بسم الله الرحمن الرحيم
الحمد لله رب العالمين الرحمن الرحيم مالك يوم الدين
اهدنا الصراط المستقيم صراط الذين أنعمت عليهم
غير المغضوب عليهم ولا الضالين

۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی نقشه برداری (ژئودزی و ژئوماتیک)

پایان نامه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی عمران ـ نقشه‌برداری
گرایش ژئودزی

مدل‌سازی مکانیکی اثر برخورد مایل صفحات زمین‌ساختی عربستان و اوراسیا در محدوده گسل شمال تبریز

استاد راهنما:
دکتر بهزاد وثوقی
استاد مشاور:
دکتر اصغر راست‌بود

نگارش:
جواد صبائی ماسوله

زمستان ۱۳۹۱

تقدیم به دو گوهر زندگی:

مادر مهربانم،

دریای بیکران فداکاری و عشق، که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

پدر بزرگوارم،

که شانه های خسته اش تکیه گاه زندگیم بوده است.

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تاسیس ۱۳۰۷	**تأییدیه هیأت داوران**	شماره: تاریخ:

هیأت داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان :

" مدل سازی مکانیکی اثر برخورد مایل صفحات زمین ساختی عربستان و اوراسیا در محدوده گسل شمال تبریز "

توسط آقای **جواد صبایی ماسوله** صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته گرایش **ژئودزی** در تاریخ **۹۱/۱۱/۱۸** مورد تأیید قرار می‌دهند.

۱- استاد راهنمای اول	جناب آقای دکتر بهزاد وثوقی	امضاء
۲- استاد راهنمای دوم	-	امضاء
۳- استاد مشاور	-	امضاء
۴- ممتحن داخلی	جناب آقای دکتر مسعود مشهدی حسینعلی	امضاء
۵- ممتحن خارجی	جناب آقای دکتر یحیی جمور	امضاء
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	جناب آقای دکتر محمد کریمی	امضاء

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تاسیس ۱۳۰۷	**اظهارنامه دانشجو**	**شماره:** **تاریخ:**

اینجانب جواد صبائی ماسوله **دانشجوی کارشناسی‌ارشد رشته** مهندسی عمران - نقشه برداری

گرایش ژئودزی **دانشکده** ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان

«مدل سازی مکانیکی اثر برخورد مایل صفحات زمین ساختی عربستان و اوراسیا در محدوده گسل شمال تبریز»

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای / ~~سرکار خانم~~ دکتر بهزاد وثوقی ، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت واصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ: ۹۱/۱۲/۱۲

فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد. ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

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

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی‌باشد.

تشکر و قدردانی

اکنون که به یاری پرودگار تدوین این پایان نامه به اتمام رسیده است، جای آن دارد که از زحمات بی دریغ و تلاش همه عزیزانی که یاری ام نموده اند تشکر و قدردانی نمایم:

از زحمات و حمایت های بی دریغ استاد محترم راهنما جناب آقای دکتر بهزاد وثوقی سپاسگزارم که راهنمایی های ارزنده ایشان در بهبود هرچه بهتر این پایان نامه کمک شایانی نموده است.

از استاد مشاور عزیز جناب آقای دکتر راست بود سپاسگزارم چرا که بدون راهنمایی ها و مساعدت ایشان این پایان نامه بسیار دشوار می گردید.

از اساتید محترم جناب آقایان دکتر مهدی نجفی علمداری، دکتر مسعود مشهدی حسینعلی و دکتر مهدی اسحاق سپاسگزارم که راهنمایی هایشان در انجام این مهم راهگشا بوده است.

