

بهبود عملکرد لایه های جاذب با میرایی افزایشی در مدل سازی عددی انتشار امواج سطحی

به روش اجزا محدود

سهراب میرائی^۱، حسین رهنما^{۲*}

پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۲۲

دریافت مقاله: ۹۸/۰۳/۲۷

چکیده

برنامه های اجزا محدود (FE) به طور فزاینده ای برای شبیه سازی انتشار امواج الاستیک و مسائل پراکنندگی بخصوص در روش های امواج سطحی استفاده می گردد. مشکل رایج هنگام استفاده از چنین روش هایی، بحث حذف بازتاب های ناخواسته از مرزهای مدل است که هنوز موضوعی چالش برانگیز می باشد. در این مقاله، به منظور به حداقل رساندن امواج بازتابی از مرزها و افزایش رزولوشن نتایج به ارزیابی پارامترهای مؤثر در جهت بهبود عملکرد روش لایه های جاذب میرایی افزایشی تحت عنوان الید (ALID) پرداخته شده است در این خصوص، پس از شناسایی مشخصات و نوع الید مناسب در نرم افزار آباکوس، تأثیر تعداد و ضخامت لایه های الید در خاک های مختلف با سرعت های موج برشی ۲۰۰، ۸۰۰ و ۲۰۰۰ متر بر ثانیه بر میزان میرایی دامنه امواج دریافتی در مرزها بررسی شده است. نتایج نشان دادند که در نظر گرفتن الید با لایه های افزایش تدریجی میرایی در مقایسه با میرایی ثابت و دو برابر شونده به نحو چشمگیری از بازتاب امواج به داخل محیط جلوگیری می کند و خاک سخت نیاز به لایه های الید بیشتر و خاک سست به خاطر میرایی بیشتر نیاز به لایه های الید کمتر دارد. همچنان که افزایش تعداد لایه های الید مؤثرتر از افزایش ضخامت آن ها می باشد.

کلید واژه ها: مرز جاذب، بازتاب امواج، میرایی، ALID، اجزا محدود.

۱. عضو هیات علمی، گروه عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران s.mirasi@sutech.ac.ir

۲. استادیار گروه عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران rahnema@sutech.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

دقت و رزولوشن نتایج در تحلیل‌های عددی و شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری انتشار امواج الاستیک متأثر از پارامترهای مختلفی است. برخی از این پارامترها شامل فاصله گیرنده‌ها، طول آرایه گیرنده‌ها، فاصله منبع لرزه‌ای تا اولین گیرنده (افست)، اندازه المان و مشخصات مرزهای جاذب می‌باشند (Ólafsdóttir, 2016). نحوه انتخاب و اعمال مرزهای جاذب مناسب جهت جلوگیری از برگشت امواج به داخل محیط بخصوص در روش‌های امواج سطحی همچون تحلیل چندگانه امواج سطحی (Multi-channel analysis of surface waves) از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار می‌باشد. روش چندایستگاهی امواج سطحی بر اساس پروفیل سرعت موج برشی یا طیف دامنه به دست آمده کاربردهای موفقیت‌آمیزی در مسائل مختلفی همچون ارزیابی ضخامت و وضعیت روسازی (Ryden et al., 2004)، پروفیل سرعت موج برشی (Joshi and Bhardwaj, 2018)، ناهنجاری‌های جانبی (Jokar et al., 2019; Mirassi et al., 2019) و شناسایی اجسام زیرسطحی (Bashir et al., 2018; Allo et al., 2019) داشته است.

تاکنون روش‌های عددی مختلفی برای شبیه‌سازی انتشار امواج الاستیک در اجسام ارائه شده است که به عنوان نمونه می‌توان به روش‌های تفاضل محدود (Moczo et al., 2002)، اجزا محدود (Semblat and Pecker, 2009)، اجزا مرزی (Bonnet, 1999) و اجزا طیفی (Komatitsch et al., 1999) اشاره کرد. نظر به مزایا و معایب هر کدام از روش‌های فوق که موجب بازتاب امواج ناخواسته از مرزهای ساختگی به داخل محیط می‌شوند از تکنیک‌های مختلفی همچون اجزا نامحدود، شرایط مرزهای جاذب، لایه‌های جاذب با افزایش میرایی (Absorbing Layers using Increasing Damping)، لایه تطابق کامل (Perfectly Matched Layer) و غیره جهت جذب و میرا نمودن امواج در مرزها استفاده شده است (Rajagopal et al., 2012; Davoodi et al., 2018).

در این مقاله، از روش اجزای محدود (Finite-difference modeling) به عنوان یک روش موفقیت‌آمیز در مسائل انتشار امواج استفاده شده است (Castaings et al., 2004; Luo and Rose, 2007; Hesse and Cawley, 2006). شبیه‌سازی اجزای محدود برای بارهای ضربه‌ای روی سطح آزاد سبب برگشت انرژی قابل توجهی از طرف مرزهای اجزای نامحدود می‌شود (Drozdz, 2008)؛ بنابراین مرزهای اجزای نامحدود برای مدل‌سازی‌های پیچیده انتشار امواج در آزمایش‌های امواج سطحی برای محیط دو و سه بعدی مناسب نیستند. از سوی دیگر، مرزهای جاذب تحت عناوین لایه‌های جاذب با افزایش میرایی (ALID) و لایه تطابق کامل (PML) به عنوان یک روش موفق (Berenger, 1994) به نحو قابل ملاحظه‌ای اندازه محاسباتی و هندسی مدل عددی را کاهش می‌دهند (Rajagopal et al., 2012; Davoodi et al., 2018). لین و اشلوک (Lin and Ashlock, 2014; Lin and Ashlock, 2016) جهت مدل‌سازی انتشار امواج سطحی از روش اجزا محدود بهره‌گیری نموده است و به منظور میرا کردن امواج در مرزهای مدل از مرزهای جاذب با میرایی دو برابر شونده استفاده کرده است که در مقایسه با دیگر مرزهای جاذب عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. الید (ALID) نوعی مرز جاذب است که دارای مشخصات مشابه محیط خاکی می‌باشد با این تفاوت که در هر لایه میزان ضرایب میرایی در هر لایه افزایش می‌یابد. این روش ساده برای جذب امواج رسیده به مرزها در ابتدا توسط ایزرایلی و اورزگ (Israeli and Orszag, 1981) بر اساس اعمال ضرایب میرایی رایلی معرفی گردید و اخیراً توسط دیگر محققان مورد استفاده قرار گرفته است (Drozdz et al., 2007; Mirassi and Rahnema, 2020; Liu and Jerry, 2003). در این روش افزایش ضرایب میرایی رایلی در لایه‌های الید باید به صورت ملایم و بر اساس میرایی محیط خاک در نظر گرفته شود به عبارت دیگر، مشخصات، تعداد و ضخامت الیدها (Olsson, 2012) پارامترهای تأثیرگذار بر روی اختلاف نسبی امپدانس اجزا در مرزهای جاذب هستند. با توجه به مطالب ذکر شده، در این مقاله از لایه‌های جاذب با افزایش میرایی (الید) به خاطر راحتی و فراهم بودن نحوه اعمال میرایی

(میرایی جرم و سختی) مصالح می باشند که در ادامه ارائه شده است.

