بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده عمران و معماری
گروه عمران

عنوان:

تخمین خطا و حل تطبیقی سازه‌های دو بعدی در اجزای محدود و روش ایزوژئومتریک

دانشجو : احمد گنجعلی

استاد راهنما:

دکتر بهروز حسنی

مشاور:

مهندس ناصر ظریف

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد سازه

تیرماه ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

گروه عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای احمد گنجعلی

تحت عنوان: تخمین خطا و حل تطبیقی سازه های دوبعدی در اجزای محدود و تحلیل ایزوژئومتریک

در تاریخ ۸۸/۴/۲۴ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

استاد راهنما	امضاء	مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی : دکتر بهروز حسنی		نام و نام خانوادگی : ناصر ظریف مقدم	

اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء
نام و نام خانوادگی : دکتر رضا نادری		نام و نام خانوادگی :	
نام و نام خانوادگی : دکتر علی کیهانی			

... در هر حرفه‌ای که هستید نه اجازه بدهید که به بدبینیهای بی حاصل آلوده شوید و نه بگذارید که بعضی لحضات تاسف بار، که برای هر ملتی پیش می‌آید، شما را به یاس و ناامیدی بکشاند. در آرامش حاکم بر آزمایشگاهها و کتابخانه‌هایتان زندگی کنید. نخست از خود بپرسید «برای یادگیری و خود آموزی چه کرده‌ام؟» سپس همچنان که پیشتر می‌روید، بپرسید «من برای کشورم، چه کرده‌ام؟» و این پرسش را آنقدر تکرار کنید تا با این احساس شاد بخش و هیجان انگیز برسید که شاید سهم کوچکی در پیشرفت و اعتلای بشریت داشته‌اید. اما هر پاداشی که زندگی به تلاشهایمان بدهد یا ندهد هنگامی که به پایان تلاشهایمان نزدیک می‌شویم هر کدام مان باید حق آن را داشته باشیم که با صدای بلند بگوییم «من آنچه در توان داشته‌ام انجام داده‌ام.»

لوئی پاستور

(۱۸۲۲–۱۸۹۵)

تقدیم به

رهروان علم و دانش

و آنهایی که با وجود مشکلات فراوان در میدان علم و دانش با دشمن جهل نبرد می‌کنند.

قدردانی

فراز و فرودهایی که در سلوک علمی پیش روی دانشجوست، گاه چنان سهمناک می‌نماید که بی مدد استاد و اشارت‌های راهبردی او کار به انجام نخواهد رسید.

این پایان نامه، پس از عنایت حق بیش از هر چیز، وامدار لطف، درایت و تذکرهای کارگشای استاد ارجمندم جناب آقای دکتر بهروز حسنی است.

با اخلاص تمام از ایشان که بر من حق حیات معنوی دارند، سپاسگزاری می کنم و از خداوند می خواهم سایه شان را بر سر فرهنگ، علم و پویندگان دانش در این مرز و بوم مستدام بدارد.

همچنین از همکاری مهندس مهدی توکلی که با کمال صمیمیت، رضایت خود را در استفاده از برنامه کامپیوتری خود را در این پژوهش ابراز داشتند، کمال قدردانی به عمل می آید.

تعهد نامه

اینجانب **احمد گنجعلی** دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکدهٔ عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه با عنوان **تخمین خطا و حل تطبیقی سازه های دو بعدی در اجزای محدود و تحلیل ایزوژئومتریک** تحت راهنمایی دکتر بهروز حسنی متهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام (دانشگاه صنعتی شاهرود) و یا (Shahrood University of Technology) به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزاها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

