١٠٩٥٤

۸۷/۱/۱۰۳۸۲۶

**دانشکده کشاورزی**

**پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی**

# شبیه سازی برهمکنش تایر و خاک به روش اجزای محدود غیرخطی و ارزیابی آن بوسیله دستگاه آزمونگر تک چرخ در انباره خاک

**توسط**
**محمد معراجی**

۱۳۸۷ /۹/ ۲۳

**استاد راهنما:**
**دکتر سعادت کامگار**

**تیر ماه ۱۳۸۷**

۱۰۹۵۹۴

به نام خدا

# شبیه سازی برهمکنش تایر و خاک به روش اجزای محدود غیرخطی و ارزیابی آن بوسیله دستگاه آزمونگر تک چرخ در انبارهی خاک

**به وسیلهی:**

**محمد معراجی**

**پایان نامه**
**ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد**

**در رشتهی:**

**مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی**

**از دانشگاه شیراز**

**شیراز**

**جمهوری اسلامی ایران**

**ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی**

دکتر سعادت کامگار استادیار بخش مکانیک ماشینهای کشاورزی (رئیس کمیته).....

دکتر محمد لغوی دانشیار بخش مکانیک ماشینهای کشاورزی.....

دکتر مهرداد فرید استادیار بخش مهندسی مکانیک.....

دکتر مهدی کسرایی استادیار بخش مکانیک ماشینهای کشاورزی.....

**تیر ماه ۱۳۸۷**

تقدیم به عزیزانم

پدر، مادر

و همسرم

# سپاسگزاری

اکنون که به لطف پروردگار و دعای خیر دوستان این پایان نامه به اتمام رسیده است، به پاس حق شناسی لازم می‌دانم که مراتب قدر دانی و تشکر را از استاد راهنما جناب دکتر سعادت کامگار ابراز دارم که با راهنمایی‌های ارزنده‌ی خویش در طول تحقیق، در پیشبرد و تکامل این مقاله اینجانب را یاری نمودند. همچنین بسیار شایسته است که از اساتید مشاور محترم، آقایان دکتر محمد لغوی و دکتر مهدی کسرایی که در هر بار رجوع به ایشان با گشاده رویی تمام تجربیات خویش را در اختیارم قرار داده و با ارائه نظرات ارزشمندشان در جهت غنی‌تر ساختن این تحقیق یاریم نمودند، صمیمانه تشکر نمایم. همچنین از استاد مشاور جناب دکتر مهرداد فرید که از بخش مهندسی مکانیک دانشگاه شیراز صبورانه در انجام این تحقیق مرا راهنمایی نمودند تشکر ویژه دارم.

در اپنجا فرصت را غنیمت شمرده و از سایر اعضای هیات علمی بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی و بخش مهندسی مکانیک که در طول تحصیل از محضر ایشان استفاده کرده‌ام تشکر و قدردانی می‌کنم.

از تکنسین‌ها و کارکنان محترم بخش آقایان جمال مهارلویی، خیرا.. امیری و کاظم حجازی که با اینجانب نهایت همکاری را داشته‌اند تشکر می‌کنم.

از دوستان بزرگوار آقایان مهندس حسین اشرفی، محمد حسین قیصری، علی داورپناه، مهدی مرادی، رضا ناظم السادات، علی مهدوی و سایر عزیزانی که بنده را در مراحل مختلف این تحقیق یاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

در پایان از پدر، مادر و همسر عزیزم که دعای خیرشان بدرقه‌ی راهم بود کمال تشکر و قدر دانی را می‌نمایم.

توفیق الهی را برای خود و تمامی این عزیزان خواستارم.

# چکیده

## شبیه سازی برهمکنش تایر و خاک به روش اجزای محدود غیرخطی و ارزیابی آن بوسیله دستگاه آزمونگر تک چرخ در انباره‌ی خاک

به وسیله:

محمد معراجی

در این پژوهش مدل برهمکنشی جدیدی از تایر و خاک با نگاهی خاص به مدل اجزای محدود دو بعدی رشته‌های مقاوم تایر شبیه سازی شد. هدف در این مدل جدید، در مقایسه با سایر مدل‌های موجود، یافتن یک رابطه‌ی ریاضی برای کل تایر نبود، بلکه اجزای اصلی ساختار مکانیکی تایر مبنای کار قرار گرفته شد و نحوه‌ی مدل سازی الیاف مقاوم تایر به عنوان پیچیده‌ترین بخش مدل اجزای محدود دو بعدی با بیان جزئیات ارائه گردید. همچنین بازسازی مدل دیواره‌ی تایر به عنوان یک ماده‌ی ابرالاستیک (Hyperelastic) و مدل خاک نیز به عنوان یک ماده‌ی الاستوپلاستیک (Elastopelastic) مورد بررسی قرار گرفت. به منظور انجام یک شبیه سازی موثر، ضرایب مکانیکی خاک لومی-سیلتی به دقت اندازه‌گیری شدند. نتایج برنامه نویسی به زبان مطلب ۷ (MatLab7) نشان داد که تایر رادیال نسبت به تایر بایاس در شرایط یکسان بر روی خاک لومی-سیلتی دارای بازده کششی بالاتری بود. در زمانی که نیروی کشش خالص برای هر دو تایر یکسان بود، در تایر بایاس نسبت به تایر رادیال کاهش حرکت (لغزش) بیشتر اتفاق افتاد و نیروی کشش ناخالص نیز اندکی افزایش یافت. همچنین نتایج شبیه سازی و آزمایش‌ها نشان دادند که تایر رادیال نسبت به تایر بایاس بر روی خاک لومی-سیلتی در شرایط یکسان دارای مقاومت غلتشی کمتری بود. بر اساس نتایج شبیه سازی، تاثیر لغزش، فشار باد و سختی مکانیکی خاک بر روی بازده کششی به طور رضایت بخشی پیش بینی شد. نتایج شبیه سازی تایر-خاک که با نتایج آزمایش‌های عملی مقایسه شد، تأییدکننده‌ی قابلیت‌های این مدل سازی عددی می‌باشد.

