JRAG
نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی
دوره ۶، شماره ۲، ۱۳۹۹، صفحات ۲۱۹-۲۳۳
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/JRAG.2020.9005.1267

ارزیابی مؤلفه‌های امواج سطحی جهت شناسایی حفره‌های زیرسطحی با استفاده از مدل‌سازی‌های دو و سه‌بعدی به روش اجزا محدود

سهراب میراثی[1]، حسین رهنما[2]* و عطیه اسحاقی[3]

۱- استادیار، گروه عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران
۲- استادیار، گروه عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران
۳- استادیار، شبکه شتابنگاری کشور، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، وزارت راه و شهرسازی، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۱۳

* نویسنده مسئول مکاتبات: **rahnema@sutech.ac.ir**

چکیده

شناسایی ناهنجاری‌های زیرسطحی همچون حفره، فروچاله و تونل به خاطر احتمال بروز نشست‌ها و فروریزش‌های احتمالی همواره مورد توجه مهندسان ژئوتکنیک و ژئوفیزیک بوده است. بهره‌گیری از روش‌های جدیدی همچون روش‌های امواج سطحی می‌تواند برای شناسایی این ناهنجاری‌ها گام مناسبی تلقی شود. نظر به این که اغلب مطالعات و تحلیل‌های انجام شده با در نظر گرفتن مولفه قائم امواج رایلی انجام شده و با توجه به این که ناهنجاری‌های زیرسطحی تأثیرات متفاوتی بر روی مؤلفه‌های مختلف امواج سطحی دارند؛ لذا در این مقاله به ارزیابی مولفه‌های قائم و شعاعی امواج رایلی و مولفه امواج لاو به منظور شناسایی حفره توخالی و توپر در محیط‌های خاکی نیم فضای همگن و لایه‌بندی شده پرداخته شده است. در این خصوص، با اعمال بار لرزه‌ای در جهت افقی و قائم به ترتیب مؤلفه امواج لاو و مؤلفه‌های قائم و شعاعی امواج رایلی ایجاد و برداشت شده است. انتشار امواج رایلی و لاو با استفاده از تحلیل چند ایستگاهی امواج سطحی و همچنین شبیه‌سازی‌ها با بهره‌گیری از روش اجزا محدود در نرم‌افزار آباکوس انجام پذیرفته است. تاثیر حفرات زیرسطحی بر مولفه‌های امواج سطحی با ارزیابی تغییرات بیضوی شکل ذرات امواج رایلی، نسبت مولفه‌ها و همچنین دامنه‌های حداکثر نرمال شده در گیرنده‌ها انجام شده است. نتایج مدل‌سازی‌های دوبعدی نشان دادند که شکل بیضوی حرکت ذرات امواج رایلی در اثر وجود ناهنجاری زیرسطحی دچار به‌هم‌ریختگی و تغییرشکل می‌شوند و این تأثیر به نحو قابل‌ملاحظه‌ای در دامنه‌های حداکثر نرمال شده و نسبت مؤلفه‌های شعاعی و قائم امواج رایلی مشاهده شده است. در ادامه نتایج مدل‌سازی‌های سه‌بعدی نشان دادند که امواج لاو نیز همانند امواج رایلی با دقت و وضوح مناسبی می‌توانند در شناسایی حفره‌های زیرسطحی مورد استفاده قرار گیرند. در مجموع می‌توان این‌گونه بیان نمود که شناسایی حفره‌های زیرسطحی با ارزیابی شکل بیضوی حرکت ذرات، دامنه‌های حداکثر نرمال شده و نسبت مؤلفه‌های امواج رایلی و لاو امکان‌پذیر است.

واژگان کلیدی

امواج سطحی
حرکت ذرات بیضوی شکل امواج رایلی
امواج لاو
دامنه مؤلفه‌های شعاعی و قائم امواج رایلی
حفره
روش اجزا محدود

۱- مقدمه

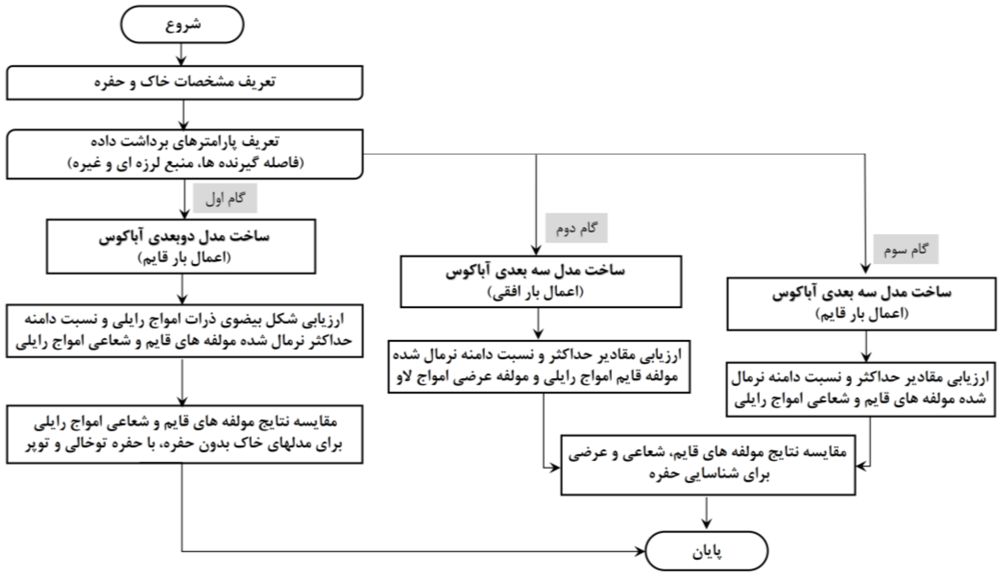
وجود ناهنجاری‌های زیرسطحی همانند حفره، فروچاله، لایه‌های ضعیف زیرسطحی، گسل، تونل که به صورت طبیعی و مصنوعی ایجاد شده‌اند، می‌توانند سبب بروز خطرات جدی گردند. در این میان پدیده فروچاله به دلیل گسترش روزافزون در دشت‌ها و مناطق شهری و همچنین بروز آسیب‌های فراوان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به عنوان نمونه می‌توان به فروچاله‌های دشت سورمق به قطر ۵۰ و عمق ۱۶ متر، دشت صفاشهر با عرض ۵۰ متر و عمق ۲۰ متر، دشت کبودرآهنگ همدان و دشت فسا با عرض ۲۰ متر و عمق نزدیک به ۱۰۰ متر اشاره نمود (Rahnema and Mirassi, 2012, 2016). با توجه به خطرات و مشکلات متعددی که ناهنجاری‌های زیرسطحی می‌توانند برای انسان‌ها ایجاد نمایند، شناسایی موقعیت این ناهنجاری‌ها امری ضروری است. شناسایی هر چه دقیق‌تر این پدیده می‌تواند در کنترل و جلوگیری از خطرات احتمالی آنها نقش مؤثری ایفا نماید. نظر به توسعه و قابلیت روش‌های جدید لرزه‌ای در زمینه ژئوتکنیک، می‌توان از این روش‌ها متناسب با دقت و سرعت بالای آنها استفاده نمود (Park et al., 1999; Coduto, 2015). در این راستا، روش‌های ژئوفیزیکی مختلفی (Liang and Liu, 2009; Dravinski and Michael, 2011) همچون انکسار امواج طولی (Engelsfeld et al., 2008; Sloan et al., 2013; Imposa et al., 2018)، گرانی سنجی (Hajian et al., 2012; McKenna et al., 2016)، ژئوالکتریک (Zhu et al., 2011) برای شناسایی حفره‌های زیرسطحی بکار گرفته شده است.

برخورد و اثر متقابل امواج لرزه‌ای با حفره‌ها در موارد بسیاری قابل شناسایی است و اجازه می‌دهد که نتایج را از تحلیل‌های متفاوت به صورت مطمئن بدست آورد (Miller etal., 2010). بر اساس مقایسه‌های اولیه صورت گرفته توسط امین‌نژاد و بوت روش‌های امواج رایلی بیشترین پتانسیل تعیین ناهنجاری‌های زیرسطحی را دارند (Aminnedjad and Butt, 2003). از آنجا که بیشتر ناهنجاری‌ها در اعماق نزدیک سطح زمین رخ می‌دهند؛ محدوده عمق مورد بررسی امواج سطحی بین ۳۰ تا ۴۰ متر یک محدودیت مهم نیست. حفرات موجب پخش انرژی امواج سطحی در فرکانس‌های مختلف می‌شوند؛ که سبب می‌شود طول موج‌ها به عمق هدف برگردانده شوند (Ivanov et al., 2003). به همین ترتیب امواج طولی نیز در برخورد با حفره و در یک فاصله خاص منبع تا گیرنده در محدوده متفاوت سرعت، انکسار پیدا می‌کنند (Sloan et al., 2015). یکی از روش‌های استفاده شده برای شناسایی حفرات و فروچاله‌ها روش انکسار است؛ که دقت بالای داده‌های آن تأثیر زیادی بر نتایج خواهد داشت (Ivanov et al., 2003).

