

کالیبراسیون مدل‌های عددی دوبعدی در مدل‌سازی سیستم‌های خاک - سازه با فونداسیون سطحی

حسین جهان خواه* (استادیار)

پژوهشکده ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

پدرام عزت‌یزدی (کارشناس ارشد)

مؤسسه‌ی آموزش عالی صدرالمنهاجین (صدرا)

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۶ (۳۱-۳۰ ص. ۴۵-۳۳-۲، شماره ۱/۱)

در بررسی مستقیم مسائل اندرکنش خاک - سازه، به دلیل محدود بودن توان محاسباتی، ابعاد محدودی از محیط نیمه بی‌نهایت خاک در مدل‌های عددی در نظر گرفته می‌شود. در این حالت، نامحدود بودن خاک با استفاده از مرزهای جاذب در اطراف مدل شبیه‌سازی می‌شود. صحت عملکرد مرزهای ارائه شده از جنبه‌های مختلف نیاز به واکاوی دارد. در گام نخست، تحت تحریک ورودی، مرزهای جاذب باید توانایی شبیه‌سازی مناسب حرکت میدان آزاد را داشته باشند. تغییر محتوای بسامدی تحریک ورودی در برخی از مرزها، نیازمند ارائه‌ی راهکار مناسب است. در گام دوم، مرزهای جاذب باید توانایی جذب کامل امواج منتشره در سیستم به علت اندرکنش خاک و سازه را داشته باشند. مرزهای ویسکوز متداول به دلیل بناشدن بر فرض انتشار موج به صورت یک‌بعدی، در جذب امواج تابشی با زوایای مایل عملکرد کاملی ندارند. این ضعف در جذب امواج سطحی تابشی به مرز، مشهودتر است. در پژوهش حاضر، محدودیت‌های موجود در اعمال تحریک لرزه‌یی و جذب امواج تابشی به مرز از طریق مرزهای مختلف ارائه و راهکارهایی برای بهبود آن معرفی شده است.

واژگان کلیدی: اندرکنش خاک - سازه، مرز جاذب، میرایی تشعشعی، مدل عددی.

۱. مقدمه

استفاده از مدل‌های اجزاء محدود در بررسی مسائل اندرکنش خاک - سازه با توجه به سهولت آن امری مرسوم است. در روش ذکرشده، ابعاد محدودی از ناحیه‌ی خاک با استفاده از مرزهای مناسب جایگزین محیط نیمه بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود.^[۱] در تحلیل‌های استاتیکی، استفاده از مرزهای مقید با فاصله‌ی محدود از سازه می‌تواند دقت مناسب مورد نیاز را تأمین کند. استفاده از این مرز در تحلیل‌های دینامیکی به دلیل بازتاب امواج تابشی و نادیده گرفتن میرایی تشعشعی نامناسب است. اگر چه در این حالت استفاده از ابعاد زیاد برای بستر به همراه میرایی مصالح می‌تواند تا حدودی فرض عدم بازگشت امواج تابشی به مرز را محقق کند، ولی به دلیل نیاز به محاسبات زمان‌بر، علی‌رغم پیشرفت سرعت محاسبات در عصر کنونی، این رویکرد با دشواری‌های خاصی همراه است.^[۲] میرایی تشعشعی در ابعاد محدود خاک با استفاده از مرزهای جاذب مصنوعی تأمین می‌شود. ماهیت این مرزها جذب انرژی امواج تابشی به آن‌هاست. مطالعات بسیاری بر روی عملکرد مرزهای جاذب انجام شده است. در سال ۱۹۶۹، مرزهای جاذب ویسکوز متشکل از میراگرهای عمود بر هم ارائه شده است.^[۳] ضرایب میراگرهای مذکور براساس تئوری انتشار یک‌بعدی موج حاصل شده است. میراگر مماس و عمود بر سطح به ترتیب براساس سرعت

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۲/۲۷، پذیرش ۱۳۹۴/۵/۳.

h.jahankhah@iiees.ac.ir
pedram.ezzatyazdi@yahoo.com

موج برشی و طولی تنظیم می‌شوند. این ضرایب در رابطه‌ی ۱ ارائه شده است، که در آن ρ چگالی مصالح بستر، c_s سرعت موج برشی، c_p سرعت موج طولی، و A مساحت مؤثر المان در محل قرارگیری مرز است:

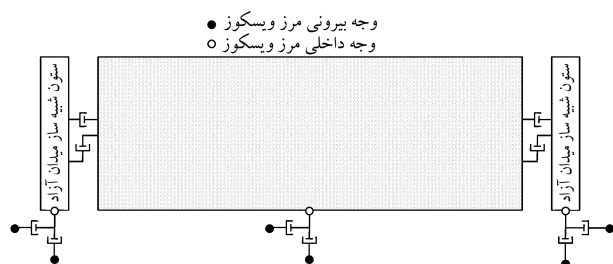
$$C_T = \rho c_s A$$

$$C_N = \rho c_p A \quad (۱)$$

پس از آن، به مدت دو دهه، پژوهشگران راهکارهای متعددی جهت مدل‌سازی مرزهای جاذب پیشنهاد کرده‌اند،^[۴-۷] و در سال ۱۹۸۸ نشان داده شده است که تمامی روش‌های مذکور بر پایه‌ی روابط ریاضی مشابهی استوار شده‌اند و بنابراین دقت جذب آنها تقریباً یکسان است.^[۸] در سال ۱۹۹۴،^[۹] مرزهای ویسکوالاستیک برای مسائل کرنش صفحه‌یی شعاعی معرفی شده است، که برای امواج برشی شامل فنر و میراگر، و برای امواج طولی شامل: فنر، میراگر، و جرم متمرکز بوده و مشاهده شده است که دقت این مرز بیشتر از مرزهای ویسکوز ارائه‌شده‌ی پیشین،^[۳] است و با فرض ناحیه به صورت شعاعی، ضرایب مرز براساس شعاع محیط ارائه شده است. در سال ۲۰۰۶ نیز مرز ویسکوالاستیک ارائه‌شده در سال ۱۹۹۴،^[۹] تعمیم داده شده است.^[۱۰] در این پژوهش در هر جهت فقط از فنر و میراگر استفاده و جرم متمرکز حذف شده است. همچنین مطابق جدول ۱، ضرایب تصحیحی برای استفاده از مرزهای ارائه‌شده در محیط‌های مستطیلی شکل ارائه شده است. روابط

جدول ۱. ضرایب تصحیح مرزهای ویسکوالاستیک در محیط‌های مستطیلی.

ضریب تصحیح	دامنه‌ی قابل قبول	ضریب پیشنهادی
α_N	$1^\circ - 2^\circ$	۱/۳۳
α_T	$5^\circ - 1^\circ$	۰/۶۷



شکل ۱. تصویر شماتیک مدل با ستون‌های شبیه‌ساز تحریک میدان آزاد و مرزهای جاذب ویسکوز.

این روش در نرم‌افزارهای مبتنی بر روش اجزاء محدود مانند ABAQUS [۲۲] و تفاضل محدود مانند FLAC [۲۳] قابل پیاده‌سازی است. در شکل ۱، نمونه‌ی این مدل به همراه ستون‌های شبیه‌ساز تحریک میدان آزاد در طرفین نشان داده شده است. با توجه به اینکه در نرم‌افزارهایی همچون آباکوس، ستون‌های میدان آزاد باید به صورت مصنوعی در طرفین مدل ساخته شوند، لذا نکته‌ی حائز اهمیت عدم تأثیرپذیری ستون از هندسه‌ی اصلی مدل است. بدین منظور دو راهکار قابل استفاده است: در راهکار اول، می‌توان ستون‌های میدان آزاد را با سختی و چگالی بسیار بزرگ‌تر از پارامترهای مشابه مصالح در هندسه‌ی اصلی در نظر گرفت. [۲۴] در راهکار دوم، می‌توان بعد درون صفحه‌ی المان‌های ستون را بسیار بزرگ‌تر از بعد المان‌های هندسه‌ی اصلی در نظر گرفت. در هر دو راهکار، سرعت انتشار موج در ستون‌ها نسبت به هندسه‌ی اصلی تفاوتی ندارد و انتشار موج به صورت یک‌بندی در سیستم به نحو مناسب صورت می‌پذیرد.

مبحث مهم دیگر در کنترل دقت مدل‌های عددی، ابعاد المان‌های مورد استفاده است. استفاده از ابعاد پایین در مدل‌های عددی، دقت بیشتری را به ارمغان می‌آورد؛ لیکن به طور هم‌زمان، طولانی‌شدن زمان تحلیل و گاه عدم توانایی تحلیل به واسطه‌ی افزایش تعداد المان‌ها را به همراه دارد. در سال ۱۹۶۹، اثر ابعاد المان در تحلیل‌های دینامیکی بررسی و با بررسی انتشار یک‌بندی موج از طریق میله با دو مصالح متفاوت نتیجه شده و پاسخ مناسب زمانی حاصل شده است که نسبت بعد بزرگ‌ترین المان به طول موج کمترین موج منتشره در محیط (موج با پایین‌ترین سرعت) در حدود یک ششم باشد. [۲۵] همچنین در سال ۱۹۷۳، دقت جابه‌جایی حاصل از یک پالس هارمونیک با فرض انتشار یک‌بندی موج در مدل اجزاء محدودی با بعد المان‌های مختلف بررسی شده است و بر مبنای مطالعات مذکور، استفاده از بعد المان در حدود یک هشتم برابر کوچک‌ترین طول موج منتشره، پاسخ‌های قابل اطمینانی حاصل می‌شود. [۲۶]

در بررسی هر یک از مباحثی که پیشتر مطرح شده است، نمایش نتایج در قالب پارامترهای سیستم‌های خاک - سازه انجام می‌پذیرد. به صورت کلی، پاسخ سیستم‌های خاک - سازه به ابعاد و مشخصات دینامیکی سازه، ابعاد پی، مشخصات خاک، و همچنین مشخصات تحریک اعمالی وابسته است. در پژوهش‌های پیشین، اثر پارامترهای ذکر شده به صورت پارامترهای بدون بعد بدین صورت نشان داده شده است: [۲۷]

پارامتر بدون بعد بسامد به عنوان شاخصی از نسبت سختی سازه به خاک مطابق رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

$$\omega_{fix} = \frac{\omega B}{V_s} \quad (3)$$

که در آن، ω بسامد طبیعی سازه‌ی قرارگرفته بر بستر صلب، B برابر با نصف عرض

۲، ضرایب فنر و میراگر را برای جهت‌های مختلف ارائه می‌دهند، که در آن‌ها جهات ۱ و ۲ مماس بر سطح و جهت ۳ عمود بر سطح است. همچنین ضریب R برابر با عمق مدل است. ضرایب تصحیح α نیز در جدول ۱ ارائه شده‌اند و ضرایب G و A به ترتیب مدول برشی مصالح بستر و مساحت مؤثر المان در محل مرز هستند. مرزهای ارائه‌شده‌ی پژوهش مذکور، [۱۹] فقط برای بستر خطی و تحریک از داخل مدل ارائه شده‌اند.

$$K_1 = K_2 = \frac{\alpha_T G}{R} A, \quad K_3 = \frac{\alpha_N G}{R} A$$

$$C_1 = C_2 = \rho c_s A, \quad C_3 = \rho c_p A \quad (2)$$

لازم به ذکر است که مرزهای پیشرفته‌ی ویسکوالاستیک با درجات متفاوت شامل: فنر، میراگر، و مجموعه‌ی سری از جرم و میراگر در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۳، [۱۲، ۱۱] به ترتیب برای محیط‌های خشک و اشباع با مختصات شعاعی ارائه شده‌اند، که پیچیدگی و محدودیت استفاده از آن‌ها فقط در مدل‌های با مختصات شعاعی از معایب مرزهای مذکور است. همچنین در دو دهه‌ی اخیر، مرزهای جذبی جهت جذب امواج بازتابشی با عنوان لایه‌ی کاملاً انطباق‌یافته پیشنهاد شده است، [۱۳، ۱۴] که در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند، [۱۵، ۱۶] و علی‌رغم کارایی بیشتر نسبت به روش‌های پیشین، به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی و محدودیت اعمال آنها در برخی مسائل لرزه‌ی، تاکنون در مسائل کاربردی اقبال قابل ملاحظه‌ی کسب نکرده‌اند. علاوه بر این مرزها، در پژوهشی در سال ۲۰۰۰، [۱۷] مرزهای جاذب بر مبنای بسط کسره‌های دنباله‌دار برای مسائل آکوستیک ارائه شده است. همچنین در سال ۲۰۱۱، [۱۸] مرزهای مذکور در مسائل اندرکنش خاک - سازه وارد شده و عملکرد مناسبی مشاهده شده است. اما همچنان مشابه با لایه‌ی کاملاً انطباق‌یافته، پیچیدگی استفاده از آن‌ها، یکی از مشکلات اصلی روش ذکر شده است.

