پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

رساله دکترای ژئوفیزیک زلزله‌شناسی

مطالعه ساختار لیتوسفر قاره‌ای در منطقه تصادمی شمال شرق ایران

سید خلیل متقی

استاد راهنما: دکتر محمد تاتار

اساتید مشاور: دکتر ایوب کاویانی، دکتر حسین شمالی

زمستان ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به:

همسر دلبندم مهسا

و

اُستادم دکتر محمد تاتار

تشکر و قدردانی

دکتر محمد تاتار دوست و استاد فرزانه‌ام، و همراه و همیار من در چهار سال گذشته، حق بزرگی به گردن من دارد. این کلمات نمی‌تواند قدردان ایشان باشد اما به رسم متعارف می‌نویسم تا بگویم که از ایشان به خاطر همه الطاف، راهنمایی‌ها و کمک‌هایشان متشکرم. دکتر حسین شمالی بی هیچ انتظاری همیشه همراه ما در این پایان‌نامه بودند. نام ایشان در اواخر کار به تیم هدایت پایان‌نامه اضافه شد اما ایشان از ابتدا با کمک‌های بسیار بسیار باارزششان همراه ما بودند و ما را شرمنده لطفشان می‌کردند. دکتر ایوب کاویانی نیز با همه دغدغه-هایشان همیشه در هدایت پایان‌نامه و پیش‌بردن بار رساله ما را یاری کردند که از همه آنها متشکرم.

بر خود واجب می‌دانم تا از دوستان عزیزم نیز تشکر کنم. دوستانی که همیشه مشوقم بودند و همواره با یاری‌های خود مسیر رو به جلوی این پایان‌نامه را هموار می‌ساختند. از دکتر حبیب رحیمی، وحید غلامی، محسن فرخی، روح‌اله فرقدان، محمد شاهوار، مجتبی راکی، محمد طالبیان و مجید میبدیان صمیمانه متشکرم. از اساتید محترمی که داوری پایان‌نامه را به عهده گرفتند: آقایان دکتر سیاهکوهی، دکتر جواهریان، دکتر عباسی و دکتر یمینی‌فرد ممنونم. دکتر حسامی نیز همیشه بی هیچ انتظاری راهنما و همراه من بوده‌اند.

از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله به خاطر پشتیبانی مالی نویسنده و پروژه ممنونم. همچنین از پروفسور کیت پریستلی (دانشگاه کمبریج) به خاطر در اختیار قرار دادن دستگاه‌های زلزله‌نگاری و دانیل رام (دانشگاه کمبریج) به خاطر همراهی‌اش در نصب و راه‌اندازی شبکه متشکرم. از پروفسور جولیانو پانزا (مرکز تحقیقات فیزیک نظری عبدالسلام ICTP و دانشگاه تریسته ایتالیا) به خاطر حمایت مالی و علمی‌اش در دوره شش ماهه فرصت مطالعاتی در ایتالیا سپاسگزارم. برگردان همزمان تابع گیرنده و منحنی پاشش و مدلسازی مستقیم داده‌های گرانشی تحت نظر مستقیم ایشان انجام شد.

از همسرم که بیشترین نصیبش در یک سال گذشته از ازدواجمان دوری و صبوری بوده صمیمانه متشکر و عذرخواهم. این رساله حجیم با انگشتان پرمهر ایشان به دنیای دیجیتال وارد شده است. از پدر، مادر و خانواده گلم که بار مشکلات سی‌ساله مرا همیشه مهربانانه به دوش کشیده‌اند نیز ممنون و به همه آنان مدیونم.

امید که تشکر مرا با قلب‌های پرمهرشان پذیرا باشند.

