

# ارزیابی روش معکوس نسبت طیفی افقی به قائم خردلرزه‌های محیطی در استخراج نیمرخ سرعت موج برشی ساختگاه با آزمایش درون چاهی سطح به عمق

مهنوش بیگلری<sup>۱\*</sup>، ایمان عشایری<sup>۲</sup>، سید یادگار هوشیار<sup>۳</sup>

۱- استادیار مهندسی زلزله، دانشگاه رازی

۲- استادیار مهندسی زلزله، دانشگاه رازی

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه رازی

m.biglari@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۶/۲/۳۱

تاریخ دریافت ۹۵/۰۶/۰۸

## چکیده

به منظور استخراج نیمرخ سرعت موج برشی با استفاده از معکوس نسبت طیفی مولفه‌ی افقی به قائم خردلرزه‌ها (H/V)، اندازه‌گیری‌های خردلرزه‌ای به صورت تک ایستگاهی در شش ایستگاه در مسیر قطار شهری کرمانشاه انجام شد. ابتدا داده‌های ثبت شده توسط دستگاه لرزه‌نگار سه مولفه‌ای، با استفاده از نرم‌افزار Geopsy پردازش و فرکانس غالب ساختگاه برآورد شد. سپس به منظور تعیین نیمرخ سرعت موج برشی از معکوس طیف H/V، از ۴ مدل پیشنهادی ۳، ۵، ۷ و ۱۰ لایه برای همه‌ی نقاط مذکور استفاده شد و در نهایت به منظور بررسی دقت نتایج به دست آمده، نیمرخ‌های سرعت موج برشی به دست آمده از روش معکوس طیف H/V با مدل‌های مذکور با نتایج آزمایش درون‌چاهی سطح به عمق (Down-hole) مقایسه شده‌اند. نکته قابل توجه این است که نیمرخ‌های سرعت موج برشی ساختگاه بدون توجه به نتایج آزمایش‌های درون چاهی برای در نظر گرفتن ضخامت و محدوده‌ی سرعت لایه‌های زمین، استخراج شد و در نهایت با نیمرخ سرعت موج برشی حاصل از آن آزمایشها مقایسه شد. نتایج به دست آمده از هماهنگی خوبی با نتایج آزمایش‌های درون‌چاهی برخوردار است. تشابه نیمرخ‌های استخراج شده با نیمرخ آزمایش درون چاهی سطح به عمق با افزایش تعداد لایه‌های در نظر گرفته شده در مدل تحلیلی افزایش می‌یابد. همچنین عمق نیمرخ‌های استخراج شده، با افزایش تعداد لایه‌های مدل‌های اولیه افزایش می‌یابد و بدین ترتیب روش معکوس طیف H/V نیمرخ سرعت موج برشی را تا عمق بیشتری نسبت به آزمایش درون چاهی برآورد می‌کند.

**واژگان کلیدی:** نیمرخ سرعت موج برشی، روش تک ایستگاهی، خردلرزه، معکوس طیف افقی به قائم

## ۱- مقدمه

آزمایش‌های انعکاسی<sup>۱</sup> و انکساری<sup>۲</sup> به دست آورد. روشهای گمانه‌ای به طور کلی زمان‌بر، مخرب و پرهزینه‌تر هستند. همچنین در آزمایش‌های انعکاسی و انکساری باید از منابع مصنوعی تحریک مانند انفجار یا لرزش استفاده نمود.

نیمرخ سرعت موج برشی را می‌توان از طریق اندازه‌گیری‌های درجا مانند ثبت ارتعاشات محیطی به صورت تک ایستگاهی یا آرایه‌ای، روش‌های گمانه‌ای (cross-hole - up/down-hole) و

عمق انجام شده در گمانه‌های حفر شده [15] منطبق بر شش نقطه مذکور، مقایسه شده‌اند.

## ۲- مراحل استخراج نیمرخ سرعت موج برشی

استخراج نیمرخ سرعت موج برشی با استفاده از اندازه‌گیری خردلرزه‌ها به صورت تک ایستگاهی از سه گام اصلی تشکیل می‌شود؛ (۱) عملیات میدانی و برداشت داده‌ها، (۲) پردازش داده‌های خردلرزه و تعیین طیف  $H/V$ ، (۳) معکوس طیف  $H/V$  و استخراج نیمرخ سرعت موج برشی، که در ادامه شرح داده می‌شوند.

### ۲-۱- عملیات میدانی و برداشت داده‌ها

اندازه‌گیری خردلرزه‌ها در شش نقطه منطبق بر محل حفر گمانه‌های نشان داده شده در شکل (۱) در مسیر پروژه قطار شهری کرمانشاه به صورت تک ایستگاهی انجام شد. جدول (۱) گزارشی از زمان و تعداد تکرار برداشت‌ها در هر کدام از ایستگاه‌ها را ارائه می‌دهد.

شکل ۱. موقعیت شش ایستگاه اندازه‌گیری‌های تک ایستگاهی



Fig. 1. Location of six measuring stations

خردلرزه‌ها توسط لرزه‌نگار باند-پهن (Broadband) سه مولفه-ای CME-4111 به مدت ۶۰ دقیقه در هر ایستگاه ثبت شده‌اند. همچنین هر یک از مولفه‌ها با آهنگ نمونه‌برداری ۲۰۰ نمونه در ثانیه برداشت شدند. شکل (۲) دستگاه لرزه‌نگار را در حال ثبت داده‌های خردلرزه در نقطه BH-3 نشان می‌دهد و در شکل (۳) نیز نمونه‌ای از خردلرزه‌های سه مولفه‌ای ثبت شده در ایستگاه MI-C نشان داده شده است.

