

بررسی پدیده همبوسی مدها در روش‌های MASW و MALW

حسین کاظم‌نژادی^۱ و حمیدرضا سیاهکوهی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۹/۴/۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۳/۴)

چکیده

تخمین پروفیل سرعت موج برشی لایه‌های سطحی در پروژه‌های مهندسی از اهمیت بالایی برخوردار است. این پارامتر به‌عنوان مثال در پروژه‌های ژئوتکنیکی به‌منظور دسته‌بندی نوع خاک و در پروژه‌های مهندسی زلزله برای تعیین پاسخ ساختگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حال حاضر روش‌های مختلفی برای تخمین پروفیل سرعت موج برشی وجود دارد که از میان آنها روش‌های MASW و MALW به‌واسطه سرعت اجرای بالا، هزینه کم و در مواردی غیرمخرب بودن، بسیار پرکاربرد هستند. یکی از مشکلات مهم پیش روی روش‌های امواج سطحی پدیده همبوسی مدهاست که در حضور تباین شدید سرعتی (شرایط مرسوم نهشته شدن رسوبات جوان روی سنگ‌بستر) رخ می‌دهد. این پدیده می‌تواند منجر به تفسیر غلط از منحنی پاشش و حصول مدل سرعتی اشتباه شود. این موضوع برای تصمیم‌سازی در پروژه‌های مهندسی می‌تواند بسیار خطرناک باشد. در این مطالعه ضمن بررسی شرایط ایجاد همبوسی مدها، عملکرد دو روش تحلیل امواج سطحی فوق در حضور این مشکل مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد برخلاف روش MASW که به وجود تباین‌های سرعتی بالا حساسیت زیادی دارد، روش MALW در مقابل این شرایط پیچیده عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهد. همچنین در این مطالعه نشان داده شده است که با استفاده از روش HVSR در کنار روش‌های امواج سطحی می‌توان فرکانس وقوع همبوسی را نیز پیش‌بینی کرد و از منحنی H/V حاصل در وارون‌سازی همزمان با داده‌های امواج سطحی بهره برد. روشن است که این موضوع از عدم قطعیت ذاتی موجود در روش‌های ژئوفیزیکی کاسته و بر دقت مدل سرعتی نهایی می‌افزاید.

واژه‌های کلیدی: تحلیل چندکاناله امواج سطحی، پروفیل سرعت موج برشی، میکروترومور، وارون‌سازی همزمان.

۱. مقدمه

Eurocode 8 (آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای سازه‌های اروپا) و استاندارد ۲۸۰۰ (آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله ایران) تحقیق در این حوزه افزایش چشم‌گیری داشته است.

دو روش تحلیل امواج سطحی یعنی روش تحلیل طیفی چندکاناله امواج سطحی (MASW) و روش تحلیل چندکاناله امواج لاو (MALW) مبتنی بر مطالعه رفتار پاششی امواج ریلی و لاو هستند. این روش‌ها به‌دلیل سرعت بالا در اجرا، هزینه پایین و همچنین غیرمخرب بودن بسیار پرکاربرد هستند. این مطالعه به مقایسه عملکرد دو روش فوق در استخراج پروفیل سرعت موج برشی در حضور تباین سرعتی بالا می‌پردازد. این شرایطی است که غالباً در رسوبات نزدیک به سطح مشاهده می‌شود، جایی که رسوبات جوان مستقیماً روی سنگ‌بستر قرار گرفته است. تباین‌های بالا تأثیر زیادی بر روی بزرگ‌نمایی

امواج سطحی برای کاربردهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که آزمایش‌های غیرمخرب لرزه‌ای، مطالعات ژئوتکنیک و لرزه‌شناسی پوسته‌ای از جمله آنها هستند (لو و همکاران، ۲۰۰۷؛ سوکو و همکاران، ۲۰۱۰؛ پرودهل و همکاران، ۲۰۱۳؛ نظریان و همکاران، ۲۰۱۷؛ سوکو و همکاران، ۲۰۱۷؛ کریشنا و همکاران، ۲۰۱۸؛ جاکا و روی، ۲۰۱۸؛ توسلی و قضاوی، ۲۰۱۸؛ سوکو و همکاران، ۲۰۱۸؛ آنتیو و فریختر، ۲۰۱۹). یکی از کاربردهای مهم امواج سطحی تعیین پروفیل سرعت موج برشی به‌خصوص در لایه‌های سطحی است. در چند سال گذشته به‌دلیل افزایش تقاضا، تلاش‌ها برای یافتن روش‌های مؤثرتر برای اعمال روش‌های امواج سطحی در مطالعات ژئوتکنیکی شدت بیشتری گرفته (دال مورو، ۲۰۱۵). همچنین به‌دلیل اشاره به اهمیت استخراج پروفیل قائم سرعت موج برشی در دستورالعمل‌ها و آیین‌نامه‌های ساختمانی همچون

لرزه‌های ساختگاه داشته و مستقیماً با هدف مطالعات تعیین پاسخ ساختگاه در ارتباط است (ناگوشی و ایگاراشی، ۱۹۷۱).

در روش MASW و در حضور این شرایط (وجود تباین سرعتی بالا میان لایه‌های زیرسطحی) برای کار با امواج سطحی با مشکلی به نام همبوسی مدها روبه‌رو هستیم. بعضی از محققین با این پدیده که در آن مد اصلی و مد اول بسیار به یکدیگر نزدیک می‌شوند، مواجه شده‌اند (بواگا و همکاران، ۲۰۱۳). پدیده مذکور مانع بزرگی برای تشخیص و انتخاب مد اصلی پاشش از مدهای بالای امواج سطحی بوده و موجب تخمین مدل ناصحیح برای ساختار سرعتی از وارون‌سازی می‌شود (استرویا و همکاران، ۲۰۱۵).

برخلاف امواج ریلی، ماهیت پاششی موج لاو مستقل از سرعت موج p است. سرعت‌های فاز موج لاو برای یک مدل زمین لایه‌ای تابعی از فرکانس و سه دسته از مشخصه‌های فیزیکی زمین (سرعت موج SH، چگالی و ضخامت لایه) است. به‌لحاظ تئوری، وجود پارامترهای کمتر عملیات وارون‌سازی موج لاو را پایدارتر کرده و از پیچیدگی محاسباتی آن می‌کاهد. علاوه‌بر این، در روش MALW مشکل همبوسی مدها نیز به‌ندرت به‌چشم می‌خورد. به‌طور کلی استفاده از امواج لاو به‌جای امواج ریلی می‌تواند این مزیت‌ها را فراهم آورد: ۱) سادگی منحنی‌های پاشش امواج لاو و عدم حضور مشکل همبوسی مدها به‌دلیل عدم وابستگی این موج به سرعت موج p . ۲) برخورداری تصاویر پاششی انرژی موج لاو از نسبت بالاتر سیگنال به نوفه در مقایسه با تصاویر پاششی موج ریلی. ۳) وارون‌سازی پایدارتر امواج لاو (شیا و همکاران، ۲۰۱۲).

مطالعات دیگر صورت گرفته بر روی امواج لاو شامل: بهبود تخمین سرعت موج برشی با استفاده از وارون‌سازی موج لاو (سافانی و همکاران، ۲۰۰۵)؛ وارون‌سازی امواج لاو در حضور لایه کم‌سرعت (سافانی و همکاران، ۲۰۰۶)؛ مدل‌سازی فرکانس بالا به‌وسیله امواج لاو (لو و

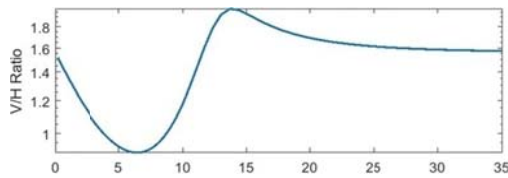
همکاران، ۲۰۱۰)؛ وارون‌سازی همزمان موج لاو و شولتی به‌وسیله الگوریتم مونت-کارلو (سوگو و همکاران، ۲۰۱۱)؛ تحلیل چندکاناله امواج لاو در یک برداشت لرزه‌ای ۳ بعدی (پن و همکاران، ۲۰۱۶)؛ تخمین ساختار سرعت موج برشی نزدیک سطح با به‌کارگیری همزمان موج ریلی و لاو (می و همکاران، ۲۰۲۰) است.

