



دانشکده فنی مهندسی
گروه عمران

پایان نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد
در رشته مکانیک خاک و پی

بررسی تأثیر نحوه تغییر سختی خاک‌ها بر امپدانس پی‌های دایره‌ای سطحی

تحقیق و نگارش

فرخ صیرفیان

اساتید راهنما

دکتر سارنگ صیرفیان

دکتر مهران جوانمرد

زمستان ۱۳۹۱

تقدیم بہ

پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

در تهیه‌ی این پایان نامه از تمامی اساتید، معلمان و افرادی که در طول زندگی به من آموزش دادند، و همچنین از آقایان دکتر سارنگ صیرفیان و دکتر مهران جوانمرد که راهنمایی بنده را بر عهده داشتند، سپاسگزارم.

چکیده

به منظور بررسی اثر توزیع سختی برشی بر پاسخ دینامیکی محیط‌هایی مانند خاک که در آن سختی برشی با افزایش عمق بطور پیوسته افزایش می‌یابد، به دو شکل مطالعه انجام پذیرفته است. در قسمت اول، حل تحلیلی بمنظور تعیین پاسخ دینامیکی یک لایه خاک ناهمگن پیوسته مستقر بر سنگ بستر متحرک ارائه شده است. توزیع سختی برشی با توابع خطی، سهموی، و نمایی نسبت به عمق تغییر می‌یابد. مسئله با استفاده از سری توانی، حل گردیده است. نتایج ارائه شده، تاثیر پارامتر ناهمگنی عمقی و نحوه توزیع سختی برشی را بر ضریب بزرگنمایی در سطح و فرکانس تشدید نشان می‌دهد. همچنین این تاثیرات، با ثابت فرض نمودن سختی برشی در سطح، روی سنگ بستر و محتوای سختی، بررسی گردیده. در قسمت بعدی، پاسخ دینامیکی یک پی سطحی نواری مستقر بر نیم فضای ناهمگن پیوسته، بطوری که پی با یک بار هارمونیک نوسان می‌کند بررسی گردیده است. مسئله با استفاده از یک برنامه تفاضل محدود، بررسی شده است. در این محیط، سختی برشی با توابع نمایی و درجه دو نسبت به عمق افزایش می‌یابد و تاثیر نحوه توزیع، با ملحوظ نمودن سختی برشی در سطح، عمق بینهایت و محتوای سختی ثابت، بررسی گردیده است و با مطالعات گذشته که در آنها محیط همگن در نظر گرفته می‌شد، مقایسه شده است.

نتایج بدست آمده در هر دو قسمت، با مطالعات قبلی که عموماً لایه خاک را همگن فرض می‌نمودند، مقایسه شده است.

کلید واژگان: ناهمگنی عمقی، سختی برشی، توزیع سختی برشی، ضریب بزرگنمایی، پی سطحی، فرکانس تشدید، پاسخ دینامیکی

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و مروری بر مطالعات گذشته	۱
فصل دوم: تاثیر نحوه توزیع سختی برشی بر ضریب بزرگنمایی یک لایه خاک محدود مستقر بر سنگ بستر صلب	۷
۱-۲- مقدمه	۸
۲-۲- انتشار یک بعدی موج SH	۹
۱-۲-۲- انتشار در محیط جامد	۱۰
۱-۱-۲-۲- معادله‌ی تعادل حاکم بر محیط پیوسته	۱۱
۱-۲-۱-۲-۲- حل معادله‌ی حاکم با توزیع سختی برشی درجه یک	۱۳
۲-۲-۱-۲-۲- نتایج عددی	۱۷
۱-۳-۱-۲-۲- حل معادله‌ی حاکم با توزیع سختی برشی درجه دو	۱۹
۲-۳-۱-۲-۲- نتایج عددی	۲۲
۱-۴-۱-۲-۲- حل معادله‌ی حاکم با توزیع سختی برشی نمایی	۲۴
۲-۴-۱-۲-۲- نتایج عددی	۲۸
۵-۱-۲-۲- مقایسه نتایج با ثابت بودن سختی برشی در سطح و روی سنگ بستر	۲۹
۶-۱-۲-۲- مقایسه نتایج با ثابت بودن محتوای سختی و سختی برشی در سطح	۳۱
فصل سوم: بررسی پاسخ دینامیکی نیم فضای ناهمگن پیوسته تحت اثر حرکت بار هارمونیک	۳۳
۱-۳- مقدمه	۳۴
۲-۳- بیان مسئله	۳۵
۳-۳- حل مسئله	۳۵
۴-۳- نتایج عددی	۳۶
فصل چهارم: بررسی حل تحلیلی پاسخ دینامیکی یک پی نواری مستقر بر نیم فضای همگن تحت اثر حرکت بار هارمونیک	۳۹
۱-۴- مقدمه	۴۰
۲-۴- بیان مسئله	۴۰
۳-۴- حل مسئله	۴۱
فصل پنجم: پاسخ دینامیکی یک پی نواری مستقر بر نیم فضای همگن تحت اثر حرکت بار هارمونیک با استفاده از مدلسازی در برنامه Flac	۴۴
۱-۵- مقدمه	۴۵
۲-۵- معرفی برنامه Flac	۴۵
۳-۵- ساخت مدل	۴۵
۳-۵- بررسی خروجی مدل	۴۷
۴-۵- نتایج عددی	۴۸
فصل ششم: پاسخ دینامیکی یک پی نواری مستقر بر نیم فضای ناهمگن تحت اثر حرکت بار هارمونیک با توزیع سختی برشی نمایی و درجه دوم	۵۰
۱-۶- مقدمه	۵۱
۲-۶- ساخت مدل	۵۱
۳-۶- بررسی اثر نحوه توزیع بر پاسخ دینامیکی	۵۳
۴-۶- مقایسه نتایج با ثابت بودن محتوای سختی، سختی برشی در سطح و عمق	۶۱
فصل هفتم نتیجه گیری	۶۷
منابع	۷۱
ضمیمه الف: شرط همگرایی سری توانی	۷۳