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


**فصل اول: مقدمه** ..... ۱

**فصل دوم: مروری بر تحقیقات و پژوهش‌های انجام شده** ..... ۷

۲-۱- پیشینه‌ی پژوهش‌ها در زمینه‌ی شبیه سازی برهمکنش
مدل تایر- خاک ..... ۷
۲-۲- مدل‌های عددی ..... ۱۸
۲-۲-۱-کمینه نمودن انرژی پتانسیل ..... ۱۹
۲-۲-۲- روش کاهش خطای معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار ماده ..... ۲۱
۲-۲-۲-۱- روش نقاط تجمعی ..... ۲۱
۲-۲-۲-۲- روش زیر دامنه ..... ۲۱
۲-۲-۲-۳- روش حداقل مربعات ..... ۲۲
۳-۲-۲-۴- روش گالرکین ..... ۲۲
۲-۳- روش اجزای محدود ..... ۲۳
۲-۳-۱- مدل‌سازی ماده‌ی الاستیک غیر خطی به روش اجزای محدود ..... ۲۵
۲-۳-۲- مدل‌سازی لاستیک به عنوان یک ماده ابرالاستیک به روش
اجزای محدود ..... ۲۶
۲-۳-۲-۱- مدل نئو- هوکین ..... ۲۹
۲-۳-۲-۲- مدل مونی- رولین ..... ۲۹
۲-۳-۲-۳- محاسبه‌ی ثوابت مادی مونی- رولین ..... ۳۱
۲-۳-۲-۴- تحلیل برازش حداقل مربعات ..... ۳۲
۲-۳-۲-۵- بررسی پایداری مادی ..... ۳۳
۲-۳-۲-۶- مدل چند جمله‌ای ..... ۳۳

عنوان | صفحه


۲-۳-۲-۷- مدل اوگدن ..... ۳۴
۲-۳-۲-۸- مدل آرودا- بویس ..... ۳۵
۲-۳-۲-۹- مدل بلاتز-کو ..... ۳۶
۲-۴- مدل الاستوپلاستیک ..... ۳۷
۲-۴-۱- مدل‌سازی ماده‌ی پلاستیک مستقل از زمان ..... ۳۷
۲-۴-۲- منحنی تنش- کرنش و معیار تسلیم ..... ۳۸
۲-۴-۳- قانون جریان ..... ۳۹
۲-۴-۴- قانون سخت شوندگی ..... ۴۰
۲-۴-۵- نمو کرنش پلاستیک ..... ۴۰
۲-۴-۶- مدلهای منحنی تنش- کرنش ..... ۴۱
۲-۴-۶-۱- سخت شوندگی دو یا چند خطه‌ی همسانگرد ..... ۴۱
۲-۴-۶-۲- سخت شوندگی همسانگرد غیر خطی ..... ۴۲
۲-۴-۶-۳- سخت شوندگی دو خطه‌ی جنبشی ..... ۴۳
۲-۴-۶-۴- سخت شوندگی جنبشی چند خطه ..... ۴۳
۲-۴-۶-۵- سخت شوندگی جنبشی غیر خطی ..... ۴۴
۲-۴-۶-۶- پلاستیسیته‌ی غیر همسانگرد ناهمگن ..... ۴۵
۲-۴-۶-۷- تئوری تابع پتانسیل هیل ..... ۴۵
۲-۴-۶-۸- تئوری پتانسیل عمومی شده‌ی هیل ..... ۴۶
۲-۴-۶-۹- معیار دراکر- پراگر ..... ۴۸
۲-۴-۶-۱۰- مدل مادی چدن ..... ۵۰
۲-۴-۶-۱۱- معیار تسلیم در مدل مادی چدن ..... ۵۰
۲-۴-۶-۱۲- قانون جریان در مدل مادی چدن ..... ۵۱
۲-۴-۶-۱۳- سخت شوندگی در مدل مادی چدن ..... ۵۲
۲-۵- مدل‌های پلاستیسیته‌ی وابسته به زمان ..... ۵۲
۲-۵-۱- خزش ..... ۵۳
۲-۵-۲- مدل‌های مختلف معادلات خزش ..... ۵۷
۲-۵-۳- پلاستیسیته‌ی وابسته به زمان مدل پرزینا ..... ۵۸
۲-۵-۴- پلاستیسیته‌ی وابسته به زمان مدل پریس ..... ۵۸
۲-۵-۵- مدل آناند ..... ۵۹

**عنوان** **صفحه**


۲-۶- خطی سازی و مشتق امتدادی..... ۶۰
۲-۶-۱- روش نیوتن رافسون..... ۶۰
۲-۶-۲- حل کلی یک مسئله‌ی غیر خطی..... ۶۲
۲-۷- آنالیز تماس..... ۶۴
۲-۷-۱- تماس جسم انعطاف پذیر با جسم صلب..... ۶۵
۲-۷-۲- تماس دو جسم غیر صلب..... ۶۵
۲-۷-۲-۱- تماس گره با گره..... ۶۵
۲-۷-۲-۲- تماس نقطه به صفحه..... ۶۶
۲-۷-۲-۳- تماس سطح به سطح..... ۶۶