۲-۲. ضرایب میرایی رایلی

به منظور اعمال میرایی به سیستم از ضرایب میرایی رایلی استفاده شده ماتریس میرایی به صورت رابطه زیر تعریف می گردد.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1)$$

که در آن به ترتیب $[C]$ ، $[M]$ و $[K]$ ماتریس میرایی، جرم و سختی، α و β ضرایب میرایی رایلی می باشند. همچنین برای تعیین نسبت میرایی مدل ξ از دو مد از آنالیز مودال استفاده شده است. با فرض نسبت میرایی مشابه (ξ) برای دو مد با فرکانس ω_m و ω_n ضرایب α و β مطابق روابط زیر محاسبه شده اند (Khazaei and Amiri, 2017):

$$\alpha = \xi \frac{2\omega_m\omega_n}{\omega_m + \omega_n} \quad (2)$$

$$\beta = \xi \frac{2}{\omega_m + \omega_n} \quad (3)$$

در روابط فوق ω_m و ω_n به صورت زیر مفروض هستند:

$$\omega_m = \omega_1$$

$$\omega_n = n\omega_1$$

که ω_1 فرکانس غالب لایه می باشد و میزان n تقریباً برابر است با ω_{1N} / ω_1 که ω_{1N} فرکانس غالب لرزه وارده می باشد (Miriano et al., 2016).

نسبت میرایی را می توان به لحاظ میرایی رایلی با استفاده از ضرایب آلفا (α) و بتا (β) این گونه بیان نمود:

$$\xi = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\beta} + \beta\omega \right) \quad (4)$$

بر اساس رابطه بین ضرایب میرایی آلفا و بتا، میرایی جرم (α) موجب تضعیف پاسخ در فرکانس های پایین می شود و

رایلی در نرم افزار آباکوس، استفاده شده است. در این خصوص، ضرایب میرایی رایلی متناسب با مشخصات خاک مورد بررسی پس از انجام تحلیل مودال در نرم افزار آباکوس تعیین و اعمال شدند. ضرایب میرایی در سه روش مختلف به صورت میرایی ثابت، دو برابر شونده و افزایش تدریجی در مرزهای مدل اعمال شدند و مناسب ترین چیدمان لایه های جاذب با مشخصات افزایش تدریجی میرایی جهت جلوگیری از بازتاب امواج به داخل محیط خاک ارائه گردیده است. در ادامه تأثیر تعداد و ضخامت لایه های جاذب با میرایی افزایشی در محیط های خاکی مختلف با سرعت های موج برشی ۲۰۰، ۸۰۰ و ۲۰۰۰ متر بر ثانیه مورد ارزیابی واقع شده است و تأثیر سختی خاک ها بر نحوه تعیین مشخصات، ضخامت و تعداد لایه های مرز جاذب بررسی شده است.

۲. مواد و روش ها

۲-۱. روش اجزا محدود

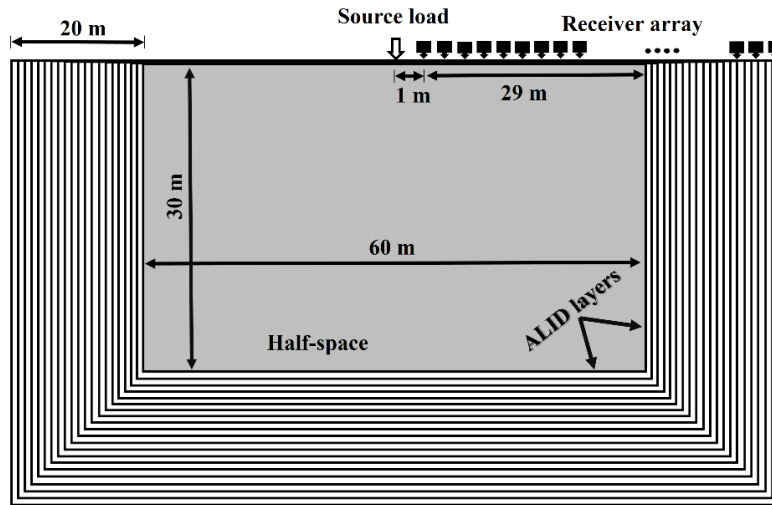
در این مقاله، روش اجزای محدود برای شبیه سازی انتشار امواج در محیط های الاستیک خطی استفاده شده است تمام مدل سازی ها با استفاده از روش اجزای محدود در نرم افزار آباکوس نسخه ۶،۱۴ صورت پذیرفته است (ABAQUS 6.14). نظر به اینکه سطح کرنش متناسب با آزمایش های ژئوفیزیکی تقریباً خیلی کوچک می باشد بنابراین به صورت گسترده پذیرفته شده که تئوری الاستیک خطی یک چهارچوب سازگار برای تفسیر تست های لرزه ای فراهم می نماید. باین وجود، پارامترهای کرنش-کوچک نقش قابل توجهی را برای محدوده وسیعی از مسائل ژئوتکنیک بازی می کند (Chai et al., 2012; Atkinson, 2000). در تست های لرزه ای همچون تحلیل چندایستگاهی امواج سطحی، کرنش های الاستیک ایجاد شده کوچک تر از ۰،۰۰۱٪ می باشد؛ پس می توان در مدل سازی ها از محیط الاستیک خطی استفاده نمود. مشخصات محیط الاستیک خطی در مدل سازی ها شامل مدول الاستیک، نسبت پواسون، جرم مخصوص و میرایی رایلی

شناسایی حدود نصف بزرگ‌ترین طول موج می‌باشد (Park and Carnevale, 2010; Rix and Leipski, 1991). در شکل ۱ مشخصات ابعادی، موقعیت لایه‌های مرزهای جاذب، بار لرزه‌ای و چیدمان گیرنده‌ها مربوط به مدل‌های شبیه‌سازی شده نمایش داده شده است. مدل‌های مورد استفاده شده در این مقاله به صورت خاک تک لایه (نیم فضا) در آباکوس با عمق ۴۰ و طول ۱۰۰ متر مدل‌سازی شده‌اند. فاصله بار لرزه‌ای تا گیرنده اول ۱ متر و تعداد گیرنده‌ها ۴۹ عدد (۴۸ متر طول آرایه گیرنده‌ها) می‌باشد. فاصله بین گیرنده ۱ متر در نظر گرفته شده است. تعداد ۲۹ عدد از گیرنده‌ها روی سطح آزاد محیط خاک و ۲۰ عدد از گیرنده روی لایه‌های الید قرار گرفته‌اند. بار لرزه‌ای ریکر با فرکانس مرکزی ۵۰ هرتز روی سطح خاک در مرکز مدل قرار داده شده است. مرز جاذب به صورت ۲۰ لایه الید ۱ متری با ضخامت کل ۲۰ متر در طرفین و کف مدل در نظر گرفته شده‌اند. در جدول ۱ مشخصات خاک مورد استفاده در مدل‌های مختلف جهت ارزیابی و مقایسه در قسمت‌های بعد این مقاله ارائه شده است. همچنان که قبلاً بیان شد ضرایب میرایی α و β می‌تواند بر اساس مدهای اول و دوم (Khazaei and Amiri, 2017) یا فرکانس غالب لایه و لرزه وارده (Miriano et al., 2016) از طریق انجام آنالیز مودال به دست بیاید. در این مقاله نسبت میرایی با توجه به سرعت موج برشی مدل‌های خاکی ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس در نظر گرفته شده است (جدول ۱). به صورت کلی می‌توان این‌گونه بیان نمود که ابتدا تمام مدل‌ها تحت آنالیز مودال قرار می‌گیرند و ضرایب میرایی رایلی مشخص می‌گردد و بعد بار لرزه‌ای به مدل اعمال و داده‌ها از طریق گیرنده‌ها برداشت می‌گردد.