در خصوص شناسایی حفره‌های زیرسطحی محققان مختلف از روش‌های متفاوتی استفاده نموده‌اند. به عنوان نمونه، ناصری مقدم و همکاران روشی بر اساس تحلیل کاهیدگی امواج رایلی در تعیین عمق و موقعیت حفره‌های زیرسطحی ارائه نمودند و با استفاده از روش تفاضل محدود و آزمایش‌های میدانی نشان دادند که میزان قابل توجهی از انرژی در حفره و فضای اطراف آن متمرکز می‌گردد. این میزان از انرژی محبوس شده به اندازه، عمق مدفون و محتوای فرکانسی بار لرزه‌ای اعمال‌شده بستگی دارد (Nasseri-Moghaddam et al., 2005, 2007). Xia et al (2007) روشی را با توجه به شکست امواج رایلی برای مشخص نمودن عمق حفرات پیشنهاد دادند. آنها با ارائه معادله حرکت امواج رایلی نشان دادند که صرفاً با مشخص کردن دو نقطه از روی مسیر امواج برگشتی در فضای میدان موج می‌توان به راحتی عمق مدفون حفره و سرعت موج رایلی لایه مربوطه را بدست آورد. Chai et al (2014, 2012) تأثیر منبع و عمق حفره را بر روی میدان موج با شبیه‌سازی عددی بررسی نمودند. Shi (2015) تأثیر انتشار امواج سطحی بر روی قطعه لوله‌های مدفون برای محاسبه جابجایی در اتصالات بتنی لوله‌های استوانه‌ای مورد ارزیابی قرار داد. Shao et al (2016) با استفاده از S-transform به تعیین حفرات زیرسطحی پرداختند؛ که روابط زمان انتقال موج رایلی از فاصله بین مرز حفره و گیرنده را به فاصله بین ضربه و گیرنده تغییر دادند. در این راستا از فیلتر کردن داده‌ها در میدان فرکانس-عددموج نیز استفاده شده است. آنها نشان دادند دقت نتایج شناسایی مرز حفره‌ها با افزایش عمق حفره کاهش یافته‌اند. Sloan et al (2013) از سه روش شکست امواج طولی، برگشت امواج رایلی و انکسار سرعت حرکتی برای شناسایی عمق حفره و موقعیت جانبی حفره استفاده کردند. ایشان مثال‌های متعددی از شناسایی حفره با شکست امواج طولی و برگشت امواج سطحی برای شناسایی تونل‌ها در آمریکا ارائه دادند.

بر اساس تحقیقات انجام شده مشاهده می‌شود محققان مختلف با بهره‌گیری از روش‌های متعددی به شناسایی حفره‌ها و ناهنجاری‌های زیرسطحی پرداخته‌اند و به نحوی توانسته‌اند موقعیت این ناهنجاری‌ها را تعیین نمایند. هر چند این روش‌ها دارای نقاط قوت و ضعف‌هایی هستند، که غالباً برای برخی شرایط خاص بررسی شده‌اند و نتایج حاصله دقت و کیفیت مناسب را دارا نمی‌باشند و این امر باعث شده هنوز بحث شناسایی حفره‌های زیرسطحی به خصوص در اعماق بیشتر و شرایط پیچیده‌تر به صورت موضعی چالش برانگیز باقی بماند. پس می‌توان این گونه اظهار داشت که استفاده ترکیبی از روش‌های متفاوت و در نظر گرفتن مولفه‌های مختلف امواج سطحی برای شناسایی بهتر ناهنجاری‌های زیرسطحی می‌تواند بسیار مفید و مؤثر واقع شود. حال آن که در اغلب مطالعات انجام‌شده از مؤلفه قائم امواج سطحی برای تجزیه و تحلیل نتایج استفاده شده است؛ که با اعمال بار قائم در آزمایش میدانی و شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری داده‌های لرزه‌ای برداشت شده است. در این مقاله سعی شده به ارزیابی دیگر مولفه‌های امواج رایلی و لاو به منظور شناسایی حفره‌های زیرسطحی پرداخته شود و با اعمال بارهای لرزه‌ای در جهت قائم و افقی، مؤلفه‌های قائم و شعاعی امواج رایلی و مولفه امواج لاو مورد ارزیابی و مقایسه قرار داده شود. به بیان دیگر اهداف این مقاله، ارزیابی توانایی مولفه امواج لاو و مولفه شعاعی امواج رایلی در کنار مولفه قائم امواج رایلی به منظور شناسایی حفره‌های توخالی و توپر زیرسطحی

می‌باشد. به علاوه این که این سه مولفه به صورت ترکیبی تا چه میزان می‌تواند در شناسایی دقیق‌تر و بهتر حفره‌های زیرسطحی مؤثر واقع شود. در این مقاله، ابتدا نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار آباکوس و کدهای متلب مورد صحت-سنجی قرارگرفته است. سپس با ایجاد مدل‌های دوبعدی و اعمال بار لرزه‌ای قائم، مولفه‌های قائم و شعاعی امواج رایلی برای شناسایی حفره زیرسطحی مورد نمایش و ارزیابی واقع شده است. این ارزیابی‌ها برای محیط خاکی نیم‌فضای همگن و لایه‌بندی شده در دو بخش مجزا از طریق نمایش تصاویر بیضوی شکل حرکت امواج رایلی و دامنه حداکثر نرمال شده مؤلفه شعاعی و قائم امواج رایلی ارائه شده است. در ادامه با ایجاد مدل سه‌بعدی و اعمال بار لرزه‌ای افقی، مولفه امواج لاو ایجاد شده است و تغییرات دامنه حداکثر نرمال شده و نسبت مولفه‌های امواج لاو با امواج رایلی مورد مقایسه قرار گرفته است. لازم به ذکر است تمام مدل‌سازی‌های دو و سه‌بعدی برای محیط خاکی نیم‌فضا و لایه‌بندی شده با در نظر گرفتن شرایط بدون حفره، با حفره توخالی و توپر انجام شده است. مراحل انجام تحقیق به صورت فلوچارت در شکل ۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از صحت‌سنجی و تعریف مشخصات خاک و حفره و همچنین تعیین چیدمان مناسب برداشت داده‌ها، مدل‌ها و تحلیل‌ها در سه روند متفاوت انجام شده است؛ که در روند اول، نتایج مدل‌سازی دوبعدی با ارزیابی مولفه افقی و قائم امواج رایلی صورت پذیرفته و در روند دوم و سوم به ترتیب با مدل‌سازی سه‌بعدی به ارزیابی مولفه امواج لاو و مولفه‌های امواج رایلی پرداخته شده است و در نهایت هم نتایج مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.



شکل ۱: فلوچارت مراحل انجام تحقیق در این مقاله

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش اجزا محدود و مرزهای جاذب

روش اجزای محدود (FEM[1]) به عنوان یک روش موفقیت‌آمیز در مسائل انتشار امواج استفاده شده است (Castaings et al., 2004; Hesse and Cawley, 2006; Luo and Rose, 2007). مرزهای اجزای نامحدود در شبیه‌سازی اجزای محدود برای بارهای ضربه‌ای سبب برگشت امواج به داخل محیط می‌شود (Drozdz, 2008). بنابراین مرزهای اجزای نامحدود برای مدل‌سازی‌های دو و سه‌بعدی در آزمایش‌های امواج سطحی و بخصوص در این مقاله مناسب نیستند. از سوی دیگر، مرزهای جاذب تحت عناوین لایه‌های جاذب با افزایش دمپینگ (ALID[2]) و لایه تطابق کامل (PML[3]) به نحو قابل ملاحظه‌ای اندازه محاسباتی و هندسی مدل عددی را کاهش می‌دهند (Rajagopal et al., 2012; Davoodi et al., 2018). در این مقاله، از لایه‌های جاذب افزایش دمپینگ (الید) با در نظر گرفتن ۲۰ لایه الید به خاطر راحتی و فراهم بودن نحوه اعمال میرایی رایلی، استفاده شده است (Lin and Ashlock, 2014).

۲-۲- مدل رفتاری

در این مقاله، روش اجزای محدود برای شبیه‌سازی انتشار امواج در محیط‌های الاستیک خطی استفاده شده است. نظر به این که سطح کرنش متناسب با آزمایش‌های ژئوفیزیکی تقریباً خیلی کوچک می‌باشد (Atkinson et al., 2000; Chai et al., 2012). در آزمایش‌های لرزه‌ای همچون تحلیل چند ایستگاهی امواج سطحی، کرنش‌های الاستیک ایجاد

1 Finite-difference modeling
2 Absorbing Layers using Increasing Damping
3 Perfectly Matched Layer

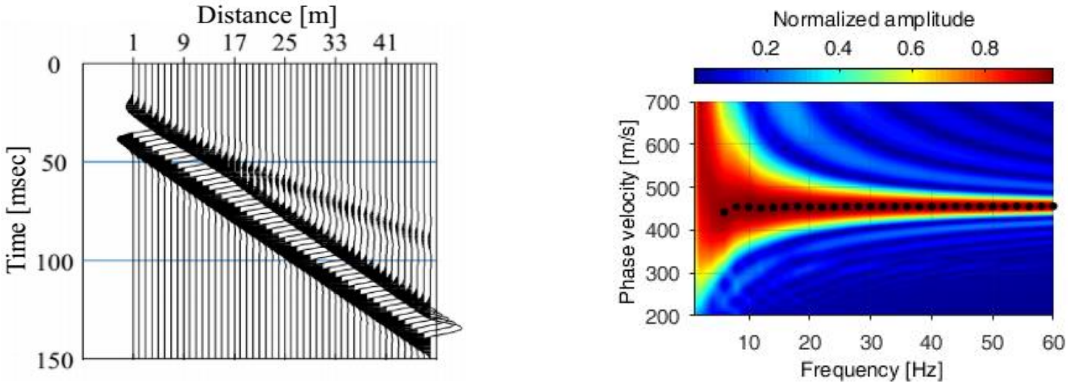
شده کوچک‌تر از ۰٫۰۰۱٪ می‌باشد. بنابراین می‌توان در مدل‌سازی‌ها از محیط الاستیک خطی استفاده نمود. مشخصات محیط الاستیک خطی شامل مدول الاستیک، نسبت پواسون، جرم مخصوص و میرایی مصالح می‌باشند؛ که در ادامه در جداول مشخصات خاک‌ها ارائه شده است (Nasseri-Moghaddam et al., 2007).