نحوه‌ی اعمال تحریک ورودی، یکی دیگر از مباحث مهم در مدل‌سازی عددی مسائل لرزه‌ی است. تحریک ورودی می‌تواند از جنس متغیرهای مختلفی همچون شتاب، سرعت، جابه‌جایی، و یا نیروی معادل با رکورد زلزله باشد. همچنین تحریک ورودی می‌تواند از طریق گره‌های داخلی و یا خارجی المان‌های جاذب مرز اعمال شود. اعمال رکورد به صورت شتاب، سرعت، و جابه‌جایی برخلاف تحریک به صورت نیرو از گره‌های داخلی مرزهای جاذب به دلیل دیکته‌کردن پاسخ در گره و حذف میرایی تشعشعی امکان‌پذیر نیست. [۱۹] تحریک ورودی باید به نحو مناسبی از کف و طرفین مدل اعمال شود. در انتشار یک‌بندی قائم امواج برشی، گره‌های موجود در کف مدل، تحریک ورودی یکسانی را تجربه می‌کنند؛ اما در مرزهای طرفین مدل، گره‌های قرارگرفته در عمق‌های مختلف این تحریک را با اختلاف فاز دریافت می‌کنند. لذا نیاز است که در تک‌تک گره‌های طرفین مدل تحریک ورودی جداگانه محاسبه و اعمال شود. به دلیل دشواری در محاسبات تاریخچه‌ی تحریک ورودی در تک‌تک گره‌ها، ستون‌های شبیه‌ساز تحریک میدان آزاد در سال‌های ۱۹۸۸ و ۱۹۸۹ معرفی شده‌اند. [۲۰، ۲۱] این ستون‌ها در طرفین مدل قرارگرفته‌اند و انتشار موج به صورت یک‌بندی را شبیه‌سازی می‌کنند. با استفاده از ستون‌های مذکور، تحریک ورودی در وجه خارجی مرز و به تبع آن در داخل مدل شبیه‌سازی شده است. اصول

پی است. نسبت ابعاد سازه نیز به صورت رابطه ی ۴ معرفی می شود:

$$\frac{h}{B} \quad (4)$$

که در آن h ارتفاع مؤثر سازه است. نسبت جرم سازه به خاک نیز به صورت رابطه ی ۵ تعریف می شود:

$$\bar{m} = \frac{m}{\rho B^2 h} \quad (5)$$

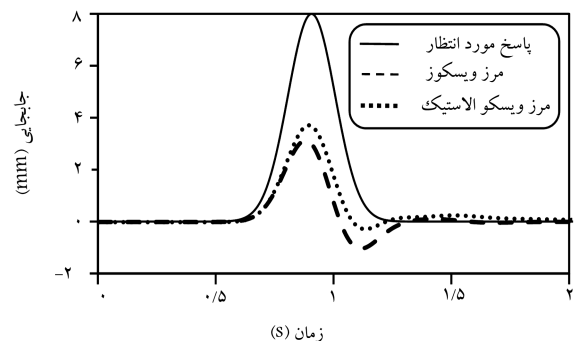
که در آن، m جرم مؤثر سازه و ρ چگالی خاک است. و همچنین پارامتر بی بعد بسامد تحریک به صورت رابطه ی ۶ تعریف می شود:

$$a_e = \frac{\omega_e B}{V_s} \quad (6)$$

که در آن، ω_e بسامد تحریک است. در پژوهش حاضر، نسبت جرم سازه به خاک (رابطه ی ۵) با توجه به مقادیر پیشنهادی ادبیات فنی، که برای سازه های معمول مهندسی نزدیک به ۰/۵ تشخیص داده شده است،^[۲۷] برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شده است. در تمام بررسی ها، مقادیر سایر پارامترهای بدون بعد ذکر شده است.

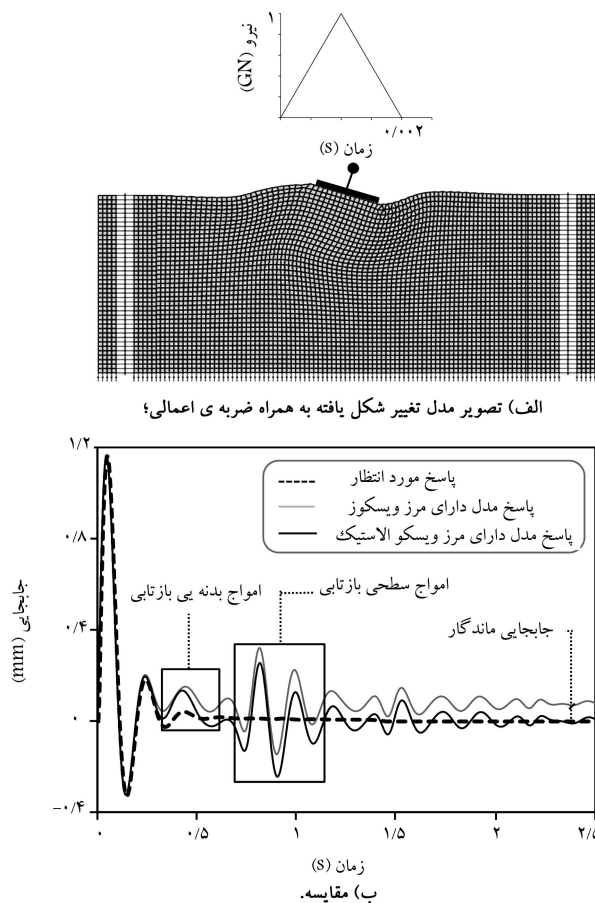
۲. بیان مسئله

حصول مناسب پاسخ میدان آزاد، اولین گام در بررسی مسائل اندرکنش خاک - سازه است. اعمال تحریک ورودی به سیستم از طریق مرز جاذب باید به نحوی باشد که تحریک میدان آزاد به دقت شبیه سازی شود. تغییر محتوای بسامدی تحریک ورودی به علت نواقص مدل سازی مرز، یکی از مسائل مهمی است که قبل از قرارگیری سازه در مدل باید مورد توجه قرار گیرد. در این بخش به عنوان نمونه، مدل های میدان آزاد با مرزهای ویسکوز و ویسکوالاستیک پیشنهادی لیو و دوو،^[۱۰] با استفاده از نرم افزار آباکوس تهیه شده و تحریک به صورت پالس جابه جایی از طریق گره های خارجی مرز کف اعمال شده است. هدف مدل سازی انتشار یک بعدی موج برشی با جهت انتشار قائم است. در شکل ۲، پاسخ در گره وسط سطح مدل ها با پاسخ دقیق مورد انتظار مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، پاسخ های ثبت شده در سطح با پاسخ مورد انتظار اختلاف زیادی دارد و به راهکارهایی برای رفع این مشکل نیاز است. این تذکر لازم است که پاسخ در تمام گره های سطح به صورت مشابه است. با فرض حل مشکلات اعمال تحریک ورودی در حصول مناسب پاسخ میدان آزاد، لازم است در مسائل اندرکنش خاک و سازه، میزان تأثیر امواج بازتابی از مرزها



شکل ۲. مقایسه ی پاسخ در سطح مدل های میدان آزاد بدون تصحیح با پاسخ مورد انتظار.

در دقت پاسخ سیستم بررسی شود. همان گونه که پیشتر بیان شده است، مرزهای جاذب متداول برگرفته از تئوری یک بعدی انتشار موج، در محیط های ۲ و ۳ بعدی در جذب کامل امواج تابشی مایل ناتوان هستند. همچنین حضور ستون های شبیه ساز تحریک میدان آزاد در طرفین مدل، عملکرد آن ها را ضعیف تر می کند. در شکل ۳، چگونگی اثرگذاری امواج بازتابی ناخواسته در پاسخ سیستم در مدل های عددی با ستون های شبیه ساز تحریک میدان آزاد با استفاده از نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته اند. در این مدل بستر با عمق ۲۰ متر و عرض ۸۰ متر و سرعت موج برشی برابر با ۱۲۰ متر بر ثانیه فرض شده و میرایی مصالح صفر در نظر گرفته شده است. عرض ستون شبیه ساز تحریک میدان آزاد نیز برابر با ۲ متر در نظر گرفته شده است. مدل های عددی شامل یک سازه ی تک درجه آزادی قرار گرفته بر فونداسیون سطحی صلب به عرض ۸ متر بر بستر کشتان بوده و پاسخ در گره حامل جرم آن تحت ضربه در بازه ی زمانی کوتاه مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۳ الف، به صورت شماتیک مدل سیستم خاک - سازه و ضربه ی اعمالی نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۳ ب پاسخ سازه قرار گرفته بر مرز ویسکوز و ویسکوالاستیک با پاسخ دقیق مقایسه شده است. این تذکر لازم است که پاسخ دقیق از مدل با ابعاد زیاد (عمق ۲۰۰ متر و عرض ۴۰۰ متر) برآورد شده است. همان گونه که در شکل ۳ ب مشاهده می شود، سازه در ابتدا پاسخ مطلوب اصلی، سپس امواج نامطلوب طولی و برشی بدنه یی بازتابی از مرز کف، و در نهایت امواج سطحی بازتابی را تجربه می کند، که البته این بازتاب های ناخواسته دوباره با دامنه ی کمتر تکرار می شوند. علاوه بر



شکل ۳. مقایسه ی پاسخ سازه ی تک درجه آزادی قرار گرفته بر مدل های با مرز ویسکوز و ویسکوالاستیک با پاسخ دقیق.

سختی دینامیکی با مدول برشی خاک مقیاس شده است. سختی دینامیکی پس از اعمال ضربه به فونداسیون در شکل ۴ الف و بررسی پاسخ آن در شکل ۴ ب به دست آمده است. در شکل ۴ الف، محور قائم دامنه‌ی نیروی اعمالی بر حسب کیلو نیوتن و در شکل ۴ ب، محور قائم دامنه‌ی پاسخ بر حسب میلی‌متر در گرده وسط فونداسیون نشان داده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل صلیبیت فونداسیون پاسخ در تمام گرده‌های آن در درجه آزادی افقی یکسان است. در هر دو شکل، محور افقی زمان بر حسب ثانیه را نشان می‌دهد. در شکل ۴ ب، سختی دینامیکی به دست آمده از تحریک ورودی و پاسخ در کنار سختی دینامیکی دقیق^[۲۸] نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به دلیل وجود جابه‌جایی ماندگار و امواج بازتابی، سختی دینامیکی حاصل از مدل عددی با مقدار دقیق، فاصله‌ی زیادی دارد.

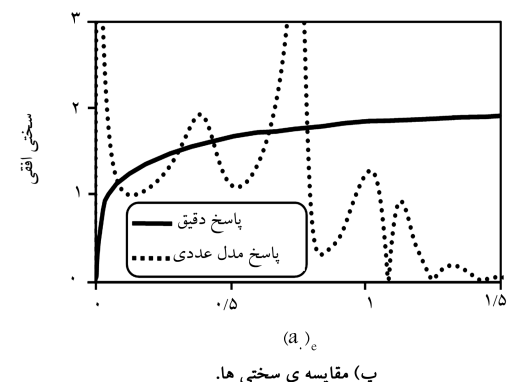
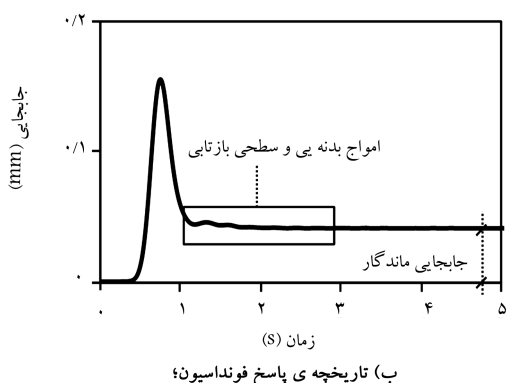
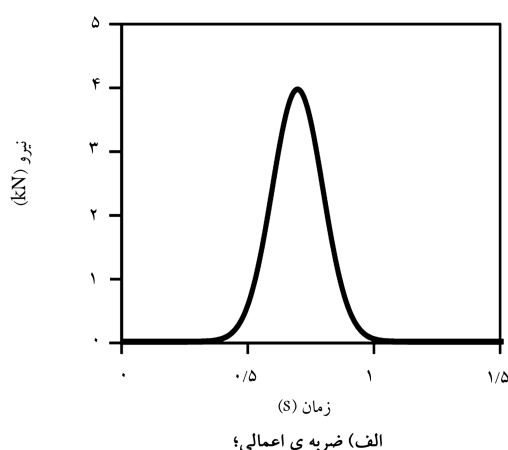
در این نوشتار با توجه به مشکلات ذکر شده در مرزهای متداول، کنترل عملکرد مناسب مدل‌های عددی در دو بخش مورد توجه است: ابتدا، مشخصات مدل و نحوه‌ی اعمال تحریک ورودی برای حصول پاسخ مناسب در حالت میدان آزاد امواج برشی با امتداد انتشار قائم در محیط دوبعدی برای مرزهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و راه حل‌های مناسب ارائه شده است. در این پژوهش اعمال تحریک ورودی به صورت جابه‌جایی در نظر گرفته شده است. در بخش دوم، به منظور جذب مناسب امواج بدنه‌یی و سطحی ناشی از اندرکنش خاک - سازه راهکارهای عملی ارائه شده است. در این راستا، برخلاف روش مرسوم که در آن از المان‌های جاذب انرژی فقط در محل مرزهای پیرامونی مدل استفاده می‌شود، نشان داده خواهد شد که استفاده از این نوع المان‌ها در گرده‌های داخلی مدل، در صورتی که تأثیری در تحریک میدان آزاد نداشته باشد، پلا مانع است و می‌تواند دقت بالاتری در جذب امواج در محیط‌های دوبعدی به ارمغان آورد. این تذکر لازم است که مجموعه‌ی راه حل‌های ارائه شده در این پژوهش، مشتمل بر مسائلی است که در آنها هدف اصلی بررسی اندرکنش خاک - سازه با حرکت میدان آزاد مشخص است. در چنین مسائلی کالیبراسیون حرکت میدان آزاد فقط جهت تضمین دریافت حرکت از پیش تعیین شده در سطح زمین است.

