

## تعیین ساختار سه بعدی سرعت موج برشی آبرفت های شهر اراک با استفاده از خاصیت بیضی واری امواج ریلی

سعید سلطانی

دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
s.soltani@iiees.ac.ir

ابراهیم حق شناس

استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
haghshen@iiees.ac.ir

محسن فضلوی

دانشجوی دکتری مهندسی عمران - زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
m.fazlavi@iiees.ac.ir

کلید واژه‌ها: ارتعاشات زمینه، بیضی واری امواج ریلی، پروفیل سرعت موج برشی، روش HVTF، شهر اراک

### چکیده

طی مطالعات ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر نتایج برداشت‌های خردلرزه‌سنجی و پردازش آنها به روش نسبت طیفی مولفه افقی به قائم (H/V) اغلب منحنی‌های نسبت طیفی بدست‌آمده دارای قله‌ای مشخص در فرکانس‌های زیر ۱ هرتز یا حدود آن بوده اند (حق شناس و همکاران، ۲۰۱۳). این قله‌ها در حالی در نقاط بسیاری از شهر دیده می‌شوند که از نظر زمین‌شناسی سطحی با نهشته‌های متفاوتی در سطح شهر مواجه هستیم. وجود این قله‌های فرکانس پایین می‌تواند به دلیل مسائل مختلف از جمله وجود آبرفت عمیق یا فقدان انرژی کافی امواج ریلی ارتعاشات زمینه و در نتیجه دامنه پایین مولفه‌ی قائم نسبت به مولفه‌های افقی نسبت داده شود. در این مقاله برای بررسی دقیق تر علت این موضوع از روش‌های نوین استخراج بیضی واری امواج ریلی از داده‌های برداشت شده ارتعاشات محیطی در نقاط مختلف شهر اراک استفاده شده است و با وارونه سازی این داده‌ها سعی در ارائه پروفیل سرعت موج برشی در دو مقطع شمالی- جنوبی و شرقی- غربی شده است. دو روش محاسبه نسبت طیفی مولفه افقی به قائم در فضای زمان- فرکانس بر پایه تبدیل موجک و روش کاهش تصادفی به منظور بدست آوردن این منحنی‌ها استفاده شده‌اند. عملیات وارون‌سازی با استفاده از یال سمت راست منحنی بیضی‌واری (از قله ی اول تا مینیمم بعدی) که بر پایه مطالعات عددی به عنوان بازه‌ی قابل اتکا برای اینکار معرفی شده، انجام شده است. پروفیل‌های بدست آمده و همچنین شواهد زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی موجود، وجود لایه ی نسبتاً ضخیم آبرفتی را در شمال و شرق منطقه ی شهری اراک تایید می‌کند و برای مناطق جنوبی نیز سرعت های بالاتر و عمق کم تر سنگ بستر که مطابق با زمین‌شناسی مناطق مرتفع جنوبی می باشد نشان می‌دهد.

### مقدمه

در سال های اخیر ثبت ارتعاشات زمینه بدلیل کم هزینه بودن این روش ها، اندازه گیری آسان و امکان انجام آزمایشات غیر مخرب در مناطق مسکونی به صورت اندازه گیری های تک ایستگاهی یا بصورت آرایه های کوچک برای تعیین پروفیل های سرعت موج برشی متداول گشته است. با توجه به در دست نبودن گمانه‌های عمیق به‌منظور استفاده از روش‌های مستقیم ژئوتکنیکی در بسیاری از مناطق مورد مطالعه، روش محاسبه نسبت طیف افقی به قائم<sup>۱</sup> (H/V) یکی از پرطرفدارترین روش های غیر مستقیم جهت بررسی های ژئوتکنیکی می باشد. یکی از مسائل مورد توجه این است که در اکثر این مطالعات فرض می‌شود ماهیت و منشأ ارتعاشات زمینه به‌خوبی شناخته شده است درحالی‌که با توجه به

1 - Horizontal to Vertical Ratio



ماهیت پیچیده‌ی میدان‌های ارتعاشات زمینه که کمابیش یک فرآیند تصادفی<sup>۲</sup> مانا دارای چشمه‌های متنوع با توزیع مکانی غیرمرتبط می‌باشد این فرض اغلب ناصحیح می‌باشد. با این حال در بسیاری از مطالعات فرض بر این است که امواج غالب در میدان موج نوفه امواج ریلی هستند.

