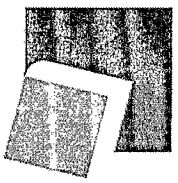
به نام یگانه عالِم عالَم

یک
۱۰۷۴۹۰

وزارت علوم، تحقیقات و فنّاوری
مرکز تحصیلات تکمیلی در علوم پایه
گاوازنگ - زنجان



دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان

# مطالعه ساختار پوسته در شمال‌غرب ایران با استفاده از تحلیل توابع گیرنده P

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد

غلام‌رضا مرتضی‌نژاد

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
نسخه مرکز

استاد راهنما: دکتر فرهاد ثبوتی

۱۳۸۷ /۹/ ۲۳

اسفند ۱۳۸۶

۱۰۷۴۹۰

## تقدیم به شما:

**مادر** فداکارم

**همسر** مهربانم

**پدر** عزیزم

## تشکر وقدردانی:

بر خود واجب می‌دانم تا از استادِ راهنمای محترم، آقای دکتر فرهاد ثبوتی که در طول یک سال گذشته مرا حمایت کردند و هدایت این پایان‌نامه را به عهده داشتند قویاً سپاسگذاری کنم. همچنین از دکتر اَیوب کاویانی و دکتر فرانک کروگر(دانشگاه پُتسدام آلمان) به خاطر کمک‌ها، راهنمایی‌ها و پیشنهادات مفیدشان نهایت تشکر و قدردانی خود را ابراز می‌دارم. از آقایان دکتر اَیوب کاویانی، دکتر عبدالرضا قدس و دکتر محمد تاتار (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله) که داوری این پایان‌نامه را انجام دادند و با توصیه‌های خود باعث بهبود کار شدند تشکر می‌کنم.

# چکیده

در این پایان‌نامه مطالعه‌ای جهت بررسی ساختار پوسته‌ی شمال‌غرب ایران با استفاده از تحلیل توابع گیرنده[1] P صورت گرفته است. داده‌های مورد نیاز دورلرزه‌هایی[2] هستند که توسط لرزه‌نگارهای کوتاه‌دوره[3] شبکه لرزه‌نگاری آذربایجان شرقی وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران از سال ۱۹۹۵ میلادی تا سال ۲۰۰۷ ثبت شده‌اند. مجموعاً ۱۵۶ دورلرزه مورد آنالیز قرار گرفته و توابع گیرنده آنها محاسبه شده است. در این توابع فاز Ps موهو در فاصله زمانی ۴/۹ تا ۷/۴ ثانیه مشاهده شده است. به طور میانگین این فاز برای ایستگاه‌های آذرشهر، بستان‌آباد، هریس، هشترود، مرند، شبستر، سراب و تبریز به ترتیب در زمان‌های ۶/۱ ، ۷/۴ ، ۵/۴ ، ۶/۴ ، ۶/۱ ، ۴/۹ ، ۶/۲ و ۶/۶ ثانیه مشاهده شده است. عمق موهو برای هر یک از این ایستگاه‌ها به ترتیب مقادیر ۴۶/۵ ± ۲/۰ ، ۴۷/۵ ± ۱/۱ ، ۴۰/۰ ± ۱/۳ ، ۴۷/۰ ± ۱/۳ ، ۴۶/۵ ± ۲/۱ ، ۳۸/۵ ± ۱/۳ ، ۴۶/۰ ± ۱/۵ و ۴۲/۰ ± ۱/۱ کیلومتر و نسبت Vp/Vs به ترتیب مقادیر ۱/۸۰ ± ۰/۰۴ ، ۱/۹۵ ± ۰/۰۲ ، ۱/۸۳ ± ۰/۰۳ ، ۱/۸۲ ± ۰/۰۳ ، ۱/۷۹ ± ۰/۰۴ ، ۱/۷۷ ± ۰/۰۳ ، ۱/۸۱ ± ۰/۰۳ و ۱/۹۵ ± ۰/۰۳ بدست آمده است. در مجموع میانگین عمق موهو و نسبت Vp/Vs در این ناحیه به ترتیب مقادیر ۴۴/۳ کیلومتر و ۱/۸۴ بدست آمده است. مقادیر بالای نسبت Vp/Vs در این ناحیه حاکی از گرم بودن پوسته است که خود ناشی از گرم بودن گوشته فوقانی است. با توجه به مقادیر بدست آمده برای عمق موهو و توپوگرافی ۱/۵ تا ۲ کیلومتری این ناحیه به نظر می‌رسد در بوجود آمدن این توپوگرافی نقش یک گوشته گرم و کم‌چگالی که تمایل به بالا آمدن دارد، بیشتر از جبران ایزوستازی یک پوسته ضخیم است.

