دانشگاه یزد
دانشکده مکانیک

پایان‌نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد

شناسایی پارامترهای دینامیک تماس
با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی

استاد راهنما:
دکتر سعید ابراهیمی

پژوهشگر:
غلامحسین لاری
۸۷۰۳۵۱۴

اسفند ۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

چکیده

در بسیاری از پدیده‌های روزمره با پدیده‌ی تماس مواجهیم. روش‌های گوناگونی برای محاسبه‌ی نیروی تماس و سرعت اجسام در حین تماس ارائه شده است. یکی از روش‌های ساده و کارآمد از بین روش‌های موجود, روش تماس ایجابی یا روش پنالتی است. در این روش فرض می‌شود سطح اجسام در حال تماس با المان‌های فنر و دمپر پوشیده شده است. اگر مقدار ضریب سختی فنر و میراگر, مقدار نفوذ و سرعت نفوذ اجسام در یکدیگر و همچنین نرخ غیر خطی بودن مقدار نفوذ و سرعت نفوذ مشخص باشد, نیروی تماس وسرعت اجسام پس از تماس به آسانی محاسبه می‌شود.

در این پروژه روشی نوین بر پایه‌ی شبکه‌های عصبی مصنوعی, برای محاسبه دو پارامتر ضریب میرایی و نرخ غیرخطی بودن مقدار نفوذ و سرعت نفوذ , که اصطلاحاً پارامترهای تماس نامیده می‌شوند, ارائه می‌شود.

با شبیه‌سازی تماس یک کره و میله در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مانند ANSYS Workbench و Visual Nastran, ۱۵۰ نمونه تولید شده و داده‌های مورد نظر استخراج می‌شود. در هرکدام از این نمونه‌ها چهار متغیر ورودی در نظر گرفته شده است. این متغیرها شامل شعاع کره, شعاع میله, طول میله و سرعت کره می‌شوند. درپایان ۱۴۰ نمونه برای آموزش شبکه و ۱۰ نمونه برای آزمودن شبکه انتخاب شده و شبکه ایجاد می‌شود.

فهرست عناوین

فصل اول – پیش‌گفتار

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ مروری اجمالی بر کارهای انجام شده در روش تماس ایجابی ۴

۱-۳ محاسبه‌ی پارامترهای تماس با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی ۶

فصل دوم - دینامیک تماس

۲-۱ مقدمه ۸

۲-۲ روش‌های محاسبه نیروی تماس ۱۱

۲-۲-۱ روش ضربه / اندازه حرکت ۱۱

۲-۲- ۲ روش ضرایب لاگرانژ ۱۵

۲-۲-۳ روش مسئله مکمل خطی ۱۶

۲-۲-۴ روش نقطه‌ی مجاور ۱۶

۲-۲-۵ روش اجزای محدود ۱۷

۲-۲-۶ روش مدل تماس چند ضلعی ۱۸

۲-۲-۷ روش تماس ایجابی عمودی ۲۰

۲-۳ تاریخچه‌ی روش تماس ایجابی عمودی ۲۱

۲-۴ مدل‌های نیروی مماسی – اصطکاکی ۳۶

فصل سوم - شبکه‌های عصبی مصنوعی

۳-۱ مقدمه ۴۳

۳-۲ حل ابتکاری مسائل ۴۴

۳-۳ شبکه‌های عصبی زیستی ۴۶

۳-۳-۱ عصب‌های زیستی ۴۶
۳-۳-۲ نمایش ریاضی نحوه‌ی کارکرد سلول های عصبی زیستی ۴۹
۳-۴ شبکه‌های عصبی مصنوعی ۵۲
۳-۴-۱ مشخصه‌های شبکه های عصبی مصنوعی ۵۲
۳-۴-۲ شبکه‌های انتشار به عقب ۶۵
۳-۵ تاریخچه‌ی شبکه های عصبی مصنوعی و کاربرد آن در روش تماس ایجابی ۶۸

فصل چهارم – حل مسئله

۴-۱ مقدمه ۷۳
۴-۲ معرفی مسئله‌ی مطرح شده در این پروژه ۷۳
۴-۳ حل مسئله‌ی مطرح شده ۷۵
۴-۳-۱ تعریف مسئله در نرم افزار ANSYS Workbench ۷۶
۴-۳-۲ تعریف مسئله در نرم افزار Visual Nastran ۸۶
۴-۳-۳ آموزش و آزمودن شبکه‌ی عصبی مصنوعی ۹۸