۳-۲- مدل‌سازی

تمام مدل‌سازی‌ها با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس نسخه ۶/۱۴ صورت پذیرفته است. مدل‌سازی‌ها به صورت دو و سه بعدی برای محیط خاکی نیم‌فضا و لایه‌بندی انجام شده است. حفره توخالی و توپر به شعاع ۲/۵ متر در وسط آرایه چیدمان گیرنده‌ها قرار داده شده است. طول آرایه گیرنده ۴۸ متر و فاصله بین گیرنده‌ها ۱ متر در نظر گرفته شده است. فاصله محل اعمال بار تا اولین گیرنده (افست) یک متر در نظر گرفته شده است. بار لرزه‌ای مورد استفاده بار ریکر با فرکانس مرکزی ۵۰ هرتز می‌باشد. میرایی اعمال‌شده به لایه‌های خاک به‌صورت میرایی رایلی در نظر گرفته شده است. نرخ داده برداری ۰/۰۰۰۵ ثانیه و مدت زمان برداشت داده‌ها ۰/۴ ثانیه لحاظ شده است (Abbasi Karafshani et al., 2016) مشخصات خاک و حفره در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

۴-۲- صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی خروجی نرم‌افزار آباکوس و کدهای نوشته شده در برنامه متلب، از مدل خاکی نیم فضا (تک لایه) با سرعت موج برشی ۵۰۰ متر بر ثانیه و سرعت موج طولی ۸۶۶ متر بر ثانیه استفاده شده است. با توجه به این که $V_R \approx 0.92$ و $V_S = 460$ می‌باشد؛ انتظار می‌رود برای خاک تک لایه منحنی پراکنش امواج رایلی با همین سرعت (۴۶۰) بدست بیاید (Chai et al., 2012). مطابق منحنی و طیف پراکنش امواج رایلی در شکل ۲-الف سرعت ۴۶۰ متر بر ثانیه بدست‌آمده است؛ که نشان از صحت مدل‌سازی‌ها و خروجی کدهای متلب دارد. در میدان موج نمایش داده شده در شکل ۲-ب امواج رایلی با دامنه بزرگتر و سرعت کمتر در قسمت پایین و امواج طولی مستقیم با سرعت بیشتر و دامنه ضعیف‌تر در بالای امواج رایلی قابل مشاهده هستند.

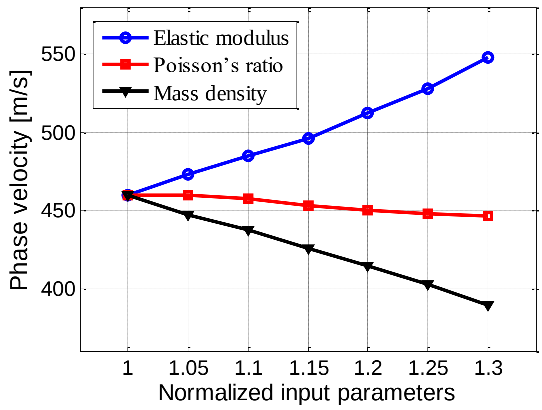


(ب) (الف)

شکل ۲: نتایج مدل خاک تک لایه: (الف) منحنی پراکندگی امواج رایلی؛ (ب) فضای میدان موج (فاصله–زمان)

۵-۲- آنالیز حساسیت

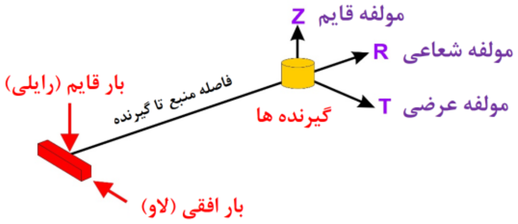
آنالیز حساسیت به منظور ارزیابی پاسخ مدل‌های مورد بررسی به تغییرات پارامترهای مختلف و تعیین مؤثرترین پارامتر موجود در مدل می‌باشد. در این بخش، تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر تغییرات منحنی‌های پراکنش سرعت امواج رایلی با استفاده از آنالیز حساسیت مورد ارزیابی قرار داده شده است. آنالیز حساسیت نسبت به سه پارامتر ورودی به نرم‌افزار یعنی مدول الاستیک خاک، وزن مخصوص و نسبت پواسون انجام شده است. برای این منظور با ثابت نگه‌داشتن دامنه توزیع تمام پارامترها در مدل اولیه، دامنه توزیع یکی از پارامترهای ورودی به اندازه یک انحراف استاندارد همان پارامتر افزایش داده شده و میزان تغییرات تابع هدف (سرعت موج رایلی در منحنی پراکنش امواج) اندازه‌گیری شده است. نتایج بدست‌آمده در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارامترهای ورودی در هر گام به میزان ۵ درصد افزایش داده شده‌اند و به تناسب تغییرات ایجاد شده بر روی سرعت موج رایلی نمایش داده شده است. بازه تغییرات مدول الاستیک از ۱۳۷۵ تا ۱۹۱۵ مگاپاسکال نسبت پواسون از ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ و وزن مخصوص از ۲۲۰۰ تا ۳۰۶۳ کیلوگرم بر مترمکعب هر کدام با گام افزایشی ۵ درصد در نظر گرفته شدند. نتایج حاصله نشان دهنده این نکته است که مدول الاستیک حساس‌ترین پارامتر می‌باشد و پارامترهای وزن مخصوص و نسبت پواسون از حساسیت کمتری برخوردارند.



شکل ۳: نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی مدل‌های خاکی

۳- بحث و نتایج

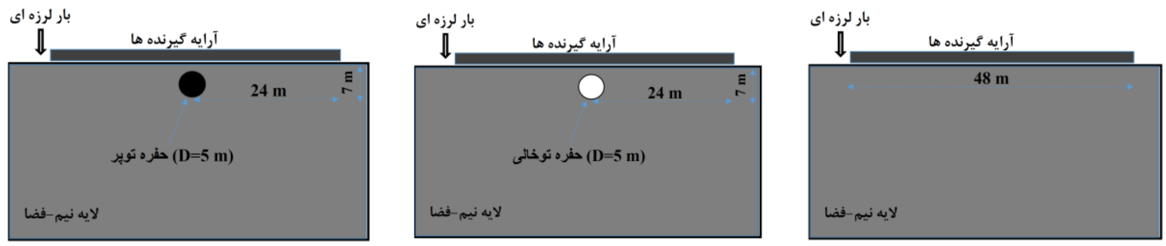
در این بخش، شبیه‌سازی دو و سه‌بعدی محیط خاکی تک لایه (نیم‌فضا) و لایه‌بندی شده بدون حفره، با حفره توخالی و توپر مورد ارزیابی قرار گرفته است. در قسمت اول و دوم وضعیت حرکت ذرات بیضوی شکل امواج رایلی، نسبت و دامنه حداکثر نرمال شده مؤلفه قائم و شعاعی امواج رایلی مورد بررسی قرار داده شده است. در قسمت سوم با مدل‌سازی سه‌بعدی و اعمال بار لرزه‌ای افقی و قائم، نسبت و دامنه حداکثر نرمال شده مؤلفه‌های امواج رایلی و لاو مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. به منظور درک بهتر نتایج، از مدل‌های خاکی بدون حفره برای مقایسه با مدل‌های خاکی حفره‌دار استفاده شده است. لازم به ذکر است بارهای لرزه‌ای به‌صورت قائم (*VF*) و افقی (*HF*) به منظور تولید امواج رایلی و لاو در سطح زمین اعمال و نام‌گذاری می‌شوند و مولفه‌های برداشت شده شامل مولفه قائم (در جهت قائم: *V*)، شعاعی (در جهت امتداد آرایه گیرنده‌ها: *R*) و عرضی (در جهت عمود بر آرایه گیرنده و در راستای بار لرزه‌ای افقی: *T*) می‌باشند (شکل ۴).



شکل ۴: مشخصات نام‌گذاری بار لرزه‌ای قائم (VF) و افقی (VF) و همچنین مولفه‌های قائم (V)، شعاعی (R) و عرضی (T) ثبت شده بوسیله گیرنده‌ها

۳-۱- ارزیابی مؤلفه‌های امواج رایلی در محیط خاکی نیم‌فضای همگن در مدل‌های دوبعدی

در این قسمت مدل‌های خاک تک لایه بدون حفره، با حفره توخالی و توپر جهت مقایسه و ارزیابی تأثیر حفره زیرسطحی بر حرکت ذرات بیضوی شکل و دامنه حداکثر مؤلفه‌های امواج رایلی در نظر گرفته‌شده است. خاک تک لایه بدون حفره، با حفره توخالی و توپر مدل‌سازی شده با روش اجزا محدود در شکل ۵ نشان داده‌شده است. همچنین مشخصات خاک و حفره توخالی و توپر در جدول ۱ نمایش داده‌شده است. شعاع حفره ۲/۵ متر و حفره در مرکز ارائه گیرنده‌ها قرار داده شده است. عمق مرکزی حفره یعنی فاصله سطح زمین تا مرکز حفره ۳/۵ متر در نظر گرفته شده است. بار لرزه‌ای مورد استفاده بار ریکر با فرکانس مرکزی ۵۰ هرتز می‌باشد؛ که به صورت قائم و در سمت چپ آرایه گیرنده‌ها در سطح زمین اعمال شده است (Meijer, 2014; Schmelzbach et al., 2015). از ۴۹ گیرنده با طول آرایه ۴۸ متر جهت برداشت داده‌های امواج رایلی در جهت قائم (مولفه قائم) و جهت افقی (مولفه شعاعی) استفاده شده است. موقعیت حفره زیرسطحی در وسط آرایه گیرنده‌ها قرار گرفته است. نرخ داده‌برداری گیرنده‌ها ۰/۰۰۰۵ ثانیه و مدت‌زمان برداشت داده‌ها ۰/۴ ثانیه لحاظ شده است.