در این تحقیق همچنین نشان داده می‌شود که با بهره‌گیری از روش HVSr در کنار روش‌های تحلیل امواج سطحی نه تنها می‌توان از حضور تباین‌های سرعتی بالا در شرایط زیرسطحی منطقه مورد مطالعه مطلع شد، بلکه به کمک منحنی H/V حاصل می‌توان به فرکانس وقوع پدیده همبوسی نیز پی برد. علاوه‌بر مزایای ذکر شده، از منحنی H/V می‌توان در وارون‌سازی همزمان با داده‌های امواج سطحی نیز بهره برد، روشن است که این موضوع منجر به تخمین پروفیل موج برشی دقیق‌تری خواهد شد. در ادامه با اعمال روش روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی ضمن ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، میزان حساسیت روش‌های MASW و MALW به حضور مشکل همبوسی مدها نیز بررسی می‌شود.

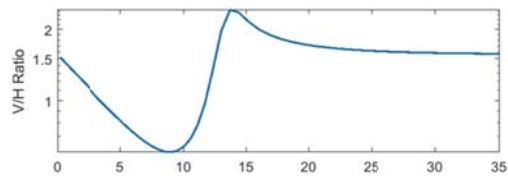
۲. همبوسی مدها، تباین سرعتی و بیضویت موج ریلی
پدیده همبوسی مدها تنها در تباین‌های سرعتی خاصی رخ می‌دهد. هنگام انتشار موج ریلی ذره حرکتی بیضی‌وار را تجربه می‌کند، نسبت بین دامنه مؤلفه‌های افقی و قائم امواج سطحی (بیضویت) به پروفیل سرعت وابسته است. در شکل ۱، بیضویت برای یک مدل تک لایه ساده با تباین سرعتی $4/5$ نمایش داده شده است. در این مدل لایه فوقانی و نیم‌فضا سرعت موج برشی به ترتیب برابر با ۲۰۰ و ۹۰۰ متر بر ثانیه دارند. مشاهده می‌شود در یک محیط لایه‌ای که به‌صورت قائم ناهمگن باشند (محیط‌های VTI) بیضویت تابعی از فرکانس بوده و مشخصات آن وابستگی زیادی به تباین‌های سرعتی خواهد داشت، اما در یک نیم‌فضای همگن بیضویت برای تمامی فرکانس‌ها ثابت بوده و تابعی از نسبت پواسون است. در شکل ۱، در

می‌شود که در آن مد اصلی موج ریلی از انرژی کافی برخوردار نبوده و با انتقال انرژی به مدهای بالاتر در عمل با یک منحنی پاشش آشفته روبه‌رو خواهیم بود. نشان داده خواهد شد که در روش MALW چنین مشکلی وجود نداشته و مد اصلی موج لاو نیز از انرژی کافی برخوردار می‌باشد. از این‌رو در صورت اصرار بر استفاده از روش MASW در حضور تباین سرعتی بالا، توصیه می‌شود که به جای استفاده از ژئوفون‌های قائم از ژئوفون‌های افقی برخط (راستای ژئوفون منطبق بر راستای پروفیل) در عملیات برداشت داده استفاده شود.

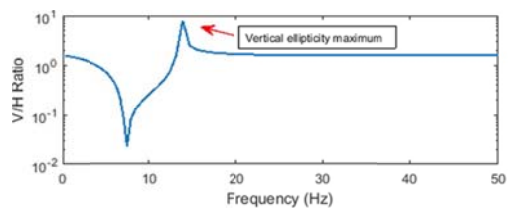
در شکل ۲ نشان داده شده است که برای یک مدل زمین فرضی تک لایه بیضویت قائم چگونه با فرکانس تغییر کرده و دامنه تغییرات آن با افزایش تباین سرعتی افزایش می‌یابد. در این شکل، علاوه بر منحنی پاشش تئوری برای مدهای اصلی و اول، بیضویت قائم برای هر دو مدل که تباین سرعتی آنها افزایش می‌یابد، نشان داده شده است.



(ب)

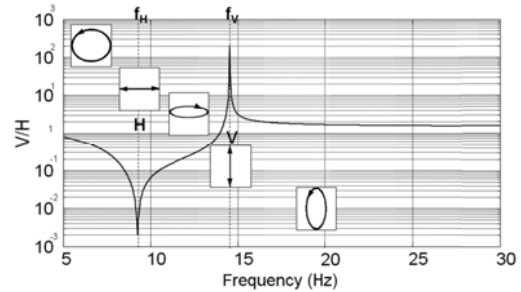


(د)



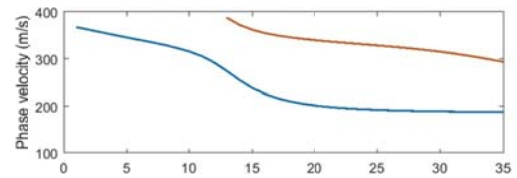
(و)

فرکانس f_H حرکت به‌طور کامل افقی بوده و در فرکانس f_V نیز حرکت به‌طور کامل قائم است (بوآگا و همکاران، ۲۰۱۳).

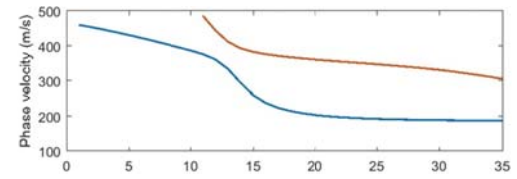


شکل ۱. بیضویت برای یک مدل تک لایه ساده با تباین سرعتی ۴/۵ در یک محیط لایه‌ای بیضویت به پروفیل سرعت و فرکانس وابسته است (بوآگا و همکاران، ۲۰۱۳).

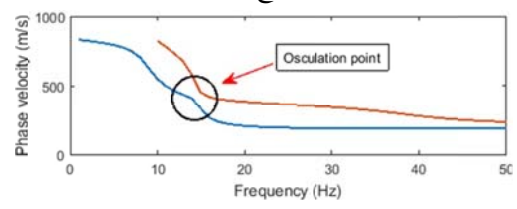
در شکل ۱ مشاهده می‌کنیم در فرکانس‌های پایین‌تر از f_V (بیشینه نسبت V/H) حرکت غالب به‌صورت افقی بوده تا جایی که در فرکانس f_H حرکت به‌صورت تماماً افقی رخ می‌دهد. از طرفی می‌دانیم که در روش MASW برای برداشت داده اغلب از ژئوفون‌های تک‌مؤلفه‌ای قائم استفاده می‌شود. این موضوع موجب برداشت داده‌ای



(الف)



(ج)



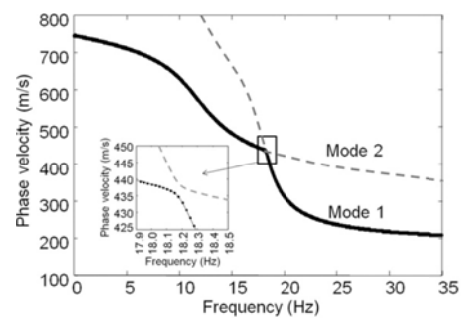
(ه)

شکل ۲. منحنی‌های پاشش تئوری مدهای اصلی و اول موج ریلی و بیضویت قائم مد اصلی برای سه مدل زمین فرضی دو لایه با تباین‌های سرعتی. الف) لایه فوقانی به ضخامت ۶ متر (۲۰۰ m/s) روی نیم فضا (۴۰۰ m/s)، ب) بیضویت قائم موج ریلی متناظر آن، ج) لایه فوقانی به ضخامت ۶ متر (۲۰۰ m/s) روی نیم فضا (۹۰۰ m/s)، د) بیضویت قائم موج ریلی متناظر آن، ه) لایه فوقانی به ضخامت ۶ متر (۲۰۰ m/s) روی نیم فضا (۹۰۰ m/s)، و) بیضویت قائم موج ریلی متناظر آن. بیضویت قائم با رشد تباین سرعتی افزایش می‌یابد. بردار قرمز، قله بیضویت قائم (شکل و) و دایره مشکی، فرکانس وقوع پدیده ی همبوسی (شکل ه) را نشان می‌دهد.