در خصوص این فرض برای اولین بار یاماناکا (۱۹۹۴) بیان داشت در ساختارهای یک‌بعدی از نسبت طیف افقی به قائم می‌توان به‌عنوان تخمینی مناسب برای به دست آوردن بیضی‌واری<sup>۳</sup> امواج ریلی استفاده نمود. بر همین اساس بارد (۱۹۹۸) نیز بر این عقیده است که اولاً نسبت  $H/V$  با توجه به غالب بودن امواج ریلی در میدان موج ارتعاشات زمینه مرتبط با بیضی‌واری موج ریلی می‌باشد و ثانیاً منحنی بیضی‌واری به دلیل وابستگی فرکانسی شدیدی که دارد بیشینه‌ی کاملاً واضحی را در نزدیکی فرکانس تشدید در ساختگاه‌هایی که اختلاف امپدانس بین لایه‌های رسوبی و سنگ بستر زیاد است نشان می‌دهد. به طور کلی انرژی ارتعاشات زمینه به عوامل متعددی مانند محل چشمه‌ها و اختلاف امپدانس بین سنگ بستر وابسته است. در این راستا بونفوی کلاودت (۲۰۰۴) بیان نمود که اگر منبع چشمه در نزدیکی یا داخل لایه‌ی رسوبی قرار گرفته باشد می‌توان قله‌ی منحنی نسبت طیفی افقی به قائم را به بیضی‌واری مد اصلی امواج ریلی نسبت داد.

بیضی‌واری موج ریلی در حالت کلی به‌عنوان تابعی از پارامترهای مختلف یک لایه بر روی نیم فضا به صورت زیر تعریف می‌شود. با توجه به برداری بودن امواج ریلی، به نسبت بدون بعد جابجایی افقی آن‌ها به جابجایی عمودی (ویژه توابع آن‌ها) در هر فرکانس در روی زمین بیضی‌واری می‌گویند.

$$\chi = \chi(r_s, r_d, v_1, v_2, \bar{f}) \quad (1)$$

که در آن  $r_s = \beta_1 / \beta_2$  نسبت سرعت موج برشی لایه  $\beta_1$  نسبت به سرعت موج برشی سنگ بستر  $\beta_2$ ،  $r_d = \rho_1 / \rho_2$  نسبت چگالی لایه  $\rho_1$  به چگالی سنگ بستر  $\rho_2$ ،  $v_1$  و  $v_2$  به ترتیب ضریب پواسون در لایه و سنگ بستر و  $\bar{f} = \frac{\lambda_{p1}}{d}$  فرکانس بدون بعد که در آن  $d$  ضخامت لایه و  $\lambda_{p1}$  طول موج برشی در لایه است. در حالت کلی به کمک حل معادله دیفرانسیلی مدل وجود یک لایه روی نیم فضا می‌توان فرمول بیضی‌واری را بدست آورد (مالیچیوسکی و شرباوم، ۲۰۰۴). با حل این معادلات در نهایت می‌توان فرمول بیضی‌واری را برحسب سه فاکتور  $\chi = f1, f2, f3$  به فرم مقابل نوشت.

$$f3 = \frac{1 + y \tanh(dp_1)}{y + \tanh(dp_1)} \quad f2 = \frac{1}{\sqrt{1 - c^2 / \alpha_1^2}} \quad f1 = 1 - \frac{c^2}{2\beta_1^2} \quad (2)$$

با توجه به پیچیدگی  $y$  (مالیچیوسکی و شرباوم، ۲۰۰۴) در معادله‌ی  $f3$  با معرفی  $f2f3 = \tilde{y}$  می‌توان معادله را به فرم زیر و به صورت ساده‌تر نوشت.

