دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده عمران و معماری

رساله دکتری

توسعه روشهای نوین برای بازیافت تنش و برآورد خطا در تحلیل مسائل به روش ایزوژئومتریک

احمد گنجعلی

استاد راهنما:

دکتر بهروز حسنی

مهر 1392

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده عمران و معماری
گروه عمران

توسعه روشهای نوین برای بازیافت تنش و برآورد خطا در تحلیل مسائل به روش ایزوژئومتریک

دانشجو : **احمد گنجعلی**

استاد راهنما:

دکتر بهروز حسنی

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

مهر 1392

باسمه تعالی

شماره : ۹۲/ت ع/۱۳۸
تاریخ : ۹۲/۷/۲۲
ویرایش :

مدیریت تحصیلات تکمیلی

صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

فرم شماره ۱۲

بدینوسیله گواهی می شود آقای احمد گنجعلی دانشجوی دکتری رشته عمران به شماره دانشجویی ۸۸۱۸۲۶۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۸۸ در تاریخ ۹۲/۷/۲۱ از رساله خود با عنوان : **روشهای نوین برای باز یافت تنش و برآورد خطا در تحلیل مسائل به روش ایزوژئومتریک** دفاع و با اخذ نمره .....۱۹.۰..... به درجه : .....عالی..... نائل گردید.

الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ ☑ ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ – ۱۷ ☐

ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹– ۱۵ ☐ د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐ ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد ☐

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتربهروز حسنی	استاد راهنما	دانشیار	
۲	دکتررضا نادری	استاد مدعو داخلی	استادیار	
۳	دکتر علی کیهانی	استاد مدعو داخلی	استادیار	
۴	دکتر سهیل محمدی	استاد مدعو خارجی	استاد	
۵	دکتر امیر عباس عابدینی	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران:

تاریخ و امضاء:

تقدیم به روح پدرم،

محمدرضا گنجعلی

و

تقدیم به همسرم که به زندگی من معنایی دیگر بخشید.

تشکر و قدردانی:

حمد و سپاس پروردگار جهانیان را که الطاف رحمتش همگان را فرا گرفته و انوار حکمتش هدایتگر و روشنی بخش راه و طریق انسانهاست. رحمت واسعه الهی فرصتی مغتنم داد تا به اقتضای توان و وسع خود از محضر اساتیدی گرانقدر بهره جویم و ره توشه‌ای از بار علمی آنها برگیرم. در این رهگذر به رسم ادب خود را ملزم می‌دانم که با تواضع و از صمیم قلب مراتب سپاس و تشکر خالصانه خود را نسبت به این عزیزان ابراز نمایم.

در این رابطه از استاد راهنمای گرامی جناب آقای دکتر بهروز حسنی کمال تشکر و قدردانی را دارم؛ چرا که از ایشان در این هفت سالی که افتخار آشناییشان را داشتم، علاوه بر یادگیری نکات علمی ارزنده، درسهایی از اخلاق نیز آموختم. صبر و تواضع ایشان در برخورد با دانشجویان بسیار کم نظیر و مثال زدنی است. تمام امیدم این است که بعد از اتمام این رساله نیز بتوانم این ارتباط را حفظ نمایم و همواره از رهنمودهای ایشان در زندگی استفاده نمایم.

همچنین مراتب سپاس و قدردانی خود را نسبت به اساتید بزرگوار، آقایان دکتر نادری، دکتر توکلی، دکتر کیهانی، دکتر کلات جاری، دکتر علایی، دکتر احمدی و کلیه اساتید محترم دانشکده مهندسی عمران دانشگاه شاهرود که از محضرشان کسب فیض نموده‌ام، ابراز می‌نمایم. و لازم می دانم که از دوستان عزیزم از جمله، دکتر ناصر ظریف مقدم، دکتر مسعود مهدی زاده، مهندس مازیار کوشا، مهندس ابوالفضل حجت پناه، مهندس ابوذر میرزاخانی نیز تشکر نمایم.

اما پدرم، امیداوارم که روحتان همواره در رحمت ایزدی و در پرتو مهر اباعبدالله الحسین (ع) شاد باشد. تمام تلاشم را می‌کنم که در این دنیا ذخیره اخرویتان باشم. و از مادر مهربانم، که تمام زندگیم مدیون دعای خیر اوست؛ خاضعانه تشکر نموده، سلامتی، تندرستی و طول عمر ایشان را از خداوند مسئلت دارم.

