فرکانس های بالا این دو منحنی به هم نزدیک شده اند.

وارون سازی داده ها

بعد از محاسبه منحنی پاشیدگی ظاهری و منحنی پاشیدگی تجربی، سعی شد با تغییر پارامترهای اساسی دخیل در منحنی (سرعت موج برشی و فشارشی، ضخامت لایه و چگالی) نزدیک ترین جواب ها به منحنی تجربی محاسبه شوند و خطاها توسط روش کمترین مربعات به حداقل رسیدند. برای نیل به جواب دقیق تر بعضی از پارامترها که با عمق تغییرات شدید ندارند (مانند چگالی) ثابت شدند (شکل ۵)

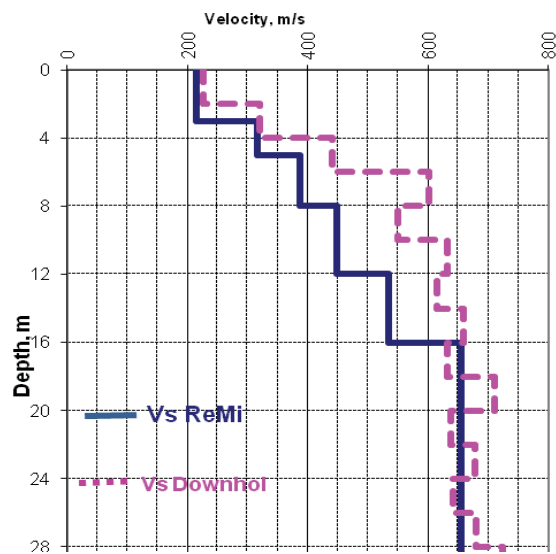


شکل ۵) نتایج وارون سازی داده ها روی یکی از پروفیل ها به همراه محدوده خطا، همانطور که مشاهده می شود اختلاف منحنی پاشیدگی تجربی و عددی در فرکانس های پایین (شکل قبل) منجر به ایجاد خطای بیشتر در اعماق پایین شده است

مقایسه نتایج

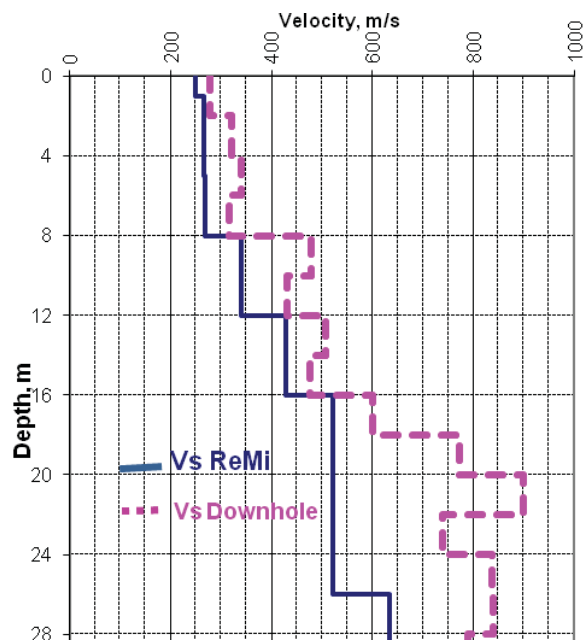
سایت شماره یک

این نقطه واقع در کنار بلوار وکیل آباد است. جهت برداشت امواج ناشی از حرکت ماشین ها و عبور مترو برداشت داده ها کنار بلوار چیده شد. فاصله تقریبی آرایه از گمانه حفاری شده حدود ۵۰ متر بوده است. نتایج برداشت در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶) مقایسه پروفیل سرعتی موج برشی به روش ReMi و Downhole در سایت شماره یک بر اساس مطالعات لرزه ای درون گمانه ای و آرایه میکروترمورها سرعت متوسط موج برشی تا عمق ۳۰ متر در این سایت به ترتیب حدود ۵۲۷ و ۴۸۵ متر بر ثانیه برآورد گردیده است.
سایت شماره ۲

این نقطه واقع در بلوار شهید ستاری بوده و آرایه خطی در وسط بلوار جایگذاری شده است.