در این پایان نامه به بررسی و معرفی روشهای تخمین خطا و حل تطبیقی در اجزای محدود و همچنین اصول به کار رفته در روش ایزوژئومتریک پرداخته شده است. در روش اجزای محدود، به تهیه برنامه کامپیوتری به زبان فرترن پرداخته شده است که قادر به تحلیل مسائل دو بعدی به کمک تخمین خطا و حل تطبیقی می باشد. جهت تخمین خطای تحلیل اجزای محدود از روش بازیافت تنش بر مبنای نقاط فوق همگرا (SPR) استفاده شده است. همچنین حل تطبیقی با المان بندی دوباره در هر مرحله جهت بهبود شبکه اجزای محدود صورت پذیرفته است. با مقایسه نتایج بدست آمده برای فاکتور شدت تنش صفحهٔ ترکدار تحت کشش حاصل از این برنامه و نرم افزار Ansys با حل تئوری، صحت و دقت آن در برآورد خطای اجزای محدود و حل تطبیقی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که این برنامه از کارایی کاملا رضایت بخشی برخوردار است و علاوه بر آن روش تخمین خطا و حل تطبیقی به کار رفته در آن نسبت به روش مورد استفاده در نرم افزار Ansys، دارای دقت بیشتر و هزینه کمتری می‌باشد. همچنین در این پایان نامه به تشریح روشی ابداعی جهت بهبود میدان تنش بدست آمده از روش ایزوژئومتریک و تخمین خطای موجود در آن پرداخته شده است. این تخمین کننده خطا، در دستهٔ روشهای برآورد خطای مبتنی بر بازیافت تنش قرار می گیرد. در این روش، با استفاده از نقاط فوق‌همگرا، برای تابع مقادیر هریک از مؤلفه‌های میدان تنش در هر ناحیه، یک سطح فرضی ساخته می شود. به منظور تعریف این سطح از همان توابع شکل نربزی استفاده می‌کنیم که در روش ایزوژئومتریک برای تقریب زدن تابع جابجایی به کار گرفته می‌شوند. از مقایسه نرم خطای انرژی دقیق و نرم خطای انرژی تقریبی، مشاهده می‌شود که تخمین کننده خطای پیشنهادی از کارایی مناسبی جهت برآورد خطای موجود در تحلیل مسائل به روش ایزوژئومتریک برخوردار است.

کلمات کلیدی: اجزای محدود، تخمین خطا، حل تطبیقی، فاکتور شدت تنش، تحلیل ایزوژئومتریک، بازیافت تنش

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه وکلیات

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- روش اجزای محدود ۴

۱-۳- خطاها در روش اجزای محدود ۷

۱-۴- پیشینه علمی برآورد خطا و آنالیز تطبیقی در اجزای محدود ۸

۱-۵- هدف و تشریح مسأله در این تحقیق ۱۰

فصل دوم: برآورد کننده‌های خطا

۲-۱- مقدمه ۱۳

۲-۲- روشهای برآورد خطا مبتنی بر محاسبه مانده‌ها ۱۴

۲-۳- روشهای برآورد خطا مبتنی بر بازیافت تنش (گرادیان) ۱۷

۲-۳-۱- روش میانگین گیری ۱۸

۲-۳-۲- روش تصویر L_2 ..... ۱۹

۲-۳-۳- روش بازیافت تنش بر مبنای نقاط فوق هم گرا SPR ۱۹

۲-۳-۴- روش بازیافت تنش بر مبنای تعادل در زیر دامنه‌ها، REP ۲۱

۲-۴- معیارهای بیان خطا ۲۳

۲-۴-۱- مفهوم نرم ۲۳

۲-۴-۲- معیار انرژی ۲۴

۲-۴-۳- درصد خطای نسبی $\boldsymbol{\eta}$ ۲۵

۲-۴-۴- معیار L_2 ..... ۲۶

۲-۴-۵- جذر مجموع مربعات خطا ۲۷

۲-۴-۶- شاخص تأثیر $\boldsymbol{\theta}$ ۲۸

۲-۴-۷- تعریف شاخص ξ_i ۲۸

فصل سوم حل تطبیقی در اجزای محدود

۳-۱- مقدمه ۳۲

۳-۲- انواع روشهای آنالیز تطبیقی ۳۳

۳-۲-۱- انواع روشهای اصلاح شبکه h ۳۳

۳-۲-۱-۱- روش تقسیم المان‌ها (غنی سازی) ۳۳

۳-۲-۱-۲- روش تولیدکامل المانها (المانبندی دوباره) ۳۴

۳-۲-۱-۳- اصلاح شبکه به روش r ۳۴

۳-۲-۲- رویکردهای مهم در اصلاح شبکه به روش P ۳۶

۳-۳- مثالهایی برای اصلاح شبکه به روش h ۳۶

۳-۳-۱- تولید مش ۳۶

۳-۳-۲- پیشگویی اندازه المان مورد نیاز در اصلاح شبکه به روش h ۳۸

۳-۳-۳- حل تطبیقی به روش h با استفاده از شبکه بندی مجدد در هر مرحله ۴۵

۳-۳-۳-۱- صفحهٔ L شکل تحت تنش مسطح ۴۶

۳-۳-۳-۲- قطعه مکانیکی تحت کرنش مسطح ۴۶

۳-۳-۳-۳- سد وزنی سوراخ دار ۴۶

۳-۴- اصلاح شبکه به روش p و hp ۴۹

فصل چهارم: برنامه تحلیل سازه‌های دو بعدی به کمک تخمین خطا و حل تطبیقی در اجزای محدود

