

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تعیین منحنی پراکندگی تئوریکی امواج رالی در محیط های لایه ای
و بررسی اثر موده های مختلف موج رالی بر روی آن

سید ابراهیم گلابی

۱۳۸۲ / ۴ / ۲۷

استاد راهنما: دکتر توحید اخلاقی

دانشکده فنی - دانشگاه ارومیه

گروه عمران

دی ماه ۱۳۸۲

مرکز اطلاعات و آرشیو علمی ایران
سید ابراهیم گلابی

۶۱۹۷۷

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - خاک و پی

پایاننامه کارشناسی ارشد عمران - خاک و پی با عنوان تعیین منحنی
پراکنندگی تئوریکی امواج رالی در محیط های لایه ای و بررسی اثر موده های
مختلف موج رالی بر روی آن به تاریخ ۸۲/۱۱/۱ و شماره ۲-۳۰۹ مورد
پذیرش هیات محترم داوران با رتبه عالی و نمره ۱۹ قرار گرفت.

۱- استاد راهنما و رئیس هیات داوران: دکتر رحیم اخلاقی (مستد)

۲- داور خارجی: دکتر محمد امین فروری

۳- داور داخلی: دکتر محمد رضا سیدابی

۴- نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر حبیب عبدمنیر

تقدیم به:

**مادر عزیزم. خداوند مهربانی که پیوسته
مدیون محبت های او می باشم.**

**پدر عزیزم. پشتوانه گرم زندگیم. مظهر
ایمان و تقوی در زندگیم.**

**همسر گرامیم. به خاطر تشویق.
راهنمایی و بردباری بی دریغش.**

تقدیر و تشکر

حال که با عنایات پروردگار متعال کار تحقیقاتی این پایان نامه با موفقیت به پایان رسیده است وظیفه خود می دانم از زحمات و کوشش های فراوان استاد راهنمای گرامی جناب آقای دکتر توحید اخلاقی که در طول این مدت با راهنمایی ها و ارشادات بی دریغشان مرا در تدوین این تحقیق یاری نمودند کمال تشکر و قدر دانی را به عمل آورم.

از مساعدت ها و راهنمایی های ارزنده آقایان مهندسین سارخانی و دیزجی که در طول این تحقیق از من دریغ نکردند قدردانی می نمایم. همچنین از مساعدت ها و همکاری های فراوان مدیریت و پرسنل شرکت آذر ادمان کمال قدردانی را دارم.

از اساتید عالی قدر دوره کارشناسی ارشد آقایان دکتر بدو، دکتر مومیوند، دکتر محمدی و دکتر مدرس به خاطر راهنمایی ها و زحماتشان کمال تشکر را دارم. در خاتمه از دوستان دوره کارشناسی ارشد به ویژه آقایان مهندسین زادکریم، ماهوتی، نقیلی، گلگون، جعفری و نبی زاده به خاطر ارائه کمکها، نظرات و پیشنهادات ارزنده کمال تشکر و سپاسگذاری را دارم.

سید ابراهیم گلابی

دی ماه ۸۲

فهرست مطالب

عنوان

صفحه

فصل اول: اهداف تحقیقاتی پایان نامه

- ۱-۱- مقدمه ۱
- ۱-۲- معرفی روش *SASW* ۲
- ۱-۳- تبیین اهداف تحقیقاتی پایان نامه ۴