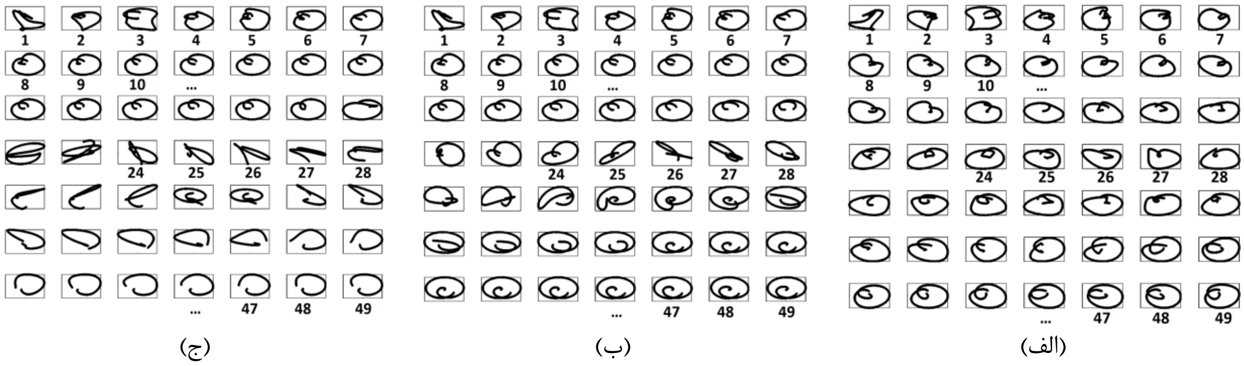
(ج) (ب) (الف)

شکل ۵: سه نمونه مدل خاکی با محیط نیم فضا (تک لایه) در اجزا محدود: الف) بدون حفره؛ ب) با حفره توخالی؛ ج) با حفره توپر

جدول ۱: مشخصات لایه خاک محیط نیم فضا، حفره و حفره توپر

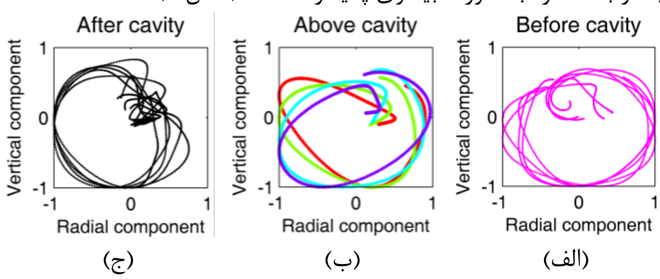
مصالح	سرعت موج برشی (m/s)	سرعت موج طولی (m/s)	مدول الاستیک (MPa)	وزن مخصوص (kg/m^3)	نسبت پواسون	ضرایب میرایی رایلی (α,β)
لایه نیم فضا	500	866	1375	2200	0.25	0.83, 0.000085
حفره توخالی	17	340	0.0086	10	0.498	3.2, 0.0009
حفره توپر	3000	5080	1.45E+7	2400	0.338	0.23, 0.000031

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، از تعداد ۴۹ گیرنده به طول ۴۸ متر برای ثبت داده‌ها در سطح زمین استفاده شده است. در شکل ۶ حرکت ذرات بیضوی شکل امواج رایلی برای هر گیرنده نمایش داده شده است. شماره‌های مندرج نمایانگر شماره گیرنده می‌باشد، که به ترتیب گیرنده شماره ۱ و ۴۹ به ترتیب نزدیک‌ترین و دورترین گیرنده از محل اعمال بار لرزه‌ای می‌باشند و گیرنده شماره ۲۵ بالای حفره زیرسطحی قرار دارد. در تصاویر شکل ۶-الف چون خاک بدون حفره بوده، بیضی‌های امواج رایلی که نشان دهنده دامنه مؤلفه شعاعی در مقابل دامنه مؤلفه قائم امواج رایلی می‌باشند؛ به صورت معمول و فاقد آشفتگی می‌باشند و تغییر شکل بیضوی‌های مربوط به گیرنده‌های اولیه به خاطر تأثیر حوزه نزدیک اعمال بار لرزه‌ای می‌باشد. در شکل ۶-ب و ۶-ج تغییر شکل بیضوی‌های ذرات امواج رایلی در اطراف گیرنده‌های شماره ۲۵ نمایانگر تأثیر و وجود حفرات توخالی و توپر می‌باشد.



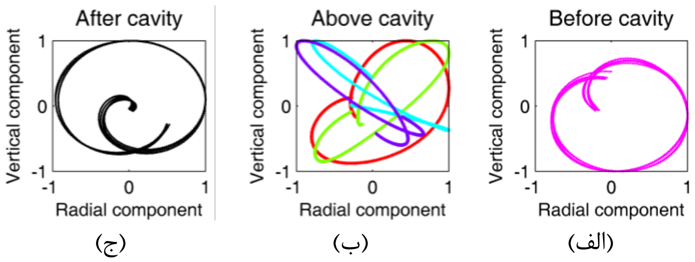
شکل ۶: بیضوی‌های حرکت ذرات امواج رایلی (محور افقی: مؤلفه شعاعی امواج رایلی و محور قائم: مؤلفه قائم امواج رایلی) در ۴۹ گیرنده مستقر در سطح زمین برای: الف) محیط خاکی نیم فضا بدون حفره، ب) محیط خاکی نیم فضا با حفره توخالی، ج) محیط خاکی نیم فضا با حفره توپر

از داده‌های ثبت شده در چند گیرنده مستقر در سه ناحیه مختلف به منظور نمایش بهتر تغییر شکل بیضوی‌های حرکت ذرات امواج رایلی استفاده شده است (شکل ۷). به بیان‌دیگر از داده‌های برداشت شده ۴ عدد گیرنده مستقر در سطح زمین که به ترتیب قبل (شکل ۷-الف)، بالا (شکل ۷-ب) و بعد از ناحیه وجود حفره (شکل ۷-ج) استفاده شده است. برای خاک نیم‌فضای بدون حفره همان‌طور که انتظار می‌رود، به دلیل عدم وجود حفره، شکل حرکت ذرات امواج رایلی برای هر سه ناحیه قبل، بالا و بعد حفره به صورت بیضوی پدیدار شده‌اند (شکل ۷).

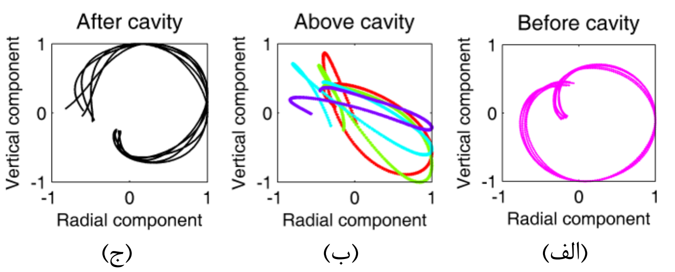


شکل ۷: بیضی‌های امواج رایلی برای محیط خاکی نیم فضا بدون حفره در موقعیت قبل، بعد و بالای حفره زیرسطحی

برای مدل‌های خاکی با حفره توخالی (شکل ۸) و توپر (شکل ۹) تأثیر وجود حفره زیرسطحی بر تغییر شکل و آشفتگی بیضوی‌های امواج رایلی (ناحیه بالای حفره) به وضوح در شکل‌های ۸-ب و ۹-ب قابل شناسایی است.



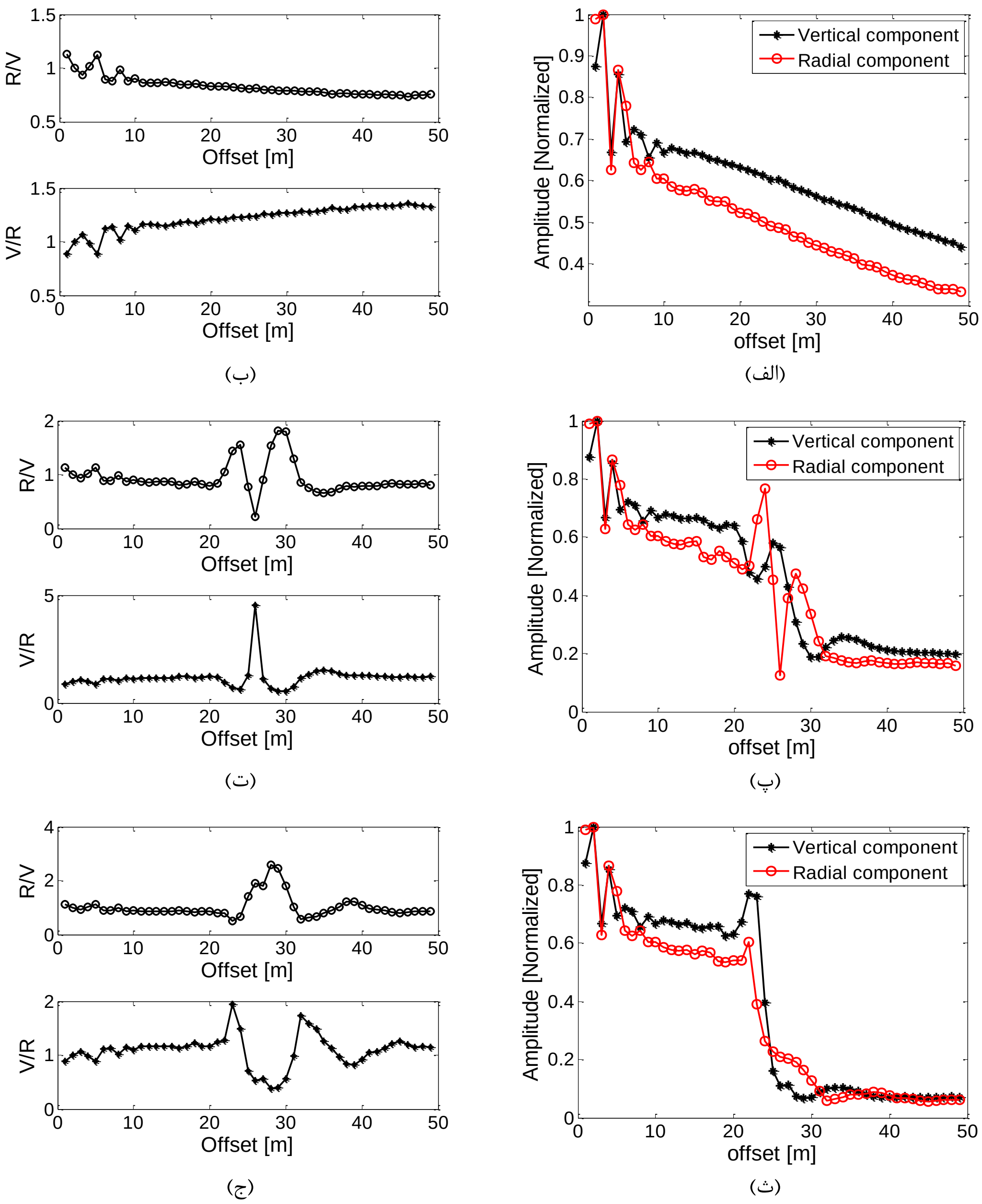
شکل ۸: بیضی‌های امواج رایلی برای محیط خاکی نیم فضا با حفره توخالی در موقعیت قبل، بعد و بالای حفره زیرسطحی