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): نحوه تغییرات مدول برشی نسبت به عمق الف: ناهمگنی محدود نشده ب: ناهمگنی محدود شده ۳
- شکل (۱-۲): محیط ناهمگن پیوسته تحت اثر حرکت سنگ بستر ۱۰
- شکل (۲-۲) تغییرات ضریب بزرگنمایی نسبت به فرکانس بازای ضرایب ناهمگنی مختلف ۱۸
- شکل (۳-۲) تغییرات ضریب بزرگنمایی نسبت به فرکانس بازای ضرایب میرایی مختلف ۱۸
- شکل (۴-۲) تغییرات ضریب بزرگنمایی نسبت به فرکانس بازای ضرایب ناهمگنی مختلف ۲۳
- شکل (۵-۲) تغییرات ضریب بزرگنمایی نسبت به فرکانس بازای ضرایب میرایی مختلف ۲۳
- شکل (۶-۲) تغییرات ضریب بزرگنمایی نسبت به فرکانس بازای ضرایب ناهمگنی مختلف ۲۸
- شکل (۷-۲) تغییرات ضریب بزرگنمایی نسبت به فرکانس بازای ضرایب میرایی مختلف ۲۹
- شکل (۸-۲) محیط ناهمگن پیوسته با سختی برشی در سطح و روی سنگ بستر ثابت ۳۰
- شکل (۹-۲) ضریب بزرگنمایی نسبت به فرکانس با ثابت بودن سختی برشی در سطح و روی سنگ بستر برای توابع مختلف ۳۰
- شکل (۱۰-۲) تغییرات تابع سختی برشی در عمق با ثابت بودن محتوای سختی ۳۱
- شکل (۱۱-۲) ضریب بزرگنمایی نسبت به فرکانس در محتوای سختی ، سختی برشی در سطح و ضریب میرایی ثابت و بازای ضرایب ناهمگنی مختلف ۳۲
- شکل (۱-۳): نیم فضای ناهمگن پیوسته تحت اثر بار هارمونیک ۳۵
- شکل (۲-۳): تغییرات قسمت حقیقی و موهومی جابجایی نسبت به فرکانس بی بعد در فضای هنکل ۳۸ و ۳۷
- شکل (۳-۳): تغییرات قسمت حقیقی و موهومی جابجایی نسبت به فاصله بازای فرکانس های مختلف در فضای حقیقی ۳۸
- شکل (۱-۴): نیم فضای همگن تحت اثر بار هارمونیک ۴۰
- شکل (۲-۴): تغییرات قسمت حقیقی و موهومی جابجایی بی بعد نسبت به فرکانس بی بعد ۴۳
- شکل (۱-۵): پی نواری صلب مستقر بر محیط همگن تحت اثر بار هارمونیک ۴۶
- شکل (۲-۵): تغییرات جابجایی نسبت به زمان ۴۸
- شکل (۳-۵): اختلاف فاز و دامنه تغییر مکان در منحنی جابجایی نسبت به زمان ۴۸