در مقابل میرایی سختی (β) سبب تضعیف پاسخ در فرکانس‌های بالا می‌گردد (Connolly, 2013). نسبت میرایی بر اساس مشخصات خاک متفاوت می‌باشد ماسه‌ها معمولاً دارای نسبت میرایی کمتر از ۱٪ می‌باشند که کمتر از شن هستند. خاک‌های رسی دارای بیشترین نسبت میرایی با محدوده بین ۱٪ تا ۶٪ هستند (Asmussen, 2011b). همچنین این نسبت میرایی در تحقیقات تجربی دیگر برای خاک‌های آلی بین ۲/۵-۵/۵٪، رسی ۱-۶٪، ماسه‌ای ۲/۰-۱/۲٪ و برای خاک‌های شنی ۸/۰-۲/۶٪ در محدوده کرنش‌های کمتر از ۰/۰۰۱ ($< 10^{-5}$) در نظر گرفته شده است (Houbrechts et al., 2011).

۳-۲. مدل رفتاری

انتخاب مناسب ابعاد و مشخصات مدل و به تناسب چیدمان گیرنده‌های روی سطح زمین، بار لرزه‌ای و مرزهای جاذب جهت برداشت داده‌ها و دستیابی به نتایج قابل قبول از اهمیت بسزایی برخوردار هست. چیدمان برداشت داده‌ها در انجام تست‌های صحرایی و شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری شامل فاصله بین گیرنده‌ها، طول آرایه گیرنده‌ها و افست می‌باشند و در تحلیل‌های عددی و نرم‌افزاری اندازه المان و مرزهای جاذب نیز به موارد فوق اضافه می‌گردند (Mirassi and Rahnama, 2021). فاصله گیرنده‌ها و اندازه المان‌ها باید بر اساس کوچک‌ترین طول موج رایلی و کمترین ضخامت لایه سطحی انتخاب گردند به صورت کلی فاصله گیرنده‌ها نباید از نصف کوتاه‌ترین طول موج بیشتر گردد و کوتاه‌ترین طول موج حداقل با ۵ یا ۶ المان (فاصله گیرنده‌ها) برداشت شود (Foti et al., 2014; Xia et al., 2009; Olivier et al., 2015; Moczo et al., 2002). در مقابل طول آرایه گیرنده و افست ارتباط مستقیمی با حداکثر عمق شناسایی و بزرگ‌ترین طول موج رایلی دارند. به عنوان یک قانون سرانگشتی طول آرایه ژئوفن‌ها تقریباً برابر حداکثر عمق شناسایی باشد (Ólafsdóttir, 2016). مطابق یک معیار تجربی، حداکثر عمق



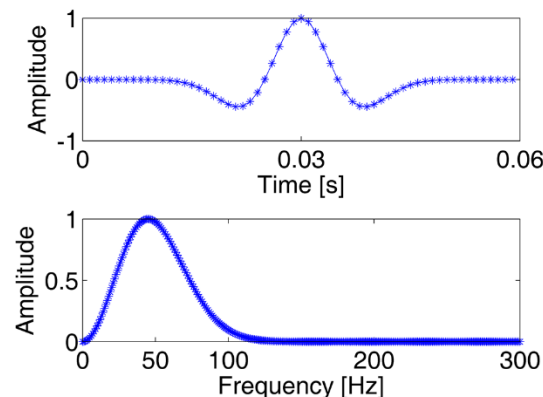
شکل ۱. مشخصات مدل خاک تک لایه، بار لرزه‌ای، مرزهای جاذب و گیرنده‌ها

جدول ۱. مشخصات خاک و حفره مدل سازی شده

Martial	Shear wave velocity(m/s)	P-wave velocity (m/s)	Elastic modulus (MPa)	Mass density (kg/m3)	Poisson's ratio	Rayleigh Damping (α and β)
Very stiff soil (Rock)	2000	3265	25000	2600	0.2	0.33, 0.000034
Stiff soil	800	1300	3680	2400	0.2	0.55, 0.000056
Medium soil	500	866	1375	2200	0.25	0.83, .0000085
Soft soil	200	400	192	2000	0.33	1.67, 0.00017

۲-۴. صحت سنجی

که R و f_M ، f ، t به ترتیب نشانگر زمان، فرکانس، فرکانس غالب و بار ریکر می‌باشد. در شکل ۲ بار لرزه‌ای ریکر مورد استفاده در حوزه زمان و فرکانس نمایش داده شده است.



شکل ۲. بار لرزه‌ای ریکر ۵۰ هرتز در حوزه زمان و فرکانس

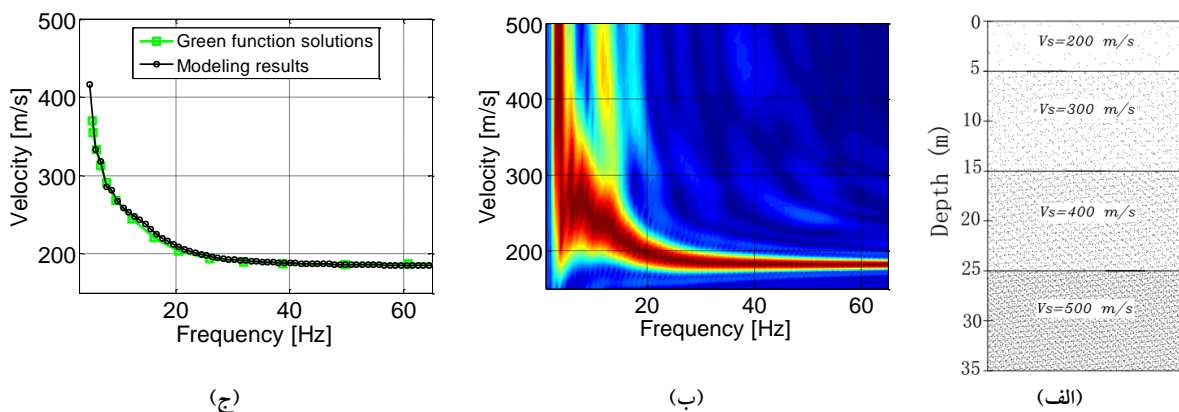
در این قسمت به صحت سنجی خروجی نرم افزار آباکوس و کدهای نوشته شده در برنامه متلب (MATLAB) با نتایج تابع گرین (Green function solutions) پرداخته شده است. بار لرزه‌ای مورد استفاده در این مقاله بار لرزه‌ای ریکر (Ricker) با فرکانس مرکزی ۵۰ هرتز هست (Mirassi and Rahnema, 2019). بار لرزه‌ای ریکر به عنوان یکی از منابع لرزه‌ای فعال به صورت گسترده در مطالعات ژئوفیزیک استفاده می‌گردد. بار ریکر در حوزه زمان و فرکانس به صورت زیر بیان می‌شود (Schmelzbach et al., 2015):

$$R(t) = (1 - 2\pi^2 f^2 t^2) e^{-\pi^2 f^2 t^2} \quad (5)$$

$$R(f) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{f^2}{f_M^3} e^{-\frac{f^2}{f_M^2}} \quad (6)$$

متلب در شکل ۳-ب و ۳-ج نمایش داده شده است در طیف پراکنش امواج (شکل ۳-ب) مقادیر سرعت در فرکانس های بالا که مربوط به لایه سطحی می باشد همخوانی مناسبی را با سرعت موج برشی لایه اول براساس رابطه $V_R \approx 0.923V_S$ نشان داده است. همچنین تطابق مناسبی بین نتایج روش اجزا محدود (آباکوس) و نتایج تابع گرین در شکل ۳-ج به دست آمده است (Yoon and Rix, 2009) که نشان از صحت مدل سازی ها و خروجی کدهای متلب دارد.