چکیده

حرکت رو به شمال صفحه عربی نسبت به صفحه اوراسیا باعث ایجاد تغییر شکل در قسمت‌های مختلف ایران از جمله زاگرس، البرز، کپه‌داغ و نواحی برشی شرق ایران شده است. این تغییر شکل‌ها به صورت کوهزایی و گسلش در ناحیه برخوردی شمال شرق ایران رشته‌کوه‌های کپه‌داغ و بینالود و سیستم گسلی بخردان- قوچان را به عنوان عوارض مهم قابل مشاهده در سطح زمین ایجاد کرده است. اثرات این برخورد قاره‌ای در پوسته و گوشته بالایی ناحیه شمال شرق ایران تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته و شناخته نشده است. عدم انجام مطالعه ساختارهای عمیق در این ناحیه باعث شده تا رژیم تکتونیکی این منطقه همچنان نامعلوم باقی بماند. برای مثال مشخص نیست که فرورانش یا زیرراندگی قاره‌ای در این ناحیه به سمت شمال است یا به سمت جنوب. مکان ناحیه بخیه در گوشته بالایی کجاست؟ و یا هندسه پوسته و ارتباط آن با توپوگرافی سطحی چگونه است؟ برای پاسخ به چنین سوالاتی، ۱۹ ایستگاه باندپهن از محدوده شهر یزد واقع در ایران مرکزی تا محدوده شهر سرخس در منتهی‌الیه شمال شرقی ایران و در مجاورت مرز ترکمنستان و در قسمت ایرانی صفحه توران نصب شد و به مدت ۱۹ ماه، از مرداد ۸۵ تا بهمن ۸۶، به داده‌برداری پیوسته مشغول گردید. روش‌های انتخابی در این رساله برای مطالعه پوسته و گوشته بالایی، توموگرافی امواج P دورلرز، محاسبه توابع گیرنده، برگردان همزمان توابع گیرنده با منحنی‌های پاشش امواج سطحی و مدل‌سازی مستقیم داده‌های گرانشی است. نتیجه این مجموعه مطالعات نشان می‌دهد که رشته‌کوه‌های مهم شمال شرق ایران، یعنی رشته‌کوه‌های کپه‌داغ و بینالود، فاقد ریشه هستند و ضخیم شدگی پوسته، مشاهده شده در جنوب رشته‌کوه بینالود، در جایی واقع شده که توپوگرافی مرتفعی در مقایسه با نواحی اطراف وجود ندارد و در نتیجه ناشی از اثرات ایزوستازی نیست. به علاوه، وجود یک لیتوسفر ضخیم‌تر در زیر مناطق کپه‌داغ و بینالود در مقایسه با ایران مرکزی (به دست آمده از برگردان همزمان تابع گیرنده و منحنی پاشش) و مشاهده یک آنومالی پرسرعت در زیر بینالود (بدست آمده از توموگرام محاسبه شده به روش توموگرافی دورلرز) وجود زیرراندگی صفحه توران به زیر ایران مرکزی را محتمل می‌سازد. محل ناحیه بخیه در گوشته بالایی در زیر دره اترک، دره واقع در بین رشته-کوه‌های کپه‌داغ و بینالود، قرار گرفته که منطبق با ناحیه بخیه مشاهده شده در سطح زمین توسط مطالعات زمین‌شناسی است. وجود یک پوسته بسیار نازک با ضخامت حدود ۳۵ کیلومتر در زیر ناحیه طبس و یک آنومالی بسیار کم‌سرعت و کم چگال در گوشته بالایی ایران مرکزی نیز از نتایج جالب توجه دیگری است که از مدل‌های به دست آمده در این رساله قابل مشاهده است. تاکنون در هیچ نقطه‌ای از صفحه ایران پوسته‌ای به این نازکی مشاهده نشده است.

واژه‌های کلیدی

ناحیه برخوردی، شمال شرق ایران، ایران مرکزی، توموگرافی امواج دورلرز، تابع گیرنده، منحنی پاشش، معکوس‌سازی، مدلسازی داده‌های گرانشی

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- هدف از انجام این مطالعه ۵

فصل دوم: موقعیت تکتونیکی و ژئودینامیکی منطقه ۷

۲-۱- تاریخچه پیدایش ۸

۲-۲- مروری بر زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه مورد مطالعه ۹

۲-۲-۱- کپه‌داغ ۱۱

۲-۲-۲- بینالود ۱۵

۲-۲-۳- ایران مرکزی ۱۷

۲-۳- نرخ کوتاه‌شدگی در منطقه مورد مطالعه ۱۹

۲-۴- فرورانش در شمال شرق ایران ۲۱

۲-۵- مطالعات پیشین انجام شده بر روی منطقه مورد مطالعه ۲۲

فصل سوم: توموگرافی زمان سیر امواج P دورلرز: روش ACH ۲۵

۳-۱- مقدمه ۲۶

۳-۲- معکوس‌سازی ۲۷

۳-۲-۱- محاسبه مقدار باقیمانده نسبی ۲۷
۳-۲-۲- پارامتر بندی حجم مورد مطالعه ۲۷
۳-۲-۳- تشکیل دستگاه معادلات خطی ۲۸
۳-۲-۴- انتخاب پارامتر میرایی ۳۱
۳-۲-۵- رزولوشن و کواریانس ۳۲
۳-۲-۶- هموار سازی مدل خروجی ۳۳
۳-۲-۷- تصحیح اثر پوسته ۳۳
۳-۳- مراحل انجام کار ۳۴
۳-۳-۱- قرائت زمان رسید فاز P ۳۴
۳-۳-۲- پارامتربندی مدل ۳۶
۳-۳-۳- فاکتور میرایی ۳۸
۳-۳-۴- اجرای معکوس سازی ۳۸

فصل چهارم: توموگرافی زمان سیر امواج P دورلرز: داده‌ها، نتایج و آزمون‌های کیفیت ۳۹
۴-۱- داده‌ها ۴۰
۴-۲- نتایج ۴۴
۴-۳- آزمون‌های کیفیت ۴۶
۴-۳-۱- تعداد پرتوهای عبوری و ماتریس رزولوشن ۴۶
۴-۳-۲- آزمون مدل‌های مصنوعی ۴۷
۴-۳-۳- مقایسه نتایج بانک داده‌های مختلف ۵۱
۴-۳-۴- مقایسه نتایج قبل و بعد از تصحیح پوسته ۵۲

