بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: عمران و معماری

گروه: عمران – سازه

عنوان:

توسعه یک روش مناسب برای بازیافت تنش در تحلیل ایزوژئومتریک

دانشجو: عادل عبدالهی

استاد راهنما:

دکتر بهروز حسنی

استاد مشاور:

مهندس احمد گنجعلی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تابستان ۱۳۹۰

شماره :
تاریخ :
ویرایش : ـــــــ

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای : عادل عدالتی
رشته : عمران گرایش : سازه
تحت عنوان : : تودسم یک روش مناسب برای بازیافت بتن در تحلیل لرزه ای تونل
که در تاریخ ۹۰/۶/۳۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : بسیار خوب امتیاز ۱۸/۷) ☐ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱ـ عالی (۲۰ ـ ۱۹)
۲ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ ـ ۱۸)
۳ـ خوب (۱۷/۹۹ ـ ۱۶)
۴ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ ـ ۱۴)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استاد راهنما	بهروز حسنی	دانشیار	
۲ـ استاد مشاور	احمد گنجعلی	مربی	
۳ـ نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	سید علی حسینی	مربی	
۴ـ استاد ممتحن	رضا نازری	استادیار	
۵ ـ استاد ممتحن	سید هادی توکلی	استادیار	

رئیس دانشکده :

تقدیم به

روح پاک پدرم

که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم.

تشکر و قدردانی

اعتراف می کنم که نه زبان شکر تو را دارم و نه توان تشکر از بندگان تو، و اما بر حسب وظیفه از کلیه اساتید ارجمندم در طول سالهای تحصیل کمال تشکر را دارم. از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر بهروز حسنی که در طول تحقیق مشوق اینجانب بوده و همواره از ایده های خوب ایشان بهره مند گردیده ام، خاضعانه سپاسگزارم و آرزوی صحت و سلامتی برای ایشان از خداوند منان را خواستارم. همچنین از زحمات فراوان و بی دریغ جناب آقای مهندس احمد گنجعلی نیز تشکر نموده و امیدوارم در تمام مراحل زندگی موفق و پیروز باشند.

تعهد نامه

اینجانب عادل عبدالهی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران – سازه دانشکده عمران ومعماری دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه توسعه یک روش مناسب برای بازیافت تنش در تحلیل ایزوژئومتریک تحت راهنمایی دکتر بهروز حسنی متعهد می‌شوم:

- **تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.**
- **در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استنایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی استفاده نشده است.**
- **کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات ، آزمایشات و نو آوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد**
- **در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته و یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.**

۱۳۹۰/۶/۳۱

چکیده:

در این پایان نامه ابتدا به بررسی و معرفی برخی روشهای بازیافت تنش در اجزای محدود پرداخته شده است. پس از بررسی روشهای موجود روش LP در مقایسه با برخی روشهای متعارف بازیافت تنش در اجزای محدود، به منظور توسعه در تحلیل ایزوژئومتریک انتخاب گردید. دلیل این امر کارایی بالا و استفاده از قید باقیمانده معادله تعادل است که برای استفاده در روش تحلیل ایزوژئومتریک مناسب به نظر می‌رسد. در این راستا اصول تحلیل در روش ایزوژئومتریک و توابع پایه نربز که از ملزومات تحلیل در این محیط می‌باشد، بطور خلاصه معرفی شده است. سپس روابط و معادلات استفاده شده در روش LP سازگار با تحلیل ایزوژئومتریک بازنویسی می‌شوند. در این مرحله در تعریف میدان تنش بازیافتی، بدست آوردن نرم خطا، نوشتن معادله تعادل، تابع خطا و مشتق‌گیری از روابط، بطور دقیق از اصول تحلیل ایزوژئومتریک پیروی شده است. پس از تعیین روابط، کد نویسی روش مربوطه در محیط برنامه نویسی انجام شده و به برنامه اصلی تحلیل ایزوژئومتریک اضافه شده است. برای مقایسه کارآیی و صحت روش از سه مثال شناخته شده که حل دقیق آنها در دسترس می‌باشد، استفاده گردید. مثالهای بررسی شده عبارتند از: ۱) تیر طره تحت بار وارده در انتهای آن ۲) صفحه تحت کشش و دارای حفره در مرکز آن ۳) صفحه ترکدار تحت کشش. نتایج حاصل از برنامه به روش LP با روش بازیافت SPR در محیط ایزوژئومتریک مقایسه شده است. برای مقایسه از پارامترهای نرم خطای انرژی، شاخص تاثیر و بررسی تنش بازیافتی در برخی نقاط استفاده شده است. در بررسی خروجیهای برنامه بهبود در نتایج نسبت به روش SPR مشاهده شده است. در انتها درجه مناسب توابع نربز به منظور بازیافت تنش در محیط ایزوژئومتریک برای مثالهای ذکر شده به روش LP تعیین گردید.