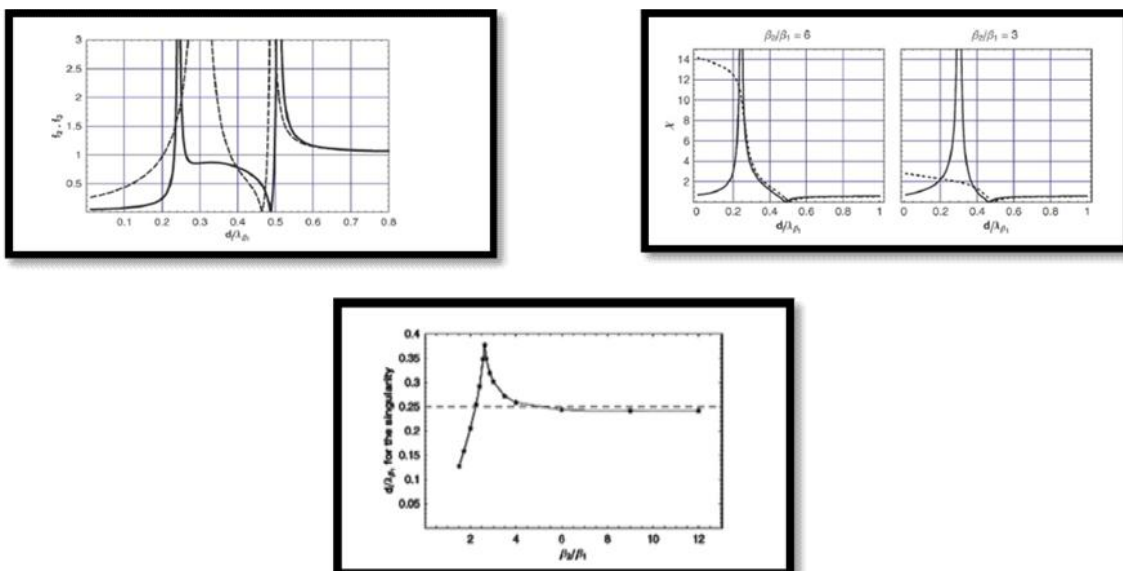
$$\chi = f1 \times \tilde{y} = \left(1 - \frac{c^2}{2\beta_1^2}\right) \tilde{y} \quad (3)$$

با بررسی  $\tilde{y}$  بر پایه مطالعات عددی می‌توان مشاهده کرد رفتار  $\tilde{y}$  در بازه‌ی فرکانسی بزرگی نزدیک به ۱ می‌باشد؛ بنابراین می‌توان به صورت تقریبی نوشت (شکل ۱)

$$\chi \approx 1 - \frac{c^2}{2\beta_1^2} \quad (4)$$

برای نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی‌تر با بررسی شرایط حدی در  $\omega$  به سمت بینهایت و در حد  $\lim_{\omega \rightarrow 0} f3$  با توجه به فرمول به واحد نزدیک‌تر شده و در نتیجه  $f1, f2$  به معادله ساده‌تر مربوط به نیم فضا می‌رسند در حد بین ۰ تا بی‌نهایت باید از فرمول اصلی استفاده کرد. با این حال باید توجه داشت در کدام بازه فرکانسی می‌توان از تقریب  $f2, f3$  برابر با یک استفاده نمود. همان‌طور که مختصراً در ابتدا اشاره شد یکی از پارامترهای مهم در تخمین بیضی‌واری اختلاف امپدانس سرعت موج برشی در لایه و نیم فضا است. همان‌طور که در قسمت ب مشاهده می‌شود برای نسبت‌های سرعت موج برشی بالای شش نمودار مدل تقریباً با نمودار به‌دست‌آمده از معادله تقریبی منطبق است. همچنین قسمت ج نشان می‌دهد اولین ماکزیمم نمودار یعنی ۰.۲۵ در امپدانس موج برشی بیشتر از ۳.۵ در لایه و نیم فضا مقدار ثابتی خواهد داشت. بنابراین این مشاهدات شرط امپدانس بالای سه و نیم لایه و سنگ بستر برای استفاده از معادلات تقریبی شرط لازمی است که همواره باید رعایت گردد.



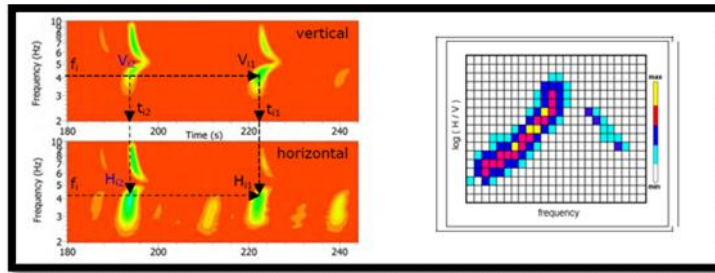


شکل ۱: الف- منحنی  $f_2, f_3$  برحسب فرکانس. مشاهده می‌شود در فرکانس‌های  $0.25$  تا  $0.45$  و از  $5.5$  به بعد مقدار  $f_2, f_3$  تقریباً برابر با مقدار ۱ می‌باشد، ب: منحنی بیضی‌واری ناشی از معادله‌ی تقریبی (خط چین) در مقایسه با منحنی مدل (خط مشکی)، ج: نمودار فرکانس برحسب نسبت سرعت موج برشی (طبق شکل از مقادیر امیدان  $3.5$  به بعد مقادیر فرکانس همگی روی مقدار اولین ماکزیمم هستند) (مالیچیوسکی و شریاوم، ۲۰۰۴)