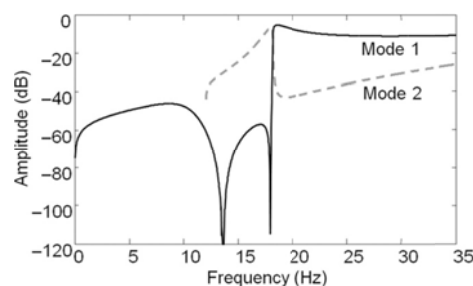
وقوع پدیده همبوسی را نشان می‌دهد. علت وقوع پدیده همبوسی را می‌توان در کاهش دامنه مد اصلی موج ریلی در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس همبوسی جست. شکل ۳ نمایش مثالی دیگر از پدیده همبوسی است. این مدل از سه لایه با سرعت‌های موج برشی به ترتیب ۲۰۰، ۲۳۰ و ۲۷۰ متر بر ثانیه با ضخامت هر لایه برابر با ۲ متر تشکیل شده که بر روی یک نیم‌فضا با سرعت ۸۰۰ متر بر ثانیه قرار گرفته‌اند. در این شکل منحنی پاشش تئوری به همراه طیف دامنه برای جابه‌جایی قائم مد اصلی و مد اول نمایش داده شده است. مشاهده می‌کنیم که مد اصلی موج ریلی در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس همبوسی انتقال دهنده اصلی انرژی است. در این حالت دامنه مد اصلی در حدود ۲۰ دسی‌بل بیشتر از دامنه مد اول است. در فرکانس همبوسی دامنه مد اصلی به‌طور ناگهانی کاهش یافته و دامنه مد اول افزایش می‌یابد. نتیجه این است که در فرکانس‌های کمتر از فرکانس همبوسی مد اصلی دیگر غالب نبوده و دامنه آن در حدود ۳۰ دسی‌بل کمتر از مد اول است (بوآگا و همکاران، ۲۰۱۳). این موضوع موجب آشفتگی منحنی پاشش موج ریلی (روش MASW) در حضور تباين‌های سرعتی بالا می‌باشد.

این مدل زمین فرضی از یک لایه فوقانی به ضخامت ۶ متر با سرعت ۲۰۰ متر بر ثانیه و نیم‌فضایی با سرعت‌های به ترتیب ۴۰۰، ۵۰۰ و ۹۰۰ متر بر ثانیه تشکیل شده است. مد‌های تئوری موج ریلی از حل مسأله مقدار ویژه ریلی در محیط لایه‌ای محاسبه شده‌اند (آکی و ریچارد، ۲۰۰۲) این مد‌ها تحت تأثیر نوفه و یا امواج حجمی قرار نگرفته‌اند.

مشاهده می‌شود که در نبود تباين سرعتی بالا، منحنی پاشش مد‌ها بخوبی از یکدیگر جدا بوده و بیضویت قائم نیز به صورت منحنی ملایم و تقریباً بدون قله تیز است (شکل ۲-الف). اما با افزایش تباين سرعتی فاصله بین منحنی پاشش مد‌ها کاهش یافته و دامنه بیضویت نیز رفته رفته در فرکانس مربوط به کاهش فاصله منحنی‌ها تشدید می‌شود (شکل ۲-ج). در مدل سوم تباين سرعتی بین لایه‌ها به ۴/۵ برابر افزایش داده شده است، مشاهده می‌شود که در این حالت فاصله بین منحنی پاشش مد‌ها بسیار کم شده و پدیده همبوسی رخ داده است (در شکل ۲-ه با دایره نشان داده شده است)، در چنین شرایطی تشخیص و انتخاب روند منحنی پاشش مد اصلی بسیار سخت خواهد بود. در شکل ۲-و مشاهده می‌شود که قله بیضویت قائم (بردار قرمز) در فرکانس ۱۵ هرتز، فرکانس



(الف)



(ب)

شکل ۳. یک مدل مصنوعی چندلایه با تباين سرعتی بالا. الف) منحنی‌های پاشش تئوری و نمایش نقطه همبوسی بین مد اول و مد دوم، ب) طیف دامنه برای مد اول و دوم، جابه‌جایی قائم (بوآگا و همکاران، ۲۰۱۳).

ژئوفون سه مؤلفه‌ای به فواصل ۱/۵ متر از یکدیگر بوده است. چشمه یک موجک ریکر با فرکانس مرکزی ۲۰ هرتز است که بر روی سطح زمین و در محل اولین ژئوفون قرار گرفته است. مشخصات زمین فرضی در مدل‌های مصنوعی در جدول ۱ آورده شده است. در این مدل‌ها تباین سرعتی موجود میان لایه فوقانی و سنگ‌بستر را از ۲/۵ برابر در مدل ۱ به بیش از ۳ برابر در مدل ۲ رسانده‌ایم، در پروژه‌های مهندسی اغلب با شرایط زیرسطحی مشابهی مواجه هستیم. شکل ۴ لرزه‌نگاشت داده‌های مصنوعی موج ریلی و لاو برای مدل ۲ را نشان می‌دهد.

در شکل ۵ با استفاده از روش شیفت فازی (پارک و میلر، ۱۹۹۹) منحنی‌های پاشش داده‌های مصنوعی محاسبه شده‌اند. منحنی‌های پاشش تئوری مدهای امواج ریلی و لاو نیز بر روی شکل‌ها نمایش داده شده‌اند. در تمامی این شکل‌ها مد اصلی با رنگ آبی و مد اول با رنگ قرمز مشخص شده است. مشاهده می‌کنیم در منحنی پاشش موج ریلی برای هر دو مدل، مدهای اصلی و اول نزدیک به یکدیگر قرار گرفته‌اند. پدیده همبوسی مدها به‌طور واضح برای مدل دوم در فرکانس ۳۸ هرتز رخ داده است، در اینجا اساساً با یک منحنی پاشش پیچیده روبه‌رو هستیم، در فرکانس‌های پایین بخشی از انرژی بر روی مد اصلی و بخشی دیگر بر روی مد اول قرار گرفته است (شکل ۵-ج).