به منظور غلبه بر این مشکلات، می‌توان روشهای مبتنی بر ارتعاشات محیطی یا خردلرزه‌ها را که در نواحی شهری و در اماکن عمومی که امکان استفاده از منابع ارتعاشی فعال مانند انفجار امکان پذیر نیست، به کار برد. علاوه بر این، استفاده از روش خردلرزه‌ها این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان بدون حفر گمانه نیمرخ سرعت موج برشی ساختگاه را استخراج کرد. [1]

یکی از روش‌های بسیار رایج برای تعیین ویژگی‌های خاک روش تک ایستگاهی مشهور به ناکامورا است [2]. این روش تنها نیازمند داده‌های ثبت شده توسط دستگاه‌های سه مولفه‌ای است و بر پایه‌ی نسبت طیفی محاسبه شده بین مولفه‌های افقی و قائم از یک نگاشت ( $H/V$  یا  $HVSR$ ) مبتنی است. بدین ترتیب تخمین مناسبی از فرکانس طبیعی ساختگاه به دست می‌آید [3, 4]. نیمرخ‌های سرعت موج برشی را می‌توان توسط حل مساله معکوس کردن طیف  $H/V$  تخمین زد. در این مورد، مساله معکوس به عنوان یک فرآیند بهینه‌سازی در فضای پارامتر محدود امکان پذیر و هر پارامتر در این مدل مربوط به ویژگی‌های فیزیکی زمین مانند سرعت موج برشی و ضخامت هر لایه است [3].

در پژوهش‌های انجام شده توسط پژوهشگران مختلف از اندازه‌گیری خردلرزه‌ها به صورت آرایه‌ای و تک ایستگاهی به عنوان یکی از روش‌های بسیار موثر و سریع به منظور تعیین ساختار سرعت موج برشی در ساختگاه و یا تعیین آثار محلی ساختگاه استفاده شده است و نتایج حاصل از آنها از هماهنگی خوبی با نتایج سایر روش‌های قابل اعتماد برخوردار بوده است [3 - 13]. این مطالعات جامع که در طول ۲۰ سال اخیر در نقاط مختلف دنیا بر روی روش‌های آرایه‌ای و تک ایستگاهی ثبت و پردازش خردلرزه‌ها صورت گرفته است، اقتصادی بودن و سرعت عمل روش‌های مذکور را در برآورد سرعت موج برشی در لایه‌های زیر سطحی نشان می‌دهد.

در این مطالعه، اندازه‌گیری‌های تک ایستگاهی در مسیر پروژه قطار شهری کرمانشاه و در شش ایستگاه با تحلیل  $H/V$  به منظور تخمین فرکانس طبیعی صورت گرفته است. سپس با استفاده از الگوریتم همسایگی [14]، نیمرخ سرعت موج برشی برای همه ایستگاه‌ها استخراج و در نهایت به منظور بررسی دقت نتایج به دست آمده، نیمرخ‌های سرعت موج برشی استخراج شده توسط معکوس منحنی‌های  $H/V$  با نتایج آزمایش درون‌چاهی سطح به

جدول ۱. زمان و تعداد تکرار برداشت‌ها در شش ایستگاه اندازه‌گیری شده

Time & Duration	No. of Measurements	Station
00:10-01:10	2	M1-C
00:30-01:30	2	M5-C
00:20-01:20	3	M7-W
03:00-04:00	4	BH-3
05:30-06:30	1	BH-5
00:30-01:30	2	M12-W

Table 1. Duration, time and No. of measurements per station

۲-۲- پردازش داده‌های خردلرزه و تعیین طیف H/V امروزه استفاده از داده‌های تک ایستگاهی ارتعاشات محیطی کاربردهای گسترده‌ای در مطالعات اثر ساختگاه روی جنبش لرزه‌ای زمین و همچنین برآورد ساختار سرعتی لایه‌های آبرفتی پیدا کرده است. روش نسبت طیفی H/V برای اولین بار به وسیله نوگوشی و ایگاراچی [16] معرفی شد و سپس به وسیله ناکامورا [2] به صورت کامل‌تری ارائه شدند. در ادامه روش تعیین طیف H/V توضیح داده شده است.

با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری امواج خردلرزه، فرکانس طبیعی ساختگاه با روش نسبت طیفی مولفه‌ی افقی به قائم (H/V) در نقطه بیشینه دامنه نسبت طیفی برآورد می‌شود. بدین منظور، داده‌های ثبت شده در مرحله قبل با نرم‌افزار Geopsy [17] و با استفاده از راهنمای ارائه شده توسط SESAME [18] پردازش می‌شوند. در این فرآیند نگاشت‌های خام تصحیح می‌شوند و سپس طیف فوریه دامنه هر سه مولفه (دو مولفه افقی و یک مولفه قائم) یک نگاشت محاسبه می‌شود. سپس از تقسیم طیف دامنه میانگین مولفه‌های افقی به مولفه قائم، منحنی H/V به دست می‌آید. تصحیح نگاشت‌های خام تا رسیدن به طیف H/V شامل مراحل زیر است:

۱- حذف ارتعاش‌های با فرکانس کمتر از ۰/۵ هرتز توسط صافی بالاگذر

۲- انتخاب پنجره‌های زمانی مناسب (بین ۱۰-۳۰ ثانیه) برای حذف ارتعاش‌های ناگهانی و حفظ بخش‌های پایدار ارتعاشات محیطی در طول نگاشت‌های ۶۰ دقیقه‌ای ثبت شده

۳- محاسبه طیف فوریه دامنه که به وسیله روش کونوو اهماتچی [19]، با ثابت ۴۰ و برش کسینوسی ۰/۵ نرم شده است.

۴- محاسبه نسبت طیفی افقی به قائم و انحراف معیار برای تمام پنجره‌های مورد قبول و محاسبه میانگین نسبت طیفی برای پنجره‌های زمانی.

مقادیر فرکانس طبیعی ساختگاه و انحراف از معیار به دست آمده از تحلیل فوق برای همه نقاط در جدول (۲) ارائه شده است.