---

[1] Receiver function analysis
[2] Teleseismic
[3] Short period

# فهرست


مقدمه ۱

**فصل ۱: زمین‌شناسی تکتونیک و لرزه‌خیزی شمال‌غرب ایران**

۱. ۱ معرفی منطقه مورد مطالعه ۴

۱. ۲ تاریخچه تکونیکی شمال‌غرب ایران ۴

۱. ۳ ویژگیهای مهم زمین‌شناسی، تکتونیکی و لرزه‌خیزی شمال‌غرب ایران ۹

۱. ۳. ۱ زمین‌شناسی ۹

۱. ۳. ۱. ۱ آتشفشان سهند ۱۱

۱. ۳. ۱. ۲ آتشفشان سبلان ۱۱

۱. ۳. ۲ گسل شمال تبریز ۱۱

۱. ۳. ۳ لرزه‌خیزی ۱۲

۱. ۴ نتایج مطالعات دیگران در شمال‌غرب ایران ۱۴

## فصل ۲: تئوری و مبانی روش


۲. ۱ مقدمه ۱۹

۲. ۲ تابع گیرنده P چیست؟ ۱۹

۲. ۳ مراحل بدست آوردن تابع گیرنده P ۲۲

۲. ۳. ۱ حذف اثر دستگاه از روی داده‌ها ۲۲

۲. ۳. ۲ چرخش به دستگاه مختصات LQT ۲۲

۲. ۳. ۳ واهمامیخت ۲۴

۲. ۴ تعیین عمق ناپیوستگی‌ها و نسبت Vp/Vs ۲۹


## فصل ۳: ارائه نتایج


۳. ۱ داده‌ها ۳۸

۳. ۲ نتایج توابع گیرنده P ۴۱

۳. ۲. ۱ ایستگاه آذرشهر، AZR ۴۲

۳. ۲. ۲ ایستگاه بستان‌آباد، BST ۴۴

۳. ۲. ۳ ایستگاه هریس، HRS ۴۸

۳. ۲. ۴ ایستگاه هشترود، HSH ۵۱

۳. ۲. ۵ ایستگاه مرند، MRD ۵۳

۳. ۲. ۶ ایستگاه شبستر، SHB ۵۶

۳. ۲. ۷ ایستگاه سراب، SRB ۶۰

۳. ۲. ۸ ایستگاه تبریز، TBZ ۶۴

## فصل ۴: بحث و نتیجه‌گیری


۴. ۱ تغییرات جانبی پارامتر Vp/Vs ۶۸

۴. ۲ تغییرات عمقی پارامتر Vp/Vs ۷۲

۴. ۳ تغییرات جانبی عمق موهو ۷۲

۴. ۴ بررسی مؤلفه T توابع گیرنده ۷۳

**پیوست: مشخصات دورلرزه‌ها** ۷۹

**مراجع** ۹۱

**واژه‌نامه فارسی به انگلیسی** ۹۶

**واژه‌نامه انگلیسی به فارسی** ۹۸

# مقدمه

شمال‌غرب ایران که از نظر جغرافیایی در محل تقاطع رشته کوه‌های البرز و زاگرس قرار دارد، بخشی از ناحیه برخوردی صفحات عربستان و اوراسیا[1] است. این ناحیه از نظر زمین شناسی و فعالیت‌های تکتونیکی قابل مقایسه با ناحیه قفقاز کوچک[2] و شرق ترکیه است. تا حدی که ویژگی‌های زمین‌شناسی و تکتونیکی آنها خیلی شبیه به یکدیگر است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این نواحی می‌توان به توپوگرافی تقریباً ۲ کیلومتری و فعالیت‌های آتشفشانی اشاره کرد. همچنین گسلش در این نواحی از نوع امتدادلغز راستگرد با امتداد شمال‌غربی- جنوب‌شرقی است. گسل شمال تبریز یکی از این گسل‌ها است. افراد زیادی با استفاده از روش‌های متفاوت در زمینه زلزله‌شناسی، گرانی و مطالعه بر روی فعالیت‌های آتشفشانی نشان داده‌اند که در این نواحی گوشته فوقانی گرم و کم چگالی است (به عنوان مثال الزکی[3] و همکاران ۲۰۰۴). اما در مورد ساختار لرزه‌ای پوسته خصوصاً عمق موهو در شمال‌غرب ایران تاکنون مطالعه خاصی انجام نشده است. ولی در نواحی اطراف آن، مطالعاتی در مورد ساختار پوسته انجام شده است. به عنوان مثال زور[4] و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از تحلیل توابع گیرنده ساختار پوسته را در شرق ترکیه مورد مطالعه قرار دادند. آنها میانگین عمق موهو را در این ناحیه ۴۵ کیلومتر برآورد کردند. در غرب حوزه خزر جنوبی مانجینو[5] و پریستلی[6] (۱۹۹۸) مطالعاتی در مورد ساختار پوسته انجام دادند. این افراد نیز میانگین ضخامت پوسته را در این ناحیه تقریباً ۴۵ کیلومتر بدست آوردند.

---

[1] Eurasia
[2] Lesser Caucasus
[3] Al-lazki
[4] Zor
[5] Mangino
[6] Priestley

با توجه به مطالب ارائه شده، این پایان نامه با هدف مطالعه ساختار پوسته‌ی شمال‌غرب ایران طراحی شده است. ساختار پوسته و خصوصاً عمق موهو را با استفاده از داده‌های مختلف ژئوفیزیکی می‌توان تعیین کرد. اما در عمل بیشتر از داده‌های لرزه‌ای برای این کار استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی برای مطالعه ساختار پوسته با استفاده از داده‌های لرزه‌ای وجود دارد. در تمامی این روش‌ها سرعت و ضخامت لایه‌ها دو پارامتر مهم محسوب می‌شود. از جمله روش‌های مطالعه ساختار پوسته استفاده از فازهای انکساری Pn و بازتابی PmP است. اما این روش‌ها بیشتر به تغییرات جانبی سرعت حساس هستند تا به عمق موهو. از طرف دیگر، این روش‌ها وابسته به موقعیت کانون زلزله است. بنابراین خطای مکان‌یابی باعث افزایش خطا در تعیین عمق موهو می‌شود. یکی دیگر از روش‌های پرکاربرد در مطالعه ساختار پوسته روش تحلیل توابع گیرنده P دورلرزه‌ها است. با توجه به اختلاف سرعت در دو طرف ناپیوستگی‌ها، خصوصاً مرز موهو، این روش وابستگی شدیدی به وجود ناپیوستگی‌ها، خصوصاً به ضخامت آنها و سرعت امواج P و S تا آن ناپیوستگی‌ها دارد. علاوه بر این از آنجایی که پرتو امواج دورلرزه تقریباً به طور عمودی به ایستگاه می‌رسد، وابستگی این روش به تغییرات جانبی سرعت بسیار کم، و به تغییرات عمقی بسیار زیاد است. پس با استفاده از این روش، عمق موهو و تغییرات عمقی سرعت در پوسته را می‌توان بدست آورد. با توجه به مطالب ذکر شده، در این پایان‌نامه روش تحلیل توابع گیرنده P برای مطالعه ساختار پوسته شمال‌غرب ایران انتخاب شد. در این روش با توجه به مسئله مورد نظر، توابع گیرنده به شیوه‌های مختلفی مورد تحلیل قرار می‌گیرند. از آنجایی که هدف این مطالعهعمق موهو و ساختار سرعتی پوسته خصوصاً نسبت Vp/Vs است، استفاده از الگوریتم برانبارش[7] ژو[8] و کانامووری[9] (۲۰۰۰) بهترین روش برای تحلیل توابع گیرنده و بدست آوردن این پارامترها است. توابع گیرنده هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس قابل محاسبه هستند. به دلیل حجم کمتر محاسبات در حوزه فرکانس، در این مطالعه توابع گیرنده در حوزه فرکانس و به روش واهمامیخت[10] سطح آب[11] محاسبه شده‌اند.