**فصل سوم : مواد و روش‌ها**..... ۶۷

۳-۱- بررسی مدل‌های اجزای محدود معرفی شده و انتخاب مدل مناسب
جهت مدل سازی برهم‌کنش تایر وخاک ..... ۶۷
۳-۱-۱- انتخاب مدل اجزای محدود تایر ..... ۶۷
۳-۱-۲- انتخاب مدل اجزای محدود خاک ..... ۶۸
۳-۱-۶- انتخاب الگوریتم تماس ..... ۶۸
۳-۲- الگوریتم مدل سازی خاک ..... ۶۹
۳-۳- الگوریتم مدل‌سازی ماده‌ی ابرالاستیک تایر ..... ۷۰
۳-۴- الگوریتم مدل‌سازی المان‌های با خواص کشش و فشار
غیرخطی در تایر ..... ۷۱
۳-۵- برنامه نویسی برهمکنش تایر و خاک در نرم افزار مطلب ..... ۷۳
۳-۵-۱- تایر ..... ۷۳
۳-۵-۱-۱- تقسیم بندی دامنه و ساخت المان ..... ۷۳
۳-۵-۱-۱-۱- تقسیم بندی دامنه‌ی آج تایر..... ۷۳
۳-۵-۱-۱-۲- ایجاد المان‌های میله‌ای واقع در پیشانی تایر..... ۷۶
۳-۵-۱-۲- ساخت ماتریس سختی در هر المان ..... ۷۷
۳-۵-۱-۲-۱- قسمت لاستیکی تایر ..... ۷۷
۳-۵-۱-۲-۲- رشته‌های تایر ..... ۷۹

عنوان | صفحه


۳-۵-۱-۳- سوار کردن ماتریسهای سختی هر المان و ایجاد ماتریس کل ... ۸۰
۳-۵-۲- خاک ..... ۸۱
۳-۵-۲-۱- تقسیم بندی دامنه و ساخت المان در خاک ..... ۸۱
۳-۵-۲-۲- سوار کردن ماتریسهای سختی هر المان و ایجاد ماتریس کل ... ۸۳
۳-۵-۳- اعمال شرایط مرزی مطابق با الگوریتم تماس ..... ۸۴
۳-۵-۴- حل معادلات ماتریسی ..... ۸۵
۳-۶- ویژگی‌های ساختمانی و ابعادی تایر ..... ۸۹
۳-۶-۱- ساختمان تایر ..... ۸۹
۳-۷- ابعاد تایر و میزان بار وارد بر تایر ..... ۹۰
۳-۸- فشار باد تایر ..... ۹۱
۳-۹- تایرهای مورد آزمایش ..... ۹۱
۳-۱۰- آزمایش‌های تایر و خاک ..... ۹۱
۳-۱۰-۱- آزمایش تایر توسط دستگاه آزمونگر تک چرخ ..... ۹۲
۳-۱۰-۱-۱- اندازه‌گیری سینماتیک تایر ..... ۹۲
۳-۱۰-۱-۲- نحوه‌ی اندازه گیری سرعت دورانی چرخ ..... ۹۲
۳-۱۰-۱-۳- نحوه‌ی اندازه‌گیری سرعت خطی چرخ ..... ۹۳
۳-۱۰-۱-۴- اندازه‌گیری نیروهای وارد بر تایر ..... ۹۴
۳-۱۱- اندازه‌گیری ضرایب خاک ..... ۹۵
۳-۱۱-۱- اندازه‌گیری چگالی و رطوبت خاک ..... ۹۵
۳-۱۱-۲- اندازه‌گیری ضرایب همچسبی و اصطکاک داخلی خاک ..... ۹۶
۳-۱۱-۳- اندازه‌گیری منحنی تنش کرنش خاک ..... ۹۷
۳-۱۲- اندازه‌گیری مقدار تراکم خاک بعد از عبور تایر ..... ۹۸
۳-۱۲-۱- دستگاه نفوذ سنج ثبات مدل SP-1000 ..... ۹۹
۳-۱۳- اندازه‌گیری مقادیر تغییر شکل تایر و خاک ..... ۱۰۲
۳-۱۴- محاسبه‌ی نظری برهمکنش تایر و خاک ..... ۱۰۳
۳-۱۴-۱- محاسبه‌ی لغزش تایر ..... ۱۰۳
۳-۱۴-۲- محاسبه‌ی برهمکنش تایر و خاک با استفاده از روابط نظری ..... ۱۰۳

عنوان | صفحه


**فصل چهارم: نتایج** ..... ۱۰۷

۴-۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک ..... ۱۰۷
۴-۱-۱- نتایج اندازه‌گیری مشخصات فیزیکی خاک ..... ۱۰۷
۴-۱-۲- نتایج اندازه‌گیری رفتار مکانیکی خاک ..... ۱۰۹
۴-۲- خصوصیات فیزیکی تایر ..... ۱۱۰
۴-۲-۱- نتایج تغییر شکل تایر تحت بار عمودی ..... ۱۱۰
۴-۳- نشست خاک ..... ۱۱۱
۴-۳-۱- نتایج اندازه‌گیری مقدار نشست خاک ..... ۱۱۱
۴-۳-۲- نتایج مدل سازی نشست خاک با روش اجزای محدود ..... ۱۱۲
۴-۴- تراکم خاک ..... ۱۱۳
۴-۴-۱- نتایج آزمایش تراکم خاک قبل و بعد از عبور تایر ..... ۱۱۳
۴-۴-۲- نتایج شبیه سازی تراکم خاک بعد از عبور تایر ..... ۱۱۳
۵-۵- نتایج آزمایش اندازه‌گیری سرعت تایرها ..... ۱۱۶
۵-۶- سرعت تایر در مدل شبیه سازی اجزای محدود ..... ۱۲۴
۵-۷- نتایج آزمایش اندازه‌گیری نیروهای وارد بر تایر ..... ۱۲۴
۵-۸- نتایج شبیه سازی نیروهای وارد بر تایر به روش اجزای محدود ..... ۱۲۸
۵-۹- نتایج شبیه سازی اجزای محدود برهمکنش تایر و خاک ..... ۱۳۲
۵-۹-۱- نتایج شبیه سازی برهمکنش تایر و خاک در لغزش بالاتر
به روش اجزای محدود ..... ۱۳۲
۵-۹-۲- نتایج شبیه‌سازی برهمکنش تایر و خاک در فشار باد بیشتر
با روش اجزای محدود ..... ۱۳۶
۵-۹-۳- نتایج شبیه سازی اجزای محدود برهمکنش تایر و خاک
در خاک سخت‌تر ..... ۱۴۰
۵-۱۰- نتیجه‌گیری ..... ۱۴۴
۴-۱۱- پیشنهادات ..... ۱۴۴