شکل ۹: بیضی‌های امواج رایلی برای محیط خاکی نیم فضا با حفره توپر در موقعیت قبل، بعد و بالای حفره زیرسطحی

در شکل ۱۰، مقایسه‌ای بین مؤلفه‌های قائم و شعاعی برداشت شده و

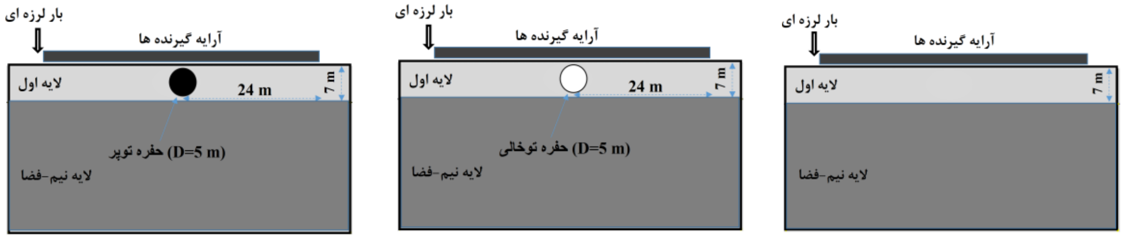
همچنین نسبت مؤلفه شعاعی به قائم (R/V) و بالعکس (V/R) صورت پذیرفته است از نتایج مدل بدون حفره برای درک بهتر تغییرات استفاده شده است (شکل ۱۰). دامنه‌های حداکثر نرمال شده مؤلفه شعاعی و قائم امواج رایلی ثبت شده مربوط به مدل تک لایه بدون حفره در شکل ۱۰-الف و نسبت مؤلفه این مؤلفه‌ها در شکل ۱۰-ب نمایش داده شده است؛ که هیچ‌گونه تغییر خاصی مشاهده نمی‌شود. به علاوه این که تغییری در نمودارهای نسبت مؤلفه‌های قائم و شعاعی امواج رایلی پدیدار نشده است (شکل ۱۰-ب). در سطر دوم شکل ۱۰ نتایج مربوط به خاک تک لایه با حفره توخالی ارائه شده است؛ که به وضوح تأثیر وجود حفره بر دامنه حداکثر و نسبت مؤلفه‌های امواج رایلی در فاصله حدود ۲۵ متر با تغییرات ناگهانی نمایان شده است (شکل ۱۰-پ و ۱۰-ت) این تأثیر با شدت و وضوح بیشتر در نتایج خاک تک لایه با حفره توپر نیز تکرار شده است (شکل ۱۰-ث و ۱۰-ج).



شکل ۱۰: مقایسه نتایج حداکثر دامنه جابجایی نرمال شده (ستون سمت راست) و نسبت مؤلفه شعاعی به قائم حداکثر جابجایی امواج رایلی ثبت شده در حوزه زمان (ستون سمت چپ): الف و ب) خاک تک لایه بدون حفره؛ پ و ت) خاک تک لایه با حفره توخالی؛ دولایه بدون حفره؛ ث و ج) خاک تک لایه با حفره توپر

۳-۲- ارزیابی مؤلفه‌های امواج رایلی در خاک لایه‌بندی شده در مدل‌های دوبعدی

در این قسمت، تأثیر وجود حفره توخالی و توپر بر دامنه مؤلفه‌های شعاعی و قائم امواج رایلی برای خاک لایه‌بندی شده مورد بررسی قرارگرفته است. مشخصات ابعاد مدل‌های خاکی لایه‌بندی شده بدون حفره، با حفره توخالی و توپر به ترتیب در شکل ۱۱-الف، ۱۱-ب و ۱۱-ج نشان داده شده است. همچنین مشخصات لایه‌های خاک، حفره توخالی و توپر در جدول ۲ نمایش داده شده است. شعاع حفره ۲/۵ متر و عمق مرکزی حفره یعنی فاصله سطح زمین تا مرکز حفره به میزان ۳/۵ متر در نظر گرفته شده است. بار لرزه‌ای مورد استفاده بار ریکر با فرکانس مرکزی ۵۰ هرتز می‌باشد (Mirassi and Rahnema, 2019).



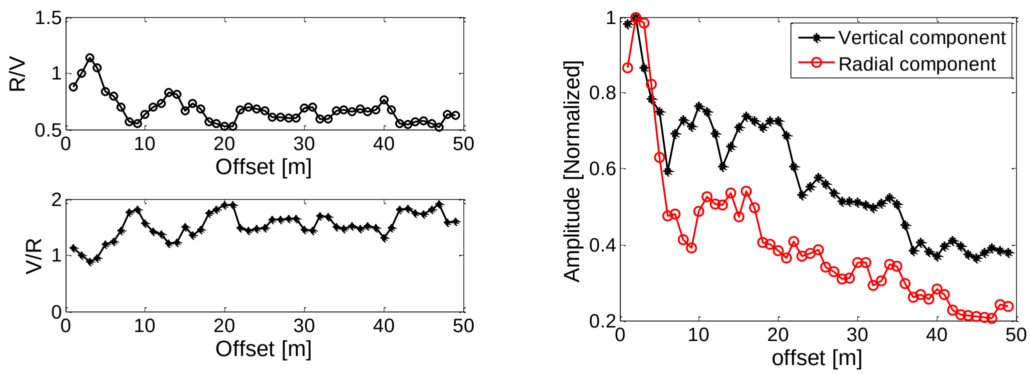
(ج) (ب) (الف)

شکل ۱۱: سه نمونه مدل خاکی با محیط نیم فضا (دولایه) در اجزا محدود: الف) بدون حفره؛ ب) با حفره توخالی؛ ج) با حفره توپر

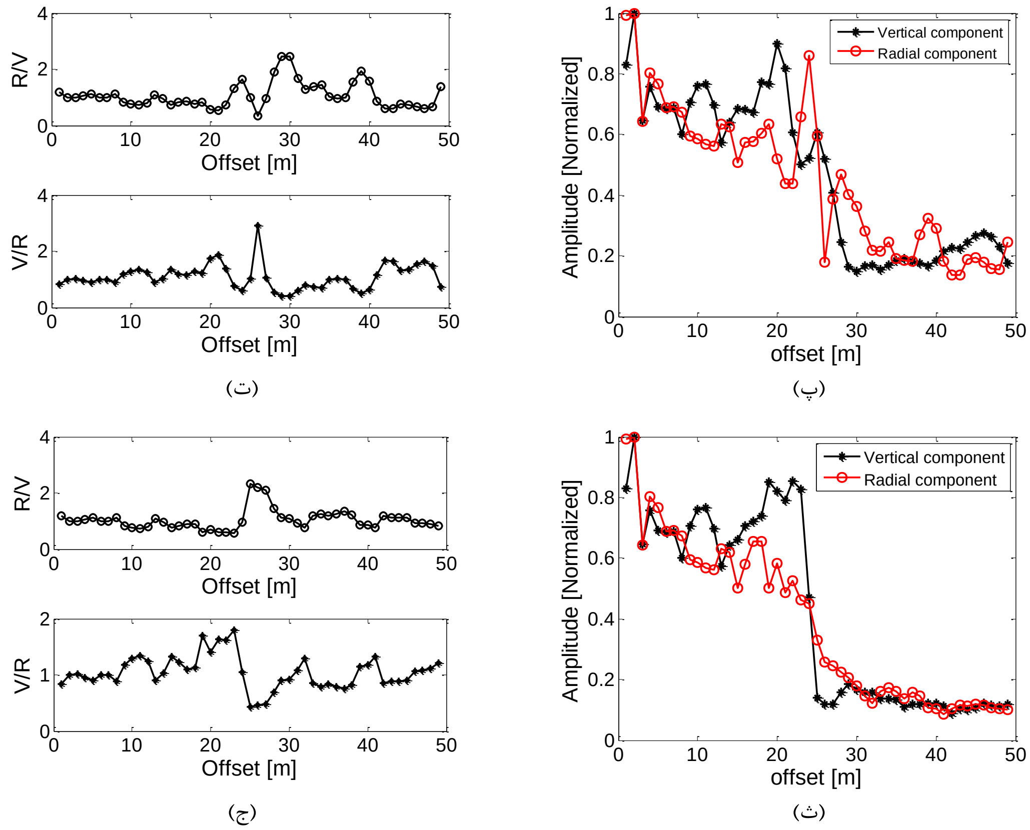
جدول ۲: مشخصات لایه خاک محیط نیم فضا، حفره توخالی و حفره توپر