فصل پنجم: معکوس سازی همزمان توابع گیرنده و منحنی‌های پاشش امواج سطحی ۵۳

۵-۱- تابع گیرنده ۵۴

۵-۱-۱- مقدمه ۵۴

۵-۱-۲- معرفی تابع گیرنده ۵۵

۵-۱-۳- پوشش مکانی توابع گیرنده ۵۶

۵-۱-۴- توصیف فیزیکی تابع گیرنده ۵۷

۵-۱-۵- نحوه آماده سازی توابع گیرنده ۵۹

۵-۱-۵-۱- جداسازی اثرات چشمه ۵۹

۵-۱-۵-۲- روش های واهمامیخت ۶۰

۵-۱-۵-۲- ۱- واهمامیخت در حوزه فرکانس- روش سطح آب ۶۱

۵-۱-۵-۲- ۲- واهمامیخت در حوزه زمان-روش تکراری ۶۲

۵-۲- پاشش امواج سطحی و ساختار زمین ۶۵

۵-۲-۱- معرفی ۶۵

۵-۲-۲- انواع موج‌های سطحی ۶۵

۵-۲-۲-۱- موج ریلی ۶۶

۵-۲-۲-۲- امواج لاو ۶۷

۵-۲-۳- پاشش در سرعت گروه ۷۰

۵-۲-۴- معکوس سازی امواج سطحی ۷۱

۵-۲-۴-۱- تحلیل زمان- فرکانس ۷۲

۵-۲-۴-۲- توموگرافی دو بعدی ۷۳

۵-۲-۴-۳- معکوس سازی غیر خطی- روش هدجگ ۷۴

۵-۲-۴-۴- قدرت تفکیک منحنی پاشش امواج سطحی ۷۵

۵-۳- معکوس سازی همزمان منحنی پاشش امواج سطحی و تابع گیرنده ۷۷

۵-۳-۱- مقدمه ۷۷

۵-۳-۲- روش معکوس سازی ۷۷

فصل ششم: معرفی داده‌ها و ارائه‌ی نتایج معکوس‌سازی همزمان توابع گیرنده و منحنی‌های پاشش ۸۱

۶-۱- معرفی داده‌ها ۸۲

۶-۲- آماده‌سازی داده‌ها ۸۵

۶-۲-۱- اثر فاصله بر تابع گیرنده، تصحیح نقطه تبدیلی مشترک ۸۹

۶-۲-۲- اثر زاویه سمتی برگشتی بر روی توابع گیرنده ۹۱

۶-۳- مهاجرت به عمق توابع گیرنده ۹۲

۶-۴- معکوس‌سازی همزمان توابع گیرنده و منحنی‌های پاشش ۹۵

۶-۴-۱- فرآیند معکوس‌سازی ۹۵

۶-۴-۲- آزمون پایداری نتایج ۱۰۰

۶-۴-۳- ساده‌سازی مدل‌ها ۱۰۶

۶-۴-۴- بحث بر روی نتایج ۱۰۸

فصل هفتم: مدل‌سازی مستقیم داده‌های گرانشی ۱۱۲

۷-۱- مقدمه ۱۱۳

۷-۲- تصحیح داده‌های گرانشی ۱۱۴

۷-۳- تصحیح بوگه ۱۱۶

۷-۴- داده‌ها ۱۱۸
۷-۵- روش ۱۲۰
۷-۶- نتایج ۱۲۳

فصل هشتم: بحث و نتیجه‌گیری ۱۲۶
۸-۱- نتایج بدست آمده از توموگرافی دورلرز ۱۲۷
۸-۲- نتایج بدست آمده از برگردان همزمان تابع گیرنده و منحنی پاشش ۱۲۸
۸-۳- نتایج بدست آمده از مدل‌سازی گرانشی ۱۲۹
۸-۴- بحث ۱۳۰

فهرست منابع ۱۳۳
پیوست ۱۴۱

پیش‌گفتار

فهم هر واقعیت نامعلوم، همواره شوری خاص در وجود من برمی‌انگیخته است. شوری که ریشه در بازیهای کودکی من دارد. این شور را در بازی‌های ریاضی به صورتی ویژه تجربه کرده‌ام. آنجا که در خاطره‌هایی روشن، در بازی با دوستی هرکدام عددی ۴ رقمی را در ذهن تعیین می‌کردیم و بعد به اعداد حدس زده شده یکدیگر امتیاز می‌دادیم و آنقدر پیش می‌رفتیم تا با تحلیل، عدد رقیب را حدس بزنیم. لذت آن بازی‌ها هنوز در خاطرم شوری شیرین دارد. آنچه در این رساله انجام داده‌ام چنان شوری را در من زنده کرده است. لذت آشکار کردن واقعیتی نادانسته، فارغ از اینکه این واقعیت مرتبط با علوم زمین است یا با ناحیه‌ای در شمال شرق ایران ارتباط دارد. در این میانه میدان بازی بوده که مهم بوده است. این میدان بازی را دکتر محمد تاتار برای من مهیا نمود. فراهم کردن پایه‌های علمی مناسب برای آغاز مطالعه، در اختیار قرار دادن بانک داده مناسب و هدیه دادن انرژی مثبت به بنده همواره همیار راه من بوده است. پرداخت مالی پژوهشگاه که فراغتی کودکانه فراهم نمود تا بی هیچ دغدغه سرگرم لذت و دل‌مشغولی خود شوم نیز نقشی به سزا داشت که سپاس ویژه خود را از دکتر تاتار عزیز و بانیان کارهای خوب پژوهشگاه صمیمانه ابراز می‌دارم.

