بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی عمران

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه

بکارگیری روش های محاسباتی تکراری به همراه پردازش موازی در تحلیل غیرخطی سازه ها

مولف:

علی مقامی

استاد راهنما:

دکتر حامد صفّاری

استاد مشاور:

دکتر محمّد جواد فدایی

شهریور ماه ۱۳۹۲

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی عمران

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو : علی مقامی

استاد راهنما : دکتر حامد صفّاری

استاد مشاور : دکتر محمّد جواد فدایی

داور ۱ : دکتر رضا رهگذر

داور۲ : دکتر پیمان ترک‌زاده ماهانی

نماینده تحصیلات تکمیلی : دکتر علی اکبر مقصودی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر مریم احتشام زاده

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است

تقدیم به :

پدر فداکار و مادر مهربانم، آنها که:

من، این نوشته و بسی ناگفته های دیگر،

وامدار تلاش های وصف ناشدنی شان می باشند.

و تقدیم به خواهر و برادر عزیزم، آنها که:

در سایهٔ حمایت های بیدریغشان، انجام این تحقیق به مقصود رسید.

تقدیر و سپاسگزاری:

اگرچه زبان از ذکر عنایات و الطاف الهی قاصر است اما خداوند بزرگ را سپاس که در کلیه مراحل زندگی همواره یاور من بوده است و آتش عشق به تحصیل علم را در وجودم شعله ور ساخت.

با تشکر و قدردانی فراوان محضر استاد عزیزم جناب آقای پروفسور حامد صفّاری که در طول دوره تحصیل و به خصوص انجام این تحقیقات، همواره راهنما و حامی این حقیر بوده و از هیچ گونه لطف و مرحمتی در حق اینجانب مضایقه ننمودند.

با تشکر از جناب آقای مهندس ایمان منصوری که در تمام مراحل پایانامه با نظارت و راهنمایی موجب به سرانجام رسیدن این پایانامه شدند.

از داوران گرامی، جناب آقایان دکتر رضا رهگذر و دکتر پیمان ترک‌زاده ماهانی که قبول زحمت نموده و داوری این پایان‌نامه را انجام دادند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از پدر و مادر بزرگوار و مهربانم که تمامی زندگی خود را مرهون حمایت های عاشقانه ایشان هستم، بینهایت سپاسگزارم .همچنین از خواهر و برادرم که همواره مشوق و امیددهنده در مراحل زندگی ام بوده اند، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

و در پایان، همه این تحقیق و تحصیل را مدیون شادروانان مهندس افضلی پور و همسر ایشان خانم فاخره صبا می دانم، انسان های بزرگ و با ایثار که کلمات در وصف آنها عاجز می باشند. روحشان شاد.

چکیده:

در روند تحلیل غیرخطی سازه‌ها، معمولا شکل آشکار و صریحی از حل دستگاه معادلات غیرخطی وجود ندارد. محققان با صرفنظر از پاره‌ای اثرات، روش‌های گوناگونی برای یافتن پاسخ این معادله ها پیشنهاد نموده اند. در روند تحلیل غیرخطی سازه ها بدلیل وجود نقطه‌های حدی و برگشت‌ها در مسیر تعادل سازه، انتخاب الگوی مناسب حل معادلات امری دشوار است. معمولا در روش‌های ارائه شده از تحلیل‌های خطی استفاده گردیده، سپس با انجام شیوه‌های تکراری ساده و یا پیشرفته، همگرایی در مسیر ایستایی سازه حاصل شده است. در این پایان‌نامه، روش گرادیان مزدوج دوگانه‌ی پیش شرط دار به همراه روش نیوتن رافسون در تحلیل غیرخطی سازه ها مورد استفاده قرار گرفته است. پیش‌شرط گذاری به همراه روش گرادیان مزدوج دوگانه اصلاح شده، توانایی یافتن پاسخ دستگاه معادلات غیرخطی را به صورت مستقیم دارا است. با آنالیز چند خرپای شناخته شده دقت و کارایی روش گرادیان مزدوج دوگانه پیش شرط دار مورد بررسی قرار گرفت و برای کاهش زمان محاسبات، ماتریس پیش‌شرط مناسبی برای تحلیل غیرخطی سازه ها پیشنهاد گردید. این ماتریس پیش‌شرط توانایی بروزرسانی در برخی گام‌ها را دارست. نتایج نشان میدهد که این روش در عین حال که موجب کاهشی چشمگیر در زمان محاسبات می‌گردد، توانایی بررسی رفتار سازه‌ها با رفتار غیرخطی پیچیده را داشته و از دقت و کارایی خوب و قابل قبولی برخوردار است.

