۱۳۷۸ /۴/ ۲۹

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
شعبه مدارک

دانشگاه تهران

دانشکده فنی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

۱

موضوع

بررسی حرکت محیط شکل‌پذیر در اثر اعمال جابجایی

استاد راهنما

دکتر شهرام وهدانی

۳۷۵۸/۲

تهیه‌کننده

شهرام تقوی اردکان

فهرست :

مقدمه .....

روش معمول جدا سازی حرکت و تغییر شکل ۱

لزوم تعیین نیروهایی که باعث تغییر شکل می‌شوند ۲

حل مشکلات فوق با روش حل حرکت ۵

مسائل مربوط به اعمال دورانهای بزرگ ۸

خلاصه سازی فرمول بندی دورانهای بزرگ ۹

فصل اول : تجزیه حرکت .....

اصول تجزیه حرکت ۱۳

فصل دوم : مبانی تئوریک در اجزاء محدود غیر خطی .....

مقدمه‌ای درفرمول بندی اجزاء محدود خطی ۲۵

مقدمه‌ای بر آنالیز غیر خطی : ۳۲

روش حل معادلات غیر خطی : ۴۲

معیارهای همگرایی ۴۷

حل معادلات تعادل در آنالیز دینامیکی ۵۱

مقدمه ۵۱

روشهای انتگرالگیری مستقیم ۵۱
آنالیز پایداری جواب ۵۹
آنالیز دقت ۶۴
فرمول بندی معادلات حرکت افزایشی محیطهای پیوسته ۶۶
مسئله اساسی ۶۶
تانسورهای تنش و کرنش ۷۱
فرمول‌بندی لاگرانژین کامل و به هنگام ۷۹
فرمول‌بندی ایزوپارامتریک ۸۹
فصل سوم : پیاده‌سازی فرمول‌بندی لاگرانژین روی المان خرپا .....
فرمول‌بندی المان خرپا ۹۲
فرمول‌بندی المان خرپای دو گرهی ۹۶
فصل چهارم : نرم‌افزار کامپیوتری ۱۰۷
فصل پنجم : مثالها ۱۲۰
نتیجه‌گیری ۱۴۴
پیشنهاد ۱۴۶

تقدیر و تشکر:

بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از زحمات بیدریغ و راهنماییهای ارزشمند جناب آقـای دکتر وهدانی که انجام این پایان نامه بدون آن مقدور نبود، ابراز می‌دارم.

شهرام تقوی – شهریور ۱۳۷۷

چکیده :

آنالیز محیطهای شکل‌پذیر همواره بـه صـورت درنظـر گرفتـن تغییـر مکـان نسـبی نقـاط محیـط بـه مرکـز جـرم آن بـوده اسـت و در نتیجـه در ایـن روشـها تغییـر مکانـهای بـزرگ از مسـئله حذف می‌شود. با اینکه این روش باعث سـادگـی مسـئله می‌شـود ولـی همیشـه کـاربرد نـدارد. یکی از موارد آن موقعی است که نیروی وارد بـر سیسـتم بـه طـور صریـح مشـخص نباشـد. بـه عبارت دیگر وقتـی بخواهیـم سیسـتمی را آنـالیز کنیـم کـه تحـت اثـر حرکتـهای مشـخصی در بعضی از نقاط آن قرار گرفتـه باشـد و نیروهـای معلومـی بـه آن وارد نشـوند، دیگـر نمی‌توانیـم حرکت نسبی نقاط نسبت به مرکز جـرم را در نظـر بگـیریم و بـاید از حرکـت کلـی نقـاط بـرای بدست آوردن مجهولات مسـئله اسـتفاده کنیـم. در ایـن حـالت کـه شـرایط مـرزی متحـرک در مسئله وجود دارد، نیروی وارد بر سیسـتم وابسـته بـه حـالت قـرارگـیری سیسـتم اسـت کـه بـا حذف حرکت مرکز جرم، نیروها به درسـتی محاسـبه نمی‌شـوند. در ایـن حـالت بـه ایـن علـت کـه سیسـتم هـر خرکـت دلخواهـی را در فضـای سـه بعـدی می‌توانـد داشـته باشـد، بـاید از الگوریتمی استفاده کنیم که تغییر مکانها و دورانـهای بـزرگ را شـامل شـود ولـی بـه توجـه بـه طبیعت مسئله‌ای کـه در ایـن پایـان نامـه بـه دنبـال حـل آن هسـتیم یعنـی حرکـت خـودرو در مسیر دلخواه، کرنشهای بـزرگ وارد مسـئله نمی‌شـوند. بـه همیـن علـت مسـئله مـورد نظـر مـا، سیسـتم غـیرخطی هندسـی می‌باشـد کـه بـرای اعمـال آن از فرمولبنـدی لاگرانژیـن بـهنگام بـه همراه الگوریتمهای حـل معـادلات غـیرخطی و دینـامیکی اسـتفاده شـده اسـت. فرمولبندی‌هـای فوق پس از سازگاری بـا یکدیگـر در برنامـه اجـزاء محـدودی گنجـانده شـده‌اند و ایـن برنامـه قادر است هر سیسـتم شـامل المانـهای خـرپـا، مـیراگـر و جـرم متمرکـز را بـا تعـداد درجـات آزادی زیاد و با اعمال نیرو یا مـرز متحـرک تحلیـل نمـاید.