- شکل (۵-۴): تغییرات قسمت حقیقی و موهومی جابجایی بی بعد نسبت به فرکانس بی بعد ۴۹
- شکل (۶-۱): توزیع سختی برشی نسبت به عمق الف: تابع نمایی ب: تابع درجه دوم ۵۲
- شکل (۶-۲): پی نواری مستقر بر محیط ناهمگن ۵۲
- شکل (۶-۳): توزیع سختی برشی در عمق ۵۳
- شکل (۶-۴): تغییرات فاز نسبت به فرکانس بی بعد بازای ضریب میرایی ۰.۲٪ و پارامترهای ناهمگنی مختلف برای تابع توزیع سختی برشی نمایی ۵۴
- شکل (۶-۵): تغییرات قسمت حقیقی جابجایی نسبت به فرکانس بی بعد بازای ضریب میرایی ۰.۲٪ و پارامترهای ناهمگنی مختلف برای تابع توزیع سختی برشی نمایی ۵۴
- شکل (۶-۶): تغییرات قسمت موهومی جابجایی نسبت به فرکانس بی بعد بازای ضریب میرایی ۰.۲٪ و پارامترهای ناهمگنی مختلف برای تابع توزیع سختی برشی نمایی ۵۵
- شکل (۶-۷): تغییرات فاز نسبت به فرکانس بی بعد بازای ضریب میرایی ۰.۵٪ و پارامترهای ناهمگنی مختلف برای تابع توزیع سختی برشی نمایی ۵۶
- شکل (۶-۸): تغییرات قسمت حقیقی جابجایی نسبت به فرکانس بی بعد بازای ضریب میرایی ۰.۵٪ و پارامترهای ناهمگنی مختلف برای تابع توزیع سختی برشی نمایی ۵۶
- شکل (۶-۹): تغییرات قسمت موهومی جابجایی نسبت به فرکانس بی بعد بازای ضریب میرایی ۰.۵٪ و پارامترهای ناهمگنی مختلف برای تابع توزیع سختی برشی نمایی ۵۷
- شکل (۶-۱۰): تغییرات فاز نسبت به فرکانس بی بعد بازای ضریب میرایی ۰.۲٪ و پارامترهای ناهمگنی مختلف برای تابع توزیع سختی برشی درجه دوم ۵۸
- شکل (۶-۱۱): تغییرات قسمت حقیقی جابجایی نسبت به فرکانس بی بعد بازای ضریب میرایی ۰.۲٪ و پارامترهای ناهمگنی مختلف برای تابع توزیع سختی برشی درجه دوم ۵۸
- شکل (۶-۱۲): تغییرات قسمت موهومی جابجایی نسبت به فرکانس بی بعد بازای ضریب میرایی ۰.۲٪ و پارامترهای ناهمگنی مختلف برای تابع توزیع سختی برشی درجه دوم ۵۹
- شکل (۶-۱۳): تغییرات فاز نسبت به فرکانس بی بعد بازای ضریب میرایی ۰.۵٪ و پارامترهای ناهمگنی مختلف برای تابع توزیع سختی برشی درجه دوم ۶۰
- شکل (۶-۱۴): تغییرات قسمت حقیقی جابجایی نسبت به فرکانس بی بعد بازای ضریب میرایی ۰.۵٪ و پارامترهای ناهمگنی مختلف برای تابع توزیع سختی برشی درجه دوم ۶۰

- شکل (۶-۱۵): تغییرات قسمت موهومی جابجایی نسبت به فرکانس بی بعد بازای ضریب میرایی ۰.۵٪ و پارامترهای
 ۶۱ ناهمگنی مختلف برای تابع توزیع سختی برشی درجه دوم
- شکل (۶-۱۶): تغییرات تابع سختی برشی در عمق با ثابت بودن محتوای سختی، سختی برشی در سطح و عمق
 ۶۲ بینهایت الف: تابع نمایی ب: تابع درجه دوم
- شکل (۶-۱۷): تغییرات فاز نسبت به فرکانس بی بعد برای سختی برشی در سطح و عمق ثابت، بازای محتوای سختی ثابت
 ۶۳
- شکل (۶-۱۸): تغییرات قسمت حقیقی نسبت به فرکانس بی بعد برای سختی برشی در سطح و عمق ثابت بازای
 ۶۴ محتوای سختی ثابت
- شکل (۶-۱۹): تغییرات قسمت موهومی نسبت به فرکانس بی بعد برای سختی برشی در سطح و عمق ثابت بازای
 ۶۵ محتوای سختی ثابت

فهرست جداول

- ۳۷ جدول (۳-۱): خصوصیات مصالح
- ۴۲ جدول (۴-۱): خصوصیات مصالح
- ۵۳ جدول (۶-۱): خصوصیات مصالح