کلمات کلیدی: تحلیل غیرخطی، روش‌های تکراری، گرادیان مزدوج دوگانه، پیش‌شرط گذاری.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اوّل

مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه و تعریف مسئله ۲

فصل دوّم

آشنایی با مفاهیم اساسی در روش تحلیل غیرخطی ۸

۲-۱ پیشگفتار ۹

۲-۲ مقایسه بین تحلیل‌های خطی و غیرخطی ۹

۲-۳ رفتار غیرخطی هندسی ۱۰

۲-۴ مفهوم انواع سختی در سازه ۱۵

۲-۵ رفتار غیرخطی مصالح ۱۵

فصل سوم

تحلیل غیرخطی سازه‌های اسکلتی ۱۹

۳-۱ پیشگفتار ۲۰

۳-۲ تحلیل غیر خطی خرپاهای فضایی ۲۰

۳-۲-۱ تحلیل غیرخطی خرپاهای فضایی با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی هندسی ۲۰

۳-۲-۲ تحلیل غیرخطی خرپاهای فضایی با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی مصالح ۲۳

۳-۳ تحلیل غیرخطی المان قاب دو بعدی ۲۴

۳-۳-۱ روابط نیرو-تغییرشکل در دستگاه مختصات عمومی و عضو ۲۴

۳-۳-۲ ماتریس سختی مماسی المان قاب دوبعدی ۲۷

فصل چهارم

روش های حل معادلات تعادل غیر خطی ۲۹

عنوان صفحه

۴-۱ پیشگفتار ۳۰
۴-۲ روش‌های اولیه حل معادلات تعادل غیرخطی ۳۰
۴-۲-۱ روش تکراری مستقیم ۳۰
۴-۲-۲ روش نموی خالص ۳۱
۴-۲-۳ روش تکراری-نموی نیوتن-رافسون ۳۲
۴-۳ روشهای پیشرفته حل معادلات تعادل غیرخطی ۳۹
۴-۳-۱ روش پارامتر سختی موجود ۴۰
۴-۳-۲ روش‌های نمو بار خودکار ۴۱
۴-۳-۲-۱ روش کنترل جابجایی ۴۳
۴-۳-۲-۲ روش طول کمان ۴۵
۴-۳-۲-۲ روش کار ثابت ۴۹
۴-۳-۲-۳ روش حداقل باقیمانده جابجایی ۵۱
۴-۳-۲-۴ روش الگوریتم جریان قائم ۵۳

فصل پنجم

روش پیشنهادی تحلیل غیرخطی براساس الگوریتم گرادیان مزدوج دوگانه‌پیش‌شرط دار ۶۱
۵-۱ پیشگفتار ۶۲
۵-۲ روش های تکراری ۶۲
۵-۲-۱ روش گرادیان مزدوج ۶۳
۵-۲-۲ گرادیان مزدوج دوگانه ۶۶
۵-۳ روش پیشنهادی الگوریتم گرادیان مزدوج دوگانه پیش‌شرط دار ۶۷
۵-۳-۱ پیش‌شرط گذاری ۶۹
۵-۳-۲ پیش‌شرط‌های مورد استفاده ۷۱
۵-۳-۳ حدس اولیه در تکرارها ۷۲