نرخ نمونه برداری ۰/۱ میلی ثانیه، مدت زمان برداشت داده ۰/۴ ثانیه و اندازه مش ۰/۲۵ متر در نظر گرفته شده است. ارزیابی های اندازه مش نشان دادند که در نظر گرفتن ۸ المان و بیشتر در یک طول موج می تواند نتایج مطلوب را ارایه نماید لذا برای مدل صحت سنجی از ۱۶ المان در یک طول موج استفاده شده است. مدلسازی ها از نتایج به دست آمده از داده های برداشت شده مربوط به خاک چهار لایه (شکل ۳-الف) در نرم افزار آباکوس و همچنین تحلیل های انجام شده در برنامه



شکل ۳. صحت سنجی نتایج روش اجزا محدود و کدهای متلب: (الف) مشخصات مدل خاک چهار لایه؛ (ب) طیف پراکندگی

امواج؛ (ج) مقایسه نتایج روش اجزا محدود با نتایج تابع گرین (Yoon and Rix, 2009)

۳. بحث و نتایج

۳-۱. تأثیر مشخصات میرایی

با توجه به مدل سازی های انجام شده به روش اجزا محدود در نرم افزار آباکوس، میرایی خاک به صورت میرایی رایلی تعریف می گردد که ضرایب میرایی آلفا (α) و بتا (β) به نمونه اعمال می گردد. مطابق تحلیل های مودال انجام شده برای خاک سرعت موج برشی ۲۰۰ متر بر ثانیه، نسبت پواسون ۰/۲ و وزن مخصوص ۲۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مقادیر ضرایب میرایی آلفا و بتا به ترتیب ۱/۶۷ و ۰/۰۰۱۷ به دست آمده است و در ادامه تعداد ۲۰ لایه الید به ضخامت یک متر جهت جذب بهتر امواج برخوردی به مرزها انتخاب شده است. لازم به ذکر است ضرایب میرایی به خصوص ضریب میرایی جرم (آلفا) که تأثیر بیشتری بر فرکانس های پایین دارد می بایست متناسب با مشخصات خاک مدل سازی شده تعیین گردد. مشخصات میرایی لایه های هر سه نوع الید در جدول ۲ ارائه شده است.

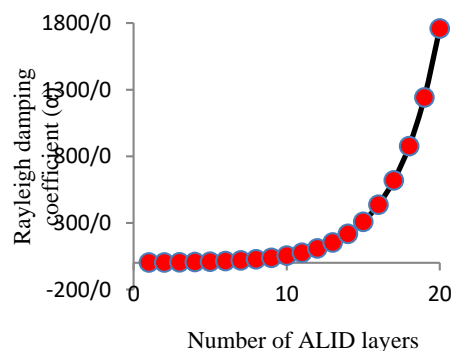
در این قسمت تأثیر مشخصات میرایی، تعداد و ضخامت لایه های الید و همچنین تأثیر سختی خاک بر میرایی امواج برگشتی در مرزهای مدل مورد ارزیابی قرار گرفته است. سه نمونه مشخصات میرایی به صورت لایه های الید با میرایی ثابت، میرایی دو برابر شونده و میرایی افزایش تدریجی متناسب با مشخصات مدل در نظر گرفته شده است. پس از تعیین مشخصات لایه الیدها، تأثیر تعداد ۲۰ لایه الید ۱ متری، ۱۰ لایه الید ۲ متری و ۵ لایه الید ۴ متری مقایسه شده است و در نهایت تأثیر سه نمونه خاک با سرعت موج برشی ۲۰۰، ۲۰۰، ۸۰۰ و ۲۰۰۰ متر بر ثانیه بر نحوه تعیین تعداد و مشخصات لایه های الید بررسی شده است.

برای خاک فوق‌الذکر سه نوع مختلف الید با مشخصات ضرایب میرایی متفاوت در نظر گرفته است و تأثیر هرکدام در جذب امواج رسیده در شکل ۵ ارائه شده است. روش ارائه شده در این مقاله که به صورت لایه‌های الید با میرایی افزایش تدریجی می‌باشد با روش‌های ارائه شده توسط لین (Lin, 2014) که به صورت میرایی ثابت و دو برابر شونده بوده مورد ارزیابی واقع شده است. لین (Lin, 2014) در نظر گرفتن الیدها با افزایش دو برابر شونده را به عنوان بهترین حالت پیشنهاد داده است این روش هرچند نسبت به روش در نظر گرفتن الیدها با میرایی ثابت مناسب تر بوده اما همچنان امواج با دامنه‌های بزرگ به داخل محیط بازتاب داشته‌اند. در فضای میدان موج نتایج تأثیر سه نمونه الید نشان داده شده است (شکل ۵). تعداد ۲۰ گیرنده سمت راست تصویر میدان موج مربوط به موقعیت قرارگیری لایه‌های الید می‌باشد همان‌گونه که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود مرز جاذب با شرایط میرایی ثابت الیدها هیچ‌گونه جذب موجی نداشته و تمامی امواج با همان انرژی به داخل محیط برگشت داده شده‌اند. در روش دوم که مرز جاذب با میرایی دو برابر شونده مدل شده، امواج تضعیف شده به داخل محیط برگشت داده شده‌اند و به نوعی به صورت تقریباً متوسطی امواج را جذب کرده‌اند؛ اما همچنان دامنه و انرژی امواج برگشتی به داخل محیط چشمگیر می‌باشد و تفسیر را با مشکل و دقت و وضوح تصاویر را کاهش می‌دهد (شکل ۵-ب). در نهایت مطابق شکل ۵-ج لایه‌های الید با میرایی تدریجی افزایشی به نحو مناسبی امواج رسیده به مرزها را جذب و میرا نموده‌اند و امواج خیلی ضعیفی به داخل محیط بازتاب یافته‌اند.

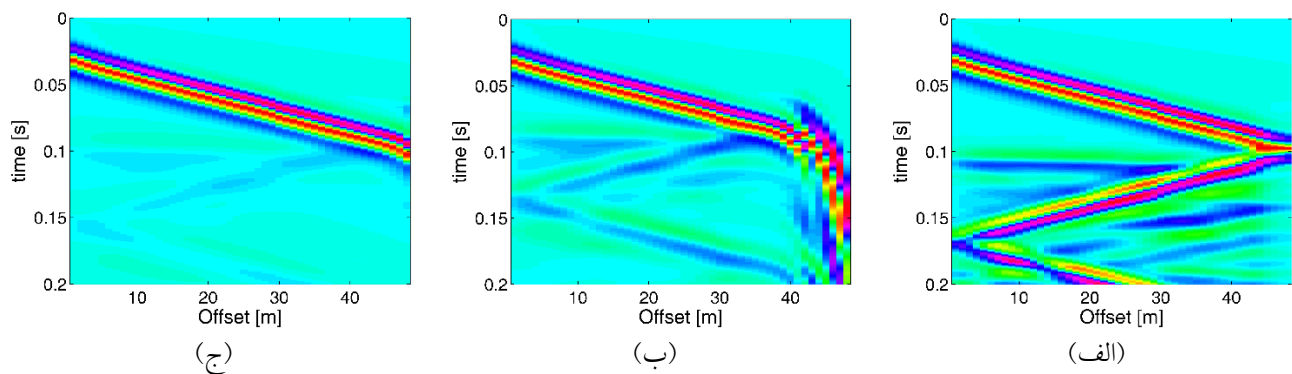
همچنین در شکل ۴ نمودار مقادیر میرایی مربوط به الید با میرایی افزایش تدریجی نمایش داده شده است. ضریب افزایشی ۱/۴۱۶ برای الید با میرایی افزایش تدریجی بر اساس ارزیابی‌های انجام شده به دست آمده است. این ضریب افزایشی بر اساس میزان امواج برگشتی در فضای میدان موج (زمان- فاصله) و دامنه جابجایی‌های ثبت شده توسط گیرنده‌های مستقر بر روی محیط خاک و لایه‌های الید تعیین شده است.