در پایان از همسرم، که با صبر و راهنماییهای مدبرانه خود نقش مهمی در به پایان رساندن این رساله داشتند کمال قدردانی و تشکر را دارم و امیدوارم که روزی بتوانم قدردان زحماتشان باشم.

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج دراین پـایان نامه (رساله) نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات ، آزمایشات و نو آوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد .

مهر ماه سال یک هزار و سیصد و نود دو

چکیده:

استفاده از فناوری طراحی به کمک رایانه در تحلیل مسائل با استفاده از روش نوین ایزوژئومتریک دارای مزیت های فراوانی است که از جمله‌ی آنها حذف خطای مدلسازی هندسه می‌باشد؛ اما در روشهای عددی وجود خطا در تقریب تابع مجهول امری اجتناب ناپذیر است و همواره باعث نگرانی محققین در قابلیت اطمینان نتایج بوده است. در این رساله به توسعه روشهایی پرداخته می‌شود که با استفاده از آن بتوان میزان خطای حاصل از تحلیل ایزوژئومتریک را برآورد کرد. این مفاهیم در دو بخش اصلی تنظیم شده است.

در بخش اول به معرفی روش برآورد خطا مبتنی بر نقاط فوق همگرا در تحلیل ایزوژئومتریک مسائل تنش-کرنش مسطح، متقارن محوری و مسائل سه بعدی پرداخته شده است؛ و نشان داده خواهد شد که چرا نقاط انتگرال گیری گوسی در تحلیل ایزوژئومتریک دارای خاصیت فوق همگرایی هستند. در این روش، با استفاده از نقاط فوق‌همگرا، برای تابع مقادیر هریک از مؤلفه‌های میدان تنش در هر وصله، یک سطح فرضی ساخته می‌شود که از تنش ایزوژئومتریک دقیقتر است. 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. نتایج نشان دهنده کارایی مناسب تخمین کننده خطای پیشنهادی در برآورد خطای موجود در تحلیل مسائل تنش-کرنش مسطح، متقارن محوری و مسائل سه بعدی به روش ایزوژئومتریک می‌باشد.

در بخش دوم به معرفی یک روش ابداعی دیگر جهت بهبود تنش حاصل از تحلیل ایزوژئومتریک و برآورد خطای آن با استفاده از قید معادلات تعادل پرداخته شده است. در این روش با استفاده از ارضای معادلات تعادل در هر وصله از فضای محاسباتی تحلیل ایزوژومتریک یک سطح تنش بهبود یافته بدست می‌آید. این سطح تنش با استفاده از توابع شکل نربز هم مرتبه با توابع برآورد کننده تابع جابجایی ساخته می‌شود. ویژگی این برآورد کنند خطا عدم نیاز به نقاط انتگرال گیری گوسی به عنوان نقاط فوق همگرای تنش است. جهت بررسی کارایی این برآورد کننده خطا به مدلسازی و تحلیل شش مسئله الاستیسیته دارای حل تحلیلی و مقایسه نتایج بدست آمده از این روش با روش مبتنی بر نقاط فوق همگرا و نتایج دقیق پرداخته شده است. نتایج نشان دهنده کارایی بهتر این روش نسبت به روش بازیافت تنش بر پایه استفاده از خاصیت نقاط فوق همگرا است و بر این اساس می توان از این روش نیز به عنوان یک روش ساده و موثر دیگر جهت بازیافت تنش و برآورد خطا در روش ایزوژئومتریک نام برد.

کلمات کلیدی: تحلیل ایزوژئومتریک، برآورد خطا، بازیافت تنش، نقاط فوق همگرا، معادلات تعادل

لیست مقالات حاصل از تحقیقات این رساله

مقالات ژورنالی(ISI):

- Hassani, B; Ganjali, A; Tavakkoli, M; (2012) "**An isogeometrical approach to error estimation and stress recovery**", *European Journal of Mechanics A/Solids*, 31, 101-109.

