

## آنالیز پارامترهای حساسیت در استخراج منحنی‌های بیضی‌واری 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*

حسین حمزه‌لو

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

**کلید واژه‌ها:** ارتعاشات زمینه، آنالیز حساسیت، بیضی‌واری امواج ریلی، پروفیل سرعت موج برشی، شهر اراک

### چکیده

تعیین ساختار سرعتی لایه‌های آبرفت، از مهمترین فاکتورها در مطالعات بررسی اثرات ساختگاه جهت برآورد فرکانس غالب و بزرگنمایی زلزله سایت مورد مطالعه می‌باشد. در آبرفت‌های کم عمق، روشهای معمول در مهندسی ژئوتکنیک همانند تست‌های درون چاهی و یا ژئوالکترونیک قادر به تعیین سرعت موج برشی لایه‌های آبرفت و شناسایی کنتراست آن با لایه‌های دارای سرعت موج برشی بالا (سنگ بستر) خواهد بود. در حالی که در لایه‌هایی با رسوبات عمیق، به دلیل عدم امکان ارسال انرژی امواج محرک به لایه‌های عمیق و همچنین دشواری تفکیک این امواج در امواج ثبت شده، کارایی روش‌های فوق‌الذکر بسیار کاهش می‌یابد. مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر نشان داده است که یکی از بهترین روش‌ها جهت استخراج پروفیل سرعت موج برشی در لایه‌های عمیق تر و همچنین تعیین عمق کنتراست لایه‌های آبرفت با سنگ بستر لرزه‌ای، استفاده از خواص بیضی‌واری امواج ریلی ارتعاشات زمینه است. در این میان دو روش آنالیز فرکانس-زمان نسبت طیفی بر پایه تبدیل موجک و روش کاهش تصادفی به منظور بدست آوردن این منحنی‌ها استفاده می‌شوند. در عمل، شرط مهم برای استحصال یک پروفیل سرعتی مناسب با وارون‌سازی منحنی‌های بیضی‌واری امواج ریلی، داشتن منحنی‌های بیضی‌واری قابل اعتماد است. با توجه به ظرافتهای موجود در اندازه‌گیری‌های ارتعاشات محیطی، مطالعه حساسیت‌های نمودارهای بیضی‌واری به پارامترهای اندازه‌گیری، زمان، مدت، مکان و نحوه اندازه‌گیری رکوردها اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در این مقاله با بررسی این پارامترها و تاثیرات شرایط محیطی سعی در استخراج بهترین منحنی بیضی‌واری خواهیم داشت.



در سه دهه گذشته، محققین متعددی نشان داده اند که روش کلاسیک نسبت طیفی مولفه های افقی به مولفه قائم (H/V) با استفاده از خاصیت بیضی واری امواج سطحی، قادر است تخمین مناسبی از ویژگی های لرزه ای آبرفت ارائه کند. حق شناس و همکاران در سال ۲۰۰۸ با بررسی زلزله ها و خردلرزه های جمع آوری شده در پروژه SESAME (۲۰۰۶ - ۲۰۰۲) نشان دادند که قله های روش کلاسیک نسبت طیفی مولفه های افقی به مولفه قائم، ارتباط مستقیم با فرکانس غالب ساختگاه رکوردهای اندازه گیری شده دارد.

با بررسی های دقیق تر در سال های اخیر مشاهده گردیده است که حذف اثرات امواج لاو و حجمی از نسبت طیفی مولفه های افقی به مولفه قائم، منحنی بیضی واری امواج رایلی با دامنه کمتر نسبت به روش کلاسیک را حاصل خواهد کرد که علاوه بر تخمین فرکانس غالب ساختگاه، داده های مشاهداتی مناسبی برای تخمین پروفیل سرعت موج برشی خواهد بود.