فصل اول

مقدمه و مروری بر مطالعات گذشته

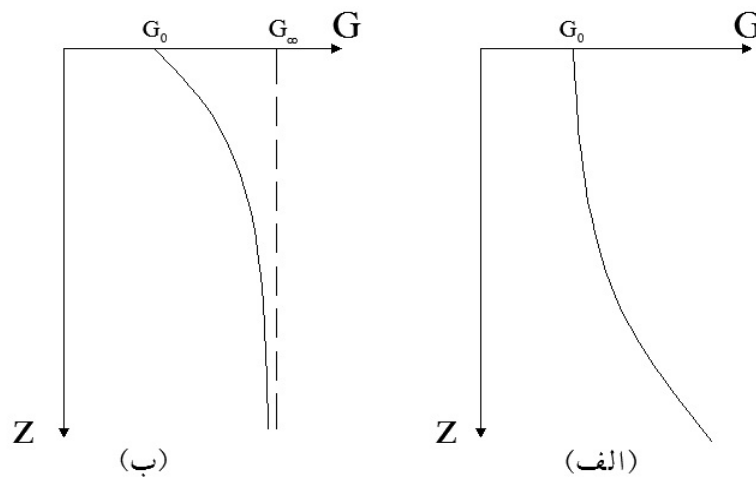
مسئله انتشار امواج^۱، از دیرباز مورد توجه محققین قرار داشته است، که در طول زمان بیشتر فرضیات ساده کننده که برای درک و تاثیر این پدیده بر سازه‌های پیرامون ما مورد استفاده قرار می‌گرفت؛ حذف گردیده و مسائل به واقعیت نزدیک گردیده‌اند. یکی از این فرضیات، همگن^۲ بودن محیط خاکی است. نتایج گذشته نشان می‌دهد که، در محیط‌های خاکی به دلیل افزایش فشار محصور کننده با حرکت به سمت عمق لایه، سختی برشی خاک افزایش می‌یابد که می‌توان به مطالعات Gibson(1967) و Selvadurai et al(1986) اشاره نمود. Gibson(1967) با بررسی انتشار امواج برشی نسبت به عمق یک تابع سهموی را برای ملحوظ نمودن تغییرات سختی برشی نسبت به عمق پیشنهاد نمود، که به دلیل بیکران بودن تابع سهموی فقط در محیط‌های کراندار قابل استفاده می‌باشد؛ این نوع توزیع به ناهمگنی محدود نشده^۳ معروف است. Selvadurai et al(1986) یک تابع نمایی را جهت توزیع سختی برشی نسبت به عمق پیشنهاد نمود، بطوری که سختی برشی از یک مقدار مشخص در سطح، به یک مقدار مشخص دیگر در عمق بینهایت، بصورت پیوسته تغییر می‌کند، و چون تابع پیشنهادی کراندار می‌باشد، بنابراین در نیم فضا نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، به عبارت دیگر محیط دارای ناهمگنی محدود شده^۴ می‌باشد. در شکل (۱-۱) ناهمگنی محدود شده و ناهمگنی نشده نمایش داده شده است. مطالعات دیگری در زمینه‌ی محیط‌های جامد صورت گرفته است، که محیط به صورت لایه لایه نسبت به عمق تغییر می‌کند، که از این جمله می‌توان به مطالعات Kundu و Apsel and Luco(1983 part I) and Mal (1985) اشاره نمود.

1 - Wave Propagation

2 - Homogeneous

3 - Unbounded Non-Homogeneity

4 - Bounded Non- Homogeneity



شکل (۱-۱): نحوه تغییرات مدول برشی نسبت به عمق

الف: ناهمگنی محدود نشده ب: ناهمگنی محدود شده

مسائل انتشار امواج شامل دو قسمت می‌باشند که یکی بیانگر مسائل میدان نزدیک^۱ و دیگری بیانگر مسائل میدان دور^۲ می‌باشند. به عنوان مثال، جبهه‌ی موج زلزله که از اعماق خاک به سمت سطح می‌آید، و پی ماشین آلات که در سطح نوسان و امواج را به داخل خاک منتشر می‌کنند؛ به ترتیب نمونه‌هایی از مسائل میدان دور و میدان نزدیک می‌باشند.

