بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی

گروه عمران

(گرایش سازه)

تحلیل عددی خمش الاستو پلاستیک ورق های میندلین چند لایه

از

اکرم پراینده شهرستانی

استاد راهنما

دکتر نصرت الله فلاح

بهمن ۱۳۹۱

تقدیم به پدر مهربان و مادر دلسوزم

آنان که همواره دست ها و دل هایشان پشتوانه زندگیم

ودعاهایشان تکیه گاه تلاش هایم بوده وهست.

تقدیر و تشکر

در ابتدا از استاد ارجمند جناب آقای دکتر فلاح، که مجموعه حاضر با راهنمایی ها و نظارت ایشان به پایان رسید کمال تشکر را دارم. همچنین وظیفه خود می دانم مراتب سپاس و امتنان خویش را از اساتید گرانقدرکه در طی دوران تحصیل ازمحضر علمی شان کسب فیض نمودم، ابراز نمایم. توفیق این سروران عزیز را در راه اعتلای روز افزون علم و دانش ، از خداوند متعال خواستارم.

در پایان از زحمات و دلسوزی‌های همسر مهربانم که همیشه مشوق و حامی بنده در طول دوره تحصیل و لحظه لحظه زندگی بوده‌است کمال قدردانی و تشکر را دارم.

فهرست مطالب

عنوان ..... الف
تقدیم ..... ب
تقدیر و تشکر ..... پ
فهرست مطالب ..... ت
فهرست شکل‌ها ..... چ
فهرست جداول ..... ذ
چکیده فارسی ..... ر
چکیده انگلیسی ..... ز
فصل اول: مقدمه ۲
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- اهداف انجام پایان نامه ۲
۱-۳- ساختار پایان نامه ۳
فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته ۵
۲-۱- مقدمه ۵
۲-۲- تاریخچه تئوری صفحات ۵
۲-۳- انواع روش های تحلیل صفحه و معرفی روش احجام محدود ۶
۲-۴- تاریخچه روش احجام محدود ۸
فصل سوم: تحلیل خمش الاستیک و الاستوپلاستیک تیر تیموشنکو تک لایه و چند لایه ۱۱
۳-۱- مقدمه ۱۱
۳-۲- فرضیات تیر تیموشنکو ۱۱
۳-۲-۱- روابط تنش- کرنش ۱۲
۳-۲-۲-روابط کرنش- تغییر مکان ۱۳
۳-۳-استخراج روابط مبتنی بر روش احجام محدود در تحلیل الاستیک تیر تیموشنکو ۱۴
۳-۳-۱-شرایط مرزی ۱۶
۳-۴-مثال های عددی ۱۷
۳-۴-۱- مثال اول ۱۷

۳-۴-۲- مثال دوم ۲۰
۳-۴-۳- مثال سوم ۲۱
۳-۴-۴- مثال چهارم ۲۲
۳-۵- رفتار الاستو پلاستیک مواد ۲۳
۳-۶-تنش الاستوپلاستیک مواد ۲۴
۳-۷-تحلیل خمش الاستو پلاستیک تیر تیموشنکو تک لایه ۲۶
۳-۸-تحلیل خمش الاستو پلاستیک تیر تیموشنکو چند لایه ۲۶
۳-۹- مثال های عددی ۲۸
۳-۹-۱- مثال اول ۲۸
۳-۹-۲- مثال دوم ۳۰
۳-۹-۳- مثال سوم ۳۲
۳-۹-۴- مثال چهارم ۳۳
۳-۹-۵- مثال پنجم ۳۵
فصل چهارم: تحلیل خمش الاستیک والاستوپلاستیک ورق میندلین تک لایه و چند لایه ۳۷
۴-۱- مقدمه ۳۷
۴-۲- فرضیات ورق میندلین ۳۷
۴-۲-۱- روابط کرنش- تغییر مکان ۳۸
۴-۲-۲- روابط تنش-کرنش ۳۸
۴-۳- استخراج روابط مبتنی بر روش احجام محدود در تحلیل الاستیک ورق میندلین ۴۰
۴-۳-۱- شرایط مرزی ۴۳
۴-۴-مثال های عددی ۴۵
۴-۴-۱- مثال اول ۴۵
۴-۴-۲- مثال دوم ۴۸
۴-۴-۳- مثال سوم ۴۹
۴-۵- تحلیل خمش الاستو پلاستیک ورق میندلین تک لایه ۵۱

