

بررسی تأثیر آرایش گودالهای باز در کاهش ارتعاشات ناشی از عملکرد ماشین آلات ضربه‌ای با استفاده از مدل اجزای محدود

آرش محمدی فارسانی* و امیر مهدی حلییان**
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۱۱/۸ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۸/۶/۲۱)

چکیده -

واژگان کلیدی :

** - استادیار

* - دانشجوی کارشناسی ارشد

Effect of Vibration Barrier Arrangements on Controlling Vibrations in Shock-producing Equipment

A. Mohammadi Frasani and A. M. Halabian

Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: *Hammers or presses commonly used in modern manufacturing facilities produce remarkable vibrations during their operation. Foundations supporting these machines experience powerful dynamic effects which may extend to the surrounding areas and affect workers, sensitive machines within the same facility, or the neighboring residential areas. To control free-field impact-induced vibrations, wave barriers may be constructed in the vicinity of the vibration source. This paper examines the efficiency of soft barriers (open trenches) on screening pulse-induced waves for foundations resting on a deep elastic layer or a layer of limited thickness underlain by rigid bedrock. The effectiveness of open trenches as wave barriers is examined for different cases of soil layer depth, arrangement for double trenches, and trench location. A 2D finite element model is constructed and some parametric analyses are performed in the time domain. Different arrangements of wave barriers in vibration isolation for shock-producing equipment are assessed for their efficiency. The results show that using the second trench could remarkably reduce the vibration amplitude. Finally, some guidelines are defined for their use*

Keywords: *Wave barriers, Open trenches, Shock producing machines, Finite element method.*

۱- مقدمه

به منظور کاهش دامنه ارتعاشات ناشی از عملکرد ماشین آلات و یا جلوگیری از انتشار آنها به محیط اطراف، می‌توان موانع ارتعاشی نظیر گودالهای باز را در اطراف چشمه ارتعاش و در عمق لایه خاک احداث کرد. این کار به این دلیل انجام می‌شود که برخی از ماشین آلات نظیر چکشها و پرسها طی عملکردشان، تنشهای دینامیکی نسبتاً زیادی به فونداسیون و خاک اطراف خود وارد می‌کنند؛ این تنشها به شکل موج از طریق خاک، به محیط اطراف خود نفوذ و گسترش یافته و باعث ارتعاش نقاط مختلف و به‌ویژه روی سطح خاک می‌شوند. بنابراین بدیهی است چنانچه در مجاورت دستگاه مزبور تجهیزات حساس دیگری نصب شده باشند، این ارتعاشات می‌توانند عملکرد مناسب آنها را مختل و یا کارگران مشغول به کار را آزار دهند و حتی در برخی مواقع، انجام کار را برای آنها ناممکن سازند. از دیگر مشکلاتی که ممکن است به دلیل عدم تمهیدات لازم به وجود آید، اثرات سوء فیزیولوژیکی و روانی حاصل از این ارتعاشات در نواحی مسکونی مجاور آنهاست. به این ترتیب اهمیت لزوم در نظر گرفتن راهکارهایی برای حل این مسائل، مشخص می‌شود.

موانع جلوگیری کننده از ارتعاش یا موج، به‌طور کلی به دو نوع موانع نرم و موانع سخت تقسیم‌بندی می‌شوند. برای مثال گودالهای باز و یا گودالهای پر شده با مصالح نرم، نظیر شفته بتونیت، از جمله موانع نرم محسوب می‌شوند و گودالهای پر شده با بتن یا دیوارهای بتنی از جمله موانع سخت‌اند. مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی زیادی در مورد تأثیر موانع ارتعاش، در کاهش ارتعاشات و حداقل کردن آنها، برای ماشین آلات رفت و برگشتی و ماشین آلات دورانی، انجام شده است و اکثر آنها ارتعاشات را در نیم فضای همگن در نظر گرفته‌اند. به عنوان مثال وودز [۱] آزمایشات صحرایی را بر اساس ارتعاشات سطحی برای بررسی جداسازی ارتعاشی گودالهای باز انجام داد. وی گودالهای باز را در نزدیکی چشمه ارتعاش، جایی که امواج حجمی حاکم‌اند، و دور از چشمه ارتعاش، جایی که امواج رایلی حاکم‌اند، مورد بررسی قرار داد و دستورات عملیاتی برای طراحی این گودالها ارائه داد، به‌طوری که دامنه‌های ارتعاش تا ۷۵ درصد کاهش یابد. بسکوس و همکاران [۲] برای مطالعه عملکرد گودالهای باز و گودالهای پر شده به‌عنوان موانع جلوگیری کننده از ارتعاش، از روش المان مرزی در حوزه فرکانس استفاده کردند. آنها با انجام مطالعات

پارامتریک، به ارزیابی اهمیت هندسه‌های مختلف، مصالح و مقادیر مختلف پارامترهای دینامیکی پرداخته و دستورات عملیاتی مفیدی را برای مهندسان طراح ارائه دادند. احمد و الحسینی [۳] نیز از روش المان مرزی استفاده کرده و مطالعه‌ای پارامتری در مورد تأثیر گودالهای باز و گودالهای پر شده، به منظور جداسازی ارتعاشات هارمونیک انجام دادند. آنها تأثیر عواملی نظیر عمق، پهنا و مصالح مورد استفاده در گودالها را مطالعه و یک روند طراحی ساده را برای آنها پیشنهاد کردند. اما در مورد ارزیابی عملکرد موانع موج در برابر ارتعاشات ناشی از بارهای گذرا و تکرار شونده، مطالعات بسیار محدودی صورت گرفته است. تأثیر گودالهای باز و گودالهای پر شده در کنترل ارتعاشات ناشی از بارگذاریهای ترافیکی حاصل از حرکت قطار با محتوی فرکانسی خیلی کم توسط یانگ و هونگ [۴] طی یک مطالعه عددی مبتنی بر روش اجزای محدود با استفاده از المانهای نیمه بی‌نهایت مورد بررسی قرار گرفت. آنها ضمن بررسی تأثیر موانع ارتعاش در محدوده‌های مختلف فرکانس بارگذاری، نتیجه گرفتند که استفاده از گودال برای فرکانسهای کم در کاهش ارتعاشات مناسب نیست. کاتیس و همکاران [۵] با استفاده از یک مدل المان مرزی در حوزه فرکانس، در خصوص جداسازی ارتعاشات، میزان تأثیر گودالهای باز و پر شده را با شمعهای توخالی و بتنی مقایسه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که گودالها نسبت به موانع شمع مؤثرترند؛ به جز در مورد ارتعاشاتی که طول موجهای بزرگی داشته و استفاده از موانع عمیق نظیر شمعها عملی تر خواهد بود. النگار و شهاب [۶] تأثیر هر کدام از موانع نرم و سخت را در کاهش ارتعاشات ناشی از عملکرد ماشین آلات ضربه‌ای مولد بارهای تکرار شونده، مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از یک مدل اجزای محدود دو بعدی، اثر یک گودال باز، یک گودال پر شده با مصالح نرم و یک دیواره بتنی را به‌طور جداگانه، بر کاهش دامنه ارتعاشات مطالعه کردند. عواملی نظیر عمق لایه خاک، موقعیت گودال از لبه فونداسیون و عمق مدفون فونداسیون، در مطالعه آنها در نظر گرفته شد و به این نتیجه