در خصوص این فرض برای اولین بار یاماناکا (۱۹۹۴) بیان داشت در ساختارهای یک بعدی از نسبت طیف مولفه های افقی به مولفه ی قائم می توان به عنوان تخمینی مناسب برای به دست آوردن بیضی واری امواج ریلی استفاده نمود. بر همین اساس بارد (۱۹۹۸) نیز بر این عقیده است که اولاً این نسبت با توجه به غالب بودن امواج ریلی در میدان موج ارتعاشات زمینه مرتبط با بیضی واری موج ریلی می باشد و ثانیاً منحنی بیضی واری به دلیل وابستگی فرکانسی شدیدی که دارد بیشینه ی کاملاً واضحی را در نزدیکی فرکانس تشدید در ساختگاه هایی که اختلاف امپدانس بین لایه های رسوبی و سنگ بستر زیاد است نشان می دهد. بونفوی کلاودت (۲۰۰۴) بیان نمود که به طور کلی انرژی ارتعاشات زمینه به عوامل متعددی مانند محل چشمه ها و اختلاف امپدانس بین سنگ بستر وابسته است. در این راستا اگر منبع چشمه در نزدیکی یا داخل لایه ی رسوبی قرار گرفته باشد می توان قله ی منحنی نسبت طیفی افقی به قائم را به بیضی واری مد اصلی امواج ریلی نسبت داد.

در این خصوص دو رهیافت برای تصحیح انرژی امواج ارتعاشات زمینه معرفی گردیدند. روش آنالیز فرکانس - زمان نسبت طیفی بر پایه تبدیل موجک (HVTFA) و روش کاهش تصادفی روش هایی هستند که با کاهش اثرات امواج درونی و لاو تخمین مناسبتری از منحنی بیضی واری بدست می دهند.

روش HVTFA اولین بار توسط فاه و همکاران (۲۰۰۳) ارائه گردید. در این روش با تعریف موجک های  $P_{SV}^1$  در طول سیگنال سعی در کاهش اثرات امواج SH و اثرات برهم نهی ورودی های متفاوت امواج  $P_{SV}$  در نسبت های H/V می باشد. در این فضا بیضی واری را می توان به صورت نسبت بدون بعد ویژه توابع جابجایی مؤلفه های افقی به عمودی امواج ریلی در هر فرکانس معرفی نمود. معمولاً بیضی واری را در محدوده ی فرکانسی قله تا کمینه اول یعنی فاصله ی بین محو شدن مؤلفه ی قائم تا محو شدن مؤلفه ی افقی به عنوان منحنی قابل اطمینان تعریف می نمایند. در این روش برخلاف روش کلاسیک نسبت طیفی مؤلفه های افقی روی قائم بر روی کل طیف محاسبه نمی شود بلکه پارانرژی ترین قسمت ها در نمایش زمان - فرکانس سیگنال قائم انتخاب گردیده و مؤلفه های افقی متناظر با  $\frac{f}{2}$  اختلاف به جهت حذف اثرات برهم نهی انتخاب می شود. فرض می شود که این بیشینه مربوط به سیگنال یک موجک موج ریلی است که برای آن نسبت طیفی محاسبه شده است. میانگین گیری روی تمام این موجک ها نسبت طیفی H/V امواج ریلی یا همان بیضی واری را مشخص می نماید.

در اندازه گیری به این روش دو پارامتر مشخص بسیار حائز اهمیت می باشند. پارامتر موجک که میزان عدم قطعیت در فرکانس را مشخص می کند و پارامتر دیگر به نام nppm تعداد انتخاب پارانرژی ترین بیشینه ها در واحد دقیقه می باشد. در این روش از موجک مورلت که به صورت زیر تعریف می گردد به علت خواصی از جمله فرکانس مرکزی معلوم و حداقل عدم قطعیت در زمان و مکان استفاده می گردد.