## روش‌های استحصال بیضی‌واری

دو روش آنالیز فرکانس- زمان نسبت طیفی بر پایه تبدیل موجک (HVTFA) و روش کاهش تصادفی از روش‌های نوین برای بدست آوردن منحنی‌های بیضی‌واری امواج ریلی می‌باشند. روش HVTFA اولین بار توسط فاه و همکاران (۲۰۰۳) ارائه گردید. فاه دو رهیافت را برای تصحیح لازم برای انرژی امواج حجمی و لاو ارائه نمود. رهیافت اول با تحلیل قطبی کلاسیک در حوزه بسامد که قطبش به صورت نسبت بین طیف فوریه مؤلفه‌های افقی و طیف مؤلفه قائم تعریف می‌شود. در این روش فرض می‌شود که مؤلفه قائم در محدوده فرکانسی مورد نظر در نزدیک قله‌ی  $H/V$  غالباً از امواج ریلی تشکیل شده است و قسمت SH میدان موج فقط در مؤلفه افقی حرکت شرکت دارد. اگر این قسمت را بتوان حذف کرد، نسبت  $H/V$  بهتر بیضی‌واری مد اصلی موج ریلی را نشان می‌دهند. این عمل نیازمند فرض‌هایی در مورد محتوای طیفی امواج است و به طور کلی، فرض می‌شود که مؤلفه شعاعی (امواج ریلی) دارای دامنه مساوی با امواج عرضی (امواج لاو) هستند، اما این فرض اغلب صحیح نیست.

در روش دوم با تعریف موجک‌های  $P_{-SV}^f$  در طول سیگنال سعی در کاهش اثرات امواج SH و اثرات برهم نهی ورودی‌های متفاوت امواج  $P_{-SV}$  در نسبت‌های  $H/V$  می‌باشد. در این فضا بیضی‌واری را می‌توان به صورت نسبت بدون بعد ویژه توابع جابجایی مؤلفه‌ی افقی به عمودی امواج ریلی در هر فرکانس معرفی نمود. معمولاً بیضی‌واری را در محدوده‌ی فرکانسی قله تا کمینه اول یعنی فاصله‌ی بین محو شدن مؤلفه‌ی قائم تا محو شدن مؤلفه‌ی افقی به عنوان منحنی قابل اطمینان تعریف می‌نمایند. در این روش برخلاف روش کلاسیک نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی روی قائم بر روی کل طیف محاسبه نمی‌شود بلکه پراثرترین قسمت‌ها در نمایش زمان- فرکانس سیگنال قائم انتخاب گردیده و مؤلفه‌ی افقی متناظر با  $\frac{f}{2}$  اختلاف به جهت حذف اثرات برهم نهی انتخاب می‌شود. فرض می‌شود که این بیشینه مربوط به سیگنال یک موجک ریلی است که برای آن نسبت طیفی محاسبه شده است. میانگین‌گیری روی تمام این موجک‌ها نسبت طیفی  $H/V$  امواج ریلی یا همان بیضی‌واری را مشخص می‌نماید.

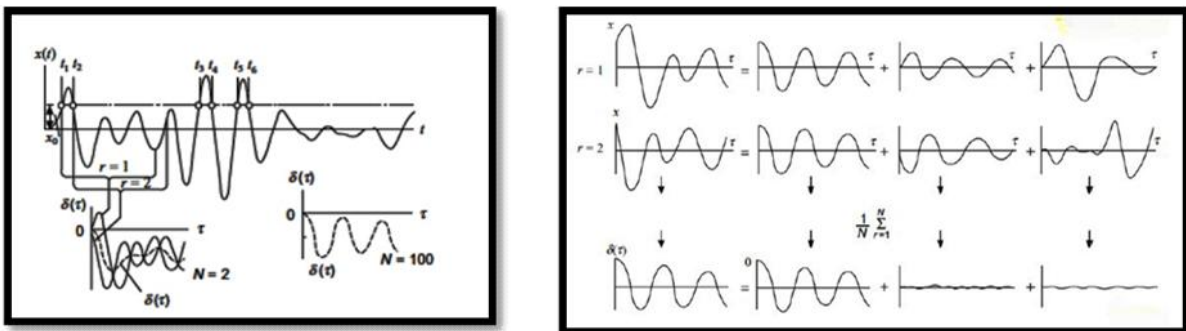


شکل ۲: الف- اصول آنالیز فرکانس - زمان و انتخاب پرنرزی ترین قسمت آن ب- نمودار لگاریتمی مستطیلی داده‌ها برحسب نسبت طیف افقی به قائم در هر فرکانس