ناحیه مورد مطالعه در این رساله یعنی ناحیه برخوردی شمال شرق ایران، پیش از این نیز به عنوان یک ناحیه‌ی کمتر مطالعه شده مورد علاقه زلزله‌شناسان بوده است. بانک داده موجود فرصتی را مهیا ساخت تا برای اولین بار ساختار پوسته و قسمت فوقانی گوشته بالایی با قابلیت تفکیک بالا مورد مطالعه قرار بگیرد. عدم وجود ریشه در زیر رشته‌کوه‌های مهم منطقه یعنی رشته‌کوه‌های بینالود و کپه‌داغ و وجود یک ضخیم‌شدگی در جنوب بینالود، در زیر جایی که توپوگرافی مرتفعی در سطح زمین دیده نمی‌شود، از نتایج جالب توجه این مطالعه است. همچنین، احتمال وجود زیرراندگی صفحه توران به زیر خردصفحه ایران مرکزی، آنطور که از شواهد سه روش مورد استفاده در این مطالعه (شامل توموگرافی دورلرز، برگردان همزمان تابع گیرنده و منحنی پاشش و مدلسازی گرانشی) به دست می‌آید، به عنوان نتیجه جالب توجه دیگری از این رساله ارائه شده است.

به این امید که مطالب و نتایج ارائه شده در این نوشته، روزی، جایی، مفید فایده باشد.

در پایان، شرمگینم که این اوراق را به عنوان ثمره سه سال کار پژوهشی مداوم ارائه می‌دهم. ثمره‌ای که شاید خسرانی بزرگ به دیده آید، اما لذت اجرای آن برای بنده همه را یک‌جا جبران می‌نماید.

سیدخلیل متقی، ۲۱ آذر ۱۳۹۰- تهران

فصل اول

۱-۱- مقدمه

روش‌های لرزه‌ای، در میان روش‌های ژئوفیزیکی، در دسته روش‌هایی قرار دارند که دارای بیشترین قابلیت تفکیک در تعیین ساختارهای درون زمین می‌باشند [۱]. سری‌های زمانی ثبت شده از لرزش زمین که در نقاط مختلف سطح پوسته جمع‌آوری می‌شوند، این فرصت را برای زلزله‌شناسان ایجاد می‌کنند تا به مطالعه چشمه‌های مولد زمین‌لرزه و مسیر عبور پرتوها در زمین بپردازند. لرزه‌نگاشت‌ها که داده‌های اصلی مورد استفاده زلزله‌شناسان هستند، اثرات چشمه و مسیر انتشار را به طور همزمان در خود دارند. بنابراین مطالعه چشمه زمین‌لرزه‌ها، همواره نیازمند شناخت ساختار درونی زمین و مطالعه ساختار درونی زمین نیز نیازمند شناخت اثرات چشمه زمین‌لرزه است. در نتیجه زلزله‌شناسی را می‌توان علمی دانست که در آن به صورتی متناوب، یافته‌های جدید باعث بهبود یافته‌های پیشین می‌شوند.

اگر چه هر مساله پژوهشی در زلزله‌شناسی جالب است و می‌تواند کنجکاوی یک محقق زلزله‌شناس را برانگیزد، ولی در غیاب وجود مطالعات جامع و نتایج قابل اعتماد، و همچنین با توجه به اهمیت و ضرورت بررسی ساختار پوسته و گوشته بالایی در یک ناحیه برخوردی قاره‌ای مانندِ ایران، در تحقیق حاضر سعی می‌شود تا در قالب یک رساله دکتری به بررسی ساختار لیتوسفر قاره‌ای شامل پوسته و قسمت فوقانی گوشته بالایی در زیر سه منطقه لرزه‌زمین‌ساختی کپه‌داغ، بینالود و ایران مرکزی واقع در شمال شرق ایران پرداخته شود. روش‌های مورد نظر برای این مطالعه برگردان همزمان تابع گیرنده و منحنی پاشش امواج ریلی جهت ارائه مدل سرعت موج S برای لیتوسفر و همچنین توموگرافی سه‌بعدی با استفاده از برگردان زمان رسید نسبی امواج P زلزله‌های دور با استفاده از روش ACH [۲] جهت مطالعه رفتار گوشته بالایی تا عمق حدود ۲۰۰ کیلومتر است.