در خصوص بهتر درک نمودن مسائل میدان دور می‌توان این مثال را آورد که، هر لایه خاک با توجه به خصوصیات ذاتی از قبیل مدول برشی، چگالی، نسبت پواسون و شدت شتاب نوسان سنگ بستر و ...، یک فرکانس ذاتی را دارا می‌باشد، و هر سازه‌ای با توجه به ویژگی‌های خود از قبیل سختی مصالح، شکل ظاهری، ارتفاع و ...، یک فرکانس طبیعی را به خود اختصاص می‌دهد؛ حال اگر در هنگام وقوع زلزله، فرکانس طبیعی سازه با فرکانس ساختگاه یکی باشد؛ آنگاه پدیده تشدید اتفاق خواهد افتاد که عواقب فجیعی را به دنبال خواهد داشت. از مطالعاتی که در این زمینه انجام شده می‌توان به Idriss and

Seed(1968) ، Kramer(1996) و Seyrafian et al(2007) اشاره نمود.

1 - Near Field
2 - Far Field

هدف از طراحی پی ماشین آلات این است که، بتوان دامنه‌ی حرکت پی ماشین آلات را در حد معیارهای بهره برداری محدود کرد. این عمل مستلزم این است که بتوان با روابطی مقدار نیروی وارده را به مقدار تغییر مکان عکس العمل ربط داد که از این رو بدست آوردن پاسخ دینامیکی پی حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین یک جزء کلیدی طراحی پی ماشین آلات، بدست آوردن پاسخ پی بر بارهای دینامیکی پیش بینی شده می‌باشد.

طبق تعریف پاسخ دینامیکی یک پی مرتعش کننده را تابع امیدانس¹ می‌نامند، که این تابع وابسته به فرکانس بارگذاری است. توابع امیدانس از انتگرال گیری یک بار واحد مرتعش کننده بر محیط، که حوزه‌ی انتگرال گیری، شکل مقطع مستقر بر محیط می‌باشد؛ بدست می‌آیند، که این پاسخ بار واحد مرتعش کننده بر محیط را تابع گرین² می‌نامند. چون انتگرال گیری از توابع گرین بازای هر شکل دلخواه از سطح بارگذاری شده به صورت تحلیلی غیر ممکن می‌باشد، بنابر این جواب انتگرال گیری به صورت عددی محاسبه می‌شود. چندی از محققین در خصوص بدست آوردن توابع گرین تلاش نمودند که می‌توان به (Lamb(1904) ، Pekeris(1955) ، Apsel et al(1983 PartII) و Vrettos(1991) اشاره نمود. Lamb(1904) اول بار پاسخ دینامیکی یک بار مرتعش کننده هارمونیک را بر روی یک نیم فضای همگن با رفتار ارتجاعی خطی و ایزوتروپ، در حوزه‌ی فرکانسی³، در حالات دو بعدی و سه بعدی بررسی نمود. Pekeris(1955) مسئله مذکور را در حوضه‌ی زمان حل نمود. Apsel et al(1983 II) تابع گرین را برای یک محیط جامد لایه‌ای بدست آورد و Vrettos(1991) مسئله Lamb(1904) را با فرض توزیع سختی برشی متغیر با عمق؛ که این توزیع توسط Selvadurai(1986) پیشنهاد شده بود؛ حل نمود و بدین صورت تابع گرین یک نیم فضای الاستیک ناهمگن را بدست آورد.

1 - Impedance Function
2 - Green Function
3 - Frequency Domain

حال فرض شود که، جهت بدست آوردن پاسخ دینامیکی، محیط به صورت یک فنر تعمیم یافته در نظر گرفته شود، که سختی فنر K و ضریب میرایی محیط C باشد، و نیروی محرک با فرکانس ω در حال ارتعاش باشد، آنگاه عبارت $K+iC\omega$ ، تابع امپدانس محیط نامیده می‌شود ($i = \sqrt{-1}$). که در آن بخش حقیقی تابع امپدانس، بیانگر سختی و مشخصه‌های اینرسی سیستم است؛ و بخش موهومی بیانگر شرط تشعشع^۱ می‌باشد. میرایی تشعشعی از استهلاک انرژی توسط انتشار امواج در محیط ناشی می‌شود، که به فرکانس وابسته می‌باشد. در زیر، به چندی از محققین که در ارتباط با تابع امپدانس مطالعه نمودند، اشاره شده است.