روش دوم (روش کاهش تصادفی) در اصل یک فرآیند حوزه‌ی زمانی است که در آن پاسخ سیستم به بارهای واقعی به یک سری توابع موسوم به توابع کاهش تصادفی انتقال داده می‌شوند که این توابع با توابع همبستگی پاسخ‌های سیستم متناسب است. روش کاهش تصادفی شامل روش نسبتاً ساده‌ی میانگین‌گیری بخش‌های زمانی از پاسخ‌های اندازه‌گیری شده با شرایط آغازین معمولی می‌باشد. کافی است فرض کنیم پاسخ سیستم به نیروهای وارده‌ی تصادفی در لحظه‌ی  $t$  متشکل از سه بخش می‌باشد. پاسخ به یک جابجایی اولیه، پاسخ به یک سرعت اولیه، پاسخ به نیروهای وارده تصادفی بین حالت آغازین و زمان  $t$

$$x(t + t_0) = x(t + t_0)|_{x(t_0)} + (x + t_0)|_{x(t_0)} + (x + t_0)|_{f(t)} \quad (5)$$

اگر یک قسمت ثابت زمانی را از تاریخچه‌ی زمانی پاسخ در هر زمان که دامنه‌ی آن پاسخ به مقدار  $X_0$  انتخابی می‌رسد انتخاب کنیم، به تعدادی از قسمت‌های تاریخچه‌ی زمانی به طول یکسان دست می‌یابیم که همگی آن‌ها از دامنه‌ی پاسخ  $X_0$  آغاز می‌شوند. شکل ۳ چگونگی انتخاب این تاریخچه‌های زمانی را نشان می‌دهد. اولین قسمت در زمان  $t_1$  آغاز و در زمان  $(t_1 + \tau)$  خاتمه می‌یابد. کل قسمت‌ها را می‌توان به صورت  $(t_1 + \tau)$  در  $X_0$  نظر گرفت.



شکل ۳: قسمت‌های گرفته‌شده از تاریخچه‌ی زمانی به طول یکسان و میانگین آن‌ها؛ میانگین‌گیری روی تمام سیگنال و به صفر میل شدن سرعت و نیرو

میانگین قسمت‌ها به فرم زیر نوشته می‌شود. با افزایش  $N$  و میانگین‌گیری به دلیل ماهیت تصادفی میانگین قسمت‌های مربوط به سرعت و نیرو به صفر میل می‌کنند که این فرض اغلب صحیح است.

$$n = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N X_0(t + \tau) \quad (6)$$

(هوبیگر و همکاران، ۲۰۰۹) از مفاهیم این روش برای استخراج بیضی‌واری موج ریلی استفاده نمودند. آن‌ها با در نظر داشتن سیگنال عمودی ارتعاشات زمینه به‌عنوان سیگنال اصلی و تقسیم به قسمت‌های ثابت زمانی به‌مانند روش ارائه‌شده به این تابع دست یافتند. تفاوت امر در این می‌باشد که انتخاب بر اساس زمان‌هایی از تاریخچه‌ی زمانی انجام می‌گیرد که در آن‌ها سیگنال قائم از منفی به مثبت تغییر علامت می‌دهد که