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \exp(i\omega_0 t) \exp(-t^2/2) \quad (1)$$

این معادله با  $\omega_0 = 6$  که معمولاً استفاده می شود مقدار خوبی برای نسبت طیفی به دست نمی دهد بنابراین در این روش از موجک مورلت تعمیم یافته که در حوزه ی فرکانس باریک تر است استفاده می گردد. تعریف موجک مورلت تعمیم یافته به صورت مقابل می باشد:

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{f}} \exp(-(\frac{f}{f_c} \dot{S}_0 - \dot{S}_0)^2 m) \quad (2)$$

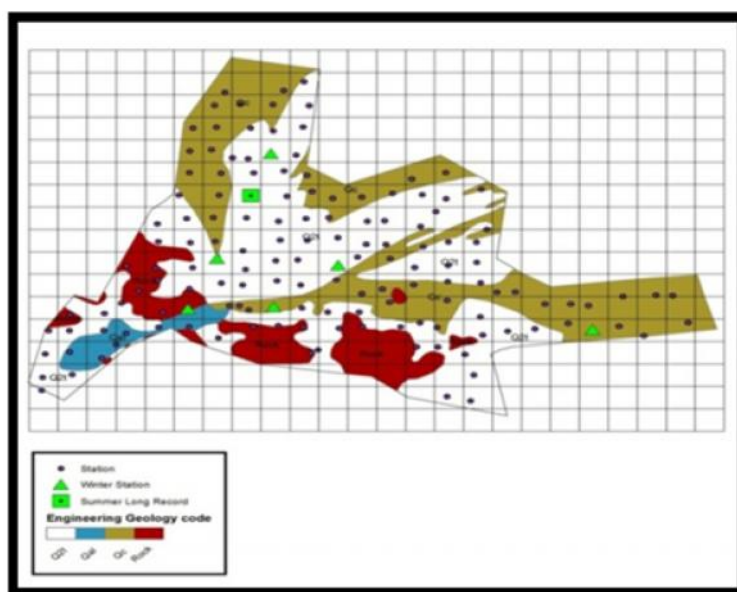
بطور کلی  $m$  یا پارامتر موجک مورلت پارامتری است که پهنای موجک مورلت را در دامنه‌ی طیفی کنترل می‌کند. پارامتر دیگر به نام  $nppm$ ، تعداد انتخاب پرنرزی ترین بیشینه‌ها در واحد دقیقه، نیز در نتایج دخیل می‌باشد. انتخاب پارامترها تجربی و به عهده کاربر می‌باشد. به‌طور مثال وجود امواج SH در میدان موج دامنه‌ی نسبت طیفی را افزایش می‌دهد و وجود امواج SV این دامنه را کاهش می‌دهد در نتیجه انتخاب تعداد زیادی بیشینه در دقیقه ممکن است باعث حضور این امواج در میدان موج ارتعاشات زمینه شود در صورتی که انتخاب تعداد کمتری بیشینه ممکن است باعث از دست رفتن اطلاعات صحیح و از بین رفتن هموار بودن منحنی گردد. بنابراین انتخاب های نادرست نتیجه را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

بدین منظور در این مقاله در روش HVTFA جستجو برای یافتن بهترین پارامتر موجک مورلت و همچنین بهترین  $nppm$  انجام گردید. مقادیر پیشنهادی برای شروع کار با توجه به مقادیر پیشنهادی توسط گزارشات پروژه نریس (۲۰۰۶-۲۰۰۸) برای  $m$ ,  $n$  در جدول ۱ مشخص گردیده‌اند.

جدول ۱: اعداد انتخابی برای تعیین حساسیت پارامترهای مربوط به روش HVTFA

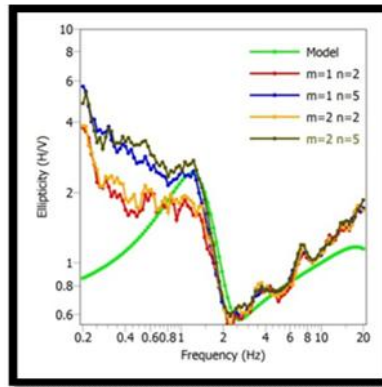
مقادیر					پارامتر
۸	۴	۲	۱	۰.۵	M (پارامتر موجک)
۱۰۵ و ۱۰	۱۰۵ و ۱۰	۱۰۵ و ۱۰	۱۰۵ و ۱۰	۱۰۵ و ۱۰	nppm