جدول ۲. ضرایب میرایی رایلی (α) محیط خاکی و الیدها برای ۳ نوع الید مختلف

Number of ALID layers	Rayleigh Damping (α)		
	ALID with constant damping	ALID with double increasing damping	ALID with gradual increasing damping
1	2	4	2.4
2	2	8	3.3
3	2	16	4.7
4	2	32	6.7
5	2	64	9.5
6	2	128	13.4
7	2	256	19.0
8	2	512	26.9
9	2	1024	38.2
10	2	2048	54.0
11	2	4096	76.6
12	2	8192	108.5
13	2	16384	153.7
14	2	32768	217.7
15	2	65536	308.4
16	2	131072	436.9
17	2	262144	619.0
18	2	524288	876.9
19	2	1048576	1242.2
20	2	2097152	1759.8



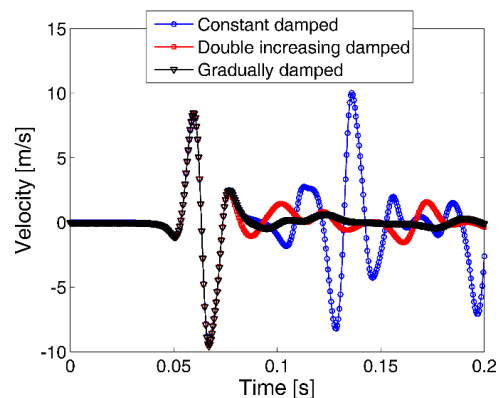
شکل ۴. ضرایب میرایی در الید با میرایی افزایش تدریجی



شکل ۵. میدان موج خاک تک لایه با سرعت ۸۰۰ متر بر ثانیه و تعداد ۲۰ الید هر کدام به ضخامت ۱ متر: الف) الیدها با میرایی ثابت؛ ب) الید با میرایی دو برابر شونده؛ ج) الید با میرایی افزایشی به صورت تدریجی (ضریب افزایش ۱/۴)

در شکل ۷ حداکثر سرعت‌های ثبت شده در هر گیرنده (۴۹ گیرنده) که بر روی سطح محیط خاکی و روی لایه‌های الید قرار داده شده برای سه روش فوق نشان داده شده است. خطچین عمود که در فاصله ۲۹ متری از منبع لرزه‌ای قرار دارد مرز شروع قرارگیری الیدها از محیط خاکی می‌باشد. نوسانات سرعت در منحنی‌های قرمز مربعی و آبی دایره‌ای که به ترتیب مربوط به میرایی دو برابر شونده و ثابت می‌باشد مشاهده می‌گردد قسمت مثبت نوسانات به این معنی می‌باشد که در آن ناحیه حداکثر سرعت، لایه‌های الید موجب برگشت موج شده‌اند به عبارت دیگر اختلاف امپدانس بین لایه‌ها زیاد بوده و نتوانسته‌اند به نحو مناسب امواج دریافتی را جذب و انتقال دهند؛ اما در روش لایه‌های الید با افزایش تدریجی (مثلث‌های مشکی) بدون وجود هیچ‌گونه نوسانی، منحنی سرعت‌های ثبت شده همواره در حال کاهش می‌باشد که نشان از میرایی امواج دریافتی می‌باشد؛ بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که مقدار میرایی لایه‌های الید نسبت به لایه‌های مجاور می‌بایست به صورت تدریجی و ملایم (ضریب افزایشی ۱/۴) افزایش داشته باشد چراکه اختلاف امپدانس موجب بازگشت امواج به محیط خاک می‌گردد. میزان ضریب افزایشی ۱/۴ بر اساس ارزیابی‌های انجام شده و شدت برگشت امواج به داخل محیط به دست آمده است. به عنوان مثال ضریب افزایشی ۱/۲ نشان داد که امواج تا بیرونی‌ترین لایه الید رسیده و مجدد به داخل محیط برگشت داده شدند و زمانی که ضریب افزایشی ۱/۸ در نظر گرفته شد امواج در لایه‌های میانی

تأثیر الیدها بر میزان میرا کردن امواج رسیده به مرزها با استفاده از سرعت‌های ثبت شده در فاصله مشخصی از منبع بار لرزه‌ای و همچنین حداکثر سرعت‌های ثبت شده روی الیدها و محیط خاکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. سرعت‌های ثبت شده توسط گیرنده شماره ۲۵ که در فاصله ۲۶ متری از منبع بار لرزه‌ای قرار گرفته در شکل ۶ نشان داده شده است که مطابق نتایج، بیشترین نوسان و به نوعی برگشت امواج از مرزها مربوط به لایه‌های الید با میرایی ثابت می‌باشد. همچنین لایه‌های الید با میرایی دو برابر شونده نیز امواج را به داخل محیط برگشت داده‌اند اما لایه‌های الید با میرایی تدریجی افزایشی (منحنی مثلث‌های مشکی‌رنگ) سبب کمترین برگشت امواج به داخل محیط شده‌اند.



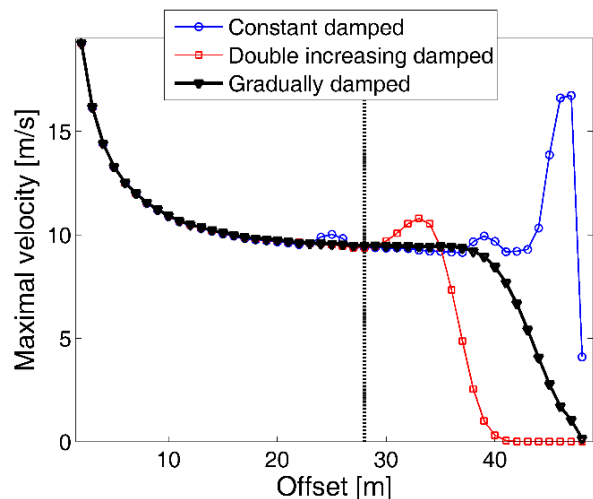
شکل ۶. سرعت‌های ثبت شده در گیرنده شماره ۲۵

با فاصله ۲۶ متر از منبع لرزه‌ای جهت مقایسه تأثیر الیدها با میرایی ثابت، میرایی دو برابر شونده و میرایی افزایشی تدریجی

کاهش اختلاف امپدانس بین آن‌ها، میزان برگشت امواج به داخل محیط را کاهش داد. در مدل شماره ۲ تعداد الیدها از ۵ به ۱۰ عدد افزایش و ضخامت الیدها از ۴ به ۲ متر کاهش یافته است که مطابق نتایج، امواج برگشتی به داخل محیط خاک به نحو چشمگیری کمتر شده است (شکل ۹-ب). در نهایت در مدل شماره ۳ با اعمال ۲۰ لایه الید ۱ متری نیز نتایج مشابه مدل با تعداد ۱۰ الید ۲ متری حاصل نموده است (شکل ۹-ج). این تشابه بیانگر این موضوع می‌باشد که در نظر گرفتن ۱۰ الید ۲ متری و یا ۲۰ الید ۱ متری برای خاک مورد بررسی نتایج یکسان و قابل قبولی را فراهم نموده است به عبارتی می‌توان گفت با افزایش تعداد الیدها و به تناسب کاهش ضخامت آن‌ها می‌توان اختلاف امپدانس را کاهش و نتایج مطلوب‌تری را به دست آورد.

ضریب افزایش میرایی لایه‌های الید برای مدل ۲۰ لایه به میزان ۱/۴ لحاظ شده است و به منظور اعمال شرایط مشابه در مدل‌های ۱۰ و ۵ لایه، ضرایب میرایی میانگین در لایه‌های الید دو مدل دیگر در نظر گرفته شده است؛ یعنی برای محاسبه ضریب میرایی لایه اول الید مدل شماره ۲ و لایه اول الید مدل شماره ۱ به ترتیب میانگین ضرایب میرایی مربوط به ۲ لایه $(\frac{3.5+5}{2})$ و ۴ لایه اول $(\frac{3.5+5+7.1+10.1}{4})$ مدل شماره ۳ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است اگر ضریب افزایش ۱/۴ برای مدل شماره ۱ (۵ لایه الید به ضخامت ۴ متر) لحاظ گردد دامنه امواج به خاطر اختلاف امپدانس کم بین لایه‌ها با متحمل شدن کمترین میزان میرایی دامنه به لایه الید انتهایی می‌رسد و مجدد به داخل محیط برگشت داده می‌شوند.