شکل ۲. دستگاه لرزه‌نگار در حال ثبت داده در ایستگاه BH-3



Fig. 2. Measurement setup at the stations BH-3

شکل ۳. برداشت سه مولفه‌ای خردلرزه ثبت شده در ایستگاه M1-C

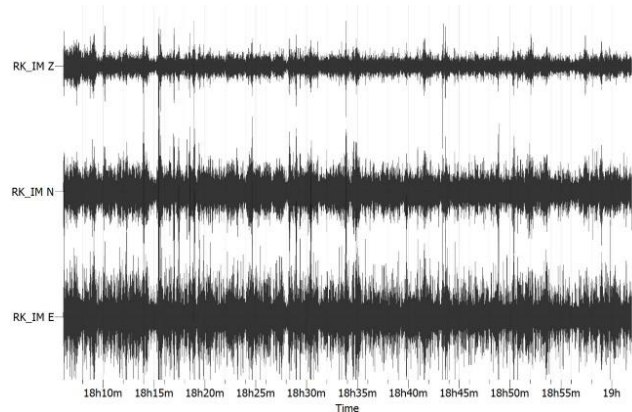


Fig. 3. Recorded three components ambient vibrations at the station of M1-C

برگشتی انجام می‌پذیرد. تخمین مدل بهینه که یک مساله غیر منحصر به فرد است از طریق الگوریتم همسایگی که بر مبنای نمونه‌های شبه کاتوره‌ای عمل می‌کند، استخراج می‌شود. این الگوریتم در سال ۱۹۹۹ به وسیله سمبریج [14] معرفی و توسعه داده شد. واتلت و همکاران [20] با استفاده از توسعه الگوریتم همسایگی روشی برای وارون‌سازی منحنی‌های پراکندگی امواج سطحی ارائه دادند. در این روش الگوریتم همسایگی در مقایسه با دیگر روش‌های جستجوی تصادفی به پارامترهای کمتری برای تنظیم کردن نیاز دارد و در شرایط مساوی به نتایج همسان یا بهتری می‌رسد. در این مطالعه، تحلیل وارون‌پذیری توسط نرم‌افزار Dinver (از مجموعه Geopsy) و به روش الگوریتم همسایگی انجام شد. در الگوریتم همسایگی، برای استخراج نیمرخ سرعت تعداد زیادی مدل ایجاد می‌شود. با محاسبه فرکانس طبیعی برای هر کدام از مدل‌های ایجاد شده و مقایسه آن با فرکانس طبیعی مشاهده شده مقدار خطا برای هر مدل محاسبه می‌گردد. مقادیر خطا (Misfit) میزان انطباق مدل تولید شده با داده‌های مشاهده شده را نشان می‌دهد. در نهایت مدل‌هایی که کمینه میزان خطا را داشته باشند به عنوان مدل ساختگاه انتخاب می‌شود.

در نرم‌افزار Dinver با تعریف تعداد لایه مورد نظر برای مدل اولیه در فضای پارامتری، مشخصات گوناگونی شامل محدوده‌ی تغییرات سرعت موج برشی، محدوده‌ی تغییرات سرعت موج فشاری، چگالی و ضخامت لایه‌ها و نسبت پواسون تعریف می‌شوند. چگالی همه لایه‌ها بین ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت پواسون بین ۰/۲ تا ۰/۵ در نظر گرفته شده اند که انواع مختلف مصالح بنیادی در مکان‌های مطالعه شده را پوشش می‌دهد. انتخاب سایر پارامترها شامل تعداد لایه‌ها، محدوده سرعت‌های امواج برشی و ضخامت لایه‌ها، برای به دست آوردن نتایج قابل قبول از اهمیت زیادی برخوردارند. برای استخراج نیمرخ سرعت موج برشی در نقاطی که قبلاً مطالعات میدانی و آزمایشگاهی صورت گرفته است، این پارامترها را می‌توان با توجه به نتایج این مطالعات به آسانی انتخاب کرد و نتایجی هماهنگ با نتایج آزمایش‌های قبلی به دست آورد. اما برای نقاطی که از قبل هیچ گونه مطالعه و اندازه‌گیری میدانی صورت نگرفته است،

جدول ۲. نتایج حاصل از تحلیل خردلرزه‌ها در شش ایستگاه برداشت شده

Standard Deviation(Hz)	Natural Frequency(Hz)	Station
0.57	5	M1-C
0.77	4.7	M5-C
0.32	1.9	M7-W
0.8	6.6	
0.44	2.53	BH-3
0.86	6.8	
0.13	1.2	BH-5
0.63	4.5	
0.86	5.84	M12-W
0.86	۷/۹	

Table 2 . The results of H/V analysis at all stations

همان‌گونه که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، نسبت طیفی افقی به قائم در ایستگاه‌های M1-C و M5-C دارای قله‌هایی به ترتیب در فرکانس‌های ۴/۷ و ۵/۷ هرتز است. در نقاط M7-W و M12-W نسبت طیفی افقی به قائم دارای دو قله واضح به ترتیب در فرکانس‌های ۱/۹ و ۶/۶ هرتز و ۵/۸۴ و ۷/۹ هرتز است که هر دوی آنها شرایط موجود برای درستی قله را برآورده می‌کنند. مطالعات نظری و عددی نشان داده است که، چنین حالتی زمانی پیش می‌آید که لایه‌های زیرسطحی شاهد دو تباین مقاومتی بالا نسبت به سنگ بستر، در دو مقیاس متفاوت باشند. بنابراین هر دو قله موجود مربوط به فرکانس طبیعی ساختگاه است و از هر دو فرکانس برای استخراج نیمرخ سرعت موج برشی استفاده می‌شود. در نقاط BH-3 و BH-5 نسبت طیفی افقی به قائم دارای دو قله است که به دلیل کم بودن نسبت دامنه طیف H/V (کمتر از یک)، در قله اول نقطه BH-5 با فرکانس ۱/۲ هرتز و قله دوم BH-3 با فرکانس ۶/۸ هرتز، فرکانس مربوط به این قله‌ها قابل اعتماد نیست. اما قله دوم ایستگاه BH-5 در فرکانس ۴/۵ هرتز و قله اول ایستگاه BH-3 در فرکانس ۲/۵۳ هرتز واضح و قابل اعتماد هستند و مربوط به مصالح زیر سطحی ساختگاه است.