با توجه به تعدد ایستگاه‌ها در شهر اراک (۱۴۸ برداشت میکروترومور و ۲۰ حالت مختلف برای مطالعه هر برداشت) (شکل ۱) انجام این عمل برای تمامی ایستگاه‌ها میسر نبود بنابراین در محل برداشت های زمستانی و ایستگاه‌های اطراف آن‌ها با توجه به وضعیت زمین‌شناسی سطحی منطقه این پارامترهای حساسیت سنجیده شدند. با توجه به اینکه در مقایسه در مناطق مختلف با توجه به نکات گفته شده در فصل گذشته مقدارهای تقریباً مشابهی در به دست آمد بنظر می‌رسید این رهیافت قابل تعمیم به تمامی مناطق شهر می‌باشد. به همین منظور در نهایت پارامترهای  $m=1$  و  $n=5$  برای استفاده در روش HVTFA انتخاب گردیدند. همانطور که در شکل نیز مشخص است همچون بسیاری از مشاهدات این مقدار دارای تطابق بسیار خوبی با منحنی مدل می‌باشد (شکل ۲).

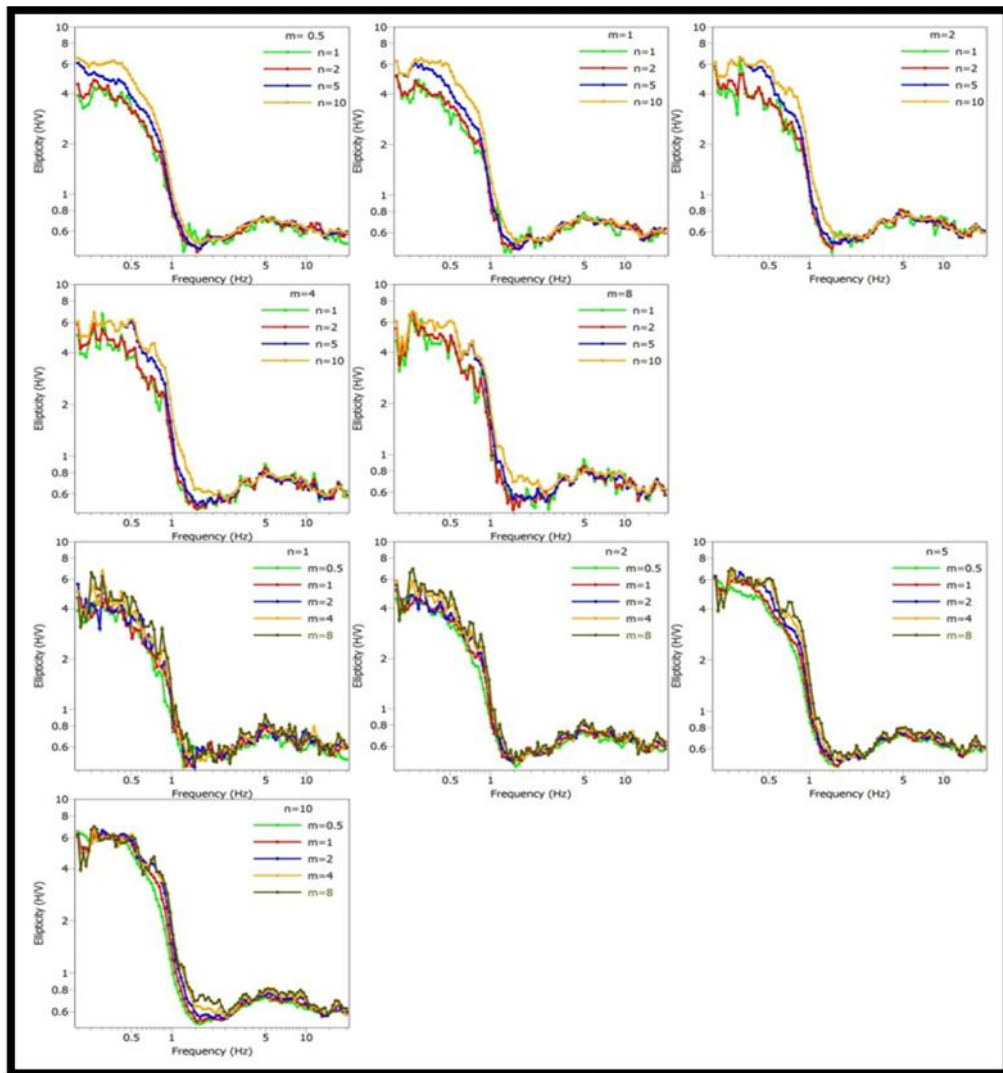


شکل ۱: ایستگاه‌های برداشت ارتعاشات زمینه در شهر اراک





الف



ب

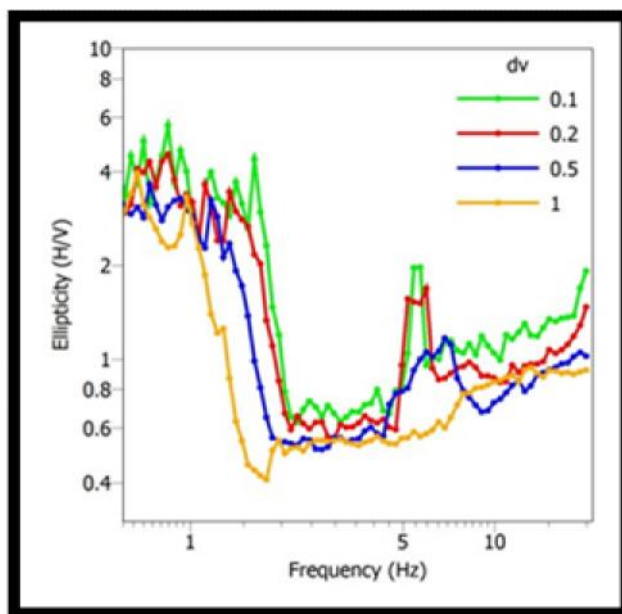
شکل ۲: الف: مقایسه منحنی‌ها با پارامترهای مختلف در روش HVTF با منحنی مدل

ب: نحوه‌ی مقایسه تمامی حالت‌ها برای یک ایستگاه مرجع (H5)

روش دوم یا روش کاهش تصادفی (آسموسن ۱۹۹۷) روش نسبتاً ساده‌ی میانگین‌گیری بخش‌های زمانی از پاسخ‌های اندازه‌گیری شده با

شرایط آغازین معمولی می‌باشد.