عنوان صفحه

فصل ششم

مطالعات عددی ۷۳

۶-۱ پیشگفتار ۷۴

۶-۲ تحلیل عددی بر اساس الگوریتم گرادیان مزدوج دوگانه‌ی پیش‌شرط دار ۷۴

۶-۲-۱ مثال شماره ۱:گنبد شئودوزی ۲۴ عضوی ۷۴

۶-۲-۲ مثال شماره ۲: خرپای هندسی ۱۵۶ عضوی ۷۶

۶-۲-۳ مثال شماره ۳: گنبد دایروی ۱۶۸ عضوی ۷۹

۶-۲-۴ مثال شماره ۴: خرپای شولدرز ۲۶۴ عضوی ۸۱

فصل هفتم

خلاصه، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۴

۷-۱ خلاصه و نتیجه‌گیری ۸۵

۷-۲ پیشنهادات ۸۶

منابع ۸۶

فهرست اشکال

عنوان صفحه

شکل (۲-۱) اثر غیرخطی تغییر شرایط مرزی یک تیر کنسول در اثر برخورد با جسم دیگر..... ۱۱
شکل (۲-۲) رفتار غیرخطی صفحه گنبدی شکل تحت بار سیال در بالای آن ۱۱
شکل (۲-۳) پاسخ یک ستون به بار محوری و جانبی ۱۱
شکل (۲-۴) هندسه خرپای دو عضوی ۱۱
شکل (۲-۵) جابجایی‌ها و تعادل سازه در اثر تغییر شکل‌های کوچک ۱۲
شکل (۲-۶) جابجایی‌ها و تعادل سازه در اثر تغییرشکل‌های بزرگ ۱۲
شکل (۲-۷) نمودار نیرو-جابجای برای خرپای دوعضوی ۱۴
شکل (۲-۸) مفاهیم انواع سختی ۱۵
شکل (۲-۹) نمودار تنش-کرنش در دو نوع فلز ۱۵
شکل (۲-۱۰) بررس رفتار غیرخطی سیستم یک درجه آزادی با رفتار غیرخطی مصالح..... ۱۶
شکل (۳-۱) نیروها و تغییر شکل عضو در مختصات عمومی عضو خرپا..... ۲۰
شکل (۳-۲) مختصات محلی عضو خرپا..... ۲۱
شکل (۳-۳) منحنی نیرو- تغییرشکل فرض شده برای بارگذاری و باربرداری در عضو خرپا..... ۲۴
شکل (۳-۴) نیروها و تغییر مکان‌ها در مختصات محلّی عضو قاب ۲۵
شکل (۳-۵) نیروها و تغییر مکان‌ها در مختصات عمومی عضو قاب..... ۲۵
شکل (۴-۱)- روش تکراری مستقیم..... ۳۱
شکل (۴-۲)- روش نموی خالص با نمو بار ثابت ۳۲
شکل (۴-۳) روش کنترل بار نیوتن-رافسون..... ۳۳
شکل (۴-۴) روش نیوتن-رافسون اصلاح شده ۳۳
شکل (۴-۵) مراحل حل معادله غیرخطی با استفاده از روش نیوتن-رافسون..... ۳۵
شکل (۴-۶) نحوه واگرایی در حل معادله غیرخطی با استفاده از روش نیوتن-رافسون..... ۳۵
شکل (۴-۷) تیرستون استوانه‌ای تحت اثر بار در وسط ۳۶
شکل (۴-۸) نحوه نمایش تکرارها ۳۷
شکل (۴-۹)- نقاط حدی (بازگشتی و فروجهش)..... ۳۹
شکل (۴-۱۰) روش پارامتر سختی موجود ۴۰