کلمات کلیدی: اجزای محدود، تخمین خطا، بازیافت تنش، شاخص تاثیر، تحلیل ایزوژئومتریک، نرم خطای انرژی

فهرست مطالب

مقدمه

معرفی ۲

خطاها در روش اجزای محدود ۳

پیشینه علمی برآورد خطا ۴

فصل اول: تخمین خطا و بازیافت تنش در اجزای محدود

۱-۱- مقدمه ۹

۱-۲- روشهای برآورد خطا مبتنی بر بازیافت تنش (گرادیان) ۱۰

۱-۲-۱- روش میانگین گیری ۱۱

۱-۲-۲- روش تصویر L_2 ..... ۱۲

۱-۲-۳- روش بازیافت تنش بر مبنای نقاط فوق هم گرا **SPR** ۱۲

۱-۲-۴- روش بازیافت تنش بر مبنای تعادل در زیر دامنه‌ها **REP** ۱۴

۱-۴- معیارهای بیان خطا ۱۶

۱-۴-۱- مفهوم نرم ۱۶

۱-۴-۲- معیار انرژی ۱۷

۱-۴-۳- درصد خطای نسبی $\boldsymbol{\eta}$ ۱۸

۱-۴-۴- معیار L_2 ..... ۱۸

۱-۴-۵- جذر مجموع مربعات خطا ۱۹

۱-۴-۶- شاخص تأثیر $\boldsymbol{\theta}$ ۱۹

***فصل دوم:* روشهای بازیافت تنش در اجزای محدود**

۲-۱- مقدمه ۲۲

۲-۲- روش بازیافت درونیابی مینیمم مربعات متحرک **(MLSI)** ۲۳

۲-۲-۱- معرفی ۲۳

۲-۲-۲- روش بازیافت ۲۳

۲-۲-۳- مثال های عددی: ۲۶

۲-۲-۳-۱- مسئله تیر یک بعدی ۲۷
۲-۲-۳-۲- مسئله لاپلاس ۲۸
۲-۲-۳-۳- تیر کنسول ۳۰
۲-۲-۳-۴- مسئله ترک ۳۲
۲-۳- روش بازیافت تنش **LP** ۳۴
۲-۳-۱- معرفی ۳۴
۲-۳-۲- روش بازیافت تنش LP ۳۵
۲-۳-۳- مثال های عددی: ۳۹
۲-۳-۳-۱- مسئله یک بعدی ۳۹
۲-۳-۳-۲- مسئله دو بعدی ۴۴
۲-۳-۳-۳- صفحه با حفره‌ایی در مرکز آن ۴۷
۲-۴- مقایسه روشهای بازیافت ۴۹
۲-۴-۱- معرفی ۴۹
۲-۴-۲- موارد ارزیابی روشها ۵۰
۲-۴-۳- عوامل تاثیرگذار بر دقت میدان تنش بازیافت ۵۱
۲-۴-۴- مثال های عددی: ۵۲
۲-۴-۴- ۱- حدود مقایسه و کاربرد بعضی از جزئیات ۵۳
۲-۴-۴-۲- نتایج مطالعات عددی ۵۴
۲-۵- نتیجه گیری و جمع بندی ۶۲

فصل سوم: روش تحلیل ایزوژئومتریک

۳-۱- مقدمه ۶۵
۳-۲- روش ایزوژئومتریک ۶۵
۳-۲-۱- بی- اسپلاین و نربز ۶۷
۳-۲-۲- فرمول‌بندی روش ایزوژئومتریک ۷۱