فصل دوم: انتشار امواج در خاک

- ۱-۲- مقدمه ۵
- ۱-۱-۱- انتشار امواج در حالت یک بعدی ۶
- ۱-۱-۱-۱- امواج طولی در یک میله با طول نامحدود ۶
- ۱-۱-۱-۲- امواج پیچشی در یک میله با طول نامحدود ۸
- ۱-۲-۱-۱- حل معادله یک بعدی حرکت ۹
- ۱-۲-۱-۲- انتشار امواج در حالت سه بعدی ۱۱
- ۱-۲-۱-۲- مروری بر پارامترهای تنش ۱۲
- ۱-۲-۱-۲- مروری بر پارامترهای کرنش ۱۳
- ۱-۲-۱-۲- معادلات حرکت در یک محیط الاستیک سه بعدی ۱۷
- ۱-۲-۱-۲- جوابهای معادلات سه بعدی حرکت ۱۸
- ۱-۲-۱-۲- امواج منتشره در خاک ۲۰
- ۱-۲-۱-۳- امواج حجمی ۲۱
- ۱-۲-۱-۳- امواج سطحی ۲۱
- ۱-۲-۱-۳- موج رالی (*Rayleigh Wave*) ۲۱
- ۱-۲-۱-۳- سرعت موج رالی ۲۵
- ۱-۲-۱-۳- دامنه تغییر مکان موج رالی ۲۶

۲۸	۲-۱-۳-۶- موج لاو
۳۱	۲-۱-۳-۷- امواج سطحی بامودهای بالاتر
۳۱	۲-۱-۳-۸- پراکندگی امواج سطحی

فصل سوم: آزمایشات ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی

۳۴	۳-۱-۱- مقدمه
۳۴	۳-۱-۱-۱- آزمایشات آزمایشگاهی
۳۵	۳-۱-۲- آزمایشات در محل
۳۶	۳-۱-۲-۱- آزمایش انعکاس لرزه‌ای
۳۸	۳-۱-۲-۲- آزمایش انکسار لرزه‌ای
۳۹	۳-۱-۳-۱- آزمایش برداشت شناور
۴۰	۳-۱-۴-۱- آزمایش امواج عبوری
۴۱	۳-۱-۵-۱- آزمایش امواج نزولی (یاصعودی)
۴۳	۳-۱-۶-۱- آزمایش مخروط لرزه‌ای
۴۳	۳-۱-۷-۱- آزمایش FWD
۴۳	۳-۱-۸-۱- آزمایش آنالیز طیفی امواج سطحی (SASW)

فصل چهارم: FWD و کاربرد آن در ارزیابی و شناسایی سیستم‌های

چندلایه‌ای

۴۴	۴-۱- مقدمه
۴۶	۴-۲- تکنیکهای تغییر شکل استاتیکی
۴۷	۴-۲-۱- تیر بنکلمن
۴۸	۴-۲-۲- تغییر شکل نگارصلیبی
۵۰	۴-۲-۳- مزایا و معایب روش تغییر شکل استاتیکی
۵۱	۴-۳- روشهای آزمایشات دینامیکی

<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
۴-۳-۱- اجزای دستگاه FWD	۵۳
۴-۳-۱-۱- صفحه بارگذاری	۵۳
۴-۳-۱-۲- وزنه‌های سقوط‌کننده و سکوی بارگذاری	۵۴
۴-۳-۱-۳- سپرهای لاستیکی	۵۲
۴-۳-۱-۴- حسگرهای بار	۵۴
۴-۳-۱-۵- ژئوفن‌ها	۵۵
۴-۳-۱-۶- میله بالا و پائین رونده	۵۵
۴-۳-۱-۷- سیستم پروسسور ۸۶۰۰ و کامپیوتر	۵۶
۴-۳-۲- روش انجام آزمایش FWD	۵۶
۴-۳-۳- دستگاه تغییر شکل سنج با وزنه‌های سنگین	۵۷
۴-۳-۴- دستگاه پروفیل‌تر سبک لایه‌های روسازی	۵۸
۴-۳-۵- دستگاه مشخص‌کننده سطح جاده	۵۹
۴-۳-۶- دستگاه شبیه‌ساز وسایل نقلیه سنگین	۶۰
۴-۴- مقایسه بین روش‌های تغییر شکل استاتیکی و دینامیکی	۶۰
۴-۵- نرم‌افزارهای آنالیز برگشتی	۶۱
۴-۵-۱- نرم‌افزار ELMOD	۶۲
۴-۵-۲- نرم‌افزار EFROMD	۶۲