Robertson(1966) مسئله اندرکنش یک شالوده‌ی دایره‌ای صلب مستقر بر سطح یک محیط همگن و ایزوتروپ، که تحت اثر ارتعاش هارمونیک می‌باشد را حل نمود. (Luco(1969) مسئله‌ی اندرکنش یک دیوار برشی و خاک را بررسی کرد، همچنین او دو سال بعد اندرکنش یک شالوده دایره‌ای و خاک را برای کلیه‌ی درجات آزادی بررسی نمود. (Awjobi(1972) بافرض تغییرات سختی برشی بر مبنای تابع پیشنهادی (Gibson(1967) مسئله تابع امپدانس پی دایروی صلب را بررسی نمود. (Gazetas et al(1976) ارتعاش یک پی نواری صلب مستقر بر محیط همسان را بررسی نمود. همچنین او ((Gazetas(1981) ارتعاش پی نواری صلب مستقر بر محیط ناهمسان بطوری که مدول الاستیسیته افقی نسبتی از مدول الاستیسیته عمودی محیط می‌باشد را برای محیط‌های محدود و نیم فضا بررسی نمود. (Apse and Luco(1987) یک پی دایروی صلب واقع بر یک محیط ناهمگن لایه‌ای را بررسی نمود. (Nourzad et al(1994) ارتعاش یک شالوده واقع بر سطح یک محیط اشباع را مطالعه نمود. (Vrettos(1999) پاسخ دینامیکی یک پی صلب مستقر بر یک نیم فضای الاستیک، که تابع توزیع سختی برشی آن توسط Selvadurai et al(1986) پیشنهاد شده بود، را با استفاده از توابع پتانسیل حل نمود. همچنین Seyrafian

1 - Radiation Condition

et al(2007) پاسخ یک دیسک استوانه‌ای صلب واقع بر نیم فضا را در حالت‌های جامد و اشباع حل نمود، که حل وی بدون استفاده از هرگونه تابع پتانسیل می‌باشد.

در این پایان نامه در فصل دوم، تاثیر نحوه توزیع سختی برشی بر ضریب بزرگنمایی^۱ یک لایه خاک ناهمگن پیوسته مستقر بر سنگ بستر صلب، بصورت تحلیلی بررسی شده است.

در فصل سوم مقالات (Vrettos(1991 و Seyrafian et al(2007 که به ترتیب تابع گرین یک بار و تابع امیدانس یک دیسک استوانه‌ای صلب را بدست آورده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است و نمودارهای مربوطه با حالت همگن مقایسه شده است.

در فصل چهارم مقاله‌ی (Gazetas(1976 که یک پی صلب مستقر بر نیم فضا؛ که بعد سوم آن بینهایت می‌باشد (مسئله با یک صفحه تقارن^۲)؛ بررسی شده است، که نمودارهای حالت همگن از آن استخراج شده است.

به علت اینکه قرار است پاسخ دینامیکی یک پی صلب، با یک صفحه تقارن، با سختی برشی متغیر نسبت به عمق در این پایان نامه مورد بررسی قرار گیرد؛ ولی در آن، معادلات دیفرانسیل حاکم بر محیط مذکور قابل حل نمی‌باشد، بنابراین با بهره‌گیری از برنامه‌ی Flac^۳ مسئله را مدل‌سازی کرده، که در فصل پنجم به نحوه مدل‌سازی در حالت همگن پرداخته می‌شود، که این مدل با حل تحلیلی کنترل خواهد شد. در فصل ششم نحوه‌ی ساخت مدل ناهمگن در برنامه Flac شرح داده می‌شود و نمودارهای پاسخ دینامیکی استخراج می‌گردد و نتایج با حالت همگن مقایسه می‌گردد.

در فصل هفتم با عنوان نتیجه‌گیری، نتایج حاصل از فصل‌های گذشته جمع بندی می‌گردد.

1 - Amplitude Factor
2 - Symmetry
3 - Itasca Flac2D (Version 4.00)

فصل دوم:

تأثیر نحوه توزیع سختی برشی، بر ضریب بزرگنمایی یک لایه خاک محدود

مستقر بر سنگ بستر صلب

تحلیل و بررسی انتشار موج برشی؛ یکی از مسائل مهم کاربردی و نیز تئوری در دانش ژئوتکنیک می‌باشد. با گذشت زمان و درک هرچه بهتر نقش و خصوصیات خاک‌ها در عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، آزمون انتشار موج برشی به عنوان یکی از کاربردی‌ترین آزمون‌ها به منظورهای متفاوت نظیر تعیین تیپ زمین (آیین نامه شماره ۲۸۰۰) و نیز سختی برشی خاک مطرح گردیده است.

در توده‌های عمیق همگن خاک و یا لایه‌های ضخیم با خصوصیات همگن، علیرغم جنس یکسان توده خاک در کل لایه؛ پارامترهای مختلف مکانیک خاک نظیر سختی برشی، بویژه در خاک‌های ماسه‌ای که رفتار آنها تابع تنش محدود کننده و نسبت به عمق متغیر است؛ ثابت نخواهد بود، بنابر این ثابت فرض کردن این پارامترها؛ علاوه بر ایجاد خطا در محاسبات، سبب خواهد گردید تفسیر نتایج آزمون موج برشی فاقد صحت کامل باشد.