فصل چهارم: توسعه روش بازیافت تنش LP در تحلیل ایزوژئومتریک

۴-۱- مقدمه ۸۰
۴-۲- تعریف میدان تنش بازیافت ۸۰

۴-۳- توسعه فرمول بندی روش بازیافت در محیط ایزوژئومتریک ۸۱
۴-۴- تعیین جملات معادله بازیافت ۸۴
۴-۴-۱- پارامتر $\overline{A}$ ۸۵
۴-۴-۲- پارامتر $\overline{C}$ ۸۶
۴-۴-۳- پارامتر $\overline{E}$ ۸۸
۴-۴-۴- پارامتر $\overline{B}$ ۸۸
۴-۴-۵- پارامتر $\overline{D}$ ۸۸
۴-۴-۶- پارامتر $\overline{F}$ ۹۰
۴-۵- تعیین مجهولات ۹۰

فصل پنجم: ارایه نتایج

۵۵-۱- مقدمه ۹۲
۵-۲- تیر طره تیموشنکو ۹۳
۵-۲-۱- بررسی فرضیات حل مسئله در روش تحلیل ایزوژئومتریک ۹۳
۵-۲-۲- بررسی شاخص تاثیر در روشهای بازیافت LP و SPR ۹۵
۵-۲-۳- نمایش و مقایسه کانتورهای نرم خطا برای حالات مختلف تحلیل ۱۰۲
۵-۲-۴- تعیین درجه بهینه به منظور بازیافت تنش به روش LP ۱۰۵
۵-۳- صفحه نامحدود سوراخدار ۱۰۹
۵-۳-۱- بررسی فرضیات حل مسئله در محیط تحلیل ایزوژئومتریک ۱۱۰
۵-۳-۲- بررسی شاخص تاثیر در روشهای بازیافت LP و SPR ۱۱۲
۵-۳-۳- نمایش و مقایسه کانتورهای نرم خطا برای دو روش بازیافت ۱۱۴
۵-۳-۴- تعیین درجه بهینه به منظور بازیافت تنش به روش LP ۱۲۰
۵-۴- صفحه ترکدار تحت تنش ۱۲۳
۵-۴-۱- بررسی فرضیات حل مسئله صفحه ترکدار در تحلیل ایزوژئومتریک ۱۲۵
۵-۴-۲- بررسی شاخص تاثیر در روشهای بازیافت LP و SPR ۱۲۷
۵-۴-۳- نمایش و مقایسه کانتورهای نرم خطا برای دو روش بازیافت ۱۳۰
۵-۴-۴- تعیین درجه بهینه به منظور بازیافت تنش به روش LP ۱۳۲

۵- ۵- نتیجه‌گیری و ارایه پیشنهادات ۱۳۸
۵-۵-۱- نتایج بدست آمده از روش بازیافت ۱۳۸
۵-۵-۲- ارائه پیشنهادات ۱۳۹
پیوست
أ. دیاگرام روش بازیافت تنش LP ۱۴۱
ب. مراجع ۱۴۲

فهرست اشکال

شکل ۱- ۲ محاسبهٔ سهم گره‌ها ۱۴

شکل ۲-۱ ناحیه محلی مشخص شده بمنظور محاسبه مشتق ۲۴

شکل ۲-۲ سرعت همگرایی روشها ۲۸

شکل ۲-۳ مقایسه کرنش در طول تیر ۲۸

شکل ۲-۴ سرعت همگرایی روشها ۲۹

شکل ۲-۵ مقایسه کرنش در جهت y ۲۹

شکل ۲-۶ میزان وابستگی بهبود روش به ضریب α ۳۰

شکل ۲-۷ مقایسه سرعت همگرایی در حالت P درجه دو ۳۰

شکل ۲-۸ مشخصات تیر با مش 16×4 المان چهارگرهی ۳۰

شکل ۲-۹ سرعت همگرایی با المان چهارگرهی ۳۱

شکل ۲-۱۰ کرنش برشی در x=6 برای حالت ۲۴ المان ۳۱

شکل ۲-۱۱ سرعت همگرایی و دقت با المان مثلثی ۳۲

شکل ۲-۱۲ مش‌بندی ناحیه نزدیک ترک با المان چهارگرهی ۳۳

شکل ۲-۱۳ نمودار سه مولفه کرنش برای سه روش FE, DI, AN ۳۴

شکل ۲-۱۴ نمایش نقاط در المان ۳۶

شکل ۲-۱۵ توزیع تنش ۴۱

شکل ۲-۱۶ سرعت همگرایی در x=1 ..... ۴۲

شکل ۲-۱۷ توزیع تنش بازیافتی و تحلیل اجزای محدود ۴۳

شکل ۲-۱۸ سرعت همگرایی بازیافت تنش برای المان درجه دو در گره x=1 برای حالت حل دقیق درجه ۳ ..... ۴۳