**فهرست منابع** ..... ۱۴۶

# فهرست جدول‌ها

**عنوان** **صفحه**


جدول ۱- معادلات خزشی ضمنی ..... ۵۷
جدول ۲- مشخصات اندازه‌گیری شده‌ی تایرها ..... ۹۱
جدول ۳- تجزیه بافت خاک مورد استفاده ..... ۱۰۸
جدول ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی چگالی خاک برای سه نمونه‌ی مجزا ..... ۱۰۹
جدول ۵- ضرایب همچسبی و اصطکاک داخلی خاک ..... ۱۰۹
جدول ۶- مقدار اندازه‌گیری شده‌ی تغییر شکل تایر ..... ۱۱۰
جدول ۷- مقدار نشست خاک ..... ۱۱۲
جدول ۸- مقادیر خطای شبیه سازی در نشست خاک ..... ۱۱۲

## فهرست شکل‌ها

**عنوان** **صفحه**


شکل (۱): نمونه‌هایی از توابع شکل مورد استفاده برای المان خطی i.j ..... ۲۴
شکل (۲): منحنی تنش-کرنش ماده‌ی الاستیک غیر خطی..... ۲۶
شکل (۳): تعیین منحنی مونی- رولین در حالات مختلف..... ۳۰
شکل (۴): آزمایش فشار و کشش یکسان تک محوره ..... ۳۱
شکل (۵): آزمایش فشار و کشش یکسان دو محوره..... ۳۲
شکل (۶): آزمایش فشار و کشش یکسان صفحه‌ای..... ۳۲
شکل (۷): حالات مختلف رفتار تنش- کرنش..... ۳۸
شکل (۸): سطوح تسلیم مختلف..... ۳۹
شکل (۹): تحول سطوح تسلیم ..... ۴۰
شکل (۱۰): نحوه‌ی محاسبه‌ی تسلیم لحظه‌ای در منحنی چند خطه‌ی
سخت شوندگی همسانگرد ..... ۴۲
شکل (۱۱): کار پلاستیک در بارگذاری تک محوره..... ۴۸
شکل (۱۲): سطح تسلیم در مدل‌های کولمب- مور و دراکر- پراگر..... ۴۹
شکل (۱۳): رفتار کششی و فشاری چدن..... ۵۰
شکل (۱۴): سطح تسلیم در حالت کشش و فشار چدن..... ۵۱
شکل (۱۵): نمودار کرنش خزشی نسبت به زمان تحت تنش ثابت..... ۵۳
شکل (۱۶): معادله غیر خطی با یک درجه‌ی آزادی..... ۶۱
شکل (۱۷): معادله‌ی یک درجه آزادی غیر خطی f(x)=0 و $F(\varepsilon)=0$ ..... ۶۲
شکل (۱۸): معادله‌ی دو درجه آزادی غیر خطی $f(x_1,x_2)$ و $F(\varepsilon)=0$ ..... ۶۳
شکل (۱۹): المان بندی آج تایر بصورت المان‌های مثلثی و نمای حجم پر شده
از هوا و رینگ صلب..... ۷۴

**عنوان** **صفحه**


شکل (۲۰): ایجاد ۳۶۱ گره حاصل از اجرای فرایند ساخت المان با دو لایه و تعداد ۱۷۹ گره در لایه اول ..... ۷۵
شکل (۲۱): ساختارهای سه تایی از مثلثها در هر لایه به صورت کاملاً یکسان تکرار می‌شوند ..... ۷۵
شکل (۲۲): رفتار تغییر شکل- نیرو در رشته‌های جانبی تایر ..... ۷۶
شکل (۲۳): نمایی از مختصات المان اصلی که از آن استفاده گردید ..... ۷۷
شکل (۲۴): آرایش گره‌های خاک و تایر ..... ۸۲
شکل (۲۵): ایجاد لایه‌ای المان‌ها درون چیدمان خاص گره‌ها ..... ۸۳
شکل (۲۶): حل مسئله با اعمال شرایط مرزی اولیه جابجایی در گره مینیمم تایر ..... ۸۴
شکل (۲۷): ساختار لایه‌ای تایر ..... ۹۰
شکل (۲۸): تصویر صفحه سوراخ دار ..... ۹۲
شکل (۲۹): تصویر خط کش شیار دار ..... ۹۳
شکل (۳۰): حسگرهای اندازه‌گیری نیروی کشش خالص ..... ۹۴
شکل (۳۱): حسگر اندازه‌گیری نیروی کشش ناخالص و ابعاد مکانیسم انتقال نیرو ..... ۹۵
شکل (۳۲): نحوه‌ی نمونه‌گیری از خاک ..... ۹۶
شکل (۳۳): نمونه خاک درون محفظه‌ی اندازه‌گیری برش خاک ..... ۹۶
شکل (۳۴): اعمال وزنه بر روی استوانه‌ی خاک ..... ۹۷
شکل (۳۵): اندازه‌گیری منحنی تنش کرنش خاک با استفاده از آزمون فشار تک محوری ..... ۹۸
شکل (۳۶): نمای کلی دستگاه نفوذ سنج مخروطی ..... ۱۰۱
شکل (۳۷): اندازه‌گیری تغییر شکل تایر و شعاع ایستایی بعد از بار گذاری ..... ۱۰۲
شکل (۳۸): اندازه‌گیری نشست خاک ..... ۱۰۲
شکل (۳۹): مثلث تعیین بافت خاک و جایگاه خاک مورد آزمایش ..... ۱۰۸
شکل (۴۰): تغییر شکل تایر رادیال که با استفاده از مدل سازی اجزای محدود تعیین شد ..... ۱۱۰
شکل (۴۱): مسیر عبور تایر بایاس بر روی خاک در انباره‌ی خاک ..... ۱۱۱
شکل (۴۲): نمودار فشار نفوذ مخروط نفوذسنج در خاک مورد آزمایش قبل و بعد از عبور تایر رادیال ..... ۱۱۴
شکل (۴۳): نمودار فشار نفوذ مخروط نفوذسنج در خاک مورد آزمایش قبل و بعد از عبور تایر بایاس ..... ۱۱۵