فصل پنجم: روش آنالیز طیفی امواج سطحی (SASW) در سیستم‌های

چند لایه‌ای و روسازی‌ها

۵-۱- مقدمه	۶۴
۵-۲- روش آزمایش SASW	۶۶
۵-۳- ابزار آزمایش SASW	۷۰
۵-۴- زمینه روش SASW	۷۲
۵-۵- منحنی پراکندگی تجربی	۷۴

صفحه

عنوان

۷۵.....	۶-۵-۶- مرحله وارونه سازی
۷۵.....	۶-۵-۱- تاریخچه پیشرفت روشهای برگردان
۷۸.....	۵-۷- استفاده از پراکندگی امواج سطحی برای تعیین خواص لایه های روسازی
۸۰.....	۵-۷-۱- روش آنالیز طیفی روسازی SPA (Spectral Pavement Analysis)
۸۰.....	۵-۷-۲- اجزا دستگاه SPA

فصل ششم: روش تامسون-هسل برای پراکندگی امواج سطحی در

محیطهای لایه‌ای

۸۳.....	۶-۱- مقدمه
۸۴.....	۶-۲- فرمول سازی مساله برای امواج رالی
۸۹.....	۶-۳- ساده سازی روش برای تحلیل کامپیوتری

فصل هفتم: نرم افزار تعیین منحنی پراکندگی با استفاده از روش

تامسون - هسل

۹۲.....	۷-۱- مقدمه
۹۲.....	۷-۲- ساختار نرم افزار
۹۳.....	۷-۲-۱- واحد ورودی
۹۳.....	۷-۲-۲- واحد محاسبه و آنالیز
۹۳.....	۷-۲-۲-۱- استفاده از ماتریس J
۹۴.....	۷-۲-۲-۲- استفاده از مقادیر k, L, M و N
۹۵.....	۷-۲-۳- واحد خروجی

فصل هشتم: رسم منحنی پراکندگی مود اساسی رالی و بررسی اثر

لایه بندی خاک بر آن

۹۸.....	۸-۱- مقدمه
---------	------------

عنوان

صفحه

- ۸-۲- تحقیق در مورد پارامترهای تولرانس t و نموفرکانس $4f$ ۹۹
- ۸-۲-۱- کالیبره نمودن نرم افزار برای حالت اجرای نرم افزار به روش ماتریس J ۹۹
- ۸-۲-۲- کالیبره نمودن نرم افزار جهت اجرای آن به روش مقادیر M, L, K و N ۱۰۰
- ۸-۳- ترسیم منحنی پراکندگی تئوریکی ۱۰۰
- ۸-۴- اثر لایه بندی خاک بر روی منحنی پراکندگی ۱۰۱

فصل نهم: امواج رالی با مودهای بالا

- ۹-۱- مقدمه ۱۳۰
- ۹-۲- بررسی مودهای بالا در امواج رالی ۱۳۱
- ۹-۳- حرکات جزئی ایجاد شده توسط بار متمرکز متناوب ۱۳۲
- ۹-۴- مشخصات پراکندگی شبیه سازی شده ۱۳۴
- ۹-۵- ایجاد منحنی پراکندگی تئوریکی مودهای مختلف امواج رالی ۱۳۶
- ۹-۶- مودهای موج رالی و پاسخ محیط ۱۳۷
- ۹-۷- رسم منحنی نسبت دامنه-فرکانس ۱۴۳

فصل دهم: تاثیر لایه بندی خاک بر روی منحنی پراکندگی امواج

رالی با مودهای بالا

- ۱۰-۱- مقدمه ۱۴۵
- ۱۰-۲- مدل‌های لایه ای مورد مطالعه ۱۴۵
- ۱۰-۳- منحنی های پراکندگی مدل های لایه ای ۱۴۷
- ۱۰-۴- بررسی منحنی های پراکندگی مودهای مختلف ۱۴۸
- ۱۰-۵- بحث و نتیجه گیری ۱۴۹