۴-۵-۱-محاسبه صلبیت خمشی اصلاح شده(D_{ep}) ۵۲
۴-۶- تحلیل خمش الاستو پلاستیک ورق میندلین چند لایه ۵۳
۴-۷-روند اجرای برنامه ۵۴
۴-۷-۱-مراحل اجرای برنامه(روش اول) ۵۴
۴-۷-۲- مراحل اجرای برنامه (روش دوم) ۵۶
۴-۸- مثال های عددی ۵۸
۴-۸-۱- مثال اول ۵۸
۴-۸-۲- مثال دوم ۶۴
۴-۸-۳- مثال سوم ۶۹
۴-۸-۴- مثال چهارم ۷۲
۴-۸-۵- مثال پنجم ۷۴
۴-۸-۶- مثال ششم ۷۵
۴-۸-۷- مثال هفتم ۷۶
۴-۸-۸- مثال هشتم ۷۸
فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۸۰
۵-۱- مقدمه ۸۰
۵-۲- نتیجه گیری ۸۰
۵-۳- پیشنهادات ۸۱
مراجع ۸۳

فهرست شکل‌ها

شکل۲-۱-حجم کنترل در روش CV- FV ۷
شکل۲-۲-حجم کنترل در روش CC – FV ۷
شکل۳-۱-تغییر شکل مقطع عرضی تیر تیموشنکو ۱۲
شکل۳-۲-قرارداد علامت در تئوری تیر تیموشنکو ۱۲
شکل۳-۳-احجام کنترل در تیر تیموشنکو ۱۴
شکل۳-۴-درجات آزادی نقاط مرکزی احجام محدود در تیر تیموشنکو ۱۴
شکل۳-۵-حجم کنترل داخلی دلخواه تحت اعمال بارهای داخلی و خارجی ۱۴
شکل۳-۶-فواصل المان های داخلی با المان های مجاور ۱۵
شکل۳-۷-حجم کنترل نقطه ای در دو انتهای تیر ۱۶
شکل۳-۸-تغییرات درصد خطا در پیش بینی جابجایی قائم وسط تیر به ازای مقادیر مختلف المان ۱۸
شکل۳-۹-تغییرات درصد خطا در پیش بینی جابجایی قائم وسط تیر به ازای مقادیر مختلف L/h ۱۸
شکل۳-۱۰-تغییرات نرمال جابجایی درامتداد طول تیر ۱۹
شکل۳-۱۱-تغییرات نرمال لنگر خمشی درامتداد طول تیر ۱۹
شکل۳-۱۲-تغییرات درصد خطا در پیش بینی جابجایی قائم وسط تیر به ازای مقادیر مختلف L/h ۲۰
شکل۳-۱۳-تغییرات نرمال جابجایی درامتداد طول تیر ۲۱
شکل۳-۱۴-تغییرات درصد خطا در پیش بینی جابجایی قائم وسط تیر به ازای مقادیر مختلف المان ۲۱
شکل۳-۱۵-تغییرات نیروی برشی در امتداد طول تیر ۲۲
شکل۳-۱۶-تغییرات درصد خطا در پیش بینی جابجایی قائم وسط تیر ۲۲
شکل۳-۱۷-تغییرات جابجایی قائم درامتداد طول تیر..... ۲۳
شکل۳-۱۸-نمودار تنش=کرنش ۲۳
شکل۳-۱۹-نمودار الاستو پلاستیک کامل تیر ۲۴
شکل۳-۲۰-گذر از رفتار الاستیک به رفتار الاستو پلاستیک ۲۵
شکل۳-۲۱-روند پلاستیک شدن تیر تیموشنکو تک لایه ۲۶
شکل۳-۲۲-روند پلاستیک شدن تیر تیموشنکو چند لایه ۲۷
شکل۳-۲۳-نمودار الاستوپلاستیک تیر تک لایه ۲۹
شکل۳-۲۴-نمودار الاستوپلاستیک تیر چند لایه به ازای تعداد لایه های مختلف ۳۰
شکل۳-۲۵-الگوی توزیع پلاستیسیته تیر چند لایه در مراحل مختلف بارگذاری ۳۰