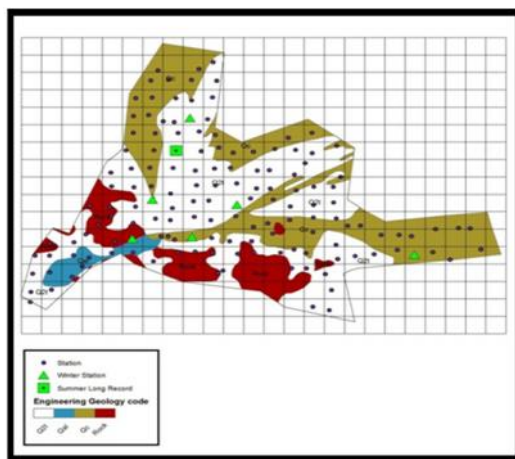
این انتخاب با فرض غالب بودن محتوای انرژی امواج ریلی در مؤلفه‌ی قائم انجام می‌گردد. در هر زمان که شرط تغییر علامت ارضا گردد پنجره‌ای از سیگنال به طول  $\Delta$  ذخیره می‌گردد. پس از انتخاب به علت اختلاف فاز طبیعی بین مؤلفه‌ی عمودی و مؤلفه‌ی افقی موج ریلی سیگنال‌های ذخیره‌شده‌ی افقی با  $\frac{1}{2}$  اختلاف فاز در نظر گرفته می‌شود و سپس با در نظر گرفتن فاکتور همبستگی میان مؤلفه‌ی افقی و عمودی نسبت طیفی اندازه‌گیری می‌شود. کارائی این روش در استخراج بیضی‌واری موج ریلی در دو واقعیت نهفته است. نخست اینکه با فرض محیط همگن و همسانگرد همبسته نشدن امواج لاو موجود در سیگنال افقی با سیگنال عمودی اتفاق می‌افتد و در نتیجه اثرات امواج لاو کاهش می‌یابد. البته نمی‌توان از اثرات همبستگی آن دسته از امواج لاو که تصادفاً از نظر زمانی همزمان با امواج ریلی به لرزه‌نگار رسیدند چشم‌پوشی کرد اگرچه تکرار عمل در طول سیگنال و ذخیره این پنجره‌های سیگنال و در نهایت عمل میانگین‌گیری این اثرات را کاهش می‌دهد. هم‌چنین تأخیر زمانی داده‌شده در مؤلفه‌ی امواج ریلی باعث یک شیفت زمانی بین اثرات این موج و امواج درونی شده که در نهایت با میانگین‌گیری از تعداد بالایی پنجره‌ی ذخیره‌شده کاهش اثرات امواج درونی را نیز شاهد خواهیم بود.

## اندازه‌گیری‌های تک ایستگاهی

به منظور بررسی ریزپهنه بندی شهری منطقه‌ی اراک بیش از ۱۴۰ نقطه برداشت تک ایستگاهی در محدوده‌ی شبکه‌بندی شده شهر اراک توسط دستگاه‌های لرزه‌نگار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برداشت گردیدند. لرزه‌نگارهای مورد استفاده در این اندازه‌گیری‌ها، دستگاه‌های سه مؤلفه‌ای از نوع Guralp CMG-6TD دارای پاسخ فرکانسی در حدود ۰.۰۳۳ تا ۵۰ هرتز بوده و روش برداشت در هر ایستگاه شامل ثبت ۳۰ دقیقه ارتعاشات محیطی به طور پیوسته با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ نمونه در ثانیه و زمان اندازه‌گیری‌ها در تابستان ۱۳۹۱ بوده است. علاوه بر این برداشت داده‌های یک‌ماهه مربوط به برداشت یک ایستگاه در حوالی شبکه H07 و داده‌های مربوط به دو ماه رکورد ارتعاشات زمینه در ۶ ایستگاه در برداشت‌های زمستانی (بهمن‌ماه سال ۱۳۹۱) در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته‌اند (شکل ۴). ژیا و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از آنالیز ماتریس ژاکوبین تابع سرعت امواج ریلی را به دست آوردند. آن‌ها نشان دادند نسبت تغییرات سرعت فاز به سرعت امواج برشی در حدود ۱.۵ برابر و نسبت به دیگر پارامترها بسیار کمتر از ۱ است؛ بنابراین سرعت فاز موج ریلی به تغییرات سرعت امواج برشی بیش از سایر پارامترهای مدل زمین حساس است و سرعت موج برشی تأثیر قابل‌توجهی بر داده‌های منحنی پاشندگی امواج ریلی دارد. این تئوری اساس تعیین پروفیل‌های سرعت موج برشی بر پایه‌ی استفاده از منحنی بیضی‌واری امواج ریلی می‌باشد. همچنین بر اساس نتیجه‌ای که از بررسی رهیافت دیفرانسیلی بیضی‌واری به دست آمد امیدانس بالای ۳.۵ بین لایه و سنگ بستر برای تفکیک لایه‌بندی امری لازم می‌باشد.

به منظور به دست آوردن پروفیل‌های سرعت موج برشی در این مقاله منحنی‌های بیضی‌واری توسط هر دو روش فوق به دست آمدند. به منظور زون بندی مناطق مختلف مورد بررسی با توجه به شیب یال سمت راست و فرکانس تشدید منحنی‌های بدست آمده طبقه بندی شده و منحنی‌های هم شکل میانگین‌گیری شده و در بازه فرکانسی مشخص شده برای یال سمت راست (از اولین بیشینه تا اولین دره) انتخاب گردیده‌اند (شکل ۵). در مرحله‌ی بعد منحنی‌های میانگین‌گیری شده در بازه‌ی فرکانسی مناسب وارد پروسه اینورژن می‌شوند. پارامتر دهی به روش واتلت و همکاران (۲۰۰۴) انجام و به روش سعی و خطا و انتهای باز انتخاب می‌شوند. این روندکار باعث آزادی عمل برنامه برای انجام یک اینورژن مطمئن خواهد شد. مراحل انجام کار بطور کامل در شکل ۶ آورده شده است.