عنوان

صفحه

فصل یازدهم: اثر مودهای مختلف موج رالی روی نسبت دامنه و پاسخ محیط در فضای فرکانسی	
۱-۱-۱۱- مقدمه	۱۵۷
۱۱-۲- بررسی اثر مودها روی نسبت دامنه	۱۵۷
۱۱-۳- بررسی اثر مودها روی پاسخ محیط	۱۶۱
۱۱-۴- بحث و نتیجه گیری	۱۶۳

فصل دوازدهم: جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۱۲- خلاصه نتایج	۱۶۵
۱۲-۲- پیشنهادات	۱۶۸
مراجع	۱۶۹

فهرست اشکال

عنوان

صفحه

- شکل (۱-۲): میله محصور شده نامحدود برای انتشار امواج یک بعدی (تقید میله در برابر کرنش شعاعی بصورت شماتیک با تعداد غلطک نشان داده شده است) ۸
- شکل (۲-۲): تنشها و تغییر مکانها در دو انتهای یک المان بطول dx و سطح مقطع A ۸
- شکل (۳-۲): گشتاور زاویه چرخش در دو انتهای قطعه‌ای به طول dx و سطح مقطع A ۱۰
- شکل (۴-۲): جابجایی ذرات؛ (الف) - به صورت تابعی از زمان، (ب) - به صورت تابعی از موقعیت در امتداد میله ۱۲
- شکل (۵-۲): پارامترهای تنش برای المانی به ابعاد dx ، dy و dz ۱۳
- شکل (۶-۲): المان مربعی تحت اثر تغییر شکل صفحه‌ای ۱۵
- شکل (۷-۲): نمایش تنش‌های در یک المان مکعبی ۱۷
- شکل (۸-۲): الف - انتشار امواج P ، ب - انتشار امواج S ۲۲
- شکل (۹-۲): الف - امواج لاو، ب - امواج رالی ۲۳
- شکل (۱۰-۲): حرکت ایجاد شده توسط یک نمونه موج صفحه‌ای که در جهت x منتشر گردد، حرکت موج تغییراتی در جهت y نخواهد داشت ۲۳
- شکل (۱۱-۲): تغییرات سرعت انتشار امواج رالی و حجمی با ضریب پواسون ۲۷
- شکل (۱۲-۲): حرکت قائم و افقی امواج رالی، ضریب دامنه مبین آن است که تغییر مکان در خلاف جهت جابجایی سطحی می‌باشد ۲۸
- شکل (۱۳-۲): نمایش شماتیکی لایه سطحی نرمتر واقع بر روی محیط الاستیک نیمه فضا که ساده‌ترین شرایط جهت ایجاد موج لاومی باشد ۲۹
- شکل (۱۴-۲): تغییرات دامنه تغییر مکان ذرات با عمق برای امواج لاو ۳۱
- شکل (۱۵-۲): تغییرات سرعت امواج لاو با فرکانس ۳۲
- شکل (۱-۳): روشهای مختلف تولید اغتشاشات برای آزمایشات ژئوفیزیک لرزه‌ای؛ (الف) انفجار در عمق کم، (ب) ضربه عمودی، (ج) ضربه افقی ۳۶
- شکل (۲-۳): (الف) - مسیر شعاع برای موج برخورد منعکس شده P از لایه افقی مرزی؛ (ب) - تغییرات زمان حرکت برای امواج مستقیم و منعکس شده ۳۸
- شکل (۳-۳): شکل شماتیکی آزمایش انکسار لرزه‌ای ۳۹