الید دچار برگشت شدید شدند و این نشان می‌دهد که ضریب افزایشی باید به گونه‌ای اعمال شود که هر لایه و به تناسب تمام لایه مقداری از دامنه امواج را میرا نماید تا موج رسیده به نحو مناسب جذب مرزهای جاذب گردد.

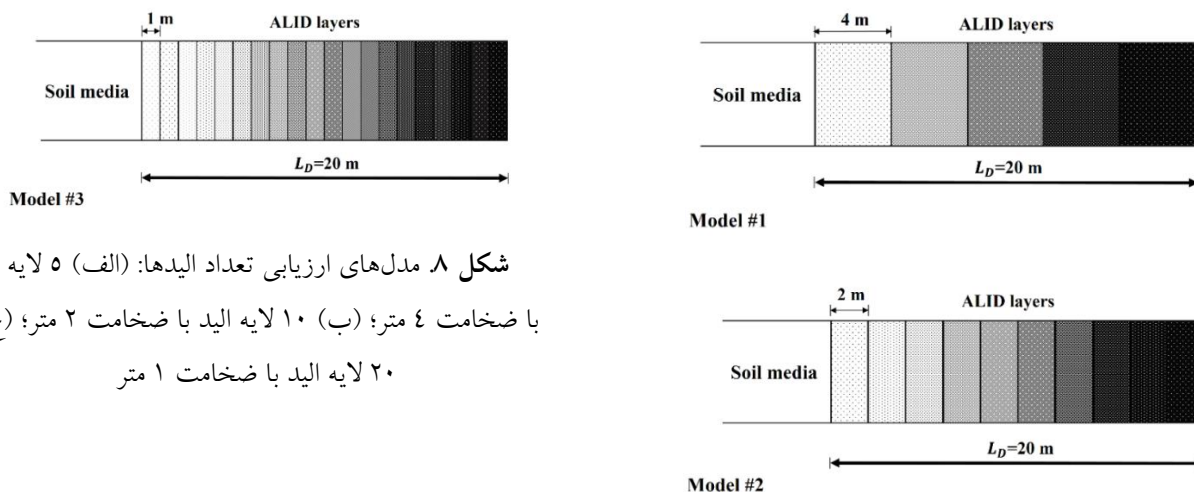


شکل ۷. حداکثر سرعت‌های ثبت شده در گیرنده‌های

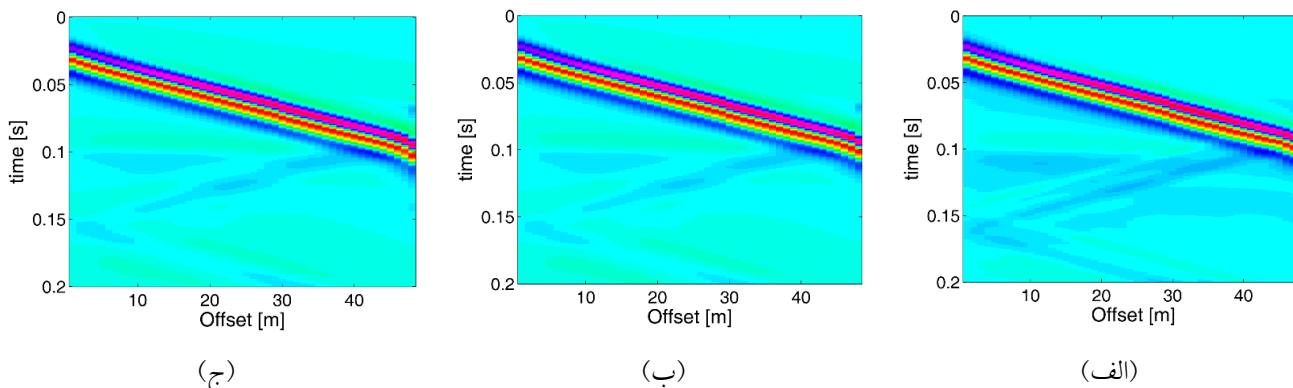
مستقر در بالای الیدها جهت مقایسه تأثیر الید با میرایی ثابت، میرایی دو برابر شونده و میرایی افزایشی تدریجی

۳-۲. تأثیر تعداد الیدها

یکی از مهم‌ترین مسائل در مدل سازی لرزه‌ای مشخص کردن تعداد و ضخامت لایه‌های مرز جاذب جهت میرا کردن امواج دریافتی در مرزها می‌باشد. به این منظور از ۳ مدل مختلف با تعداد لایه‌های الید ۵، ۱۰ و ۲۰ و به ترتیب با ضخامت‌های ۴، ۲ و ۱ متر در مدل سازی استفاده شده است (شکل ۸). مطابق مدل شماره نشان داده شده در مدل شماره ۱ (Model #1) جهت میرا کردن امواج در مرزها از تعداد ۵ الید به ضخامت هر کدام به میزان ۴ متر (در مجموع ۲۰ متر) استفاده شده است نتایج به دست آمده نشان داد که تعداد ۵ لایه الید ۴ متری موجب برگشت قابل توجهی از امواج به داخل محیط خاک شده است (شکل ۹-الف). با توجه به موقعیت برگشت امواج می‌توان اظهار داشت که اختلاف امپدانس بین لایه‌های اولیه الید عامل اصلی برگشت امواج به داخل محیط خاک شده است لذا می‌بایست با افزایش تعداد الیدها و به تناسب با



شکل ۸. مدل‌های ارزیابی تعداد الیدها: (الف) ۵ لایه الید با ضخامت ۴ متر؛ (ب) ۱۰ لایه الید با ضخامت ۲ متر؛ (ج) ۲۰ لایه الید با ضخامت ۱ متر



شکل ۹. نمایش امواج برگشتی در فضای میدان موج: (الف) ۵ لایه الید با ضخامت ۴ متر؛ (ب) ۱۰ لایه الید با ضخامت ۲ متر؛ (ج) ۲۰ لایه الید با ضخامت ۱ متر

۳-۳. تأثیر سختی خاک

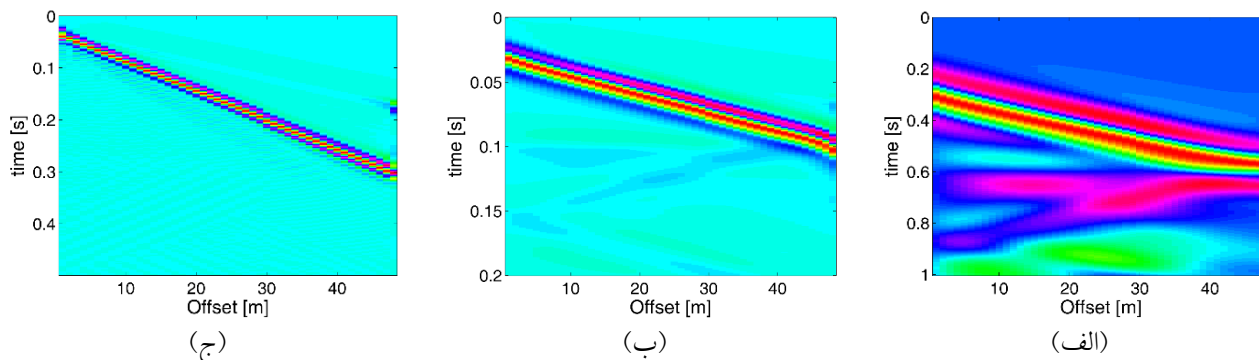
برگشتی به صورت قابل قبولی ضعیف شده‌اند (شکل ۱۰-ب). در نهایت در خاک با سرعت موج برشی ۲۰۰ متر بر ثانیه، تقریباً هیچ گونه موج برگشتی قابل ملاحظه‌ای در فضای میدان موج پدیدار نشده است (شکل ۱۰-ج). این نکته می‌بایست مدنظر قرار گیرد که لحاظ کردن مشخصات الیدها باید مطابق با مشخصات لایه‌های خاک مدل‌سازی شده باشد. خاک‌های سست (با سرعت موج برشی کمتر) با دارا بودن میرایی بیشتر به تعداد الید کمتری نیاز دارند ولی در مقابل، خاک‌های متراکم (با سرعت موج برشی بزرگ‌تر) با میرایی کمتر به تعداد الید بیشتر نیاز داشته تا بتوانند موج‌های دریاقتی در مرزها را به نحو مطلوب جذب و میرا نمایند.