فصل پنجم – نتایج و پیشنهادات

۵-۱ بحث در نتایج ۱۱۲
۵-۲ پیشنهادات ۱۱۳

ضمائم

ضمیمه ۱ – نحوه‌ی استفاده از نرم افزار ANSYS Workbench ۱۱۵
ضمیمه ۲ – نحوه‌ی استفاده از نرم افزار Visual Nastran ۱۲۵
ضمیمه ۳ – نحوه‌ی استفاده از نرم افزار MATLAB ۱۳۱
مراجع ۱۴۱

فهرست اشکال

فصل دوم – دینامیک تماس

شکل ۲-۱ نمونه‌های تماس ۸

شکل ۲-۲ حالات مختلف ضریب بازگشت ۱۴

شکل ۲-۳ نواحی در مدل PCM ۲۰

شکل ۲-۴ تماس دو کره در مدل هرتز ۲۳

شکل ۲-۵ تماس چند نقطه‌ای ۲۵

شکل ۲-۶ الگوریتم محاسبه‌ی پارامترهای تماس ۲۷

شکل ۲-۷ تماس دو کره در مدل کلوین – ویت ۲۷

شکل ۲-۸ مدل ویسکوالاستیک غیرخطی در برخورد سرعت پایین ۳۰

شکل ۲-۹ مدل ویسکوالاستیک غیرخطی در برخورد سرعت بالا ۳۰

شکل ۲-۱۰ ضریب میرایی بر حسب ضریب بازگشت ۳۱

شکل ۲-۱۱ مدل نمودارهای مربوط به حل دوبوسکی و فرانشتین ۳۵

شکل ۲-۱۲ نمودار نیرو – عمق نفوذ برای تماس‌های کروی و استوانه‌ای ۳۷

شکل ۲-۱۳ تغییرات نیروی اصطکاک بر حسب سرعت نسبی ۳۸

شکل ۲-۱۴ تغییرات نیروی اصطکاک بر حسب سرعت نسبی ۴۰

شکل ۲-۱۵ المان‌های موی مانند

فصل سوم – شبکه‌های عصبی مصنوعی

شکل ۳-۱ ابتکار ۴۳

شکل ۳-۲ عصب زیستی ۴۵

شکل ۳-۳ ورودی و ثابت وزنی آن ۴۸
شکل ۳-۴ مجموع مقادیر در بدنه‌ی سلول ۴۸
شکل ۳-۵ بلوک دیاگرام مدل عصب‌های زیستی ۴۹
شکل ۳-۶ توپولوژی انواع شبکه‌ها ۵۲
شکل ۳-۷ محاسبه ورودی خالص ۵۴
شکل ۳-۸ توابع انتقال ۵۵
شکل ۳-۹ پرسپترون‌ها ۶۰
شکل ۳-۱۰ شبکه‌ی فیدفروارد ۶۲
شکل ۳-۱۱اگر j یک واحد خروجی نباشد, بر مجموعه‌ای از واحدهای خروجی اثر گذار است ۶۴
شکل ۳-۱۲ نتایج کار ون‌کاتارامان ۶۶
شکل ۳-۱۳ ربات دو درجه آزادی ۶۸

فصل چهارم – حل مسئله

شکل ۴-۱ نحوه‌ی تشخیص پارامترهای مطلوب ۷۲
شکل ۴-۲ هندسه‌ی تعریف شده در نرم افزار ANSYS Workbench ۷۳
شکل ۴-۳ نتایج آزمایش مرجع [۱۵] ۷۴
شکل ۴-۴ نتایج ANSYS Workbench ۷۵
شکل ۴-۵الف نمونه نمودار نیرو در ANSYS Workbench ۷۷
شکل ۴-۵ب نمونه نمودار سرعت بعد از تماس (سبز) و سرعت قبل از تماس (مشکی) میله ۷۷
شکل ۴-۵ج نمونه نمودار سرعت بعد از تماس (سبز) و سرعت قبل از تماس (مشکی)