با توجه به استفاده از روش برگردان همزمان تابع گیرنده و منحنی پاشش، در ادامه به طور خلاصه به تاریخچه این روش اشاره می‌گردد. در سال ۱۹۷۹ چارلز لانگستون [۳] با استفاده از اطلاعات موجود در یک لرزه-نگاشتِ سه‌مولفه‌ای که از یک رویدادِ دور ثبت شده بود به مطالعه ساختار سرعتی زیر ایستگاه پرداخت. بدین صورت که با توجه به دسترسی به سه نگاشتِ هم‌مسیر از یک رویداد، وی می‌توانست اثرات ساختارهای نزدیک ایستگاه را از بقیه سیگنال جدا کند. این یافته جدید، فصل نوینی را در زلزله‌شناسی باز کرد که هدف آن مطالعه ساختار لیتوسفر، به کمک یک سیگنال جدا شده از لرزه‌نگاشت به نام تابع گیرنده بود. از آن زمان به بعد، تابع گیرنده به عنوان روشی برای تعیین ناپیوستگی‌های سرعتی در زیر ایستگاه‌های موقت و دائم لرزه‌نگاری، در سراسر دنیا مورد استفاده قرار گرفته است، ولی یک اشکال مهم در معکوس‌سازی تابع گیرنده جهت تعیین مدل سرعتی، واحد نبودن جواب‌های معکوس‌سازی است [۴]. این عدم وجود جواب واحد به علت وجود موازنه (trade-off) بین مقدار عمق ناپیوستگی و

سرعت موج در محاسبه مقدار زمان سیر است که مشکلی بدیهی در همه روش‌هایی است که از زمان سیر موج برای محاسبه همزمان سرعت و فاصله استفاده می‌کنند. اما روش دیگری نیز برای محاسبه سرعت موج S در لایه‌های فوقانی زمین وجود دارد که از منحنی پاشش امواج سطحی به عنوان داده ورودی استفاده می‌کند. در این روش اشکال یاد شده یعنی موازنه بین سرعت و عمق وجود ندارد ولی اشکال آن قدرت تفکیک کم در تشخیص مرزهای سرعتی است. بنابراین، با علم به اینکه توابع گیرنده و منحنی‌های پاشش همگی به پارامترهای محیط (سرعت و عمق) حساسند، یک برگردان همزمان از هر دو بانک داده می‌تواند عدم‌قطعیت‌های موجود در استفاده جداگانه از هر روش را به طور قابل توجهی کاهش دهد [۵].

استفاده از روش فوق (برگردان همزمان تابع گیرنده و منحنی پاشندگی) هندسه و ساختار سرعتی پوسته و به ویژه عمق ناپیوستگی موهو را با قدرت تفکیک قابل توجه آشکار می‌سازد. به علاوه این روش قادر است تا ساختار قسمت فوقانی گوشته بالایی را با قدرت تفکیک عمقی مناسب ارائه دهد.

به منظور مطالعه گوشته فوقانی با قدرت تفکیک جانبی مناسب، در این رساله از روش توموگرافی سه‌بعدی زمان رسیدِ نسبی امواجِ P زلزله‌هایِ دور استفاده می‌شود تا در نتیجه‌ی تلفیق نتایج این روش با روش فوق، تصویری جامع از پوسته و گوشته بالایی ارائه شود. با توجه به استفاده از روش توموگرافی در اینجا به تاریخچه این روش نیز به صورت کوتاه اشاره می‌گردد. از سال‌های ۱۹۳۰ به بعد زلزله شناس‌ها متوجه شده بودند که زلزله‌های دور در زمان‌های پیش‌بینی شده توسط مدل‌های زمین به ایستگاه ثبت‌کننده نمی‌رسند و همواره قدری تاخیر یا تقدم زمانی بین مقدار مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های موجود وجود داشت. اختلاف مشاهده شده در زمان سیر پرتو به عنوان داده ورودی می‌توانست جهت آشکارسازی ناهمگنی‌های درون زمین مورد استفاده قرار گیرد. آکی، کریستوفرسن و هیوزبای [۲] اولین افرادی بودند که با استفاده از ایده توموگرافی در فیزیک پزشکی، یک روش معکوس‌سازی برای برگردان مقادیر باقیمانده زلزله‌های دورلرز تدوین کردند که به روش ACH (برگرفته از حرف اول اسم آنها) معروف شد. مدل سرعت سه بعدی بدست آمده از این روش شامل بلوکهایی است که هر کدام یک تغییر سرعت نسبی نسبت به بلوک‌های مجاور ارائه می‌دهند. روش ACH با وجود قدمتش همچنان از روش‌های رایج پرطرفدار جهت مطالعه ساختارهای عمیق درون زمین به حساب می‌آید و قادر است مدل‌هایی با قدرت تفکیک جانبی قابل توجه ارائه دهد.