چکیده

زمین‌ساخت کنونی ایران به طور عمده نتیجه برخورد میان صفحات عربستان و اوراسیا می‌باشد که نرخ کوتاه‌شدگی میان قفقاز و کوه‌های زاگرس شمالی در حدود ۱۴ ± ۲ mm/year می‌باشد. شمال غرب ایران منطقه‌ای توام با تغییر-شکل و لرزه‌خیزی بالا است که بین دو کمربند تراست قفقاز در شمال و کوههای زاگرس در جنوب قرار دارد. در این پایان‌نامه، ابتدا اثر پارامترهای هندسی و رئولوژیکی در میدان جابجایی سطحی یک گسل امتدادلغز بررسی می‌شود، که بر اساس نتایج آنالیز حساسیت انجام‌شده ملاحظه می‌شود که بیشترین حساسیت و تغییر در جابجایی سطحی نسبت به پارامتر عمق قفل‌شدگی می‌باشد. سپس دو مدل به منظور مطالعه تغییرشکل شمال غرب ایران و برخورد صفحات عربستان و اوراسیا ایجاد می‌شود. رئولوژی لیتوسفر شامل یک پوسته بالایی کشسان با معیار تسلیم دراکر-پراگر و پوسته پایینی گرانروی، می‌باشد. مدل اول شامل گسل شمال تبریز و گسل تسوج می‌باشد و اندرکنش میان ویژگی‌های رئولوژیکی پوسته شمال غرب ایران و نرخ جابجایی گسل شمال تبریز بررسی می‌شود. به منظور مطالعه تأثیر گرانروی و اصطکاک در تغییرشکل شمال غرب ایران، اصطکاک از ۰/۰۲ تا ۰/۳ و گرانروی از 10^{19} Pa s تا 10^{23} Pa s تغییر داده شده‌اند. از مقایسه نتایج با مشاهدات انجام‌گرفته توسط جمور و همکاران (۲۰۱۱) و با استفاده از گرانروی 10^{19} Pa s برای پوسته پایینی، اصطکاک ۰/۰۲ تطابق بهتری را با مشاهدات دارد که این نشان می‌دهد، گسل شمال تبریز یک گسل با اصطکاک پائین مانند گسل‌های سن آندریاس و شمال آناتولین می‌باشد. نتایج حاصل از میزان نرخ کرنش در شمال غرب ایران نشان می‌دهد که در قسمت‌های ابتدایی، میانی و انتهایی گسل شمال تبریز بیشترین میزان نرخ کرنش وجود دارد. با درنظرگرفتن اثر توپوگرافی، بردارهای سرعت تغییرات ناچیزی را نسبت به حالت بدون توپوگرافی دارند. رفتار امتدادلغز گسل شمال تبریز را می‌توان از تنش‌های اصلی مشاهده نمود. مدل دوم شامل گسل جوان اصلی، تراست اصلی زاگرس، گسل کازرون، گسل دهشیر، گسل کاشان و گسل شمال تبریز می‌باشد. سه ضریب اصطکاک (۰/۰۲، ۰/۱ و ۰/۳) آزمایش شده‌اند. ضریب اصطکاک ۰/۰۲ تطابق بهتری با مشاهدات را دارد و برای این حالت نتایج، نرخ کرنش بالایی در امتداد گسل‌ها (به خصوص در امتداد گسل شمال تبریز) و نرخ کرنش پائینی را در ایران مرکزی نشان می‌دهد و این نتیجه، فعال بودن گسل شمال تبریز را تایید می‌نماید. رفتار امتدادلغز گسل شمال تبریز را نمی-توان از تنش‌های اصلی مدل دوم نتیجه گرفت.

واژگان کلیدی: برخورد عربستان و اوراسیا، شمال غرب ایران، مدل‌سازی مکانیکی، روش اجزاء محدود، میدان سرعت GPS، رئولوژی لیتوسفر