کره ۷۷
شکل ۴-۶ نتایج نرم افزار Visual Nastran ۸۴
شکل ۴-۷ هندسه‌ی تعریف شده در Visual Nastran ۸۹
شکل ۴-۸ تغییرات توان نفوذ بر حسب شعاع کره برای سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه و طول میله ۱ متر ۹۰
شکل ۴-۹ تغییرات توان نفوذ بر حسب شعاع کره برای سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه و طول میله ۱ متر ۹۰
شکل ۴-۱۰ تغییرات توان نفوذ بر حسب شعاع کره برای سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه و طول میله ۱/۵ متر ۹۱
شکل ۴-۱۱ تغییرات توان نفوذ بر حسب شعاع کره برای سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه و طول میله ۱/۵ متر ۹۱
شکل ۴-۱۲ تغییرات توان نفوذ بر حسب شعاع کره برای سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه و طول میله ۲ متر ۹۲
شکل ۴-۱۳ تغییرات توان نفوذ بر حسب شعاع کره برای سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه و طول میله ۲ متر ۹۲
شکل ۴-۱۴ مقایسه‌ی تغییرات توان نفوذ بر حسب شعاع کره برای هر دو سرعت و طول میله ۱ متر ۹۳
شکل ۴-۱۵ مقایسه‌ی تغییرات توان نفوذ بر حسب شعاع کره برای هر دو سرعت و طول میله ۱/۵ متر ۹۳
شکل ۴-۱۶ مقایسه‌ی تغییرات توان نفوذ بر حسب شعاع کره برای هر دو سرعت و طول میله ۲ متر ۹۴
شکل ۴-۱۷ حد کارایی شبکه‌ی توان نفوذ ۹۶

شکل ۴-۱۸ رگرسیون شبکه‌ی توان نفوذ ۹۶
شکل ۴-۱۹ مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده‌ی توان نفوذ برای نمونه های آموزش ۹۷
شکل ۴-۲۰ خطای توان نفوذ برای نمونه های آموزش ۹۷
شکل ۴-۲۱ مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده‌ی توان نفوذ برای آزمودن شبکه ۹۹
شکل ۴-۲۲ خطای توان نفوذ برای آزمودن شبکه ۹۹
شکل ۴-۲۳ خطای ضریب میرایی درمرحله آموزش شبکه‌ی نامناسب ۱۰۰
شکل ۴-۲۴ خطای ضریب میرایی درمرحله آزمودن شبکه‌ی نامناسب ۱۰۰
شکل ۴-۲۵ حد کارایی شبکه‌ی ضریب میرایی ۱۰۱
شکل ۴-۲۶ رگرسیون شبکه‌ی ضریب میرایی ۱۰۲
شکل ۴-۲۷ مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده توسط شبکه برای ضریب میرایی در آموزش ۱۰۳
شکل ۴-۲۸ خطای شبکه‌ی محاسبه‌ی ضریب میرایی در مرحله‌ی آموزش ۱۰۳
شکل ۴-۲۹ مقایسه‌ی مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده‌ی ضریب میرایی مرحله‌ی آزمودن ۱۰۴
شکل ۴-۳۰ خطای مرحله‌ی آزمودن شبکه‌ی محاسبه‌ی ضریب میرایی ۱۰۵

ضمائم

شکل ض-۱ نحوه‌ی اجرای نرم افزار ANSYS Workbench ۱۱۰
شکل ض-۲ محیط نرم افزار ANSYS Workbench ۱۱۱
شکل ض-۳ ماژول Explicit Dynamics (ANSYS) ۱۱۱
شکل ض-۴ منوی Engineering Data ۱۱۲
شکل ض-۵ انتخاب واحد طول ۱۱۴