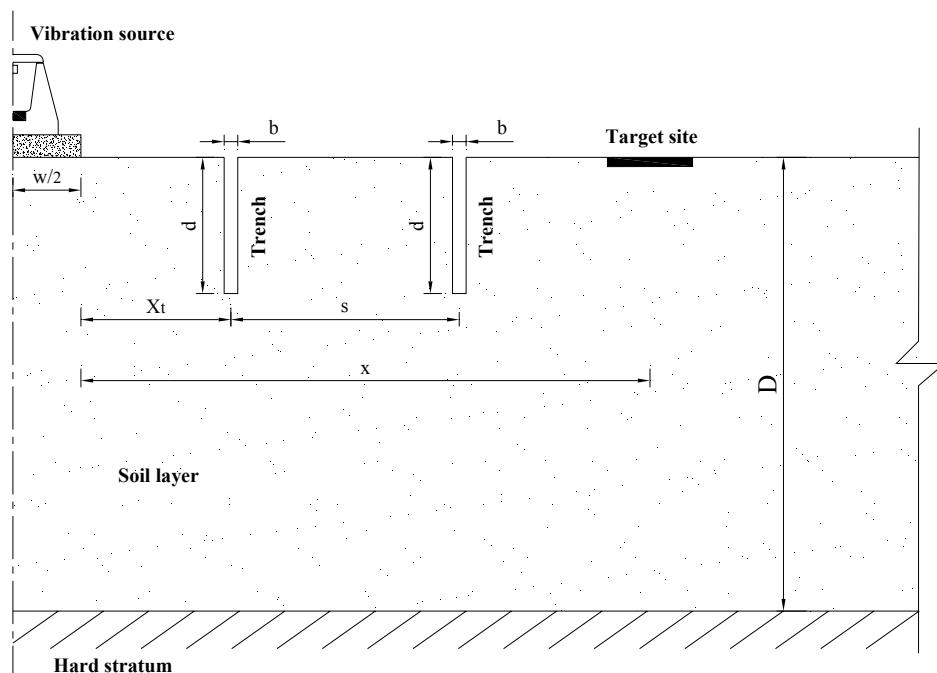
رسیدند که موانع موج مورد بررسی، اعم از موانع نرم و سخت، برای جداسازی ارتعاش فونداسیونهای چکش مستقر بر روی خاک نیمه بی‌نهایت، مؤثر نیستند. همچنین در خصوص لایه خاک با ضخامت محدود، تأثیر مانع موج با افزایش عمق گودال نسبت به ضخامت لایه خاک افزایش می‌یابد. به‌علاوه، تأثیر موانع موج نرم مانند گودالهای باز، از موانع موج سخت نظیر دیواره بتنی بسیار بیشتر است و عمق مدفونی فونداسیون روی عملکرد گودال نیز تأثیری ندارد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در تحقیق النگار و شهاب [۶] که نشان می‌داد در برخی موارد به‌ویژه برای خاک نیمه بی‌نهایت اثر مانع موج نرم تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کنترل ارتعاش ندارد، در مطالعه حاضر ضمن بررسی عوامل مذکور در تحقیق اشاره شده، آرایشهای مختلف چند گودال در کاهش دامنه ارتعاشات برای خاک لایه‌ای و نیمه بی‌نهایت مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو در این تحقیق، با استفاده از یک مدل اجزای محدود دو بعدی، به بررسی تأثیر دو گودال باز و با در نظر گرفتن عواملی همچون: عمق لایه خاک، موقعیت گودالها از لبه فونداسیون و همچنین فاصله گودالها نسبت به یکدیگر، پرداخته شده است. به منظور انجام یک مقایسه جامع، با حالتی که فقط یک گودال وجود داشته باشد، از مدل‌های یکسانی برای تحلیلها استفاده شده است. لازم به ذکر است که پیش از این در مورد اثر دو گودال و موقعیت آنها مطالعه‌ای صورت نگرفته است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- تعریف مسئله، روش تحلیل و مشخصات مدل

مسئله مورد بررسی در این تحقیق، یک فونداسیون چکش است که بر روی لایه‌ای از خاک به ضخامت D قرار گرفته و در زیر آن یک لایه سخت فرض می‌شود. عرض فونداسیون w بوده و فرض می‌شود دو گودال باز با دیواره‌های قائم، هر کدام به عرض b و عمق d و با فاصله s از یکدیگر در مجاورت پی چکش حفر شده‌اند. گودال نزدیکتر به چشمه ارتعاش، در فاصله x_1 از لبه فونداسیون قرار می‌گیرد. عرض گودال یک دهم



شکل ۱- گودالهای باز مورد استفاده برای جداسازی ارتعاش و پارامترهای هندسی مسئله

فرض می‌شود. همچنین تماس کاملی بین فونداسیون و خاک، در نظر گرفته می‌شود. این فرض برای سطح تغییر شکل‌های مجاز، در مورد فونداسیونهای ماشین آلات قابل توجه است. به‌عنوان یک فرض متعارف در دینامیک خاک، خصوصیات خاک در سرتاسر عمق لایه، یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. در نهایت پاسخ دینامیکی سیستم، تنها برای بار ضربه‌ای محاسبه می‌شود. این بدان معناست که پاسخ دینامیکی سیستم، در ادامه پاسخ استاتیکی ناشی از وزن ماشین‌آلات، فونداسیون و خاک به‌دست آمده است. به منظور انجام صحت‌سنجی، نتایج به‌دست آمده از مدل بسط داده شده برای یک گودال با نتایج ارائه شده در مرجع [۶] که در آن مشخصات مصالح لایه خاک به‌صورت:

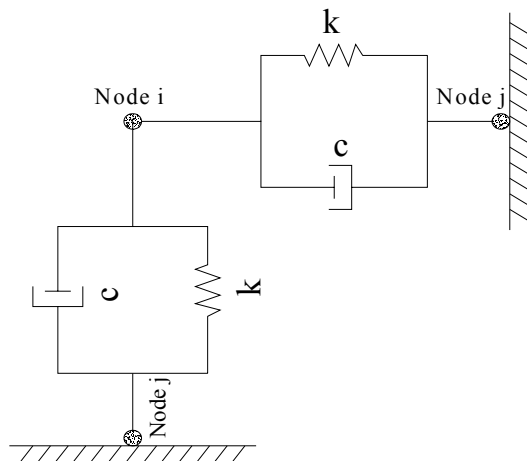
سرعت موج برشی در خاک: 150 m/s ؛ دانسیته: 1800 kg/m^3 ؛ نسبت پواسون: 0.3 ؛ میرایی مصالح: 0.03 می‌باشند، مقایسه می‌گردد.

۲-۲- مدل اجزای محدود

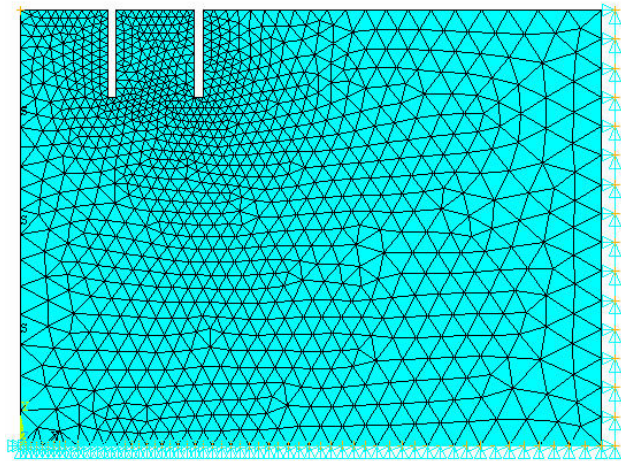
با استفاده از نرم‌افزار ANSYS 8.0، مدل اجزای محدودی بر اساس مدل هندسی فرض شده بسط داده شده است. حالتی که

عمق آن در نظر گرفته می‌شود ($b=d/10$). شکل (۱) هندسه مسئله را نشان می‌دهد که به دلیل تقارن، تنها نیمی از آن مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

تحلیل، شرایط کرنش مستوی دو بعدی را در نظر می‌گیرد. این فرض ممکن است تأثیر گودال را به‌صورت بیشینه تخمین بزند؛ زیرا از حرکت امواجی که در اطراف دیواره‌های گودال در امتداد موازی با صفحه دیواره‌ها حرکت می‌کنند، صرف‌نظر می‌کند. این حالت تحلیل برای تحلیل موانع موج به‌ویژه ایزولاسیونهای مقاوم از دقت کافی برخوردار است [۳]. از طرفی دیگر، فرض کرنش مستوی تنها انتشار امواج دو بعدی (در جهات قائم و افقی) را در نظر گرفته و از انتشار موج در جهت دیگر افقی صرف‌نظر می‌کند که منجر به کاهش تخمین تأثیر گودال در کنترل ارتعاش می‌شود و بنابراین، این مسئله تا حدودی تأثیر گودال را در جداسازی ارتعاش تعدیل می‌کند. فونداسیونهای چکش، همواره به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که معمولاً خاک اطراف و زیرین آنها در محدوده الاستیک باقی می‌ماند. به عبارت دیگر تغییر شکل‌های پلاستیک به هیچ وجه مورد انتظار نخواهد بود. از این رو خاک محدوده مدل، الاستیک، همگن و خطی



شکل ۳- المان مورد استفاده برای شرایط مرزی انتقالی



شکل ۲- مدل اجزای محدود ساخته شده برای تحلیل؛ $D=5d$

اطمینان حاصل می‌شود که فونداسیون به صورت یک جسم صلب و تنها در راستای قائم حرکت می‌کند.

شرایط مرزی متقارن در امتداد محور تقارن، به وسیله مقید کردن جابه‌جایی، در جهت افقی اعمال می‌شود. لایه بسیار سخت موجود در زیر لایه خاک، عملاً کلیه امواج برخوردی را بازتاب خواهد کرد. بنابراین منطقی است که فرض شود این لایه، یک مرز صلب را تشکیل می‌دهد و در نتیجه پایه مدل، گیردار فرض شود. در مسائل دینامیکی برای مدل کردن گستره نامحدود خاک، برای جلوگیری از بازتاب امواج منتشره در مدل به سمت داخل مدل، از مرزهای مصنوعی جاذب استفاده می‌شود. موقعیت مرز مصنوعی به مقدار میرایی مادی خاک، محدوده فرکانسی مورد نظر، سرعت موج و مدت زمان تحریک بستگی دارد. در مرز سمت راست مدل، به هرگره مرزی، یک جفت از المانهای کلونین، یکی در راستای قائم و دیگری در راستای افقی، نسبت داده می‌شود. این المان، مطابق شکل (۳)، شامل یک فنر خطی و یک میراگر است.