در این تحقیق یک لایه خاکی با عمق محدود که دارای تغییرات سختی برشی نسبت به عمق می‌باشد فرض گردیده است که البته تغییرات سختی برشی با توابع مختلف نظیر توابع خطی؛ سهموی و نمایی مورد بررسی قرار گرفته است؛ سپس در چنین محیط‌هایی معادلات دیفرانسیل حاکم مربوط به انتشار موج برشی در هر یک از حالت‌های فوق به تفکیک مورد حل قرار گرفته‌اند؛ لذا نقش و تاثیر تغییرات سختی برشی به خصوصیات انتشار امواج مورد بررسی قرار گرفته است.

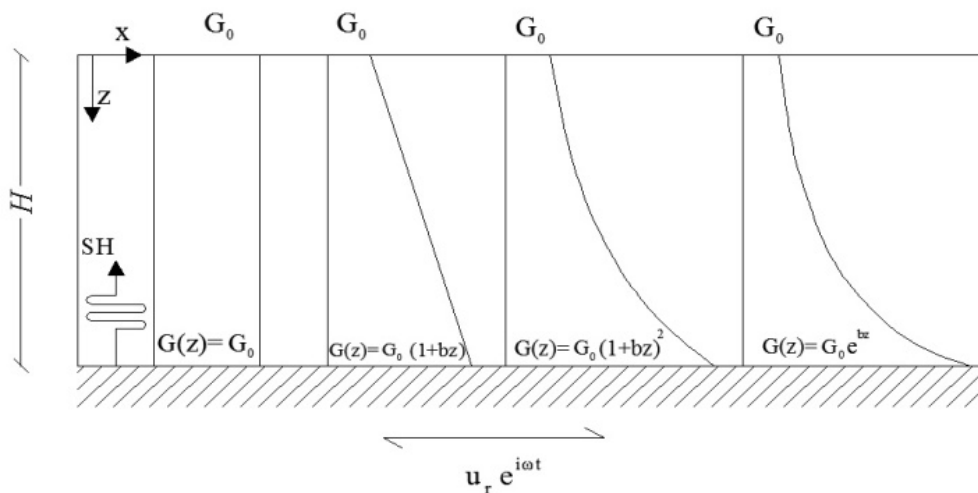
با توجه به منظور نمودن توابع مختلف تغییرات سختی برشی، علاوه بر بررسی تاثیر این تغییرات می‌توان تفاوت ناشی از نحوه این تغییرات را نیز به دقت مورد بررسی قرار داد.

نتایج حاصل از این تحقیق علاوه بر درک هرچه بهتر نقش و تاثیرات سختی برشی نسبت به عمق بر رفتار موج برشی عملاً امکان تفسیر نتایج بهتر آزمون موج برشی را میسر می‌سازد.

۲-۲- انتشار یک بعدی موج SH^۱

شکل (۱-۲)، یک محیط ناهمگن پیوسته‌ی محدود، که تحت اثر حرکت سنگ بستر صلب می‌باشد را نشان می‌دهد. انتشار موج SH از سنگ بستر تا سطح، بستگی به محتوای فرکانسی حرکت، مشخصات مکانیکی خاک و نیز ضخامت لایه‌ی خاک دارد. در راه حل‌های کلاسیک، جهت ساده سازی مسئله انتشار موج، محیط به صورت یک لایه‌ی همگن فرض می‌شود، که این امر از تاثیر پارامتر ناهمگنی صرف نظر می‌کند. و یا بعضاً لایه‌ی خاک به چند لایه با مشخصات مکانیکی ثابت ولی از لایه‌ای به لایه‌ی دیگر تغییر می‌کند؛ تقسیم می‌شود که این امر سبب پیدایش خطای جمع شونده می‌شود و همچنین باعث تغییر ناگهانی مشخصات خاک نیز می‌شود که این خطاها قابل صرف نظر کردن نمی‌باشد. در این بخش حل مستقیم معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسئله با استفاده از سری توانی^۲ انجام خواهد شد که در آن تاثیر ناهمگنی عمقی به صورت مستقیم لحاظ می‌شود.