شکل ض-۶ منوی Details View ۱۱۴
شکل ض-۷ منویOutline در بخش Model ۱۱۵
شکل ض-۸ منوی Details در بخش Model ۱۱۵
شکل ض-۹ حالات مختلف انتخاب (جسم, صفحه, لبه و گوشه) ۱۱۶
شکل ض-۱۰ منوی Mesh Control ۱۱۷
شکل ض-۱۱ محیط نرم افزار Visual Nastran ۱۱۹
شکل ض-۱۲ بخش Properties در صفحه‌ی اصلی ۱۲۱
شکل ض-۱۳ تغییر تنظیمات تماس ۱۲۱
شکل ض-۱۴ تغییر تنظیمات تماس ۱۲۱
شکل ض-۱۵ محیط وارد کردن فرمول ۱۲۲
شکل ض-۱۶ تنظیمات Insert Slider ۱۲۳
شکل ض-۱۷ محیط Simulation settings ۱۲۴
شکل ض-۱۸ دکمه‌ی Run در نرم افزار Visual Nastran ۱۲۵
شکل ض-۱۹ Neural Network Toolbox ۱۲۵
شکل ض-۲۰ وارد کردن مقادیر ورودی و هدف ۱۲۶
شکل ض-۲۱ پنجره‌ی ساخت شبکه ۱۲۷
شکل ض-۲۲ شکل شبکه ۱۲۷

فهرست جداول

فصل سوم – شبکه‌های عصبی مصنوعی

جدول ۳-۱ کاربرد شبکه های مختلف ۶۱

جدول ۳-۲ نتایج آزمایش بوداک ۶۹

فصل چهارم – حل مسئله

جدول ۴-۱ جنس مواد استفاده شده در آزمایش واقعی ۷۴

جدول ۴-۲ مقایسه نتایج واقعی و نرم افزار ANSYS Workbench ۷۵

جدول ۴-۳ پارامترهای قابل تغییر در مسئله ۷۶

جدول ۴-۴ جنس مواد ۷۶

جدول ۴-۵ نتایج ANSYS Workbench در این پروژه ۸۲

جدول ۴-۶ مقایسه نتایج واقعی و نرم افزار Visual Nastran ۸۴

جدول ۴-۷ نتایج Visual Nastran در این پروژه ۸۹

جدول ۴-۸ مشخصات شبکه‌های استفاده شده ۹۵

جدول ۴-۹ نتایج آزمودن شبکه برای نمونه‌های جدید ۱۰۶

ضمائم

جدول ض-۱ منوهای ماژول Explicit Dynamics(ANSYS) ۱۱۲

جدول ض-۲ بخش‌های مختلف منوی Engineering Data ۱۱۲

جدول ض-۳ انواع مش‌بندی ۱۱۷

جدول ض-۴ پارامترهای زمان در حل مسئله ۱۱۸

جدول ض-۵ تعیین خصوصیات جسم در Visual Nastran ۱۲۰

جدول ض-۶ متغیرهای Insert Slider ۱۲۳
جدول ض-۷ متغیرهای Insert Slider ۱۲۴
جدول ض-۸ پارامترهای آموزش در Toolbox ۱۲۸
جدول ض-۹ عملکرد کدهای ساخت شبکه ۱۳۱

فصل اول – پیش‌گفتار

۱-۱ مقدمه

در اغلب سیستم‌ها حداقل دو جزء وجود دارد که بین آنها برهم‌کنش وجود دارد. تقابل بین این دو جزء را می توان به سه بخش تقسیم کرد [۱]:

- حرکت آزاد[1]
- حرکت حالت گذرا [2]
- حرکت مقید [3]

آنچه که در این کار مورد توجه است، حرکت حالت گذراست. حرکت از حالت آزاد به حالت مقید که ضربه نیز نامیده می شود دارای اثراتی است که در دو دسته قابل تقسیم است:

۱- اثری که باید با دقت بالا اندازه‌گیری شود مانند انتشار موج, ارتعاش سیستم و غیره. تحلیل به این شکل نیازمند بررسی مدلی پیوسته با جزئیات بالاست که در محدوده‌ی این کار نمی‌گنجد.

[1] Free motion phase
[2] Transition phase
[3] Constrained motion phase

۲- نوع دوم اثر کلی مانند نیروهای تماس است. در حین تماس نیروهایی به شکل آنی در سیستم ایجاد شده و محو می‌گردند. برای محاسبه این نیرو ها روش‌های متنوعی ارائه شده است که می توان آنها را در دو گروه کلی زیر تقسیم بندی کرد [۲]:

- روش گسسته
- روش پیوسته.