ضرایب سختی و میرایی مرزهای مصنوعی جاذب در واحد سطح، بر اساس روابط زیر به دست می‌آیند، نواک و میتوالی [۸] و دیکس و راندلف [۹]:

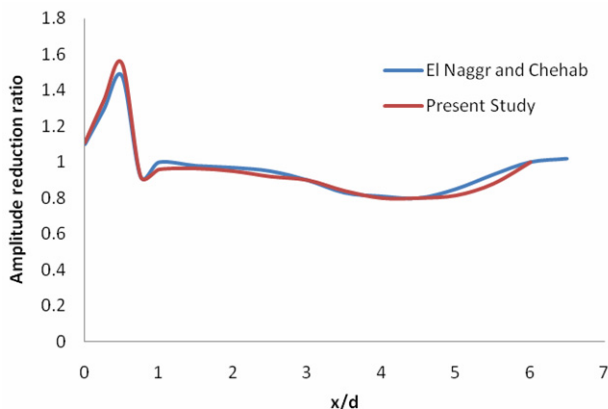
$$K_x = [S_{r1}(a_0, v_s, \delta_s) + iS_{r2}(a_0, v_s, \delta_s)]G_s / r_0 \quad (1)$$

$$K_y = [S_{y1}(a_0, v_s, \delta_s) + iS_{y2}(a_0, v_s, \delta_s)]G_s / r_0 \quad (2)$$

روابط (۱) و (۲) برای راستای شعاعی و راستای قائم ارائه

$D=5d$ باشد، در شکل (۲) نشان داده شده است. در مدل اجزای محدود بسط داده شده، خاک با استفاده از المانهای مثلثی شش‌گره‌ای، که دارای دو درجه آزادی انتقالی در هر گره است، مدل شده است.

اندازه المانها به جهت عدم حصول خطا در تحلیل، حدود یک هشتم تا یک پنجم کوتاهترین طول موج رایلی (λ_r) انتخاب شده‌اند. با در نظر گرفتن سرعت موج برشی خاک و نیز پریود بارگذاری تکرار شونده برابر 0.02 ثانیه، کوتاهترین طول موج برابر ۳ متر در نزدیکی فونداسیون و ۱۸ متر دور از چشمه ارتعاش برآورد می‌شود. از این رو اندازه المانها حدود نیم متر ($\lambda_r/6$) در مجاورت فونداسیون و حدود ۲/۳ متر دور از چشمه ارتعاش انتخاب شده‌اند. نسبت طول به عرض، برای همه المانها، کمتر از ۲ در نظر گرفته شده و از تغییر ناگهانی در اندازه المان اجتناب شده است. بلوک بتنی فونداسیون چکش با استفاده از المانهای تیر دوگره‌ای با دو درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی چرخشی برای هر گره تعریف شده است. با توجه به اینکه بلوک فونداسیون همانند یک جسم صلب حرکت می‌کند و بار ضربه‌ای چکش نیز معمولاً به‌طور هم مرکز اعمال می‌شود، بنابراین جابه‌جایی فونداسیون تنها در راستای قائم خواهد بود. لذا بایستی علاوه بر سختی بسیار زیادی که به المانهای تیر نسبت داده می‌شود، اولین المان نیز در مقابل جابه‌جایی افقی و چرخشی مقید شود. به این ترتیب، این

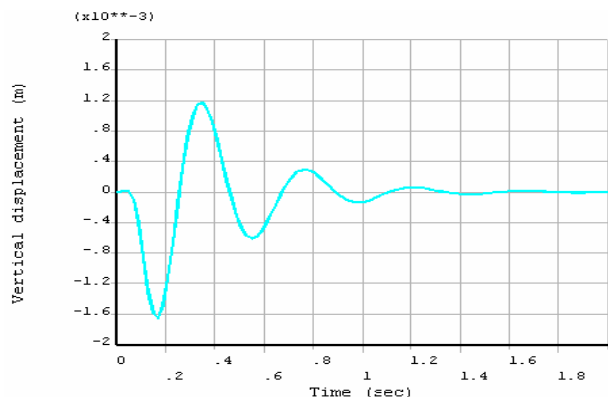


شکل ۵- صحت سنجی مدل بسط داده شده با تحقیق النگار و شهاب [۶]

گودال، d ، بی بعد شده‌اند عبارت‌اند از: X_i/d ، نسبت فاصله اولین گودال تا لبه فونداسیون به عمق گودال؛ x/d ، نسبت موقعیت نقاط روی سطح خاک به عمق گودال و s/d ، نسبت فاصله بین دو گودال به عمق گودال. لازم به ذکر است که در مدل اجزای محدود، عمق گودال برابر ۶ متر و نصف عرض فونداسیون، مطابق شکل (۱)، برابر ۳ متر بوده است.

بارگذاری به صورت یک پالس مستطیلی با دامنه ۲ مگانیوتن و مدت زمان ۱۰ میلی ثانیه اعمال می‌شود، که بیانگر بارگذاری چکش خواهد بود. تحلیل دینامیکی خطی برای محاسبه پاسخ مدل به این بارگذاری، در حالات با و بدون وجود گودال، انجام شده است و تاریخچه زمانی ارتعاش قائم در تعدادی از گره‌های واقع بر سطح مدل به دست آمده‌اند و به این ترتیب حداکثر دامنه ارتعاش در هر گره تعیین شده است. برای نمونه، شکل (۴)، پاسخ تاریخچه زمانی ارتعاش قائم نقطه‌ای به فاصله $x/d=2.5$ متر از لبه فونداسیون را در حالتی که $X_i/d=1.5$ و $s/d=2$ ، $D/d=5$ است، نشان می‌دهد.

حالتی که در آن $s/d=0$ است، در حقیقت بیانگر وجود یک گودال باز در مدل است که پیش از این، توسط النگار و شهاب [۶] مورد مطالعه قرار گرفته بود. منحنیهای به دست آمده در تحقیق حاضر که در بخش بعدی نشان داده می‌شوند، در حالت $s/d=0$ ، با آنچه توسط پژوهشگران مذکور به دست آمده بود، مطابقت دارد، شکل (۵). به این ترتیب صحت مدل‌سازی انجام شده در این تحقیق، تأیید می‌شود.