۲-۳- معکوس طیف H/V و استخراج نیمرخ سرعت موج برشی  
پس از تعیین طیف H/V و فرکانس طبیعی نقاط برداشت شده، به منظور برآورد نیمرخ سرعت موج برشی عملیات

جدول ۳. مشخصات مدل‌های ورودی اولیه به منظور انجام تحلیل برگشتی و برآورد سرعت موج برشی

Layer's (m) depth	Shear wave velocity (m/s)	No. of Layers	Model No.
1-50	100-1300	3	1
1-100	200-1400		
>100	300-1500		
1-25	100-1100	5	1
1-50	200-1200		
1-75	300-1300		
1-100	400-1400		
>100	500-1500		
1-15	100-1100	7	3
1-30	200-1200		
1-45	300-1300		
1-60	350-1350		
1-75	400-1400		
1-90	450-1450		
>90	500-1500		
1-10	100-900	10	4
1-20	200-1000		
1-30	300-1100		
1-40	350-1150		
1-50	400-1200		
1-60	450-1250		
1-70	500-1300		
1-80	550-1350		
1-90	600-1400		
>90	650-1450		

Table 3. Initial input models intended to do inversion analysis and estimation of shear wave velocity

همچنین در شکل (۴) مشاهده می‌شود که عمق شناسایی شده توسط مدل‌های مذکور، با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد. یعنی بیشترین عمق شناسایی شده توسط مدل ۱۰ لایه است. علاوه بر این، تخمین نیمرخ‌های سرعت موج برشی با استفاده از معکوس طیف H/V تا اعماقی بیشتر از عمق قابل دسترسی در روش درون چاهی امکان‌پذیر است.

به منظور بررسی دقت نتایج، نیمرخ‌های سرعت موج برشی با مدل کمینه خطای بدست آمده از معکوس طیف H/V در هر یک از نقاط برداشت شده با نیمرخ‌های سرعت موج برشی به دست آمده از آزمایش درون چاهی سطح به عمق در شکل‌های (۵ تا ۷) مقایسه شده‌اند.

تشخیص تعداد لایه‌های ساختگاه و ضخامت آنها و همچنین محدوده‌ی سرعت امواج برشی، مشکل و با ابهام همراه است. در این مطالعه، برای انجام تحلیل برگشتی و به منظور بررسی حساسیت نتایج این وارون‌سازی به چگونگی پارامتری کردن ساختار خاک، مشخصات لایه‌های زیر سطحی بر اساس فرضیات مختلف پارامتری شوند. به منظور انجام تحلیل برگشتی و برآورد سرعت موج برشی در همه نقاط مطالعه شده، ۴ مدل ۳، ۵، ۷ و ۱۰ لایه در نظر گرفته شد. همه مدل‌های اولیه از ویژگی یکسانی برخوردارند به گونه‌ای که بازه‌ی تغییرات سرعت موج برشی برای هر مدل در همه لایه‌ها یکسان است و طول بازه سرعت در مدل‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ لایه، به ترتیب ۱۲۰۰، ۱۰۰۰، ۱۰۰۰ و ۸۰۰ نظر گرفته شده است. همچنین مقدار سرعت، در ابتدا و انتهای بازه در هر لایه از لایه فوقانی بیشتر در نظر گرفته شده است. این چنین انتخابی به عنوان مزیتی نسبت به مطالعات پیشین [5، 8، 21]، به منظور حفظ سادگی و عمومیت استفاده از این روش برای دیگر پژوهشگران به حساب می‌آید، که تفسیر و تعمیم نتایج حاصل را آسان می‌نماید. مشخصات هر کدام از مدل‌های اولیه معرفی شده در جدول (۳) آمده است. در حالت‌های مذکور سعی شده که مدل‌های متنوعی با در نظر گرفتن تعداد و ضخامت لایه‌ها بر اساس محدوده‌های مختلف سرعت در نظر گرفته شود. در این مقاله از این مدل‌ها برای شش ایستگاه برای تعیین نیمرخ سرعت موج برشی استفاده شده است. با استفاده از این مدل‌ها ابتدا بدون توجه به نتایج آزمایش درون چاهی سطح به عمق برای ضخامت و محدوده‌ی سرعت، نیمرخ سرعت موج برشی استخراج و در نهایت با نتایج بدست آمده از آزمایش درون چاهی سطح به عمق مقایسه شدند. در شکل (۴) نیمرخ‌های سرعت موج برشی با میزان خطا به ازای مدل‌های ۷، ۵، ۳ و ۱۰ لایه برای ایستگاه MI-C برای نمونه آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نیمرخ‌های مختلفی از سرعت موج برشی توسط معکوس طیف H/V با استفاده از ۴ مدل پیشنهادی ۳، ۵، ۷ و ۱۰ لایه جدول (۳) استخراج شده‌اند.

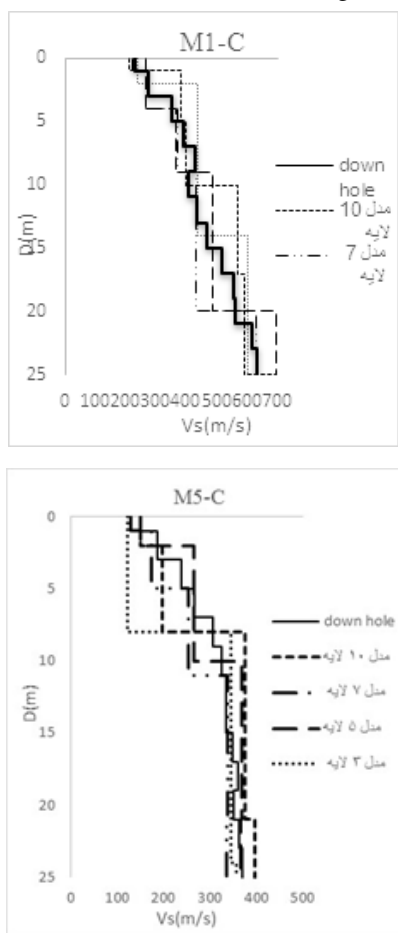
عمق، در جدول (۴) آورده شده است. در رابطه (۱)،  $V_s(M)$  سرعت متوسط موج برشی تا عمق  $M$  متری است و

که در آن ضخامت لایه و  $V_{si}$  سرعت امواج برشی لایه  $i$ ام و  $n$  تعداد لایه است.

$$V_s(M) = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n \frac{T_i}{V_{Si}}} \quad (1)$$