عنوان صفحه

شکل (۴-۱۱) چگونگی نموها در روشهای نموی خودکار.....۴۱
شکل (۴-۱۲) نمودار نیرو-جابجایی در روش کنترل جابجایی.....۴۴
شکل (۴-۱۳) روند تصویری مراحل روش طول کمان.....۴۸
شکل (۴-۱۴) روند تصویری مراحل روش کار ثابت.....۵۰
شکل (۴-۱۵)- کار انجام شده از اولین تکرار از یک نمو بار.....۵۰
شکل (۴-۱۶) روند تصویری مراحل روش حداقل باقیمانده جابجایی.....۵۲
شکل ۴-۱۷- الگوریتم جریان قائم.....۵۴
شکل ۴-۱۸- مسیر عمود شده بر بردار جواب ($y = Ax$) واقع در ($Span(A)$ ۵۵
شکل (۴-۱۹) مراحل تکرار تصحیح کننده در الگوریتم جریان قائم.....۵۶
شکل (۴-۲۰) مقایسه ی روش الگوریتم جریان قائم با سایر روش ها.....۵۹
شکل (۵-۱) مسیر جستجو در روش گرادیان مزدوج دوگانه و بهبود یافته.....۶۹
شکل (۶-۱) گنبد ژئودوزی مثال شماره ۱، (ابعاد برحسب سانتیمتر).....۷۵
شکل (۶-۲) تغییر مکان گره شماره۲ گنبد ژئودوزی مثال ۱.....۷۶
شکل (۶-۳) گنبد ۱۵۶عضوی مثال شماره ۲.....۷۸
شکل (۶-۴) تغییرمکان گره مرکزی گنبد ۱۵۶ عضوی مثال ۲.....۷۸
شکل (۶-۵) گنبد ۱۶۸ عضوی مثال ۳.....۸۰
شکل (۶-۶) تغییر مکان گره شماره ۲ گنبد ۱۶۸ عضوی مثال ۳.....۸۰
شکل (۶-۷) خرپای شولدرز ۲۶۴ عضوی مثال ۴.....۸۲
شکل (۶-۸) تغییرمکان گره مرکزی خرپای شولدرز ۲۶۴ عضوی مثال ۴.....۸۲

فهرست جداول

عنوان صفحه

جدول(۲-۱) : مقایسه بین تحلیل‌های خطی و غیرخطی ۹
جدول (۶-۱) مقایسه زمان محاسبات، در مثال شماره ۱ ..... ۷۶
جدول (۶-۲) مقایسه زمان محاسبات، در مثال شماره ۲ ..... ۷۹
جدول (۶-۳) مقایسه زمان محاسبات، در مثال شماره ۳ ..... ۸۱
جدول (۶-۴) مقایسه زمان محاسبات، در مثال شماره ۴ ..... ۸۳

فصل اوّل

مقدمه

۱-۱ مقدمه و تعریف مسئله

امروزه جهت آنالیز سازه ها اکثراً از تحلیل های خطی اسفاده می شود، تحلیل های خطی دارای فرضیاتی می‌باشد که بیش از حد رفتار واقعی سازه را ساده سازی می کند. این در حالی است که بخصوص در بارهای نزدییک بار نهایی دیگر فرضیات تحلیل های خطی برقرار نمی باشد. بنابراین در بسیاری از موارد تحلیل های غیر خطی جایگزین تحلیل های خطی شده اند. سیستم‌های غیرخطی معمولا توسط روش‌های نموی-تکراری حل می گردند. این روش‌ها به این صورت عمل می‌نمایند که با تغییر جزئی در بار اعمالی بر سازه، جابجایی کوچکی از آن را محاسبه می کنند. این روش‌ها به عنوان یک ابزار کاربردی در شناخت رفتار سازه‌ها بکار می‌روند. نکته قابل توجه در اینجاست که، در میان روش‌های موجود دو مشکل عمده مطرح است. اول این‌که در صورتی که رفتار غیرخطی سازه دارای پیچیدگی خاص باشد، آن‌گاه روند نموی-تکراری در همگرایی جواب‌ها و عبور از مسیر ایستایی ناتوان خواهد بود. دوم این‌که، در حالتی که تعداد درجات آزادی سازه زیاد باشد، تعدادتکرارها و زمان محاسبات در هر تکرار افزایش قابل توجهی پیدا می-کند، در نتیجه سرعت انجام تحلیل افزایش چشمگیری می‌یابد. بنا به همین دلایل در این پایان‌نامه، روشی بر پایه مفاهیم ریاضی نوین ارائه شده است. بطوریکه روش حاضر ضمن داشتن توانایی بالا جهت بررسی رفتار سازه‌های پیچیده، از سرعت بیشتری برخوردار بوده و در تعداد تکرارهای لازم جهت حل، کاهش قابل ملاحظه‌ای ایجاد می کند.

