دانشکده مهندسی نقشه برداری(ژئودزی و ژئوماتیک)

گروه ژئودزی

پایان نامه کارشناسی ارشد

# تحقیقی در مدل‌سازی تغییرشکل‌های لرزه‌ای ناشی از پدیده تکتونیک صفحه‌ای براساس روش المان مرزی

استاد راهنما:

**دکتر بهزاد وثوقی**

استاد مشاور:

**مهندس اصغر راست‌بود**

نگارش:

**میلاد نهاوندی**

شهریورماه ۱۳۸۹

تقدیم به پدر و مادر فداکار و خواهر عزیزم

## تشکر و قدردانی

سپاس می‌گویم پرودگار بی‌همتا را که تمام کامیابی‌های زندگی‌ام مرهون لطف بی‌کران اوست. او که در تمام لحظات زندگی‌ام به من شوق زندگی داد و همواره پشتیبان و حامی‌ام بوده و مرا در رسیدن به آرمان‌هایم یاری رسانده است. همچنین از خانواده‌ام که در تمامی مراحل زندگی همواره مشوق و پشتیبان من بوده‌اند و شرایط را برای ادامه تحصیلاتم فراهم نموده‌اند، تشکر می‌کنم. بر خود لازم می‌دانم از زحمات آقای دکتر وثوقی که در اجرای پایان‌نامه و انجام هرچه بهتر آن مرا هدایت و یاری رساندند، تشکر کنم. همچنین از نظرات ارزشمند آقای دکتر حسامی و آقای دکتر مشهدی حسینعلی که زحمت داوری این پایان‌نامه را برعهده گرفتند نیز کمال قدردانی را دارم.

**اظهار نامه دانشجو**

**موضوع پایان نامه**: تحقیقی در مدل‌سازی تغییرشکل‌های لرزه‌ای ناشی از پدیده تکتونیک صفحه‌ای براساس روش المان مرزی

**استاد راهنما** : آقای دکتر بهزاد وثوقی

**نام دانشجو** : میلاد نهاوندی

**شماره دانشجوئی** : ۸۶۰۱۶۱۴

اینجانب میلاد نهاوندی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی نقشه برداری گرایش ژئودزی دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی مینمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید می باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است . بعلاوه گواهی می نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جای دیگری ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