شکل ۴- نمونه پاسخ تاریخچه زمانی ارتعاش قائم نقطه‌ای روی سطح خاک به فاصله $x/d=2.5$ از لبه فونداسیون در حالتی که $X_i/d=1.5$ و $s/d=2$ ، $D/d=5$

شده‌اند؛ که در آنها، K_y و K_x ، سختیهای مختلط در راستاهای مذکورند. در این روابط همچنین G_s ، مدول برشی خاک، r_0 ، فاصله چشمه ارتعاش تا مرز مدل و S_{F1} ، S_{F2} و S_{y1} و S_{y2} پارامترهای بی‌بعدی‌اند که به فرکانس بی‌بعد a_0 ، نسبت پواسون ν_s و میرایی مادی خاک $\tan\delta_s$ ، بستگی داشته و از نمودارهای ارائه شده در نوک و میتوالی [۸] به دست می‌آیند. فرکانس بی‌بعد a_0 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$a_0 = r_0 \omega / V_s \quad (3)$$

که در آن، ω و V_s ، به ترتیب، فرکانس تحریک و سرعت موج برشی در خاک‌اند. ضرایب سختی و میرایی واحد سطح را می‌توان به صورت قسمتهای حقیقی و موهومی معادلات (۱) و (۲) نیز نوشت؛ یعنی، به صورت زیر:

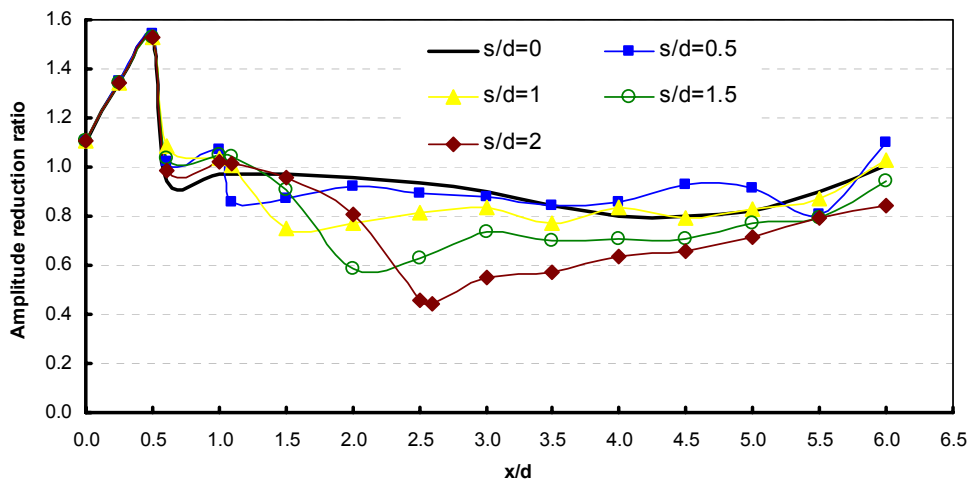
$$k = G_s S_1 / r_0 \quad (4)$$

$$c = G_s S_2 / \omega r_0 \quad (5)$$

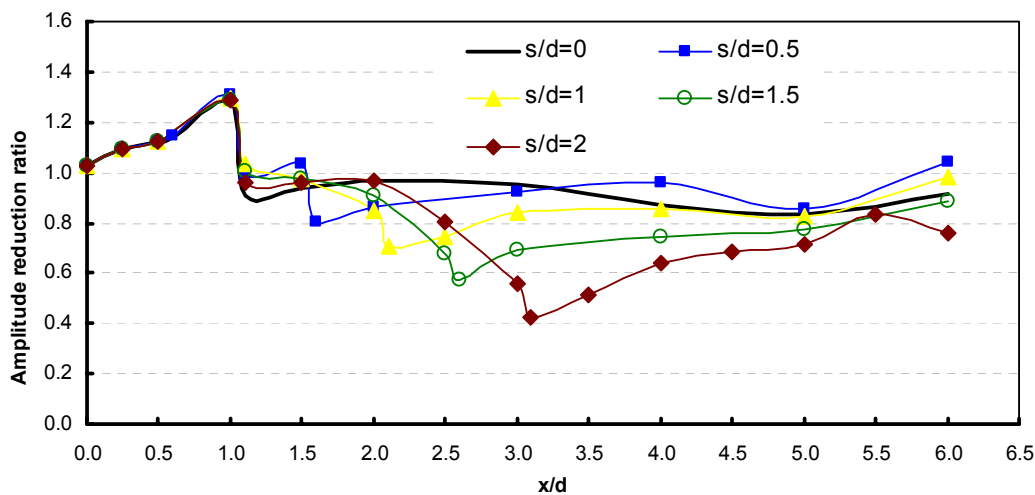
بنابراین برای به دست آوردن ثابتهای فنر و میراگر در المانهای کلون، این ضرایب، k و c ، در سطح المان مربوطه ضرب می‌شوند.

۳-۲- بارگذاری و تحلیل

پارامترهای هندسی مدل که در تحلیل استفاده شده‌اند، به صورت بی‌بعد نمایش داده می‌شوند. این پارامترها که با عمق



شکل ۶- اثر استفاده از دو گودال در کاهش ارتعاشات؛ $X_1/d=0.5$ و $D/d=5$



شکل ۷- اثر استفاده از دو گودال در کاهش ارتعاشات؛ $X_1/d=1$ و $D/d=5$

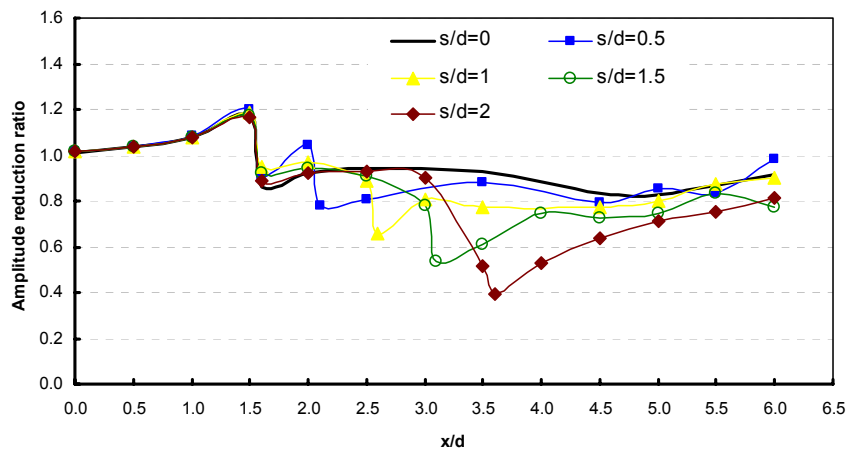
s/d ، تکرار شده است.