شبکه لرزه‌نگاری آذربایجان شرقی وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، در شمال‌غرب ایران از سال ۱۹۹۵ میلادی تاکنون فعال بوده است. این شبکه دارای هشت ایستگاه لرزه‌نگاری

---

[7] Stacking
[8] Zhu
[9] Kanamori
[10] Deconvolution
[11] Water-level

کوتاه‌دوره با فرکانس طبیعی[12] یک هرتز است. داده‌های مورد نیاز در این مطالعه دورلرزه‌هایی هستند که بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۷ توسط این شبکه ثبت شده‌اند. از بین دورلرزه‌هایی که بزرگی آنها بیشتر از ۵ و فاصله رومرکزی[13] آنها بین ۳۰ تا ۹۵ درجه بوده است، تعداد ۱۵۶ دورلرزه که دارای نسبت سیگنال به نوفه بهتری نسبت به بقیه بوده‌اند، برای محاسبه توابع گیرنده انتخاب شده‌اند. مشخصات دورلرزه‌های مورد استفاده در این مطالعه در پیوست این نوشتار ارائه شده است.

با توجه به اینکه فقط هشت ایستگاه در این ناحیه وجود دارد، این مطالعه قادر به تحلیل جزئیات با دقت بالا نیست. بلکه فقط یک دید کلی از عمق موهو و سایر ویژگی‌های پوسته، خصوصاً ویژگی‌های سرعتی، به ما می‌دهد. نتیجه این مطالعه تغییرات جانبی Vp/Vs در این ناحیه و تغییرات عمقی آن را در زیر هر ایستگاه نشان می‌دهد. به علاوه تغییرات جانبی عمق موهو در این ناحیه نشان داده شده است. در مجموع میانگین عمق موهو و نسبت Vp/Vs در این ناحیه به ترتیب مقادیر ۴۴/۳ کیلومتر و ۱/۸۴ بدست آمده است. مقادیر بالای نسبت Vp/Vs در این ناحیه نشان دهنده گرم بودن پوسته است که خود ناشی از گرم بودن گوشته فوقانی است. با توجه به مقادیر بدست آمده برای عمق موهو و توپوگرافی ۱/۵ تا ۲ کیلومتری این ناحیه، به نظر می‌رسد این توپوگرافی بیشتر توسط یک گوشته گرم و کم‌چگالی که تمایل به بالا آمدن دارد پشتیبانی می‌شود تا بوسیله جبران ایزوستازی یک پوسته ضخیم.

این نوشتار که به عنوان پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک تدوین شده است، در برگیرنده مراحل مختلف تحقیق، شرح نتایج و یافته‌های آن می‌باشد. فصل اول این نوشتار به معرفی ناحیه مورد مطالعه می‌پردازد. در این فصل زمین‌شناسی، لرزه‌خیزی و تکتونیک ناحیه شمال‌غرب ایران بطور خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرد. تئوری روش مورد استفاده در فصل دوم شرح داده شده است. در فصل سوم نتایج بدست آمده از این مطالعه در مورد عمق و نسبت Vp/Vs ناپیوستگی‌ها، خصوصاً ناپیوستگی موهو، برای هر ایستگاه گزارش شده است. جمع‌بندی نتایج، تفسیر نتایج بدست‌آمده و ارائه پیشنهادات محتوای فصل چهارم را تشکیل می‌دهد.