مقالات چاپ شده در نشریات علمی پژوهشی (ISC):

- بهروز حسنی؛ احمد گنجعلی؛ مهدی توکلی؛ (1390) " **برآورد خطا و بهبود میدان تنش بدست آمده از تحلیل مسائل به روش ایزوژئومتریک** " مجله (ISC) و علمی- پژوهشی مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، دوره 22، شماره 2، صفحه 17-32.
- بهروز حسنی؛ احمد گنجعلی؛ ابوالفضل حجت پناه؛ (1390) " **تحلیل و بهینه سازی شکل سازه-های متقارن محوری با استفاده از تحلیل ایزوژئومتریک** " مجله (ISC) و علمی- پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها دانشگاه صنعتی شاهرود، دوره 1، شماره 1، صفحه 1-13.
- بهروز حسنی؛ احمد گنجعلی؛ (1391) " **استفاده از نیروهای وارد بر وصله‌های تحلیل ایزوژئومتریک جهت محاسبه تنش بهبود یافته و برآورد توزیع خطا** " مجله (ISC) و علمی-پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها دانشگاه صنعتی شاهرود، دوره 2، شماره 2، صفحه 13-29.
- بهروز حسنی؛ احمد گنجعلی؛ " **بررسی تاثیر نقاط فوق همگرای تنش جهت بهبود حل و برآورد خطا در تحلیل ایزوژئومتریک مسائل متقارن محوری** " مجله (ISC) و علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقالات چاپ شده در کنفرانس‌ها:

- Hassani, B; Ganjali, A; Tavakkoli, M; (2010) "**Error Estimation and Stress Recovery in the Isogeometrical Analysis Method**", *The Fourth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC*), *Cape Town South Africa.*

- بهروز حسنی؛ احمد گنجعلی؛ عبدالغفور خادم الرسول؛ (1390) " **معرفی روشی هندسی جهت برآورد خطای موجود در تحلیل مسائل به روش ایزوژئومتریک** " ششمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، سمنان، دانشگاه سمنان، ایران.
- بهروز حسنی؛ احمد گنجعلی؛ عبدالغفور خادم الرسول؛ (1390) " **برآورد خطای موجود در تحلیل ایزوژئومتریک صفحهٔ ترکدار تحت کشش**" نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک ایران، بیرجند، دانشگاه بیرجند، ایران.

- بهروز حسنی؛ احمد گنجعلی؛ ابوالفضل حجت پناه منتظری؛ (1390) " **بررسی عملکرد روش ایزوژئومتریک در بهینه سازی شکل سازه های متقارن محوری** " کنفرانس هوافضای ایران، تهران، دانشگاه شهید ستاری.
- بهروز حسنی؛ احمد گنجعلی؛ (1391) " **نقاط فوق همگرای تنش در تحلیل ایزوژئومتریک** " نهمین کنفراس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.
- بهروز حسنی؛ احمد گنجعلی؛ ابوالفضل حجت پناه منتظری؛ (1391) " **بهینه سازی شکل سازه های متقارن محوری با استفاده از تحلیل ایزوژئومتریک** " نهمین کنفراس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.
- بهروز حسنی؛ احمد گنجعلی؛ (1391) " **استفاده از معادلات تعادل جهت بازیافت تنش و برآورد خطا در تحلیل مسائل به روش ایزوژئومتریک** " اولین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و فناوریهای پیشرفته، هتل بین المللی عباسی، اصفهان، ایران.