۳. تصحیح مدل در حالت میدان آزاد

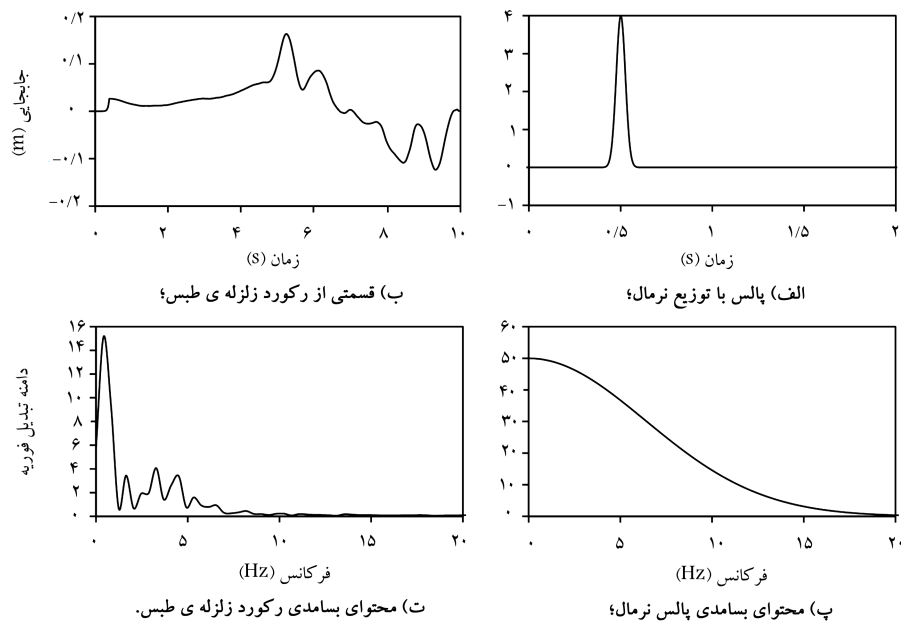
در این بخش توانایی مرزهای جاذب در انتقال مناسب تحریک ورودی به داخل سیستم و انتشار موج به صورت یک‌بُعدی در مدل‌های دوبعدی میدان آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. بر این مبنا عملکرد انواع مرزهای جاذب در شبیه‌سازی مستقیم حرکت میدان آزاد براساس مجموعه‌یی از آزمون‌ها کنترل می‌شود. مرزهای جاذب از نوع ویسکوز و ویسکوالاستیک در نظر گرفته شده و مدل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ساخته شده است. خاک با مدول کشسانی برابر با ۴۳۸۹۰ مگاپاسکال و چگالی ۱۶۶۵ تن بر متر مکعب و ضریب پواسون ۰/۳۳ فرض شده است. این خاک، مدول برشی ۱۶۵۰ مگاپاسکال و سرعت موج برشی ۱۰۰ متر بر ثانیه دارد. لازم به ذکر است که مشخصات پارامترهای خاک به صورت نمونه جهت تحلیل‌ها ارائه شده است. لیکن نواقص و راه حل‌های طرح شده حالت عمومی خواهند داشت. هندسه‌ی مدل‌های دوبعدی با استفاده از المان‌های ۴ گرده‌یی CPE۴R به ابعاد ۰/۵ متر در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. خاک به طول ۸ متر و عمق ۲ متر فرض شده است، که به تعداد ۴۱ المان در عمق و ۱۶۱ المان در طول مش بندی شده است. با توجه به پیشنهاد کمیته‌ی بعد مش، که حدوداً

بازتابش‌های نامطلوب ذکر شده در مدل با مرز ویسکوز، جابه‌جایی ماندگار در انتهای تحلیل مشاهده می‌شود. جهت رفع نواقص ذکر شده در بخش اندرکنش خاک - سازه نیز نیاز به ارائه‌ی راه حل‌های مناسب احساس می‌شود. لازم به ذکر است که اگر چه استفاده از مدل با ابعاد زیاد برای خاک به همراه فرض میرایی مصالح و مرزهای جاذب تا حدودی دامنه‌ی امواج بازتابی را کاهش می‌دهد، ولی به دلیل نیاز به ابعاد زیاد، زمانی طولانی برای تحلیل نیاز است و دشواری‌های خاصی به همراه دارد.

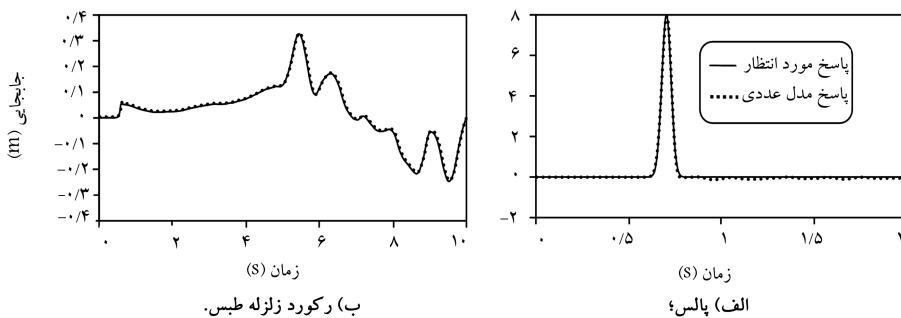
بازتاب امواج و جابه‌جایی ماندگار می‌تواند سبب بروز خطای زیادی در محاسبه‌ی امیدانس دینامیکی فونداسیون‌ها شود. به عنوان نمونه در شکل ۴، سختی دینامیکی افقی فونداسیون نواری حاصل از مدل‌های عددی با مرز ویسکوز استخراج شده و با مقادیر دقیق ارائه شده در پژوهشی در سال ۱۹۸۳^[۲۸] مقایسه شده است. مقادیر



شکل ۴. مقایسه‌ی سختی دینامیکی حاصل از مدل عددی با مقدار دقیق.



شکل ۵. رکوردهای مورد استفاده به همراه محتوای بسامدی.



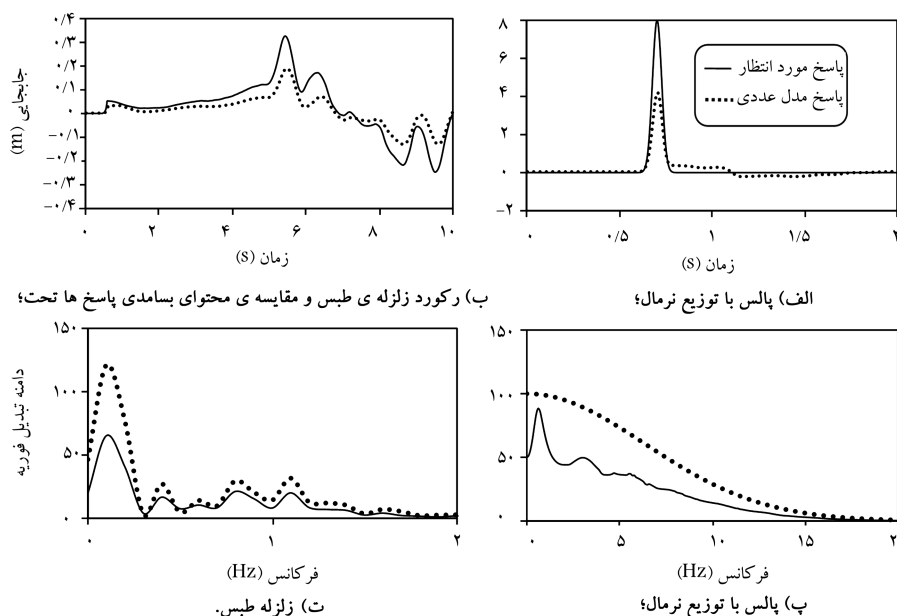
شکل ۶. مقایسه ی پاسخ در سطح مدل میدان آزاد با مرز ویسکوز با مقدار مورد انتظار.

شده است. با توجه به اینکه مدل در شرایط میدان آزاد قرار دارد و تحریک ورودی در جهت افقی اعمال می شود، لذا انتظار می رود که در سیستم، فقط امواج SV انتشار یابد. در این حالت، مرزهای موجود باید توانایی جذب کامل امواج بازتابی از سطح را داشته باشند. براساس تئوری انتشار یک بعدی موج، دامنه ی تحریک ورودی هنگام برخورد به سطح آزاد باید ۲ برابر مقدار اصلی به همراه اختلاف زمانی مناسب ناشی از حرکت موج از کف مدل تا سطح باشد. مطالعات گذشته کاهش ۵۰ درصدی دامنه ی تحریک ورودی هنگام عبور از مرز ویسکوز را نشان داده است،^[۳۰] لذا در این قسمت تحریک ورودی با دامنه ی ۲ برابر اعمال شده است.

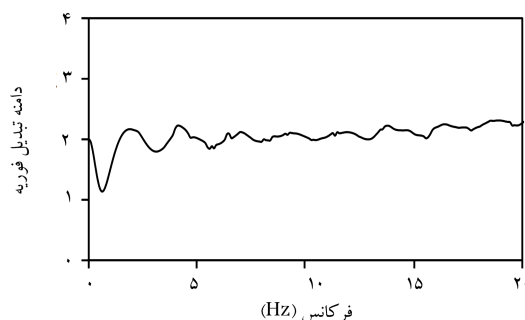
شکل ۶، پاسخ در سطح مدل با مرز جاذب ویسکوز را پس از ۲ برابر شدن دامنه ی تحریک ورودی در کنار پاسخ های دقیق نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، ۲ برابر کردن تحریک ورودی، سبب ثبت پاسخ های مناسب در سطح شده است.