[12] Natural frequency
[13] Epicentral distance

# فصل اول

# زمین‌شناسی تکتونیک و لرزه‌خیزی شمال‌غرب ایران

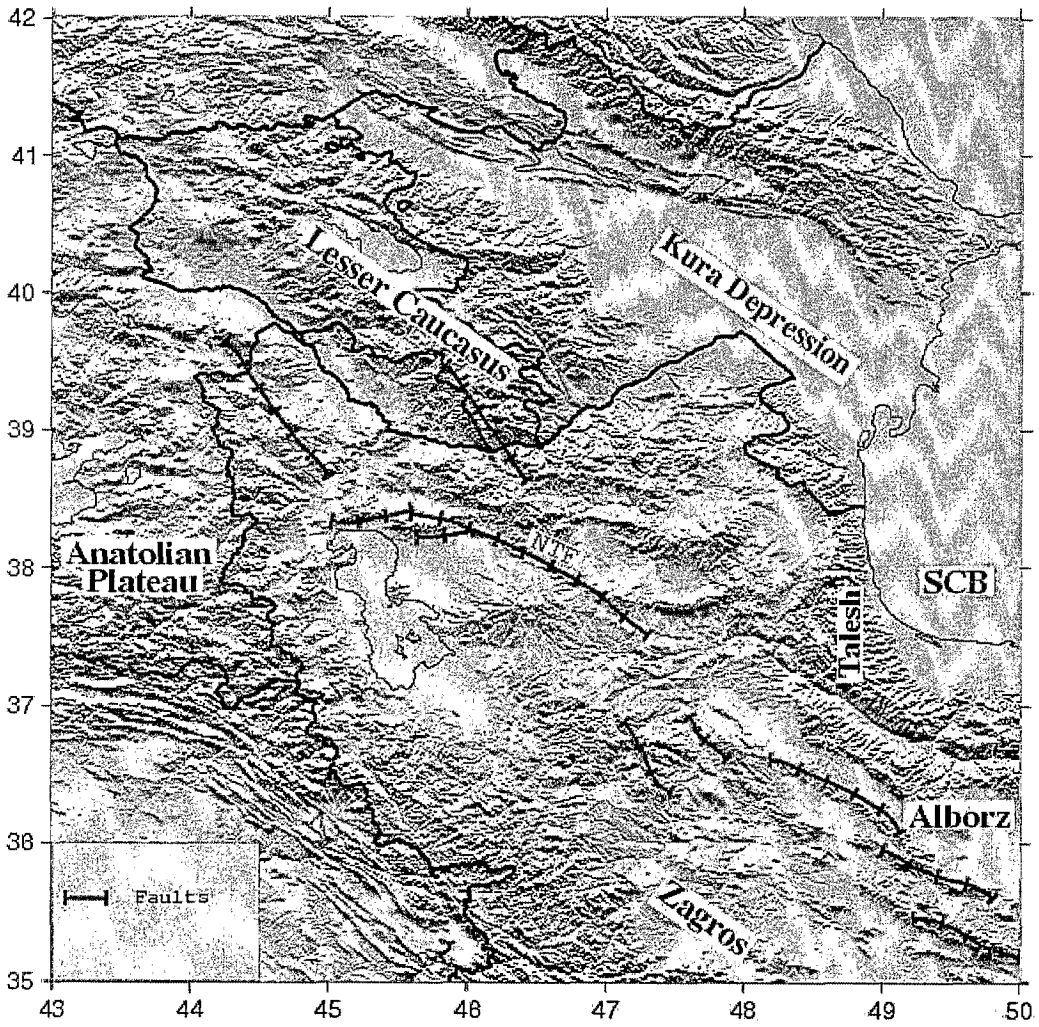
## ۱. ۱ معرفی منطقه مورد مطالعه

شمال‌غرب ایران ناحیه‌ای است که حوزه خزر جنوبی[14] (SCB) و کوه های تالش از شرق، فلات آناتولی[15] از غرب، ناحیه قفقاز کوچک و ناحیه فرو افتاده کورا[16] از شمال و رشته کوه‌های زاگرس از جنوب، آن را محصور کرده‌اند (شکل ۱-۱). این منطقه به نسبت سایر مناطق ایران کمتر مورد مطالعات ژئوفیزیکی قرار گرفته است. لذا سؤالات بسیاری در مورد آن مطرح است که پاسخ دادن به آنها بدون هیچ شکی نیاز به کاربرد روش‌های مختلف ژئوفیزیکی در این منطقه دارد. ویژگی‌های سرعتی پوسته و عمق موهو از جمله مسائل مورد سؤال در این منطقه است. هدف این مطالعه بررسی این ویژگی‌ها در زیر هر یک از ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری آذربایجان شرقی است. شکل ۱-۲ موقعیت ایستگاه‌های این شبکه در این منطقه و جزئیات بیشتری از منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

## ۱. ۲ تاریخچه تکونیکی شمال‌غرب ایران

در اکثر مطالعات انجام شده شمال‌غرب ایران همواره به همراه شرق ترکیه، تحت عنوان فلات ایران-ترکیه، و ناحیه قفقاز مورد مطالعه قرار گرفته است. فلات ایران-ترکیه و ناحیه قفقاز با ارتفاع تقریباً ۲ کیلومتر از مرتفع‌ترین نواحی در جنوب‌غربی آسیا به شمار می‌روند. از نظر تکتونیکی این

[14] South Caspian Basin
[15] Anatolian Plateau
[16] Kura Depression




شکل ۱-۱: نمایی از ناحیه شمال‌غرب ایران. این ناحیه توسط حوزه خزر جنوبی (SCB) و کوه‌های تالش از شرق، فلات آناتولی از غرب، ناحیه قفقاز کوچک و ناحیه فروافتاده کورا از شمال و رشته کوه‌های زاگرس از جنوب، محصور شده است. گسل‌های مهم منطقه مخصوصاً گسل شمال تبریز (NTF) در شکل مشخص شده‌اند.

ناحیه بخشی از ناحیه برخوردی صفحه عربستان و اوراسیا است که در آن، برخورد کاملاً از نوع بین‌قاره‌ای است. برخورد قاره‌ای-قاره‌ای عربستان و اوراسیا که توسط کمربند زاگرس-بیتلیس[۱۷] کاملاً قابل تشخیص است، به دلیل همگرایی رو به شمال صفحه عربستان نسبت به اوراسیا، در دوره میوسن میانی شروع شده است (دویی[۱۸] و همکاران ۱۹۸۶ : شنگور و ایلماز[۱۹] ۱۹۸۱).