۳- بحث روی نتایج

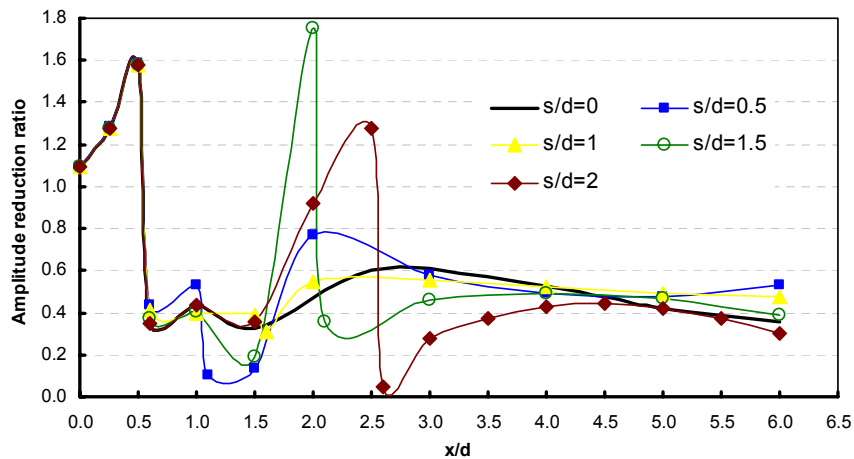
حالت $s/d=0$ نیز همان‌طور که در بخش قبلی ذکر شد معرف وجود تنها یک گودال در مدل تحلیلی است و به این دلیل آورده شده است که، علاوه بر تأیید صحت تحلیلها، برای هر حالتی از تغییر پارامترها، مقایسه را با حالتی که هر دو گودال وجود دارند، آسانتر می‌کند.

شکل‌های (۶) تا (۸)، نسبت‌های کاهش دامنه ارتعاش را برای حالت $D/d=5$ و نیز وضعیت‌های مختلف X_1/d و s/d نشان می‌دهند. نشان داده شده است که وقتی ضخامت لایه خاک از ۵ برابر عمق گودال بیشتر باشد، می‌تواند محیط به عنوان یک

با استفاده از پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی قائم چندین گره در موقعیتهای مختلف، x ، روی سطح خاک، و در جلوی گودال اول، مابین گودالها و پشت گودال دوم حداکثر دامنه ارتعاش نقاط مورد بررسی تعیین شده‌اند. این کار برای وقتی که گودالهای باز وجود داشته و یا هیچ کدام وجود نداشته باشند، انجام شده است و حداکثر دامنه‌های به دست آمده از حالت وجود گودالهای باز به حالت بدون وجود گودال نرمالیزه شده و به صورت «نسبت کاهش دامنه» در مقابل x/d رسم شده‌اند. این مراحل برای پارامترهای مختلف هندسی، نظیر D/d ، X_1/d و



شکل ۸- اثر استفاده از دو گودال در کاهش ارتعاشات؛ $D/d=5$ و $X_1/d=1.5$

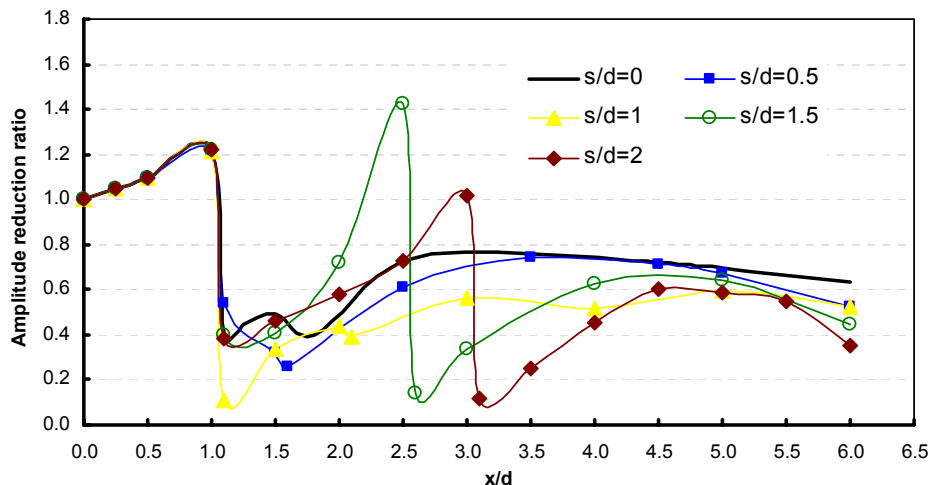


شکل ۹- اثر استفاده از دو گودال در کاهش ارتعاشات؛ $D/d=2$ و $X_1/d=0.5$

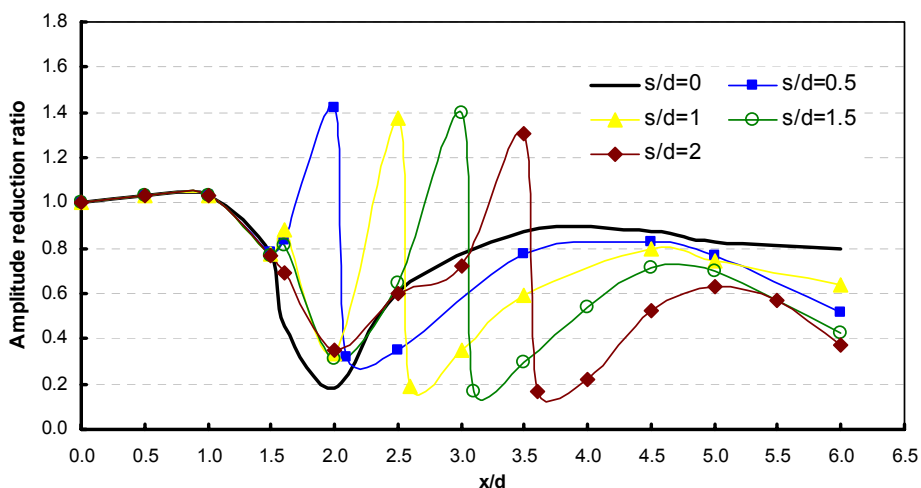
دوم، کاهش داد. این در حالی است که وجود تنها یک گودال، عملاً بی‌تأثیر است. با دور شدن از گودال دوم به تدریج اثر آنها از بین می‌رود. این را می‌توان به توانایی کنترل ارتعاشات قائم در مدل با دو گودال مربوط دانست.