در این خصوص، تأثیر افزایش لایه‌های الید در خاک متراکم نیز مورد ارزیابی قرار داده شده است و نتایج به دست آمده

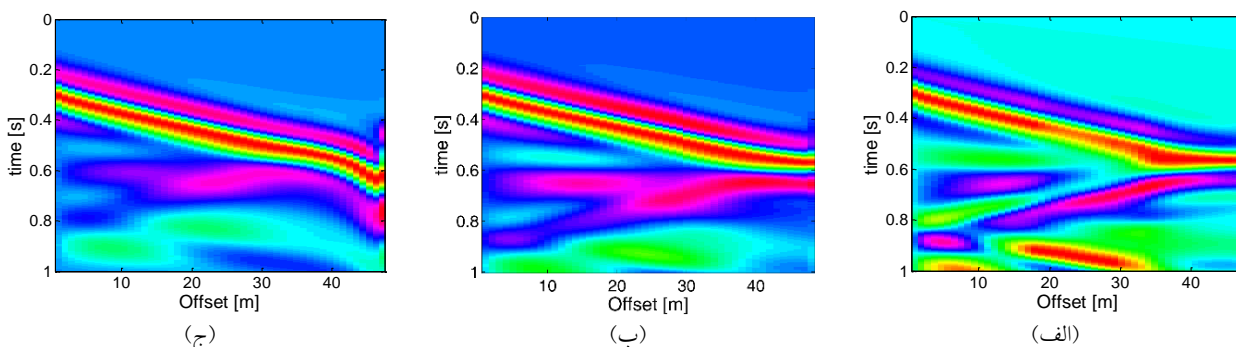
در این بخش تأثیر مشخصات مقاومتی خاک به لحاظ سستی یا سختی خاک بر نحوه تعیین تعداد لایه‌های الید مورد ارزیابی واقع شده است در این خصوص سه نوع خاک متفاوت با سرعت‌های موج برشی ۲۰۰، ۸۰۰ و ۲۰۰۰ متر بر ثانیه جهت مدل‌سازی استفاده شده است. برای هر مدل تعداد ۲۰ لایه الید ۱ متری (در مجموع ۲۰ متر) در مرزهای کف و طرفین مدل در نظر گرفته شده است. در مدل خاک متراکم (سرعت موج برشی ۲۰۰۰ متر بر ثانیه) مشاهده می‌شود که تعداد ۲۰ الید ۱ متری به خوبی نتوانسته‌اند امواج را در مرزها جذب نمایند و امواج با دامنه بالا به داخل محیط خاک برگشت داده شده‌اند (شکل ۱۰-الف). در مدل نیمه متراکم یعنی با کاهش سختی خاک از سرعت موج برشی ۲۰۰۰ به ۸۰۰ متر بر ثانیه، امواج

مستقیم) شدت و پهنای بیشتری در لایه های اید داخلی (اولین لایه های اید) دارند و می بایست این اختلاف میرایی بین لایه های اولیه اید که سبب برگشت امواج به داخل محیط شده است کاهش یابد. در مجموع، نتایج به دست آمده بیانگر این موضوع می باشد که می بایست برای لایه های خاک سخت و متراکم، تعداد لایه های اید افزایشی اید تا بتواند به نحو مناسب تری امواج دریافتی در مرزها را جذب و مانع برگشت آن ها به داخل محیط شوند و در لایه های سست می توان با در نظر گرفتن لایه های اید کمتر از برگشت امواج به داخل محیط خاک جلوگیری نمود.

مربوط به ۱۰، ۲۰ و ۳۰ لایه اید ۱ متری با ضریب افزایش میرایی ۱/۴ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود ۱۰ لایه اید نتوانسته به نحو مناسب از برگشت امواج به داخل محیط جلوگیری نماید (شکل ۱۱-الف) در ادامه با افزایش تعداد لایه های اید به ۲۰ عدد تا حدودی امواج برگشتی به داخل محیط کاهش پیدا کرده اند (شکل ۱۱-ب) و در نهایت ۳۰ لایه اید به نحو مناسب تری امواج را جذب و میرا نموده است (شکل ۱۱-ج). لازم به ذکر است جهت بهبود عملکرد جذب امواج در مرزهای مدل خاک متراکم می توان مقدار ضریب افزایش میرایی ($< 1/4$) را کاهش داد چراکه طیف امواج برگشتی (خلاف جهت امواج



شکل ۱۰. نمایش امواج برگشتی در فضای میدان موج با در نظر گرفتن ۲۰ لایه اید ۱ متری: (الف) خاک سخت با سرعت موج برشی ۲۰۰۰ متر بر ثانیه؛ (ب) خاک نیمه سخت با سرعت موج برشی ۸۰۰ متر بر ثانیه؛ (ج) خاک سست با سرعت موج برشی ۲۰۰ متر بر ثانیه



شکل ۱۱. تأثیر افزایش تعداد لایه های اید در خاک متراکم (سرعت موج برشی ۲۰۰۰ متر بر ثانیه): (الف) ۱۰ لایه اید؛ (ب) ۲۰ لایه اید؛ (ج) ۳۰ لایه اید

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، بهبود عملکرد مرزهای جاذب تحت عنوان لایه‌های جاذب با میرایی افزایشی (ALID) جهت کاهش بازتاب امواج از مرزها به داخل محیط خاک در روش تحلیل چندایستگاهی امواج سطحی با استفاده از روش اجزا محدود (FEM) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان دادند که:

- استفاده از لایه‌های الید با میرایی تدریجی افزایشی در مقایسه با میرایی ثابت و دو برابر شونده به نحو چشمگیری از بازتاب امواج به داخل محیط خاکی جلوگیری می‌نماید.

- ضرایب میرایی جرم و سختی رایلی می‌بایست متناسب با مشخصات مدل خاکی پس از انجام تحلیل مودال در نرم‌افزار آباکوس محاسبه و به صورت افزایشی ملایم (ضریب افزایشی $1/4$) به مدل اعمال گردد همچنان که تغییرات ضریب میرایی جرم (α) بیشترین تأثیر را بر جذب و بازتاب امواج در لایه‌های الید دارد.

- تعداد بیشتر لایه‌های الید با ضخامت کمتر (20 لایه الید 1 متری) عملکرد بهتری از تعداد کمتر لایه‌های الید با ضخامت بیشتر (5 لایه الید 4 متری) دارد. چون هر چه تعداد لایه‌ها افزایش یابد ضرایب میرایی با اختلاف کمتری اعمال و به تناسب اختلاف امپدانس بین لایه‌ها کاهش می‌یابد که در نتیجه امواج برخوردی به نحو مناسب‌تری در مرزها میرا می‌شوند.