**امضاء دانشجو :**

**تاریخ :**

## فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

۳- همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

**K.N.Toosi of University**
**Faculty of Geodesy & Geomatic**
**Department of Geodesy**

**M.Sc Thesis**

# An investigation in interseismic deformation modeling of tectonic plates phenomena based on Boundary element method

**Supervisor**
**Dr. Behzad Voosoghi**

**Advisor**
**Asghar Rastbood**

**by**
**Milad nahavandi**

**Sebtember 2010**

## چکیده

منشأ و تکامل پوسته‌ی زمین از جمله مسائل بسیار پیچیده‌ای است که از اوایل قرن نوزدهم میلادی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین عامل ایجاد تغییرشکل در پوسته‌ی زمین و موقعیت نقاط واقع بر آن، پدیده‌ی تکتونیک صفحه‌ای می‌باشد. بر اساس تئوری زمین‌ساخت صفحه‌ای، قسمت‌هایی از کره‌ی زمین که در مرز صفحات تشکیل‌دهنده‌ی پوسته‌ی زمین واقع شده‌اند نواحی مستعد تغییرشکل‌های بزرگ و وقوع زمین‌لرزه-های عظیم می‌باشند. کشور ما ایران به علت موقعیت جغرافیایی خاص، در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی، پوسته‌ی آن دستخوش تغییرات زیادی بوده است. باتوجه به زلزله‌های مهمی که در طول گسل‌های ایران بروز می‌کنند و به علت عدم تجانس پوسته قاره‌ای ایران و فشارهایی که به آن وارد می‌آید، اکثر گسل‌های ایران فعال یا دارای پتانسیل فعالیت می‌باشند. یکی از چهار ناحیه اساسی لرزه‌زمین‌ساخت ایران ناحیه‌ی البرز می‌باشد. روش‌های گوناگونی برای مدل‌کردن میدان تغییرشکل حرکات لرزه‌ای ناشی از گسل‌ها مورد استفاده می‌باشند، که با رشد سریع علم و با ظهور رایانه‌های با سرعت‌های بسیار بالا روش‌های عددی یکی از مهم‌ترین روش‌ها به حساب می‌آیند. در بین روش‌های عددی از آنجا که روش المان مرزی این امکان را فراهم می‌نماید که میزان تأثیر قطعات گسلی مختلف را در هر فاصله‌ای که از منطقه مورد بررسی قرار داشته باشند به تفکیک و به طورمجزا در میزان تغییرشکل ایجاد شده در ناحیه مطالعه محاسبه نمود و همچنین به علت اینکه در این روش می‌توان اطلاعات یک سیستم گسلی را با یکدیگر وارد مدل المان مرزی نمود لذا تأثیر حرکات المان‌های مختلف گسلی بر روی یکدیگر و بر روی ناحیه مطالعه به خوبی مدل می‌شود. در این پژوهش میدان تغییرشکل ایجاد شده توسط حرکت گسل‌های عمده‌ی ناحیه‌ی البرز و گسل‌های مرزی مهم بین صفحات مجاور را در منطقه مطالعاتی البرز و با استفاده از مدل المان مرزی 3Ddef محاسبه نموده و با جابجایی‌های بدست آمده از مشاهدات GPS مقایسه نمودیم که میانگین طول بردارهای باقیمانده در نقاط مشاهداتی درحدود ۱,۴۰ میلیمتر در سال می‌باشد و بردارهای سرعت مدل و مشاهدات از لحاظ راستا دارای انطباق بسیار خوبی می‌باشند و

میانگین اختلاف زاویه‌ای بین دو دسته بردار جابجایی در حدود ۶ درجه می‌باشد. در انتها با استفاده از روش معکوس حل مسئله، طوری نرخ‌های لغزش گسل‌های ناحیه‌ی البرزمرکزی را تعیین نماییم، که بردارهای سرعت بدست آمده از مدل دارای انطباق مناسب و بیشترین میزان نزدیکی با بردارهای سرعت بدست آمده از مشاهدات GPS باشند. همچنین در این پژوهش کمیت عددی اتساع، که میانگین استرین‌های اصلی تنسور استرین ایجاد شده در منطقه مورد مطالعه، ناشی از حرکت گسل‌های مورد بررسی می‌باشد را محاسبه نموده‌ایم.

**واژگان کلیدی** : روش المان مرزی، مدل بلوک، مدل اُکادا، بردار سرعت جابجایی، کمیت اتساع

**Abstract**

Source and evaluation of earth surface is one of the most complicated problems which are under drastic considerations from early nineteenth century. The most prominent factor which causes deformation on earth surface and points coordinates which are located on it, is plate tectonic. Based on plate tectonic theory, the parts of earth that located on the boundary of earth plates which comprises the earth are the most talented regions for occurrence of huge deformation and earthquakes. Our country, Iran, because of its special position, in different geological eras, its shell has undergone many changes. According to major earthquakes which are happening along Iran faults and due to heterogeneity of Iranian continental crust and pressures which are come into it, most of Iranian faults are active or have the potential of being active. One of the four basic areas seismotectonics of Iran is the Alborz area. Variety of different methods are applied for movement modeling of seismic deformation fields, which in today's fast paced world and with advent of very high speed computers, numerical methods are the most prominent ways which are considered. Among numerical methods, since boundary element method provides the facility to measure the impact of different fault segments which are located in different length from area which we are studying and also in this method can enter the information related to the faults of a fault system together into the boundary element model therefore the effect of fault movements on each other and on the deformation of study area is a good modeled. In this study calculate, the deformation field created by slips of the main faults of Alborz and Major boundary faults between adjoining plates on the neighborhood of Alborz using 3Ddef boundary element model and compare the results of model with the results derived from GPS observations. The average length of reminder vectors in observation grid is about 1.40 mm per year and displacement vectors of model and observation in term of direction have good compliance and the mean angular difference between the two displacement vectors is about 6 degrees. Also in this research we calculate Dilation quantity which is the mean of principal strains of strain tensor created in the study area from moving faults that we studied.