شکل ۲-۱۹ سرعت همگرایی بازیافت تنش المان درجه دو برای حالت استفاده از حل دقیق درجه دو ۴۴

شکل ۲-۲۰ میدان تنش دقیق درجه دو ۴۵

شکل ۲-۲۱ سرعت همگرایی بازیافت تنش مولفه σ_{xx} ۴۶

شکل ۲-۲۲ سرعت همگرایی بازیافت تنش مولفه σ_{yy} ۴۶
شکل ۲-۲۳ سرعت همگرایی بازیافت تنش مولفه σ_{xy} ۴۷
شکل۲-۲۴ هندسه صفحه مربع مسئله با بار وارده ۴۷
شکل۲-۲۵ مش های استفاده شده در تحلیل مسئله ۴۸
شکل۲-۲۶ سرعت همگرایی مولفه های تنش در نقطه داخلی با تغییر نوع مش ۴۸
شکل۲-۲۷ سرعت همگرایی مولفه تنش σ_{xx} در نقطه مرزی با تغییر نوع مش ۴۹
شکل ۲-۲۸ نحوه مش بندی صفحه سوراخدار ۵۴
شکل ۲-۲۹ نحوه مش بندی صفحه ترکدار ۵۵
شکل ۲-۳۰ سرعت همگرایی در صفحه ترکدار به روش REP ۵۶
شکل ۲-۳۱ سرعت همگرایی در صفحه ترکدار به روش LP ۵۸
شکل ۳-۱ نحوه مدل نمودن مرز در تحلیل ایزوژئومتریک و اجزای محدود ۶۶
شکل ۳-۲ شبکه نقاط کنترلی و سطح نربز مربوط به آن با توابع پایه درجه دو ۷۱
شکل ۳-۳ المان های ساخته شده به وسیله دهانه های گره ای نربز ۷۶
شکل ۵-۱ تیر طره در شرایط تنش مستوی ۹۳
شکل ۵-۲ آرایش نقاط کنترل مورد استفاده در مدلسازی تیر طره ۹۴
شکل ۵-۳ بردارهای گرهی مورد استفاده در مدلسازی تیر طره ۹۵
شکل ۵-۴ کانتور نرم خطا برای ۷۶ نقطه کنترل و درجه p=1 برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۴ نقاط گاوس ۱۰۳
شکل ۵-۵ کانتور نرم خطا برای ۷۶ نقطه کنترل و درجه p=2 برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۹ نقاط گاوس ۱۰۳
شکل ۵-۶ کانتور نرم خطا برای ۱۰۵ نقطه کنترل و درجه p=1 برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۴ نقاط گاوس ۱۰۴
شکل ۵-۷ کانتور نرم خطا برای ۱۰۵ نقطه کنترل و درجه p=2 برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۹ نقاط گاوس ۱۰۴
شکل ۵-۸ کانتور نرم خطا برای ۱۰۵ نقطه کنترل و درجه p=3 برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۱۶ نقاط گاوس ۱۰۵
شکل ۵- ۹ نمودار تنش بازیافت و حل دقیق برای سه درجه توابع پایه در حالت استفاده از۷۶ نقطه کنترل ۱۰۷
شکل ۵- ۱۰ نمودار تنش بازیافت و حل دقیق برای سه درجه توابع پایه در حالت استفاده از۱۰۵ نقطه کنترل ۱۰۸
شکل ۵- ۱۱ نمودار صفحه نامحدود سوراخدار تحت تنش واحد در جهت x ۱۰۹
شکل ۵-۱۲ مشخصات و شرایط مرزی دامنه مدلسازی شدهٔ صفحه نامحدود سوراخدار ۱۰۹