۴-۱- مقدمه ۵۶

۴-۱- تحلیل اجزای محدود ۵۷

۴-۱-۱- تئوری الاستیسیته برای مسائل صفحه‌ای ۵۷

۴-۲- تولید شکل و مرزهای سازه ۶۱

۴-۲-۱- توابع اسپلاین ۶۱

۴-۲-۲- اسپلاین‌های پارمتری درجه سه ۶۳

۴-۲-۳- B- اسپلاینها ۶۴

۴-۲-۴- منحنی‌های B- اسپلاین ۶۵

۴-۲-۵- مدلسازی دامنه یک سازه ۶۷

۴-۳- تولید شبکه اجزای محدود ۶۸
۴-۳-۱- انواع روشهای تولید کننده شبکه اجزای محدود..... ۶۹
۴-۴- تخمین خطا و بهبود شبکه اجزای محدود..... ۷۱

فصل پنجم: بررسی صحت و دقت برنامه با تعیین فاکتور شدت تنش صفحهٔ ترکدار تحت کشش

۵-۱- مقدمه ۷۵
۵-۲- مکانیک شکست ارتجاعی خطی..... ۷۵
۵-۳- فاکتور شدت تنش ۸۵
۵-۴- محاسبه فاکتور شدت تنش در مدلهای اجزای محدود دو بعدی ۸۶
۵-۵- تعریف مسئله ۸۷
۵-۶- مدلسازی مسئله به کمک برنامه ADAPT..... ۸۸
۵-۶-۱- نتایج ناشی از مدلسازی با المان مثلثی شش گرهی ۸۹
۵-۶-۲- نتایج ناشی از مدلسازی با المان چهار ضلعی هشت گرهی..... ۹۲
۵-۷- مدلسازی مسئله به کمک برنامهAnsys..... ۹۴
۵-۷-۱- نتایج ناشی از مدلسازی با المان مثلثی شش گرهیPLANE2 ..... ۹۶
۵-۷-۲- نتایج ناشی از مدلسازی با المان چهار ضلعی هشت گرهی PLANE82 ..... ۹۹
۵-۸- مقایسه و نتیجه گیری..... ۱۰۱

فصل ششم: تخمین خطا و بهبود میدان تنش حاصل از تحلیل ایزوژئومتریک

۶-۱- مقدمه ۱۰۳
۶-۲- روش ایزوژئومتریک ۱۰۳
۶-۲-۱- بی- اسپلاین و نربز ۱۰۴
۶-۲-۲- فرمول‌بندی روش ایزوژئومتریک ۱۰۸
۶-۳- تشریح روش بازیافت تنش ۱۱۴
۶-۴- نرم خطای انرژی ۱۱۷
۶-۵- تیر طره تیموشنکو ۱۱۹

۶-۶- صفحه نامحدود سوراخدار ۱۲۵
۶-۷- صفحه ترکدار تحت کشش ۱۳۱

فصل هفتم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

۷-۱- نتایج بدست آمده از بخش اول پژوهش ۱۳۷
۷-۲- نتایج بدست آمده از بخش دوم پژوهش ۱۳۹
۷-۳- ارائه پیشنهادات ۱۴۰

ضمیمه ۱: نقاط فوق همگرا در برآورد خطای اجزای محدود

۱- مرتبه خطا ۱۴۲
۲- نقاط گوس در انتگرالگیری عددی ۱۴۳
۳- نقاط فوق همگرا ۱۴۹

ضمیمه ۲: روش جبهه پیش رونده برای تولید شبکه اجزای محدود

۱- تاریخچه ۱۵۵
۲- کنترل فرایند تولید مش ۱۵۶
۳- الگوریتم روش جبهه پیش رونده برای تولید شبکه اجزای محدود ۱۶۱
۴- تطبیق و نحوه اثر پارامترها در تشکیل المان‌ها ۱۷۰