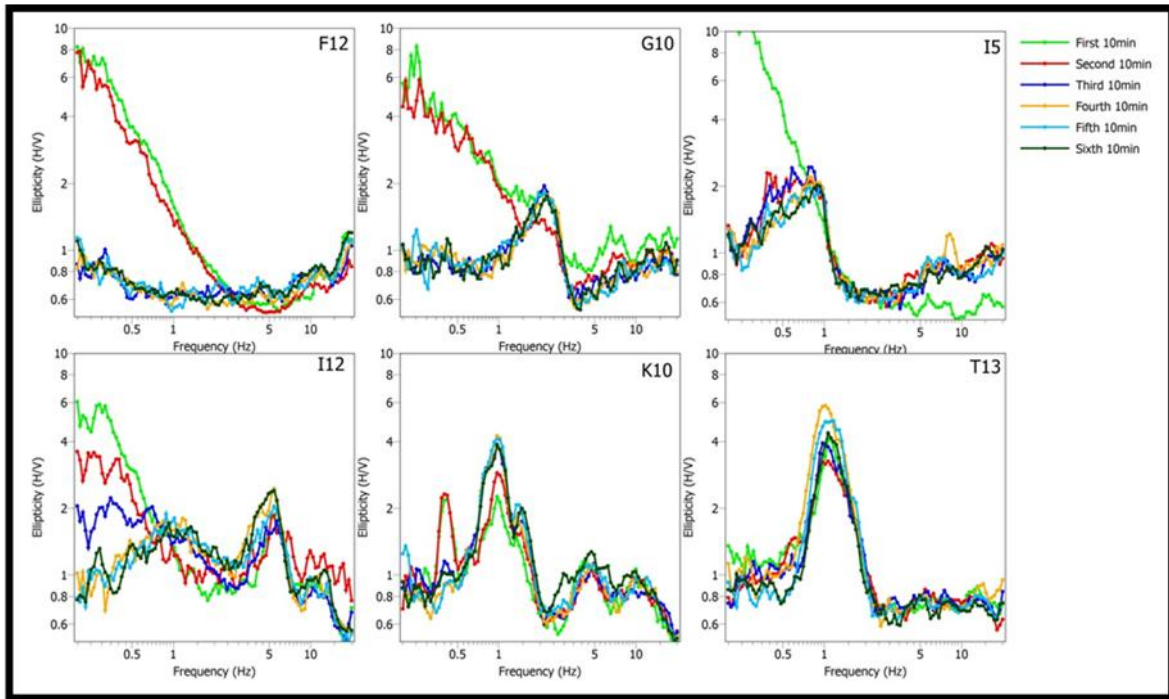
(هوبیگر و همکاران ۲۰۰۹) از مفاهیم این روش برای استخراج بیضی‌واری موج ریلی استفاده نمودند. آن‌ها با در نظر داشتن سیگنال عمودی ارتعاشات زمینه به‌عنوان سیگنال اصلی و تقسیم به قسمت‌های ثابت زمانی به مانند روش آسموسن به این تابع دست یافتند. تفاوت امر در این می‌باشد که انتخاب بر اساس زمان‌هایی از تاریخچه‌ی 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 ذخیره می‌گردد. پس از انتخاب به علت اختلاف فاز طبیعی بین مؤلفه‌ی عمودی و مؤلفه‌ی افقی موج ریلی سیگنال‌های ذخیره شده‌ی 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 داده شده 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 ذخیره شده کاهش اثرات امواج درونی را نیز شاهد خواهیم بود. در روش ری - دک پارامتر پهنای فیلترینگ سیگنال به عنوان متغیر اصلی وجود دارد که بعد از بررسی و مقایسه با نتایج روش قبلی و فرض این مسئله که تا زمانیکه پهنای کم به مشاهده لطمه نزنند مقادیر کوچکتر فیلترینگ نتایج مناسب تری به همراه خواهند داشت عدد ۰.۲ مناسب تشخیص داده شد و برای تعداد پنجره‌ها به خاطر زمان کمتر برای پردازش داده‌ها تعداد پنجره‌ها یک انتخاب شدند (شکل ۳).