شکل ۵-۱۳ آرایش ۶۳ نقطه کنترلی مورد استفاده در مدلسازی صفحه سوراخدار ۱۱۱

شکل ۵-۱۴ آرایش ۹۰ نقطه کنترلی مورد استفاده در مدلسازی صفحه سوراخدار ۱۱۱

شکل ۵-۱۵ بردارهای گرهی مورد استفاده در مدلسازی صفحه سوراخدار ۱۱۲

شکل ۵-۱۶ کانتور نرم خطا برای ۶۳ نقطه کنترل و درجه $p=1$ برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۴ نقاط گاوس ۱۱۵

شکل ۵-۱۷ کانتور نرم خطا برای ۶۳ نقطه کنترل و درجه $p=2$ برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۹ نقاط گاوس ۱۱۶

شکل ۵-۱۸ کانتور نرم خطا برای ۹۰ نقطه کنترل و درجه $p=1$ برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۴ نقاط گاوس ۱۱۷

شکل ۵-۱۹ کانتور نرم خطا برای ۹۰ نقطه کنترل و درجه $p=2$ برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۹ نقاط گاوس ۱۱۸

شکل ۵-۲۰ کانتور نرم خطا برای ۹۰ نقطه کنترل و درجه $p=3$ برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۱۶ نقاط گاوس ۱۱۹

شکل ۵-۲۱ نمودار تنش بازیافت و حل دقیق برای سه درجه توابع پایه در حالت استفاده از ۶۳ نقطه کنترل ۱۲۱

شکل ۵-۲۲ نمودار تنش بازیافت و حل دقیق برای سه درجه توابع پایه در حالت استفاده از ۹۰ نقطه کنترل ۱۲۳

شکل ۵-۲۳ صفحه مربعی ترکدار تحت تنش کششی قائم ۱۲۴

شکل ۵-۲۴ نحوه قرارگیری ۶۶ نقطه کنترل در تحلیل به روش ایزوژئومتریک در صفحه ترکدار ۱۲۵

شکل ۵-۲۵ نحوه قرارگیری ۹۱ نقطه کنترل در تحلیل به روش ایزوژئومتریک در صفحه ترکدار ۱۲۵

شکل ۵-۲۶ نحوه قرارگیری ۱۲۰ نقطه کنترل در تحلیل به روش ایزوژئومتریک در صفحه ترکدار ۱۲۶

شکل ۵-۲۷ نحوه قرارگیری ۱۹۰ نقطه کنترل در تحلیل به روش ایزوژئومتریک در صفحه ترکدار ۱۲۶

شکل ۵-۲۸ چهار ترکیب بردارهای گرهی مورد استفاده در مدلسازی صفحه ترکدار ۱۲۷

شکل ۵-۲۹ نحوه اعمال شرایط مرزی در تحلیل به روش ایزوژئومتریک با ۶۶ نقطه کنترل ۱۲۷

شکل ۵-۳۰ نمودار تاثیر افزایش درجه توابع پایه بر درصد افزایش شاخص تاثیر ۱۲۹

شکل ۵-۳۱ کانتور نرم خطا برای ۶۶ نقطه کنترل و درجه $p=2$ برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۹ نقاط گاوس ۱۳۰

شکل ۵-۳۲ کانتور نرم خطا برای ۹۱ نقطه کنترل و درجه $p=2$ برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۹ نقاط گاوس ۱۳۱

شکل ۵-۳۳ کانتور نرم خطا برای ۱۲۰ نقطه کنترل و درجه $p=2$ برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۹ نقاط گاوس ۱۳۱

شکل ۵-۳۴ کانتور نرم خطا برای ۱۹۰ نقطه کنترل و درجه $p=3$ برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۱۶ نقاط گاوس ۱۳۲

شکل ۵-۳۵ نمودار تنش بازیافت و تنش تحلیلی در نقطه $(x=5,y=4.9)$ با استفاده از ۶۶ نقطه کنترل ۱۳۴

شکل ۵-۳۶ نمودار تنش بازیافت و تنش تحلیلی در نقطه $(x=5,y=4.9)$ با استفاده از ۹۰ نقطه کنترل ۱۳۵

شکل ۵-۳۷ نمودار تنش بازیافت و تنش تحلیلی در نقطه $(x=5,y=4.9)$ با استفاده از ۱۲۰ نقطه کنترل ۱۳۶