در اوایل دهه ۶۰ میلادی تکنیک نموی در ردیابی منحنی بار-تغییرمکان خرپاها و قاب‌ها توسعه داده شد [۱و۲]. در این تکنیک، بار اعمالی به تعدادی نمو کوچک تقسیم می گردد. پس از هر نمو بار، شکل هندسی و ماتریس سختی سازه، جهت لحاظ اثرات غیرخطی هندسی به روز رسانی می-شود. در هر نمو یک سری خطا وارد کار می‌شود که به صورت تجمعی به آن افزوده می‌شود. در رابطه با تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه ها اولین بار ماتریس سختی مماسی در دستگاه اویلرین با استفاده از تئوری تیر-ستون بدون در نظر گرفتن اندرکنش خمش و پیچش توسط محققین ارائه شده است [۳]. در این مطالعات اثرات انحناء در تغییر طول محوری عضو منظور شده است. همچنین ماتریس راهنمای گرهی برای دوران‌های کوچک گره ها نیز بیان شده است، لیکن ماتریس ارائه شده متعامد نبوده و خطاهای عددی در محاسبات ایجاد می کند. مقدار دقیق ماتریس راهنمای گرهی توسط «کاسیمالی» توسعه داده شده است [۴و۵]. اکثر مراجع از دستگاه مختصات لاگرانژین استفاده کرده اند و اثرات دوران های بزرگ اعضای سازه را در محاسبات مربوط به روابط نیرو-تغییر مکان منظور کرده اند [۵و۶و۷]. پس از آن رابطه سازی مناسبی جهت تحلیل

غیرخطی قاب‌های سه بعدی با در نظر گرفتن اثرات تغییرشکل‌های بزرگ و رفتار غیرخطی مواد ارائه شده است [۸]. محققین رابطه سازی مناسبی جهت در نظر گرفتن اثرات نیروی محوری بر روی سختی پیچشی برای مقاطع دارای دو محور تقارن و همچنین تحلیل غیرخطی مواد ارائه و رفتار قاب های سه بعدی را مورد بررسی قرار داده اند [۹]. در بعضی مراجع دیگر نقاط حدی بر روی مسیر ایستایی حاصل از رفتار غیرخطی سازها مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۰]. منظور از نقاط حدی، نقاط عطف برای مسیر تعادل سازه یا نقاط انتقال از حالت پایدار به حالت تعادل ناپایدار و بلعکس که شامل حالت فروجهش[1] و حالت برگشتی[2] است [۱۱]. در برخی مطالعات، براساس دستگاه مختصات لاگرانژین بهنگام شده، رفتار غیرخطی هندسی و مواد را برای المان تیر ستون ارائه کرده اند [۱۲].