**Keywords:** Boundary element method, numerical methods, Block model, Okada model, displacement vectots, Dilation

## فهرست مطالب


**فصل اول : مقدمه ..... ۱**

**فصل دوم : زمین تغییرشکل‌پذیر و عوارض واقع بر آن..... ۷**

۲-۱- زمین متغیر ..... ۸

۲-۲- تئوری زمین ساخت ..... ۸

۲-۳- مرز صفحات ..... ۱۱

۲-۳-۱- مرزهای دورشونده ..... ۱۱

۲-۳-۲- مرزهای همگرا..... ۱۲

۲-۳-۳- مرزهای گسل امتداد لغز..... ۱۵

۲-۴- گسل‌ها و علت وقوع زمین لرزه ..... ۱۶

**فصل سوم : زمین‌شناسی ناحیه‌ی البرز ..... ۲۱**

۳-۱- دوره‌های زمین‌شناسی ..... ۲۲

۳-۱-۱- دوره پالئوزوئیک ..... ۲۲

۳-۱-۲- دوره مزوزوئیک ..... ۲۴

۳-۲-۳- دوران سنوزوئیک ..... ۲۶

۳-۳- زمین‌شناسی ایران ..... ۲۷

۳-۴- ناحیه البرز ..... ۲۸

۳-۴-۲- زمین شناسی ناحیه البرز..... ۲۹

۳-۴-۳- تکتونیک البرز ..... ۳۱

۳-۵- گسل‌ها ..... ۳۳

۳-۵-۱- گسل شمال‌تهران ( North Tehran Fault ) ..... ۳۴

۳-۵-۲- گسل طالقان ( Taleghan Fault ) ..... ۳۴

۳-۵-۳- گسل مشا ( Mosha Fault ) ..... ۳۵

۳-۵-۴- گسل های فیروزکوه و آستانه ( Firuzkuh And Astaneh Faults ) ..... ۳۵

۳-۵-۵- گسل گرمسار (Garmsar Fault) ..... ۳۶

۳-۵-۶- گسل کهریزک ( Kahrizak Fault ) ..... ۳۷

۳-۵-۷- گسل آیپک ( Ipak Fault ) ..... ۳۸

۳-۵-۸- گسل خزر( Khazar Fault ) ..... ۳۸

۳-۵-۹- گسل شمال‌البرز ( North Alborz Fault ) ..... ۳۹

۳-۶- توضیحات تکمیلی و پایانی راجع به گسل های ناحیه مطالعه ..... ۳۹

**فصل چهارم : کلیات روش المان‌مرزی ..... ۴۰**
۴-۱- مقدمه ..... ۴۱
۴-۲- جواب‌های تحلیلی ..... ۴۱
۴-۳- جواب‌های عددی ..... ۴۲
۴-۴- مقایسه اجمالی انواع روش های عددی و دلیل استفاده از روش المان مرزی ..... ۴۳
۴-۴-۱- مقایسه زمان صرف شده برای انجام محاسبات عددی ..... ۴۳
۴-۴-۲- مقایسه روش‌های عددی در آنالیز تغییرشکل زمین ..... ۴۴
۴-۵- روش المان‌مرزی ..... ۴۸
۴-۵-۲- مفاهیم و تعاریف مورد نیاز برای روش المان‌مرزی ..... ۴۸
۴-۵-۲-۱- مسئله فلامنت-بوسینسک ..... ۴۸
۴-۵-۲-۲- مسئله کلوین ..... ۴۹
۴-۵-۲-۳- مسئله فلامنت ..... ۵۱
۴-۵-۲-۴- جواب اساسی ..... ۵۲
۴-۵-۳- اساس روش المان‌مرزی ..... ۵۳
۴-۵-۴- انواع روش های المان‌مرزی ..... ۵۸
۴-۶- انتخاب روش ناپیوستگی جابجایی برای آنالیز تغییرشکل‌های میان‌لرزه‌ای ..... ۶۰
۴-۷- ناپیوستگی جابجایی در یک جسم جامد نامحدود ..... ۶۳
۴-۸- مسئله شکاف تحت فشار ..... ۶۴
۴-۹- فرآیند عددی ..... ۶۶
**فصل پنجم : پارامترهای ضروری و ابزارهای لازم برای مدل المان‌مرزی ..... ۶۹**
۵-۱- مقدمه ..... ۷۰
۵-۲- برنامه المان‌مرزی 3Ddef ..... ۷۰
۵-۲-۱-تعاریف و قراردادها ..... ۷۱
۵-۲-۱-۱-توابع گرین ..... ۷۲
۵-۲-۱-۲- سیستم مختصات‌های مدل المان مرزی 3Ddef ..... ۷۲
۵-۲-۱-۳- صفحه (المان) در 3Ddef ..... ۷۳
۵-۲-۱-۴- نقطه‌ی مرجع $X_0,Y_0,Z_0$ در 3Ddef ..... ۷۳
۵-۲-۱-۵- فرادیواره و فرودیواره و جابجایی نسبی در 3Ddef ..... ۷۴
۵-۲-۲-کدهای شرط مرزی در 3Ddef ..... ۷۵
۵-۲-۳- قراردادهای جهت و علامت جابجایی و هندسه‌ی گسل در 3Ddef ..... ۷۷
۵-۲-۴- واحدهای پارامترهای مورد استفاده در 3Ddef ..... ۷۸