در روش اول معادلات ضربه و تماس برای زمان قبل از تماس و بعد از تماس نوشته می شود و ارتباط بین این معادلات توسط ضریب بازگشت بیان می شود. تعریف‌های متفاوتی برای ضریب بازگشت وجود دارد که این خود موجب تقسیم‌بندی دوباره این روش می‌شود. در واقع در این روش زمان تماس بسیار کوتاه و یا ناچیز در نظر گرفته می‌شود که یکی از محدودیت‌های این روش است و آن را اغلب محدود به تماس‌های صلب می‌کند. محدودیت دیگر این روش در مقدار ضریب بازگشت و نحوه محاسبه آن است [۳].

در روش پیوسته، گسستگی بین زمان پیش از تماس و پس از آن وجود ندارد و نیروی تماس به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود. روش تماس ایجابی[1] در این دسته قرار می‌گیرد.

در روش تماس ایجابی فرض می‌شود که سطوح اجسام با مجموعه‌ای از المان‌های فنر و دمپر پوشیده شده‌اند. درهنگام تماس اجسام و تشخیص نفوذ، نیروهای تماس به صورت حاصل‌جمع نیروهای المان‌های فنر و دمپر در نظر گرفته می‌شود. فنرها و دمپرها می توانند به شکل سری یا موازی در کنار یکدیگر قرار بگیرند که شکل رایج, موازی است. در این حالت فرض می شود اجسام اجازه نفوذ به درون یکدیگر را دارند. حال اگر این میزان نفوذ و نرخ تغییرات آن را داشته باشیم، مقدار نیروی تماس را به راحتی محاسبه می‌کنیم. اما یک مشکل در این میان وجود دارد: در این شبیه‌سازی مقدار ضرایب سختی فنرها و میرایی دمپرها به چه میزان باید باشد تا مقدار واقعی نیرو

[1] Compliance Contact Method

محاسبه شود؟ اگر مقدار ضریب سختی کم انتخاب شود, فنر در نظر گرفته شده ضعیف است و دو جسم به راحتی در یکدیگر نفوذ می‌کنند. از طرف دیگر اگر این مقدار زیاد در نظر گرفته شود، مقدار نیروهای تماس بسیار زیاد شده و عملاً مسأله به درستی حل نخواهد شد. علاوه بر این، مشکلات متعددی از لحاظ محاسبات عددی پیش می‌آید. همین سئوالات برای ضریب میرایی نیز به شکل پیچیده‌تری وجود دارد. رابطه‌ی نیرو و جابجایی، و یا نیرو و نرخ جابجایی به چه شکلی باید باشد: خطی یا غیر خطی؟ اگر این رابطه غیرخطی است, غیرخطی بودن نفوذ و نرخ نفوذ به چه شکل است؟ اگر جوابی به سئوالات فوق داده شود روش تماس ایجابی که محدودیت روش های گسسته را ندارد و از لحاظ زمانی نیز سریع تر از سایر روش هاست, روشی مطلوب است.

در این کار، هدف استفاده از نتایج آزمایش‌های موجود و انجام آزمایش‌های جدید و سپس استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی[1] برای شناسایی پارامترهای سختی, میرایی و توان نیروی مورد نیاز در روش تماس ایجابی است.

در این فصل به مرور اجمالی کارهای گذشته در این زمینه می‌پردازیم. کارهای گذشته را از دو منظر می‌توان بررسی کرد. ابتدا کارهایی که در آن ها صرفاً روابط ریاضی برای محاسبه پارامترهای تماس در روش تماس ایجابی ارائه شده است, معرفی می‌شود. سپس کارهایی را مرور می کنیم که در آن‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در کنار نتایج آزمایش‌ها و روابط ریاضی, پارامترهای روش تماس ایجابی محاسبه شده‌اند.

[1] Artificial Neural Networks

۲-۱ مروری اجمالی بر کارهای انجام شده در روش تماس ایجابی

در مرجع [۴] اساس روش تماس ایجابی بیان شده است. هرتز[1], در این کار با در نظر گرفتن یک فنر در سطح جسم, رابطه‌ای ساده را بیان کرده‌است که پس از آن دیگران با افزودن پارامترهایی به رابطه ی او و تکمیل کار او روش مورد بررسی را پیش برده‌اند.