از آنجا که در تحلیل غیرخطی سازه ها شکل آشکار و صریحی از حل دستگاه معادلات غیرخطی وجود ندارد، روش‌های متفاوتی جهت حل دستگاه معادلات غیرخطی ارائه شده اند. باید افزود نقاط حدی و همچنین برگشت های مسیر در منحنی بار تغییر مکان سازه نقش بسزایی در الگوی تحلیل خواهند داشت. به طوریکه برخی از روش‌ها در هنگام عبور از این نقاط ناتوان بوده و قادر به ارائه ی رفتار واقعی سازه نخواهند بود. چندین روش عددی جهت حل معادلات غیرخطی پیشنهاد شده است. برای نمونه روش نموی خالص[3] (بدون تکرار) که منحنی تعادل را به خوبی دنبال نمی‌کند و خطای محاسبات در این روش زیاد است. از میان روش های گوناگون حل دستگاه معادلات غیرخطی، تکنیک نموی-تکراری نیوتن-رافسون بیشترین کاربرد را دارد [۱۳]. اما این روش هنگام گذر از نقاط حدی دچار واگرایی میگردد و همچنین در تحلیل سازه های بزرگ نیازمند هزینه و صرف زمان زیاد خواهد بود. در سازه های با رفتار پیچیده، منحنی بار تغییر مکان ترکیبی از حالت های نرم شوندگی و سخت شوندگی با نقاط حدی است. در نتیجه تحلیل چنین سازه هایی با روش های نموی-تکراری ساده میسر نمی باشد[۱۴و۱۵]. در نسخه اصل روش نیوتن-رافسون، ماتریس سختی مماسی در هر مرحله‌ی تکرار تشکیل داده می‌شود و دستگاه معادلات خطی با ماتریس ضرایب جدید حل می‌گردد و این امر برای سازه‌ها با درجه آزادی زیاد در محاسبات کامپیوتری بسیار پر هزینه می‌باشد. برای کاهش زمان محاسبات روش اصلاح شده‌ی نیوتن-رافسون توسط محققین معرفی شده است، به‌طوری که برای مسائل سازه‌ای، ماتریس سختی فقط در ابتدای هر نمو بار به روز رسانی شده و در تکرارهای مربوط به هر نمو بار همان ماتریس

[1] Snap-through
[2] Snap-back
[3] Pure incremental method

سختی به کار گرفته می‌شود تا اینکه در ابتدای نمو بعدی دوباره به روز گردد. اصل روش نیوتن-رافسون در مقابل روش اصلاح شده آن زمان بیشتری را صرف به روز رسانی و معکوس کردن ماتریس سختی می‌کند لیکن در تعداد تکرار کمتری به همگرایی می‌رسد.

به جای استفاده از بار به عنوان پارامتری برای ردیابی بخشی از منحنی بار-جابجایی در نزدیکی نقطه حدی، «آرگریز» پیشنهاد استفاده از نمو مشخصی از جابجایی را داد به طوری که به عنوان یک پارامتر بار اعمالی را کنترل نماید که از بار حد نهایی کمتر باشد [۱۷]. در این روش تقارن ماتریس سختی حفظ نمی‌شود. که بعدها محققین، یک روند مناسبی تحت عنوان روش کنترل جابجایی را به طوری که تقارن ماتریس سختی را به هم نمی‌زد پیشنهاد کردند که مناسب برای برنامه‌های کامپیوتری می‌باشد. روش جابجایی ثابت یا کنترل جابجایی تنها از نقاط فروجهش عبور می‌کرد و قادر نبود از نقاط برگشتی عبور کند. روش‌های نموی-تکراری پیشرفته از آغاز دهه‌ی هفتاد میلادی مورد توجه محققین قرار گرفته است. به طوریکه محدوده ی تکرار با شعاع ثابت و بر روی یک صفحه فرضی قائم پیشنهاد گردید و مفهوم کنترل طول کمان برای مسائل فروجهش و برگشت ارائه شد، که البته با این روش تقارن ماتریس سختی به هم می‌خورد [۱۸و۱۹]. بر همین اساس محققین در مقالاتی، روش نموی -تکراری را پیشنهاد دادند که در آن معادله شرطی (قید) از مجموعه معادلات تعادل جدا می‌شود، که سبب می‌شود طبیعت متقارن و نواری[1] بودن ماتریس سختی که مناسب برای محاسبات اجزاء محدودی است حفظ شود. روش اخیر به طور چشمگیری، مورد توجه قرار گرفته و در اغلب الگوریتم های نرم افزارهای تحلیل غیرخطی استفاده شده است. زیرا در روش طول کمان، علاوه بر کاهش زمان مورد نیاز برای انجام روند تکرار، توانایی عبور از نقاط حدی را نیز فراهم کرده است [۱۷و۲۰و۲۱]. روش کار ثابت که کار انجام شده را در هر نمو بار را ثابت در نظر می‌گیرد، در مرجع [۲۲] معرفی گردیده است. محقیق ادعا می‌کنند که روش پیشنهادی آنها نسبت به روش طول کمان عملکرد بهتری را در نزدیکی نقاط حدی از خود نشان می‌دهد. بعدها روش حداقل سازی جابجایی باقیمانده را برای تحلیل غیرخطی هندسی و مصالح پیشنهاد گردید [۲۳]. روش‌های دیگری نیز بر اساس روش طول کمان معرفی شده است [۲۴].روش های تحلیل غیرخطی پیشرفته جهت بررسی رفتار پیچیده‌ی سازه ها به وجود آمده اند. در این روش ها نیاز به استفاده از یک معادله ی کمکی در حل معادله‌ی ایستایی خواهد بود. جهت نوشتن این رابطه، روش های گوناگون دیگری نیز، از جمله روش «فورد» و همکاران [۲۵] و یا روش «الراسبی» [۲۶] می‌توان اشاره داشت.