**عنوان** **صفحه**


شکل (۴۴): نمایش خطوط تراز تنش ایجاد شده درون خاک..... ۱۱۶
شکل (۴۵): سرعت تایر رادیال از زمان شروع تا انتهای مسیر ..... ۱۱۷
شکل (۴۶): سرعت تایر بایاس از زمان شروع تا انتهای مسیر..... ۱۱۸
شکل (۴۷): درصد لغزش تایرهای رادیال و بایاس از زمان شروع تا انتهای مسیر..... ۱۱۹
شکل (۴۸): سرعت تایر رادیال از زمان شروع تا انتهای مسیر ..... ۱۲۱
شکل (۴۹): سرعت تایر بایاس از زمان شروع تا انتهای مسیر..... ۱۲۲
شکل (۵۰): درصد لغزش تایرهای رادیال و بایاس از زمان شروع تا انتهای مسیر..... ۱۲۳
شکل (۵۱): نیروهای وارد بر تایر رادیال از زمان شروع تا انتهای مسیر..... ۱۲۵
شکل (۵۲): نیروهای وارد بر تایر بایاس از زمان شروع تا انتهای مسیر..... ۱۲۶
شکل (۵۳): بازده کشش تایرهای رادیال و بایاس از زمان شروع تا انتهای مسیر..... ۱۲۷
شکل (۵۴): نمودار نیروهای وارد بر تایر رادیال در حالت شبه استاتیک ..... ۱۲۹
شکل (۵۵): نمودار نیروهای وارد بر تایر بایاس در حالت شبه استاتیک..... ۱۳۰
شکل (۵۶): بازده کشش تایرهای رادیال و بایاس در حالت شبه استاتیک..... ۱۳۱
شکل (۵۷): برهمکنش نظری تایر رادیال و خاک در لغزش‌های مختلف..... ۱۳۲
شکل (۵۸): برهمکنش نظری تایر بایاس و خاک در لغزش‌های مختلف..... ۱۳۲
شکل (۵۹): نمودار نیروهای وارد بر تایر رادیال در حالت شبه استاتیک ..... ۱۳۳
شکل (۶۰): نمودار نیروهای وارد بر تایر بایاس در حالت شبه استاتیک..... ۱۳۴
شکل (۶۱): بازده کشش تایرهای رادیال و بایاس در حالت شبه استاتیک..... ۱۳۵
شکل (۶۲): برهمکنش نظری تایر رادیال و خاک در لغزش‌های مختلف..... ۱۳۶
شکل (۶۳): برهمکنش نظری تایر بایاس و خاک در لغزش‌های مختلف..... ۱۳۶
شکل (۶۴): نمودار نیروهای وارد بر تایر رادیال در حالت شبه استاتیک..... ۱۳۷
شکل (۶۵): نمودار نیروهای وارد بر تایر بایاس در حالت شبه استاتیک..... ۱۳۸
شکل (۶۶): بازده کشش تایرهای رادیال و بایاس در حالت شبه استاتیک..... ۱۳۹
شکل (۶۷): برهمکنش نظری تایر رادیال و خاک در لغزش‌های مختلف..... ۱۴۰
شکل (۶۸): برهمکنش نظری تایر بایاس و خاک در لغزش‌های مختلف..... ۱۴۰
شکل (۶۹): نمودار نیروهای وارد بر تایر رادیال در حالت شبه استاتیک..... ۱۴۱
شکل (۷۰): نمودار نیروهای وارد بر تایر بایاس در حالت شبه استاتیک..... ۱۴۲
شکل (۷۱): بازده کشش تایرهای رادیال و بایاس در حالت شبه استاتیک ..... ۱۴۳

# فصل اول

## مقدمه

مسئله بر هم‌کنش[1] تایر و خاک یکی از موضوعات مهم پژوهشی برای خودروسازان و محققین بخش مکانیک خاک می‌باشد [۵۹]. در گذشته تحقیقاتی در این زمینه صورت گرفته و بسته به اهداف مورد نیاز و فرض‌های ساده شونده‌ای مسئله برهمکنش تایر و خاک شبیه سازی شده و اغلب با تغییر پارامترهای موثر بر عملکرد شبیه سازی تا حدی خواسته‌های مورد نیاز بهینه شدند [۲۱ و۳۰]. بهینه سازی مسئله به این دلیل اهمیت دارد که روزانه میلیون‌ها خودرو داخل جاده‌ها و یا خارج از جاده در حرکت‌اند و تمام نیروهای وارد از طرف زمین به خودرو از طرف تایر به آن وارد می‌شود [۲۱و۳۰] و این تایر است که خودرو را حرکت داده و راننده را قادر به کنترل مسیر حرکت می‌نماید [۱۹]. از این رو بسته به انتظاراتی که از هر نوع خودرو می‌رود افزایش قابلیت‌های دینامیکی تایر که در مبحث خودروهای کشاورزی افزایش توان مالبندی[2] را به دنبال دارد و کاهش مصرف سوخت و افزایش بازده کششی[3] که از طریق کاهش مقاومت غلتشی[4] حاصل می‌شوند نمونه‌هایی از عملکرد مناسب برای یک تایر به حساب می‌آیند [۲۵]. البته باید توجه داشت که ممکن است تحقق همزمان همه عملکردهای مطلوب میسر نباشد اما پژوهشگران این بخش تلاش می‌کنند با توجه به شرایط حاکم بر مسئله بهینه‌ترین عملکرد را مدل کنند.