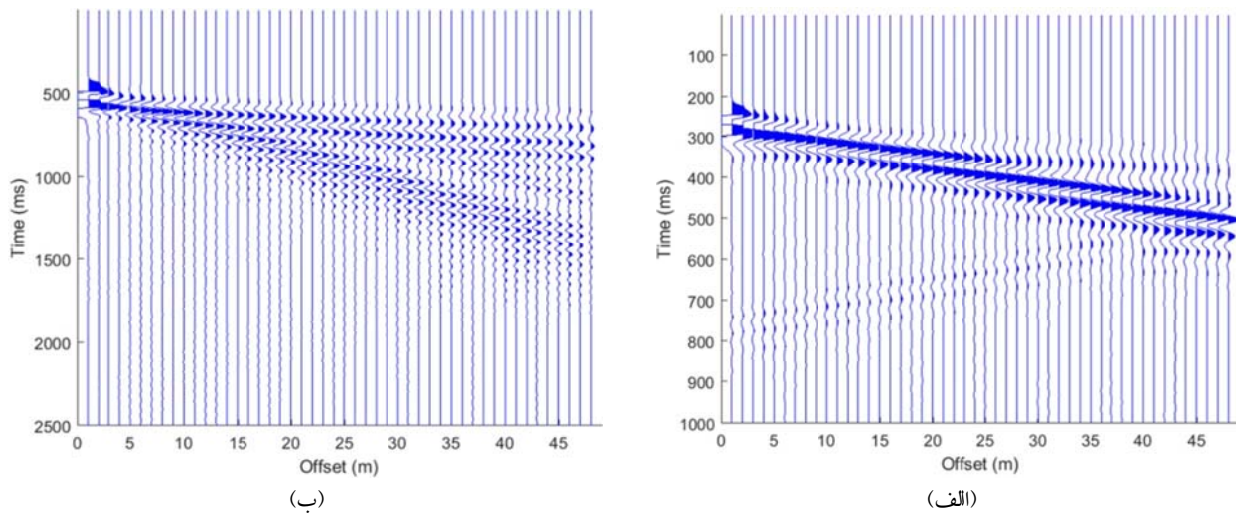
بنابراین واضح است که در مناطق با تباین سرعتی بالا احتمال رخداد همبوسی منحنی‌های پاشش بالا بوده و برای تحلیل منحنی پاشش خطرناک هستند، چراکه در چنین حالاتی احتمال اختلاط مدها و انتخاب غلط منحنی پاشش مد اصلی (از سوی کاربر) افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که در اینجا منحنی‌ها با دو رنگ متفاوت و با پهنایی به اندازه پهنای یک خط رسم شده‌اند ولی در شرایط واقعی به دلیل حضور نوفه در داده برداشت شده و همچنین قدرت تفکیک مکانی محدود (به علت محدودیت در طول آرایه) این مشکل حادتر می‌شود. از آنجاکه بین منحنی‌های پاشش تفاوت رنگ نیست و پهنای هر منحنی چندین برابر پهنای یک خط است شرایط را برای تفکیک منحنی‌ها از هم پیچیده‌تر می‌کند. بنابراین در حضور تباین‌های سرعتی بالا منحنی‌های پاشش امواج ریلی عملاً غیرقابل استفاده خواهد بود.

۳. بررسی عملکرد امواج ریلی و لاو در حضور مشکل همبوسی مدها (داده مصنوعی)

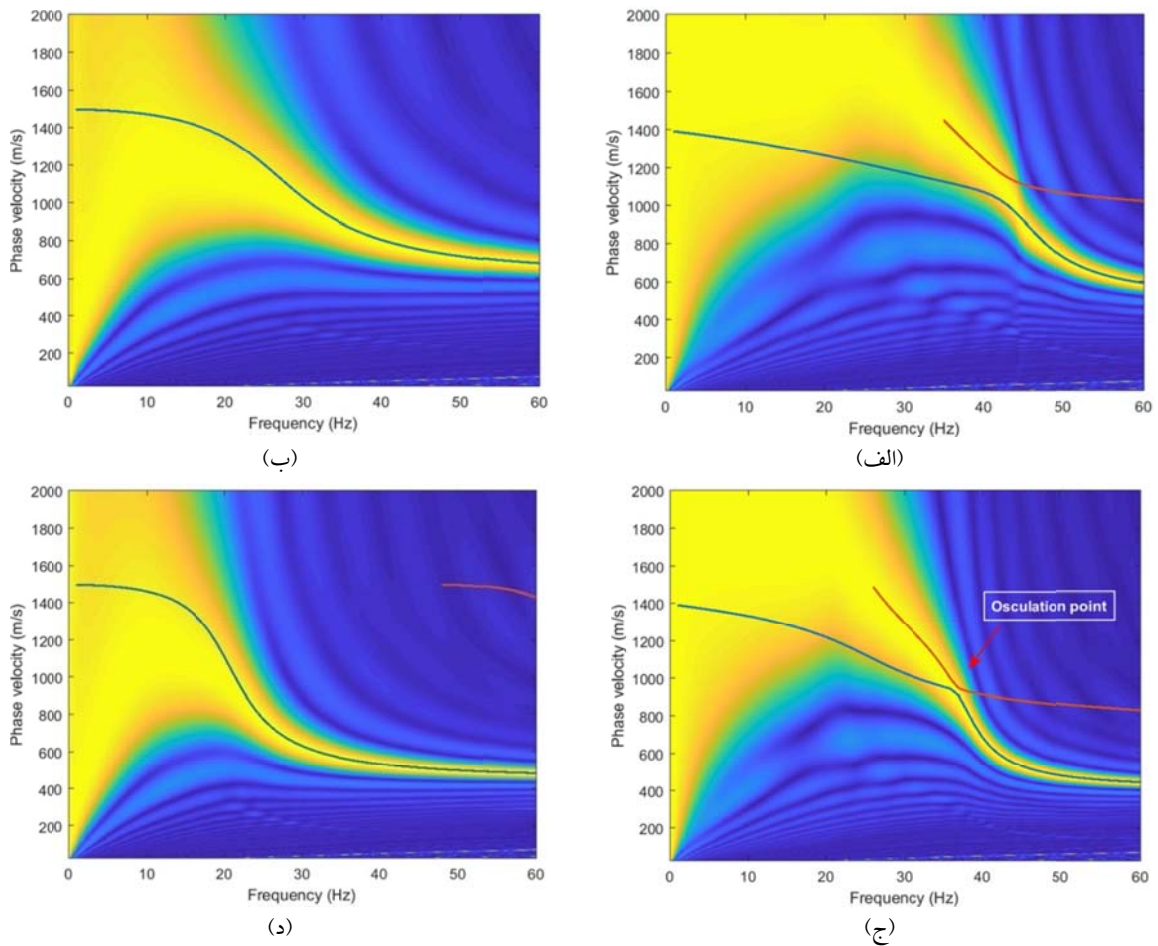
در این قسمت با تولید داده‌های مصنوعی برای مدل‌های زمین فرضی به بررسی عملکرد موج‌های ریلی و لاو در حضور تباین‌های سرعتی بالا پرداخته شده است. برای ساخت داده مصنوعی از کد SEM2DPACK استفاده شد (آپوئرو، ۲۰۰۸). در این مدل‌ها داده‌برداری مصنوعی با پروفیلی به طول ۷۲ متر صورت گرفته که شامل ۴۸

جدول ۱. مشخصات زمین فرضی در مدل‌های مصنوعی.

مدل ۱	سرعت موج P (m/s)	سرعت موج S (m/s)	چگالی (g/cm ³)	ضخامت لایه (m)
لایه فوقانی	۱۲۰۰	۶۰۰	۱/۸	۵
سنگ بستر	۳۰۰۰	۱۵۰۰	۱/۸	∞
مدل ۲	سرعت موج P (m/s)	سرعت موج S (m/s)	چگالی (g/cm ³)	ضخامت لایه (m)
لایه فوقانی	۹۰۰	۴۵۰	۱/۸	۵
سنگ بستر	۳۰۰۰	۱۵۰۰	۱/۸	∞



شکل ۴. الف) لرزه‌نگاشت مصنوعی موج لآو. ب) لرزه‌نگاشت مصنوعی موج ریلی. (لرزه‌نگاشت‌ها برای زمین فرضی مدل ۲ از جدول ۱).

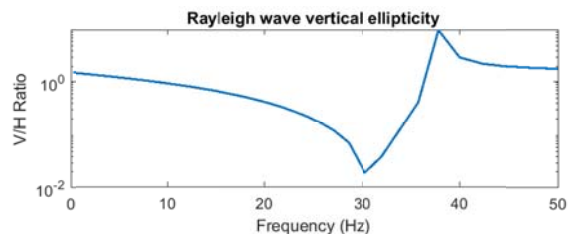


شکل ۵. منحنی پاشش داده های مصنوعی و منحنی تئوری مدهای امواج ریلی و لآو. شکل الف) موج ریلی برای زمین مدل یک. ب) موج لآو برای زمین مدل یک. ج) موج ریلی برای زمین مدل دو. د) موج لآو برای زمین مدل دو. وقوع پدیده همبوسی در داده موج ریلی مشهود است (شکل ج).