فهرست مطالب

فصل اول

مقدمه و کلیات

1-1- مقدمه 2

1-2- روش اجزای محدود 3

1-3- منابع خطا در روش اجزای محدود 4

1-4- پیشینه علمی برآورد خطا و آنالیز تطبیقی در اجزای محدود 5

1-5- هدف و تشریح مسأله در این رساله 7

فصل دوم

برآورد کننده‌های خطا در روش اجزای محدود

2-1- مقدمه 11

2-2- روشهای برآورد خطا مبتنی بر محاسبه مانده‌ها 12

2-3- روشهای برآورد خطا مبتنی بر بازیافت تنش (گرادیان) 14

2-3-1- روش میانگین گیری 16

2-3-2- روش تصویر L_2 16

2-3-3- روش بازیافت تنش بر مبنای نقاط فوق هم گرا SPR 17

2-3-4- روش بازیافت تنش بر مبنای تعادل در زیر دامنه‌ها، REP 19

2-3-5- شکل بهبود یافته روش بازیافت تنش بر مبنای تعادل در زیر دامنه‌ها 20

2-3-6- روش بازیافت تنش بر پایه درونیابی مینیمم مربعات متحرک (MLSI) 21

2-3-7- بهبود روش SPR با اضافه کردن معادلات و شرایط مرزی (SPRE) 24

2-3-8- روش بازیافت تنش LP 24

2-4- معیارهای بیان خطا 27

2-4-1- مفهوم نرم 28

2-4-2- معیار خطای انرژی 28

2-4-3- درصد خطای نسبی $\boldsymbol{\eta}$ 29

2-4-4- معیار خطای L_2 30

2-4-5- جذر مجموع مربعات خطا 31

2-4-6- شاخص تأثیر $\boldsymbol{\theta}$ 32

2-4-7- تعریف شاخص x_i 32

فصل سوم

روش بازیافت تنش و برآورد خطا در تحلیل ایزوژئومتریک مسائل تنش-کرنش مسطح

3-1- مقدمه 36

3-2- روش ایزوژئومتریک 37
3-2-1- بی- اسپلاین و نربز 38
3-2-2- فرمول‌بندی روش ایزوژئومتریک در مسائل تنش-کرنش مسطح 41

3-3- تشریح روش برآورد خطای مسائل تنش-کرنش مسطح، بر مبنای استفاده از نقاط فوق همگرای گوسی ... 49
3-3-1- دلیل دقت بیشتر تنش، در نقاط گوسی تحلیل ایزوژئومتریک 52

3-4- تیر دو سر مفصل تحت بار گسترده 57

3-5- تیر طره دایره‌ای شکل 60

3-6- صفحه دایره‌ای تحت بار متمرکز فشاری 66

3-7- بررسی تعداد بهینه نقاط انتگرالگیری گوس به عنوان نقاط فوق همگرای تنش 69

فصل چهارم

بازیافت تنش و برآورد خطا در تحلیل ایزوژئومتریک مسائل متقارن محوری

4-1- مقدمه 72

4-2- سازه‌های دارای تقارن محوری 72

4-3- فرمولبندی تحلیل ایزوژئومتریک در مسائل متقارن محوری 73

4-4- تشریح روش برآورد خطا در مسائل متقارن محوری 76

4-5- لوله بلند جدار ضخیم تحت فشار داخلی و خارجی 78

4-6- صفحه دایره‌ای شکل تحت بار متمرکز 83

فصل پنجم

بازیافت تنش و برآورد خطا در تحلیل ایزوژئومتریک مسائل سه بعدی

5-1- مقدمه 89

5-2- تولید هندسه سه بعدی با استفاده از تکنیک نربز 89

5-3- فرمولبندی تحلیل ایزوژئومتریک در مسائل سه بعدی 91

5-4- نحوه محاسبه تنش بهبود یافته در مسائل سه بعدی 96

5-5- تیر طره مکعب مستطیلی 97

5-6- تیر طره استوانهای 103

فصل ششم

بهبود تنش و برآورد خطا با استفاده از تعادل در هر وصله از تحلیل ایزوژئومتریک

6-1- مقدمه 110

6-2- نحوه تشکیل سطح تنش بهبود یافته بر مبنای استفاده از تعادل در هر وصله از تحلیل ایزوژئومتریک 111

6-3- تیر دو سر مفصل تحت بار گسترده 117

6-4- تیر طره تیموشنکو 121

6-5- صفحه ترکدار تحت کشش 125

6-6- تیر طره دایرهای شکل 129

6-7- صفحه نامحدود سوراخدار 133

6-8- صفحه دایرهای تحت بار متمرکز فشاری 137

فصل هفتم

جمع بندی نتایج و پیشنهادات

7-1- مقدمه 144

7-2- نتیجه گیری 145

3-7- پیشنهادات 150

پیوست

معرفی الگوریتم و برنامه تحلیل و برآورد خطای روش ایزوژئومتریک در مسائل تنش-کرنش مسطح، متقارن محوری و مسائل سه‌بعدی 153

مراجع 168

فهرست اشکال

شکل 2-1 عدم پیوستگی شیب در مرز المان 13

شکل 2- 2 محاسبهٔ سهم گره‌ها در روش SPR 18

شکل 2-3 ناحیه محلی مشخص شده بمنظور محاسبه مشتق 22

شکل 3-1 شبکه نقاط کنترلی و سطح نربز مربوط به آن 41

شکل 3-2 نقاط کنترلی مورد تاثیر هر المان از دامنه مدلسازی شده با چهار وصله و توابع شکل نربز درجه سه .. 43