مصالح	سرعت موج‌برشی (m/s)	سرعت موج طولی (m/s)	مدول الاستیک (MPa)	وزن مخصوص (kg/m^3)	نسبت پواسون	ضرایب میرایی رایلی (α, β)
لایه اول	200	400	192	1800	0.33	1.67, 0.00017
لایه نیم فضا	500	866	1375	2200	0.25	0.83, 0.000085
حفره توخالی	17	340	0.0086	10	0.498	3.2, 0.0009
حفره توپر	3000	5080	1.45E+7	2400	0.338	0.23, 0.000031

نتایج مدل‌های خاک دولایه بدون حفره، با حفره توخالی و توپر برای مقایسه در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. نتایج دامنه‌های حداکثر مؤلفه شعاعی و قائم ثبت شده مربوط به مدل دو لایه بدون حفره در شکل ۱۲-الف و نسبت مؤلفه این مؤلفه‌ها در شکل ۱۲-ب نمایش داده شده است؛ که هیچ‌گونه تغییر خاصی در آنها مشاهده نمی‌شود. در ادامه در سطر دوم شکل ۱۲ نتایج مربوط به خاک دو لایه با حفره توخالی ارائه شده است؛ که به وضوح تأثیر وجود حفره در فاصله حدود ۲۵ متر در شکل ۱۲-پ و ۱۲-ت نمایان است و این روند در نتایج خاک دو لایه با حفره توپر نیز تکرار شده است (شکل ۱۲-ث و ۱۲-ج).



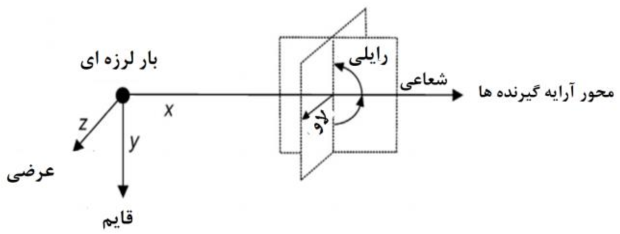
(ب) (الف)



شکل ۱۲: **مقایسه نتایج حداکثر دامنه جابجایی نرمال شده (ستون سمت چپ) و نسبت مؤلفه شعاعی به قائم حداکثر جابجایی امواج رایلی ثبت شده در حوزه زمان (ستون سمت راست): الف و ب) خاک دو لایه بدون حفره؛ ج و د) خاک دو لایه با حفره توخالی؛ دو لایه بدون حفره؛ ه و و) خاک دو لایه با حفره توپر**

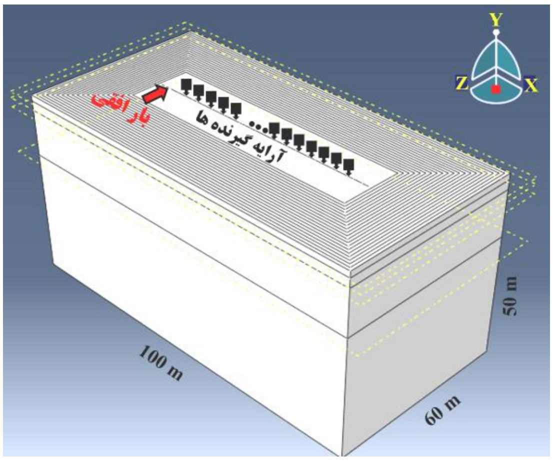
۳-۳- ارزیابی مؤلفه امواج لاو در اثر اعمال بار افقی در مدل‌های سه بعدی

در این قسمت، با انجام مدل‌سازی سه‌بعدی به بررسی و ارزیابی مولفه امواج لاو جهت شناسایی حفره زیرسطحی پرداخته‌شده است. حفره دایره‌ای به شعاع ۲/۵ متر و عمق مرکزی ۳/۵ متر از سطح زمین در نظر گرفته شده است. برای تولید امواج لاو در مدل‌سازی‌ها، بار لرزه‌ای ریکر به‌صورت افقی در راستای محور z اعمال‌شده است (شکل ۱۳). در این خصوص با اعمال بار لرزه‌ای ریکر با فرکانس مرکزی ۵۰ هرتز به‌صورت افقی (عمود بر صفحه کاغذ، راستای محور z)، مؤلفه‌های قائم و شعاعی نیز در صفحه x و y و مؤلفه امواج لاو در راستای محور z برداشت‌شده است (شکل ۱۳). مطابق شکل ۱۳ امواج لاو دارای مؤلفه عرضی در جهت z و مولفه‌های دیگر در جهت قائم و شعاعی در صفحه x و y هستند. به‌عبارت‌دیگر مولفه‌های برداشت گیرنده‌ها تحت عنوان مولفه قائم (در جهت قائم)، شعاعی (در جهت امتداد آرایه گیرنده‌ها) و عرضی (در جهت محور z و عمود بر امتداد آرایه گیرنده‌ها) نام‌گذاری می‌شوند؛ که تحت تاثیر بار لرزه ای در جهت افقی ایجاد شده‌اند.



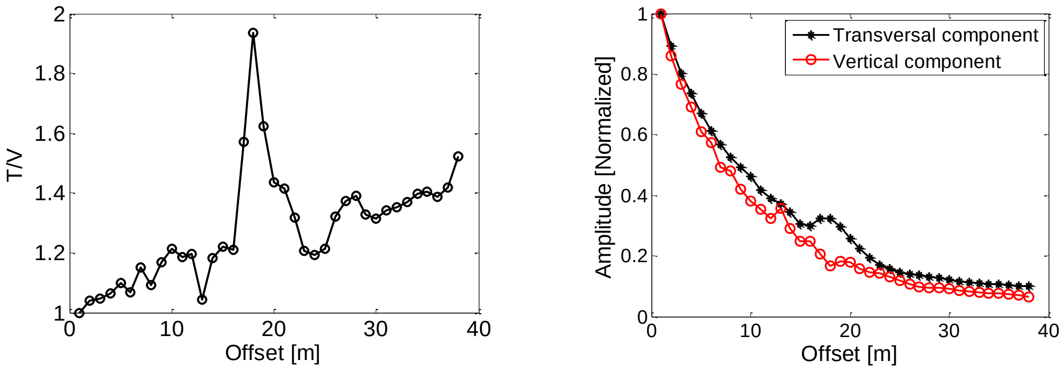
شکل ۱۳: **جهت‌های حرکت مؤلفه‌های امواج رایلی و لاو**

در شکل ۱۴ نمای سه‌بعدی مدل‌های خاکی مورد بررسی و راستای اعمال بار لرزه‌ای نمایش داده شده است. در شکل ۱۴ بار لرزه‌ای ریکر در جهت افقی (در جهت محور z) اعمال شده است و مؤلفه برداشت‌شده در این جهت (مولفه عرضی) توسط گیرنده به عنوان امواج لاو شناخته می‌شود. لازم به ذکر است گیرنده‌های سه مولفه‌ای برای برداشت داده‌ها در سه راستا استفاده شده است. از ۳۸ گیرنده با طول آرایه ۳۷ متر برای برداشت داده‌های امواج در جهت قائم (مولفه قائم) و جهت افقی (مولفه شعاعی). جهت عرضی (مولفه امواج لاو) استفاده شده است (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: نمای مدل سه‌بعدی با اعمال بار لرزه‌ای در جهت افقی (HF)

ارزیابی نسبت و دامنه حداکثر نرمال شده مؤلفه امواج لاو (*Transversal*) برداشت شده از شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی در اثر اعمال بار افقی در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. در شکل ۱۵ مولفه عرضی امواج لاو با مولفه قائم ایجاد شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. موقعیت حفره زیرسطحی متناسب با تغییرات ناگهانی در دامنه‌های مولفه عرضی امواج لاو و مولفه قائم کاملاً مشهود است (شکل ۱۵-الف). حال آن که تأثیر حفره زیرسطحی بر تغییرات نسبت مؤلفه‌های عرضی و قائم (*T/V* و *V/T*) به نحو مناسب‌تر به صورت یک تغییر چشم‌گیر به راحتی قابل شناسایی است (شکل ۱۵-ب).



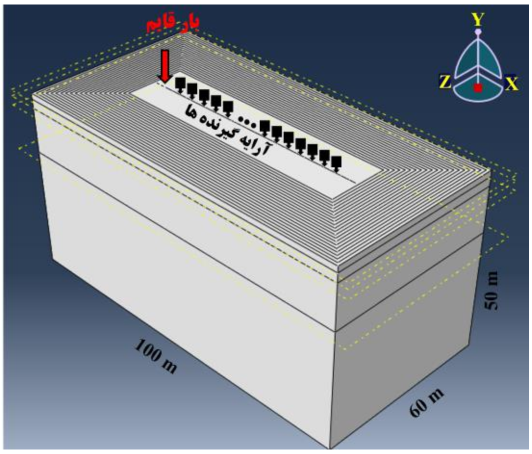
(الف) (ب)

شکل ۱۵: نتایج مقایسه دامنه حداکثر نرمال شده مؤلفه قائم امواج رایلی و مؤلفه عرضی امواج لاو: الف) مقایسه دامنه حداکثر نرمال شده؛ ب) نسبت مؤلفه‌های قائم امواج رایلی و مؤلفه امواج لاو

۳-۴- ارزیابی مولفه امواج رایلی در اثر اعمال بار قائم در مدل‌های سه بعدی

در این قسمت به ارزیابی و مقایسه توانایی امواج رایلی و لاو برای شناسایی حفره زیرسطحی به شعاع ۲/۵ متر و به عمق مرکزی ۳/۵ متر از سطح زمین پرداخته شده است. به این منظور مشابه مدل قسمت قبل و فقط با تغییر جهت بار لرزه‌ای اعمالی به صورت قائم، مولفه‌های امواج رایلی برداشت شده است، که این مولفه‌ها شامل مولفه قائم و شعاعی می‌باشند (شکل ۱۶).