شکل‌های (۹) تا (۱۱)، نسبت‌های کاهش دامنه ارتعاش را برای حالت $D/d=2$ و نیز وضعیت‌های مختلف X_1/d و s/d نشان می‌دهند. به‌طور کلی، ملاحظه می‌شود که استفاده از دو گودال در این حالت، نه تنها مزیتی نسبت به یک گودال تنها ایجاد نمی‌کند، بلکه دامنه‌های ارتعاش را در حد فاصل بین دو گودال به شدت تقویت می‌کند. بنابراین هنگامی که عمق لایه خاک، حدود ۲ برابر عمق گودال است، نباید از دو گودال استفاده نمود. اگر چه در حالت‌های خاصی همانند $X_1/d=1.5$ و $s/d=0.5$

نیم‌فضای الاستیک در نظر گرفته شود [۶]. نمودارها نشان می‌دهند که به دلیل انعکاس موج، در جلوی گودال اول، دامنه ارتعاش تقویت می‌شود. این مطلب برای همه حالات s/d مشابه با اثر یک گودال است. دامنه ارتعاش در حد فاصل بین دو گودال تقویت نمی‌شود و فقط هنگامی که $s/d=0.5$ است، مقدار ناچیزی در حدود ۵ درصد تقویت ارتعاش در جلوی گودال دوم مشاهده می‌شود. شکل‌های (۶) تا (۸)، نشان می‌دهند که برای یک خاک نیمه بی‌نهایت، $D/d=5$ ، استفاده از دو گودال متفاوت از آنچه که برای تک گودال به دست آمد، می‌تواند مؤثر باشد؛ به شرط آن که دو گودال به فاصله $1/5$ تا 2 برابر عمقشان از یکدیگر قرار گیرند. در این صورت نسبت دامنه ارتعاش را می‌توان به بیش از ۵۰ درصد در محدوده $0.5d$ در پشت گودال



شکل ۱۰- اثر استفاده از دو گودال در کاهش ارتعاشات؛ $D/d=2$ و $X_1/d=1$



شکل ۱۱- اثر استفاده از دو گودال در کاهش ارتعاشات؛ $D/d=2$ و $X_1/d=1.5$

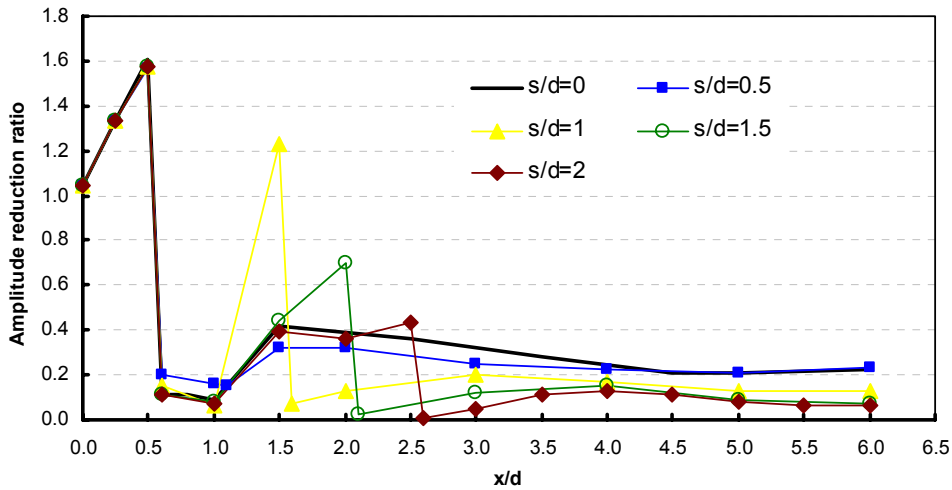
بسیار زیاد باشد، استفاده از دو گودال، برای حالت‌های $X_1/d=1$ و $X_1/d=1.5$ می‌تواند مؤثر باشد؛ به شرط آن که s/d بزرگتر یا مساوی ۱ انتخاب شود. در این صورت می‌توان دامنه ارتعاشات را تا بیش از ۹۵ درصد در یک فاصله $0.5d$ پشت گودال دوم، کاهش داد.

۴- نتیجه‌گیری

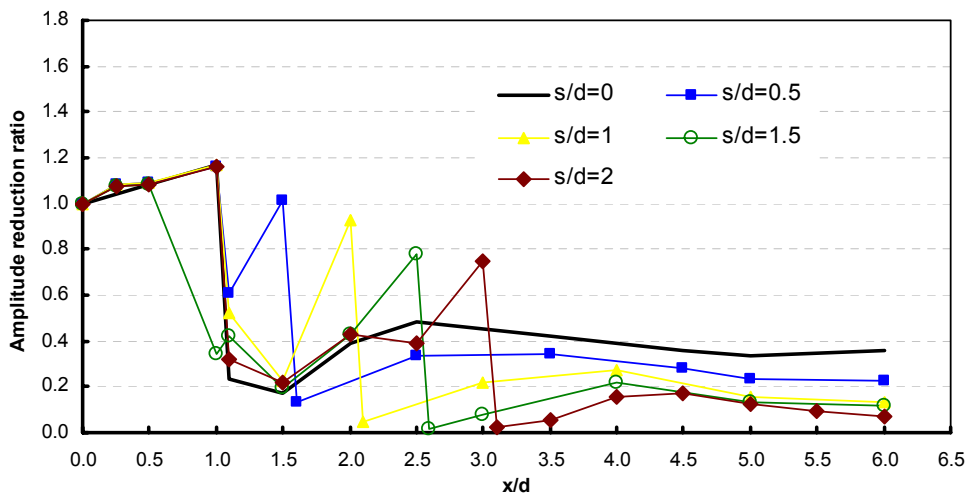
تأثیر استفاده از دو گودال باز با فواصل مختلف بر روی کاهش دامنه ارتعاشات ناشی از عملکرد ماشین آلات ضربه‌ای واقع بر خاک نیمه بی‌نهایت و همچنین لایه خاک بر بستر

دور از گودالها دامنه ارتعاش نسبت به یک گودال بیش از ۲۰ درصد کاهش می‌یابد که این نیز به لحاظ اقتصادی توجیهی ندارد.