۵-۲-۵- فایل ورودی برنامه 3Ddef ..... ۷۸
۵-۲-۵-۱- بخش اول فایل ورودی ..... ۷۹
۵-۲-۵-۲- بخش دوم فایل ورودی ..... ۸۰
۵-۳- الاستیسیته ..... ۸۲
۵-۳-۲- استرین ..... ۸۳
۵-۳-۳- روابط استرین-جابجایی ..... ۸۶
۵-۳-۳-۱- استرین نرمال ..... ۸۷
۵-۳-۳-۲- استرین یا تغییرشکل برشی ..... ۸۸
۵-۳-۳-۲-۱-برش ساده ..... ۸۹
۵-۳-۳-۲-۲- برش خالص ..... ۸۹
۵-۳-۳-۳- تنسور استرین یا ماتریس تغییر شکل ..... ۹۰
۵-۳-۳-۴- اجزای تغییر شکل ..... ۹۱
۵-۳-۳-۵- استرین های اصلی ..... ۹۲
۵-۳-۳-۶- کمیت اتساع ..... ۹۳
۵-۳-۴- استرس(تنش) ..... ۹۳
۵-۳-۴-۱- تنش نرمال و تنش برشی ..... ۹۸
۵-۳-۴-۲- تنش کششی و تنش فشارشی ..... ۹۸
۵-۳-۴-۳- استرس‌های اصلی ..... ۱۰۰
۵-۳-۵- رابطه‌ی تنش-کرنش ..... ۱۰۰
۵-۴- مدل اُکادا ..... ۱۰۴
۵-۴-۱- منبع نقطه‌ای ..... ۱۰۸
۵-۴-۲- تغییرشکل‌های ناشی از یک منبع مستطیلی محدود ..... ۱۱۳
۵-۴-۲-۱- نقاط تکین موجود در عبارات محاسبه شده برای میدان تغییرشکل گسل‌های محدود ..... ۱۱۸
۵-۵- مدل بلوک ..... ۱۲۰
**فصل ششم : محاسبه میدان تغییرشکل با استفاده از مدل المان مرزی در منطقه مطالعه..... ۱۲۷**
۶-۱- منطقه مورد مطالعه ..... ۱۲۸
۶-۲- آماده سازی داده‌ها برای ورود به مدل المان مرزی ..... ۱۳۰
۶-۲-۱- داده‌های لازم برای ورود به مدل المان مرزی ..... ۱۳۰
۶-۲-۲- ایجاد فایل ورودی مورد نیاز برای مدل المان مرزی توسط برنامه‌نویس در متلب ..... ۱۳۱
۶-۳- میدان تغییرشکل در ناحیه‌ی البرزمرکزی ..... ۱۳۵
۶-۴- میدان سرعت ایجاد شده در ناحیه‌ی البرزمرکزی ..... ۱۳۶