ضمیمه ۳

آشنایی با نحوه تهیه فایل ورودی برنامه ADAPT ۱۷۲
مراجع ۱۹۰

فهرست اشکال

شکل۲-۱ عدم پیوستگی شیب در مرز المان ۱۵
شکل۲-۲ محاسبهٔ سهم گره‌ها ۲۱
شکل۳-۱ شیوه‌های مختلف اصلاح شبکه به روش h..... ۳۵
شکل۳-۲ تأثیر مش اولیه در سرعت همگرایی اصلاح شبکه به روش h. حل تطبیقی با استفاده از المانهای مثلثی درجهٔ دوم ۴۰
شکل ۳-۳ اصلاح شبکه تیر طره کوتاه با المانهای خطی مثلثی..... ۴۱
شکل ۳-۴ اصلاح شبکه تیر طره کوتاه با المانهای مثلثی درجه دوم ۴۲
شکل ۳-۵ سرعت همگرایی بدست آمده از نتایج تجربی برای تیر طره کوتاه..... ۴۳
شکل ۳-۶ تیر طره کوتاه. غنی سازی مش در مقابل تولید دوبارهٔ مش با استفاده از المانهای چهار ضلعی خطی..... ۴۳
شکل ۳-۷ حل تطبیقی تیر طرهٔ کوتاه با غنی سازی مش‌ها و استفاده از المانهای مربعی خطی..... ۴۴
شکل ۳-۸ حل تطبیقی تیر طرهٔ کوتاه با تولید دوبارهٔ مش‌ها و استفاده از المانهای چهار ضلعی خطی..... ۴۴
شکل ۳-۹ مراحل مختلف اصلاح شبکه ۴۵
شکل ۳-۱۰ اصلاح شبکه صفحهٔ L شکل تحت تنش مسطح..... ۴۷
شکل ۳-۱۱ حل تطبیقی قطعهٔ مکانیکی تحت کرنش مسطح با استفاده از المانهای خطی مربعی ۴۸
شکل ۳- ۱۲ حل تطبیقی سد وزنی سوراخ دار تحت بارگذاری آب و استفاده از المانهای مثلثی درجه دو با فرض کرنش مسطح تا رسیدن به دقت ۵٪..... ۵۰
شکل ۳-۱۳ حل تطبیقی سد وزنی سوراخدار به روش p. الف) مرحلهٔ سوم با ۲۰۶ درجهٔ آزادی ب) مرحلهٔ چهارم با ۳۶۵ درجهٔ آزادی..... ۵۱
شکل ۳-۱۴ نتایج اصلاح شبکهٔ صفحهٔ L شکل با روش hp..... ۵۳
شکل ۳-۱۵ نتایج اصلاح شبکه تیر کوتاه طره با روش hp..... ۵۴
شکل ۴-۱ شش مولفه مستقل تنش در یک جسم جامد..... ۵۷
شکل ۴-۲ تنش‌ها و کرنش‌ها در حالت متقارن محوری..... ۵۹
شکل ۴-۳ منحنی درجه سه B-Spline..... ۶۴