شکل ۳: مقایسه منحنی‌های بدست آمده توسط روش ری دک بر پایه پهنای فرکانسی مختلف

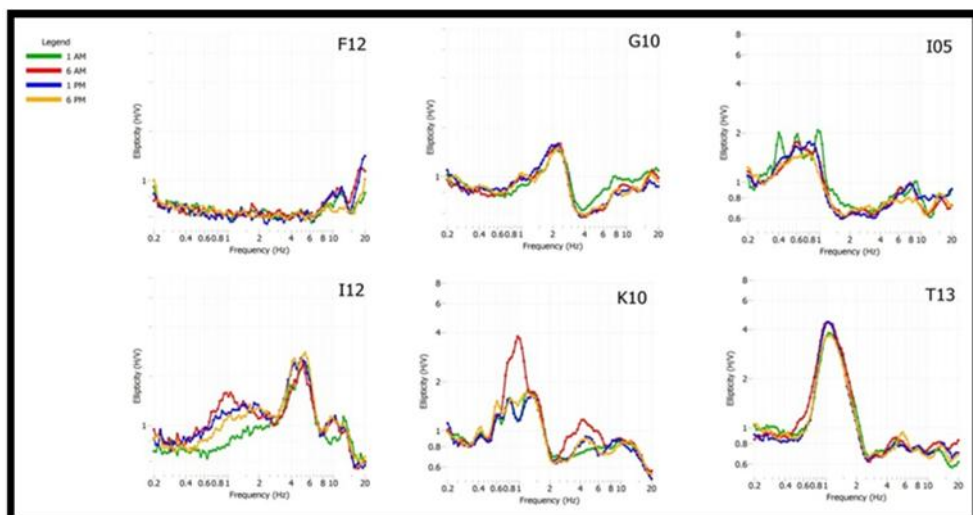
پس از انتخاب بهترین پارامترها قدم بعدی مشاهده زمان پایداری داده‌ها می‌باشد. طولانی بودن زمان رکوردگیری علیرغم طولانی‌تر کردن مدت عملیات میدانی، امکان بررسی فرکانس‌های تشدید احتمالی بسیار پایین را فراهم می‌سازد و از طرف دیگر امکان انتخاب تعداد کافی پنجره‌های مانای مناسب برای پردازش داده‌ها و حذف نویزهای گذرای احتمالی را فراهم می‌سازد بدین منظور داده‌ها را برای یک دسته از رکوردهای بلندمدت زمستانی در بازه‌های ده‌دقیقه‌ای جدا نموده و تغییرات را مشاهده کرده ایم (شکل ۴).





شکل ۴: منحنی‌های بیضی‌واری برای بازه‌هایی از ده دقیقه اول تا ده دقیقه ششم در ایستگاه‌های مرجع

همانطور که مشخص است علت اینکه در تعدادی از ایستگاه‌ها داده‌ها در دقایق ابتدایی نتیجه مناسبی ندارند مربوط به مشکلات دستگاهی می‌باشد. در واقع طبق تئوری اگر شرایط نصب دستگاه مناسب باشد رکوردهای ۳ تا ۵ دقیقه‌ای نیز برای به دست آوردن منحنی‌های طیفی کافی می‌باشد. به هر نحو این مشاهده نشان داد داده‌های مورد مطالعه تحت هر شرایطی در ده دقیقه سوم به پایداری رسیده‌اند بنابراین در محاسبات رکوردهایی با مدت‌زمان سی دقیقه (داده‌های مورد استفاده در این رساله) نتایج پایداری از خود نشان می‌دهند. در مشاهده دیگری به منظور جلوگیری از نویز انسانی یا به طور کلی مطالعه حساسیت شب و روز داده‌ها به شب و روز رکوردهای ۶ ایستگاه مرجع زمستانی دارای رکورد بلندمدت در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز پردازش شده که نتایج در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.



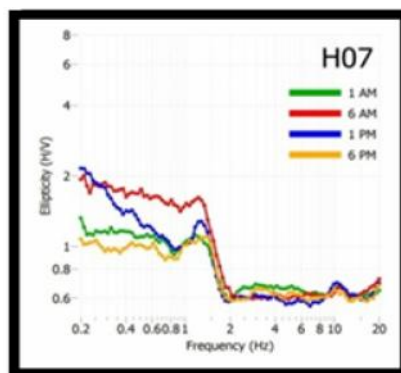
شکل ۵: مطالعه منحنی‌های بیضی‌واری در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز

این مقایسه شبانه‌روزی برای تک ایستگاه تابستانی بلندمدت موجود نیز انجام گردید. ناپایداری فرکانس‌های پایین را می‌توان به مشکلات دستگاهی مربوط به این برداشت نسبت داد (شکل ۶). به هر نحو با توجه به استفاده نشدن باند فرکانسی یال چپ در محاسبات اینورژن بیضی‌واری