۶-۴-۱- میدان تغییرشکل ایجاد شده در ناحیه البرز در اثر بلوک‌ها و صفحات مجاور ..... ۱۳۷
۶-۴-۱-۱- ناحیه اول ..... ۱۳۸
۶-۴-۱-۲- ناحیه دوم ..... ۱۴۴
۶-۴-۱-۳- ناحیه سوم ..... ۱۴۸
۶-۴-۱-۴- ناحیه چهارم ..... ۱۵۲
۶-۴-۱-۵- ناحیه پنجم ..... ۱۵۶
۶-۴-۱-۶- ناحیه ششم ..... ۱۶۱
۶-۴-۲- تعیین نرخ‌های لغزش دقیق گسل‌های ناحیه مطالعاتی البرز ..... ۱۶۵
۶-۴-۲-۱- حذف گسل‌های مرزی بلوک البرز ..... ۱۶۵
۶-۴-۲-۲- افزودن گسل‌های واقع در ناحیه‌ی البرز و ورود به مدل المان مرزی ..... ۱۶۸
۶-۴-۳- مقایسه‌ی نرخ‌های لغزش بدست آمده از مدل و نرخ‌های لغزش زمین‌شناسی..... ۱۸۰
**فصل هفتم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات ..... ۱۸۲**
**منابع و مراجع ..... ۱۸۶**

## فهرست جداول

جدول ۴-۱- حالات مختلف پارامترهای معلوم در مسائل دریخله و نیومن و مختلط ..... ۵۷
جدول ۵-۱- کدهای شرط مرزی در برنامه 3Ddef ..... ۷۶
جدول۵-۲- قراردادهای علامت در 3Ddef ..... ۷۷
جدول ۵-۳- واحد پارامترهای مورد استفاده در 3Ddef ..... ۷۸
جدول۵-۴- مدول‌های الاستیسیته ..... ۱۰۳
جدول ۵-۵- روابط ریاضی بین ضرایب الاستیسیته ..... ۱۰۴
جدول ۵-۶- خلاصه‌ی کارهای صورت گرفته پیش از آکادا برای بدست آوردن توابع گرین برای میدان‌های تغییرشکل ..... ۱۰۶
جدول ۶-۱- موقعیت وسرعت ایستگاه‌های GPS ناحیه‌ی البرز مرکزی ..... ۱۳۰
جدول ۶-۲- بردارهای سرعت در نقاط مشاهداتی منطقه مطالعه در اثر گسل‌های ناحیه‌ی ۱ ..... ۱۴۱
جدول ۶-۳- بردارهای سرعت در نقاط مشاهداتی منطقه مطالعه در اثر گسل‌های ناحیه‌ی ۲ ..... ۱۴۵
جدول ۶-۴- بردارهای سرعت در نقاط مشاهداتی منطقه مطالعه در اثر گسل‌های ناحیه‌ی ۳ ..... ۱۵۰
جدول ۶-۵- بردارهای سرعت در نقاط مشاهداتی منطقه مطالعه در اثر گسل‌های ناحیه‌ی ۴ ..... ۱۵۳
جدول ۶-۶- بردارهای سرعت در نقاط مشاهداتی منطقه مطالعه در اثر گسل‌های ناحیه‌ی ۵ ..... ۱۵۷
جدول ۶-۷- بردارهای سرعت در نقاط مشاهداتی منطقه مطالعه در اثر گسل‌های ناحیه‌ی ۶ ..... ۱۶۲
جدول ۶-۸- گسل‌هایی از ناحیه‌ی البرز که در مدل المان مرزی مورد استفاده واقع شده‌اند ..... ۱۶۹
جدول ۶-۹- بردارهای سرعت در نقاط مشاهداتی منطقه مطالعه ..... ۱۷۵
جدول ۶-۱۰- نرخ‌های لغزش پیشنهادی برای گسل‌های ناحیه‌ی البرز از طریق روش المان مرزی ..... ۱۷۹
جدول ۶-۱۱- نرخ‌های لغزش زمین‌شناسی برای تعدادی از گسل‌های ناحیه‌ی البرز ..... ۱۷۹