مقدمه

ـ مقدمه

ـ روش معمول جدا سازی حرکت و تغییر شکل

همانطور که می‌دانیم وقتی یک جسم غیر صلب در حال حرکت باشد می‌توانیم حرکت را به صورت دو قسمت مجزا از هم تعریف و تقسیم کنیم، قسمت اول مود صلب حرکت می‌باشد، به این صورت که تمام جسم مورد مطالعه، رفتار مرکز جرم را به خود می‌گیرد و به صورت جسم صلبی که نیرویی به آن وارد شده است، تمام نقاط آن به صورت واحد حرکت می‌کنند. مثلاً وقتی یک جسم صلب را در یک جهت بکشیم تمام قسمتهای آن به یک صورت حرکت کرده و نیرویی در آن جسم ایجاد نمی‌شود، علت آن است که تغییر شکل وجود ندارد و هرچه هست تغییر مکان یا جابجایی است، و یا اینکه اگر آن را دوران دهیم، باز به این علت که تغییر شکلی در آن ایجاد نمی‌شود و فقط تغییر مکان به صورت دورانی وجود دارد نیرویی ناشی از تغییر شکل در جسم ایجاد نمی‌شود.

قسمت دوم حرکت مود غیر صلب یا انعطاف پذیر حرکت می‌باشد. به این صورت که در این مود مرکز جرم حرکتی ندارد و بقیه نقاط سازه حول مرکز جرم حرکت نوسانی انجام می‌دهند. یعنی اگر فرض کنیم که یک جسم انعطاف‌پذیر در حال حرکت باشد و اگر تغییر مکان مرکز جرم را از تغییر مکان بقیه نقاط کم کنیم به جسمی خواهیم رسید که مرکز جرم آن ثابت و نقاط دیگر یک حرکت نوسانی را انجام می‌دهند و دیگر حرکت انتقالی محیط وجود ندارد و هر چه هست ارتعاش و

نوسان است.

به طور مثال اگر یک خودرو را در نظر بگیریم که با سرعت ثابت در جاده‌ای در حال حرکت باشد که در اثر ناهموار بودن پروفیل جاده نیروهایی در خودرو بوجود می‌آید. اگر بخواهیم این ماشین را آنالیز کنیم می‌توانیم از حرکت رو به جلوی آن صرف نظر کنیم چرا که وقتی یک ماشین با سرعت ثابت در حال حرکت است نیرویی در آن بوجود نمی‌آید البته نوسان قطعات مختلف ماشین وجود خواهد داشت که فرض می‌کنیم پس از مدتی میرا شوند. در اینجا هدف تعیین نیروهای داخلی خودرو بر اثر حرکت قائم چرخ‌ها به علت وجود دست‌انداز و ناهمواری در جاده است، به همین دلیل حذف حرکت افقی و رو به جلوی خودرو اشکالی در حل مسئله ایجاد نمی‌کند و در نظر گرفتن حرکت قائم تنها می‌تواند جواب مسئله را بدرستی برای ما حاصل کند.