مرزهای ویسکوالاستیک ارائه شده ی لیو و دوو،^[۱۰] تأثیر متفاوتی در تحریک ورودی دارند. مدل های مشابه با قبل به همراه مرز جاذب ویسکوالاستیک تحت تحریک های خارجی شکل ۳ قرار گرفته و پاسخ ثبت شده در سطح آن ها با مقادیر دقیق در شکل ۷ الف و ۷ ب مقایسه شده است. همچنین در شکل ۷ پ و ۷ ت، محتوای بسامدی پاسخ ثبت شده با پاسخ مورد انتظار مقایسه شده است. همان گونه

برابر با یک هشتم طول موج است، ناحیه ی عملکرد مناسب این المان ها برای امواج با طول موج بیش از ۴ متر است، که با توجه به مشخصات خاک، پوشش دهنده ی محتوای بسامدی با بیشینه ی بسامد ۲۵ هرتز است. ستون های شبیه ساز تحریک میدان آزاد از طریق مرزهای جاذب ویسکوز در طرفین مدل قرار داده شده است. به منظور حصول مناسب پاسخ میدان آزاد امواج برشی لازم است تا درجات آزادی انتقالی گره های طرفین مدل به صورت جداگانه در هر ارتفاع با یکدیگر مقید شوند. به طور مشابه، گره های طرفین ستون های شبیه ساز حرکت میدان آزاد نیز لازم است به یکدیگر مقید شوند. در این قسمت تحریک ورودی به صورت جابه جایی از گره های خارجی مرز جاذب کف در نظر گرفته شده است. شکل ۵، تاریخچه ی جابه جایی تحریک های ورودی مورد استفاده به همراه محتوای بسامدی آن ها را نشان می دهد. در شکل ۵ الف و ۵ ب، محورهای افقی، زمان بر حسب ثانیه و محورهای قائم، دامنه ی جابه جایی را نمایش می دهد. همچنین در شکل ۵ پ و ۵ ت، محورهای افقی، بسامد و محورهای قائم، دامنه ی فوریه ی رکوردها را نشان می دهد. تحریک ورودی به دلیل قرارگیری مرز جاذب تحت تأثیر قرار می گیرد. این تغییرات با توجه به نوع مرز جاذب متفاوت است. در ابتدا اثر مرز جاذب ویسکوز بر تحریک ورودی مورد بررسی قرار گرفته است. دو تحریک پالس با توزیع نرمال و قسمتی از رکورد زلزله ی طیس ثبت شده در ایستگاه طیس به منظور بررسی عملکرد مدل های عددی انتخاب



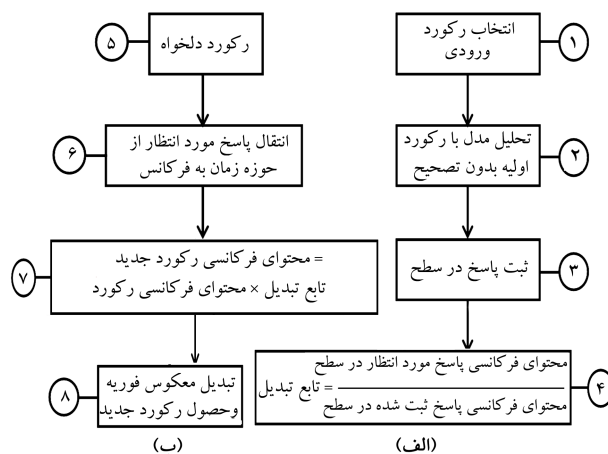
شکل ۷. مقایسه‌ی پاسخ جابه‌جایی ثبت‌شده در سطح مدل میدان آزاد با مرز ویسکوالاستیک با مقدار مورد انتظار.



شکل ۹. تابع تبدیل سیستم.

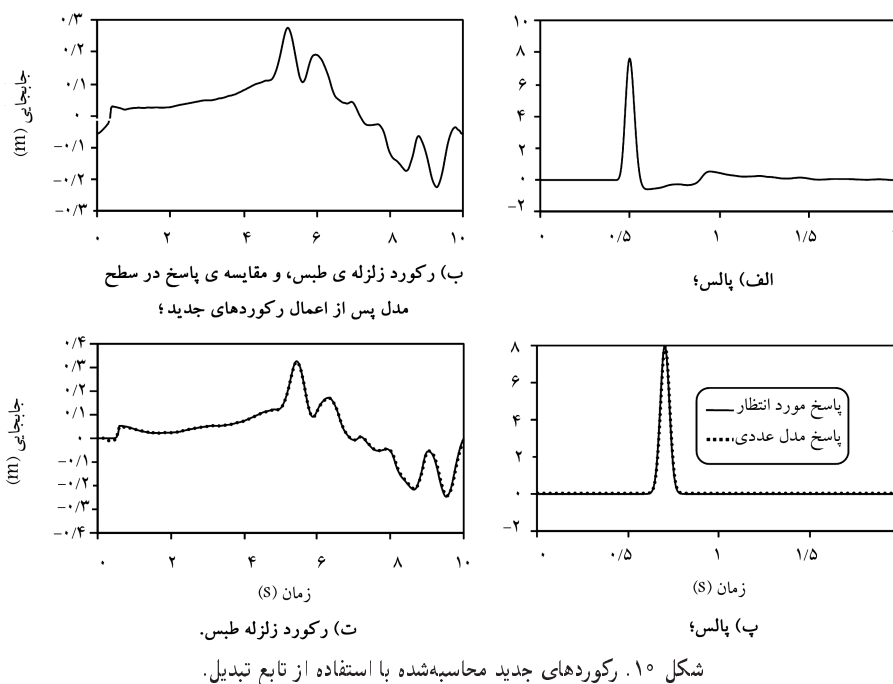
ثبت پاسخ مورد انتظار، تحت رکورد هدف، در مدل میدان آزاد می‌شود. تابع تبدیل محاسبه‌شده در شکل ۹ ارائه شده است. لازم به ذکر است که این تابع تبدیل در صورت عدم تغییر در ابعاد مدل و مشخصات مصالح یکسان است. با استفاده از روند معرفی‌شده در شکل ۸ و تابع تبدیل به‌دست‌آمده در شکل ۹، رکوردهای ورودی جدید محاسبه و در شکل ۱۰ الف و ۱۰ ب ارائه شده است. این رکوردها در کف مدل‌های با مرز ویسکوالاستیک اعمال شده و پاسخ در سطح مدل با پاسخ دقیق در شکل ۱۰ پ و ۱۰ ت مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پاسخ‌ها منطبق بر مقادیر مورد انتظار است و بدین ترتیب دقت استفاده از مرزهای ویسکوالاستیک ارتقاء داده شده است. اهمیت دقت مدل میدان آزاد با مرز ویسکوالاستیک در آنجاست که در بخش اندرکنش خاک - سازه مرزهای ویسکوز عموماً مشکل جابه‌جایی ماندگار داشته و استفاده از مرز ویسکوالاستیک ناگزیر خواهد بود. این مسئله در بخش بعد بررسی شده است.

مبحث دیگری که در این پژوهش در بخش میدان آزاد مورد توجه قرار گرفته است، حوزه‌ی اعتبار ابعاد پیشنهادی موجود برای هر المان جهت پوشش‌دادن محدوده‌ی بسامدی مناسب است. در این راستا، علاوه بر مدل‌های نیمه بی‌نهایت، مدل‌های خاک تک‌لایه قرار گرفته بر بستر صلب نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات

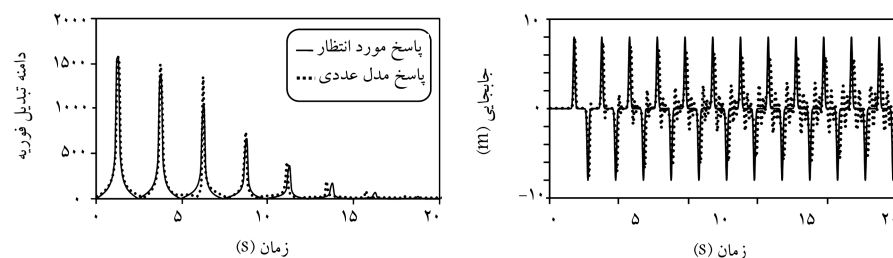


شکل ۸. روند محاسبه‌ی تابع تبدیل و رکورد ورودی جدید.

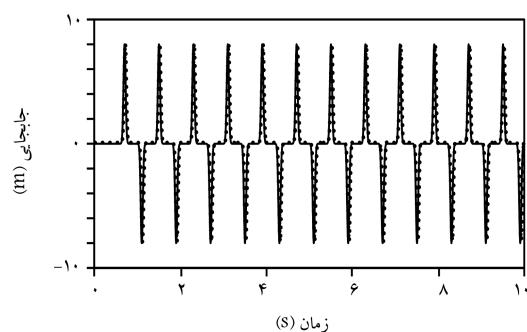
که مشاهده می‌شود، اثر مرز ویسکوالاستیک در تحریک ورودی پیچیده‌تر از مرز ویسکوز بوده و تغییر در دامنه‌ی پاسخ در بسامدهای مختلف متفاوت است. به منظور رفع این مشکل در این پژوهش تابع تبدیلی بین پاسخ ثبت‌شده در سطح و پاسخ مورد انتظار پیشنهاد شده است. این تابع تبدیل تأثیر مرز ویسکوالاستیک بر محتوای بسامدی پاسخ را نشان می‌دهد. با استفاده از این تابع می‌توان تحریک ورودی جدیدی برای ثبت پاسخ مورد انتظار در سطح مدل، محاسبه کرد. روند محاسبه‌ی تابع تبدیل و رکورد ورودی جدید در شکل ۸ ارائه شده است. بدین منظور مدل با مرز ویسکوالاستیک تحت تحریک خارجی دلخواه قرار گرفته و پاسخ در سطح مدل به‌دست آمده است. پیشنهاد می‌شود این تحریک به گونه‌ی انتخاب شود که در برگیرنده‌ی محدوده‌ی بسامدی کاربردی بالایی ترجیحاً تا ۲۵ هرتز باشد. حاصل تقسیم تبدیل فوری‌ی پاسخ مورد انتظار و پاسخ ثبت‌شده در سطح، تابع تبدیل سیستم است. پس از حصول تابع تبدیل می‌توان با ضرب‌کردن آن در محتوای بسامدی هر رکورد هدف دلخواه، رکورد جدیدی را به‌دست آورد. اعمال این رکورد جدید باعث



شکل ۱۰. رکوردهای جدید محاسبه شده با استفاده از تابع تبدیل.



شکل ۱۱. مقایسه ی پاسخ ثبت شده و محتوای بسامدی آن با مقادیر دقیق.



شکل ۱۲. مقایسه ی پاسخ ثبت شده و دقیق در مدل با بُعد المان ۰/۱.

۴. تصحیح مدل در اندرکنش خاک - سازه

تصحیح در تحریک ورودی به منظور حصول مناسب شرایط میدان آزاد در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت تأثیر حضور سازه در عملکرد مرزها مطالعه خواهد شد. اندرکنش خاک - سازه منجر به ایجاد امواج برشی و طولی با زوایای مختلف در سیستم می شود. همان گونه که پیشتر بیان شده است، ضرایب مرزهای جاذب براساس تئوری انتشار موج به صورت یک بُعدی تنظیم شده اند و لذا در جذب امواج مایل و سطحی، ضعف دارند. انتظار می رود این ضعف در

لایه همانند مشخصات فضای نیمه بی نهایت پیشین در نظر گرفته شده است. در این حالت با توجه به صلبیت سنگ بستر، نیازی به استفاده از مرز جاذب در کف مدل نیست و استفاده از درجات آزادی مقید برای گره های کف مناسب است. پاسخ مورد انتظار در سطح با توجه به عدم جذب موج در مرزها و همچنین بازگشت با فاز مخالف هنگام برخورد به کف مقید مدل محاسبه می شود. پالس جابه جایی، به عنوان تحریک در کف مدل های لایه یی که در طرفین با ستون های شبیه ساز تحریک میدان آزاد هستند، اعمال شده است. مقایسه ی پاسخ ثبت شده و محتوای بسامدی آن با مقادیر دقیق در شکل ۱۱ ارائه شده است. از آنجا که محتوای بسامدی این پالس از ۲۰ هرتز به بعد در حدود صفر است، انتظار می رود بُعد المان ۰/۵ متر، که حتی با معیار ۱۰/۸ نیز تا ۲۰ هرتز را پوشش می دهد، دقت کافی داشته باشد. لیکن مطابق شکل ۱۱ الف به نظر می رسد به دلیل محبوس شدن موج، معیار (۱۰/۸ الی ۸/۸) تغییر می کند. همان گونه که از شکل ۱۱ ب واضح است، محتوای بسامدی پاسخ ثبت شده با پاسخ مورد انتظار اختلاف دارد. به منظور بررسی این موضوع در تحلیل جداگانه ی بُعد المان از ۰/۵ متر به ۰/۱ متر کاهش داده شده است. پاسخ حاصل از مدل مذکور در شکل ۱۲ ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، پاسخ ها با مقدار مورد انتظار مطابق است. در این حالت بُعد المان انتخابی ملاک ۸/۴۰ را حاصل می سازد. این تذکر لازم است که طرح موضوع اثرگذاری لایه بندی خاک بر بُعد المان انتخابی در این پژوهش فقط به عنوان نشان دادن یک پدیده است و جهت ارائه ی یک معیار جامع برای تصحیح بُعد المان به مطالعات بیشتری احتیاج است.