شکل ۵-۳۸ نمودار تنش بازیافت و تنش تحلیلی در نقطه $(x=5,y=4.9)$ با استفاده از ۱۹۰ نقطه کنترل ۱۳۷

فهرست جداول

جدول ۲-۱ حالتهای مختلف حل مسایل با دو روش LP و REP.....۵۴

جدول ۲-۲ درصد کلی پارامتر همگرایی $R(\eta^*)$ در مسئله ۱ با استفاده از دو روش SPR و LP.....۵۷

جدول ۲-۳ تاثیر شرایط مرزی در دو روش بر پارامتر خطای نسبی η^*.....۵۹

جدول ۲-۴ مقایسه سه روش توسط پارامتر خطای نسبی η^*بدون ناحیه مرزی.....۶۰

جدول ۲-۵ مقایسه سه روش توسط پارامتر خطای نسبی η^* برای آخرین مش‌بندی،بدون ناحیه مرزی با مشخص نمودن بهترین جواب.....۶۱

جدول ۲-۶ شاخص تاثیر برای حالت مختلف.....۶۲

جدول ۵-۱ نرم خطای دقیق، نرم خطای تقریبی و شاخص تاثیر برای ۷۶ نقطه کنترل و درجه p=1 برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۴ نقاط گاوس.....۹۷

جدول ۵-۲ نرم خطای دقیق، نرم خطای تقریبی و شاخص تاثیر برای ۷۶ نقطه کنترل و درجه p=2 برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۹ نقاط گاوس.....۹۸

جدول ۵-۳ نرم خطای دقیق، نرم خطای تقریبی و شاخص تاثیر برای ۱۰۵ نقطه کنترل و درجه p=1 برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۴ نقاط گاوس.....۹۹

جدول ۵-۴ نرم خطای دقیق، نرم خطای تقریبی و شاخص تاثیر برای ۱۰۵ نقطه کنترل و درجه p=3 برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۱۶ نقاط گاوس.....۱۰۰

جدول ۵-۵ نرم خطای دقیق، نرم خطای تقریبی و شاخص تاثیر برای ۱۰۵ نقطه کنترل و درجه p=2 برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۹ نقاط گاوس.....۱۰۱

جدول ۵-۶ درصد رشد شاخص تاثیر برای روش LP نسبت به SPR در تیر طره.....۱۰۲

جدول ۵-۷ مقادیر حداکثر نرم خطا در تیر طره.....۱۰۵

جدول ۵-۸ نرم خطای دقیق، نرم خطای تقریبی و شاخص تاثیر برای ۶۳ نقطه کنترل و درجه p=1 برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۴ نقاط گاوس.....۱۱۳

جدول ۵-۹ نرم خطای دقیق، نرم خطای تقریبی و شاخص تاثیر در شش حالت، برای هر دو روش بازیافت تنش در کل دامنه ۱۱۴
جدول ۵-۱۰ مقادیر حداکثر نرم خطا در صفحه سوراخدار ۱۲۰
جدول ۵-۱۱ نرم خطای دقیق، نرم خطای تقریبی و شاخص تاثیر برای ۶۶ نقطه کنترل و درجه $p=1$ برای هر دو روش بازیافت تنش برای ۴ نقاط گاوس ۱۲۸
جدول ۵-۱۲ نرم خطای دقیق، نرم خطای تقریبی و شاخص تاثیر در **۱۲** حالت، برای هر دو روش بازیافت تنش در کل دامنه ۱۲۹
جدول ۵-۱۳ تعداد المانهای تشکیل شده در فضای نربز ۱۳۳

مقدمه

- **معرفی**

همگام با رشد علوم و فناوری، مسائل مهندسی نیز روز به روز پیچیده تر می‌شوند. با پیچیده تر شدن مسائل و لزوم حل سریعتر و دقیق تر آنها، روشهای تحلیلی دیگر جوابگوی نیازهای روز افزون جوامع نیستند. با چنین نگرشی، محققان همواره سعی کرده‌اند 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 جدیدترین روش‌ها است، اشاره کرد. هر کدام از این روشها موارد کاربرد خاص خود را دارند و هنوز 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 و به 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. روش 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[1] پیشنهاد شد[۱].