در مقابل در منحنی‌های پاشش موج لاو، حتی در حضور تباین سرعتی سه‌برابری (مدل ۲) نیز چنین رفتاری مشاهده نشده و در هر دو حالت مدهای پاششی به‌طور کامل از یکدیگر جدا بوده و انرژی به‌طور کامل بر روی مد اصلی قرار گرفته است (شکل‌های ۵-ب و ۵-د)؛ بنابراین از این برتری روش MALW می‌توان در مطالعه ساختگاه‌ها با تباین سرعتی بالا بهره برد. استفاده از داده‌های میکروترمور تک‌ایستگاهی نیز می‌تواند راهکاری عملی برای شناسایی تباین‌های سرعتی بالا باشد. در بررسی‌های قبلی نشان داده شد که قله بیضویت قائم با تباین سرعتی رابطه مستقیم دارد، به این معنا که با افزایش تباین سرعتی بزرگی قله بیضویت قائم نیز افزایش می‌یابد، همچنین دیده شد که این قله در محلی نزدیک به فرکانس همبوسی رخ می‌دهد. این موضوع برای مدل زمین فرضی دوم موج ریلی در شکل ۶ نمایش داده شده است، بیضویت قائم در محل وقوع همبوسی مدها (فرکانس ۳۸ هرتز) یک قله تیز را نشان می‌دهد.

در شکل ۷ نسبت طیفی H/V به‌دست آمده برای این سایت نشان داده شده است. در این شکل منحنی سیاه نشان‌دهنده نسبت H/V و خط چین‌های بالا و پایین بیانگر انحراف معیار داده هستند. در پردازش داده‌های میکروترمور از پنجره‌های زمانی دوزنقه‌ای با طول ۵۰ ثانیه استفاده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که مقدار بیشینه در فرکانس ۷/۵ هرتز اتفاق افتاده است، این فرکانس برابر با فرکانس تشدید (f_0) ساختگاه مورد مطالعه است. با توجه به اینکه تشدید در فرکانس نسبتاً بالایی رخ داده انتظار داریم که در این ناحیه سنگ‌بستر عمق کمی داشته باشد (از تقریب ساده یک چهارم طول موج داریم: $D = \frac{V_{savg}}{4f_0}$ ، که در آن D عمق سنگ‌بستر، V_{savg} میانگین سرعت موج برشی رسوبات و f_0 فرکانس تشدید ساختگاه است. بنابراین با فرض یک سرعت موج برشی میانگین برای رسوبات، بزرگ بودن فرکانس تشدید حاکی از عمق کم سنگ‌بستر خواهد بود). لازم به اشاره است که کم بودن عمق سنگ‌بسترترین انتظار را ایجاد می‌کند که روش MASW به خاطر حساسیت بالایش به تباین‌های سرعتی بالا، در این منطقه با مشکل همبوسی مدها روبه‌رو شود.

در مقابل در منحنی‌های پاشش موج لاو، حتی در حضور تباین سرعتی سه‌برابری (مدل ۲) نیز چنین رفتاری مشاهده نشده و در هر دو حالت مدهای پاششی به‌طور کامل از یکدیگر جدا بوده و انرژی به‌طور کامل بر روی مد اصلی قرار گرفته است (شکل‌های ۵-ب و ۵-د)؛ بنابراین از این برتری روش MALW می‌توان در مطالعه ساختگاه‌ها با تباین سرعتی بالا بهره برد. استفاده از داده‌های میکروترمور تک‌ایستگاهی نیز می‌تواند راهکاری عملی برای شناسایی تباین‌های سرعتی بالا باشد. در بررسی‌های قبلی نشان داده شد که قله بیضویت قائم با تباین سرعتی رابطه مستقیم دارد، به این معنا که با افزایش تباین سرعتی بزرگی قله بیضویت قائم نیز افزایش می‌یابد، همچنین دیده شد که این قله در محلی نزدیک به فرکانس همبوسی رخ می‌دهد. این موضوع برای مدل زمین فرضی دوم موج ریلی در شکل ۶ نمایش داده شده است، بیضویت قائم در محل وقوع همبوسی مدها (فرکانس ۳۸ هرتز) یک قله تیز را نشان می‌دهد.



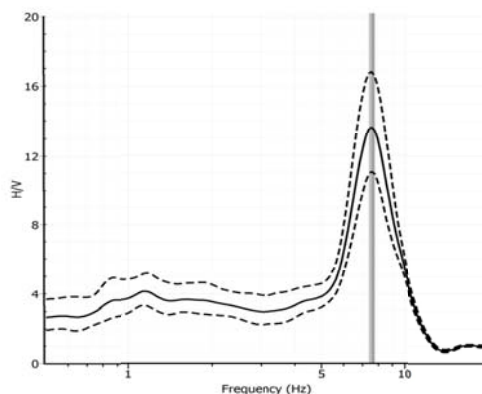
شکل ۶. بیضویت قائم موج ریلی برای مدل زمین فرضی دوم. بیشینه بیضویت قائم محل وقوع پدیده همبوسی را در فرکانس ۳۸ هرتز نشان می‌دهد.

۴. بررسی عملکرد امواج ریلی و لاو در حضور مشکل همبوسی مدها (داده واقعی)

در این قسمت به بررسی عملکرد داده‌های حاصل از برداشت امواج ریلی و لاو در شرایط واقعی پرداخته شده است. این داده‌ها در شهر منیفی ایالت کالیفرنیا آمریکا، نزدیک به یک ایستگاه آتش‌نشانی و به‌منظور برآورد میانگین سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول زمین برداشت شده‌اند. در این سایت روش‌های ژئوفیزیکی

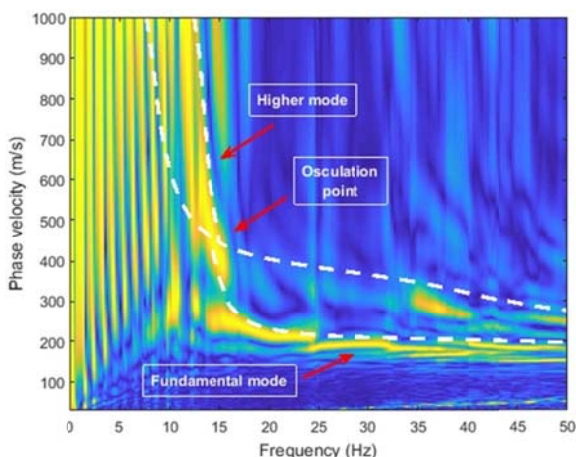
غالب بودن مدهای بالاتر با نتایج حاصل از روش HVSR نیز قابل پیش‌بینی بود. در این شکل‌ها با استفاده از مدل سرعتی به‌دست آمده از روش MALW، مدهای تئوری موج ریلی را تولید کرده و به‌صورت خط‌چین سفید بر روی منحنی پاشش موج ریلی رسم کرده‌ایم. مشاهده می‌شود.

که در فرکانس ۱۴ هرتز مد اصلی و مد اول به یکدیگر نزدیک شده و پدیده همبوسی مدها رخ داده است، توجه داریم که برای داده موج ریلی تشخیص مد اصلی پاششی در فرکانس‌های پایین نزدیک به از ۱۴ هرتز (طول‌موج‌های بلند) برای کاربر بسیار مشکل خواهد بود (شکل ۸-ب). در تحلیل داده‌های مصنوعی نشان داده شد که بیشینه نسبت V/H در فرکانسی بسیار نزدیک به فرکانس همبوسی رخ می‌دهد. در این قسمت با استفاده از داده واقعی HVSR این موضوع را بررسی شده است. از شکل ۹ مشاهده می‌شود که بیشینه این نسبت طیفی در فرکانس ۱۴ هرتز، جایی که مشکل همبوسی مدها برای داده موج ریلی رخ داده بود، اتفاق افتاده است؛ بنابراین با استفاده از روش HVSR نه‌تنها می‌توان به حضور یا عدم‌حضور تباین‌های سرعتی بالا در شرایط زیرسطحی پی برد، بلکه می‌توان در صورت حضور چنین شرایطی، فرکانس وقوع پدیده همبوسی را نیز پیش‌بینی کرد.