می‌شود:

$$\omega_s^2 = \frac{k}{m}, \quad \omega_h^2 = \frac{k_h}{m}, \quad \omega_r^2 = \frac{k_r}{mh^2} \quad (10)$$

$$\xi_x = \frac{\omega_x c_x}{2k_x}, \quad \xi_\phi = \frac{\omega_\phi c_\phi}{2k_\phi}$$

پس از جایگذاری روابط ۱۰ در روابط ۷ الی ۹ و فرض میرایی مصالح صفر برای خاک و سازه، روابط ۱۱ الی ۱۳ حاصل می‌شود:

$$u_o = \frac{\omega_s^2}{\omega_r^2} \times \frac{1}{1 + 2\xi_x i} \times u \quad (11)$$

$$h\phi = \frac{\omega_s^2}{\omega_r^2} \times \frac{1}{1 + 2\xi_\phi i} \times u \quad (12)$$

$$\left(1 - \frac{\omega_s^2}{\omega_r^2} - \frac{\omega_s^2}{\omega_h^2} \times \frac{1}{1 + 2\xi_x i} - \frac{\omega_s^2}{\omega_r^2} \times \frac{1}{1 + 2\xi_\phi i} \right) \times u = \frac{\omega_s^2}{\omega_r^2} \times \frac{F}{m\omega_r^2} \quad (13)$$

از جهتی می‌دانیم که جابه‌جایی کلی سیستم برابر با رابطه‌ی ۱۴ است و با جایگذاری روابط ۱۱ و ۱۲ در رابطه‌ی ۱۴ به رابطه‌ی ۱۵ می‌رسیم، که ارتباط بین جابه‌جایی سازه و جابه‌جایی کلی سیستم را مشخص می‌کند:

$$u_{sys} = u_o + h\phi + u \quad (14)$$

$$u_{sys} = \left(\frac{\omega_s^2}{\omega_h^2} \times \frac{1}{1 + 2\xi_x i} + \frac{\omega_s^2}{\omega_r^2} \times \frac{1}{1 + 2\xi_\phi i} + 1 \right) \times u \quad (15)$$

با استفاده از روابط ۱۳ و ۱۵، پاسخ ارتعاش آزاد سیستم تحت ضربه واحد به دست می‌آید. به منظور حصول پاسخ دقیق، امیدانس دینامیکی موردنیاز در روابط ۱۰ از مطالعاتی در سال ۱۹۸۳^[۲۸] استخراج شده است. سازه‌ی تک درجه با نسبت لاغری ۰/۵ و ۱/۰ و بسامد بدون بُعد سازه برابر ۳/۰ فرض شده است. در تمامی پاسخ‌های ارتعاش آزاد، که از این پس ارائه خواهد شد، محور قائم جابه‌جایی بر حسب متر و محور افقی زمان بر حسب ثانیه است.

در ابتدا پاسخ مدل‌های با مرز ویسکوز در کف و طرفین مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۴، مقایسه‌ی پاسخ ارتعاش آزاد سازه تک درجه با مقادیر دقیق حاصل از روابط ۱۳ الی ۱۵ را نشان می‌دهد. پاسخ‌ها برای بسامد بدون بُعد ۳/۰ و ضرایب لاغری ۰/۵ و ۱/۰ ارائه شده است. اثر امواج بازتابی نامطلوب با دامنه‌ی قابل توجه و جابه‌جایی ماندگار در سیستم مشهود است. مقایسه‌ی مقادیر امیدانس دینامیکی حاصل از مدل‌های عددی با مقادیر دقیق نیز در شکل ۱۵ ارائه شده است. در شکل ۱۵ الف، سختی دینامیکی و در شکل ۱۵ ب، میرایی دینامیکی مقیاس‌شده سیستم برای درجات آزادی افقی، چرخشی و قائم ارائه شده است. محور افقی تمامی نمودارها بر حسب بسامد بی‌بعد تحریک مدرج شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به واسطه‌ی عدم توانایی مرز در جذب کامل امواج و همچنین جابه‌جایی ماندگار در سیستم مقادیر امیدانس دینامیکی با مقادیر دقیق فاصله‌ی زیادی دارد. این فاصله در سختی و میرایی چرخشی در بسامدهای بی‌بعد بالا بیشتر است و در درجات افقی و قائم تقریباً در تمامی نواحی بسامدی مشاهده می‌شود.

در ادامه، عملکرد مدل‌های با مرزهای ویسکوالاستیک در کف و مرزهای ویسکوز در طرفین نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه‌ی پاسخ ارتعاش آزاد و امیدانس دینامیکی با مقادیر دقیق مربوط به این مرزها به ترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ ارائه

حالاتی که سیستم با میرایی تشعشعی بالاست، چشم‌گیرتر باشد. میرایی تشعشعی در سیستم‌های با نسبت بالای بسامد بدون بُعد و همچنین سازه‌های با نسبت ارتفاع به بعد فونداسیون کم (سازه‌های چاق) بیشتر از سایر حالات است.^[۱] در این قسمت، مدل‌های عددی مفروض با مشخصات مشابه با بخش قبل است. سختی دینامیکی فونداسیون سطحی و پاسخ ارتعاش آزاد سازه تک درجه آزادی به‌عنوان ۲ اندیس در بررسی دقت عملکرد مدل‌های عددی در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی ارتعاش آزاد پاسخ مدل‌های عددی ضربه‌ی مثلثی شکل در زمان بسیار کوتاه ۰/۰۰۲ ثانیه در جرم سازه اعمال شده است. همچنین برای برآورد سختی دینامیکی نیز از اعمال ضربه و بررسی پاسخ سیستم در بسامدهای مختلف استفاده شده است.

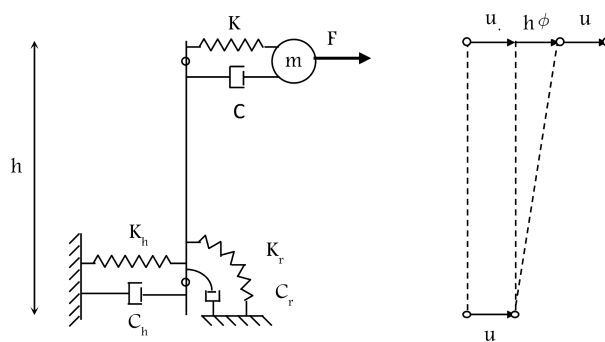
جهت صحت‌سنجی مدل‌های با مرز جاذب، نیاز به تعیین پاسخ‌های دقیق مبنا در هر دو حوزه‌ی امیدانس دینامیکی فونداسیون و پاسخ سیستم تک درجه آزادی قرارگرفته بر بستر انعطاف‌پذیر است. مقادیر دقیق سختی دینامیکی فونداسیون‌های نواری از مطالعاتی در سال ۱۹۸۳ استخراج شده است.^[۲۸] با در دست داشتن امیدانس‌های دینامیکی فونداسیون، پاسخ دقیق ارتعاش آزاد سازه‌ی تک درجه قرارگرفته بر بستر منعطف با استفاده تابع تبدیل سیستم‌های خاک - سازه قابل حصول است. با توجه به اعمال ضربه به جرم سازه‌ی تک درجه آزادی، روابط برای حصول این تابع در ادامه ارائه شده است. شکل ۱۳، سازه‌ی مفروض به همراه پارامترهای موردنیاز را نشان می‌دهد. سازه با ارتفاع h ، جرم m ، سختی k ، و میرایی c است. همچنین بستر با سختی افقی و گهواره‌ی k_h و k_r و میرایی افقی و گهواره‌ی C_h و C_r است. سازه تحت ضربه به‌صورت نیرو F در درجه آزادی جرمی خود قرار گرفته است. در اثر این تحریک، سیستم جابه‌جایی‌های u_o ، $h\phi$ و u را تجربه می‌کند و معادلات تعادل در گره جرم و همچنین درجات آزادی انتقالی و گهواره‌ی به‌صورت روابط ۷ الی ۹ نوشته می‌شود:

$$-m\omega^2(u + u_o + h\phi) + k(1 + 2\xi_x i)u = F \quad (7)$$

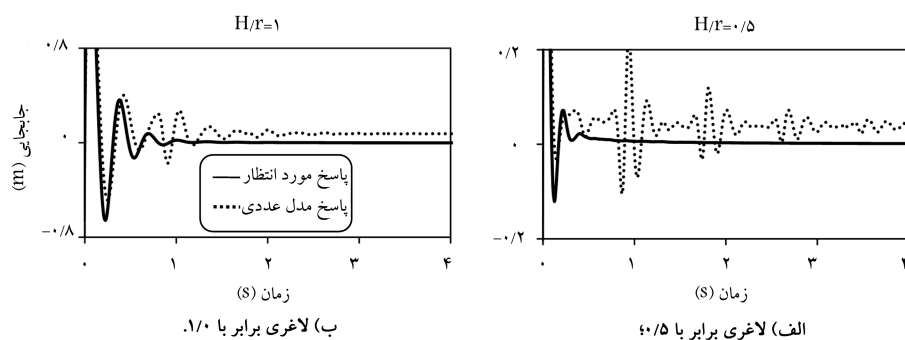
$$-m\omega^2(u + u_o + h\phi) + k_h(1 + 2\xi_x i + 2\xi_g i)u_o = F \quad (8)$$

$$-mh\omega^2(u + u_o + h\phi) + k_r(1 + 2\xi_\phi i + 2\xi_g i)\phi = F \times h \quad (9)$$

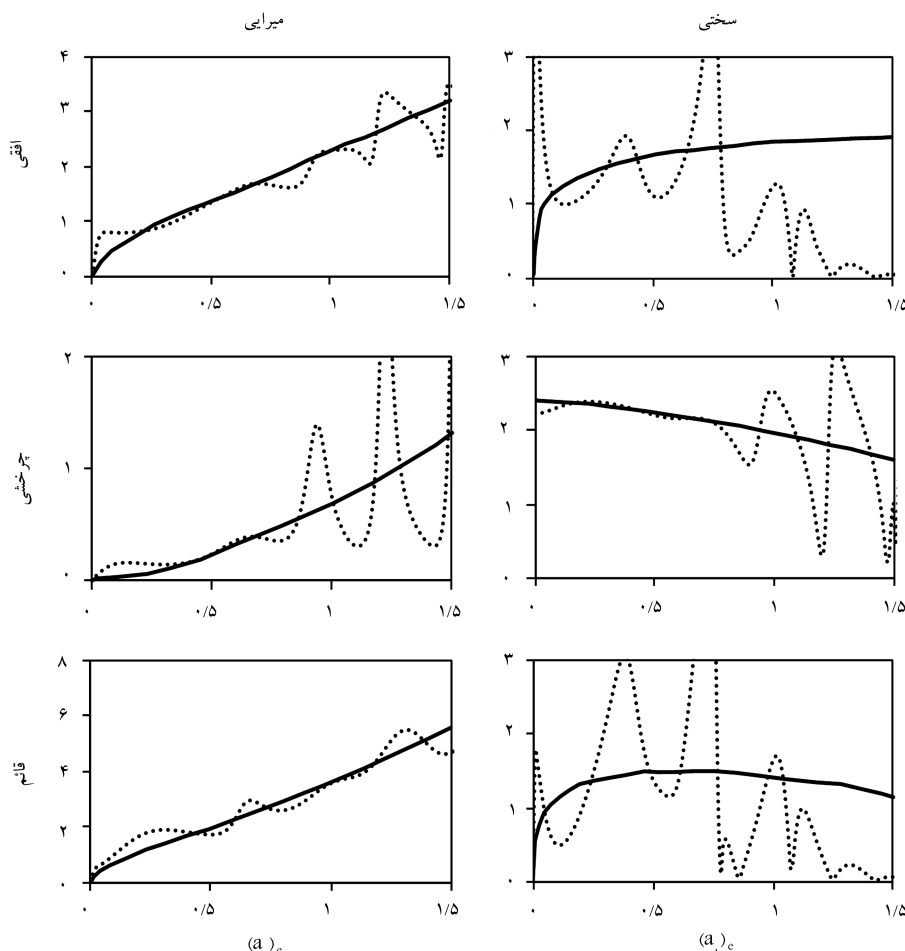
که در آن‌ها، ξ_g میرایی خاک و ξ میرایی سازه است که با حذف آن‌ها، میرایی سیستم به میرایی تشعشعی منحصر می‌شود. همچنین ω سرعت زاویه‌ی تحریک است و سایر مقادیر موردنیاز در روابط مذکور، نیز با استفاده از روابط ۱۰ حاصل



شکل ۱۳. سازه‌ی تک درجه معادل سیستم خاک - سازه تحت ضربه از گره جرم.



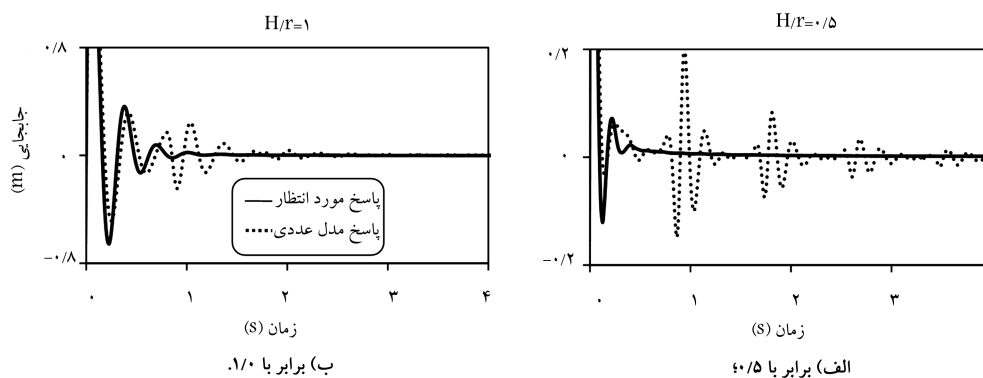
شکل ۱۴. مقایسه‌ی پاسخ دقیق و پاسخ حاصل از مدل عددی با مرز ویسکوز برای سازه‌ی با بسامد بدون بُعد ۰/۳.