[17] Zagros-Bitlis belt
[18] Dewey
[19] Yilmaz

# مقدمه

شمال‌غرب ایران که از نظر جغرافیایی در محل تقاطع رشته کوه‌های البرز و زاگرس قرار دارد، بخشی از ناحیه برخوردی صفحات عربستان و اوراسیا[1] است. این ناحیه از نظر زمین شناسی و فعالیت‌های تکتونیکی قابل مقایسه با ناحیه قفقاز کوچک[2] و شرق ترکیه است. تا حدی که ویژگی‌های زمین‌شناسی و تکتونیکی آنها خیلی شبیه به یکدیگر است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این نواحی می‌توان به توپوگرافی تقریباً ۲ کیلومتری و فعالیت‌های آتشفشانی اشاره کرد. همچنین گسلش در این نواحی از نوع امتدادلغز راستگرد با امتداد شمال‌غربی- جنوب‌شرقی است. گسل شمال تبریز یکی از این گسل‌ها است. افراد زیادی با استفاده از روش‌های متفاوت در زمینه زلزله‌شناسی، گرانی و مطالعه بر روی فعالیت‌های آتشفشانی نشان داده‌اند که در این نواحی گوشته فوقانی گرم و کم چگالی است (به عنوان مثال الزکی[3] و همکاران ۲۰۰۴). اما در مورد ساختار لرزه‌ای پوسته خصوصاً عمق موهو در شمال‌غرب ایران تاکنون مطالعه خاصی انجام نشده است. ولی در نواحی اطراف آن، مطالعاتی در مورد ساختار پوسته انجام شده است. به عنوان مثال زور[4] و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از تحلیل توابع گیرنده ساختار پوسته را در شرق ترکیه مورد مطالعه قرار دادند. آنها میانگین عمق موهو را در این ناحیه ۴۵ کیلومتر برآورد کردند. در غرب حوزه خزر جنوبی مانجینو[5] و پریستلی[6] (۱۹۹۸) مطالعاتی در مورد ساختار پوسته انجام دادند. این افراد نیز میانگین ضخامت پوسته را در این ناحیه تقریباً ۴۵ کیلومتر بدست آوردند.

---

[1] Eurasia
[2] Lesser Caucasus
[3] Al-lazki
[4] Zor
[5] Mangino
[6] Priestley

با توجه به مطالب ارائه شده، این پایان نامه با هدف مطالعه ساختار پوسته‌ی شمال‌غرب ایران طراحی شده است. ساختار پوسته و خصوصاً عمق موهو را با استفاده از داده‌های مختلف ژئوفیزیکی می‌توان تعیین کرد. اما در عمل بیشتر از داده‌های لرزه‌ای برای این کار استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی برای مطالعه ساختار پوسته با استفاده از داده‌های لرزه‌ای وجود دارد. در تمامی این روش‌ها سرعت و ضخامت لایه‌ها دو پارامتر مهم محسوب می‌شود. از جمله روش‌های مطالعه ساختار پوسته استفاده از فازهای انکساری Pn و بازتابی PmP است. اما این روش‌ها بیشتر به تغییرات جانبی سرعت حساس هستند تا به عمق موهو. از طرف دیگر، این روش‌ها وابسته به موقعیت کانون زلزله است. بنابراین خطای مکان‌یابی باعث افزایش خطا در تعیین عمق موهو می‌شود. یکی دیگر از روش‌های پرکاربرد در مطالعه ساختار پوسته روش تحلیل توابع گیرنده P دورلرزه‌ها است. با توجه به اختلاف سرعت در دو طرف ناپیوستگی‌ها، خصوصاً مرز موهو، این روش وابستگی شدیدی به وجود ناپیوستگی‌ها، خصوصاً به ضخامت آنها و سرعت امواج P و S تا آن ناپیوستگی‌ها دارد. علاوه بر این از آنجایی که پرتو امواج دورلرزه تقریباً به طور عمودی به ایستگاه می‌رسد، وابستگی این روش به تغییرات جانبی سرعت بسیار کم، و به تغییرات عمقی بسیار زیاد است. پس با استفاده از این روش، عمق موهو و تغییرات عمقی سرعت در پوسته را می‌توان بدست آورد. با توجه به مطالب ذکر شده، در این پایان‌نامه روش تحلیل توابع گیرنده P برای مطالعه ساختار پوسته شمال‌غرب ایران انتخاب شد. در این روش با توجه به مسئله مورد نظر، توابع گیرنده به شیوه‌های مختلفی مورد تحلیل قرار می‌گیرند. از آنجایی که هدف این مطالعهعمق موهو و ساختار سرعتی پوسته خصوصاً نسبت Vp/Vs است، استفاده از الگوریتم برانبارش[7] ژو[8] و کانامووری[9] (۲۰۰۰) بهترین روش برای تحلیل توابع گیرنده و بدست آوردن این پارامترها است. توابع گیرنده هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس قابل محاسبه هستند. به دلیل حجم کمتر محاسبات در حوزه فرکانس، در این مطالعه توابع گیرنده در حوزه فرکانس و به روش واهمامیخت[10] سطح آب[11] محاسبه شده‌اند.

شبکه لرزه‌نگاری آذربایجان شرقی وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، در شمال‌غرب ایران از سال ۱۹۹۵ میلادی تاکنون فعال بوده است. این شبکه دارای هشت ایستگاه لرزه‌نگاری

[7] Stacking
[8] Zhu
[9] Kanamori
[10] Deconvolution
[11] Water-level

کوتاه‌دوره با فرکانس طبیعی[12] یک هرتز است. داده‌های مورد نیاز در این مطالعه دورلرزه‌هایی هستند که بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۷ توسط این شبکه ثبت شده‌اند. از بین دورلرزه‌هایی که بزرگی آنها بیشتر از ۵ و فاصله رومرکزی[13] آنها بین ۳۰ تا ۹۵ درجه بوده است، تعداد ۱۵۶ دورلرزه که دارای نسبت سیگنال به نوفه بهتری نسبت به بقیه بوده‌اند، برای محاسبه توابع گیرنده انتخاب شده‌اند. مشخصات دورلرزه‌های مورد استفاده در این مطالعه در پیوست این نوشتار ارائه شده است.

با توجه به اینکه فقط هشت ایستگاه در این ناحیه وجود دارد، این مطالعه قادر به تحلیل جزئیات با دقت بالا نیست. بلکه فقط یک دید کلی از عمق موهو و سایر ویژگی‌های پوسته، خصوصاً ویژگی‌های سرعتی، به ما می‌دهد. نتیجه این مطالعه تغییرات جانبی Vp/Vs در این ناحیه و تغییرات عمقی آن را در زیر هر ایستگاه نشان می‌دهد. به علاوه تغییرات جانبی عمق موهو در این ناحیه نشان داده شده است. در مجموع میانگین عمق موهو و نسبت Vp/Vs در این ناحیه به ترتیب مقادیر ۴۴/۳ کیلومتر و ۱/۸۴ بدست آمده است. مقادیر بالای نسبت Vp/Vs در این ناحیه نشان دهنده گرم بودن پوسته است که خود ناشی از گرم بودن گوشته فوقانی است. با توجه به مقادیر بدست آمده برای عمق موهو و توپوگرافی ۱/۵ تا ۲ کیلومتری این ناحیه، به نظر می‌رسد این توپوگرافی بیشتر توسط یک گوشته گرم و کم‌چگالی که تمایل به بالا آمدن دارد پشتیبانی می‌شود تا بوسیله جبران ایزوستازی یک پوسته ضخیم.