1- Shear Wave
2 - Power Series



شکل (۱-۲): محیط ناهمگن پیوسته تحت اثر حرکت سنگ بستر

۱-۲-۲- انتشار در محیط جامد

بافرض اینکه حرکت سنگ بستر صلب به صورت هارمونیک و با تابع $e^{i\omega t}$ در حرکت است، به طوری که ω فرکانس حرکت و t تابع زمان و $i^2 = -1$ و e عدد نپر می باشد، و ناهمگنی عمقی به صورت توابع درجه یک، درجه دو و نمایی که به ترتیب با توابع $G(z) = G_0(1+bz)$ ، $G(z) = G_0(1+bz)^2$ و $G(z) = G_0 e^{bz}$ در نظر گرفته شده است؛ بیان می شود، و در آن $G(z) [ML^{-1}T^{-2}]$ تابع سختی عمقی، $G_0 [ML^{-1}T^{-2}]$ سختی لایه در سطح، $b [L^{-1}]$ پارامتر ناهمگنی و $z [L]$ تابع عمق می باشد. چگالی^۱ و نسبت پواسون^۲ محیط ثابت فرض شده است. شکل (۱-۲) محیط های محدود جامد که سختی برشی آن به صورت پیوسته با عمق تغییر می کند و تحت اثر حرکت هارمونیک سنگ بستر می باشد را نشان می دهد.

به منظور تعیین پاسخ زمین تحت اثر حرکت هارمونیک سنگ بستر، در ابتدا می بایست معادله دیفرانسیل حاکم بر مسئله مشخص گردد.

1 - Mass Density
2 - Poisson's Ratio

۲-۱-۱-۱- معادله‌ی تعادل حاکم بر محیط پیوسته

معادله‌ی تعادل حاکم بر محیط پیوسته در دستگاه مختصات دکارتی با استفاده از جبر اندیسی به صورت زیر می‌باشد:

$$\sigma_{ij,j} + f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (1-2)$$

که در آن σ_{ij} تنسور تنش، f_i نیروی حجمی، ρ چگالی و u_i بردار تغییر مکان می‌باشد. علامت (،) نیز بیانگر مشتق گیری است، با توجه به استفاده از قوانین جبر اندیسی، جمع بندی بر روی اندیس تکرار انجام می‌گردد.

ارتباط بین تنش - کرنش نیز طبق قانون عمومی هوک به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\sigma_{ij} = \lambda^* u_{k,k} \delta_{ij} + G^* (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2-2)$$

که در آن λ^* و G^* ضرایب لامه^۲ مختلط و دربرگیرنده‌ی اثر میرایی ویسکوز هستند و δ_{ij} نیز دلتای کرونکر^۳ می‌باشد. با توجه به این امر که در انتشار یک بعدی موج SH، مطابق شکل (۱-۲)، σ_{xz} تنها مولفه‌ی غیر صفر تنش می‌باشد، لذا رابطه‌ی (۱-۲) درغیاب نیروهای حجمی به صورت زیر ساده می‌گردد.

$$\frac{d\sigma_{xz}}{dz} = \rho \ddot{u}_x \quad (3-2)$$

1 - Dummy index
2 - Lamé Coefficients
3 - Kroncker delta

ازسوی دیگر باتوجه به اینکه بردار تغییر مکان تنها در راستای x دارای مولفه هست، لذا مولفه u_x تنها مولفه‌ی غیر صفر محیط است، که این مولفه در راستای z دارای تغییرات می‌باشد، بنابراین رابطه‌ی (۳-۲) به رابطه‌ی زیر تبدیل می‌گردد.

$$\sigma_{xz} = G^* \frac{du_x}{dz} \quad (۴-۲)$$

با جایگذاری رابطه‌ی (۲-۲) در (۳-۲)، رابطه‌ی تعادل دینامیکی برحسب تغییر مکان که در حقیقت یکی از حالت‌های خاص معادله‌ی عمومی ناویه^۱ می‌باشد به فرم زیر حاصل می‌گردد.

$$G^* \frac{d^2 u_x}{dz^2} + \frac{dG^*}{dz} \frac{du_x}{dz} = \rho \ddot{u}_x \quad (۵-۲)$$

که برای سهولت اندیس x حذف شده و معادله به فرم زیر خواهد شد.

$$G^* \frac{d^2 u}{dz^2} + \frac{dG^*}{dz} \frac{du}{dz} = \rho \ddot{u} \quad (۶-۲)$$

همانگونه که قبلاً گفته شد، حرکت نسبت به زمان هارمونیک فرض شده است؛ به عبارت دیگر مسئله درحوزه‌ی فرکانسی بررسی می‌شود؛ لذا داریم:

$$u(z, t) = u(z, \omega) e^{i\omega t} \quad (۷-۲)$$

که درصورت جایگذاری رابطه‌ی فوق در رابطه‌ی (۶-۲) و حذف متغیر زمان از طرفین معادله، معادله‌ی حاکم درفضای فرکانسی به فرم زیر خواهد شد:

$$G^* \frac{d^2 u}{dz^2} + \frac{dG^*}{dz} \frac{du}{dz} + \rho \omega^2 u = 0 \quad (۸-۲)$$