[1] Symmetry and band wide

ساختار روش های نموی-تکراری پیشرفته بر پایه ی روش طول کمان است. بر این اساس مطابق ضریب بار بدست آمده در هر تکرار، تراز بار به طور مناسبی به سوی منحنی مسیر ایستایی برگردانده می شود. این کار تا آنجا ادامه می یابد که همگرایی با دقت قابل قبولی حاصل شود. در این روش ها، برخلاف روش های نموی-تکراری ساده امکان عبور از نقاط حدی وجود دارد. از معایب برخی روش های نموی-تکراری پیشرفته موجود ناتوانی عبور از نقطه حدی در حالت رفتار غیرخطی شدید است[۱۰و۱۷].

محققین با با بکارگیری از روش الگوریتم جریان قائم به بررسی سازه‌های خرپایی پرداختند[۲۷]. سپس از این روش برای بررسی رفتار قاب‌ها استفاده شد [۲۸]. این روش تحلیل غیرخطی سازه‌ها در موارد مختلف دیگری نیز مورد استفاده قرار گرفت[۲۹]. محققین با استفاده از روش الگوریتم جریان قائم، علاوه بر عبور از نقاط حدی در رفتارهای غیرخطی شدید، تعداد تکرارها را در نزدیکی نقاط مذکور نیز، کاهش دادند. در الگوریتم جریان قائم به جای انجام عملیات تکرار متناسب با یکی از شیوه های طول کمان، تکرار در طول مسیر جریان قائم انجام می گردد[۲۷].

جهت تسریع در روند تحلیل غیرخطی سازه‌ها و کاهش حجم محاسبات، از دو روش برونیابی حداقل مربعات اصلاح شده[1] و تخمین پاده[2] جهت تسریع روند همگرایی جهت آنالیز پوسته های جدار نازک استفاده گردیده است[۳۰]. این روش به این صورت عمل می‌نماید که دارای تصحیح کننده هایی در هر تکرار می‌باشد، به طوریکه استفاده از این تصحیح کننده‌ها زمان محاسبات را افزایش نمی‌دهد. این روش زمانی موثر خواهد بود که روند همگرایی کند صورت بگیرد.

روش‌های متنوعی برای کوتاه کردن حجم محاسبات در روش نیوتن-رافسون توسط محققین ارائه شده است [۳۱و۳۲]. همچنین یک روش جدید بر پایه روش نیوتن رافسون برای تحلیل غیرخطی سازه ها توسط محققین ارائه شده است [۳۳]. آن ها از یک روش ریاضی به نام دو نقطه ای[3] بهره جستند که باعث افزایش نرخ همگرایی گردید. این روش بر اساس یک روش پیشگویی و اصلاح ساخته شده است. در این تکنیک، اطلاعات هر گام بارگذاری، برای گام بعدی استفاده می‌شود. سپس از این روش برای بررسی رفتار سازه در عبور از نقاط حدی نیز استفاده گردیده است [۳۴]. یک تکنیک دیگر در ریاضیات، روش اختلال هوموتوپی[4] می‌باشد که برای تحلیل الاستو-پلاستیک قاب‌های دو بعدی به کار رفته است [۳۵]. این روش یک ابزار جالب برای حل دستگاه

[1] Modified minimal polynomial extrapolation (MMPE)
[2] Pade approximants
[3] Two point method
[4] Homotopy perturbation method