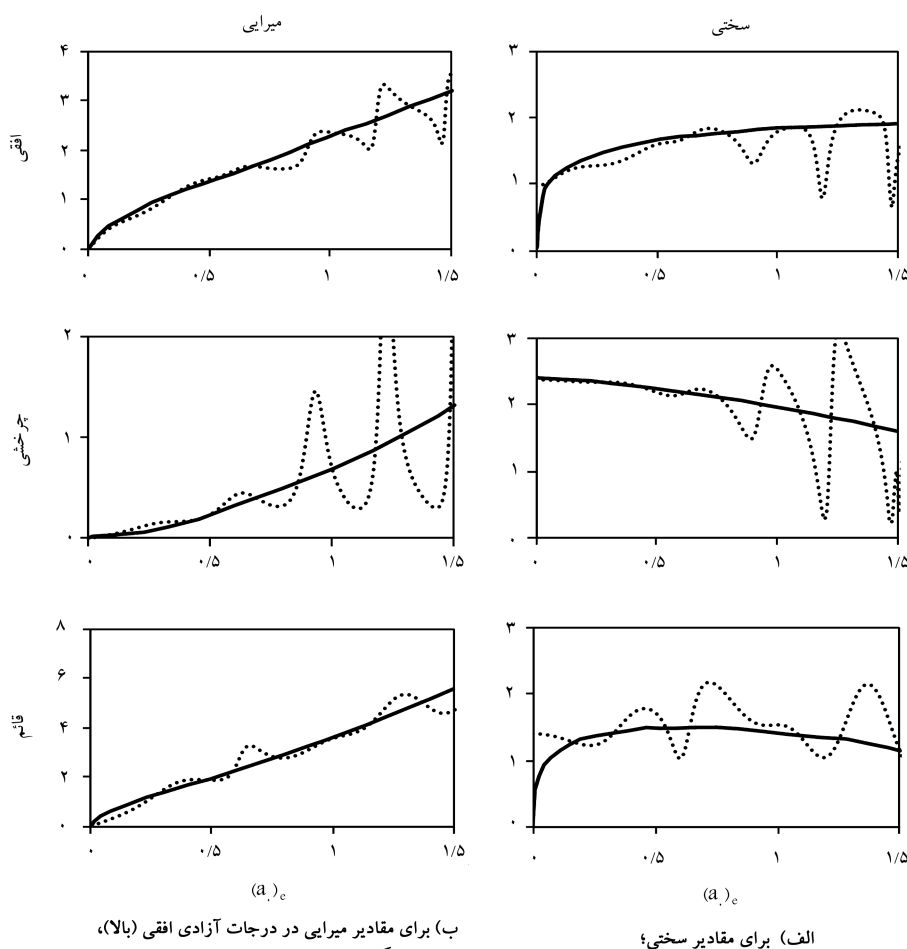
شکل ۱۵. مقایسه‌ی مقادیر دقیق امیدانس دینامیکی مقیاس‌شده و مقادیر حاصل از مدل‌های عددی برای مدل با مرز ویسکوز.

این نواقص راهکارهایی ارائه شده است. رویکرد متفاوتی که در ارائه‌ی این راهکارها مد نظر قرار گرفته آن است که برخلاف روش معمول، که المان‌های جاذب در محیط پیرامونی مدل قرار می‌گیرند، پیشنهاد شده است از المان‌های جاذب انرژی در داخل مدل نیز استفاده شود. به عبارتی، قید مکانی متداول موقعیت قرارگیری مرزها حذف شده و مرزها این امکان را می‌یابند که به داخل مدل تسری یابند. تنها قید در تعیین مرزها، عدم ایجاد اختلال در حرکت میدان آزاد و به‌کارافتادن آنها در برابر امواج تشعشعی ناشی از اندرکنش خاک - سازه است. لذا بر این اساس، به دلیل عملکرد

شده است. محورهای افقی و قائم نمودارها همانند موارد ارائه شده در مرز ویسکوز مدرج شده‌اند. جابه‌جایی ماندگار مشاهده شده در مدل‌های قبل در این حالت حذف و همچنین مقادیر امیدانس دینامیکی بسیار بهتر از مرز ویسکوز برآورد شده است. بهبود نتایج امیدانس‌های دینامیکی بیشتر در درجات آزادی افقی و قائم مشاهده می‌شود و تقریب‌ها در درجه آزادی چرخشی کماکان زیاد است. عدم توانایی مدل‌های عددی در برآورد امیدانس دینامیکی می‌تواند سبب خطای زیادی در بررسی مسائل اندرکنش خاک - سازه شود. در ادامه، به‌منظور کاهش



شکل ۱۶. مقایسه‌ی پاسخ دقیق و پاسخ حاصل از مدل عددی با مرز ویسکوالاستیک برای سازه‌ی با بسامد بدون بُعد ۰/۳ و نسبت‌های مختلف ارتفاع به نصف بُعد پی.



شکل ۱۷. مقایسه‌ی مقادیر دقیق امیدانسی دینامیکی و مقادیر حاصل از مدل‌های عددی برای مدل با مرز ویسکوالاستیک.

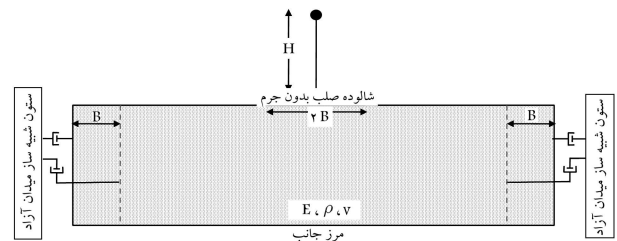
مرزهای طرفین مدل، اتصال گره داخلی میراگر مماسی به این مرز مقید شده است. قید مذکور پاسخ بین گره‌های طرفین مدل را یکسان می‌سازد و عملاً انتشار امواج برشی را در مسئله تضمین می‌کند. در پژوهش رویکرد انتقال مرزها به داخل مدل، راهکار نخست، انتقال گره‌های داخلی میراگر مماسی به داخل مدل است. شکل ۱۸، این راهکار را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در بررسی صورت پذیرفته، فاصله‌ی ۴ متری در داخل مدل برای مقید ساختن میراگرهای مماسی براساس آزمون و خطا

بهتر مدل‌های با مرز ویسکوالاستیک نسبت به مدل‌های با مرز ویسکوز، تصحیحات فقط برای مدل‌های با مرزهای ویسکوالاستیک در کف و مرزهای ویسکوز در طرفین ارائه شده است. با توجه به این رویکرد، در پژوهش حاضر ۲ راهکار جهت افزایش دقت مدل‌ها ارائه شده است. در پیشنهادها مطرح شده سعی شده است که از ارائه‌ی روش‌های پیچیده پرهیز شود. با توجه به اجتناب ناپذیر بودن مقیدسازی درجات آزادی انتقالی طرفین مدل مشاهده شده است که یکی از عوامل عدم عملکرد مناسب در

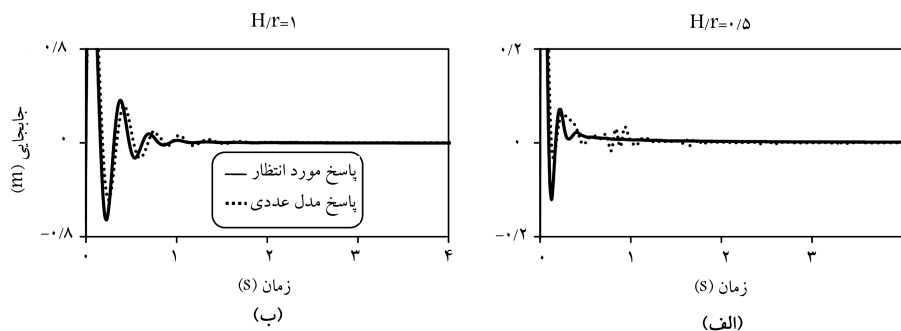
جذب مورد نظر صورت نمی پذیرد. از این رو تغییرات ضریب میراگرها با فاصله گرفتن از سازه به صورت افزایش تدریجی در نظر گرفته شده است. در این راستا، مجموعه‌ی مختلفی از تحلیل‌ها با میراگرهای سطحی با طول‌های قرارگیری مختلف و ضرایب متفاوت بررسی و در هر حالت، پاسخ حاصل از مدل عددی با مقادیر دقیق مقایسه و کانتورهای خطا ترسیم شده است. میراگرهای سطحی مورد استفاده فقط به سطح محدود نشده‌اند، بلکه تا عمق ۲ متری سطح برای تمام گره‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین توابع مختلفی برای تغییر ضرایب میراگرهای سطحی با توجه به بُعد ناحیه‌ی قرارگیری آنها مورد استفاده قرار گرفته است. پس از تحلیل چندین تابع با درجات مختلف، تابع درجه ۲ به فرم رابطه‌ی ۱۶ به عنوان تابع مناسب انتخاب شده است، که در آن، ضرایب میراگرها با توجه به طول ناحیه‌ی قرارگیری آنها تعیین شده‌اند. x فاصله از بر مدل است و تابع ذکر شده با مقدار بیشینه در بر مدل و مقدار کمینه در نزدیک‌ترین فاصله به سازه است. فاصله‌ی سازه از بر مدل، ۴۰ متر بوده و بُعد ناحیه‌ی قرارگیری میراگرها بین ۶ تا ۳۲ متر فرض شده است. به منظور مطالعه‌ی پارامتریک، سازه‌ی تک درجه آزادی با نسبت ارتفاع به بُعد پی برابر با ۰/۵ و بسامد بدون بُعد ۳/۰ انتخاب شده است. همچنین خاک به صورت خطی و با سرعت موج برشی برابر با ۶۷ متر بر ثانیه فرض شده است. انتخاب سرعت انتشار موج پایین از آن جهت است که بازگشت امواج از مرزها بهتر قابل رصد کردن باشد. لیکن انتخاب مذکور، خللی در رویکرد پیشنهادی ایجاد نمی‌کند. مقایسه‌ی پاسخ جابه‌جایی سیستم خاک - سازه با جابه‌جایی مشابه حاصل از مدل مینا، ملاک تعیین مقادیر خطاست. پاسخ ارتعاش آزاد سازه‌ی تک درجه آزادی در ۳ ناحیه بررسی شده است: ناحیه‌ی اول، پاسخ ارتعاش آزاد سازه است که تأثیری از امواج بازتابی نمی‌پذیرد و در شکل پاسخ از زمان صفر تا ۰/۶ ثانیه را شامل می‌شود. در صورتی که امواجی از میراگرهای سطحی بازتاب یابند، این ناحیه تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. ناحیه‌ی دوم، بردار پاسخ از ثانیه‌ی ۰/۳ الی ۰/۶ است، که با مقدار دقیق مقایسه و مقادیر زاویه‌ی میان بردارها ارائه شده است. ملاک بررسی خطا در این قسمت، انحراف زاویه‌ی برداری پاسخ از مقدار دقیق بر حسب درجه است. بدین صورت که پاسخ زمانی دقیق و پاسخ زمانی محاسبه شده از مدل، هر کدام به صورت یک بردار در نظر گرفته شده‌اند. سپس با استفاده از روابط جبر خطی، زاویه‌ی میان دو بردار به دست آمده است. هر چه زاویه به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان از انطباق بیشتر بردارهاست و در صورت افزایش زاویه، هم خوانی بردارها نامناسب ارزیابی می‌شود. ناحیه‌ی سوم، که مبنای محاسبه‌ی معیار خطای دوم است، اندازه‌ی برداری پاسخ در زمان ۰/۶ الی ۲/۵ ثانیه است. در صورتی که بازتاب امواج از مرزها رخ ندهد، انتظار می‌رود این اندازه مقدار صفر داشته باشد. در این بررسی ضریب ثابت C در تابع برابر با واحد فرض شده است. شکل ۲۲ الف و ۲۲ ب، کانتورهای این دو خطا را در انتهای مطالعه‌ی پارامتریک نشان می‌دهد. در هر دو شکل، محور قائم ضریب

و مقایسه‌ی تاریخچه‌ی جابه‌جایی قائم گره‌های مختلف مدل به صورت نمونه انتخاب شده است. این فاصله‌ی انتخابی برابر با B یعنی نصف بُعد پی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه میراگرهای مماسی فقط در برابر حرکات قائم گره‌ها عکس العمل نشان می‌دهند و جنبش میدان آزاد موج برشی با امتداد انتشار قائم فقط درجات آزادی افقی را درگیر می‌کند، عملاً تحریک میدان آزاد تأثیری از میراگرهای مماسی که به داخل مدل بسته شده‌اند، نمی‌پذیرد. شکل ۱۹، پاسخ ارتعاش آزاد سازه‌ی تک درجه آزادی در مدل عددی را با مقادیر دقیق مقایسه کرده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پاسخ ارتعاش آزاد سازه‌ی تک درجه آزادی با مقدار حاصل از مدل بزرگ تطبیق مناسبی دارد. همچنین در شکل ۲۰، مقادیر امیداندین دینامیکی مدل با مقادیر دقیق مقایسه شده است. مدراج سازی محورها همانند شکل ۱۵ انجام شده است، که مطابق آن سختی و میرایی در درجات آزادی افقی و گهواره‌ی بسیار بهتر از قبل تقریب زده شده است. لیکن، همان‌گونه که انتظار می‌رود، نتایج برای درجه آزادی قائم مناسب نیست. این راهکار برای بررسی سیستم‌های خاک سازه، که درجات آزادی افقی و گهواره‌ی آنها مهم‌تر از درجه آزادی قائم است، پیشنهاد می‌شود.