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

فصل دوم: تغییرشکل و رئولوژی لیتوسفر ۷

۲-۱- نیروهای حجمی و نیروهای سطحی ۸

۲-۲- تنش و مقادیر ناوردای تنش ۹

۲-۳- تنش جاذبی زمین ۱۰

۲-۴- قانون اصطکاک کلمب ۱۲

۲-۵- تغییرشکل پیوسته ۱۳

۲-۵-۱- توصیف‌های لاگرانژی و اویلری ۱۳

۲-۵-۲- گرادیان تغییرشکل ۱۴

۲-۵-۳- تنسور تغییرشکل کوشی و گرین ۱۵

۲-۵-۴- تنسورهای لاگرانژی و اویلری ۱۶

۲-۵-۵- تجزیه قطبی ۱۶

۲-۵-۶- نرخ‌های تغییرشکل، کرنش و دوران ۱۸

۲-۶- قانون بقای جرم ۱۹

۲-۷- تعادل اندازه حرکت ۲۰

۲-۸- روابط رفتاری ۲۲

۲-۸-۱- تغییرشکل کشسان ۲۲

۲-۸-۲- قوانین کلی تغییرشکل گرانروی ۲۳

۲-۸-۳- مدل ماکسول ۲۴

۲-۸-۴- تغییرشکل شکننده و معیار تسلیم کلمب- ناویر ۲۵

۲-۸-۵- معیار تسلیم دراکر- پراگر ۲۸

۲-۹- رئولوژی لیتوسفر قاره‌ای ۳۰

۲-۱۰- دما و انتقال حرارت ۳۱

۲-۱۰-۱- قانون فوریه ۳۱

۲-۱۰-۲- دما در لیتوسفر ۳۲

۲-۱۰-۳- معادله انتقال گرما ۳۳

۲-۱۰-۴- تنش‌های حرارتی در لیتوسفر بالایی ۳۵

فصل سوم: روش مدل‌سازی ۳۶

۳-۱- حل عددی و حل تحلیلی ۳۸

۳-۲- روش تفاضل محدود ۳۹

۳-۲-۱- روش‌های تفاضل محدود صریح و غیرصریح ۴۱

۳-۳- آسایش دینامیکی ۴۳

۳-۴- روش‌های اجزاء محدود ۴۵

۳-۴-۱- روش مستقیم اجزاء محدود ۴۵

۳-۴-۲- مسائل مقادیر ویژه ۴۶

۳-۴-۳- مسائل انتشاری ۴۷

۳-۵- قانون کار مجازی ۴۸

۳-۶- درونیابی اجزاء محدود ۴۹

۳-۷- تقریب‌های اجزاء محدود ۵۲

۳-۸- گسسته‌سازی فضایی ۵۳

۳-۹- گسسته‌سازی زمانی ۵۴

۳-۱۰- نیروهای تماسی ۵۶

۳-۱۱- نیروهای داخلی ۵۷

۳-۱۲- انتخاب کاهنده ۵۷

فصل چهارم: ساختار ژئودینامیک محدوده برخورد صفحات عربستان و اوراسیا و شمال غرب ایران ۵۹