با توجه به سرعت‌های بدست آمده و با توجه به جنس زمین شناسی سنگ موجود در ناحیه می‌توان سرعت‌های بالای 1000 متر بر ثانیه را برابر با سنگ بستر در نظر گرفت. بنابراین مسئله پروفیل دو بعدی شهر را می‌توان به شکل زیر رسم نمود (شکل ۴).

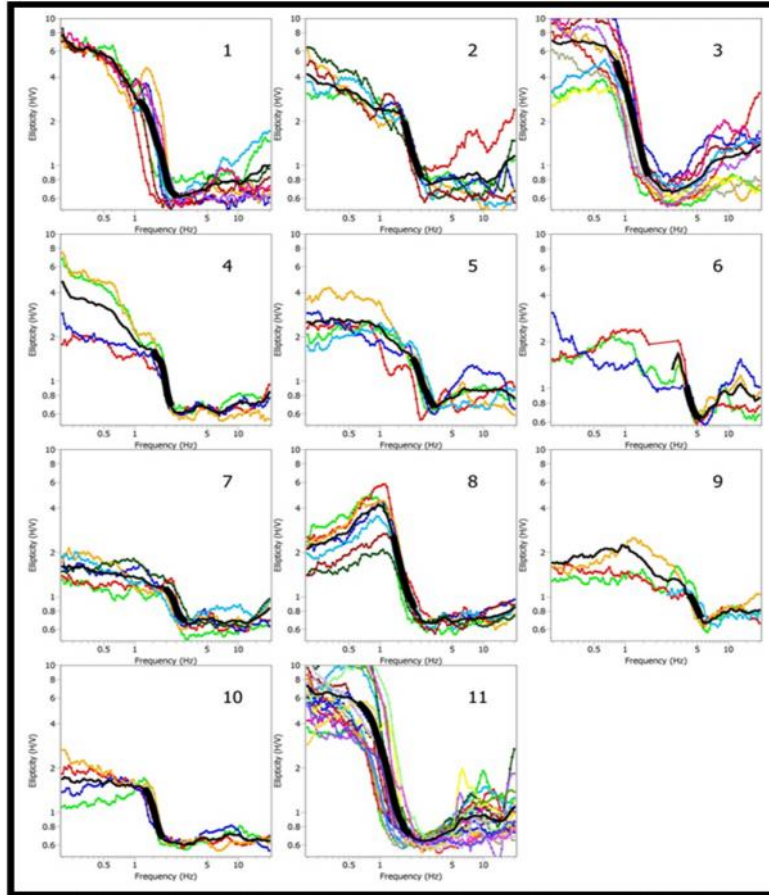


شکل ۴: نقشه زمین شناسی سطحی محدوده‌ی شهری اراک و ایستگاه‌های برداشت ارتعاشات زمینه

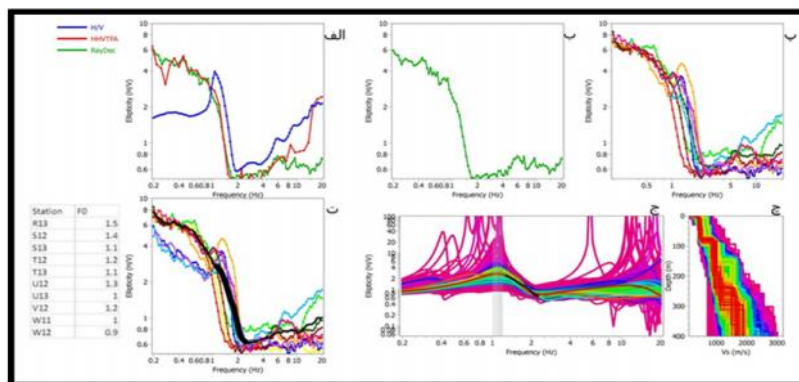


جدول ۱: بازه‌ی فرکانسی یال سمت راست انتخابی برای زون‌های ۱۱ گانه

زون	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
فرکانس	۲.۳ تا ۱۱.۲	۳ تا ۱.۸	۲ تا ۰.۷	۲.۵ تا ۱.۴	۳.۸ تا ۲	۵ تا ۳.۵	۴ تا ۲	۲.۲ تا ۰.۸	۵.۵ تا ۳.۵	۱.۸ تا ۱.۲	۲ تا ۰.۶