شکل۳-۲۶-نمودار الاستو پلاستیک تیر تک لایه ۳۱
شکل۳-۲۷-نمودار الاستوپلاستیک تیر چند لایه به ازای تعداد لایه های مختلف ۳۱
شکل۳-۲۸-الگوی توزیع پلاستیسیته تیرلایه ای در مراحل مختلف بارگذاری ۳۲
شکل۳-۲۹-نمودار الاستوپلاستیک تیر تک لایه ۳۲
شکل۳-۳۰-نمودار الاستوپلاستیک تیر چند لایه به ازای تعداد لایه های مختلف ۳۳
شکل۳-۳۱-الگوی توزیع پلاستیسیته تیر لایه ای در مراحل مختلف بارگذاری ۳۳
شکل۳-۳۲-الگوی توزیع پلاستیسیته تیر لایه ای در مراحل مختلف بارگذاری ۳۴
شکل۳-۳۳-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک تیر درروش های عددی احجام محدود و نوار محدود [۶] ۳۵
شکل۴-۱-قرارداد علامت در تئوری ورق میندلین ۳۸
شکل۴-۲-دو حجم کنترل مجاور هم در روش CC-FV ۴۰
شکل۴-۳-فاصله مراکز دو حجم کنترل مجاور از وجه مشترک ۴۲
شکل۴-۴-گره گوشه q احاطه شده توسط منطقه ناشی از اتصال مراکز سلول های مجاور ۴۲
شکل۴-۵-حجم کنترل مرزی ۴۳
شکل۴-۶-مختصات ورق مفروضه ۴۵
شکل۴-۷-ورق تغییر شکل یافته ۴۶
شکل۴-۸-تغییرات درصد خطا در پیش بینی جابجایی مرکز ورق به ازای تقسیمات مختلف ۴۷
شکل۴-۹-تغییرات درصد خطا در پیش بینی جابجایی مرکز ورق به ازای ۱۵ المان در هر راستا ومقادیر مختلف L/h ۴۷
شکل۴-۱۰-منحنی لنگرهای خمشی و پیچشی ورق ۴۷
شکل۴-۱۱-منحنی نیروهای برشی ورق ۴۸
شکل۴-۱۲- ورق تغییر شکل یافته ۴۸
شکل۴-۱۳-تغییرات درصد خطا در پیش بینی جابجایی مرکز ورق به ازای تقسیمات مختلف ۴۹
شکل۴-۱۴-منحنی لنگر خمشی ورق ۴۹
شکل۴-۱۵- ورق تغییر شکل یافته ۵۰
شکل۴-۱۶-تغییرات درصد خطا در پیش بینی جابجایی مرکز ورق به ازای تقسیمات مختلف ۵۰
شکل۴-۱۷-منحنی لنگرهای خمشی ورق ۵۱
شکل۴-۱۸-منحنی نیروهای برشی ورق ۵۱
شکل۴-۱۹-ورق چند لایه و مقطع عرضی آن ۵۳
شکل۴-۲۰-شرایط تکیه گاهی و بارگذاری ورق ۵۸