- شکل (۳-۴): آزمایش امواج لرزه ای عبوری، (الف) - اندازه گیری مستقیم بوسیله دو گمانه، (ب) -
 اندازه گیری فاصله ای بوسیله سه گمانه ۴۱
- شکل (۳-۵): (الف) - آزمایش امواج صعودی؛ (ب) - آزمایش امواج نزولی ۴۲
- شکل (۴-۱): پاسخ جاده به بار چرخ در حال حرکت ۴۵
- شکل (۴-۲): لایه های روسازی با تغییر شکل ماکزیمم یکسان و کاسه تغییر شکل متفاوت ۴۵
- شکل (۴-۳): استفاده ترکیبی از تغییر شکل و کاسه تغییر شکل در ارزیابی روسازی ها ۴۶
- شکل (۴-۴): نمای کلی از دستگاه تیر بنکلمن ۴۷
- شکل (۴-۵): نحوه انجام آزمایش با تیر بنکلمن ۴۸
- شکل (۴-۶): نمای کلی تغییر شکل نگار صلیبی ۴۹
- شکل (۴-۷): تیر تغییر شکل تغییر شکل نگار صلیبی ۴۹
- شکل (۴-۸): روش ضبط تغییر شکل ها با استفاده از تغییر شکل نگار ۵۰
- شکل (۴-۹): نمایش شماتیک چرخه اندازه گیری تغییر شکل نگار که احتیاج به اصلاح هندسی
 دارد ۵۱
- شکل (۴-۱۰): نحوه حمل دستگاه FWD ۵۲
- شکل (۴-۱۱): نمایی از دستگاه FWD ۵۲
- شکل (۴-۱۲): صفحه بار گذاری ۵۳
- شکل (۴-۱۳): نمای کلی از اجزای دستگاه FWD ۵۴
- شکل (۴-۱۴): نمایی از حسگر بار دینامیکی ۵۵
- شکل (۴-۱۵): نمای کلی از اجزا دستگاه HWD ۵۷
- شکل (۴-۱۶): اجرای آزمایش HWD در فرودگاه Vantaa هلسینکی ۵۸
- شکل (۴-۱۷): نمای کلی از دستگاه Lightweight Profilometer ۵۸
- شکل (۴-۱۸): نمایی کلی از دستگاه RSP ۶۰
- شکل (۴-۱۹): نمای کلی از دستگاه HVS ۶۱
- شکل (۵-۱): تصویر کلی از انجام آزمایش SASW ۶۷
- شکل (۵-۲): انجام آزمایش SASW ۶۷
- شکل (۵-۳): نمایی از ابزار آزمایش SASW ۶۸

- شکل (۴-۵): حالت‌های مختلف هندسی آرایش گیرنده - منبع، الف: حالت هندسی نقطه مشترک در وسط گیرنده ها، ب: حالت هندسی منبع مشترک ۶۹
- شکل (۵-۵): طول موج و سرعت فاز امواج رالی ۷۰
- شکل (۶-۵): الف: فاز طیفی امواج گذرنده، ب- تابع تطابق ۷۰
- شکل (۷-۵): یک سری از منحنی های پراکندگی تجربی به همراه منحنی پراکندگی تجربی میانگین ۷۳
- شکل (۸-۵): مقایسه منحنی پراکندگی تجربی و تئوریک ۷۳
- شکل (۹-۵): مقطع لایه ای زمین مدلسازی شده ۷۶
- شکل (۱۰-۵): نمای کلی دستگاه SPA ۸۰
- شکل (۱-۶): مدل محیط لایه‌ای ۸۴
- شکل (۱-۷): فلوچارت الگوریتم مربوط به روش J ۹۶
- شکل (۲-۷): فلوچارت الگوریتم مربوط به روش مقادیر K, L, M و N ۹۷
- شکل (۲-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه آمبارلی (Ambarli), ATS ۱۰۳
- شکل (۳-۸): منحنی های پراکندگی منطقه ATS با استفاده از مقادیر جدول (۲-۸) ۱۰۴
- شکل (۴-۸): منحنی های پراکندگی منطقه ATS با استفاده از مقادیر جدول (۳-۸) ۱۰۵
- شکل (۵-۸): منحنی های پراکندگی منطقه ATS با استفاده از مقادیر جدول (۴-۸) ۱۰۵
- شکل (۶-۸): منحنی های پراکندگی منطقه ATS با استفاده از مقادیر جدول (۵-۸) ۱۰۶
- شکل (۷-۸): منحنی های پراکندگی منطقه ATS با استفاده از مقادیر جدول (۶-۸) ۱۰۷
- شکل (۸-۸): منحنی های پراکندگی منطقه ATS با استفاده از مقادیر جدول (۷-۸) ۱۰۷
- شکل (۹-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه بولو (Bolu), BOL ۱۰۸
- شکل (۱۰-۸): منحنی پراکندگی مربوط به منطقه بولو (Bolu), BOL ۱۰۸
- شکل (۱۱-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه سکمه (Cekmece), CAN ۱۰۹
- شکل (۱۲-۸): منحنی پراکندگی تئوریک منطقه سکمه (Cekmece), CAN ۱۰۹
- شکل (۱۳-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه دوزچی (Duzce), DZC ۱۱۰
- شکل (۱۴-۸): منحنی پراکندگی منطقه دوزچی (Duzce), DZC ۱۱۰
- شکل (۱۵-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه گیبز (Gebze), GBZ ۱۱۱