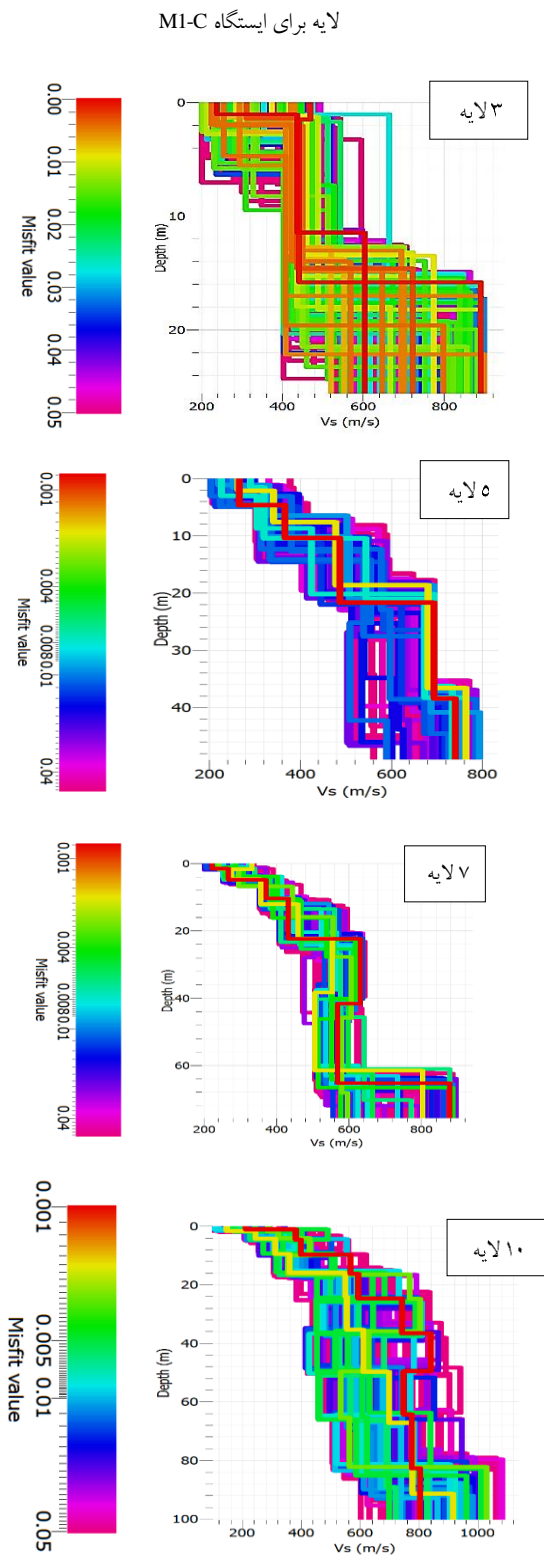
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نیمرخ‌های سرعت موج برشی به دست آمده از معکوس طیف  $H/V$  در تمامی موارد از همانگی خوبی با نتایج حاصل از آزمایش درون چاهی سطح به عمق برخوردارند.

شکل ۵. مقایسه نیمرخ‌های سرعت موج برشی بدست آمده از معکوس طیف  $H/V$  با در نظر گرفتن مدل‌های ۷، ۵، ۳ و ۱۰ لایه با نتایج آزمایش درون چاهی (ایستگاه‌های M1-C و M5-C)



**Fig. 5.** Comparison of shear wave velocity profiles obtained from the inverse spectrum  $H/V$ , taking into account the results of 3,5,7 and 10 layers models, with downhole experiments (stations M1-C and M5-C)

شکل ۴. نیمرخ‌های سرعت موج برشی با میزان خطا به ازای مدل‌های ۷، ۵، ۳ و ۱۰ لایه برای ایستگاه MI-C



**Fig. 4.** Shear wave velocity profiles with the amount of errors rate for models 3,5,7 and 10 layers for station M1-C

همچنین متوسط سرعت موج برشی محاسبه شده در عمق گمانه‌ها با استفاده از رابطه (۱) در هر کدام از نقاط برای همه مدل‌ها و همچنین برای نتایج آزمایش درون چاهی سطح به

شکل ۶. مقایسه نیمرخ‌های سرعت موج برشی بدست آمده از معکوس طیف H/V با در نظر گرفتن مدل‌های ۷، ۵، ۳ و ۱۰ لایه با نتایج آزمایش درون چاهی (ایستگاه‌های M7-W و BH-3)

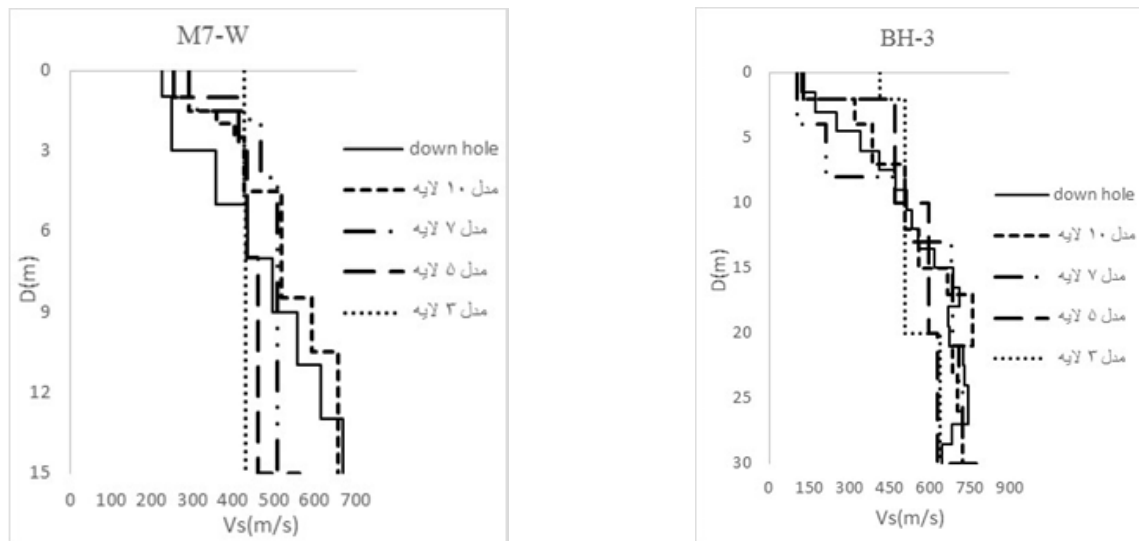


Fig. 6. Comparison of shear wave velocity profiles obtained from the inverse spectrum H/V, taking into account the results of 3,5,7 and 10 layers models, with downhole experiments (stations M7-W and BH-3)