شکل ۴-۴ توابع پایه از درجه ۱،۲، ۰ برای بردار گره‌ای یکنواخت $u = \{0,1,2,3,4,5,...\}$ ۶۵
شکل ۴-۵ توابع پایه درجه دو برای بردار گره‌ای $u = \{0,0,0,1,2,3,4,5,5,5\}$ ۶۶
شکل ۴-۶ دیاگرام نحوه محاسبه B_i^p ۶۶
شکل ۴-۷ منحنی درجه دوم تکه‌ای B- اسپلاین با استفاده از توابع پایه و بردار گره‌ای شکل ۴-۵ ..... ۶۷
شکل ۴-۸ مدل سازی دامنه یک سازه شامل سوراخ داخلی با استفاده از ۱۹ نقطه کلیدی و ۱۵ قطعه ۶۷
شکل ۴-۹ المانهای مورد استفاده جهت شبکه بندی دامنه در برنامه ADAPT ۶۹
شکل ۴-۱۰ الف) مش سازمان یافته ب) مش سازمان نیافته ۷۱
شکل ۴-۱۱ اصلاح شبکه صفحهٔ مربعی تحت بار متمرکز ۷۳
شکل ۵-۱ مودهای تغییر شکل ترک ۷۷
شکل ۵-۲ صفحه به ابعاد بینهایت تحت بار کششی دو محوره یکنواخت ۷۸
شکل ۵-۳ تعریف سیستم مختصات و مولفه‌های تنش در نوک ترک ۸۳
شکل ۵-۴ صفحه با عرض محدود دارای ترک مرکزی ۸۵
شکل ۵-۵ صفحه با ترک میانی ۸۸
شکل ۵-۶ شبکه اولیه(۹۱۷=تعداد گره‌ها، ۴۲۸=تعداد المانها، درصد $\eta = ۳/۷۷$ با ۱۸۳۴ درجهٔ آزادی) ۸۹
شکل ۵-۷ شبکه نهایی (۱۵۶۸=تعداد گره‌ها، ۷۳۳=تعداد المانها، درصد $\eta = ۰/۴۲$ با ۳۱۳۶ درجهٔ آزادی) ۸۹
شکل ۵-۸ برازش خط به فاکتورهای شدت تنش محاسبه شده از المانهای مثلثی شش گرهی ۹۱
شکل ۵-۹ شبکه اولیه (۷۱۳=تعداد گره‌ها، ۲۱۶=تعداد المانها، درصد $\eta = ۴/۶۹$ با ۱۴۲۸ درجهٔ آزادی) ۹۲
شکل ۵-۱۰ شبکه نهایی (۱۷۵۸=تعداد گره‌ها، ۵۵۵=تعداد المانها، درصد $\eta = ۰/۲۱$ با ۳۵۱۶ درجهٔ آزادی) ۹۲
شکل ۵-۱۱ برازش خط به فاکتورهای شدت تنش محاسبه شده از المانهای چهار ضلعی هشت گرهی ۹۳
شکل ۵-۱۲ المانهای مورد استفاده در شبکه بندی به کمک نرم افزار Ansys ۹۵
شکل ۵-۱۳ شبکه اولیه(۵۲۶=تعداد گره‌ها، ۲۴۱=تعداد المانها، درصد $\eta = ۷/۲۹$ با ۱۰۵۲ درجهٔ آزادی) ۹۶
شکل ۵-۱۴ شبکه نهایی(۱۵۸۸=تعداد گره‌ها، ۷۲۳=تعداد المانها، درصد $\eta = ۰/۵۹$ با ۳۱۷۶ درجهٔ آزادی) ۹۶
شکل ۵-۱۵ برازش خط به فاکتورهای شدت تنش محاسبه شده از شبکه بندی اولیه و نهایی ۹۸
شکل ۵-۱۶ شبکه اولیه(۳۷۰=تعداد گره‌ها، ۱۰۹=تعداد المانها، درصد $\eta = ۹/۴۶$ با ۷۴۰ درجهٔ آزادی) ۹۹
شکل ۵-۱۷ شبکه نهایی(۳۲۶۲=تعداد گره‌ها، ۱۰۱۷=تعداد المانها، درصد $\eta = ۰/۲۲$ با ۶۵۲۴ درجهٔ آزادی) ۹۹