یک روش موثر و قدرتمند برای ارائه مدل‌های ژئوفیزیکی معتبر، استفاده هم‌زمان از داده‌های ژئوفیزیکی متفاوت، مانند داده‌های لرزه‌ای و گرانشی، جهت ارائه مدلی واحد، یا مقید کردن مدل‌های به دست آمده از روش-های مختلف به نتایج یکدیگر است. در کنار تابع گیرنده، منحنی پاشش و زمان سیر پرتوهای لرزه‌ای، یکی دیگر از

داده‌های ژئوفیزیکی که بر اساس خصوصیات فیزیکی ساختارهای درون زمین، بر روی سطح زمین آنومالی نشان می‌دهد، داده گرانشی است. مدلسازی داده‌های گرانشی به محققان این فرصت را می‌دهد تا با توجه به وجود روابط تجربی بین سرعت موج و چگالی از اطلاعات موجود در مدل‌های سرعتی به عنوان قید اولیه برای مدلسازی گرانشی استفاده کنند و ساختارهای مشاهده شده در مدل چگالی را با مدل سرعت مقایسه نمایند.

منطقه مورد مطالعه در این رساله، ناحیه برخوردی شمال شرق ایران است که نواحی تکتونیکی کپه‌داغ، بینالود و ایران مرکزی را در بر می‌گیرد. رشته کوه‌های کپه‌داغ و بینالود به علت لرزه‌خیزی بالا و تغییر شکل زیاد پس از زاگرس و البرز در فلات ایران بیشترین توجه را به خود جلب کرده است. بر خلاف سایر بخش‌های سیستم آلپ-هیمالیا که در آنها تکتونیک فعال در مناطقی به پهنای چند صد کیلومتر گسترش یافته، در مرزهای همگرایی موجود در ایران از جمله مرز کپه‌داغ و بینالود، تمام همگرایی در نواحی کوچکی تجمع یافته است و در نتیجه این نواحی می‌توانند به عنوان آزمایشگاهی برای مطالعه مرزهای بین قاره‌ای مورد استفاده قرار بگیرند [۶]. ناحیه برخوردی شمال شرق ایران، پیش از این نیز به عنوان یک ناحیه‌ی کمتر مطالعه شده مورد علاقه زلزله‌شناسان بوده است. سوال‌های اساسی مانند چگونگی هندسه موهو در زیر این منطقه هنوز با دقت پاسخ داده نشده است. با توجه به جوان بودن مرز برخوردی شمال شرق ایران و انتظار وجود ساختارهای به جا مانده از فرآیند فرورانش پوسته اقیانوسی در گوشته فوقانی در زیر این ناحیه، خصوصیات آنومالی‌های به دست آمده از مدل‌سازی‌ها می‌تواند به تدوین مدل‌های تکتونیکی شمال شرق ایران کمک شایانی بنماید. تعیین محل ناحیه بخیه که مرز بین صفحات تکتونیکی ایران مرکزی و توران را مشخص می‌کند و تعیین جهت فرورانش پوسته اقیانوسی (به سمت شمال یا جنوب؟) در این منطقه از سوالات اساسی است که در این رساله مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

در تحقیق حاضر، از ۱۹ ماه داده‌ی پیوسته، ثبت شده توسط ۱۹ ایستگاه باند پهن که به صورت خطی از مرداد ۱۳۸۵ تا بهمن ۱۳۸۶ در حد فاصل شهرهای یزد تا سرخس به داده‌برداری پرداخته‌اند (پروفیل شمال شرق ایران)، استفاده خواهیم نمود. طولانی بودن زمان داده‌برداری سبب شده تا یک بانک داده حجیم حاوی حدود ۴۰۰ زلزله دورلرز، رویداده در فاصله ۲۵ تا ۹۵ درجه و با بزرگای بیش از ۵/۵، که هر کدام به طور متوسط در ۱۱ ایستگاه سه‌مولفه‌ای باندپهن ثبت شده‌اند، فراهم آید و فرصتی کم‌نظیر جهت مطالعه ساختارهای عمیق در ناحیه شمال شرق پدید آورد. فاصله کم این ایستگاه‌ها بر روی مناطق کپه‌داغ و بینالود، ساختار پوسته و گوشته بالایی در این مناطق را با دقت و قابلیت تفکیک بالایی آشکار خواهد نمود.

۱-۲- هدف از انجام این مطالعه

هدف از انجام این پایان‌نامه، ارائه مدل سرعت سیر موج و چگالی در زیر پروفیل شمال شرق ایران و تشخیص ساختار تکتونیکی در زیر این پروفیل است. برای این منظور از سه روش "برگردان همزمان تابع گیرنده و منحنی پاشش امواج سطحی" و "توموگرافی زمان‌سیر امواجِ P دورلرز" و "مدلسازی مستقیم داده‌های گرانشی" استفاده گردیده است. روش برگردان همزمان تابع گیرنده و منحنی پاشش، یک مدل سرعت موج S با قدرت تفکیک بالا برای پوسته ارائه خواهد داد. ما در این روش تنها به مطالعه پوسته بسنده نکرده‌ایم و اگرچه بیشترین قدرت تفکیک مدل در پوسته است، اما با توجه به اطلاعات موجود در منحنی پاشش، مدل را تا عمق ۳۰۰ کیلومتری بسط داده‌ایم. این روش یک مدل سرعت S مطلق برای ناحیه ارائه می‌دهد که دارای قدرت تفکیک عمقی خوبی است اما از قدرت تفکیک جانبی کمی در گوشته بالایی برخوردار است. روش دیگر، توموگرافی زمان‌سیر امواج P دورلرز، تغییرات جانبی سرعت موج P را در گوشته بالایی آشکار خواهد کرد. این مدل از قدرت تفکیک بسیار بالاتری نسبت به مدل بدست آمده برای گوشته بالایی در روش قبل برخوردار می‌باشد. مدلسازی گرانشی انجام شده در این رساله نیز کمک می‌کند تا یک مدل چگالی برای ناحیه شمال شرق ایران فراهم آید و امکان مقایسه ساختارهای بدست آمده از مدل سرعتی و چگالی فراهم آید. مجموع این مطالعات و سایر مطالعاتی که در آینده صورت خواهد گرفت می‌تواند به تدوین یک مدل تکتونیکی برای ناحیه شمال شرق ایران منجر شود.