ـ لزوم تعیین نیروهایی که باعث تغییر شکل می‌شوند

همانطور که در قسمت قبل گفته شد برای حالت خاص حرکت با سرعت ثابت و جهت ثابت می‌توانیم از حرکت کلی جسم صرف نظر کنیم و مسئله را با نوسانهای قائم وارد به چرخ حل کنیم. در اینجا لازم نیست نیرویی را به جسم وارد کنیم و فقط حرکت قائم چرخ ها به خودرو وارد می‌شوند و مسئله بطور کامل و صحیح حل خواهد شد.

حال می‌خواهیم حالتی را در نظر بگیریم که هدف آنالیز وسیله‌ای است که سرعت آن از مقدار مشخص، ناگهان به صفر می‌رسد یعنی می‌خواهیم بدانیم اگر یک ماشین ترمز کند چه نیروهایی در اجزاء مختلف آن ایجاد می‌شود. در اینجا اگر بخواهیم حرکت مود صلب جسم را در نظر نگیریم به مشکلی بر می‌خوریم که در حالت قبل با آن مواجه نبودیم. چرا که در حالت قبل نیروهای ایجاد شده در اثر حرکت قائم چرخ‌ها به وجود می‌آمدند ولی این بار تغییر سرعت افقی ماشین باعث ایجاد نیرو در بخش‌های مختلف آن می‌شود.

اگر بخواهیم مانند حالت قبل عمل نمائیم باید حرکتی را که باعث ایجاد نیرو در جسم می‌شود به محیط که در مثال ما همان ماشین است اعمال کنیم. فرق این مثال با مثال قبل در اینجاست که قبلاً یک حرکت نوسانی را اعمال می‌کردیم ولی در اینجا یک حرکت کلی و غیر نوسانی است پس مشخص است که نمی‌توانیم مرکز جرم وسیله را ثابت نگه‌داریم و حرکتی بزرگ را به آن اعمال کنیم. در نتیجه باید حرکت کلی جسم را در نظر بگیریم و به جسم اجازه حرکت بدهیم.

ولی اگر نخواهیم این کار را انجام دهیم باید به طریقی نیروی معادلی را که در اثر این گونه حرکت در المانهای مختلف ماشین اعمال می‌شود را محاسبه کنیم و آن را به ماشین اعمال کنیم مثلاً اگر شتاب ماشین مشخص باشد براساس جرم کل ماشین نیرو را بدست آورده و به مرکز جرم آن وارد کنیم و یا اگر بخواهیم دقت کار را افزایش دهیم باید برای هر المان به صورت مجزا نیروی وارده را حساب

می‌کنیم ولی مشکل اینجاست که تمام قسمت‌های ماشین شتاب کلی را ندارند و این کار نیز نمی‌تواند در بدست آوردن جواب مناسب مسئله به ما کمک کند. همچنین به نظر می‌رسد وقتی یک ماشین ترمز کند نیرو به تدریج از پایین به بالا منتقل می‌شود و نباید در یک لحظه به تمام اجزاء ماشین نیرو وارد کرد. حال اگر فرض کنیم که توسط روش خاصی بتوانیم نیروهای وارد بر تک تک المانها را به طور دقیق محاسبه کنیم باز مشکلی که وجود دارد این است که اگر تعداد المانهای تشکیل دهنده مدل ریاضی یک ماشین زیاد باشد واضح خواهد بود که چه کار دشواری خواهد بود که بیاییم تک تک نیروها را به ماشین وارد کنیم.

پس واضح است که اگر نخواهیم دو قسمت حرکت را از هم جدا کنیم و هر حرکتی را بتوانیم به صورت خود حرکت و نه به شکل نیروی معادل به جسم اعمال کنیم به چه میزان کار ساده‌تر، سریع‌تر و کم هزینه‌تر و از همه مهمتر دقیق‌تر خواهد شد.

حال مثالی را در نظر بگیریم که یک ماشین در حال حرکت روی یک مسیر منحنی‌الخط باشد. باز هم به مشکلاتی که در بالا به آن اشاره شد و با آن مواجه بودیم برخواهیم خورد و شاید هم پیچیده‌تر.

در اینجا نیروهایی که در سازه ماشین بوجود می‌آیند ناشی از نیروی جانب مرکزی است که بر اثر حرکت در مسیر منحنی‌الخط ماشین بوجود می‌آید. در اینجا می‌توانیم به عنوان ساده‌ترین کار از حرکت ماشین صرف نظر کنیم و نیرویی که در

اثر حرکت بوجود می‌آید محاسبه کرده و به ماشین وارد کنیم و یا اگر بخواهیم دقیقتر کار کنیم مانند قبل جرم قسمتهای مختلف ماشین را جداگانه حساب کرده و به صورت مجزا به آنها نیرو وارد کنیم، که باز اشکالات ذکر شده در قسمت‌های قبل را دارا خواهد بود.