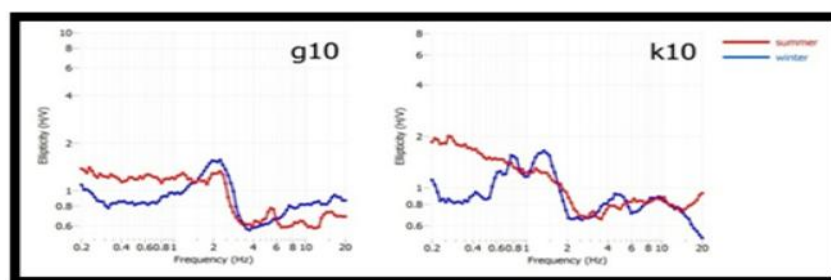


در این رساله این مشاهده مشکل چندانی ایجاد نمی کند. برای مطالعه بیشتر می توان برای فرکانس های پایین می توان طیفها را در شرایط خام مشاهده نمود.

هم چنین در اختیار داشتن داده ی قابل قبول در دو فصل و شرایط آب و هوایی متفاوت امکان مقایسه داده ها در تابستان و زمستان را نیز در اختیار ما قرار داده است. لازم به ذکر است که در این مقایسه، داده تابستانی داده کوتاه مدت و داده زمستانی داده بلند مدت می باشد (شکل ۷). همان طور که تأثیرات مشاهده می شود داده های مربوط به زمستان پایدارتر و امکان مشاهده ی فرکانس تشدید در آن ها ساده تر می باشد.

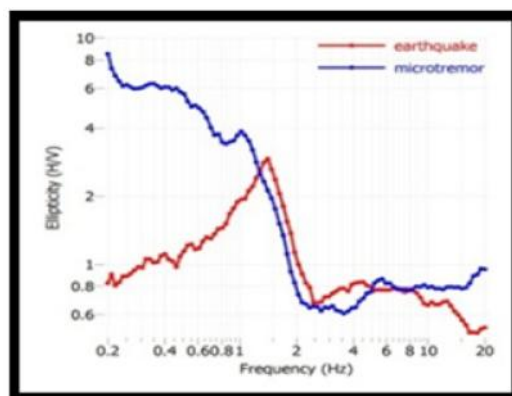


شکل ۶: مطالعه منحنی بیضی واری رکورد تابستانی بلندمدت (ایستگاه H7) در طول شبانه روز



شکل ۷: مقایسه منحنی ها در دو فصل مختلف در دو ایستگاه (ایستگاه G10 و K10)

از طرفی رکوردهای زلزله ثبت شده در مدت زمان ثبت رکوردها می تواند اطلاعات دقیق تری نسبت به رکوردهای ارتعاشات زمینه داشته باشد. به طور مثال رکورد ثبت شده در ایستگاه T13 دارای قله ی مشخص فرکانسی در فرکانس ۱.۳ هرتز می باشد (شکل ۸). استفاده از رویدادهای زلزله بطور کاملا مشخص حاوی اطلاعات دقیق تری می باشد که می توان از آن ها به عنوان تصدیقی برای مطالعات ارتعاشات زمینه نام برد و همچنین برای تعیین دقیق قله ی فرکانسی نیز می توان از آن ها بعنوان یک مشاهده ی مطمئن استفاده نمود.



شکل ۸: مقایسه رکورد زلزله و ارتعاشات زمینه در یک ایستگاه حاوی رویداد ثبت شده زلزله (ایستگاه T13)



- Asmussen JC (1997) Modal analysis based on the random decrement technique, Ph.D. thesis, Univ. of Aalborg, Aalborg, Denmark
- Bard P-Y (1998) Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? *Proceedings 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, Bard PY, Theodulidis N and SESAMEWP04 Team (2008) Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio, *Bull. Earthq. Eng.*, 6(1): 75–108
- 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
- NERIES Deliverable Geotechnical Site Characterization Report on Using Ellipticity Information for Site Characterization (JRA4) (2006-2008), European Commission – Research General Directorate, Project No. 026130
- 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