# فهرست اشکال


شکل۲-۱- صفحات لیتوسفری پوسته زمین ..... ۱۱
شکل۲-۲- پشته های میان اقیانوسی(جایی که صفحات پوسته ای از یکدیگر دور می شوند)..... ۱۲
شکل۲-۳- تشکیل کوهستانها در اثر همگرایی دو صفحه لیتوسفری..... ۱۳
شکل۲-۴- درازگودال‌های اصلی زمین (جایی که صفحات پوسته به درون پوسته فرو می روند) ..... ۱۴
شکل۲-۵- برخورد دو صفحه قاره‌ای(بالا)، همگرایی یک صفحه قاره‌ای و یک صفحه اقیانوسی(وسط)، همگرایی دو صفحه اقیانوسی(پایین) ..... ۱۵
شکل۲-۶- انواع گسل ..... ۱۷
شکل۲-۷- چگونگی ایجاد ترافشارش ..... ۱۹
شکل۲-۸- نمونه ای از ترافشارش ..... ۱۹
شکل۳-۱- پانگه آ، کمربندهای کوهستانی تشکیل شده از تماس قاره‌ها ..... ۲۴
شکل۳-۲- قاره‌ی گندوانا در طول دوره‌ی پالئوزوئیک ..... ۲۶
شکل۳-۳- تعدادی از گسل‌های ناحیه‌ی البرز به همراه توپوگرافی این ناحیه ..... ۳۶
شکل ۳-۴- گسل‌های فعال ناحیه‌ی البرز ..... ۳۷
شکل۴-۱- تقسیم‌بندی روش‌های عددی ..... ۴۳
شکل۴-۲- نیم فضای تحت نیروی اعمال شده بر سطح آن (مسئله فلامنت-بوسینسک) ..... ۴۹
شکل۴-۳- فضای کامل دوبعدی تحت نیرو (مسئله کلوین) ..... ۵۰
شکل۴-۴- توصیف دامنه در روش المان مرزی ..... ۵۴
شکل۴-۵- طریقه برخورد با سینگولاریتی ..... ۵۵
شکل۴-۶- مسئله دریخله، نیومن، مختلط ..... ۵۶
شکل۴-۷- گسسته‌سازی مرز ..... ۵۷
شکل۴-۸- بیان یک شکاف توسط N المان از ناپیوستگی جابجایی ..... ۶۷
شکل ۵-۱- خصوصیات مدل المان مرزی ..... ۷۱
شکل ۵-۲- سیستم‌های مختصات مورد استفاده در برنامه المان مرزی 3Ddef ..... ۷۴
شکل ۵-۳- مؤلفه استرین‌های نرمال ..... ۸۵
شکل ۵-۴- مؤلفه استرین برشی ..... ۸۶
شکل ۵-۵- جابجایی و تغییرشکل یک مکعب کوچک به یک وضعیت جدید ..... ۸۸
شکل۵-۷- چگونگی محاسبه بردار کشش ..... ۹۵