مسائلی که در بالا مطرح شدند همگی از جمله آنالیزهای لازم برای محاسبه و طراحی یک وسیله متحرک به شمار می‌روند، که باید در تمام کارخانه‌ها و مراکز تحقیقاتی مرتبط با اتومبیل انجام شوند.

ـ حل مشکلات فوق با روش حل حرکت

در این پروژه هدف بر این است که آنالیز یک جسم متحرک که خودرو نیز مثالی از آن می‌باشد توسط یک برنامه اجزاء محدود حل شود تا این مشکل که حالت خاص معادلات باعث شود که برای هر آنالیز بخصوص از ابتدا تمام کارها انجام شود برطرف گردد و همچنین مسائلی که در قسمت‌های قبل به آنها اشاره شد مانند مجهول بودن نیروی وارد بر جسم و دیگر مسائل ذکر شده رفع گردند.

این مسئله برای افرادی که دست‌اندرکار آنالیز خودرو هستند بسیار مطلوب می‌باشد چرا که به نظر نمی‌رسد خودرویی که با ۱۶ درجه آزادی مدل شده باشد بتواند جواب‌های مناسبی را در اختیار مهندس طراح قرار دهند. لازم به ذکر است در تحقیقات به عمل آمده دیده شد که کاملترین مدل خودرو که در یکی از مراکز

مهم تحقیقاتی خودرو در حال آنالیز می‌باشد یک ماشین با ۱۶ درجه آزادی می‌باشد. هدف اصلی حل توام دو قسمت حرکت یعنی قسمت نوسانی و حرکت صلب می‌باشد بطوریکه یک جسم را در جای خود نگه نداریم و فقط بخواهیم حرکت ارتعاشی آن را مورد بررسی قرار دهیم. بلکه حرکت را در حالت کلی در نظر بگیریم و به مدل اجازه حرکت بدهیم، بدیهی است که وقتی حل کلی‌تر و کاملتر و با فرضیات محدود کننده و ساده کننده کمتری باشد جواب‌ها بهتر و دقیقتر خواهد بود. می‌دانیم که حرکت صلب در جسم تغییر شکل ایجاد نکرده و در نتیجه باعث ایجاد نیرویی در سازه نخواهد شد و در نهایت همان نوسانات و ارتعاشات هستند که باعث تغییر شکل و در نتیجه ایجاد نیرو در سازه خواهند شد. کاری که در این پروژه انجام شده است در نظر گرفتن تغییر مکان‌های بزرگ است. همانطور که گفتیم ما می‌خواستیم هرچه کمتر فرضیات محدود کننده را به سازه اعمال کنیم در نتیجه برنامه‌ای برای حل حرکت کلی سازه در نظر داشتیم.

برای تأمین این هدف ناچار هستیم که حرکت را به صورت دلخواه در نظر بگیریم. یعنی اینکه این امکان برای سازه وجود داشته باشد که بتواند در فضا دوران کند و فقط مجبور نباشد که در یک مسیر مستقیم و یا در محدوده دوران‌های کوچک حرکت کند. بنابراین مجبور خواهیم بود که الگوریتمی را پیاده کنیم که بتواند علاوه بر حل مربوط به تغییر مکان‌های بزرگ، دورانهای بزرگ را هم جوابگو باشد. قدم بعدی در شکل‌گیری برنامه، اضافه کردن الگوریتمی است که

بتواند علاوه بر حل سازه تحت اثر نیرو، حرکت نقاط مختلف سازه را به صورت عامل حرکت قبول نماید به صورتی که لازم نباشد برای حل سازه‌ای نیروهای وارد بر آن مشخص باشد بلکه بتواند تغییر مکان نقاط مختلف را به صورت ورودی دریافت کند و عکس‌العمل سازه را که با گذشت زمان، حرکت‌های پیش فرض نیز تغییر می‌کنند محاسبه کند. با کامل شدن مراحل فوق قادر خواهیم بود با این نرم‌افزار یک سازه را در فضای سه بعدی که شامل المان فنر و میراگر باشد چه تحت اثر نیرو و چه تحت اثر تغییر مکانهای متغیر یا زمان و به صورت مشخص حل نماییم.