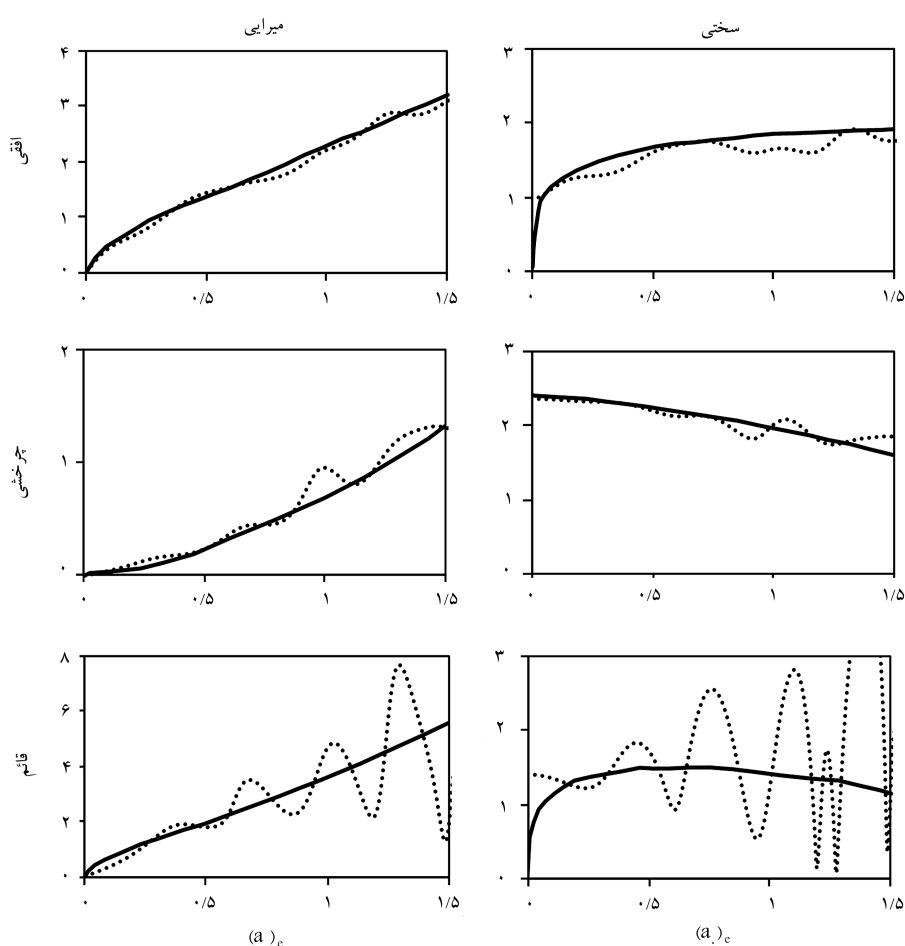
راهکار نمونه‌ی دوم بر انتقال میراگرها به سطح مدل متمرکز شده است. با توجه به اینکه یکی از مشکلات اصلی مرزهای جاذب، بازگشت امواج سطحی است، در راهکار دوم مجموعه‌ی از میراگرهای ویسکوز در جهت قائم در سطح مدل و طرفین سازه تعبیه شده است. شکل ۲۱، این تصحیح را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. با توجه به جهت قرارگیری این میراگرها در جهت قائم، هیچ تغییری در پاسخ میدان آزاد امواج برش قائم ایجاد نشده است و از قید اصلی رویکرد مورد توجه این پژوهش عدول نخواهد شد. انتظار می‌رود که این میراگرهای سطحی، امواج سطحی تابشی از سازه به طرفین مدل را جذب کنند. نکته‌ی حائز اهمیت در این روش، برآورد مناسب مشخصات ناحیه‌ی قرارگیری و تعیین ضریب مناسب برای میراگرهای سطحی است. در صورتی که ضرایب در تمامی طول قرارگیری میراگرها مقدار بالایی داشته باشند، امواج سطحی در اولین برخورد به میراگرها بازتاب می‌یابند و عملاً



شکل ۱۸. راهکار اول به صورت شماتیک جهت بهبود عملکرد مرزهای جاذب از طریق تغییر موقعیت مکانی میراگرهای قائم جانبی به داخل مدل.



شکل ۱۹. مقایسه‌ی پاسخ ارتعاش آزاد ثبت شده توسط سازه‌ی قرار گرفته بر مدل مرز ویسکوالاستیک با تصحیح اول با مقادیر دقیق.



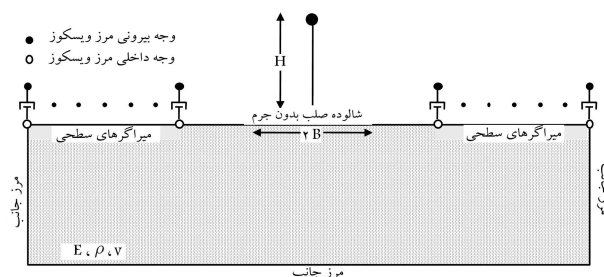
شکل ۲۰. مقایسه‌ی مقادیر دقیق امپدانس دینامیکی و مقادیر حاصل از مدل‌های عددی برای مدل با مرز ویسکوالاستیک تصحیح‌شده توسط راهکار اول.

این پژوهش مشخصات بهینه‌ی نسبی برای میراگرها پیشنهاد شده و بهینه‌یابی جهت یافتن بهترین مشخصات انجام نشده است. زیرا هدف این پژوهش معرفی رویکرد انتقال مرزها به داخل مدل است و معرفی مصادیق بهینه‌ی مطلق به مطالعات آتی موکول شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در این بررسی گزینه‌ی انتخابی با نسبت لاغری ۰/۵ و بسامد بدون بُعد ۳/۰، میرایی تشعشعی بالایی نسبت به سایر حالات دارد. لذا بهبود حاصل از روش ذکرشده، در حالتی که از سیستم میرایی تشعشعی پایین‌تری انتظار می‌رود، نیز مورد انتظار خواهد بود.

$$Dashpot\ Coef = D(x - dashpotlength)^2 + C \quad (16)$$

$$Dashpot\ Coef = 100(x - 8)^2 + 1 \quad (17)$$

شکل ۲۳، ارتعاش آزاد سازی تک درجه‌ی قرارگرفته بر مدل تصحیح‌شده با این راهکار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این روش باعث از بین رفتن کامل امواج بازتابی نشده است، لیکن دامنه‌ی موج بازتابی را تا حد زیادی کاهش داده است. علاوه بر پاسخ ارتعاش آزاد لازم است عملکرد این راهکار از طریق بررسی امپدانس دینامیکی برای مدل مورد استفاده نیز کنترل شود. برای این منظور مقادیر امپدانس دینامیکی نیز در شکل ۲۴ ارائه شده است، که مطابق آن مقادیر سختی و میرایی در درجات آزادی افقی و گهواره‌یی با تقریب مناسب به دست آمده است.



شکل ۲۱. راهکار دوم به صورت شماتیک جهت بهبود عملکرد جذب امواج سطحی از طریق قراردادن میراگرهای با امتداد قائم در سطح.

D و محور افقی طول قرارگیری میراگرها را نمایش می‌دهد. نقاطی که در آنجا هر دو خط مقدار کمیته داشته باشند، می‌تواند به عنوان ملاک انتخاب تابع مناسب، برای تعیین مشخصات میراگرها در نظر گرفته شود. همان‌گونه که در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود، افزایش طول ناحیه‌ی قرارگیری میراگرها، سبب افزایش خطا در انحراف ناحیه‌ی دوم پاسخ شده است. نقطه‌ی بهینه‌ی نسبی انتخابی به صورت ستاره در شکل ۲۲ نشان داده شده است. این نقطه متناظر دمپ‌های سطحی است که در طول و عمقی به میزان ۸ متر و ۲ متر توزیع شده و ضرایبی مطابق رابطه ۱۷ برحسب کیلونیوتن - ثانیه بر متر به آنها تخصیص داده شده است. این تذکر لازم است که در

در مقایسه‌ی دو راهکار ارائه شده، راهکار اول تا حدودی تقریب بهتری از سختی و میرایی در درجه آزادی افقی و گهواره‌یی به دست آورده است؛ در حالی که راهکار دوم، سختی و میرایی درجه آزادی قائم را به صورت نسبی بهتر از راهکار قبل به دست آورده است.

۵. نتیجه‌گیری

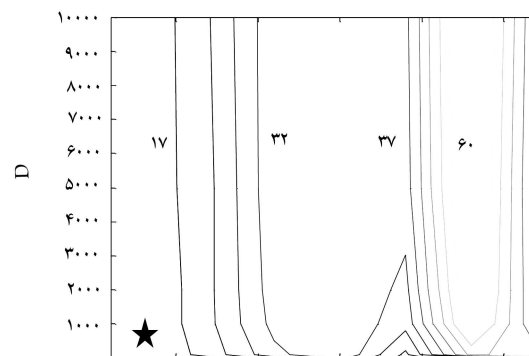
در نوشتار حاضر، عملکرد مرزهای جاذب در مدل‌سازی مسائل اندرکنش خاک - سازه مورد بررسی قرار گرفته است. مشکلات متعددی همچون تغییر در تحریک ورودی، وجود جابه‌جایی ماندگار در انتهای تحلیل و بازتاب ناخواسته‌ی امواج سطحی و بدنه‌یی با استفاده از مدل‌های عددی خاک - سازه نشان داده شده است. با توجه به ضعف‌های موجود، مجموعه‌یی از راه حل‌ها برای تصحیح مرزها از هر دو جنبه‌ی جذب و اعمال تحریک ورودی ارائه شده است. در ابتدا، راهکاری برای اعمال تحریک ورودی مناسب از مرزهای ویسکوالاستیک ارائه شده است.

مرزهای ویسکوالاستیک، دامنه‌ی تحریک ورودی را در بسامدهای مختلف به میزان متفاوتی تغییر می‌دهند. میزان تغییر با استفاده از تابع تبدیل بین تبدیل فوری‌ی پاسخ ثبت شده و پاسخ موردانتظار محاسبه شده است. با استفاده از تابع تبدیل مذکور می‌توان تحریک ورودی را به نحو مناسبی تغییر داد تا پاسخ موردانتظار در سطح حاصل شود. مطالعه‌ی حاضر نشان می‌دهد که با استفاده از روش ذکرشده، تحریک میدان آزاد امواج برشی با امتداد انتشار قائم در مدل‌های با مرزهای ویسکوالاستیک به نحو مناسبی حاصل می‌شود. همچنین در این پژوهش با بررسی اجمالی در مورد شرط کمینه‌ی بعد المان برای پوشش دادن محدوده‌ی مناسب بسامدی نشان داده شده است، که در حالت خاک تک لایه‌ی قرارگرفته بر بستر صلب، کمینه‌ی ابعاد پایین‌تری از مقادیر بیان شده در ادبیات فنی کنونی موردنیاز است.

در مرحله‌ی دوم، عملکرد مرزهای جاذب متداول مبتنی بر تئوری انتشار یک بعدی در جذب امواج سطحی و بدنه‌یی ناشی از اندرکنش خاک - سازه مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نمونه‌ی بررسی شده، بازتاب‌های قابل توجهی از مرزهای جاذب طرفین مدل مشاهده می‌شود. جهت کاهش این مشکل، رویکردی ارائه شده است که مطابق آن برخلاف روش‌های معمول که فقط از المان‌های جاذب انرژی در مرزهای پیرامونی مدل استفاده می‌شود، می‌توان مرزهای جاذب را به شرط عدم اختلال در پاسخ میدان آزاد در هر موقعیتی از مدل قرار داد. به عنوان نمونه، دو راهکار ساده برای جذب بهتر امواج ناخواسته در سیستم ارائه شده است. در راهکار اول، گره داخلی میراگرهای مماسی طرفین مدل به جای قرارگرفتن در پیرامون مدل، در فاصله‌یی به اندازه‌ی نیمی از بعد فونداسیون در داخل مدل بسته می‌شوند. در راهکار دوم، مجموعه‌یی از میراگرهای جاذب انرژی در سطح آزاد مدل مورد استفاده قرار گرفته است. قرارگیری این میراگرها به نحوی است که تحریک میدان آزاد را متأثر نخواهد ساخت.