شکل۵-۸- توازن نیروها روی یک چهاروجهی ..... ۹۷
شکل ۵-۹- المان مکعبی در محیط پیوسته که وجوه آن موازی صفحات مختصاتی می‌باشند ..... ۱۰۰
شکل ۵-۱۰- سیستم مختصات اتخاذ شده توسط اُکادا ..... ۱۰۹
شکل ۵-۱۱- هندسه‌ی ۳ منبع نقطه‌ای مختلف ..... ۱۱۲
شکل ۵-۱۲- هندسه‌ی منبع مستطیلی ..... ۱۱۴
شکل ۵-۱۳- مفهوم فیزیکی برخی ثوابت و متغیرهای به‌کاررفته در جداول مربوط به روابط بدست آمده برای میدان‌های تغییرشکل ..... ۱۱۶
شکل ۵-۱۴- مکان‌هایی که سینگولاریتی‌ها در عبارات میدان تغییرشکل ناشی از منبع مستطیلی محدود رخ می‌دهند ..... ۱۱۹
شکل ۵-۱۵- مدل بلوک استفاده شده توسط رایلینگر ..... ۱۲۴
شکل۶-۱- میدان سرعت بردارهای GPS البرزمرکزی براساس مشاهدات بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲..... ۱۲۹
شکل۶-۲- فایل (مختصاتی، لغزشی) لازم برای برنامه متلب نوشته شده ..... ۱۳۲
شکل ۶-۳- فرآیند طی شده در برنامه متلب برای ایجاد اتوماتیک فایل ورودی برنامه المان مرزی ..... ۱۳۴
شکل ۶-۴- ایجاد ورودی برنامه المان مرزی و ایجاد خروجی آن و ترسیم خروجی‌ها ..... ۱۳۵
شکل ۶-۵- تصویر توپوگرافی و تکتونیکی بلوک‌های مجاور ناحیه‌ی مطالعه ..... ۱۴۰
شکل ۶-۶- گسل‌ها و المان‌های ناحیه‌ی اول ورودی مدل المان مرزی ..... ۱۴۱
شکل ۶-۷- بردارهای سرعت ناشی از گسل‌های ناحیه‌ی۱ ..... ۱۴۳
شکل ۶-۸- اختلاف بین اندازه‌ی بردارهای سرعت مدل و مشاهدات GPS در ناحیه ۱ ..... ۱۴۴
شکل ۶-۹- گسل‌ها و المان‌هایی ناحیه‌ی۲ ورودی مدل المان مرزی ..... ۱۴۵
شکل ۶-۱۰- اختلاف بین اندازه‌ی بردارهای سرعت مدل و مشاهدات GPS در ناحیه ۲ ..... ۱۴۶
شکل ۶-۱۱- اختلاف بین اندازه‌ی بردارهای سرعت مدل در نواحی ۱ و ۲ ..... ۱۴۷
شکل ۶-۱۲- بردارهای سرعت ناشی از گسل‌های ناحیه‌ی۲ ..... ۱۴۸
شکل ۶-۱۳- گسل‌ها و المان‌هایی که در ناحیه‌ی۳ ورودی مدل المان مرزی ..... ۱۴۹
شکل ۶-۱۴- بردارهای سرعت ناشی از گسل‌های ناحیه‌ی ۳ ..... ۱۵۱
شکل ۶-۱۵- اختلاف بین اندازه‌ی بردارهای سرعت مدل در نواحی ۲ و ۳ ..... ۱۵۲
شکل ۶-۱۶- گسل‌ها و المان‌های ناحیه‌ی۴ ..... ۱۵۳
شکل ۶-۱۷- بردارهای سرعت ناشی از گسل‌های ناحیه‌ی ۴ ..... ۱۵۵
شکل ۶-۱۸- اختلاف بین اندازه‌ی بردارهای سرعت مدل در نواحی ۳ و ۴ ..... ۱۵۵
شکل ۶-۱۹- گسل‌ها و المان‌های ناحیه‌ی۵ ..... ۱۵۷

شکل ۶-۲۰- بردارهای سرعت ناشی از گسل‌های ناحیه‌ی ۵ ..... ۱۵۹
شکل ۶-۲۱- اختلاف بین اندازه‌ی بردارهای سرعت مدل و مشاهدات GPS در ناحیه ۵ ..... ۱۵۹
شکل ۶-۲۲- اختلاف اندازه‌ی بردارهای سرعت بدست آمده توسط مدل المان مرزی در نواحی۴ و۵ ..... ۱۶۰
شکل ۶-۲۳- گسل‌ها و المان‌های ناحیه‌ی ۶ ..... ۱۶۳
شکل ۶-۲۴- بردارهای سرعت ناشی از گسل‌های ناحیه‌ی ۶ ..... ۱۶۴
شکل ۶-۲۵- نمایش رنگی طول بردارهای باقیمانده‌ی بین بردارهای سرعت مدل و GPS به‌همراه بردارهای مدل و GPS ..... ۱۶۴
شکل ۶-۲۶- گسل‌های بلوک البرز ..... ۱۶۶
شکل ۶-۲۷- بردارهای سرعت مدل ناشی از حذف گسل‌های بلوک البرز و بردارهای GPS و بیضی‌های خطای آنها ..... ۱۶۷
شکل۶-۲۸- مقایسه‌ی متوسط لغزش ایجاد شده توسط گسل‌های مختلف ..... ۱۶۸
شکل ۶-۲۹- گسل‌های ناحیه‌ی البرز ..... ۱۷۰
شکل ۶-۳۰- بردارهای سرعت مدل المان مرزی (نارنجی) و بردارهای سرعت GPS (قرمز) ..... ۱۷۲
شکل ۶-۳۱- نمای بزرگتری از بردارهای سرعت در نقاط مشاهداتی به منظور مشخص شدن انطباق مناسب آنها ..... ۱۷۳
شکل ۶-۳۲- اختلاف بین اندازه‌ی بردارهای سرعت مدل و GPS در نقاط مشاهداتی ..... ۱۷۴
شکل ۶-۳۳- اختلاف زاویه‌ای بین بردارهای مدل و GPS در ایستگاه‌های مشاهداتی بر حسب درجه ..... ۱۷۶
شکل ۶-۳۴- نمایش رنگی طول بردارهای باقیمانده‌ی بین بردارهای سرعت مدل و مشاهدات به همراه بردارهای سرعت آنها ..... ۱۷۷
شکل ۶-۳۵- نمایش رنگی طول بردارهای باقیمانده‌ی بین بردارهای سرعت مدل و مشاهدات و بیضی‌های خطای با فاصله‌ی اطمینان ۶۷ درصد ..... ۱۷۸