برای بررسی هر پدیده‌ای ابتدا باید مدلی ریاضی از رفتار آن را ایجاد کنیم تا بتوانیم آن را تجزیه و تحلیل و سپس بهینه سازی کنیم [۵۵]. به طور کلی سه روش برای این مدل سازی وجود دارد که به ترتیب عبارتند از روش تحلیلی دقیق[5]، روش تجربی[6] و روش عددی[7] [۵۷]. در حل دقیق محاسبه از طریق حل پارامتری معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسئله انجام می‌شود که به علت وجود پیچیدگی‌های زیاد، در مسئله برهمکنش تایر و خاک چندان توسعه پیدا نکرده است. شبیه سازی‌های تجربی تاکنون در این زمینه توسعه‌ی زیادی یافته‌اند اما مشکلات اصلی آنها را می‌توان پرهزینه و طولانی بودن مدت زمان انجام آنها دانست [۵۷]. در این میان روش‌های عددی که روش اجزای محدود[8] یکی از نمونه‌های آن می‌باشد به دلیل پیشرفتی که

---

1- Interaction
2- Drawbar power
3- Traction efficiency
4- Rolling resistance
5- Exact solution
6- Experimental method
7- Numerical solution
8- Finite element method

رایانه‌های شخصی در حل مسائل بزرگ ریاضی در زمان کوتاه داشته‌اند توانسته است توجه برخی محققین بخش مکانیک خاک را به خود جلب کند و آنان توانسته‌اند مدل‌های خوبی از برهمکنش تایر و خاک به روش اجزای محدود ارائه کنند.

از زمانی که روش اجزای محدود برای اولین بار توسط کلاف[1] [۷] در سال ۱۹۶۰ برای حل مسائل الاستیسیته[2] دو بعدی به کار گرفته شد تاکنون این روش پیشرفتهای زیادی داشته و تقریباً هر زمینه‌ای از علم که به نحوی با ریاضیات سر و کار داشته بهره‌ای از این روش عددی برده است. ویژگی خاص این روش آن است که قادر است جزئیات و پارامترهای بیشتری را برای مدل سازی در نظر بگیرد در صورتی که در روش تجربی افزایش پارامترها سبب افزایش هزینه و مدت زمان انجام آزمایش می‌شود [۵۷]. مدل سازی مسئله برهمکنش تایر و خاک از سه بخش تشکیل شده که عبارتند: از مدل سازی تایر، خاک و الگوریتم تماس[3] برای رسیدن به یک پاسخ قابل قبول باید به طور همزمان هر سه مورد را در نظر داشت.

مدل‌های تایر موجود که در مقاله‌های مختلف به سه شکل یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی یافت می‌شوند اغلب به این صورت است که مدل یک بعدی در مسائل دینامیک خودرو و ارتعاشات مربوط به حرکات عمودی خودرو مطرح می‌باشد [۲۷] و مدل‌های دو بعدی و سه بعدی در مسائل برهمکنش تایر و خاک به کار می‌روند. اخیراً با توسعه‌ی سخت‌افزاری رایانه‌های شخصی مدل سازی‌های سه بعدی نیز مورد توجه قرار گرفته شده به نحوی که با در نظر گرفتن همه پارامترهای موثر بر تایر، مدل‌های واقعی‌تر و دقیق‌تری ارائه شده است. متاسفانه علی‌رغم تلاش‌هایی که در سال‌های اخیر به مسئله مدل سازی برهمکنش تایر و سطح صلب انجام شده در زمینه‌ی تایر و خاک کارهای کمی ارائه شده است که شاید علت اصلی آن، طبیعت پیچیده‌ی ترکیبی[4] [۴۷و۳۳] ابرالاستیک[5] تایر [۲۴] و حل همزمان با رفتار غیر خطی[6] و تراکم پذیر[7] الاستوپلاستیک خاک باشد [۳۵]. ویژگی مسئله برهمکنش تایر و خاک این است که عملکرد تایر و رفتار خاک همزمان بررسی می‌شوند. بنابراین جهت بهینه سازی، پارامترهای عملکرد تایر و خاک هم زمان به کار گرفته می‌شوند که این امر موجب زمان‌بری زیاد خواهد شد. از این رو می‌باشد که بسیاری از محققین به منظور کاهش زمان حل مسئله، سعی در ساده سازی و کاهش پارامترها داشته‌اند. این ساده سازی‌ها در برخی موارد موجب کاهش دقت یا افزایش خطای مدل سازی می‌شود. ساده سازی‌ها بیشتر در مورد تایر به چشم می‌خورد زیرا غالباً ساختار پیچیده‌ی تایرهای سه بعدی به صورت دو بعدی مدل سازی می‌شوند. در این مدل‌ها تغییرات جابجایی و نیرویی در عرض تایر دیده نمی‌شوند [۱۸]. همچنین برای تغییرات عمودی نیز اتخاذ فرض‌های مناسب ضروری می‌باشد. در این پژوهش تایر به صورت دو بعدی

---

1- Clough
2- Elasticity
3- Contact algorithm
4- Composite
5- Hyper elastic
6- Nonlinear behavior
7- Elastoplastic compressible