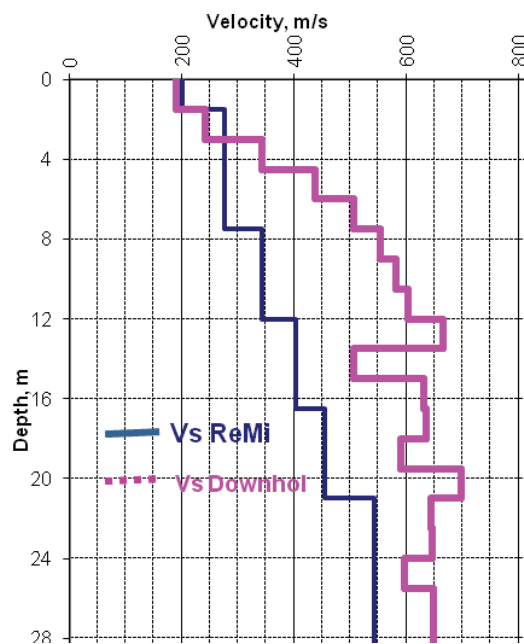


شکل ۷) مقایسه پروفیل سرعتی موج برشی به روش ReMi و Downhole در سایت شماره ۲

بر اساس مطالعات لرزه ای درون گمانه ای و آرایه میکروترمورها سرعت متوسط موج برشی تا عمق ۳۰ متر در این سایت به ترتیب حدود ۵۰۴ و ۴۳۸ متر بر ثانیه برآورد گردیده و بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ در گروه تیپ خاک ۲ قرار می گیرند.

سایت شماره ۳

این نقطه واقع در بلوار الهیه، الهیه ۲۵ قرار دارد و در سایت سکوت تقریبی لرزه ای حاکم است.



شکل ۸) مقایسه پروفیل سرعتی موج برشی به روش ReMi و Downhole در سایت شماره ۳

بر اساس مطالعات لرزه ای درون گمانه ای و آرایه میکروترمورها سرعت متوسط موج برشی تا عمق ۳۰ متر در این سایت به ترتیب حدود ۵۰۴ و ۴۹۰ متر بر ثانیه برآورد گردیده و بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ در گروه تیپ خاک ۲ قرار می گیرند.

نتیجه گیری :

در هر ۳ سایت مطالعه شده، میانگین سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر حداکثر ۱۵ درصد با هم اختلاف دارند که در دو سایت این اختلاف کمتر از ۱۰ درصد است. بر اساس دقت در نظر گرفته شده توسط Louie(2001) اختلاف تا ۲۰ درصد قابل قبول می باشد.

در روش ReMi به علت رکورد برخی نویزهای شهری (مانند ترافیک سنگین) می توان برخی لایه ها را با دقت و جزئیات بیشتر بررسی کرد چون نویزهای شهری دارای طیف فرکانسی پهن هستند و همانگونه که مشاهده می شود در سایت شماره یک به علت وجود این نویزها نتایج در لایه های سطحی بسیار به هم نزدیک هستند. علت اختلاف در اعماق زیاد را می توان به عدم رکورد فرکانس های کوچک (طول موج های بلند) نسبت داد .

باید توجه کرد که مرحله پیک کردن منحنی پاشیدگی توسط کاربر انجام می شود. از مزیت های این کار این است که همیشه یک بازبینی بصری روی داده ها انجام می شود اما باید توجه داشت که عدم شناخت و تجربه کافی نسبت به امواج سطحی و مراحل انجام کار منجر به نتایج نامعقول در پروفیل سرعتی خواهد شد. به لحاظ عملیاتی روش ReMi حدودا ۵۰ درصد از زمان عملیات را کاهش می دهد ضمن اینکه اثرات تخریبی روی محیط زیست ندارد و از آنجایی که نویزهای شهری نیز در این روش قابل استفاده اند، لذا محدودیتی در زمان برداشت وجود ندارد. بر خلاف سایر روش های میکروترمو که غالبا نیازمند سکوت لرزه ای و برداشت شبانه هستند.

References:

- 1- Borcherdt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bulletin of the Seismological Society of America* V.60, pp 29–61.
- 2-Goto, H., S. Sawada, H. Morikawa, H. Kiku, and S. Ozalaybey (2005). Modeling of 3D subsurface structure and numerical simulations of strong ground motion in the Adapazari basin during the 1999 Kocaeli earthquake, Turkey. *Bulletin of the Seismological Society of America* V.95, 2, pp. 197–2,215.
- 3-Jaume, S, 2006. Shear Wave Velocity Profiles via Seismic Cone Penetration Test and Refraction Microtremor Techniques at ANSS Strong Motion Sites in Charleston, South Carolina, *Seismological Research Letters*, V. 77, pp. 771-779
- 4- Louie, J. N. (2001). Faster, better shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America* v.91, 347–364
- 5- Park, C. B., R. D. Miller, and J. Xia (1999). Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics* V. 64, pp. 800–808..
- 6- Roma V. 2001. Soil Properties and Site Characterization by means of Rayleigh Waves. Ph.D Dissertation, Politecnico di Torino (Italy).
- 7- Strobbia, S, and Giorgio, C. (2011). Refraction microtremors: Data analysis and diagnostics of key hypotheses, *GEOPHYSICS*, V 76, pp 373-379.