بدیهی است که نمونه خودرو نیز می‌تواند یکی از مثالهای قابل حل با این برنامه باشد. یعنی بتوان یک ماشین را از روی دست‌انداز عبور داد، سرعت آن را متغیر فرض کرد و مثلاً تحت اثر ترمز، عکس‌العمل سازه را بررسی کرد و یا اینکه آن را در اثر حرکت در مسیر منحنی‌الخط مورد آنالیز قرار داد و از فرضیات ساده کننده و گاه اشتباه که در قسمت‌های قبل به آنها اشاره کردیم استفاده نکرد. در قسمت بعد به مواردی که در مدل سازی موارد فوق‌الذکر به آنها برخورد پیدا خواهیم کرد، اشاره می‌کنیم.

ـ مسائل مربوط به اعمال دورانهای بزرگ

بطوریکه در قسمت قبل اشاره شد به این نتیجه رسیدیم برای آنکه بتوانیم یک سازه را با کمترین محدودیت در فضا حرکت بدهیم باید الگوریتمی را پیاده سازی کنیم که بتواند دورانهای بزرگ را جوابگو باشد. اگر بخواهیم مسئله را بدون در نظر گرفتن دورانهای بزرگ حل کنیم در محدوده یک حل غیر خطی خواهیم بود. در اینجا لازم است توضیح دهیم که اگر بخواهیم برای حل سازه‌ای از محدوده خطی خارج شویم دو علت وجود خواهد داشت.

اول اینکه مصالح مصرفی در سازه از حالت الاستیک خارج شوند و به محدوده پلاستیک وارد شوند، یعنی مسئله غیر خطی مادی خواهد بود.

حالت دوم مربوط به غیر خطی هندسی می‌باشد. یعنی مصالح در حد ارتجاعی باقی خواهند ماند ولی هندسه سازه به صورت اولیه خود باقی نخواهد ماند. اگر هندسه و حالت جسم باگذشت زمان تغییر نماید آنگاه مسئله غیر خطی هندسی خواهد شد.

در حل مسائل غیر خطی چه از نوع غیر خطی مادی و چه از نوع غیر خطی هندسی باشد نیاز به یک روش حل گام به گام خواهیم داشت. علت امر این است که وقتی در مسائل خطی سازه‌ای را حل می‌کنیم تغییر موقعیت سازه بعد از تغییر شکل به حدی نیست که بتواند حل ما را دچار تغییر کند و بگونه‌ای باشد که تغییرات در خصوصیات سازه به حدی باشد که بین نیروهای داخلی و خارجی

تعادل ایجاد نشود ولی در حل غیر خطی وضع به گونه دیگری است. چرا که اگر فرض کنیم موقعیت سازه در زمان t معلوم باشد و بخواهیم در یک گام زمانی Δt موقعیت را در زمان $t+\Delta t$ بدست آوریم پس از اولین حل چون نمی‌توان از تغییر هندسه سازه صرف نظر کرد دیگر تعادل بین نیروهای خارجی و داخلی بر قرار نخواهد بود و به همین دلیل باید حل را تکرار کنیم و این حل تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تعادل بین نیروهای اعمال شده خارجی و نیروهای بوجود آمده داخلی ایجاد شود.

بنابراین مشاهده می‌شود که حل مسئله وقت بیشتری را نسبت به حالت خطی صرف خواهد کرد در نتیجه ما باید بتوانیم تا آنجا که ممکن است مسئله را بطوریکه از دقت لازم آن کاسته نشود ساده کنیم تا اینکه مسئله دقت که یکی از مهمترین مسائل در حل عددی می‌باشد در حین کاهش زمان اجرای برنامه، در حد قابل قبولی باقی بماند.

در قسمت بعد به این نکته بیشتر خواهیم پرداخت.

ـ خلاصه سازی فرمول بندی دورانهای بزرگ

در قسمت قبل درباره ضرورت استفاده از یکی از الگوریتمهایی که بتواند دورانهای بزرگ را جوابگو باشد صحبت کردیم. همانطور که گفتیم برای یک آنالیز جسم متحرک در فضا باید دورانهای بزرگ را که یکی از نیازهای حرکت کلی