۴-۱- برخورد صفحات عربستان و اوراسیا ۶۰

۴-۲- تغییرشکل و لرزه‌خیزی ایران ۶۳

۴-۳- سینماتیک کلی ایران ۶۶

۴-۴- زمین‌ساخت زاگرس ۶۹

۴-۵- گسل دهشیر ۷۲

۴-۶- شمال غرب ایران ۷۳

۴-۶-۱- ضخامت پوسته‌ای شمال غرب ایران ۷۶

۴-۶-۲- زمین‌شناسی گسل شمال تبریز ۷۷

۴-۶-۳- زمین‌لرزه‌های تاریخی شهر تبریز ۸۱

فصل پنجم: مراحل مدل‌سازی ۸۵

۵-۱- آنالیز حساسیت ۸۶

۵-۱-۱- هندسه و تغییرشکل مدل مرجع ۸۷

۵-۱-۲- اثر تک تک پارامترهای ورودی در تغییرات جابجایی گسل ۸۹

۵-۲- مدل‌سازی تغییرشکل شمال غرب ایران ۹۴

۵-۲-۱- هندسه و شرایط مرزی ۹۴

۵-۲-۲- قوانین ساختاری ۹۶

۵-۲-۳- تغییر گرانروی و ضریب اصطکاک گسل ۹۸

۵-۲-۴- بررسی تغییرشکل شمال غرب ایران ۱۰۱

۵-۲-۵- اثر توپوگرافی ۱۰۴

۵-۲-۶- میدان تنش شمال غرب ایران ۱۰۷

۵-۳- مدل‌سازی بزرگ مقیاس محدوده زاگرس و شمال غرب ایران ۱۰۹

۵-۳-۱- هندسه و شرایط مرزی ۱۱۰

۵-۳-۲- تغییر ضریب اصطکاک ۱۱۲

۵-۳-۳- بررسی تغییرشکل برخورد صفحات عربستان و اوراسیا ۱۱۶

۵-۳-۴- میدان تنش برخورد صفحات عربستان و اوراسیا ۱۲۰

فصل ششم: نتیجه‌گیری‌ها و پیشنهادات ۱۲۲

منابع و مراجع ۱۲۵

فهرست اشکال

شکل ۲-۱ نمایش الگووار توپوگرافی سطحی پوسته، V و M، به ترتیب نمایش‌دهنده دره و کوه هستند. (Zang and Stephansson, 2009) ۱۱
شکل ۲-۲ میدان تنش ایجادشده به سبب نیروی جاذبه (Zang and Stephansson, 2009) ۱۱
شکل ۲-۳ قانون اصطکاک کلمب ۱۲
شکل ۲-۴ شبکه اویلری (E) و شبکه لاگرانژی (L) (Belytschko et al., 2006) ۱۴
شکل ۲-۵ حالت‌های مختلف شکست شکننده. a) شکست برشی کششی، b) شکست کششی، c) شکست برشی فشارشی و d) شکست جدایی محوری (Ranalli, 1995) ۲۵
شکل ۲-۶ معیار تسلیم کلمب- ناویر (Burov, 2011) ۲۶
شکل ۲-۷ پروفیل استحکام (Stuwe, 2007) ۳۰
شکل ۲-۸ انتقال گرما در جزء حجمی بسیار کوچک dV (Ranalli, 1995) ۳۳
شکل ۳-۱ شیب تابع f(x) و روش تفاضل محدود (Stuwe, 2007) ۳۹
شکل ۳-۲ سه روش ساده گسسته‌سازی به روش تفاضل محدود. روش تفاضل محدود به سمت جلو، روش تفاضل محدود مرکزی و روش تفاضل محدود به سمت عقب (Stuwe, 2007) ۴۰
شکل ۳-۳ روش‌های تفاضل محدود صریح و غیر صریح (Stuwe, 2007) ۴۲
شکل ۳-۴ تقریب عددی و کاهش مساله مقدار مرزی اولیه به گروهی از معادلات اجزاء محدود (De Souza Neto et al., 2008) ۵۰
شکل ۳-۵ درونیابی اجزاء محدود و تابع شکل جزء (De Souza Neto et al., 2008) ۵۰
شکل ۳-۶ درونیابی اجزاء محدود و تابع شکل کلی (De Souza Neto et al., 2008) ۵۱
شکل ۴-۱ سرعت‌های پیش‌بینی‌شده بوسیله مدل ناول A-۱ نسبت به صفحه اوراسیا (DeMets et al., 1994) ۶۱
شکل ۴-۲ میدان سرعت افقی برای کمربند آلپ- هیمالیای شرقی در یک چارچوب مرجع اوراسیا (Vernant et al., 2004). ۶۱
شکل ۴-۳ نقشه گسل‌های ایران (حسامی و جمالی، ۲۰۰۶). AF: گسل آبیز، ASHF: گسل عشق آباد، DF: گسل درونه، DBF: گسل دشت بیاز، DEHF: گسل دهشیر، FT: تراست فردوس، KF: گسل کاشان، KALF: گسل کلمرد، KBF: گسل کوه بنان، GF: گسل گوک، KZF: گسل کازرون، MRF: گسل جوان اصلی، MZT: تراست اصلی زاگرس، Mi: گسل‌های میناب-زندان-پالامی، NTF: گسل شمال تبریز، NF: گسل نایبند، NOSF: گسل نصرت آباد، SSZ: ناحیه زمین‌درز سیستان، SF: گسل سبزواران ۶۴
شکل ۴-۴ نقشه لرزه‌خیزی ایران (توکلی و همکاران، ۲۰۰۷) ۶۵
شکل ۴-۵ سرعت‌های افقی GPS در چارچوب مرجع اوراسیا (Masson et al., 2007) ۶۶
شکل ۴-۶ نرخ کوتاه‌شدگی حاصل از اندازه‌گیری‌های GPS در بخش‌های مختلف ایران (Vernant et al., 2004). بردارهای سیاه نمایش‌دهنده حرکت صفحه عربستان نسبت به اوراسیا می‌باشند. بردارهای خاکستری، نرخ‌های تغییرشکل حاصل از اندازه‌گیری‌های GPS می‌باشند. بردارهای سفید نرخ‌های تغییرشکل حاصل از GPS، شواهد زمین‌شناسی و لرزه‌شناسی می‌باشند ۶۸