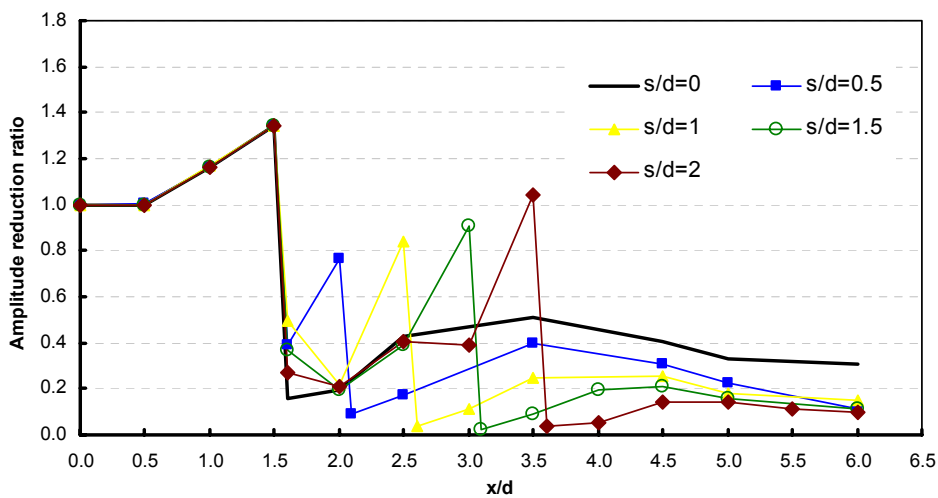
شکلهای (۱۲) تا (۱۴)، نسبت‌های کاهش دامنه ارتعاش را برای یک لایه سطحی $D/d=1.5$ است و همچنین حالت‌های مختلف X_1/d و s/d نشان می‌دهند. در حالتی که $X_1/d=0.5$ است، اثر دو گودال همچنان مشابه اثر یک گودال بوده با این تفاوت که در $s/d=1$ جلوی گودال دوم دامنه ارتعاش حدود ۲۰ درصد نیز تقویت می‌شود. بنابراین در این حالت نیز استفاده از دو گودال توصیه نمی‌شود. چنانچه حساسیت به دامنه ارتعاشات



شکل ۱۲- اثر استفاده از دو گودال در کاهش ارتعاشات؛ $D/d=1.5$ و $X_l/d=0.5$



شکل ۱۳- اثر استفاده از دو گودال در کاهش ارتعاشات؛ $D/d=1.5$ و $X_l/d=1$



شکل ۱۴- اثر استفاده از دو گودال در کاهش ارتعاشات؛ $D/d=1.5$ و $X_l/d=1.5$

سخت، بررسی و با نتایج حالت استفاده از یک گودال مقایسه شد. در این مورد، نتایج زیر حاصل شده است:

۱- اگرچه استفاده از یک گودال باز، برای جداسازی ارتعاش ناشی از عملکرد ماشین آلات ضربه‌ای مستقر بر روی خاک نیمه بی‌نهایت، بی‌تأثیر است، اما بر خلاف تصور اولیه، استفاده از دو گودال باز می‌تواند به‌طور موضعی مؤثر باشد به طوری که اگر دو گودال به فاصله $1/5$ تا 2 برابر عمقشان از یکدیگر قرار گیرند، نسبت دامنه ارتعاش حدود 50 تا 60 درصد در محدوده $0.5d$ در پشت گودال دوم، کاهش پیدا می‌کند.

۲- تأثیر گودالهای باز با افزایش عمق گودال نسبت به ضخامت لایه خاک، مشابه با حالت وجود یک گودال، افزایش می‌یابد، اما این افزایش نسبت به اثر یک گودال تنها، زیاد نیست.

۳- استفاده از دو گودال باز برای حالت‌های $D/d=1.5$ و $D/d=2$ نسبت به حالت یک گودال، به‌طور موضعی تأثیر معکوس دارد، به طوری که دامنه‌های ارتعاش در حد فاصل بین دو گودال به شدت تقویت می‌شود. به هر حال در حالت‌های خاصی همانند $X_l/d=1.5$ و $s/d=0.5$ دور از گودالها دامنه ارتعاش نسبت به یک گودال بیش از 20 درصد کاهش می‌یابد.

۴- در صورت حساسیت زیاد به اثرات ارتعاشی ناشی از عملکرد ماشین آلات ضربه‌ای، وقتی $D/d=1.5$ است، استفاده از دو گودال برای حالت‌های $X_l/d=1$ و $X_l/d=1.5$ می‌تواند توصیه شود؛ به شرط آن که s/d بزرگتر یا مساوی 1 انتخاب شود. در این صورت می‌توان دامنه ارتعاشات را تا بیش از 95 درصد، در یک فاصله $0.5d$ پشت گودال دوم، کاهش داد.

مراجع

1. Woods, R. D., "Screening of Surface Waves in Soil," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 94, No. 4, pp. 951-979, 1968.
2. Beskos, D. E., Dasgupta, G., and Vardoulakis, I. G., "Vibration Isolation Using Open or Infilled Trenches," *Computational Mechanics*, Vol. 1, No. 1, pp. 43-63, 1986.
3. Ahmad, S., and Al-Hussaini, T. M., "Simplified Design for Vibration Screening by Open and Infilled Trenches," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 1, pp. 67-88, 1991.
4. Yang, Y. B., and Hung, H. H., "A Parametric Study of Wave Barriers for Reduction of Train-Induced Vibration," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, pp. 3729-374, 1997.
5. Kattis, S. E., Polyzos, D., and Beskos, D. E., "Vibration Isolation by a Row of Piles Using a 3-D Frequency Domain BEM," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 46, pp. 713-728, 1999.
6. El-Naggar, M. H., and Chehab, A. G., "Vibration Barriers for Shock-Producing Equipment," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, pp. 297-306, 2005.
7. ANSYS Inc. 2004. User's manual for ANSYS 8.0. ANSYS Inc., Canonsburg, Pa.
8. Novak, M., and Mitwally, H., "Transmitting Boundary for Axisymmetric Dilation Problems," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 114, No. 1, pp. 181-187, 1988.
9. Deeks, A. J., and Randolph, M. F., "Axisymmetric Time-Domain Transmitting Boundaries," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 120, No. 1, pp. 25-42, 1994.