# فصل اول

## مقدمه

زمین یک کره‌ی تغییرشکل‌پذیر است، گواه این ادعا این است که صد میلیون سال قبل چهره زمین کاملاً متفاوت بوده است و هیچ اثری از کوه‌های آلپ یا خلیج مکزیک نبوده است، در عوض قاره‌هایی در ابعاد، اشکال و موقعیتهای متفاوتی وجود داشته است. منشأ و تکامل پوسته‌ی زمین از جمله مسائل بسیار پیچیده‌ای است که از اوایل قرن نوزدهم میلادی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. برخی از مسائلی که در ابتدا مطرح شده بودند، مثل چگونگی و زمان تشکیل پوسته‌های قاره‌ای و اقیانوسی، هم اکنون نیز به عنوان یک مسئله‌ی بحث برانگیز باقی مانده‌اند. با پیشرفت سریع علم در حیطه‌های مختلف علوم وابسته به زمین و با انباشت سریع اطلاعات در رشته‌های ژئوفیزیک، ژئوشیمی و زمین‌شناسی در دهه‌های اخیر، دانش بشر نسبت به طبیعت فیزیکی و شیمیایی پوسته‌ی زمین و فرآیند تکامل آن رشد کرده است و این موضوع باعث به وجود آمدن شاخه-های نوین‌تری برای ارزیابی دقیق تغییرشکل‌های پوسته‌ی زمین شده است که از جمله‌ی آنها می‌توان به علم ژئودزی اشاره نمود که رسالت و هدف اصلی آن مطالعه و تعیین تغییرشکل‌های پوسته‌ای زمین می‌باشد و در کنار دیگر علوم زمین، باعث بالارفتن آگاهی بشر راجع به تحولات و تغییرات محیط پیرامون شده است.

عوامل مختلفی می‌توانند باعث ایجاد تغییرشکل در پوسته زمین شوند، مهم‌ترین عامل ایجاد تغییرشکل در پوسته‌ی زمین و موقعیت نقاط بر روی زمین، پدیده‌ی زمین‌ساخت می‌باشد، که منشأ آن از درون کره‌ی زمین و فرآیندهایی که در لایه‌های درونی‌تر زمین اتفاق می‌افتند، سرچشمه می‌گیرد. بر اساس تئوری زمین‌ساخت صفحه‌ای، قسمت‌هایی از کره‌ی زمین که در مرز صفحات تشکیل‌دهنده‌ی پوسته‌ی زمین واقع شده‌اند نواحی مستعد تغییرشکل‌های بزرگ و وقوع زمین‌لرزه‌های عظیم می‌باشند. کشور ما ایران به علت موقعیت جغرافیایی خاص آن و قرارگیری آن در ناحیه‌ای که تقریباً از تمامی جهات تحت فشار صفحات مجاور قرار دارد، همواره و در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی، پوسته‌ی آن دستخوش تغییرات زیادی بوده است و وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ در قسمت‌های مختلف کشور و پراکندگی این زلزله‌ها نشان می‌دهد که موقعیت زلزله خیزی ایران بر وضعیت