شکل ۴-۷ موقعیت گسل‌های اصلی زاگرس (بربریان، ۱۹۹۵) و لرزه‌خیزی (Engdahl et al., 1998). DEF: گسل دزفول، HZF: گسل بلند زاگرس، KB: گسل کره‌باس، MFF: گسل پیشانی کوهستان، MRF: گسل جوان اصلی، MZT: تراست اصلی زاگرس، S: گسل سروستان، SP: گسل سبزپوشان، SFB : کمربند چین‌خورده ساده، ZFF: گسل پیش گودال زاگرس ۷۰
شکل ۴-۸ نقشه زمین‌ساخت شمال غرب ایران (مرادی و همکاران، ۲۰۱۱) ۷۴
شکل ۴-۹ میدان سرعت شمال غرب ایران نسبت به چارچوب مرجع اوراسیا (Masson et al., 2006) ۷۵
شکل ۴-۱۰ نقشه گسل کواترنری شمال تبریز (بربریان و ارشدی، ۱۹۷۶) ۷۷
شکل ۴-۱۱ گسل شمال تبریز در روستای چله خانه (شرق صوفیان) (بربریان و ارشدی، ۱۹۷۶) ۷۸
شکل ۴-۱۲ گسل شمال تبریز در خواجه مرجان (بربریان و ارشدی، ۱۹۷۶) ۷۸
شکل ۴-۱۳ گسل شمال تبریز در شمال فرودگاه تبریز (بربریان و ارشدی، ۱۹۷۶) ۷۹
شکل ۵-۱ هندسه مدل مرجع به طول L، عمق قفل‌شدگی h و عرض w ۸۷
شکل ۵-۲ تغییرشکل مدل مرجع و بردارهای جابجایی مدل ۸۸
شکل ۵-۳ نتیجه حاصل از آنالیز حساسیت میدان جابجایی مسطحاتی مدل به تغییرات پارامتر طول گسل. حساسیت مدل به پارامتر طول گسل بسیار کم است. ۹۰
شکل ۵-۴ نتیجه حاصل از آنالیز حساسیت میدان جابجایی مسطحاتی مدل به تغییرات پارامتر عرض گسل. حساسیت مدل به عرض گسل بیشتر از طول گسل است. ۹۰
شکل ۵-۵ نتیجه حاصل از آنالیز حساسیت میدان جابجایی مسطحاتی مدل به تغییرات پارامتر عمق قفل‌شدگی گسل. مدل حساسیت بیشتری به عمق قفل‌شدگی نشان می‌دهد. ۹۱
شکل ۵-۶ نتیجه حاصل از آنالیز حساسیت میدان جابجایی مسطحاتی مدل به تغییرات پارامتر نسبت پواسون محیط. مدل حساسیت بسیار کمی به نسبت پواسون نشان می‌دهد. ۹۲
شکل ۵-۷ نتیجه حاصل از آنالیز حساسیت میدان جابجایی مسطحاتی مدل به تغییرات پارامتر ضریب اصطکاک گسل. حساسیت مدل به ضریب اصطکاک گسل کم است. ۹۲
شکل ۵-۸ نتیجه حاصل از آنالیز حساسیت میدان جابجایی مسطحاتی مدل به تغییرات پارامتر چگالی. مدل حساسیت بسیار کمی به چگالی دارد. ۹۳
شکل ۵-۹ هندسه مدل و شرایط مرزی اعمال‌شده بر مدل که شامل گسل شمال تبریز (NTF) و گسل تسوج (TF) می‌باشد. سیستم مختصات xy، سیستم مختصات محلی تعریف‌شده برای گسل شمال تبریز می‌باشد. ۹۴
شکل ۵-۱۰ شبکه‌بندی مدل اجزاء محدود شمال غرب ایران ۹۵
شکل ۵-۱۱ رئولوژی پوسته بالایی و پوسته پائینی استفاده‌شده در مدل ۹۷
شکل ۵-۱۲ نقشه زمین‌ساختی شمال غرب ایران و بردارهای GPS مشاهده‌شده توسط جمور و همکاران (۲۰۱۱) ۹۹
شکل ۵-۱۳ نمودار اختلاف مؤلفه‌های شرقی سرعت دو ایستگاه SKOH و AHAR به ازای گرانروی‌ها و اصطکاک‌های مختلف. خطوط نقطه‌چین فاصله اطمینان را نشان می‌دهند. ۱۰۰
شکل ۵-۱۴ پروفیل استحکام حاصل از مدل شمال غرب ایران ۱۰۱
شکل ۵-۱۵ نرخ کرنش و بردارهای سرعت نتیجه‌شده ازمدل (بردارهای قرمز رنگ) برای حالت گرانروی 10^{19} Pa s با ضریب اصطکاک ۰/۰۲، بردارهای سبز رنگ نمایشگر بردارهای سرعت GPS مشاهده‌شده می‌باشند. ۱۰۲

شکل ۵-۱۶ نرخ کرنش و بردارهای سرعت نتیجه‌شده ازمدل (بردارهای قرمز رنگ) برای حالت گرانروی 10^{19} Pa s با ضریب اصطکاک ۰/۳، بردارهای سبز رنگ نمایشگر بردارهای GPS مشاهده‌شده می‌باشند. ۱۰۳
شکل ۵-۱۷ بردارهای جابجایی ناشی از اثر توپوگرافی با شرایط مرزی صفر.....۱۰۴
شکل ۵-۱۸ نرخ کرنش و بردارهای سرعت نتیجه‌شده ازمدل (بردارهای قرمز رنگ) برای حالت گرانروی 10^{19} Pa s با ضریب اصطکاک ۰/۰۲ با اعمال اثر توپوگرافی. بردارهای سبز رنگ نمایشگر بردارهای GPS مشاهده‌شده می‌باشند. ۱۰۶
شکل ۵-۱۹ تنش‌های اصلی برای حالت گرانروی 10^{19} Pa s با ضریب اصطکاک ۰/۰۲ .....۱۰۸
شکل ۵-۲۰ نقشه گسل‌های ایران (حسامی و جمالی، ۲۰۰۶). خطوط پررنگ مشکی، محدوده مدل را نشان می‌دهد. ۱۰۹
شکل ۵-۲۱ هندسه مدل و شرایط مرزی اعمال‌شده بر مدل که شامل گسل دهشیر (Deh)، گسل کاشان (Kas)، گسل کازرون (Kaz)، گسل شمال تبریز (NTF)، گسل جوان اصلی (MRF) و تراست اصلی زاگرس (MZT) می‌باشد. ۱۱۰
شکل ۵-۲۲ شبکه‌بندی مدل اجزاء محدود محدوده زاگرس و شمال غرب ایران ۱۱۱
شکل ۵-۲۳ ۳۲ نقطه مرجع استفاده‌شده در مدل ۱۱۳
شکل ۵-۲۴ پروفیل استحکام مدل برای محدوده زاگرس ۱۱۵
شکل ۵-۲۵ پروفیل استحکام مدل برای محدوده شمال غرب ایران ۱۱۵
شکل ۵-۲۶ پروفیل استحکام مدل برای محدوده ایران مرکزی ۱۱۶
شکل ۵-۲۷ نرخ کرنش و بردارهای سرعت منتج ازمدل‌سازی (بردارهای قرمز رنگ) برای ضریب اصطکاک ۰/۰۲. بردارهای سبز رنگ نمایشگر بردارهای GPS مشاهده‌شده می‌باشند.....۱۱۷
شکل ۵-۲۸ نرخ کرنش و بردارهای سرعت منتج ازمدل (بردارهای قرمز رنگ) برای ضریب اصطکاک ۰/۰۲ با لایه‌های بیشتر. بردارهای سبز رنگ نشان‌دهنده بردارهای GPS مشاهده‌شده می‌باشند. ۱۱۸
شکل ۵-۲۹ نرخ کرنش و بردارهای سرعت منتج ازمدل‌سازی (بردارهای قرمز رنگ) برای ضریب اصطکاک ۰/۳. بردارهای سبز رنگ نمایشگر بردارهای GPS مشاهده‌شده می‌باشند.....۱۱۹
شکل ۵-۳۰ تنش‌های اصلی برآوردشده از مدل. بردارهای خاکستری برای ضریب اصطکاک ۰/۰۲ و بردارهای سیاه برای ضریب اصطکاک ۰/۳ می‌باشند. ۱۲۱