شکل۴-۲۱-مقایسه دو روش به کار گرفته شده در احجام محدود ۵۹
شکل۴-۲۲-نمودار الاستو پلاستیک ورق لایه ای با المان های مختلف به ازای ۱۰ لایه ۵۹
شکل۴-۲۳-نمودار الاستو پلاستیک ورق لایه ای با تعداد لایه های مختلف به ازای ۱۱ المان در هر راستا ۶۰
شکل۴-۲۴-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق تک لایه و چند لایه به ازای ۹ المان در هر راستا ۶۱
شکل۴-۲۵-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق چند لایه در روش های مختلف عددی ۶۱
شکل۴-۲۶-منحنی لنگرهای خمشی و پیچشی در مراحل مختلف بارگذاری ۶۲
شکل۴-۲۷-مقایسه نمودار الاستو پلاستیک ورق لایه ای با ضخامت های مختلف ۶۳
شکل۴-۲۸-الگوی توزیع پلاستیسیته ورق لایه ای در مراحل مختلف بارگذاری ۶۳
شکل۴-۲۹-توزیع پلاستیسیته در عمق ورق در مراحل مختلف بارگذاری ۶۴
شکل۴-۳۰-شرایط تکیه گاهی و بارگذاری ورق ۶۴
شکل۴-۳۱-نمودار الاستو پلاستیک ورق لایه ای با المان های مختلف به ازای ۱۰ لایه ۶۵
شکل۴-۳۲-نمودار الاستو پلاستیک ورق لایه ای با تعداد لایه های مختلف به ازای ۱۱ المان در هر راستا ۶۵
شکل۴-۳۳-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق تک لایه و چند لایه به ازای ۹ المان در هر راستا ۶۶
شکل۴-۳۴-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق چند لایه در روش های مختلف عددی ۶۶
شکل۴-۳۵-منحنی لنگرهای خمشی در مراحل مختلف بارگذاری ۶۷
شکل۴-۳۶-الگوی توزیع پلاستیسیته ورق لایه ای در مراحل مختلف بارگذاری ۶۸
شکل۴-۳۷-توزیع پلاستیسیته در عمق ورق در مراحل مختلف بارگذاری ۶۸
شکل۴-۳۸-شرایط تکیه گاهی و بارگذاری ورق ۶۹
شکل۴-۳۹-نمودار الاستو پلاستیک ورق لایه ای با المان های مختلف به ازای ۱۰ لایه ۶۹
شکل۴-۴۰-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق تک لایه و چند لایه به ازای ۹ المان در هر راستا ۷۰
شکل۴-۴۱-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق چند لایه در روش های مختلف عددی ۷۰
شکل۴-۴۲-منحنی لنگرهای خمشی و پیچشی در مراحل مختلف بارگذاری ۷۱
شکل۴-۴۳-الگوی توزیع پلاستیسیته ورق لایه ای در مراحل مختلف بارگذاری ۷۲
شکل۴-۴۴-شرایط تکیه گاهی و بارگذاری ورق ۷۲
شکل۴-۴۵-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق تک لایه و چند لایه به ازای ۹ المان در هر راستا ۷۳
شکل۴-۴۶-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق چند لایه در روش های مختلف عددی ۷۳
شکل۴-۴۷-الگوی توزیع پلاستیسیته ورق لایه ای در مراحل مختلف بارگذاری ۷۴
شکل۴-۴۸-شرایط تکیه گاهی و بارگذاری ورق ۷۴

شکل۴-۴۹-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق تک لایه و چند لایه به ازای ۹ المان در هر راستا ۷۵
شکل۴-۵۰-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق چند لایه در روش های مختلف عددی..... ۷۵
شکل۴-۵۱-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق تک لایه و چند لایه به ازای ۹ المان در هر راستا ۷۶
شکل۴-۵۲-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق چند لایه در روش های مختلف عددی..... ۷۶
شکل۴-۵۳-شرایط تکیه گاهی و بارگذاری ورق..... ۷۷
شکل۴-۵۴-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق تک لایه و چند لایه به ازای ۹ المان در هر راستا ۷۷
شکل۴-۵۵-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق چند لایه در روش های مختلف عددی..... ۷۷
شکل۴-۵۶-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق تک لایه و چند لایه به ازای ۹ المان در هر راستا ۷۸
شکل۴-۵۷-مقایسه نمودار الاستوپلاستیک ورق چند لایه در روش های مختلف عددی..... ۷۸