برای رفع نقص موجود در روش هرتز, مرجع [۵] رابطه ی دیگری را برای محاسبه نیرو ارائه می دهد. در این کار فنر و دمپر به صورت سری و خطی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. در تحقیق [۶] فنر و دمپر به صورت موازی ولی خطی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند تا گامی در جهت بهبود روش هرتز برداشته شود. در کار انجام شده در [۷] با بهره‌گیری از معادلات مومنتوم رابطه‌ای برای محاسبه ضرایب روش تماس ایجابی ارائه شده در [۶] معرفی می‌شود. موضوع کار [۸] افزودن عبارت اصطکاک به رابطه‌ی بیان شده در [۶] برای محاسبه‌ی پارامترهای تماس است. در مرجع [۹] و [۱۰] با انجام آزمایش‌هایی, صحت رابطه‌ی ارائه شده در [۸] تایید شده است.

با وجود این که مدل خطی مشکل رابطه‌ی هرتز را برطرف کرد, اما به دلیل ماهیت خطی آن همچنان دارای کمبودهایی است. در پژوهش‌های انجام شده در [۱۱] با ارائه‌ی مدلی غیرخطی, گام هایی در جهت رفع مشکل فوق برداشته شده است. در این تحقیق دو رابطه برای تماس‌های با سرعت پایین و سرعت بالا ارائه می‌شود.

مرجع [۱۲] با در نظر گرفتن مدلی غیرخطی رابطه‌ای دیگر را برای تماس‌هایی که در آن ها ضریب بازگشت نزدیک به یک است ارائه می‌دهد.

آنچه مرجع [۱۳] به آن می پردازد, بیان رابطه‌ای برای محاسبه ضریب میرایی هیسترزیس[2] ارائه شده در مدل غیرخطی است. این رابطه در محدوده‌ی مشخصی از ضریب بازگشت جواب های قابل قبولی را به دست می دهد.

---

[1] Hertz
[2] Hystersis Damping Coefficient

تحقیق [۱۴] با تقریب سرعت و زمان به صورت یک چند جمله‌ای, مدل خطی متفاوتی را برای محاسبه نیروی تماس معرفی می کند.

در [۱۵] پژوهشگران با یک تقریب لگاریتمی برای سرعت‌های نسبی, رابطه ای دیگر را برای محاسبه نیروی تماس ارائه داده‌اند.

حاصل تحقیقات [۱۶] و [۱۷] رابطه‌ای ضمنی برای محاسبه‌ی ضریب میرایی است. در [۱۷] با بازنویسی معادله‌ی تماس, رابطه‌ای برای محاسبه‌ی ضریب میرایی هیسترزیس به دست آمده است. این رابطه کاربرد وسیع‌تری نسبت به رابطه‌ی رابطه‌ی بیان شده در [۱۲] دارد.

در [۱۸] مقایسه‌ی روش های مختلف از قبیل آنالیز مودی[1], روش اجزای محدود[2] و روش تماس ایجابی با انجام یک سری آزمایش‌ها انجام شده است. آزمایش مورد نظر تماس یک کره و یک میله به صورت طولی است. هدف از انجام این کار, محاسبه‌ی مقدار ضریب بازگشت برای برخوردهای متوالی است.

محققان برای تکمیل تحقیق خود در [۱۸], در مرجع[۱۹], آزمایش فوق را برای تماس عرضی کره و میله انجام می‌دهند.

روابط ارائه شده پیشین برای تماس سطوح کروی بیان شده‌اند. برخی از نویسندگان در [۲۰] با تغییر توان نیرو در روابط پیشین, همان روابط را برای سطوح استوانه‌ای پیشنهاد کرده‌اند.

تماس بین یک پین و سطح داخلی استوانه در مقاله‌ی [۲۱] و با کاربرد رابطه‌ی هرتز بیان می-شود.

در ESDU-78035 از مجموعه روغن‌کاری [۲۲] رابطه‌ای کاربردی برای تماس پین و استوانه بیان شده است.

[1] Modal Analysis
[2] Finite Element Method

در کارهای پیشین نیروی اصطکاک در لحظه‌ی تماس نادیده گرفته شده است. کارهای متفاوتی انجام شده‌است که در آن‌ها با در نظر گرفتن اصطکاک, روابطی برای محاسبه نیروی اصطکاک در لحظه ی تماس ارائه شده‌است.