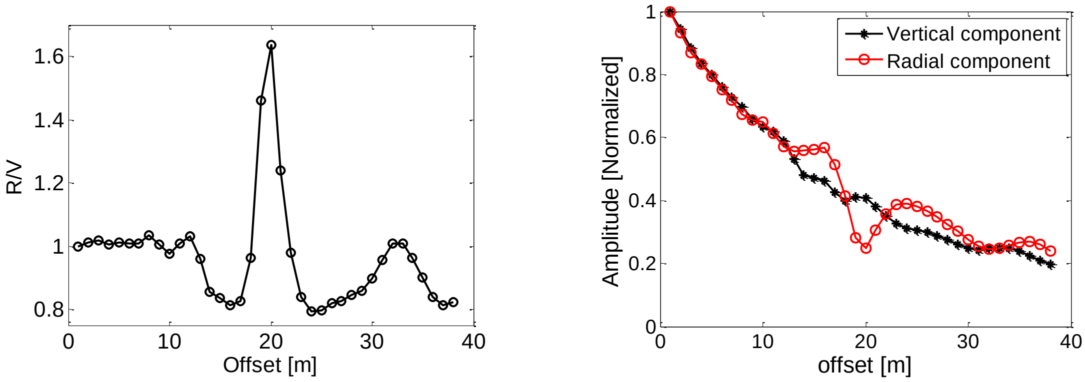
در شکل ۱۷ نتایج بدست آمده در شبیه‌سازی سه بعدی در اثر اعمال بار قائم نشان داده شده است. تغییرات منحنی‌های دامنه حداکثر نرمال شده مؤلفه امواج رایلی برداشت شده در شکل ۱۷-الف نمایش داده شده است؛ که تاثیر حفره زیرسطحی بر مولفه قائم امواج رایلی و به خصوص بر مولفه شعاعی امواج رایلی به وضوح قابل تشخیص است. همچنین تأثیر و موقعیت حفره زیرسطحی در نمودار نسبت مؤلفه شعاعی به قائم امواج رایلی (*R/V*) به وضوح قابل رؤیت است و می‌توان اظهار داشت که با دقت بهتری می‌توان موقعیت و تاثیر حفره زیرسطحی را با نسبت دامنه مولفه‌های امواج رایلی تعیین نمود (شکل ۱۷-ب). لازم به ذکر است که تغییرات دامنه مؤلفه شعاعی در اثر وجود حفره زیرسطحی دارای شدت و اندازه بیشتری نسبت به مؤلفه قائم امواج رایلی می‌باشد.



شکل ۱۶: نمای مدل سه‌بعدی با اعمال بار لرزه‌ای در جهت قائم (VF)

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارزیابی مؤلفه‌های امواج رایلی و لاو جهت شناسایی حفره‌های زیرسطحی در محیط خاکی نیم فضای همگن و لایه‌بندی شده با استفاده از روش اجزا محدود پرداخته‌شده است. نتایج مدل‌سازی‌های دوبعدی نشان دادند که بیضوی‌های حرکت ذرات امواج رایلی در نواحی بالای حفره توخالی و توپر دچار تغییرشکل و آشفتگی می‌شوند؛ درحالی‌که در نواحی قبل و بعد از حفره، شکل بیضوی حرکت ذرات امواج رایلی حفظ شده است.



(ب) (الف)

شکل ۱۷: نتایج مقایسه دامنه حداکثر نرمال شده مؤلفه قائم و شعاعی امواج رایلی: الف) مقایسه دامنه حداکثر نرمال شده؛ ب) نسبت مؤلفه‌های قائم و شعاعی امواج رایلی ثبت شده

در این خصوص میزان دامنه حداکثر نرمال شده مؤلفه‌های قائم و شعاعی امواج رایلی در تمام گیرنده مشخص و موقعیت حفره زیرسطحی با توجه به تغییرات ناگهانی در دامنه مؤلفه‌ها شناسایی گردید در ادامه نیز با ترسیم نمودارهای نسبت مؤلفه‌های شعاعی و قائم، به نحو مناسب‌تری و با وضوح بیشتری تأثیر حفره و موقعیت آنها تعیین گردیده است. به‌منظور ارزیابی تاثیر مؤلفه عرضی امواج لاو و مولفه شعاعی امواج رایلی از مدل‌سازی‌های سه‌بعدی با اعمال بار لرزه‌ای افقی و قائم استفاده شده است که نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند مؤلفه امواج لاو و مولفه شعاعی امواج رایلی نیز می تواند در شناسایی حفره زیرسطحی موثر باشند. حال آن که نمودارهای مقایسه‌ای مربوط به نسبت مؤلفه‌های لاو و شعاعی به مولفه قائم دارای وضوح و دقت بیشتری می‌باشند. بنابراین می‌توان بر اساس نمودارهای دامنه‌های حداکثر نرمال شده و نسبت آنها اظهار داشت که در نظر گرفتن مؤلفه امواج لاو و مولفه امواج شعاعی در کنار مولفه امواج قائم به نحو مناسبی می‌تواند در شناسایی ناهنجاری‌های زیرسطحی مفید و مؤثر باشند. در مجموع می‌توان با بهره‌گیری از هر سه مؤلفه امواج رایلی و لاو، حرکت ذرات بیضوی شکل امواج رایلی، نسبت و دامنه حداکثر امواج رایلی در فضای دامنه-فاصله با دقت و وضوح قابل قبولی ناهنجاری‌های زیرسطحی را در شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری و آزمایش‌های میدانی شناسایی نمود. در آزمایش‌های میدانی با در نظر گرفتن ژئوفون‌های سه مولفه ای و اعمال ضربه چکش به صورت قائم و افقی بدون تغییر دیگر پارامترهای چیدمان برداشت، می‌توان داده‌های هر سه مولفه امواج سطحی را به راحتی برداشت و تحلیل‌های مربوطه را انجام داد.

فهرست علائم و اختصارات

VF (Vertical Force)	بار لرزه ای قائم
HF (Horizontal Force)	بار لرزه ای افقی
V (Vertical Component)	مولفه قائم امواج رایلی
R (Radial Component)	مولفه شعاعی امواج رایلی
T (Transversal Component)	مولفه امواج لاو (مولفه عرضی)
V_R	سرعت موج رایلی
V_S	سرعت موج برشی
α	ضریب میرایی جرم رایلی
β	ضریب میرایی سختی رایلی

۵- منابع

Abbasi Karafshani, S., Ardakani, and A. Yakhchalian, M., 2016, Comparison between the Effects of Near- and Far-Fault Ground Motions on the Seismic Response of a Soil-Pile-Structure System, Journal of Structural and Construction Engineering, 2 (4), pp. 117-130.

Aminnedjad, B., & Butt, S. D., 2003, Imaging Abandoned Underground Mines and Assessing Geotechnical Hazards Research Project, Phase 1 Final Report–Assessment of State of the Art for Nondestructive Geophysical Imaging Technology, unpublished report.

Ivanov, J., Miller, R. D., Park, C. B., & Ryden, N. 2003, Seismic search for underground anomalies, In: SEG Technical Program Expanded Abstracts 2003, 1223-1226, Society of Exploration Geophysicists.

Liang, J. and Liu, Z., 2009, Diffraction of plane SV waves by a cavity in poroelastic half-space, Earthquake engineering and engineering vibration, 8 (1): 29-46.

Lin, S., & Ashlock, J. C., 2014, Multimode Rayleigh wave profiling by hybrid surface and borehole methods. Geophysical Journal International, 197 (2), 1184-1195.

Lin, S., & Ashlock, J. C., 2016, Surface-wave testing of soil sites using multichannel simulation with one-receiver, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 87, 82-92.

Luo, W., & Rose, J. L., 2007, Phased array focusing with guided waves in a viscoelastic coated hollow cylinder, The Journal of the Acoustical Society of America, 121 (4), 1945-1955.

McKenna, J.R., Rim, H., and Li, Y., 2016, Feasibility and Limitations of Void Detection Using Gravity Gradiometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54: 881-891.

Meijer, W.Y., 2014, Numerical modeling for seismic exploration with karstic subsurface structures, Master of Science Thesis, 2014, Delft University of Technology, ETH Zurich, RWTH Aachen University.

Miller, R. D., Ivanov, J., Xia, J., Peterie, S. L., & Sloan, S. L., 2010, Seismic investigations of subsidence hazards. In SEG Technical Program Expanded Abstracts, 3769-3773, Society of Exploration Geophysicists.

Mirassi, S. and Rahnema, H., 2019, Effect of frequency content of seismic source load on Rayleigh and P waves in soil media with cavity, Journal of Structural and Construction Engineering, (Articles in Press): doi:10.22065/jsce.2019.176403.1808

Nasseri-Moghaddam, A., Cascante, G., & Hutchinson, J., 2005, A new quantitative procedure to determine the location and embedment depth of a void using surface waves, Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 10 (1), 51-64.