شکل ۷. مقایسه نیمرخ‌های سرعت موج برشی بدست آمده از معکوس طیف H/V با در نظر گرفتن مدل‌های ۷، ۵، ۳ و ۱۰ لایه با نتایج آزمایش درون چاهی (ایستگاه‌های BH-5 و M12-W)

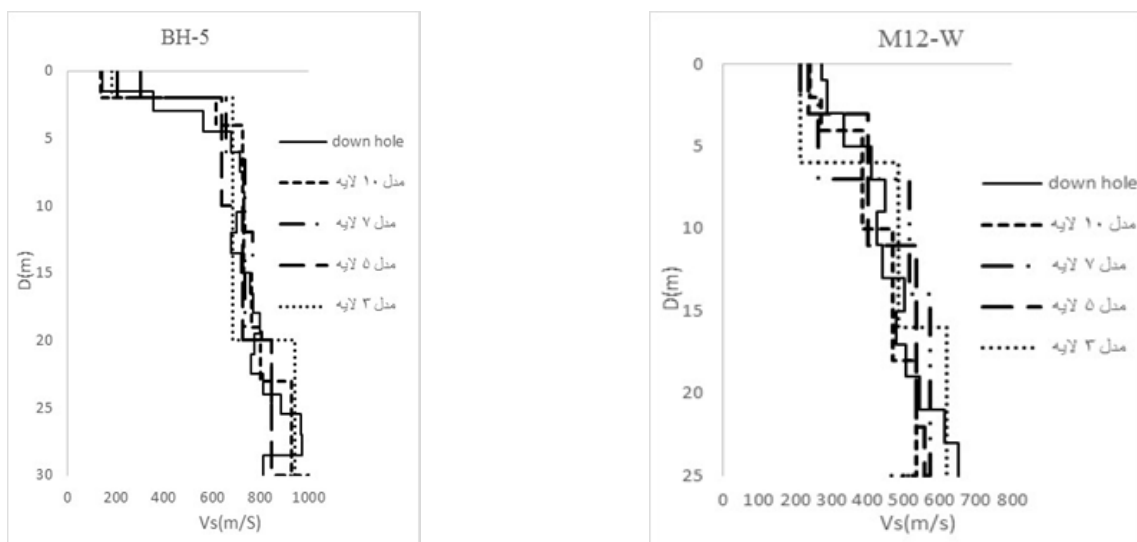


Fig. 7. Comparison of shear wave velocity profiles obtained from the inverse spectrum H/V, taking into account the results of 3,5,7 and 10 layers models, with downhole experiments (stations M12-W and BH-5)

لایه تقریباً با مقدار بدست آمده از نتایج سطح به عمق برابر است. همچنین از روی مقادیر خطای نسبی محاسبه شده برای متوسط سرعت موج برشی مدل‌ها در جدول (۴)، ملاحظه می‌شود که کمترین خطا مربوط به مدل ۱۰ لایه در نقطه M1-C (۲۳٪- درصد) و بیشترین خطا مربوط به مدل ۳ لایه در نقطه BH-3 (۲۶٪ درصد) است و میانگین خطای هر مدل در تمامی

علاوه بر این با مقایسه مقادیر متوسط سرعت موج برشی محاسبه شده از نتایج مدل‌ها با مقدار محاسبه شده از نتایج آزمایش درون چاهی سطح به عمق در جدول (۴) مشخص می‌شود که اختلاف متوسط سرعت موج برشی در همه مدل‌ها با نتایج سطح به عمق کمتر از ۵۰ متر بر ثانیه است و در دو نقطه M12-W و M1-C متوسط سرعت موج برشی در مدل ۱۰

تعداد لایه‌های در نظر گرفته شده در مدل تحلیلی افزایش می‌یابد و با نتایج سایر روش‌ها هماهنگی بیشتری پیدا می‌کند. برای نمونه در نقاط BH-3، BH-5 و M12-W مدل ۱۰ لایه نسبت به سایر مدل‌ها با نتایج آزمایش درون چاهی بهترین هماهنگی را دارند. در سایر نقاط نیز با افزایش تعداد لایه‌ها هماهنگی نتایج بیشتر می‌شود. در مواردی که نتایج با هم هماهنگ نبودند با افزایش تعداد اجراها، مقدار خطا کاهش و نتایج به هم نزدیک می‌شدند.

بنابراین می‌توان از این مدل‌ها برای نقاطی که قبلاً هیچ اندازه‌گیری میدانی و آزمایش درون چاهی برای تعیین نیمرخ سرعت موج برشی انجام نشده است، استفاده نمود و نتایج قابل اعتمادی را بدست آورد. با توجه به نتایجی که گفته شد می‌توان گفت که در بین ۴ مدل پیشنهادی فوق مدل ۱۰ لایه قابل اعتمادترین مدل برای تعیین نیمرخ سرعت موج برشی به شمار می‌رود.

### ۳- نتیجه‌گیری

در این مطالعه کارایی روش معکوس طیف H/V در تعیین نیمرخ سرعت موج برشی بررسی شد. بدین منظور پس از آزمایش ثبت ارتعاشات محیطی در مسیر پروژه قطار شهری کرمانشاه به روش تک ایستگاهی، برای تعیین طیف H/V ارتعاشات ثبت شده مورد پردازش قرار گرفتند. در نهایت نیمرخ سرعت موج برشی با مدل‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ لایه از معکوس طیف H/V استخراج و با نتایج آزمایش درون چاهی مقایسه شد. در زیر خلاصه‌ای از مهمترین نتایج بدست آمده در این مقاله ارائه شده است.