شکل ۵-۱۸ برازش خط به فاکتورهای شدت تنش محاسبه شده از شبکه بندی با المانهای PLANE82 ..... ۱۰۰
شکل ۶-۱ شبکه نقاط کنترلی و سطح نربز مربوط به آن با توابع پایه درجه دو ۱۰۷
شکل ۶-۲ المان های ساخته شده به وسیله دهانه های گره ای نربز ۱۱۲
شکل ۶-۳ تیر طره در شرایط تنش مستوی ۱۱۹
شکل ۶-۴ نقاط کنترلی مورد استفاده در مدلسازی تیر طره ۱۲۰
شکل ۶-۵ نمودار تغییرات نرم خطای انرژی تقریبی و نرم خطای انرژی دقیق تیر طره تیموشنکو ۱۲۲
شکل ۶-۶ توزیع نرم خطای دقیق و نرم خطای تقریبی تیر طره تیموشنکو ۱۲۳
شکل ۶-۷ توزیع سه بعدی نرم خطای تقریبی و نرم خطای دقیق تیر طره تیموشنکو ۱۲۳
شکل ۶-۸ صفحهٔ تنش σ_y برای نتایج بدست آمده از تحلیل ایزوژئومتریک و بهبود یافتهٔ تیر طره تیموشنکو ۱۲۴
شکل ۶-۹ صفحه نامحدود سوراخدار ۱۲۵
شکل ۶-۱۰ مشخصات و شرایط مرزی دامنه مدلسازی شدهٔ صفحه نامحدود سوراخدار ۱۲۵
شکل ۶-۱۱ نقاط کنترلی مورد استفاده در مدلسازی صفحه نامحدود سوراخدار ۱۲۶
شکل ۶-۱۲ نمودار تغییرات نرم خطای انرژی تقریبی و نرم خطای انرژی دقیق صفحه نامحدود سوراخدار ۱۲۸
شکل ۶-۱۳ توزیع نرم خطای دقیق و تقریبی صفحه نامحدود سوراخدار ۱۲۸
شکل ۶-۱۴ توزیع سه بعدی نرم خطای دقیق و نرم خطای تقریبی صفحه نامحدود سوراخدار ۱۲۹
شکل ۶-۱۵ کانتور تنش σ_x برای نتایج گرفته شده از تحلیل تئوری، تحلیل ایزوژئومتریک و تنشهای بهبود یافته صفحه نامحدود سوراخدار ۱۲۹
شکل ۶-۱۶ صفحهٔ تنش σ_x برای نتایج گرفته شده از تحلیل تئوری، تحلیل ایزوژئومتریک و تنشهای بهبود یافته صفحه نامحدود سوراخدار ۱۳۰
شکل ۶-۱۷ صفحه مربعی ترکدار تحت تنش کششی قائم ۱۳۲
شکل ۶-۱۸ (الف) بردار گرهی و (ب) المانهای تولید شده بر روی دامنه مدلسازی شده توسط توابع شکل درجه یک، دو و سه به روش ایزوژئومتریک ۱۳۳
شکل ۶-۱۹ دامنه مدلسازی شده به همراه شرایط مرزی و نقاط کنترلی به کار رفته جهت تحلیل صفحه ترکدار تحت کشش با توابع شکل (الف) درجهٔ یک، (ب) درجهٔ دو، (ج) درجهٔ سه ۱۳۴
شکل ۶-۲۰ مقایسه نرم خطای انرژی دقیق و تقریبی صفحه ترکدار تحت کشش ۱۳۵

فهرست جداول

جدول ۵-۱ مقادیر فاکتور شدت تنش بدست آمده از شبکه بندی دامنه با المانهای مثلثی شش گرهی..... ۹۰
جدول ۵-۲ مقادیر فاکتور شدت تنش بدست آمده از شبکه بندی با المانهای چهار ضلعی هشت گرهی..... ۹۳
جدول ۵-۳ مقادیر فاکتور شدت تنش بدست آمده از شبکه بندی نهایی با المانهای مثلثی PLANE 2..... ۹۷
جدول ۵-۴ مقادیر فاکتور شدت تنش بدست آمده از شبکه بندی با المانهای چهار ضلعی PLANE82..... ۹۹
جدول ۵-۵ نتایج بدست آمده از برنامه ADAPT و نرم افزار Ansys..... ۱۰۱
جدول ۶-۱ نرم خطای دقیق، نرم خطای تقریبی و شاخص تاثیر تیر طره تیموشنکو..... ۱۲۱
جدول ۶-۲ نرم خطای دقیق، نرم خطای تقریبی و شاخص تاثیر صفحه نامحدود سوراخدار..... ۱۲۷

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

همگام با رشد علوم و فناوری، مسائل مهندسی نیز روز به روز پیچیده تر می‌شوند. با پیچیده تر شدن مسائل ولزوم حل سریعتر و دقیق تر آنها، روشهای تحلیلی دیگر جوابگوی نیازهای روز افزون جوامع نیستند. با چنین نگرشی، محققان همواره سعی کردند در کنار توسعه مبانی علوم، روشهای عددی را نیز توسعه بخشند.

دراین مسیر، روشهای متعددی توسط محققین ابداع گشته است. از مهمترین اینها می‌توان به روش تفاضلهای محدود، روش اجزای محدود، روش احجام محدود، روش المانهای مرزی و همچنین روش ایزوژئومتریک که از جملهٔ جدید ترین روش ها است، اشاره کرد. هر کدام از این روشها موارد کاربرد خاص خود را دارند وهنوز هم محققان درصدد رشد و توسعه این روشها و ابداع روشهای جدید هستند. روش اجزای محدود یکی از روشهایی است که کاربرد فراوانی در حل مسائل بسیاری از رشته‌های مهندسی وبه خصوص مسائل مکانیک جامدات دارد. ریشه‌های توسعه این روش را باید در اوائل دهه ۱۹۴۰ میلادی جستجو کرد. در سال ۱۹۴۳ کورانت معادله پواسون پیچش را توسط آنچه امروز المانهای مثلثی خطی نامیده می‌شود، حل کرد، اما کارهای وی مدتها ناشناخته ماند. روشهای اجزای محدود به شکل امروزی آن، ریشه در کارهای ترنر و همکاران وی در سال ۱۹۵۷ دارد. در سال ۱۹۶۰، کلاف نام اجزای محدود را بر این روش نهاد؛ و کاربرد این روش برای حل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای درسال ۱۹۶۵ توسط زینکویچ و چونگ پیشنهاد شد[۱].