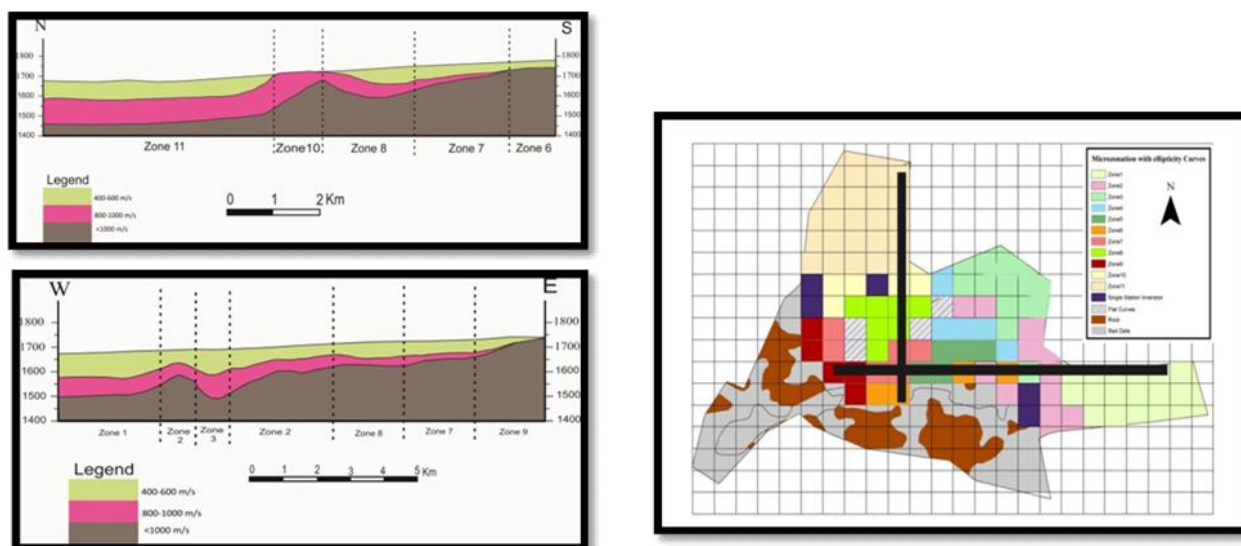


شکل ۵: منحنی‌های بیضی‌واری همراه با میانگین مربوط به زون‌های ۱۱ گانه



شکل ۶: الف: منحنی‌های به دست آمده به دو روش به همراه منحنی H/V کلاسیک برای مشاهده‌ی قله ب: استخراج منحنی مناسب ب: انتخاب منحنی‌های هم‌شیب و هم‌فرکانس برای زون بندی ت: انجام عمل میانگین‌گیری از ایستگاه‌های هم‌شکل مشخص شده به همراه منحنی میانگین (منحنی مشکی) و انتخاب یال سمت راست مناسب برای انجام عمل اینورژن ج: منحنی بیضی‌واری میانگین و منحنی مدل ج: پروفیل سرعت موج برشی؛ (زون ۱)





شکل ۷: الف: پروفیل های دو بعدی شهر در دو راستای شمالی- جنوبی و شرقی- غربی  
 ب: نقشه زون بندی شهر بر اساس منحنی های مشابه بیضی واری و محل قرارگیری پروفیل ها

## مراجع

- Bard P-Y (1998) Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? *Proceeding of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Yokohama, Japan*, pp. 1251–1279
- Bonnefoy-Claudet S, Cornou C, Bard P-Y and Cotton F (2004) Nature of noise wave field, *SESAME report, D13.08*
- Haghshenas E (2013) Arak seismic microzonation, single station ambient noise reports, IIEES, Professional report (In Persian)
- Hobiger M, Bard P-Y, Cornou C and Le Bihan N (2009) Single Station Determination of Rayleigh Wave Ellipticity by Using the Random Decrement Technique (RayDec). *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L14303
- Malischewsky PG and Scherbaum F (2004) Love's formula and H/V ratio (ellipticity) of Rayleigh waves, *Wave Motion*, 40, 57– 67
- Poggi V and Fäh D (2010) Estimating Rayleigh wave particle motion from three-component array analysis of ambient vibrations, *Geophys. J. Int.*, Vol 180, 251–267
- Yamanaka H, Takemura M, Ishida H and Niwa M (1994) Characteristics of long-period microtremors and their applicability in exploration of deep sedimentary layers, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (6):1831–1841