این نوشتار که به عنوان پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک تدوین شده است، در برگیرنده مراحل مختلف تحقیق، شرح نتایج و یافته‌های آن می‌باشد. فصل اول این نوشتار به معرفی ناحیه مورد مطالعه می‌پردازد. در این فصل زمین‌شناسی، لرزه‌خیزی و تکتونیک ناحیه شمال‌غرب ایران بطور خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرد. تئوری روش مورد استفاده در فصل دوم شرح داده شده است. در فصل سوم نتایج بدست آمده از این مطالعه در مورد عمق و نسبت Vp/Vs ناپیوستگی‌ها، خصوصاً ناپیوستگی موهو، برای هر ایستگاه گزارش شده است. جمع‌بندی نتایج، تفسیر نتایج بدست‌آمده و ارائه پیشنهادات محتوای فصل چهارم را تشکیل می‌دهد.

[12] Natural frequency
[13] Epicentral distance

# فصل اول

# زمین‌شناسی تکتونیک و لرزه‌خیزی شمال‌غرب ایران

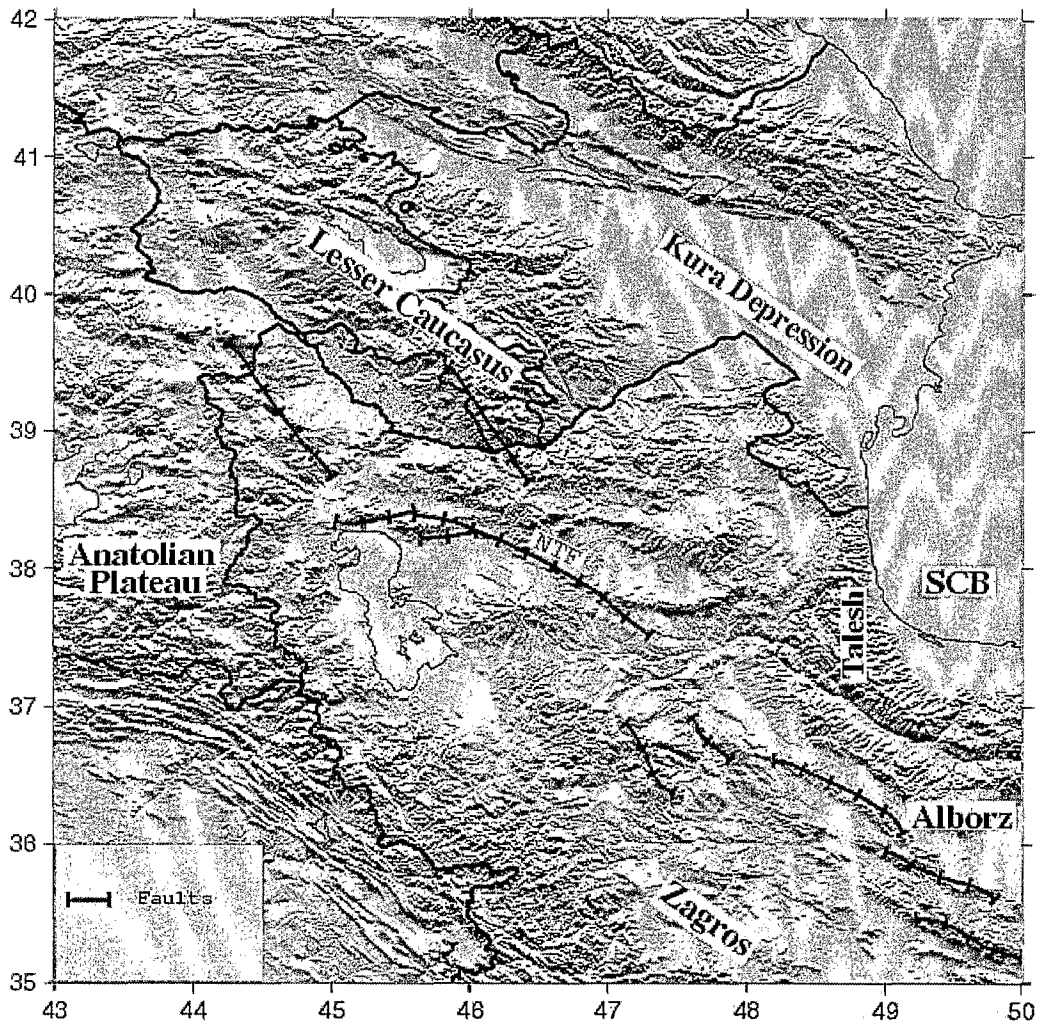
## ۱. ۱ معرفی منطقه مورد مطالعه

شمال‌غرب ایران ناحیه‌ای است که حوزه خزر جنوبی[14] (SCB) و کوه های تالش از شرق، فلات آناتولی[15] از غرب، ناحیه قفقاز کوچک و ناحیه فرو افتاده کورا[16] از شمال و رشته کوه‌های زاگرس از جنوب، آن را محصور کرده‌اند (شکل ۱-۱). این منطقه به نسبت سایر مناطق ایران کمتر مورد مطالعات ژئوفیزیکی قرار گرفته است. لذا سؤالات بسیاری در مورد آن مطرح است که پاسخ دادن به آنها بدون هیچ شکی نیاز به کاربرد روش‌های مختلف ژئوفیزیکی در این منطقه دارد. ویژگی‌های سرعتی پوسته و عمق موهو از جمله مسائل مورد سؤال در این منطقه است. هدف این مطالعه بررسی این ویژگی‌ها در زیر هر یک از ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری آذربایجان شرقی است. شکل ۱-۲ موقعیت ایستگاه‌های این شبکه در این منطقه و جزئیات بیشتری از منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