فهرست جداول

جدول ۵-۱ مقادیر پارامترهای هندسی و فیزیکی مورد استفاده در آنالیز حساسیت ۸۹
جدول ۵-۲ rms نرخ لغزش محاسبه‌شده برای اصطکاک‌های مختلف ۱۱۲
جدول ۵-۳ نرخ لغزش محاسبه‌شده برای گسل‌های اصلی مدل ۱۱۴

فصل اول: مقدمه

ایران آزمایشگاهی طبیعی برای مطالعه سینماتیک و دینامیک فعل و انفعالات زمین‌ساختی است، زیرا فرآیندهای زمین‌ساختی متنوعی شامل برخورد قاره‌ای (زاگرس، قفقاز، البرز، کوپه‌داغ، تالش)، فرورانش لیتوسفر اقیانوسی (مکران) و انتقال بین کوهزایی جوان (زاگرس) و ناحیه فرورانشی (مکران) در آن وجود دارد (Vernant et al., 2004)، که برخورد صفحات عربستان و اوراسیا بر ژئودینامیک این ناحیه غالب می‌باشد (Jackson and McKenzie, 1984; Jackson and McKenzie, 1988).

زمین‌لرزه‌های تاریخی (Ambraseys and Melville,1982) و دستگاهی (Engdahl et al., 1998) در ایران نشان‌دهنده تغییرشکل قاره‌ای متمرکز در چندین کمربند کوهستانی هستند، که بلوک‌های غیرلرزه‌ای (بلوک ایران مرکزی، بلوک لوت و بلوک خزر جنوبی) را احاطه نموده‌اند. کشور ایران به عنوان بخشی از کمربند کوهزایی آلپ-هیمالیا همواره از لرزه‌خیزی بالایی در طول تاریخ برخوردار بوده است. گسیختگی پوسته زمین به دلیل جنبش‌های برشی در دو طرف گسل‌ها عامل اصلی بروز زمین‌لرزه می‌باشد و نتیجه مستقیم انباشتگی تنش‌ها در نتیجه جابجایی‌های صفحه‌های زمین‌ساختی نسبت به یکدیگر می‌باشد. کمربند چین‌خورده و تراست زاگرس واقع در جنوب غربی زاگرس، یکی از جوان‌ترین و لرزه‌خیزترین مناطق در جهان می‌باشد (نانکلی، ۲۰۱۱). ساختار اصلی زاگرس به صورت کمربند چین‌خورده خطی و نامتقارنی است، که با عرض ۳۰۰-۲۰۰ km در حدود ۱۵۰۰ km از شرق ترکیه تا تنگه هرمز امتداد دارد. گسل معکوس اصلی زاگرس[۱] (MZRF) کمربند کوهستانی زاگرس را از ایران مرکزی جدا می‌کند که یک ناپیوستگی ساختاری مهم می‌باشد(Stocklin, 1968). گسل جوان اصلی[۲] (MRF) با جهت NW-SE، مرز شمال شرقی کوههای زاگرس را تشکیل می‌دهد (Tchalenko and Braud, 1974) و گسل کازرون در زاگرس مرکزی واقع است.

سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که همگرایی بین صفحات عربستان و اوراسیا بیشتر در شاخه WNW گسل‌های راستگرد امتدادلغز شمال غرب ایران انجام می‌شود (Jackson, 1992) و به نظر می‌رسد که این گسل‌های امتدادلغز ادامه جنوب شرقی گسل آناتولین شمالی و دیگر گسل‌های راستگرد جنوب شرقی ترکیه‌اند (Jackson, 1992; Westaway, 1990; Westaway, 1994).

[۱] Main Zagros Reverse Fault
[۲] Main Recent Fault

به‌هرحال گسلش راستگرد در جنوب شرق ترکیه-شمال غرب ایران پیوسته نیست و شامل گسل‌های ناپیوسته مختلفی می‌باشد (Hessami et al., 2003).

اندازه گیری‌های GPS تغییر مکان راستگرد جانبی را در شمال غرب ایران نشان می‌دهد (Masson et al., 2006). گسل شمال تبریز یک گسل اصلی لرزه‌خیز و فعال در شمال غرب ایران است که دارای طولی در حدود ۱۵۰ km می‌باشد و به نظر می‌رسد دارای شیب تقریبا قائم است (بربریان و ارشدی، ۱۹۷۶). حرکت امتدادلغز راستگرد در طول این گسل به وسیله بربریان و ارشدی (۱۹۷۶)، از عکسهای هوایی مطالعه شده است و همچنین به وضوح به صورت میدانی قابل مشاهده است. دانستن رفتار لرزه‌ای این گسل برای مطالعه خطر لرزه‌ای شهر تبریز بسیار حیاتی و مهم است. مطالعه تاریخچه لرزه‌خیزی شمال غرب ایران، حکایت از رویداد زمین‌لرزه‌های ویرانگری دارد که بارها باعث ویرانی و تخریب شهرها و روستاهای این گستره شده است.

تشخیص نرخ لغزش گسل‌ها برای بدست آوردن رفتار تغییرشکل پوسته در زیر این مناطق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به دلیل اینکه نرخ لغزش گسل به طور مستقیم به زمان تکرار زمین-لرزه‌های ناشی از گسیختگی گسل مربوط می‌باشد. مطالعات GPS اخیر در ایران (توکلی و همکاران، ۲۰۰۷؛ حسامی و همکاران، ۲۰۰۶؛ جمور و همکاران، ۲۰۱۱ Vernant et al., 2004; Walpersdorf et al., 2006;)، داده‌های جدیدی را برای سینماتیک تغییرشکل، در محدوده ایران، منطقه زاگرس و شمال غرب ایران فراهم نموده است. اطلاعات GPS، رفتار شبه‌صلب را برای بلوک ایران مرکزی تایید می‌کنند که به نظر می‌رسد محدود به منطقه سنندج- سیرجان باشد.

تغییرشکل یک جسم به دلیل نیروهای وارده بر جسم حاصل می‌شود و این تغییرشکل را می‌توان با درنظرگرفتن چهار گروه از معادلات تعادل جسم، قوانین ساختاری ماده، شرایط مرزی و شرایط اولیه محاسبه نمود. مدل‌سازی این پدیده امکان بدست آوردن سازوکارهای مرتبط با تغییرشکل موردنظر را فراهم می‌آورد. مدل‌های عددی، کمکی برای توضیح پدیده‌های فیزیکی مانند تغییرشکل لیتوسفر می-باشند. شبیه‌سازی تغییرشکل یک محیط پیوسته، منجر به استفاده از معادلاتی می‌شود که به طور مستقیم قابل حل نمی‌باشند. به عنوان مثال، در طول تغییرشکل، پوسته زمین اغلب رفتار رئولوژیکی غیرخطی و پیچیده‌ای از خود بروز می‌دهد که حل آنها نیازمند به کارگیری روش‌های عددی است.

روش‌های عددی متعددی برای مدل‌نمودن تغییرشکل لیتوسفر وجود دارد که یکی از روش‌های عددی مناسب برای حل چنین مسائلی روش اجزاء محدود[۳] می‌باشد. تحلیل به روش اجزاء محدود یک ابزار محاسباتی بسیار قدرتمند و در واقع تکنیکی برای حل معادلات دیفرانسیل می‌باشد. این روش را می‌توان برای مدل‌سازی حرکت گسل و یا فرورانش یک لیتوسفر اقیانوسی در زیر یک لیتوسفر قاره‌ای به کار برد. گسسته‌سازی فضایی محیط موردنظر به روش اجزاء محدود که مرتبط با گسسته سازی زمانی می‌باشد امکان بدست آوردن طبیعت عددی از این معادلات غیرخطی و پیچیده را حاصل می-دهد، سپس آنها می‌توانند برنامه‌ریزی شوند و مدل‌سازی عددی تغییرشکل‌های بزرگ امکان‌پذیر شود. با استفاده از مدل‌سازی به روش اجزاء محدود، قادر به بررسی وابستگی مدل به پارامترهای فیزیکی بوده و نمایش چگونگی توزیع تنش در مدل و در هر مرحله‌ای از محاسبات، امکان‌پذیر است.