فهرست جداول

جدول ۳-۱- مشخصات تیر ۱۷

جدول۳-۲-درصد خطا در پیش بینی جابجایی وسط تیر به ازای المان های مختلف ۱۸

جدول۳-۳-درصد خطا در پیش بینی جابجایی وسط تیر به ازای المان های مختلف ۲۰

جدول۳-۴-درصد خطا در پیش بینی جابجایی انتهای آزاد تیر به ازای المان های مختلف ۲۲

جدول۳-۵-درصد خطا در پیش بینی بار پلاستیک تیر تک لایه به ازای المان های مختلف ۲۹

جدول۳-۶- تغییرات بار پلاستیک به ازای تعداد لایه های های مختلف ۲۹

جدول۳-۷- تغییرات بار پلاستیک به ازای تعداد لایه های های مختلف ۳۱

جدول۳-۸- تغییرات بار پلاستیک به ازای تعداد لایه های های مختلف ۳۳

جدول۳-۹- تغییرات بار پلاستیک به ازای تعداد لایه های های مختلف ۳۴

جدول ۳-۱۰- مشخصات تیر ۳۵

جدول ۴-۱- مشخصات ورق ۴۵

چکیده

تحلیل عددی خمش الاستوپلاستیک ورق میندلین چند لایه

اکرم پراینده شهرستانی

در سال های اخیر تلاش های عمده ای جهت گسترش روش های عددی درتحلیل رفتار اجسام صورت گرفته است. همچنین کاربرد فراوان ورق های فولادی در صنایع مختلف سبب افزایش مطالعات نسبت به این سازه شده است. بنابر این ، شاهد به کارگیری روشهای مختلف عددی نظیر المان محدود، نوار محدود، المان مرزی و غیره در تحلیل رفتار ورق ها می باشیم. در مطالعه حاضر، به تحلیل خمش الاستو پلاستیک ورق های مستطیلی با استفاده از روش احجام محدود پرداخته شده است که در آن ورق ها به صورت تک لایه و چند لایه مدل می شوند. در خصوصیت چند لایه ، ضخامت ورق به تعدادی لایه جداگانه تقسیم می شود. در نتیجه این امکان وجود دارد که نحوه انتشار پلاستیسیته در امتداد ضخامت و همچنین سطح ورق مشاهده شود.

در روش احجام محدود، سطح میانی صفحه به تعدادی المان که به عنوان حجم کنترل شناخته می شود، تقسیم می شود. معادلات تعادل متناظر با هر حجم کنترل نوشته می شود که در آن ها نظیر هر وجه، مشتق تغییر مکان ها به صورت تقریبی ارزیابی می شوند. در این تحقیق، از تئوری ورق میندلین استفاده شده است که اثر برشی در آن لحاظ می شود. این تئوری کارایی لازم برای تحلیل ورق های نازک تا ضخیم را دارا می باشد.

جهت ارزیابی صحت معادلات به دست آمده از روش احجام محدود، چندین نمونه مطالعه عددی صورت گرفته است. نتایج حاصله با نتایج به دست آمده از روش های مختلف عددی و همچنین روش های تحلیلی مقایسه می شود. این مقایسه بیانگر توانایی روش احجام محدود در تحلیل صحیح رفتار الاستو پلاستیک ورق ها است. قابل توجه است که در تحلیل صفحات نازک، پدیده قفل برشی مشاهده نمی شود. در این پایان نامه همچنین، به تحلیل خمش الاستو پلاستیک تیر تیموشنکو پرداخته شده است که به طور موفقیت آمیزی با روش احجام محدود حل شده است.

کلید واژه: خمش الاستو پلاستیک ، ورق میندلین ، روش احجام محدود ، روش چند لایه

Abstract

Numerical analysis of elasto-plastic bending of layered Mindlin plates

Akram Parayandeh Shahrestany

In recent years, tremendous efforts have been made in the development of numerical methods for the analysis of solids and material. Also, wide applications of steel plates in industries, have increased the studies of this structure.Therefore, the behavior of plates has been studied by different numerical methods such as the finite element, finite strip, boundary element and etc. In the present study, a cell centered finite volume based formulation for analyzing the elasto-plastic bending of rectangular plate is proposed. Both layered and non-layered approaches of plate are used. In layered approach the plate is subdivided into a chosen number of layers. Therefore, it is possible to monitor the plasticity evolution through the plate thickness along with the spread of the plastic phenomena on the plate surface.

In the FV method, the plate mid-surface is discretized in to a number of elements known as control volumes. Equilibrium equations corresponding to each cell is expressed. In this study, Mindlin-Reissner plate theory is utilized which allows for transverse shear effects and therefore, it can be applicable for thin and thick plates.

For evaluation the proposed formulation, some numerical examples are studied. The results obtained are compared with results obtained by using other numerical methods and analytical solutions. The comparison reveals that the FVM is able to predict accurate elasto-plastic behavior of plates. Interestingly, no shear locking was observed in the analysis of thin plates.

In this dissertation, also, analyzing the elasto-plastic bending of Thimoshenko beam is performed which have been successfully solved by the implementation of Finite Volume method.

Key words: elasto-plastic bending, Mindlin plate, FiniteVolume method, layered approach

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

کاربرد گسترده سازه های صفحه ای در تکنولوژی نوین که شامل رشته های مهندسی عمران، مکانیک، هوافضا، شیمی، معماری و حتی رشته های ریاضی و فیزیک می باشد، اهمیت ویژه ای را به خود اختصاص داده است. از طرفی پیشرفت سریع در کاربرد کامپوزیت ها به علت سبکی، استحکام، و صرفه اقتصادی که دارند، پرداختن به مبحث صفحات را مهمتر جلوه می دهد.