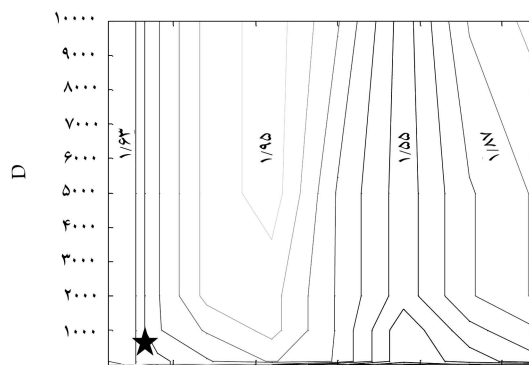
ضرایب و طول این میراگرهای سطحی با استفاده از مطالعه‌ی پارامتریک به نحوی که جذب بهینه‌ی نسبی در امواج سطحی را موجب شود، تنظیم شده است. نشان داده شده است که دو راهکار ساده ذکرشده به نحو مناسبی دامنه‌ی امواج بازتابی را کاهش می‌دهد. عملکرد مؤثر این روش‌ها از طریق بررسی پاسخ ارتعاش آزاد سازه و مقادیر امیدانسی دینامیکی مدل نشان شده است. اگر چه راهکار دوم در درجه آزادی قائم، برآورد بهتری از مقادیر دقیق دارد، ولی راهکار اول در درجات

زاویه برداری انحراف بین پاسخ ۰/۳ تا ۰/۶ ثانیه



الف) مقایسه‌ی انحراف قسمت اول پاسخ با زاویه؛

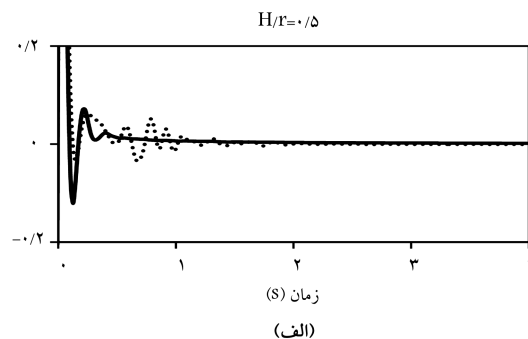
اندازه برداری پاسخ از ۰/۶ تا ۰/۵ ثانیه (x1000)



طول میراگرها

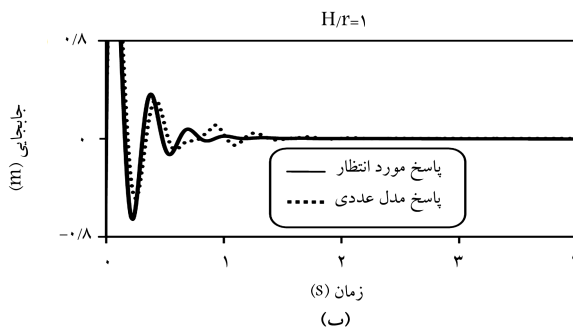
ب) مقایسه‌ی اندازه‌ی بردار پاسخ در قسمت دوم.

شکل ۲۲. کانتورهای خطا در تعیین مشخصات دمپرهای سطحی.



زمان (s)

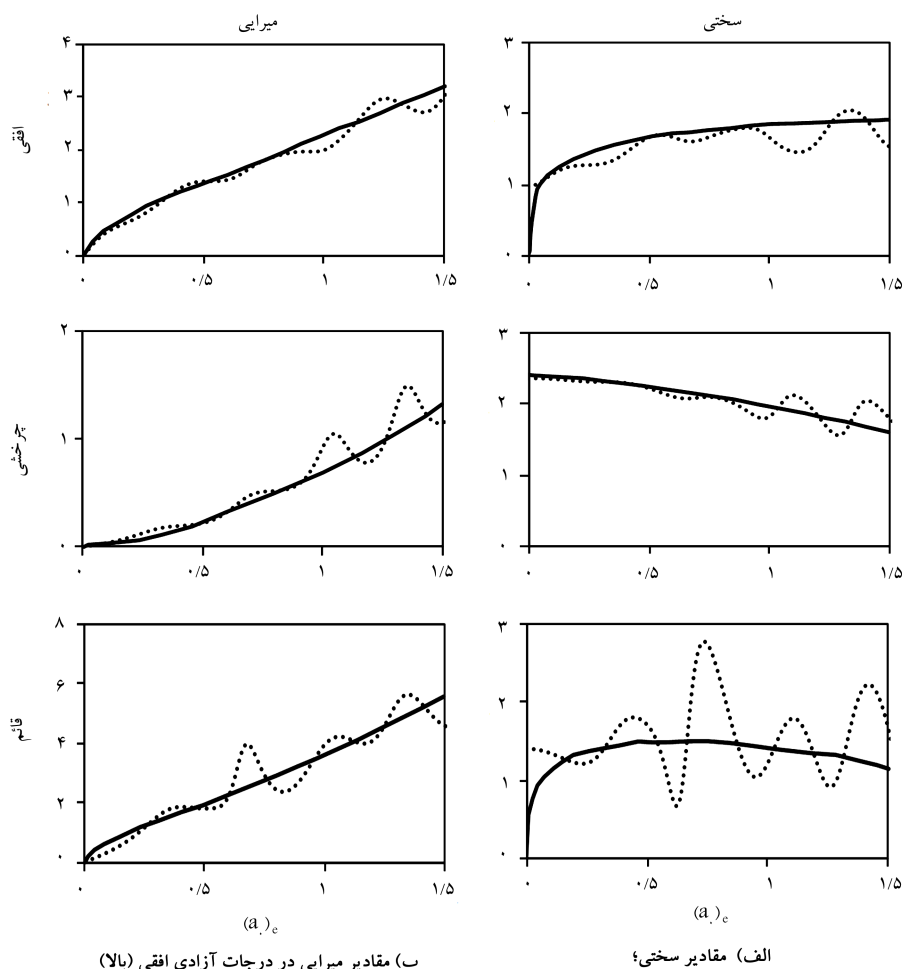
الف)



زمان (s)

ب)

شکل ۲۳. مقایسه‌ی پاسخ ارتعاش آزاد ثبت شده توسط سازه‌ی قرارگرفته بر مدل با مرز ویسکوالاستیک با تصحیح دوم با مقادیر دقیق.



(ب) مقادیر میرایی در درجات آزادی افقی (بالا) گهواره بی (وسط)، و قائم (پایین).

(الف) مقادیر سختی؛

شکل ۲۴. مقایسه‌ی مقادیر دقیق امیدانسی دینامیکی و مقادیر حاصل از مدل‌های عدد برای مدل با مرز ویسکوالاستیک تصحیح‌شده از طریق راهکار دوم.

تقدیر و تشکر

این پژوهش در راستای انجام پروژه‌ی پژوهشی به شماره‌ی کد ۵۶۴ در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تعریف و از سوی این مؤسسه پشتیبانی شده است، که بدین وسیله از این پشتیبانی قدردانی می‌شود.

آزادی افقی و گهواره‌ی بی با دقت بهتری حاصل شده است. دو راهکار ارائه‌شده فقط نمونه‌هایی برای ارائه‌ی عملکرد بهتر قرارگرفتن المان‌های جاذب در داخل مدل هستند. در انتها این نکته ذکر می‌شود که برای مسائل پیچیده‌تر اندرکنش خاک - سازه، همچون: بسترهای لایه‌بی، فونداسیون‌های مدفون، و تحلیل‌های غیرخطی به بررسی‌های بیشتری نیاز است.

منابع (References)

1. Wolf, P.J., *Dynamic Soil Structure Interaction*, Prentice Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, ASCE (1985).
2. Kramer, S.L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, Prentice Hall, Upper Saddle River (1996).
3. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. "Finite dynamic model for infinite media", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, **95**(EM4), pp. 859-877 (1969).
4. Engquist, B. and Majda, A. "Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of the waves", *Math. Computation*, **31**(139), pp. 629-651 (1977).
5. Ang, H. and Newmark, N., *Development of a Transmitting Boundary for Numerical Wave Motion Calculation*, Report 2631, Defense Atomic Support Agency (1972).
6. Smith, W. "A nonreflecting plane boundary for wave propagation problems", *Journal of Comp. Physics*,

- 15(4), pp. 492-503 (1974).
7. Liao, Z. and Wong, H. "A transmitting boundary for the numerical simulation of elastic wave propagation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **3**(4), pp. 174-183 (1984).
8. Kausel, E. "Local transmitting boundaries", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **114**(6), pp. 1011-1027 (1988).
9. Deeks, A.J. and Randolph, M.F. "Axisymmetric time-domain transmitting boundaries", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **120**(1), pp. 25-42 (1994).
10. Liu, J., Du, Y., Du, X., Wang, Z. and Wu, J. "3D viscous-spring artificial boundary in time domain", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **5**(1), pp. 93-102 (2006).
11. Du, X. and Zhao, M. "A local time-domain transmitting boundary for simulating cylindrical elastic wave propagation in infinite media", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(10), pp. 937-946 (2010).
12. Li, P. and Song, E.X. "A high-order time-domain transmitting boundary for cylindrical wave propagation problems in unbounded saturated poroelastic media", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **48**, pp. 48-62 (May 2013).
13. Berenger, J.P. "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves", *Journal of Computational Physics*, **114**(2), pp. 185-200 (1994).
14. Basu, U. "Explicit finite element perfectly matched layer for transient three-dimensional elastic waves", *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, **77**(2), pp. 151-176 (2009).
15. Lee, J.H., Kim, J.K. and Kim, J.H. "Nonlinear analysis of soil-structure interaction using perfectly matched discrete layers", *Computers and Structures*, **142**, pp. 28-44 (2014).
16. Jeong, C., Esmailzadeh Seylabi, E. and Taciroglu, E. "A time-domain substructuring method for dynamic soil structure interaction analysis of arbitrarily shaped foundation systems on heterogeneous media", *Computing in Civil Engineering*, pp. 346-353 (2013).
17. Guddati, M.N. and Tassoulas, J.L. "Continued-fraction absorbing boundary conditions for the wave equation", *Journal of Computational Acoustics*, **8**(01), pp. 139-156 (2000).
18. Lee, J.H. and Tassoulas, J.L. "Consistent transmitting boundary with continued-fraction absorbing boundary conditions for analysis of soil-structure interaction in a layered half-space", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **200**(13), pp. 1509-1525 (2011).
19. Zdravkovic, L. and Kontoe, S. "Some issues in modeling boundary conditions in dynamic geotechnical analysis", *The 12th international Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, India*, pp. 1-6 (2008).
20. Wolf, P.J., *Soil Structure Interaction in Time Domain*, Prentice Hall (1988).
21. Zienkiewicz, O.C., Bianic, N. and Shen, F.Q. "Earthquake input definition and the transmitting boundary condition", *Conf. Advances in Computational Non-Linear Mechanics*, Editor: St. Doltnis I., pp. 109-138 (1988).
22. ABAQUS Inc., ABAQUS V.6.11 User's Manual, Providence, Rhode Island, USA (2011).
23. Itasca Consulting Group Inc, *FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Version 4.0, Minneapolis, Minnesota, USA (2001).
24. Ebrahimian, M. "The effect of foundation flexibility on total response of soil-structure systems", MSc Thesis, Sharif University of Technology (2009).
25. Kuhlmeier, R.L. "Vertical vibrations of footings embedded in layered media", Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, California (1969).
26. Kuhlmeier, R.L. and Lysmer, J. "Finite element method accuracy for wave propagation problems", *J. Soil Mech. and Foundations Div., ASCE*, **99**(5), pp. 421-427 (1973).
27. Ghannad, M.A., Fukuwa, N. and Nishizaka R. "A study on the frequency and damping of soil-structure systems using a simplified model", *Journal of Structural Engineering, Architectural Institute of Japan (AIJ)*, **44B**, pp. 85-93 (1998).
28. Gazetas, G. "Analysis of machine foundation vibrations: State of the art", *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **2**(1), pp. 2-42 (1983).
29. Sieffert, J.G. and Cevaer, F., *Handbook of Impedance Functions: Surface Foundations*, Ovest Édition (1992).
30. Mejia, L.H. and Dawson, E.M. "Earthquake deconvolution for FLAC", *Proceeding 4th International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics*, Madrid, Spain (2006).