مرجع [۲۳] رابطه‌ای را برای محاسبه‌ی نیروی اصطکاک در زمان تماس ارائه می‌دهد. نقطه ضعف این رابطه در بی نهایت شدن مقدار آن در سرعت‌های نسبی نزدیک به صفر است.

مرجع [۲۴] با تقسیم کردن زمان تماس به دو قسمت, دو رابطه‌ی متفاوت را برای محاسبه‌ی نیروی اصطکاک در زمان تماس ارائه داده و مشکل موجود در مرجع [۲۳] را تا حدودی برطرف کرده است.

در کارهایی جداگانه در [۲۵] و [۲۶] روابطی برای محاسبه نیروی اصطکاک بیان شده است. این روابط از لحاظ پایداری عددی و صحت نتایج نسبت به روابط گذشته جواب‌های بهتری دارد.

۱-۳ محاسبه ی پارامترهای تماس با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی

در قسمت قبل تحقیقاتی بررسی شدند که در آن ها روابطی برای مدل کردن نیروی تماس در روش تماس ایجابی به‌دست آمده‌اند. همچنین روش‌های محاسبه‌ی پارامترهای تماس و آزمایش های تعیین میزان صحت روابط پیشین بیان شدند. در این بخش به بررسی کارهایی می‌پردازیم که در آن ها با در نظر گرفتن یکی از روش های محاسبه‌ی پارامترهای تماس بیان شده در بخش قبل و انجام مجموعه ای از آزمایش‌ها و سپس استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی, پارامترهای تماس محاسبه می‌شوند. تعداد کارهای انجام شده در این زمینه به مراتب کمتر از کارهای انجام شده در بخش پیشین است.

محققان در [۲۷] با استفاده از مدل غیرخطی, پارامترهای تماس را برای یک ربات در محیط‌های ناشناخته محاسبه کردند. آن‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی, چهار پارامتر تماس را که

شامل ضریب میرایی, ضریب سختی, توان نفوذ و توان سرعت نفوذ می شود, با دقت مطلوبی به دست آوردند. هدف آن ها استفاده این پارامترها در محاسبات کنترلی ربات مورد نظر است.

در مرجع [۲۸] با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی, پارامترهای تماس در یک ربات دو درجه آزادی تعیین شده‌اند.

با توجه به مهم بودن اثر پارامترهای تماس در محاسبه‌ی توابع پاسخ فرکانسی[1] در ماشین‌های برش و ماشین‌کاری, در [۲۹] با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی, این پارامترها محاسبه می-شوند. دقت به دست آمده در این کار از روش‌های دیگر بیشتر و زمان محاسبه کمتر است.

در فصل آینده اصول کلی دینامیک تماس را بیان می‌کنیم. پس از آن به معرفی روش‌های مختلف محاسبه نیروی تماس می پردازیم و بحث را با تمرکز بیشتر بر روی روش تماس ایجابی ادامه می‌دهیم. پس از آن با مرور مفصل تاریخچه‌ی این روش فصل را به پایان می‌رسانیم.

در فصل سوم با هوش مصنوعی به صورت مختصر آشنا می‌شویم. پس از آن بحث شبکه‌های عصبی مصنوعی را به عنوان یکی از زیر شاخه‌های هوش مصنوعی دنبال می‌کنیم. پایان بخش این فصل نیز مروری بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در محاسبه‌ی پارامترهای دینامیک تماس و معرفی مفصل آن‌هاست.

در فصل چهارم روش ها و شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این پروژه معرفی می‌شود.

در فصل پنجم نتایج را بیان می‌کنیم. در این فصل همچنین پیشنهاداتی برای بهبود کار فعلی و پیشبرد آن در کارهای آینده بیان می شود.

با توجه به این که در انجام این پروژه از سه نرم افزار مختلف (دو نرم‌افزار برای تهیه‌ی نمونه و یک نرم‌افزار برای ساخت شبکه‌ی عصبی مصنوعی) استفاده شده است, در پایان نحوه‌ی استفاده از این نرم افزارها را در قالب سه ضمیمه بیان کرده و سپس مراجع را معرفی می کنیم.

[1] Frequency Response Functions