توسعه عناصر سازه ای به علت محدودیت مواد و دانش اندک نسبت به این مواد تا قبل از آغاز قرن نوزدهم بسیار محدود بود. اختراع موادی مانند فولاد، بتن و آلومینیوم انقلابی در طراحی سازه ایجاد نمود که امکانات کامل آن ها هنوز هم در حال بررسی است. در مراحل اولیه توسعه و پیشرفت، وجود اشکال مختلف صفحه ای در کتاب بزرگ طبیعت به نوعی آموزش محسوب می شد. همچنین مطالعات علمی بر روی موجودات زنده نشان داد که قدرت و استحکام یک سازه فقط به جنس مواد بستگی ندارد بلکه به شکل و فرم آن ها نیز بستگی دارد.

استفاده گسترده از عناصر سازه ای با کاربرد صفحات فلزی در بدنه کشتی ها، توسعه پل های فلزی و سازه های هواپیمایی آغاز شد. در ادامه این صفحات به طور گسترده در محیط های دیگری از مهندسی سازه از جمله ورقه های آجدار برای ساخت و ساز کف و سقف ساختمان مورد استفاده قرار گرفت. تیرهای کامپوزیت بتنی و فلزی، دیوارهای حائل، دروازه های فولادی از جمله موارد استفاده صفحات فلزی در صنعت ساختمان است. این صفحات در صنایع دیگر نیز کاربرد چشمگیر دارند. صنایع هوایی نظیر ساخت هواپیماهای غول پیکر و ماهواره ها، صنایع دریایی همچون ساخت کشتی های عظیم و سکوهای دریایی، صنایع نفت و گاز و پتروشیمی شامل ساخت خطوط لوله، مخازن ذخیره سازی و پالایشگاه ها، صنایع لوازم خانگی و صنایع حمل و نقل زمینی از جمله آن ها می باشند. از این رو اهمیت مطالعه در خصوص صفحات به خوبی روشن می شود.

۱-۲- اهداف انجام پایان نامه

یکی از اهداف مطالعه حاضر آماده کردن یک روش عددی مناسب برای تحلیل سازه ای است. با توجه به پیچیدگی های مسئله، به کارگیری روش های تحلیلی برای این هدف بسیار دشوار است و روش های عددی مناسب تر به نظر می رسند.

به دلیل انعطاف پذیری روش المان محدود، در چند دهه اخیر این روش مکررا مورد استفاده قرار می گرفته است. اما امروزه به دنبال توسعه روش های عددی دیگر و دقت بیشتر این روش ها نسبت به المان محدود شاهد به کار گیری این روش ها در تحلیل مسائل مهندسی سازه هستیم. در دو دهه اخیر گرایش رو به رشدی به سوی استفاده از روش احجام محدود در تحلیل مسائل مکانیک جامدات ایجاد شده است. نتایج خوب به دست آمده به ویژه در مسائل دو بعدی، انگیزه ای برای به کارگیری این روش در حل مسائل پیچیده تر شده است. هدف از این پایان نامه توسعه مطالعات انجام گرفته پیشین در تحلیل صفحات و بررسی رفتار الاستوپلاستیک صفحات بر اساس روش احجام محدود می باشد. به منظور بررسی کارآیی این روش ، برنامه های کامپیوتری بر

اساس معادلات ارائه شده در این پایان نامه در محیط نرم افزار *Matlab* نوشته شد و نتایج با جواب های تحلیلی مقایسه گردید که توانایی روش احجام محدود در تحلیل مسائل مکانیک جامدات روشن خواهد شد.

۱-۳- ساختار پایان نامه

این پایان نامه مشتمل بر پنج فصل می‌باشد که در ذیل به طور مختصر به شرح آن می‌پردازیم.

در فصل اول به توضیح مسأله، اهداف و اهمیت آن پرداخته شده است.

فصل دوم شامل مروری بر کارهای گذشته در زمینه تئوری صفحات و روش احجام محدود می باشد.