شکل 3-3 المان‌های ساخته شده به وسیله دهانه‌های گره‌ای نربز[25] 47

شکل3-4 نقاط فوق همگرا در روش ایزوژئومتریک 56

شکل3-5 تیر دوسر مفصل تحت بار گسترده 57

شکل3-6 پارامترهای تعریف شده در حل تحلیلی تیر دوسر مفصل تحت بار گسترده[54] 57

شکل3-7 نقاط کنترلی مورد استفاده در مدلسازی تیر دوسر مفصل تحت بار گسترده 58

شکل 3-8 سطح تنش $\boldsymbol{\sigma}_x$ تیر دو سر مفصل تحت بار گسترده 59

شکل 3-9 سطح تنش $\boldsymbol{\tau}_{xy}$ تیر دو سر مفصل تحت بار گسترده 60

شکل 3-10 نحوه توزیع نرم خطای انرژی تیر دو سر مفصل تحت بار گسترده 61

شکل 3-11 تیر طره دایره‌ای شکل 62

شکل 3-12 نحوه آرایش و شماره گذاری نقاط کنترلی تیر طره دایره‌ای شکل 63

شکل 3-13 کانتور تنش s_y تیر طره دایره‌ای شکل 64

شکل 3-14 نحوهٔ توزیع نرم خطای انرژی دقیق و تقریبی تیر طره دایره‌ای شکل 65

شکل 3-15 صفحه دایره‌ای تحت بار متمرکز فشاری 66

شکل 3-16 آرایش نقاط کنترلی و المانبندی در صفحه دایرهای تحت فشار 67

شکل 3-17 نحوهٔ توزیع نرم خطای انرژی صفحه دایرهای 68

شکل 3-18 نقاط گوسی استفاده شده به عنوان نقاط فوق همگرای تنش 69

شکل 4-1 تحلیل دو بعدی در حالت تقارن محوری 73

شکل4-2 لوله جدار ضخیم تحت فشار داخلی و خارجی 78

شکل 4-3 نقاط کنترلی و شرایط مرزی لوله جدار ضخیم تحت فشار داخلی و خارجی 79

شکل 4-4 کانتور تنش مولفه s_r لوله جدار ضخیم 80

شکل 4-5 توزیع نرم خطای انرژی لوله جدار ضخیم 81

شکل 4-6 نمودار تغییرات مولفه‌های تنش لوله جدار ضخیم در مسیر Z=0.5 82
شکل 4-7 صفحه دایره‌ای شکل تحت بار متمرکز در مرکز 83
شکل 4-8 نقاط کنترلی و شرایط مرزی صفحه دایره‌ای تحت بار متمرکز در مرکز 84
شکل4-9 توزیع نرم خطای انرژی صفحه دایره‌ای 85
شکل4-10 نمودار تغییرات مولفه‌های تنش صفحه دایره‌ای در مسیر Z=0.25 86
شکل4-11 نمودار تغییرات مولفه‌های تنش صفحه دایره‌ای در مسیر R=0. 5 87
شکل 5-1 شبکه نقاط کنترلی و حجم نربز مربوط به آن 90
شکل 5-2 شرایط مرزی یک مسئله الاستیسیته 94
شکل 5-3 تیر طره با مقطع مستطیلی [54] 97
شکل 5-4 توزیع تنش s_x تیر طره مکعب مستطیلی 99
شکل 5-5 نحوه توزیع نرم خطای L_2 تنش s_x 100
شکل 5-6 نحوه توزیع نرم خطای L_2 تنش t_{xy} 101
شکل 5-7 نحوه توزیع نرم خطای L_2 تنش t_{zx} 102
شکل 5-8 تیر طره با مقطع دایره[54] 103
شکل 5-9 توزیع تنش s_x تیر طره استوانهای 105
شکل 5-10 نحوه توزیع نرم خطای L2 تنش s_x تیر طره استوانهای 106
شکل 5-11 نحوه توزیع نرم خطای L2 تنش t_{xy} تیر طره استوانهای 107
شکل 5-12 نحوه توزیع نرم خطای L2 تنش t_{zx} 108
شکل 6-1 مدلسازی یک مسئله دوبعدی در روش ایزوژئومتریک 112
شکل6-2 نقاط کنترلی و شرایط مرزی مدلسازی شده در تحلیل ایزوژئومتریک تیر دو سر مفصل تحت بار گسترده 118
شکل 6-3 نحوه توزیع نرم خطای انرژی تیر دو سر مفصل تحت بار گسترده 119
شکل6-4 نمودار تغییرات مولفه تنش s_y تیر دو سر مفصل تحت بار گسترده در مسیر y=1/96 120
شکل6-5 نمودار تغییرات مولفه تنش t_{xy} تیر دو سر مفصل تحت بار گسترده در مسیر y=1/0 120
شکل 6-6 تیر طره در شرایط تنش مستوی 121
شکل 6-7 نقاط کنترلی و شرایط مرزی مدلسازی شده در تحلیل ایزوژئومتریک تیر طره تیموشنکو 122
شکل 6-8 نحوه توزیع نرم خطای انرژی تیر طره تیموشنکو 123
شکل6-9 نمودار تغییرات تنش تیر طره تیموشنکو در مسیر x=0/1 124