## ۱. ۲ تاریخچه تکونیکی شمال‌غرب ایران

در اکثر مطالعات انجام شده شمال‌غرب ایران همواره به همراه شرق ترکیه، تحت عنوان فلات ایران-ترکیه، و ناحیه قفقاز مورد مطالعه قرار گرفته است. فلات ایران-ترکیه و ناحیه قفقاز با ارتفاع تقریباً ۲ کیلومتر از مرتفع‌ترین نواحی در جنوب‌غربی آسیا به شمار می‌روند. از نظر تکتونیکی این

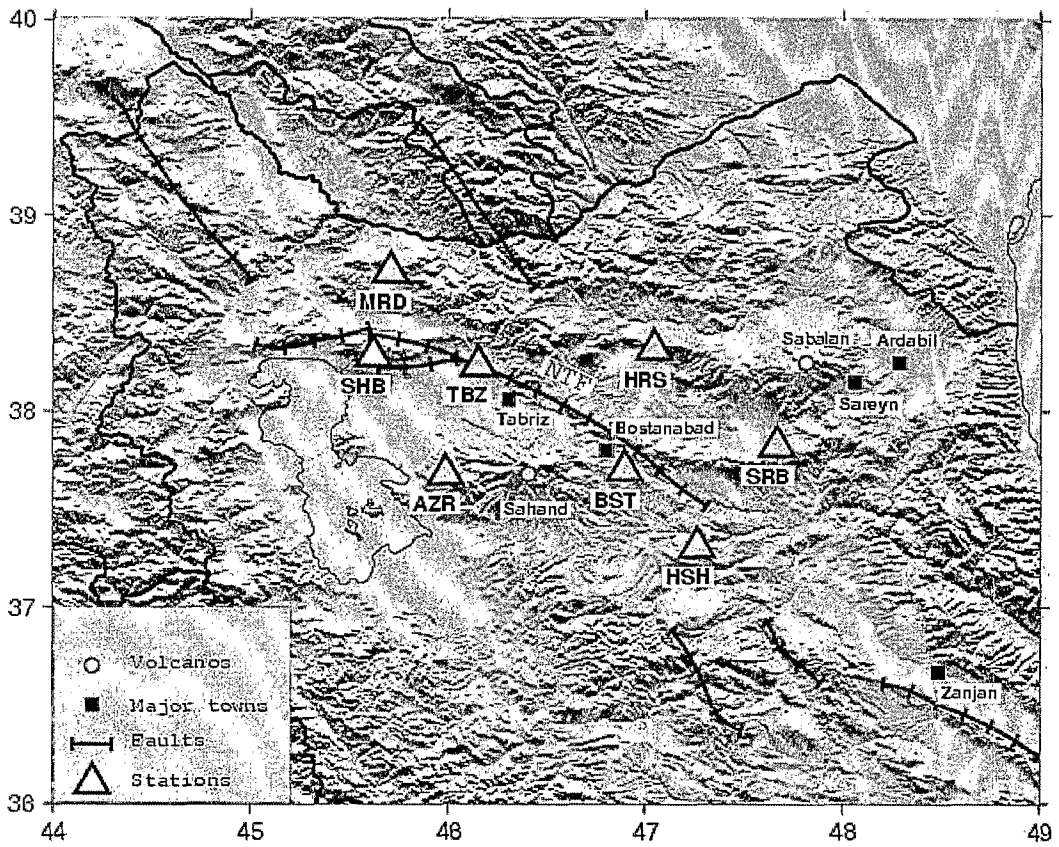
[14] South Caspian Basin
[15] Anatolian Plateau
[16] Kura Depression




شکل ۱-۱: نمایی از ناحیه شمال‌غرب ایران. این ناحیه توسط حوزه خزر جنوبی (SCB) و کوه‌های تالش از شرق، فلات آناتولی از غرب، ناحیه قفقاز کوچک و ناحیه فروافتاده کورا از شمال و رشته کوه‌های زاگرس از جنوب، محصور شده است. گسل‌های مهم منطقه مخصوصاً گسل شمال تبریز (NTF) در شکل مشخص شده‌اند.

ناحیه بخشی از ناحیه برخوردی صفحه عربستان و اوراسیا است که در آن، برخورد کاملاً از نوع بین‌قاره‌ای است. برخورد قاره‌ای-قاره‌ای عربستان و اوراسیا که توسط کمربند زاگرس-بیتلیس[17] کاملاً قابل تشخیص است، به دلیل همگرایی رو به شمال صفحه عربستان نسبت به اوراسیا، در دوره میوسن میانی شروع شده است (دویی[18] و همکاران ۱۹۸۶ : شنگور و ایلماز[19] ۱۹۸۱).