مدل‌های ارائه‌شده توسط جکسون و همکاران (۱۹۹۵) و ثبوتی و ارکانی (۱۹۹۶)، برای تغییرشکل ایران با استفاده از فرض پیوسته‌بودن تغییرشکل بوده است. جکسون و همکاران (۱۹۹۵)، با استفاده از مینیمم‌کردن نرخ کار در یک محیط پیوسته ویسکوز، میدان سرعت و تغییرشکل ایران را تحلیل نمود. ریلینگر و همکاران (۲۰۰۶)، مدل بلوکی را برای مقید نمودن حرکت صفحات، تغییرشکل‌های منطقه-ای در نواحی درون‌صفحه‌ای و نرخ‌لغزش گسل‌های اصلی ارائه نمود.

تحقیقات بسیار زیادی در زمینه مدل‌سازی عددی لیتوسفر به روش اجزاء محدود صورت گرفته است که در زیر به تعدادی از کارهای انجام‌گرفته در ایران اشاره می‌شود.

ورنانت و چری (۲۰۰۶)، با استفاده از روش اجزاء محدود، تغییرشکل ایران را مدل نموده‌اند و یک اصطکاک پائین (۰/۰۲) را برای گسل‌های ایران نتیجه گرفتند.

ورنانت و چری (۲۰۰۶)، با استفاده از مدلی دو بعدی به روش اجزاء محدود، برای زاگرس تأثیر پارامترهای انحراف همگرایی، استحکام گسل جوان اصلی و دیگر پارامترهای رئولوژیکی و حرارتی را بر روی تغییرشکل زاگرس بررسی نموده‌اند.

[۳] The finite element method

نانکلی (۲۰۱۱)، با استفاده از روش اجزاء محدود مدلی را برای گسل‌های زاگرس (گسل جوان اصلی، گسل کازرون و تراست اصلی زاگرس) ایجاد نموده و با انجام آزمایش‌هایی به این نتیجه رسیده است که گسل جوان اصلی و گسل کازرون، گسل‌هایی با اصطکاک پائین می‌باشند.

تاکنون ورنانت و همکاران (۲۰۰۶)، مدلی که با هر دو مشاهدات GPS و زمین‌شناسی تطابق داشته باشد را از ایران ارائه نموده‌اند، اما این مدل، قادر به توضیح سینماتیک شمال غرب ایران نبوده است. در این پایان‌نامه ابتدا آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای هندسی و رئولوژیکی یک گسل امتدادلغز انجام می‌شود. سپس به منظور مطالعه محلی شمال غرب ایران، مدلی سه بعدی با استفاده از مشاهدات GPS انجام‌شده توسط جمور و همکاران (۲۰۱۱)، ارائه می‌شود و در این مدل به بررسی تغییرشکل شمال غرب ایران و رفتار امتدادلغز گسل شمال تبریز پرداخته می‌شود. در انتها نیز به منظور مطالعه توام تغییرشکل شمال غرب ایران و منطقه زاگرس، از مدلی شامل گسل‌های زاگرس (گسل جوان اصلی، تراست اصلی زاگرس، گسل دهشیر، گسل کازرون)، گسل کاشان و گسل شمال تبریز استفاده شده است و در این مدل رفتار تغییرشکل شمال غرب ایران در سیستمی متشکل از گسل‌های مذکور بررسی می‌شود. در واقع با روشی معکوس، پارامترهای مناسب گرانروی و ضریب اصطکاک گسل شمال تبریز و ضریب اصطکاک مناسب برای مجموعه گسل‌ها در مدل محدوده زاگرس و شمال غرب ایران مورد بررسی قرار می‌گیرند.

مطالب و تحقیقات انجام‌شده در این پایان نامه در قالب ۶ فصل به شرح ذیل ارائه می‌شود:

فصل اول شامل مقدمه و اهداف این تحقیق می‌باشد.

فصل دوم شامل مفاهیم پایه آنالیز تغییرشکل، رئولوژی و نقش دما در تغییرشکل لیتوسفر می‌باشد. تئوری‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی، مانند تنسورهای تغییرشکل، قوانین کلی مکانیک محیط‌های پیوسته (قانون بقای جرم و قوانین تعادلی)، قوانین رفتاری (کشسان[۴]، گرانروی[۵] و شکننده[۶]) و روابط انتقال گرما در لیتوسفر، در این فصل بیان شده است.

[۴] Elastic
[۵] Viscous
[۶] Brittle