شکل6-10 نمودار تغییرات مولفه تنش s_y تیر طره تیموشنکو در مسیر y=1/9 125
شکل 6-11 صفحه مربعی ترکدار تحت تنش کششی 126
شکل 6-12 نقاط کنترلی و شرایط مرزی مدلسازی شده در تحلیل ایزوژئومتریک صفحه ترکدار 127
شکل 6-13 نحوه توزیع نرم خطای انرژی صفحه ترکدار تحت کشش 128
شکل 6-14 نحوه توزیع تنش‌های s_x , s_y صفحه ترکدار تحت کشش 129
شکل 6-15 نقاط کنترلی و شرایط مرزی مدلسازی شده در تحلیل ایزوژئومتریک تیر طره دایره‌ای 130
شکل 6-16 نحوه توزیع نرم خطای انرژی تیر طره دایره‌ای 131
شکل6-17 نمودار تغییرات تنش تیر طره دایره‌ای در مسیر x=0/04 132
شکل 6-18 صفحه نامحدود سوراخدار 133
شکل 6-19 دامنه مدلسازی شدهٔ صفحه نامحدود سوراخدار 133
شکل 6-20 نقاط کنترلی و شرایط مرزی مدلسازی شده در تحلیل ایزوژئومتریک صفحه نامحدود سوراخدار ... 134
شکل 6-21 نحوه توزیع نرم خطای انرژی صفحه نامحدود سوراخدار 135
شکل6-22 نمودار تغییرات مولفه تنش s_x صفحه نامحدود سوراخدار در مسیر x=1/0 136
شکل6-23 نمودار تغییرات مولفه تنش s_y صفحه نامحدود سوراخدار در مسیر y=1/0 136
شکل 6-24 شبکه نقاط کنترلی در مدلسازی صفحه دایره‌ای 137
شکل 6-25 نحوه توزیع نرم خطای انرژی صفحه دایره‌ای تحت بار متمرکز فشاری 139
شکل 6-26 نحوه توزیع تنش s_x صفحه دایره‌ای تحت بار متمرکز فشاری 140
شکل 6-27 نحوه توزیع تنش s_y صفحه دایره‌ای تحت بار متمرکز فشاری 141
شکل 6-28 نحوه توزیع تنش t_{xy} صفحه دایره‌ای تحت بار متمرکز فشاری 142

فهرست جداول

جدول 3-1 مقادیر شاخص تاثیر برآورد کننده خطا، برای نقاط گوسی مختلف 69

فصل اول

مقدمه و کلیات

1-1- مقدمه

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 1940 میلادی جستجو کرد. در سال 1943 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 1957 دارد. در سال 1960، کلاف نام «اجزای محدود» را بر این روش نهاد؛ و کاربرد این روش برای حل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای[1] درسال 1965 توسط زینکویچ پیشنهاد شد[1].

تاکنون مقالات و کتابهای فراوانی در زمینه توسعه روشهای عددی نوشته شده‌اند و هنوز روشها و تکنیکهای جدیدی در این زمینه مطرح می‌شوند تا بتوانند نتایج با دقت مطلوبتری را ارائه دهند؛ اما از همان آغاز مدل سازی رخدادهای فیزیکی توسط کامپیوتر و شکل گیری مبانی روشهای عددی در تحلیل مسائل مهندسی وجود خطا در محاسبات منشأ اصلی نگرانی بوده است.

[1] Partial Differential Equations