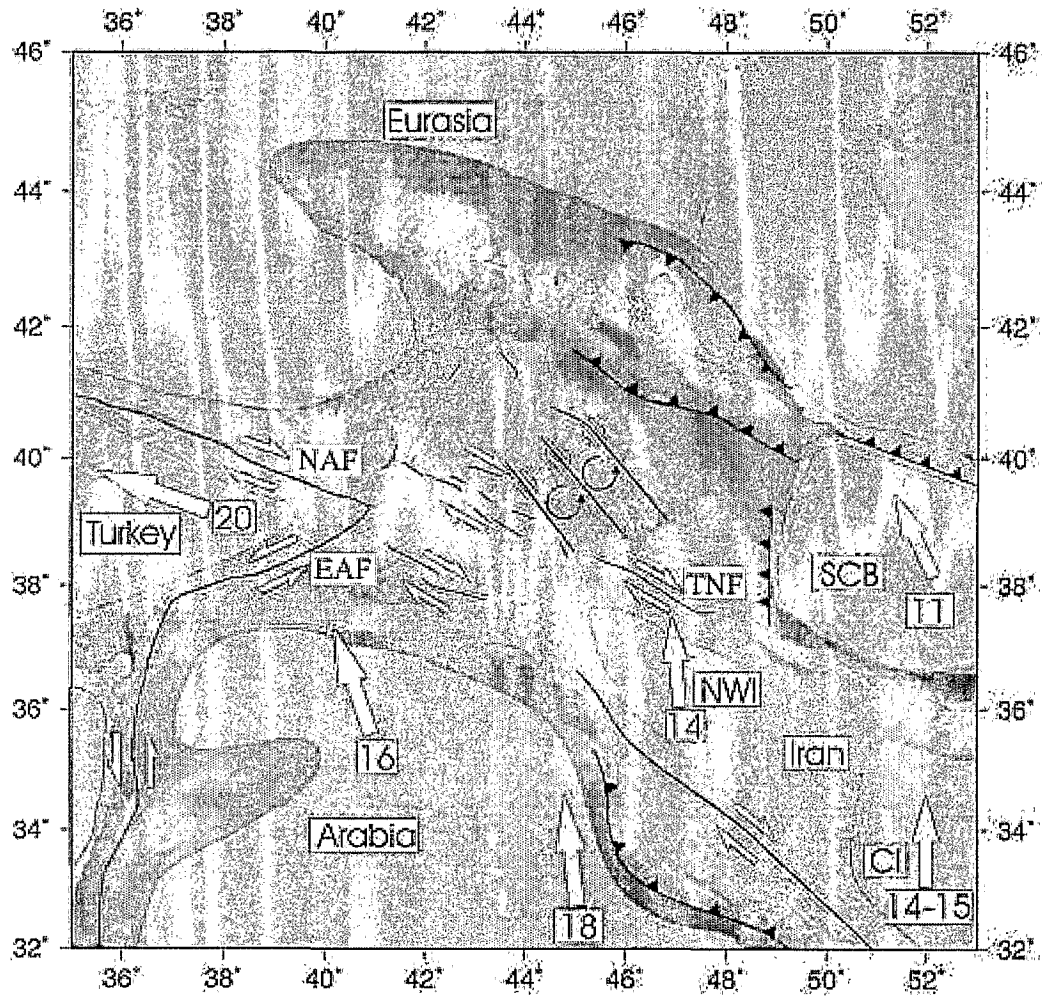
[17] Zagros-Bitlis belt
[18] Dewey
[19] Yilmaz




شکل ۱-۲: موقعیت ایستگاههای شبکه لرزه‌نگاری آذربایجان شرقی بر روی نقشه توپوگرافی منطقه. گسلهای مهم، شهرهای بزرگ و آتشفشان‌های سهند و سبلان نیز نشان داده شده است. به گسل شمال تبریز (NTF) که از وسط شبکه عبور می‌کند، توجه کنید.

در شمال‌غرب ایران، شرق ترکیه و قفقاز قسمت عمده همگرایی صفحه‌های عربستان و اوراسیا، توسط دو ناحیه جذب شده است. ناحیه اول کمربند کوه‌های قفقاز بزرگتر[۲۰] است که لبه شمالی ناحیه برخورد را تشکیل می‌دهند. در این ناحیه گسلش رورانده و کوتاه شدگی وجود دارد. ناحیه دوم یک مجموعه از گسل‌های امتدادلغز راستگرد با امتداد شمال‌غربی- جنوب‌شرقی در شرق ترکیه و شمال‌غرب ایران است. این گسل‌ها مؤلفه‌ای از همگرایی را که توسط کوتاه‌شدکی در قفقاز جذب نشده است، جذب می‌کنند (کوپلی[۲۱] و جکسون[۲۲] ۲۰۰۶). گسل شمال تبریز انتهای شرقی این مجموعه را مشخص می‌کند (شکل ۱-۳). اندازه حرکت امتدادلغز در طول این گسل‌ها از شرق به غرب افزایش می‌یابد.

[20] Greater Caucasus
[21] Copley
[22] Jackson




شکل ۱-۳: نمایی از تکتونیک فعال فلات ایران-ترکیه. گسل‌های رورانده با خطوط و مثلث‌های سیاه مشخص شده‌اند. ترکیه، ایران مرکزی (CI)، شمال‌غرب ایران (NWI)، عربستان، حوزه خزر جنوبی (SCB) و اوراسیا که دارای رنگ یکنواختی هستند بر اساس داده‌های GPS ، اطلاعات توپوگرافی و زلزله‌شناسی نسبتاً بدون تغییر شکل باقی مانده‌اند. فلش‌های سفید و اعداد کنار آنها بیانگر میزان سرعت حرکت این نواحی نسبت به اوراسیا است. سرعت‌ها بر حسب میلیمتر بر سال است. مناطق تحت راندگی با خطوط و مثلث‌های سیاه مشخص شده‌اند. گسل شمال تبریز (NTF) و گسل‌های شمال آناتولی (NAF) و شرق آناتولی (EAF) در شکل مشخص شده‌اند. ( با کمی تغییر، کوپلی و جکسون ۲۰۰۶)

کوپلی و جکسون (۲۰۰۶) با استفاده از داده‌های جی‌پی‌اس ریلینگر و همکاران (۲۰۰۳)، بردار لغزش زلزله‌های این ناحیه و شواهد زمین‌شناسی، نمایی کلی از تکتونیک فعال فلات ایران-ترکیه را ارائه کرده‌اند (شکل ۱-۳). شکل ۱-۴ سرعت حرکت در فلات ایران-ترکیه را با استفاده از داده‌های جی‌پی‌اس ریلینگر و همکاران (۲۰۰۶) نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل می‌بینیم حرکت رو