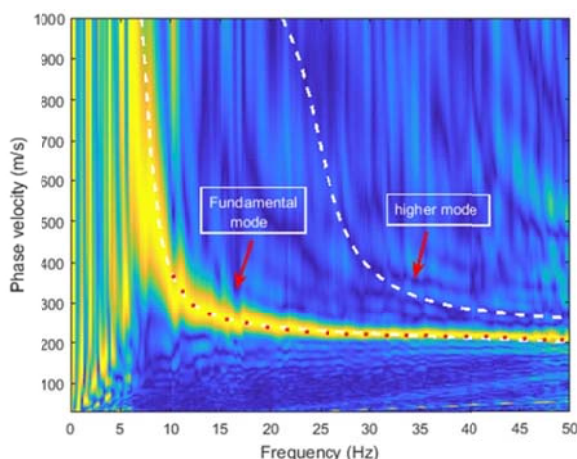


شکل ۷. نسبت طیفی H/V برای سایت آتش‌نشانی در کالیفرنیا. در فرکانس ۷/۵ هرتز یک بیشینه دامنه مشاهده می‌شود. (منحنی سیاه بیانگر نسبت طیفی H/V و خط‌چین‌های بالا و پایین نشان‌دهنده میزان انحراف معیار هستند).

در ادامه در شکل ۸ منحنی پاشش داده‌های ریلی و لاو به روش شیفت فازی به‌دست آورده شده است. مشاهده می‌شود که در منحنی پاشش داده موج لاو از فرکانس ۱۰ تا ۵۰ هرتز در تمامی نقاط انرژی به‌طور کامل بر روی مد اصلی قرار گرفته است، در این حالت انتخاب مد اصلی برای عملیات وارون‌سازی به‌سادگی توسط اپراتور امکان‌پذیر است (شکل ۸-الف). اما در مقابل در منحنی پاشش موج ریلی انرژی بین مد اصلی و مد بالاتر پخش شده است، در چنین شرایطی عملاً امکان‌پذیرش درست منحنی مد اصلی به‌خوبی امکان‌پذیر نیست. تفسیر اشتباه این منحنی منجر به تخمین غلط پروفیل سرعت موج برشی خواهد شد. غیرقابل استفاده بودن داده موج ریلی به‌دلیل

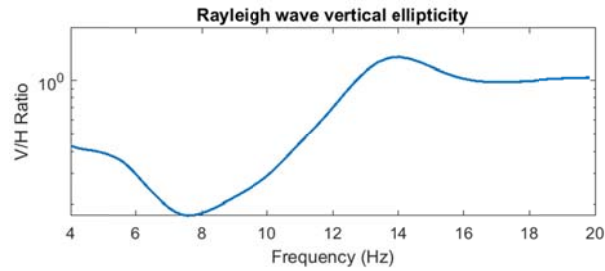


(ب)



(الف)

شکل ۸. الف) منحنی پاشش داده موج لاو. در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۵۰ هرتز انرژی به‌طور کامل بر روی مد اصلی پاششی قرار دارد. ب) منحنی پاشش داده موج ریلی. انرژی بین مد پاششی اصلی و مد اول پخش شده است، محل وقوع پدیده همبوسی بر روی تصویر نمایش داده شده است.



شکل ۹. نسبت V/H به دست آمده از داده واقعی HVSR. بیشینه نسبت V/H محل وقوع فرکانس همبوسی را نشان می‌دهد.

۳- در حالت سوم، کاربر با فرض اطلاع از پدیده همبوسی مد اصلی را به طور صحیح در فرکانس‌های پایین‌تر و بالاتر از فرکانس همبوسی انتخاب می‌کند (شکل ۱۰-ه، نقطه چین مشکی)

در شکل ۱۰ برای هر یک از حالات ذکر شده، پروفیل سرعت موج برشی حاصله نمایش داده شده است (شکل‌های ۱۰-ب، ۱۰-د و ۱۰-ه). همچنین در سطر چهارم خروجی‌های روش پیشنهادی این مقاله (استفاده از روش‌های MALW و HVSR) آورده شده است. پیش از این مشاهده شد که داده‌های موج لاو از کیفیت بالایی برخوردار بوده و از مشکل همبوسی و غالب بودن مدهای بالاتر رنج نمی‌برند. در اینجا در مرحله وارون‌سازی از مد اصلی پیک شده (نقطه چین مشکی، شکل ۱۰-ز) به همراه منحنی H/V (شکل ۷) برای وارون‌سازی همزمان استفاده شده است، پروفیل V_s حاصله در جدول ۲ آمده است. در این اشکال وارون‌سازی توسط نرم‌افزار Geopsy انجام گرفته است. در فرآیند وارون‌سازی تعداد مدل‌های تصادفی تولید شده توسط روش مونت-کارلو برابر با ۱۰۰ و تعداد مدل‌های تولید شده توسط الگوریتم همسایگی را ۲۰۰۰۰ مدل انتخاب شده‌اند.

همچنین مزیت دیگر به کارگیری روش HVSR در مطالعات مهندسی، استفاده از منحنی H/V حاصله در وارون‌سازی همزمان با داده‌های روش‌های امواج سطحی همچون MASW و MALW می‌باشد، روشن است که این موضوع از عدم قطعیت موجود در خروجی این روش‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای می‌کاهد، در این تحقیق نیز برای عملیات وارون‌سازی از همین تکنیک بهره برده‌ایم.

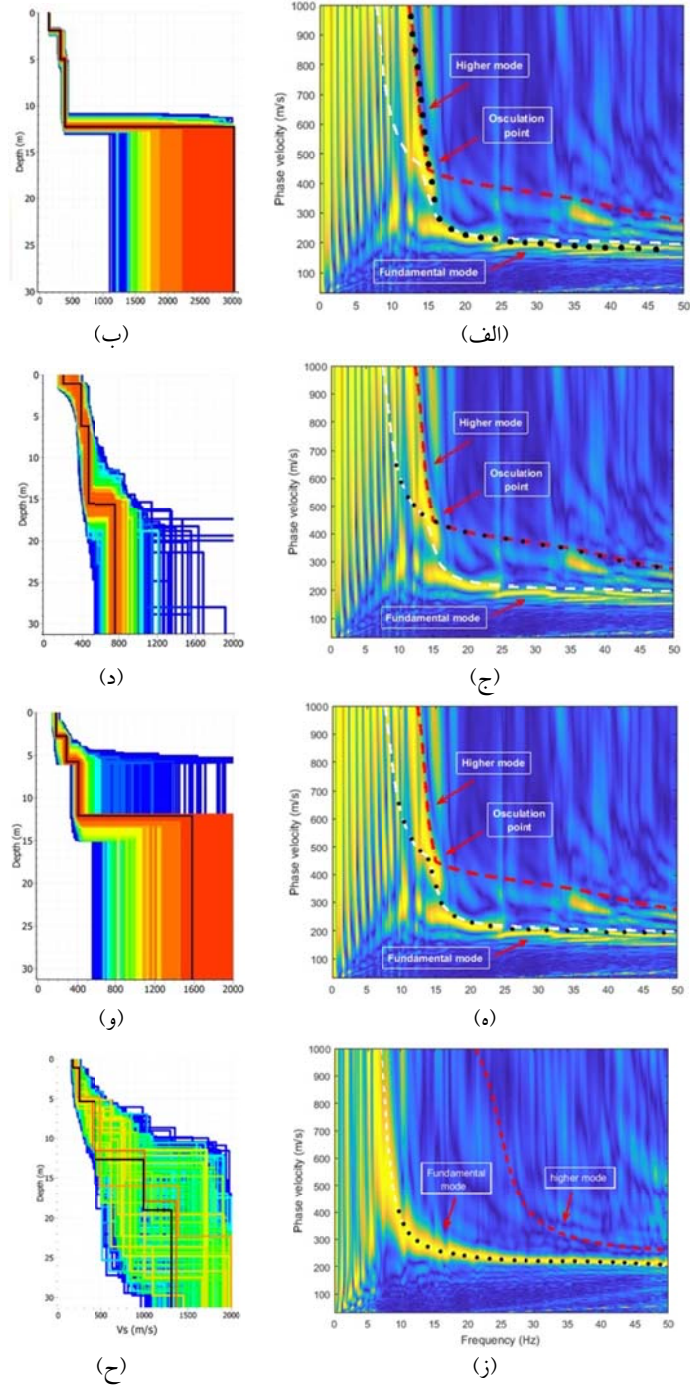
منحنی پاشش موج ریلی نشان داده شده در شکل ۸-ب به دلیل وجود آشفتگی و غالب بودن مد بالاتر، اساساً سه سناریوی متفاوت را برای تشخیص و انتخاب مد اصلی پیش روی کاربر قرار می‌دهد:

۱- در حالت اول، با فرض اینکه کاربر از پدیده همبوسی مطلع نیست در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس همبوسی مد بالاتر را به اشتباه به عنوان مد اصلی انتخاب می‌کند (شکل ۱۰-الف، نقطه چین مشکی).

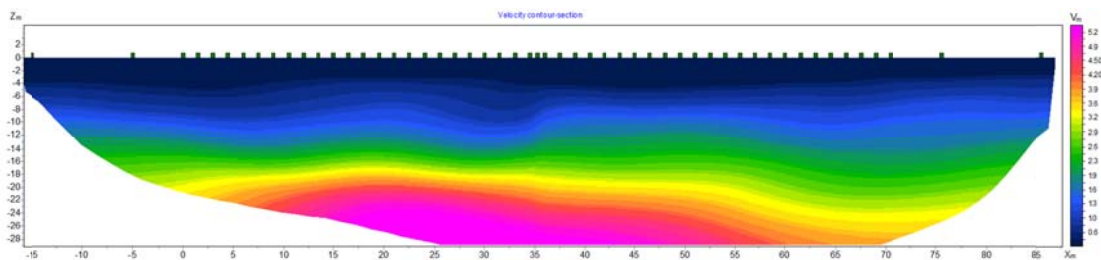
۲- در حالت دوم، با فرض اینکه کاربر از پدیده همبوسی مطلع نیست در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس همبوسی مد بالاتر را به اشتباه به عنوان مد اصلی انتخاب می‌کند (شکل ۱۰-ج، نقطه چین مشکی).

جدول ۲. مدل V_s نهایی به دست آمده از روش MALW و HVSR.

عمق تا قسمت فوقانی لایه (m)	ضخامت لایه (m)	سرعت موج S (m/s)
۰	۱	۱۶۰
۱	۴	۲۵۰
۵	۸	۴۳۰
۱۳	۶	۱۰۰۰
۱۹	>۱۱	۱۳۰۰



شکل ۱۰. نمایش حالات مختلف تشخیص و انتخاب مد اصلی امواج سطحی (نقطه چین مشکئی) به همراه مدل‌های سرعتی حاصله برای هر یک از حالت‌ها. خط مشکئی بر روی مدل‌های سرعتی بیانگر مدل با بالاترین میزان برازش است. (توضیح اجزای شکل در متن مقاله آمده است).



شکل ۱۱. توموگرافی دوبعدی حاصل از روش لرزه‌نگاری شکست مرزی (موج p) برای سایت آتش‌نشانی. عمق لایه‌ها با مدل‌های سرعتی (شکل‌های ۱۰- و ۱۰-ح) همخوانی دارد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله با تحلیل داده‌های مصنوعی و واقعی به شرایط وقوع مشکل همبوسی مدها پرداخته و به مقایسه عملکرد روش‌های MASW و MALW در حضور این مشکل پرداختیم. نشان داده شد که مشکل همبوسی در حضور تباین‌های سرعتی بیش از ۳ برابر در داده موج ریلی (روش MASW) به وقوع می‌پیوندد. در چنین شرایطی منحنی پاشش موج ریلی پیچیده بوده و انرژی بین مد اصلی و مد بالاتر پخش می‌شود. این مسأله تشخیص و انتخاب مد اصلی را برای عملیات وارون‌سازی (و متعاقباً حصول پروفیل سرعت موج برشی) بسیار مشکل کرده و می‌تواند سبب تفسیر غلط منحنی پاشش توسط کاربر شود. واضح است که این موضوع برای پروژه‌های مهندسی بسیار خطرناک است چراکه می‌تواند منجر به برآورد غلط پارامترهای طراحی سازه‌ها شود. در حالی که نشان داده شد داده موج لاو (روش MALW) حتی در تباین‌های سرعتی بالا از چنین مشکلی مصون بوده و مد اصلی پاششی در آن به نحوی مطلوب قابل تشخیص است. این مزیت روش MALW به ما کمک می‌کند تا در حضور شرایط زیرسطحی پیچیده به مدل سرعتی دقیق‌تری دست پیدا کنیم. در این تحقیق نشان داده شد که اجرای روش HVSR به موازات روش‌های تحلیل امواج سطحی می‌تواند ما را از وجود تباین‌های سرعتی بالا در لایه‌های نزدیک به سطح مطلع کند، همچنین نشان داده شد که فرکانس وقوع پدیده همبوسی نیز توسط این روش قابل پیش‌بینی است. علاوه بر اینها می‌توان از منحنی H/V به دست آمده در وارون‌سازی همزمان با داده موج ریلی یا لاو استفاده کرد. این موضوع از عدم قطعیت موجود در روش‌های امواج سطحی کاسته و به حصول پروفیل سرعت موج برشی دقیق‌تر کمک شایانی می‌کند.

مراجع

Aki, K. and Richards, P. G., 2002, Quantitative seismology. Sausalito, California, University Science Books.
Ampuero, J. P., 2008, SEM2DPACK a spectral

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با توجه به تشخیص غلط مد اصلی در سناریوهای اول و دوم مدل‌های سرعتی حاصله اختلاف فاحشی با مدل Vs نهایی (جدول ۲) دارند. به عنوان مثال در حالت اول (شکل ۱۰-ب) سرعتی که برای عمق ۱۳ متری تخمین زده شده برابر با ۳۰۰۰ متر بر ثانیه است، در حالی که سرعت به دست آمده از روش MALW برای این عمق ۱۰۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد. از طرفی در حالت دوم (شکل ۱۰-د) نیز سرعت در عمق ۲۰ متری ۸۰۰ متر بر ثانیه تخمین زده شده که این عدد در مدل نهایی به دست آمده برابر با ۱۳۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که در حضور تباین‌های سرعتی بالا تشخیص صحیح مد اصلی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. در حالت سوم (شکل ۱۰-ه) تشخیص مد اصلی پاشش موج ریلی (با در نظر گرفتن وقوع پدیده همبوسی) به طور صحیح صورت گرفته و بنابراین مشاهده می‌شود که مدل سرعتی حاصله همخوانی بیشتری با مدل نهایی به دست آمده از روش MALW (شکل ۱۰-ح) دارد.

همچنین برای ارزیابی بیشتر نتایج، تو موگرافی دوبعدی حاصل از روش لرزه شکست مرزی که در همین سایت برداشت شده نیز در شکل ۱۱ آورده شده است. از آنجاکه این مدل سرعتی مربوط به موج p بوده نمی‌توان در مورد سرعت‌ها مقایسه‌ای انجام داد اما مشاهده می‌شود که عمق لایه‌ها با آنچه که در مدل‌های سرعتی حالات سوم و چهارم (شکل‌های ۱۰-و، ۱۰-ح) ارائه شد همخوانی دارند، با این تفاوت که در مدل سرعتی به دست آمده از روش شکست مرزی در اعماق بیش از ۲۰ متر نیز یک لایه پرسرعت دیده می‌شود، این لایه به دلیل محتوای فرکانسی امواج سطحی بر روی پروفیل‌های سرعت موج برشی رؤیت نشده است.

element method tool for 2D wave propagation and earthquake source dynamics. <https://geodynamics.org/cig/software/specfem2d/>.