پس از اتمام این فصل مقدماتی، در فصل دوم موقعیت تکتونیکی و خصوصیات ژئودینامیکی ناحیه برخوردی شمال شرق ایران و ایران مرکزی مورد توجه قرار خواهد گرفت. در این فصل تلاش شده تا خواننده اطلاعاتی کلی از نواحی کپه‌داغ، بینالود و ایران مرکزی کسب نماید.

در فصل سوم، پایه‌های تئوری و نحوه انجام توموگرافی سه‌بعدی امواج P دورلرز ارائه می‌شود. در این فصل ابتدا به تاریخچه‌ای از روش توموگرافی و پیدایش روش ACH اشاره شده و مزیت استفاده از آن بیان می‌شود. سپس مراحل انجام معکوس‌سازی با استفاده از ACH به صورت گام به گام توضیح داده شده، به گونه‌ای که خواننده بتواند به خوبی با این روش و محدودیت‌ها و توانایی‌های آن آشنا شود. در قسمت پایانی این فصل مراحل آماده‌سازی یک بانک داده جهت انجام توموگرافی دورلرز تشریح می‌گردد و نحوه معکوس‌سازی داده‌ها به صورت تئوری توضیح داده می‌شود.

در فصل چهارم بانک داده تولید شده برای توموگرافی معرفی شده و نتایج بدست آمده از اجرای آن در زیر ناحیه مورد مطالعه ارائه می‌شود. برای تشخیص آنومالی‌های معتبر با بررسی پارامترهایی که کیفیت نتایج را نشان

می‌دهند و همچنین تولید بانک داده‌های مصنوعی، آزمون‌های کیفیت نتایج اجرا می‌شود و آنومالی‌هایی که ارزش بحث شدن داشته باشند تشخیص داده می‌شود.

در فصل پنجم به سراغ روش معکوس‌سازی همزمان توابع گیرنده و منحنی‌های پاشش امواج سطحی می‌رویم. در ابتدای این فصل، تابع گیرنده معرفی می‌شود و پایه‌های تئوری آن ارائه می‌گردد. سپس امواج سطحی و پاشش این امواج معرفی می‌گردد. نحوه استخراج منحنی پاشش از امواج سطحی توضیح داده می‌شود و بدین طریق خواننده با نحوه آماده‌سازی آن به طور خلاصه آشنا می‌گردد. محاسبه منحنی پاشش در حوزه این پایان‌نامه نیست. در ادامه، روش برگردان غیرخطی هدجگ توضیح داده می‌شود. این روش در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار نمی‌گیرد اما الهام‌بخش نحوه پارامتربندی روش معکوس‌سازی همزمان خواهد بود. نحوه پارامتربندی در معکوس‌سازی همزمان با الهام‌گیری از این روش و مفهوم "قدرت بازیابی" داده‌ها، که در این رساله مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام خواهد شد. در پایان این فصل روش معکوس‌سازی همزمان تابع گیرنده و منحنی پاشش که روشی خطی است معرفی و پایه‌های تئوری آن ارائه می‌گردد.

در فصل ششم ابتدا نحوه آماده‌سازی بانک داده برای انجام معکوس‌سازی همزمان ارائه می‌شود. آماده‌سازی بانک داده شامل محاسبه توابع گیرنده و استخراج منحنی‌های پاشش از نتایج توموگرافی دوبعدی منحنی‌های پاشش است، که تنها محاسبه توابع گیرنده در این چارچوب این پایان‌نامه قرار می‌گیرد. در قسمت بعد معکوس‌سازی همزمان توابع گیرنده با منحنی‌های پاشش توضیح داده می‌شود. پارامترهای مورد استفاده و مدل‌های سرعت اولیه معرفی شده و آزمون پایداری نتایج برای رسیدن به مدل‌های نهایی قابل اعتماد انجام می‌شود.