۱- روش معکوس طیف H/V را مانند سایر روش‌های ژئوتکنیکی و آزمایش‌های انکساری و انعکاسی، می‌توان به عنوان یک ابزار مناسب و سریع برای ارزیابی آثار ساختگاهی و تعیین نیمرخ سرعت موج برشی به کار برد.

۲- نتایج بدست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که نیمرخ‌های سرعت موج برشی به دست آمده از روش معکوس طیف H/V هماهنگی خوبی با نتایج روش آزمایش درون چاهی سطح به عمق دارد. بنابراین می‌توان از روش معکوس طیف H/V

نقاط، با افزایش تعداد لایه‌ها کاهش می‌یابد. همان‌گونه که گفته شد، نکته قابل توجه در مورد مدل‌های پیشنهادی استفاده شده این است که، با استفاده مدل‌های مذکور ابتدا بدون توجه به نتایج آزمایش درون چاهی برای در نظر گرفتن ضخامت و محدوده‌ی سرعت، نیمرخ سرعت موج برشی استخراج و در نهایت نتایج حاصل با نتایج آزمایش درون‌چاهی در شکل‌های (۵ تا ۷) مقایسه شده است.

جدول ۴. متوسط سرعت موج برشی بر حسب m/s تا عمق قابل دسترسی گمانه‌ها محاسبه شده با استفاده نتایج آزمایش سطح به عمق و مدل‌های پیشنهادی به همراه مقدار خطای نسبی (مقادیر داخل پرانتز بر حسب درصد)

Station Downhole	Model No. 1	Model No. 2	Model No. 3	Model No. 4
M1-C	430 (7.7)	478 (11.2)	461 (7.2)	429 (-0.23)
M5-C	291 (-25.4)	287 (-1.5)	280 (-3.7)	268 (-7.9)
M7-W	410 (4.4)	429 (4.6)	477 (16.3)	437 (6.6)
BH-3	426 (26.2)	459 (7.7)	330 (-22.5)	456 (7)
BH-5	594 (5.4)	628 (5.7)	633 (6.6)	550 (-7.4)
M12-W	284 (13)	287 (1.05)	335 (17.9)	287 (1)
Average (%)Error	5.2	4.8	3.6	-0.93

**Table 4.** The average shear wave velocity in m/s to the depth of boreholes, calculated using downhole results and that of the proposed models with the relative errors (values in parentheses are in percent)

از مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از مدل‌های فوق با نیمرخ سرعت موج برشی حاصل از آزمایش درون چاهی سازگاری خوبی دارند. دقت نیمرخ‌ها با افزایش



توسط مدل ۱۰ لایه است. علاوه بر این تخمین نیمرخ‌های سرعت موج برشی با استفاده از معکوس طیف H/V تا اعماقی بیشتر از عمق قابل دسترسی در روش درون چاهی امکان‌پذیر است.

## References

## ۴-مراجع

- [1] Fah, D., Kind, F., & Giardini, D. (2003). Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site-effects. *Journal of Seismology*, 7(4), 449-467.
- [2] Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).
- [3] Mundepi, A. K., Galiana-Merino, J. J., Asthana, A. K. L., & Rosa-Cintas, S. (2015). Soil characteristics in Doon Valley (north west Himalaya, India) by inversion of H/V spectral ratios from ambient noise measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 77, 309-320.
- [4] Hobiger, M., Cornou, C., Wathelet, M., Di Giulio, G., Knapmeyer-Endrun, B., Renalier, F., & Ohrnberger, M. (2013). Ground structure imaging by inversions of Rayleigh wave ellipticity: sensitivity analysis and application to European strong-motion sites. *Geophysical Journal International*, 192(1), 207-229.
- [5] Ghalandar Zadeh, A., Kavand, A., "Determination of shear wave velocity in alluvial layers using microtremor measurements, (1389), *Nashrie-Civil Eng. & Geodesy, Tehran Univ.*, Vol. 44, No. 4, pp. 525-536 (In Persian).
- [6] Dvodi, M., Hagshenas, E., Mirjalili, M., Application of Array microtremor method in shear wave velocity profile of subsurface layers in a sample site in Tehran (Shaghayegh Park), (1387), *J. Seismology and Earthquake Eng.*, Vol. 10, pp. 205-215 (In Persian)
- [7] Arai, H. & Tokimatsu, K., (2004). S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(1), 53-63.
- [8] Clavero, D., Rosa-Cintas, S., López-Casado, C., Delgado, J., & Galiana-Merino, J. J. (2014). Shear wave velocity estimation in the metropolitan area of Málaga (S Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 109, 175-185.
- [9] Arai, H., & Tokimatsu, k., (2005). S-wave velocity profiling by joint inversion of microtremor dispersion curve and horizontal-to-vertical (H/V) spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(5), 1766-1778.
- [10] Rosenblad, B. L., & Goetz, R. (2010). Study of the H/V spectral ratio method for determining average shear wave velocities in the Mississippi embayment. *Engineering geology*, 112(1), 13-20.

عنوان یک روش قابل اعتماد در تخمین نیمرخ سرعت موج برشی استفاده نمود.

۳-طیف H/V بدست آمده از پردازش نگاشت‌های ثبت شده در نقاط M7-W و M12-W دارای دو قله واضح به ترتیب در فرکانس‌های ۱/۹ و ۶/۶ هرتز و ۵/۸۴ و ۷/۹ هرتز است، هر دوی آنها شرایط موجود برای درستی قله H/V را برآورده می‌کنند. مطالعات نظری و عددی نشان داده است که، چنین حالتی زمانی پیش می‌آید که لایه‌های زیرسطحی شاهد دو تباین مقاومتی بالا (بالای چهار) نسبت به سنگ بستر، در دو مقیاس متفاوت باشند. بنابراین هر دو قله موجود روی هر یک از منحنی‌های مذکور می‌توانند مربوط به فرکانس طبیعی ساختگاه باشند.