در فصل سوم به بیان فرضیات و روابط مبتنی بر روش احجام محدود در تحلیل تیر تیموشنکو پرداخته شده و در بررسی دقت نتایج مثال های عددی ضمیمه شده است.

سپس در فصل چهارم به ارائه فرضیات و روابط حاکم بر ورق میندلین با به کارگیری روش احجام محدود پرداخته شده است . به منظور بررسی صحت معادلات و ارزیابی دقت جواب های حاصله از روش به کار گرفته شده، مثال های عددی مورد مطالعه قرار می گیرند.

در نهایت در فصل پنجم نتایج و پیشنهادات برای ادامه کار ارائه خواهد شد.

فصل دوم

مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- مقدمه

ورق ها به دلیل اهمیت و کاربرد فراوانی که در صنعت دارند از اجزاء مهم سازه های مکانیکی به شمار می روند. به دلیل پیچیدگی آنالیز مسائل مربوط به ورق، با استفاده از روش های موجود، ارضاء شرایط حاکم بر محیط بدون در نظرگیری برخی ساده سازی ها مقدور نمی باشد. علاوه بر این ، حل های ارائه شده بر اساس روش های موجود ، در کنار مزایا و نقاط قوت ،گاه خطاهای محسوس و محدودیت هایی را به دنبال دارند. برای نمونه ، صرف نظر کردن از تغییر شکل برشی عرضی که در تئوری های کلاسیک ارائه شده است ، موجب به دست آمدن تغییر شکل ها با دقت کمتر می شود. از جمله تلاش های اولیه صورت گرفته در زمینه حل ورق ها ، حل صفحات نازک بر اساس تئوری کیرشهف می باشد که به تئوری کلاسیک ورق شهرت دارد. با توجه به فرضیات کیرشهف ، تئوری کلاسیک ورق قادر به بیان کردن میزان کرنش و برش عرضی یا تنش برشی عرضی نمی باشد، که این عامل موجب به وجود آمدن نتایج نادرست در تحلیل صفحات ضخیم می شد و استفاده از این تئوری را در حد تحلیل صفحات نازک محدود می نمود. به همین علت تئوری های تغییر شکل برشی برای تحلیل دقیق تر این گونه ورق ها ارائه شده است. پایه این تئوری ها بر اساس فرضیه میندلین-ریسنر می باشد. در این فرضیه محدودیت موجود در تئوری کلاسیک ورق اصلاح شده است و فرض بر این است که صفحات عمود بر سطح میانی ، چرخش های مستقلی در راستای محور های اصلی تجربه می کنند. تئوری تغییر شکل برشی موجب حصول تنش برشی ثابت در ضخامت صفحه می شود .

پس از گسترش روابط مربوط به تئوری تغییر شکل برشی ، محققین زیادی روابط اجزاء محدود را بر اساس این تئوری ها گسترش دادند، که ثمره آن به وجود آمدن المان هایی بود که روابط مربوط به این تئوری ها را ارضاء می نمودند . هرچند این المان ها بسیار کارآمد بودند، ولی هنوز مشکلاتی در آن ها وجود داشت. از جمله مشکلاتی که این دسته از المان ها با آن مواجه بودند می توان به پدیده قفل برشی[1] ، به وجود آمدن مود های ناصحیح در حل المان ها و مشکلاتی در به دست آوردن تنش در آن ها اشاره نمود ، که همین موضوع محققان را بر آن داشت که از روش های جدیدتری استفاده نمایند که در آن ها مشکلات نامبرده نیز حل شده باشند. بدین سبب ارائه یک روش حل بدون ساده سازی و محدودیت های چشم گیر امری نسبتاً ضروری به حساب می آید ، که در این پایان نامه به این مهم پرداخته شده است.

۲-۲- تاریخچه تئوری صفحات

اولین مطالعات عمده صفحات در اوایل سال ۱۸۰۰ میلادی آغاز شد. بسیاری از کارهای انجام شده در این زمینه منسوب به *Cauchy*، *Poisson*، *Navier*، *Lagrange* و *Kirchhoff* بود . اولین خصوصیت ریاضی تئوری صفحات توسط *Euler* (۱۷۶۶) تنظیم شد که مسئله ارتعاش آزاد صفحات الاستیک دایره ای و مستطیلی را حل کرد . اما *Navier* (۱۸۳۶- ۱۷۸۵) را

[1] Shear locking