Nasseri-Moghaddam, A., Cascante, G., Phillips, C., & Hutchinson, D. J., 2007, Effects of underground cavities on Rayleigh waves—Field and numerical experiments, Soil dynamics and earthquake engineering, 27 (4), 300-313.

Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface waves, Geophysics, 64 (3), 800-808.

Rahnema, H., & Mirasi, S., 2012, Seismic and geotechnical study of land subsidence and vulnerability of rural

Atkinson, J. Hf., 2000, Non-linear soil stiffness in routine design, Gèotechnique, 50 (5), 487–508.

Castaings, M., Bacon, C., Hosten, B. and Predoi, M. V., 2004, Finite element predictions for the dynamic response of thermo-viscoelastic material structures, The Journal of the Acoustical Society of America, 115 (3), 1125-1133.

Chai, H. Y., Goh, S. H., Phoon, K. K., Wei, C. F. and Zhang, D. J., 2014, Effects of source and cavity depths on wave fields in layered media, Journal of Applied Geophysics, 107, 163-170.

Chai, H. Y., Phoon, K. K., Goh, S. H. and Wei, C. F., 2012, Some theoretical and numerical observations on scattering of Rayleigh waves in media containing shallow rectangular cavities, Journal of Applied Geophysics, 83, 107-119.

Coduto, D. P., 2015, Foundation design: principles and practices, Pearson. (Second edition), Prentice Hall, Inc.

Davoodi, M., Pourdeilami, A., Jahankhah, H. and Jafari, M. K., 2018, Application of perfectly matched layer to soil-foundation interaction analysis, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 10 (4), 753-768.

Dravinski, M. and Michael, C. Y., 2011, Peak surface motion due to scattering of plane harmonic P, SV, or Rayleigh waves by a rough cavity embedded in an elastic half-space, Journal of seismology, 15 (1): 131-145.

Drozdz, M. B., 2008, Efficient finite element modelling of ultrasound waves in elastic media (Doctoral dissertation, Imperial College London), Imperial College London.

Engelsfeld, T., Šumanovac, F. and Pavin, N., 2008, Investigation of underground cavities in a two-layer model using the refraction seismic method, Near Surface Geophysics, 6 (4): 221-231.

Hajian, A., Zomorrodian, H. and Styles, P., 2012, Simultaneous estimation of shape factor and depth of subsurface cavities from residual gravity anomalies using feed-forward back-propagation neural networks, Acta Geophysica, 60 (4): 1043-1075.

Hesse, D. and Cawley, P., 2006, Surface wave modes in rails, The Journal of the Acoustical Society of America, 120 (2), 733-740.

Imposa, S., Grassi, S., Di Raimondo, S., Patti, G., Lombardo, G. and Panzera, F., 2018, Seismic refraction tomography surveys as a method for voids detection: an application to the archaeological park of Cava Ispica, Sicily, Italy, International Journal of Architectural Heritage, 12 (5): 806-815.

Shirzad Shahrivar, M. and Gholi Zadeh, A., 2017, Numerical investigation of soil and buried structures using finite element analysis, Journal of Structural and Construction Engineering, 3 (4): 97-104. doi:10.22065/jsce.2016.41241.

Sloan, S. D., Nolan, J. J., Broadfoot, S. W., McKenna, J. R. and Metheny, O. M., 2013, Using near-surface seismic refraction tomography and multichannel analysis of surface waves to detect shallow tunnels: A feasibility study, Journal of Applied Geophysics, 99: 60–65, doi:10.1016/j.jappgeo.2013.10.004.

Sloan, S. D., Peterie, S. L., Miller, R. D., Ivanov, J., Schwenk, J. T., & McKenna, J. R., 2015, Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques, Geophysics, 80 (5), EN127-EN135.

Xia, J., Nyquist, J. E., Xu, Y., Roth, M. J., & Miller, R. D., 2007, Feasibility of detecting near-surface feature with Rayleigh-wave diffraction, Journal of Applied Geophysics, 62 (3), 244-253.

Zhu, J., Currens, J.C. and Dinger, J. S., 2011, Challenges of using electrical resistivity method to locate karst conduits-A field case in the Inner Bluegrass Region, Kentucky, Journal of Applied Geophysics, 75: 523-530.

buildings, International Journal of Geosciences, 3 (04), 878.

Rahnema, H., & Mirassi, S., 2016, Study of land subsidence around the city of Shiraz, Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering, 23 (3), 882.

Rajagopal, P., Drozdz, M., Skelton, E. A., Lowe, M. J., & Craster, R. V., 2012, On the use of absorbing layers to simulate the propagation of elastic waves in unbounded isotropic media using commercially available finite element packages. NDT & E International, 51, 30-40.

Schmelzbach, C., Jordi, C., Sollberger, D., Doetsch, J., Kaufmann, M., Meijer, W.Y., Manukyan, E., Robertsson, J., Maurer, H., Greenhalgh, S. and Horstmeyer, H., 2015, Understanding the impact of karst on seismic wave propagation-a multi-method geophysical study, in 77th EAGE Conference and Exhibition-Workshops.

Shao, G. Z., Tsoflias, G. P., And Li, C. J., 2016, Detection of near-surface cavities by generalized S-transform of Rayleigh waves, Journal of Applied Geophysics, 129, 53-65.

Shi, P., 2015, Surface wave propagation effects on buried segmented pipelines, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 7 (4), 440-451.

JOURNAL OF RESEARCH ON APPLIED GEOPHYSICS

Shahrood University of Technology

(JRAG)
2020, VOL 6, NO 2
(DOI): 10.22044/JRAG.2020.9005.1267

Evaluation of surface wave components for identification of subsurface cavities using 2D and 3D finite element modeling method

Sohrab Mirassi[1], Hossein Rahnema[2]* and Attieh Eshaghi[3]

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Iranian Strong Motion Network, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Received: 8 October 2015; Accepted: 01 April 2020

Corresponding author: Rahnema@sutech.ac.ir

Keywords

Surface waves
Rayleigh and Love waves
Diffracted waves
Elliptic shape of R-wave
Particles motions
Vertical and radial components
Cavity

Extended Abstract

Summary

Identifying the subsurface anomalies has always been of interest to the geotechnical and geological engineers especially when there is the potential risk of collapse and settlement. These anomalies have various effects on different components of the surface waves. Therefore, in this paper, the effects of empty and solid cavities on the components of Rayleigh (R) and Love (L) waves are investigated in homogeneous and layered soil media. In this regard, the vertical and radial components of the Rayleigh and Love waves are compared by applying vertical and horizontal loads. Moreover, the elliptical shape of R-wave is evaluated for different models without cavity, with cavity and intrusion (i.e. filled cavity). All 2D and 3D models are simulated using finite element method (FEM) in the Abaqus software. Furthermore, the potential ability of different components of the surface waves for cavity detection is compared by considering the resolution of the diffracted waves and their amplitudes in the wave-field domain. The results show that the elliptical shape of particles motions, maximum normalized amplitude and the ratio of different components of R and L waves are influenced by the subsurface cavities.

Introduction

Subsurface cavities cause serious damages to crop lands, residential buildings, roads and other structures as well as environmental, economic and social losses (Rahnema and Mirassi, 2012, 2016). Thus, detection of sinkholes and cavities are really important for many engineering projects. In this regard, different geophysical methods have been employed for detecting cavities, including P-wave seismic refraction (Engelsfeld et al., 2008; Sloan et al., 2013; Imposa et al., 2018), gravimetry (McKenna et al., 2016) and resistivity (Zhu et al., 2011). Several researchers published their obtained results on cavity detection using seismic surface waves (e.g. Nasseri-Moghaddam et al., 2005; Xia et al., 2007, 2012). Shao et al. (2016) investigated near-surface cavity detection by generalized S-transform of R waves based on small modification to the travel time equation for R-wave diffraction of the study made by Xia et al. (2007). Chai et al. (2013, 2014) studied the influence of the source and void depth on the wave-field in half-space and layered media by numerical simulation. Attenuation analyses of R wave have demonstrated satisfactory results in identifying shallow subsurface voids (Nasseri-Moghaddam et al., 2005). In addition, numerical studies (Gelis et al., 2005; Wang et al., 2014; Hei et al., 2016) have verified the feasibility of detecting near-surface voids using seismic waves.

Methodology and Approaches

The main contribution of this paper is to apply the FEM method to identify cavities in soil media by analyzing the particles motions and different components of R and L waves. The circular cavities are modeled in different materials of the empty cavity (cavity) and filled cavity (intrusion) in the half-space and layered soil media. Surface waves propagation is analyzed according to multi-channel analysis of surface waves (MASW) method. All 2D and 3D models are simulated using the FEM in the Abaqus (6.14) software. In this research, the authors try to evaluate and compare the different components of surface waves by applying seismic loads in vertical and horizontal directions. In this regard, first, the obtained results from the simulations using Abaqus software and MATLAB code are verified, and then, the results of 2D and 3D modeling of soil media without cavity, with cavity and intrusion are evaluated. Hence, the comparison of radial, vertical and transversal components of surface waves are conducted based on the maximum normalized amplitude of each trace recorded by receivers. Furthermore, the elliptical shapes of R waves are evaluated in different location of receivers, which are located before, above and after the buried cavity.

Results and Conclusions

The results of 2D and 3D models show that some local changes in the maximum normalized amplitude and the ratio of different components of R waves are related to the presence of cavity and intrusion. The ratio of different components of R and L waves represents the significant change due to the effects of cavity and intrusion. Moreover, the deformation of the elliptical shape of R waves represents the location of the cavity and intrusion. The comparison results of applying vertical and horizontal seismic source loads show the significant effect of the subsurface cavity on the radial component of R and L waves. In general, elliptical shape of particles motions, the maximum normalized amplitude of each trace, and the ratio of different components of R waves are found to be helpful in detecting cavities using synthetic data.