- خاک‌ها با سختی و تراکم بالا (با سرعت موج برشی 2000 متر بر ثانیه) در مقایسه با خاک سست (سرعت موج برشی 200 متر بر ثانیه) نیاز به تعداد الید بیشتر و اعمال مشخصات میرایی با ضریب ملایم‌تری دارند چراکه در خاک سست امواج زودتر میرا می‌شوند و به مرزهای جاذب ضعیف‌تری نیاز دارند ولی در مقابل، خاک سخت با دارا بودن میرایی کمتر نیاز به مرزهای قوی‌تر جهت جذب امواج دریافتی دارند.

منابع

- ABAQUS v6.14 Abaqus Analysis User's Guide 2014.
- Allo, O.J., Ayolabi, E.A. and Oladele, S., 2019. Investigation of near-surface structures using seismic refraction and multi-channel analysis of surface waves methods—a case study of the University of Lagos main campus. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(7): p.257.
- Asmussen, B., 2011b. Test procedures for the determination of the dynamic soil characteristics. Deliverable D1.1. *Railway Induced Vibration Abatement Solutions* (pp. 1–107).
- Atkinson, J.H., 2000. Non-linear soil stiffness in routine design. *Géotechnique*, 50(5): pp.487-508.
- Bashir, N., Alhaj, A. and Torgashov, E., 2018. Application of Multi-Channel Analysis of Surface Waves Method to Determine Optimum Parameter Settings in Karst Terrain in Southwest Missouri. *International Journal of Science and Research*, pp. 427-431.
- Berenger, J.P., 1994. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of computational physics*, 114(2): pp.185-200.
- Bonnet M., 1999. *Boundary integral equation methods for solids and fluids*. Wiley, Chichester, UK.
- Castaigns, 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): pp.1125-1133.
- 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: pp.107-119.
- Connolly, D., 2013. *Ground borne vibrations from high speed trains*, Ph.D. thesis, The University of Edinburgh.

- 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): pp.753-768.
- Drozd, M. B., 2008. Efficient finite element modelling of ultrasound waves in elastic media (Doctoral dissertation, Imperial College London). Imperial College London.
- Drozd, M., Skelton, E., Craster, R.V. and Lowe, M.J.S., Modeling bulk and guided wave propagation in unbounded elastic media using absorbing layers. *Review of Progress in QNDE*, 26, p.87.
- Foti, S., Lai, C.G., Rix, G.J. and Strobbia, C., 2014. *Surface wave methods for near-surface site characterization*. CRC press.
- Hesse, D. and Cawley, P., 2006. Surface wave modes in rails. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(2): pp.733-740.
- Houbrechts, J., Schevenels, M., Lombaert, G., Degrande, G., Rücker, W., Cuellar, V. and Smekal, A., 2011. Test procedures for the determination of the dynamic soil characteristics. *Railway Induced Vibration Abatement Solutions RIVAS WP*, 1.
- Israeli, M. and Orszag, S.A., 1981. Approximation of radiation boundary conditions. *Journal of computational physics*, 41(1), pp.115-135.
- Jokar, M.H., Boaga, J., Petronio, L., Perri, M.T., Strobbia, C., Affatato, A., Romeo, R. and Cassiani, G., 2019. Detection of lateral discontinuities via surface waves analysis: A case study at a derelict industrial site. *Journal of Applied Geophysics*.
- Joshi, A. and Bhardwaj, P., 2018. Site characterisation using Multi-channel Analysis of Surface Waves at various locations in Kumaon Himalayas, India. *J. Ind. Geophys. Union* (May 2018), 22(3): pp.265-278.
- Khazaei, J., Amiri, A., 2017. Evaluation of the dynamic responses of high rise buildings with respect to the direct methods for soil-foundation-structure interaction effects and comparison with the approximate methods. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(2): 106-122. doi: 10.22065/jsce.2017.71513.1028
- Komatitsch, D., Vilotte, J.P., Vai, R., Castillo-Covarrubias, J.M. and Sánchez-Sesma, F.J., 1999. The spectral element method for elastic wave equations—application to 2-D and 3-D seismic problems. *International Journal for numerical methods in engineering*, 45(9): pp.1139-1164.
- Lin, S. and Ashlock, J.C., 2014. Multimode Rayleigh wave profiling by hybrid surface and borehole methods. *Geophysical Journal International*, 197(2): pp.1184-1195.
- Lin, S. and Ashlock, J.C., 2016. Surface-wave testing of soil sites using multichannel simulation with one-receiver. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 87: pp.82-92.
- Lin, S., 2014. *Advancements in active surface wave methods: modeling, testing, and inversion*. PhD dissertation, Citeseer.
- Liu, G.R. and Jerry, S.Q., 2003. A non-reflecting boundary for analyzing wave propagation using the finite element method. *Finite elements in analysis and design*, 39(5-6), pp.403-417.
- Luo, W. and 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): pp.1945-1955.
- 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*, (in press), pp. -. doi: 10.22065/jsce.2019.176403.1808
- Miriano, C., Cattoni, E. and Tamagnini, C., 2016. Advanced numerical modeling of seismic response of a propped rc diaphragm wall. *Acta Geotechnica*, 11(1): 161-175.
- Moczko P, Kristek J, Vavrycuk V, Archuleta RJ, Halada L., 2002. 3D heterogeneous staggered-grid finite difference modeling of seismic motion with volume harmonic and arithmetic averaging of elastic moduli and densities. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(8): 3042-3066.
- Ólafsdóttir, E.Á., 2016. *Multichannel analysis of surface waves for assessing soil stiffness*. Doctoral dissertation.
- Olivier, G., Brenguier, F., Campillo, M., Lynch, R. and Roux, P., 2015. Body-wave reconstruction from ambient seismic noise correlations in an underground mine. *Geophysics*, 80(3): pp.KS11-KS25.
- Olsson, D., 2012. *Numerical simulations of energy absorbing boundaries for elastic wave propagation in thick concrete structures subjected to impact loading*. Thesis, Umeå University.

- Park, C.B. and Carnevale, M., 2010. Optimum MASW survey-revisit after a decade of use. *Proceedings of GeoFlorida*, pp.1303-1312.
- Rajagopal, P., Drozd, M., Skelton, E.A., Lowe, M.J. and 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: pp.30-40.
- Rix, G.J. and Leipski, E.A., 1991. Accuracy and resolution of surface wave inversion. Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics. *Proceedings of sessions sponsored by the geotechnical engineering division of the american society of civil engineers in conjunction with the asce convention orlando, florida. october 21, 1991. Publication of: American Society of Civil Engineers.*
- Ryden, N., Park, C.B., Ulriksen, P. and Miller, R.D., 2004. Multimodal approach to seismic pavement testing. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(6): pp.636-645.
- Schmelzbach, C., Jordi, C., Sollberger, D., Doetsch, J., Kaufmann, M., Meijer, W. Y. & Horstmeyer, H. (2015, June). Understanding the impact of karst on seismic wave propagation-a multi-method geophysical study. In *77th EAGE Conference and Exhibition-Workshops.*
- Semblat JF, Pecker A., 2009. *Waves and Vibrations in Soils: Earthquakes, Traffic, Shocks, Construction Works*, IUSS Press: Pavia, Italy.
- Xia, J., Miller, R.D., Xu, Y., Luo, Y., Chen, C., Liu, J., Ivanov, J. and Zeng, C., 2009. High-frequency Rayleigh-wave method. *Journal of Earth Science*, 20(3): 63-579.
- Yoon, S. and Rix, G.J., 2009. Near-field effects on array-based surface wave methods with active sources. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(3), pp.399-406.