مدل سازی شده که اگر فرض‌های اصلاح کننده در طی مدل سازی اتخاذ نشود این فرض منجر به پاسخ‌های نادرست خواهد شد. علت اصلی، وجود ساختار پیچیده‌ی سه بعدی تایر است زیرا تایر در راستای محور دوران خود ساختاری نایکنواخت دارد و این ساختار نایکنواخت با بافت ترکیبی ناهمگن[1] همراه بوده که فرض دو بعدی بودن تایر را غیر ممکن نشان می‌دهد. اتخاذ فرضهایی برای در نظر گرفتن فشار باد و ساختار ترکیبی تایر به شکل مناسبی مدل دو بعدی تایر را بهبود می‌دهد. تایر از چهار بخش اصلی تشکیل شده که عبارتند از آج[2]، حجم پر شده از هوا[3]، الیاف مستحکم درون تایر[4] و رینگ[5] که در مدل دو بعدی استفاده شده در این پژوهش آج تایر حذف و بخشهای پر شده از هوا و رشته‌های تایر به شکلی خاص در هم ادغام می‌شوند [۲۰]. باید توجه داشت که در شرایط واقعی که آج‌های تایر بر روی سطح خاک تماس پیدا می‌کنند بسیاری از مدل‌های عددی که با فرض پیوستگی[6] مواد شبیه‌سازی، بوجود آمده‌اند توانایی مدل سازی و حل معادلات در لبه‌های نوک تیز آج را ندارند [۳۷]. به همین دلیل است که غالب مدلهای عددی، تایر را بدون در نظر گرفتن آج مدل سازی کرده یا برای در نظر گرفتن آج، ضرایبی فرض کرده و این ضرایب را در مدل سازی دخالت می‌دهند. فرض صاف بودن آج تایر با توجه به انتشار مقالاتی که تاثیر آج تایر بر کشش را مطرح می‌کنند با واقعیت فاصله دارد و استفاده از ضرایبی برای در نظر گرفتن آج شاید تنها راه نزدیک شدن به نتیجه‌ای نسبتاً مناسب باشد [۱۸]. اگر خاک را با فرض غیر پیوسته و با روش اجزای گسسته[7] مدل سازی کنیم می‌توانیم آج تایر را نیز در نظر بگیریم [۳۷]. روش اجزای گسسته اخیراً در مبحث مواد گسسته و دانه‌ای پیشرفت زیادی کرده است اما به دلیل نیاز به دانه بندی ریز و المانهای زیاد زمان طولانی برای رسیدن به جواب نیاز دارد [۳۶]. روشی که برای مدل سازی خاک در این پایان‌نامه استفاده شده با فرض پیوسته بودن خاک انجام شده که این ساده سازی برای یک تایر بدون آج خطای ناچیزی به همراه داشته و علاوه بر این، کاهش قابل ملاحظه‌ای در زمان حل مسئله موجب شده است.

برخی از ضرایبی که برای تایر در نظر گرفته می‌شوند باید به صورت عملی آزمایش و تایید شوند چرا که ممکن است در شرایط واقعی ضرایب در نظر گرفته شده اندکی خطا داشته باشند. آزمایش‌های عملی برای ارزیابی تایر پیشرفت‌های زیادی داشته تا جایی که شرکت‌های بزرگ طراحی و ساخت خودرو را بر آن داشته تا به منظور ایمنی و ارتقای کیفیت تایرها آزمایش‌های زیادی را با هزینه‌های بالا انجام دهند. برخی از آزمایش‌ها به خواص دینامیکی تایر[8] مربوط

---

1- Heterogeneous
2- Tread
3- Air-filled volume
4- Carcass
5- Rim
6- Continuity
7- Discrete element method
8- Dynamic behavior

می‌شوند. باید توجه داشت که خصوصیات دینامیکی تایر نقش اصلی در ایجاد توان حرکت[۱]، نیروی گیزایی[۲] و ترمزی[۳] خودرو داشته و نیروی مورد نیاز برای هدایت مسیر حرکت خودرو را تامین می‌کند بنابراین بدیهی است که هزینه‌های گزافی به منظور آزمایش نیرویی، تغییر شکل، خستگی و همچنین تعیین ضرایب ارتعاشاتی تایر صرف شود [۳۲]. هم اکنون شرکت‌های بزرگی مانند شرکت کالسپن[۴]، شرکت تایر و لاستیک کوپر[۵]، شرکت آزمایش تایر و خودروی فورد[۶]، اتحادیه تولیدات کوئیک وی[۷]، موسسه تحقیقات الاستومر و تایر هاستری[۸]، سازمان تحقیقات میلیکن[۹]، شرکت سیستم‌های ام.تی.اس[۱۰]، مرکز آزمایش خودروی نوادا[۱۱] و .. در زمینه آزمایش تایر فعالیت می‌کنند که پارامترهای زیادی از قبیل سرعت‌های خطی[۱۲] و دورانی[۱۳] تایر، زاویه لغزش[۱۴] تایر، زاویه راستای[۱۵] تایر، نسبت لغزش[۱۶]، نیروهای عمودی[۱۷]، جانبی[۱۸] و طولی[۱۹] وارد بر تایر از طرف زمین، گشتاور محرک[۲۰] و گشتاور تنظیمی[۲۱] چرخ، فشار باد[۲۲] تایر و ... در آنجا انجام می‌شوند. برخی از مدل‌های تایر در شرایط تماس تایر بر روی سطح صلب، کاملاً تجربی بوده و با اندازه‌گیری ضرایبی از تایر مشخص می‌شوند که معروف‌ترین آنها مدل تجربی پجکا[۲۳] است. وی با اندازه‌گیری ۳۲ پارامتر از تایر و جایگذاری در یک رابطه‌ی نسبتاً پیچیده مدل دینامیکی جامعی را برای خودرو سازان معرفی کرد. از آن زمان تاکنون همه‌ی این پارامترها برای تایرهای مختلف در دانشگاه دلف[۲۴] و توسط دستگاه‌های دقیق اندازه‌گیری می‌شوند. این مدل‌های دقیق ارائه شده قادرند تغییر شکل و مقدار نیروی جانبی را نیز نشان دهند. اهمیت و لزوم وجود مدل دینامیکی خودروهای روی جاده به حدی بوده که مدل‌های دیگری که ترکیبی از روابط تئوری رفتار تایر و نتایج آزمایش‌های عملی می‌باشند نیز بوجود آمده‌اند. مدل‌های تئوری تجربی آلن[۲۵] و مدل نیک‌روش از این دسته‌اند. دقت این مدل‌ها به حدی است که در سیستم‌های ترمز ای.بی.اس[۲۶] به عنوان منطق ترمزگیری به کار می‌روند [۳۰].