در فصل هفتم مدلسازی مستقیم داده‌های گرانشی انجام خواهد شد. در این فصل با استفاده از مدل سرعت به دست آمده از فصل ششم، مدل چگالی که قادر است داده‌های گرانشی موجود را توجیه کند مورد جستجو قرار می‌گیرد. در این مدل‌سازی مستقیم، مدل چگالی با مدل سرعت به دست آمده از داده‌های لرزه‌ای مقید خواهد شد. این کار سبب می‌شود تا بدانیم که آیا ساختارهای مشاهده شده در مدل سرعتی با داده‌های گرانشی قابل توجیه هستند یا خیر؟

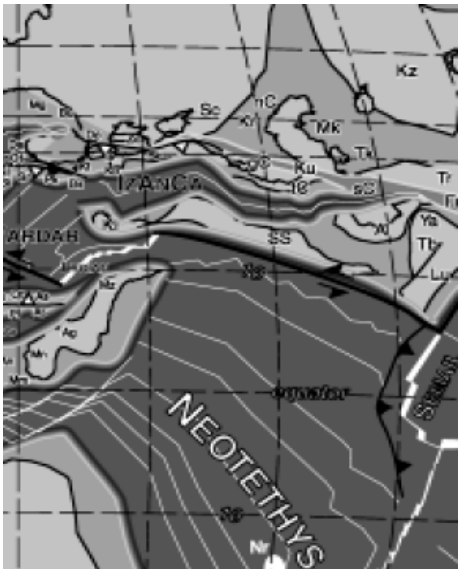
فصل هشتم حاوی بحث و جمع‌بندی بر روی نتایج بدست آمده از این رساله خواهد بود.

بدین امید که قبول افتد و در نظر آید.

فصل دوم

۲-۱- تاریخچه پیدایش

الگوی زمانی لایه‌های مشاهده شده از دوره پالئوزوئیک پیشین به بعد که از لبه اقیانوس تتیس بدست آمده‌اند، قیدهایی را برای بازسازی صفحات قدیمی و موقعیت اقیانوس‌هایی که امروز دیگر ناپدید شده‌اند فراهم کرده است [۷، ۸]. در دوره ترشیاری پیشین، فرورانش رو به شمال اقیانوس پالئوتتیس باعث باز شدن اقیانوس‌هایی در پشت کمان فرورانش و در لبه اوراسیا شد که از اتریش شروع می‌شد و تا پامیر ادامه داشت (شکل ۲-۱). این دریاهای متولد شده بعدها دوران تکاملی متفاوتی را از سر گذراندند؛ برخی در اثر همگرایی مجدد به سوی مرز اوراسیا بسته شدند (مانند کپه‌داغ) در حالی که برخی دیگر همچنان باز ماندند و فرورانش با تاخیر آنها سبب به وجود آمدن دریاهای دیگری شد [۸].



شکل ۲-۱: بازسازی شکل لبه غربی تتیس در دوره کرتاسه پیشین [۸]

بربریان و کینگ [۹] سن اولین برخورد قاره‌ای در صفحه ایران را ۶۵ میلیون سال تخمین زدند، در حالی که دیگران سن‌های جوان‌تری را برای این برخورد پیشنهاد می‌دهند. برای مثال همپتون و همکاران [۱۰]: ۴۰~ میلیون سال، ییلماز [۱۱]: ۳۵~ میلیون سال، روبرتسون [۱۲]: ۱۶ تا ۲۳~ میلیون سال، و مک‌کوئری و همکاران [۱۳]: ۱۰~ میلیون سال. تمامی این مطالعات، فارغ از آنکه کدامیک درستند، نشان از وجود مرز برخوردی جوان در همه نواحی برخوردی ایران از جمله شمال شرق ایران دارند.

۲-۲- مروری بر زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه مورد مطالعه

سرزمین ایران، به عنوان بخشی از زون زمین‌ساختی آلپ-هیمالیا، دارای طرحی پیچیده از مجموعه زون-های مختلف زمین‌ساختی است و سطح بالایی از فعالیت لرزه‌خیزی در آن مشاهده می‌شود (شکل ۲-۲). این منطقه از پایین و بالا تحت فشارشی تکتونیکی قرار دارد و کوتاه‌شدگی ناشی از این فشارش به علت حرکت رو به بالای صفحه سخت عربی نسبت به صفحه اوراسیا می‌باشد. اندازه‌گیری‌های اخیر GPS در ایران نشان می‌دهد که صفحه عربی در طول جغرافیایی منطقه کپه‌داغ به صورت تخمینی با آهنگ ۲۵ میلی‌متر در سال [۱۶] حرکتی رو به شمال دارد که این مقدار از مقدار محاسبه شده توسط مدل چرخش صفحات (plate-circuit models) [۱۴] کمتر است. لرزه‌خیزی ثبت شده در ایران نشان می‌دهد که بیشتر تغییر شکل‌ها در ایران در رشته‌کوه‌های زاگرس، البرز و کپه-داغ و همچنین در مرز بلوک‌ها در ناحیه شرقی ایران تجمع یافته‌اند [۱۵] (شکل ۲-۲) و نواحی لوت و ایران مرکزی، که همچون بلوک‌هایی سخت رفتار می‌کنند، نواحی غیر فعال ایران را تشکیل می‌دهند. دسته‌بندی‌های فوق توسط داده‌های GPS تایید شده است [۱۶، ۱۷].