- Antipov, V. V. and Ofrikhter, V. G., 2019, Field estimation of deformation modulus of the soils by multichannel analysis of surface waves. *Data in Brief*, 24, 2352-3409.
- Boaga, J., Cassiani, G., Strobbia, C. L. and Vignoli, G., 2013, Mode misidentification in Rayleigh waves. *Geophysics*, 78, 4, EN17-EN28.
- Dalmoro, G., 2015, *Surface Wave Analysis for Near Surface Applications*. Elsevier books.
- Jakka, R. S. and Roy, N., 2018, Uncertainties in Site Characterization Using Surface Wave Techniques and Their Effects on Seismic Ground Response, In: Krishna A., Dey A., Sreedeeep S. (eds), *Geotechnics for Natural and Engineered Sustainable Technologies. Developments in Geotechnical Engineering*. Springer, Singapore.
- Krishna, A., Jakka, R. S. and Roy, N., 2018, Uncertainties in Site Characterization Using Surface Wave Techniques and Their Effects on Seismic Ground Response, In: Dey A., Sreedeeep S. (eds), *Geotechnics for Natural and Engineered Sustainable Technologies. Developments in Geotechnical Engineering*. Springer, Singapore.
- Luo, Y., Xia, J., Liu, J., Liu, Q. and Xu, S., 2007, Joint inversion of high-frequency surface waves with Fundamental and higher modes. *J. Appl. Geophysics*, 62, 375-384.
- Luo, Y., Xia, J., Xu, Y., Zeng, C. and Liu, J., 2010, Finite-difference modeling and dispersion analysis of high frequency Love waves for near-surface applications. *Pure Appl Geophys*, 167(12), 1525-1536.
- Mi, B., Xia, J., Bradford, J. H. and Shen, C., 2020, Estimating Near-Surface Shear-Wave-Velocity Structures Via Multichannel Analysis of Rayleigh and Love Waves: An Experiment at the Boise Hydrogeophysical Research Site. *Surv Geophys*, 41, 323-341. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09582-4>.
- Nazarian, S., Prajwol, T., Azari, H. and Yuan, D., 2017, Implementation of spectral analysis of surface waves approach for characterization of railway track substructure., *Transportation Geotechnics*, 12, 101-111.
- Nogoshi, M. and Igarashi, T., 1971, On the amplitude characteristics of Microtremor (part 2). *Jour. Seismol. Soc. Jpn*, 24, 26-40, (Japanese with English abstract).
- Yudi, P., Xia, J., Xu, Y. and Gao, L., 2016, Multichannel analysis of Love waves in a 3D seismic acquisition system, *GEOPHYSICS* 81, EN67-EN74.
- Park, C. B. and Miller, R. D., 1999, Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64, 800-808.
- Prodehl, C., Kennett, B. and Artemieva, I. and Thybo, H., 2013, 100 years of seismic research on the Moho. *Tectonophysics*, 609, 9-44.
- Safani, J., O'Neill, A., Matsuoka, T. and Sanada, Y., 2005, Applications of Love wave dispersion for improved shear-wave velocity imaging. *J Environ Eng Geophys*, 10(2), 135-150.
- Safani, J., O'Neill, A. and Matsuoka, T., 2006, Love wave modeling and inversion for low velocity layer cases. In: *Proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems (SAGEEP)*. Annual meeting of the environmental and engineering geophysical society (EEGS) Seattle, WA, 1181-1190.
- Socco, L. V., Foti, S. and Boiero, D., 2010, Surface-wave analysis for building near-surface velocity models — Established approaches and new perspectives. *Geophysics*, 75, 75A83-75A102.
- Socco, L. V., Boiero, D., Maraschini, M., Vanneste, M., Madshus, C., Westerdahl, H., Duffaut, K. and Skomedal, E., 2011, On the use of NGI's prototype seabed-coupled shear wave vibrator for 1 shallow soil characterization— Part II: Joint Inversion of multi-modal Love and Scholte surface waves. *Geophys J Int*, 185, 237-252.
- Socco, L. V., Comina, C. and KhosroAnjom, F., 2017, Time-average velocity estimation through surface-wave analysis: Part 1 — S-wave velocity. *Geophysics*, 82, U49-U59.
- Socco, L. V., Foti, S., Hollender, F. and Garofalo, F., 2018, Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project. *Bull. Earthquake Eng*, 16, 2367-2420.
- Strobbia, C., Foti, S., Rix, G. J. and Lai, C. G., 2015, *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Tavasoli, O. and Ghazavi, M., 2018, Wave propagation and ground vibrations due to non-uniform cross-sections piles driving. *Computers and Geotechnics*, 104, 13-21.
- Xia, J., Xu, Y., Luo, Y. and Miller, D., 2012, Advantages of Using Multichannel Analysis of Love Waves (MALW) to Estimate Near-Surface Shear-Wave Velocity. *Surv Geophys*, 33, 841-860. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9174-2>.

Investigation of mode osculation phenomenon in MASW and MALW methods

Kazemnezhadi, H.¹ and Siahkoochi, H. R.^{2*}

1. M.Sc. Graduated, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 29 June 2020, Accepted: 25 May 2021)

Summary

There are two types of seismic waves: those that can propagate inside a medium (body waves) and those traveling along the Earth's surface (surface waves). In the last decades, a number of papers dealing with surface waves have been published but it must be recalled that their theoretical description and first applications date back to almost a century ago. Surface waves have been in fact used for a number of applications since 1920s: nondestructive testing (even for medical applications, geotechnical studies and crustal seismology). Recently the interest toward their applications has increased both for the increasing demand for efficient methodologies to apply in engineering projects and because the recent regulations addressing the assessment of the seismic hazard (for instance the Eurocode8) that are giving the necessary emphasis to the determination of shear-wave velocity vertical profile. This parameter is commonly used in geotechnical studies for classifying soil types.

Among various methods for estimating shear-wave velocity profile, MASW and MALW methods are most popular because of their fast performance, low cost and their nondestructive nature. These methods are based on analyzing dispersive properties of Rayleigh and Love waves. In surface wave methods a correct identification of the modes is essential to avoid serious errors in building near surface shear wave velocity model. Here we consider the case of higher-mode misidentification known as "osculation" where the energy peak shifts at low frequencies from the fundamental to the first higher mode. This jump occurs around a well-defined frequency where the two modes get very close to each other. This problem is known to take place in complex subsurface situations, for example in inversely dispersive sites or in presence of a strong impedance contrast, such as a soil layer resting on top of the bedrock. This phenomenon can cause a misleading interpretation of dispersion curve by the operator, which is completely hazardous for engineering projects.

In this paper we investigated mode osculation phenomenon for both MASW and MALW methods using synthetic and real datasets. We showed that MALW has a far better performance facing this problem, while it is a main drawback for the MASW method. Generally, when we encounter a low-velocity layer in the subsurface, the identification of Rayleigh wave's fundamental mode (MASW method) becomes almost impossible, while at the same time dispersion modes of Love waves (MALW method) are well separated, even in extreme conditions. In addition, we showed that performing single-station microtremor ellipticity analysis can also be quite useful. It can warn against the presence of a strong impedance contrast, it indicates the critical frequency at which mode osculation takes place, and also the HVSr data can be used as a constraint in the inversion process of surface wave data. So performing HVSr method alongside MASW and MALW methods not only can predict mode osculation frequency and strong impedance contrasts presence, but also can help us with joint-inversion of the surface wave data, resulting in a more solid Vs profile. We evaluated the performances of the proposed methods on real and synthetic seismic data and results were satisfying.

Keywords: MASW, MALW, Shear wave velocity profile, HVSr, Joint-inversion.

* Corresponding author:

hamid@ut.ac.ir