متاسفانه دقت مدل‌های تایر و خاک که تاکنون ارائه شده‌اند با دقت مدل تایر و سطح صلب قابل مقایسه نیستند. علت وجود این عدم قطعیت‌ها در مدل‌های ارائه شده‌ی تایر و خاک پیچیده‌گی‌هایی است که ماهیت و ساختار خاص تایر و خاک از خود نشان می‌دهند. خاک نیز

---

1- Drive power
2- Tractive force
3- Braking force
4- Calspan corporation
5- Cooper tire & rubber company
6- Ford tire & vehicle testing
7- Kwik-way products inc.
8- Hasetri
9- Milliken research associates, Inc
10- MTS systems corporation
11- Nevada automotive test center
12- Road velocity
13- Wheel rpm
14- Slip angle
15- Inclination angle
16- Slip ratio
17- Normal load
18- Lateral force
19- Longitudinal force
20- Drive torque
21- Aligning torque
22- Tire pressure
23- Pacjeka
24- Delph university
25- Allen
26- ABS brake

رفتاری الاستیک پلاستیک از خود نشان می‌دهد. خاک در هنگامی که تنش اعمال شده به آن از تنش تسلیم کمتر باشد رفتار الاستیک از خود نشان می‌دهد ولی اگر تنش اعمالی بیشتر باشد رفتار ماده تغییر می‌کند و وارد مرحله‌ی پلاستیک شده و متناسب با تنش اعمالی سختی خاک نیز افزایش می‌یابد [۳۹]. وجود ناپیکنواختی‌ها در خاک موجب کاهش دقت و عدم قطعیت‌ها در نتایج حاصل شده می‌گردد. خاک به طور طبیعی ترکیبی از سه فاز مایع، جامد و گاز است که شامل سنگ‌های معدنی اولیه، کانی‌های رسی، سرامیک‌های دانه‌ای، مواد آلی، آب، نمک‌های غیر قابل حل، هوا، بخار آب و دیگر گازها است [۵۹]. وجود عناصر مختلف در خاک به شدت بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک تاثیر دارند و به همین دلیل تئوری‌های مختلفی برای خاک‌های با عناصر متفاوت در مکانیک محیط‌های پیوسته و همچنین در مسائل اجزای محدود ارائه شده که باید در انتخاب نوع مدل خاک و همینطور در انتخاب نوع تئوری گسیختگی[1] خاک دقت لازم صورت گیرد تا از صحت پاسخ‌های اجزای محدود اطمینان بیشتری حاصل شود. علاوه بر این فرض پیوستگی خاک که در روش اجزای محدود بکار می‌رود بر خلاف روش اجزای گسسته، توانایی تجزیه و تحلیل میکروسکوپیک[2] اجزای خاک را ندارد و صرفاً از دید ماکروسکوپیک[3] به خاک نگاه می‌کند. بنابراین ضرایبی که برای مدل اجزای محدود خاک نیاز می‌باشند منحصر به رفتار ماکروسکوپیک خاک می‌شوند و باید تحت آزمایش‌های مشخصی تعیین شوند. در مبحث برهمکنش تایر و خاک موضوع تراکم[4] خاک نیز مطرح می‌باشد. در برخی موارد کاهش تراکم خاک خواسته‌ی اصلی مدل سازی می‌باشد یعنی پژوهشگر تلاش می‌کند با تغییر دادن پارامترهای موثر بر تراکم خاک در شرایط بارگذاری یکسان پاسخی را با حداقل فشردگی خاک ایجاد کند [۵۹]. بدیهی است که در این شرایط انتخاب مدل اجزای محدود مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا مدل خاک باید توانایی سخت شدن در هنگام به هم فشردگی را داشته باشد. همچنین این مدل باید بتواند مقدار تراکم خاک در نقاط تماس و نواحی اطراف آن را بعد از عبور تایر از سطح خاک نشان دهد. از همه مهمتر مدل خاک باید همکاری مناسب با الگوریتم تماس داشته باشد زیرا در این مسئله که دو جسم با رفتار غیر خطی باهم تماس برقرار می‌کنند پیاده سازی الگوریتم تماس آنها دشوار است.

با وجود اینکه هم اکنون در روش اجزای محدود جهت مدل سازی اجسام با محیط پیوسته‌ی خطی دارای تماس، تئوری‌هایی ارائه شده است ولی در محیط غیرخطی محدودیت‌ها همچنان وجود دارند اما راه حل‌های پیچیده‌ای که به صورت الگوریتم بیان شده همچنان برای حل مسئله‌ی تماس دو جسم غیر خطی به کار می‌رود. در تماس دو جسم باید شرایط عدم نفوذ[5]

---

1- Yield criteria
2- Microscopic
3- Macroscopic
4- Compaction
5- Impenetrability