۴-در این مطالعه از مدل‌های پیشنهادی ۳، ۵، ۷ و ۱۰ لایه برای انجام تحلیل برگشتی و برآورد نیمرخ سرعت موج برشی استفاده شده است. از مزیت این مدل‌ها که آنها را از سایر مدل‌های ارائه شده در مطالعات دیگر جدا کرده است این است که، محدوده تغییر سرعت و ضخامت در هر مدل برای همه لایه‌ها یکسان و ثابت در نظر گرفته شده، که این مدل‌ها را تبدیل به یک الگوی ثابت برای به کارگیری در دیگر مطالعات کرده است. نکته قابل توجه این است که، با استفاده از مدل‌های مذکور ابتدا بدون توجه به نتایج آزمایش درون چاهی برای در نظر گرفتن ضخامت و محدوده‌ی سرعت، نیمرخ سرعت موج برشی استخراج و در نهایت با نتایج حاصل از آزمایش سطح به عمق مقایسه شده است که نتایج هماهنگی خوبی با نتایج حاصل از آزمایش سطح به عمق داشته‌اند. بنابراین می‌توان از این مدل‌ها برای نقاطی که قبلاً هیچ اندازه‌گیری میدانی و آزمایش درون چاهی برای تعیین نیمرخ سرعت موج برشی انجام نشده است استفاده کرد و نتایج قابل اعتمادی را بدست آورد.

۵-دقت نیمرخ‌ها با افزایش تعداد لایه‌های در نظر گرفته شده در مدل تحلیلی افزایش می‌یابد. بنابراین مدل ۱۰ لایه نسبت به سایر مدل‌ها با نتایج آزمایش درون چاهی سطح به عمق بهترین هماهنگی را دارد.

۶-عمق شناسایی شده توسط مدل‌های پیشنهادی، با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد. یعنی بیشترین عمق شناسایی شده

- [17] Nogoshi, M., & Igarashi, T. (1970). On the propagation characteristics of microtremors. *J. Seism. Soc. Japan*, 23, 264-280.
- [18] Geopsy Software Version 2.7.3, Geophysical Signal Database for Noise Array Processing, <http://www.geopsy.org/wiki/index.php/Geopsy>
- [19] KonnoK, OhmachiT. Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremors. *Bull Seismol Soc Am* 1998;88:228-41.
- [20] Wathelet, M., (2005). Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion. PhD Diss., Liège University, 161.
- [21] Renalir, 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-B209.
- [11] Castellaro, S., & Mulargia, F. (2009). VS30 estimates using constrained H/V measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2A), 761-773.
- [12] Lontsi, A. M., Ohrnberger, M., & Krüger, F. (2016). Shear wave velocity profile estimation by integrated analysis of active and passive seismic data from small aperture arrays. *Journal of Applied Geophysics*, 130, 37-52.
- [13] Molnar, S., Ventura, C. E., Boroschek, R., & Archila, M. (2015). Site characterization at Chilean strong-motion stations: Comparison of downhole and microtremor shear-wave velocity methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 22-35.
- [14] Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm II. Appraising the ensemble. *Geophysical Journal International*, 138(3), 727-746.
- [15] Final Report of Geotechnical Investigation of Kermanshah Urban Railroad Project, Doc. No:70513-G-REP GRL CIV GT 003, (In Persian).
- [16] SESAME Project, (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibration measurements and interpretation. [Report] Deliverable D51.35, University of Potsdam.

# Evaluating Inversion of Microtremor H/V Spectrum in Extracting Shear Wave Velocity Profile with Down-hole Test Results

M.Biglari<sup>\*1</sup>, I.Ashayeri<sup>2</sup>, Y.Hoshyar<sup>3</sup>

1\_ Assistant Prof., of Earthquake Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. \* (Corresponding Author)

2\_ Assistant Prof., of Earthquake Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

3\_ M.Sc. Student of Earthquake Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

## Abstract:

The velocity of shear wave, which is utilized in evaluation of the stiffness and strength of subsurface layers, the geotechnical site effects of earthquakes, and determination of the profile of subsurface layers is one of the most prominent and essential parameters in geotechnical studies. The profile of shear wave velocity of soil layer is usually discerned in the site by means of prevalent direct seismic and geophysical methods such as reflection, refraction like SASW and MASW, and borehole ways or indirectly, by geotechnical methods such as conducting CPT or SPT sounding and employing experimental relations among Vs and CPT or SPT quantities. As far as these methods need to dig boreholes, it is obvious that deploying borehole geophysical methods or geotechnical ones to certify the profile of shear wave velocity is expensive and time-consuming. As an economical and practical alternative, the measurements of microtremors which can be easily implemented on the ground surface at a single station. Firstly, the method registers ambient vibrations; then, the spectral proportion of the average of horizontal components to vertical component of microtremors (H/V) are determined. At the end, shear wave velocity profile of the site are discerned by inversion of the H/V spectrum in a reversal algorithm. The analyses are easily performed by means Dinver program of useful package of Geopsy software.

In this study, single station microtremor measurements are done at six points along Kermanshah Urban Railroad project. In order to determine shear wave velocity profile from inversion of H/V spectrum, four shear wave models with 3,5,7, and 10 layers are initially suggested for all mentioned six points. All initial models were similar in parameters like thickness of layers and range of shear wave velocity in each layer, so that final conclusions and interpretations can be made for future studies. The best of achieved shear wave velocity profiles in terms of minimum misfit error of inversion of horizontal to vertical spectral peak are compared with the result of field Vs measurements that were performed by down hole experiments. The most outstanding point is that, the procedure is utilized to find shear wave velocity profile without considering the results of down-hole tests for thickness and velocity limits. The comparison showed that there are significant compatibility between shear wave velocity profiles achieved by inversion method and the results of field down-hole tests. Generally, this compatibility increases with increasing the number of layers from three to ten layers of initial models. Furthermore, the depth of exploration grows with increasing the number of layers as well as the accuracy of profiles, so the initial model with 10 layers has more consistency with the results of borehole experiments of all six points in relation to other models. However, it is obvious that the time for analyzing initial model with 10 layers is more than other ones and a tradeoff between accuracy and time of analyses must determine the acceptable results. In conclusion, inversion of H/V spectrum method shows the ability to appropriately estimate shear wave velocity profile even in deeper sediments in relation to down-hole tests

**Keywords:** Shear wave velocity profile, single station seismogram, microtremors, inversion of horizontal to vertical spectrum ratio