[1] Zienkiewicz

تاکنون مقالات و کتابهای 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 در محاسبات و گسسته‌سازی محیط پیوسته منشأ اصلی نگرانی بوده است.

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

سوالی که از آغاز بکارگیری روشهای عددی در مسائل مختلف علوم و مهندسی، متخصصان این رشته‌ها با آن روبرو بوده اند این است که چگونه می‌توان خطا را اندازه گرفت، کنترل کرد و مقدار آن را کاهش داد.

با توجه به اینکه روش ایزوژئومتریک روشی نوظهور است که در چند سال اخیر توسط آقای هیوز مطرح شده است، به همین دلیل بر روی تخمین خطا در این روش کار چندانی صورت نگرفته است.

روش ایزوژئومتریک همانند روش اجزای محدود در زمره روشهای عددی قرار دارد و می‌توان از کارهای انجام شده در زمینه تخمین خطا در اجزای محدود استفاده کرده و در روش تحلیل ایزوژئومتریک پیاده سازی نمود. به همین دلیل در ادامه کلیاتی درباره‌ی تاریخچه تخمین خطا و خطاها در اجزای محدود مطرح می‌گردد.

- **خطاها در روش اجزای محدود**

روش اجزای محدود یک روش تقریبی است. با توجه به آنچه در قسمت قبل آمد، منابع خطا در روش اجزای محدود را می‌توان به سه گروه عمده تقسیم کرد[۲]:

۱- **خطای ناشی از تقریب زدن دامنه حل مسأله** : این خطا از آنجا ناشی می‌شود که درحالت کلی نمی‌توان دامنه حل مسأله را با المانهای مورد نظر به طور کامل پوشانید. برای مثال، یک صفحه دایره‌ای شکل را هیچگاه نمی‌توان با المانهای مثلثی خطی به طور کامل مدل نمود، هر

چند با ریزتر نمودن شبکه اجزای محدود می توان تا حد لازم به هندسه دقیق مسئله نزدیک شد.

۲- خطای ناشی از گرد کردن اعداد : این دسته از خطاها بستگی به سخت افزار و نرم افزار مورد استفاده برای محاسبات دارد. از آنجا که تعداد محدودی از ارقام یک عدد در رایانه ذخیره می‌شود، استفاده از این عدد در محاسبات باعث ایجاد خطا خواهد شد و به علت اینکه محاسبات معمولا به صورت زنجیروار به نتایج مراحل قبل وابسته است، این موضوع باعث گسترش خطا در تمامی‌حل می‌گردد. بر خلاف سایر انواع خطاها، ریزتر نمودن شبکه المان بندی معمولا این دسته از خطاها را تشدید می‌کند. برای کاهش این دسته از خطاها، باید به صورت سخت افزاری و یا نرم افزاری تعداد ارقامی‌از یک عدد را که در رایانه نگهداری می‌شود، افزایش داد که این کار با افزایش حافظه مورد نیاز و همچنین بالا رفتن زمان حل همراه است.

۳- خطای ناشی از گسسته سازی : عمده ترین منبع خطا در روش اجزای محدود بوده و ناشی از تقریب زدن میدان جابجایی به وسیله توابع شکل می‌باشد. این دسته از خطاها نیز با ریزتر کردن شبکه المان بندی و بالا بردن درجه توابع شکل مورد استفاده، کاهش می‌یابد.

این سه دسته خطا در حل عددی معادلات دیفرانسیل از آن جمله در حل معادلات الاستیسیته به روش تغییر مکان برای بدست آوردن مقدار جابجایی هر گره وارد می‌شود.

آنچه از این پس در این تحقیق به عنوان خطا مورد بحث قرار خواهد گرفت، خطای ناشی از گسسته سازی است و بنابراین همواره فرض بر آن خواهد بود که دامنه حل به طور کامل توسط المانهای مورد استفاده پوشیده شده و محاسبات نیز به صورت کاملا دقیق انجام می‌گیرد.

- **پیشینه علمی برآورد خطا**

از اولین مقاله‌هایی که در آن یک روش عمومی از تخمین خطا بیان شد، مقاله‌هایی است که توسط ریچاردسون[1] در سال ۱۹۱۰ نوشته شده است.

[1] L.F. Richardson