- شکل (۱۶-۸): منحنی پراکندگی منطقه گیبز (GBZ), (Gebze) ۱۱۱
- شکل (۱۷-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه ایزنیک (JZN) (Izmit) ۱۱۲
- شکل (۱۸-۸): منحنی پراکندگی منطقه ایزنیک (JZN) (Izmit) ۱۱۲
- شکل (۱۹-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه شماره یک ایزمیت (JZI) (Izmit) ۱۱۳
- شکل (۲۰-۸): منحنی پراکندگی منطقه شماره یک ایزمیت (JZI) (Izmit) ۱۱۳
- شکل (۲۱-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه شماره دو ایزمیت (JZI) (Izmit) ۱۱۴
- شکل (۲۲-۸): منحنی پراکندگی منطقه شماره دو ایزمیت (JZI) (Izmit) ۱۱۴
- شکل (۲۳-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه ذکر یا (SKR), (Sakarya) ۱۱۵
- شکل (۲۴-۸): منحنی پراکندگی منطقه ذکر یا (SKR), (Sakarya) ۱۱۵
- شکل (۲۵-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه یاریمکا (YPT), (Yarimca) ۱۱۶
- شکل (۲۶-۸): منحنی پراکندگی منطقه یاریمکا (YPT), (Yarimca) ۱۱۶
- شکل (۲۷-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه LD-3 ۱۱۷
- شکل (۲۸-۸): منحنی پراکندگی منطقه LD-3 ۱۱۷
- شکل (۲۹-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه LD-5 ۱۱۸
- شکل (۳۰-۸): منحنی پراکندگی منطقه LD-5 ۱۱۸
- شکل (۳۱-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه LD-7 ۱۱۹
- شکل (۳۲-۸): منحنی پراکندگی منطقه LD-7 ۱۱۹
- شکل (۳۳-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه LD-9 ۱۲۰
- شکل (۳۴-۸): منحنی پراکندگی منطقه LD-9 ۱۲۰
- شکل (۳۵-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه LD-10 ۱۲۱
- شکل (۳۶-۸): منحنی پراکندگی منطقه LD-10 ۱۲۱
- شکل (۳۷-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه LD-12 ۱۲۲
- شکل (۳۸-۸): منحنی پراکندگی منطقه LD-12 ۱۲۲
- شکل (۳۹-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه بالیکا (BAL), (Ballica) ۱۲۳
- شکل (۴۰-۸): منحنی پراکندگی منطقه بالیکا (BAL), (Ballica) ۱۲۳
- شکل (۴۱-۸): پروفیل سرعت موج برشی منطقه شماره یک آیدینپینار (AYD), (Aydinpinar) ... ۱۲۴