تاکنون مقالات وکتابهای فراوانی در زمینه اجزای محدود نوشته شده‌اند و هنوز روشها و تکنیکهای جدیدی در این زمینه مطرح می‌شوند؛ اما از همان آغاز مدل سازی رخدادهای فیزیکی توسط کامپیوتر و شکل گیری مبانی اجزای محدود وجود خطاهای عددی درمحاسبات منشأ اصلی نگرانی بوده است؛ زیرا در فرایند جزء بندی یک محیط پیوسته و تبدیل آن به یک مسأ له کامپیوتری قابل مدیریت، یقینا نمی‌توان تمام اطلاعات موجود در مدل را که بوسیله معادلات دیفرانسیل پاره‌ای یا معادلات

انتگرالی مشخص و توصیف شده است، در بر گرفت.

خطای تقریبی در چنین شبیه سازیهایی چقدر است؟

چگونه ممکن است که بتوان خطا را اندازه گرفت، کنترل کرد وبطور موثر و قابل توجه مقدارآنرا کم کرد؟

اینها سوالاتی است که از آغاز بکارگیری روشهای عددی در مسائل مختلف علوم و مهندسی، متخصصان این رشته‌ها را با خود روبرو کرده است.

امید است که در پایان این تحقیق به این سوالات پاسخ داده شود، وراه برای تحقیقات بعدی آسانتر شده باشد.

۱-۲- روش اجزای محدود

روش کلاسیک تحلیل یک محیط پیوسته بدین قرار است که یک تابع تنش یا تغییرشکل که معادلات دیفرانسیل تعادل، روابط تنش- کرنش، و شرایط سازگاری را در هر نقطه از محیط پیوسته شامل شرایط مرزی برآورده سازد، تعیین می‌شود. با توجه به قیدهای معمولا پیچیده، تعداد حل‌های کلاسیک موجود، بسیارمحدود می‌باشد. به علاوه اکثر نتایج بدست آمده از روش‌های کلاسیک به صورت سریهای نا متناهی می‌باشد که در محاسبات علمی فقط چند جمله اول آنها به کار گرفته می‌شود که نتیجه آن ایجاد یک تقریب در نتایج است. در صورت عدم تعیین یک تابع صریح، می‌توان معادله دیفرانسیل تعادل را به کمک روش تفاوتهای محدود[۱]حل نمود، لیکن این روش نیز ایراداتی دارد که عدم ارضاء شرایط مرزی و عدم دقت در نتایج بدست آمده از جمله آن‌ها است[۲].

روش تقریبی دیگری که امروزه به عنوان یک ابزار قوی برای حل عددی محدوده وسیعی از مسائل هندسی است، روش اجزای محدود[۲] می‌باشد. در روش اجزای محدود، محیط پیوسته به اجزای هندسی ساده وکوچکتری که (جزء محدود) نامیده می‌شود، تقسیم می‌گردد. این عمل را جزء بندی کردن[۳] می‌گویند. سپس با انتخاب یک تابع شکل[۴] تغییر مکان، مشخصات مصالح وتنشهای داخلی برحسب تغییر مکانهای مجهول گره‌های هر یک از این اجزاء تعریف می‌گردد. با توجه به ترتیب قرارگیری اجزاء در کنار یکدیگر، معادلات آنها بر هم سوار شده و با منظور کردن نیروهای خارجی وشرایط تکیه گاهی درمحل گرها، معادلات تعادل کل سیستم بدست می‌آید. این معادلات نیروهای گرهی را به تغییر مکانهای گرهی ربط می‌دهند و ثابتهای آنها مشخصات هندسی و الاستیک اجزای محدود می‌باشد. با حل این معادلات تغییر مکانهای گرهی و با استفاده از آنها تنشهای داخلی محاسبه می‌شوند[۲].

---

[۱] *Finite difference*

[۲] *Finite Element*

[۳] *Discretizing*

[۴] *Shape Function*