غیر خطی و تبدیل آن به یک سری دستگاه خطی و یک سری دستگاه غیر خطی است که این مجموعه به صورت تکراری حل می شود. همچنین محققین با استفاده از روش سه نقطه‌ای[1] و بر اساس الگوریتم جریان قائم روشی را بیان نمودند که توانایی آنالیز سازه ها با رفتار پیچیده‌ی غیر خطی را در زمان کمتری دارا بود [۳۶]. برای کاهش حجم محاسبات در روند تکرارها، روشی ارئه شده است که موجب سرعت بخشیدن به همگرایی تکرارها می‌گردید نتایج بررسی محققین نشان می‌دهد که دقت و نرخ همگرایی در این روش نسبت به روش‌های پیشین بیشتر گردیده است [۳۷].

روش گرادیان مزدوج[2] یکی از مشهورترین و پرکاربردترین روش‌های تکراری برای حل دستگاه معادلات بزرگ است [۳۸]. یکی از ویژگی‌های بسیار مفید این روش در این است که حتی در صورتی که ماتریس ضرایب معادلات بسیار بزرگ باشد، بازهم با استفاده از این روش پاسخ می‌توان با دقت قابل قبولی پاسخ سیستم را بدست می‌آورد [۳۹]. محققین با استفاده از روش گرادیان مزدوج روشی جهت یافتن پاسخ سیستم‌های غیرخطی بزرگ ارائه دادند [۴۰]. آن‌ها روشی براساس روش گرادیان مزدوج ارائه نمودند که توانایی حل سیستم‌های غیرخطی را دارا بود لیکن نمی‌توانست از نقاط حدی عبور کند. اخیراً روش نیوتن-رافسون در مسیر الگوریتم جریان قائم با سه روش تکراری که توانایی حل معادلات با ماتریس ضرایب نامتقارن را دارا بودند، ترکیب شده است. محققین نشان دادند که در بین این روش‌ها، روش گرادیان مزدوج دوگانه[3] بهترین روش جهت به کارگیری به همراه روش نیوتن رافسون در تحلیل غیرخطی سازه‌ها است، چراکه در بین سه روش پیشنهادی، این روش دارای کمترین تعداد تکرار و کمترین زمان محاسبات بود. آن‌ها همچنین با بهبود دادن روش گرادیان مزدوج دوگانه توانستند روشی ارائه دهند که توانایی حل سیستم‌های غیرخطی را به‌طور مستقیم داراست. این روش زمان محاسبات و تعداد تکرارها را در تحلیل غیرخطی سازه‌ها به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد [۴۱].

روش گرادیان مزدوج دوگانه روشی پرکاربرد در مسائل علمی و مهندسی است. با به کارگیری از یک پیش‌شرط[4] مناسب می‌توان کارایی این روش را به طور چشمگیری افزایش داد. روش‌های تکراری معمولا به همراه یک پیش‌شرط (M) در مسائل مورد استفاده قرار می‌گیرند، که پیش‌شرط‌ها معمولا به صورت $MAx = Mb$ به سیستم اعمال می‌گردند. ماتریس (M) ماتریسی است

[1] Tree point method
[2] Conjugate gradient method
[3] BiConjugtae gradient method
[4] Preconditioner

که معکوس ماتریس ضرایب را به نحوی تقریب بزند. لازم به ذکر است که ماتریس M باید به سادگی قابل محاسبه باشد. در این پایان‌نامه، شیوه‌ای جدید براساس پیش‌شرط گذاری برای حل قسمت خطی مساله در تکرارهای مختلف روش‌های تکراری-نموی ارائه گردیده است. این شیوه همچنین به همراه الگوریتم گرادیان مزدوج دوگانه‌ی بهبودیافته[1]، توانای حل مسائل غیرخطی را به صورت مستقیم داراست. با انجام شیوه‌های مختلف آنالیز غیرخطی و حل مثال‌ها، هدف ارائه‌ی یک الگوریتم پیش‌شرط دار مناسب برای تحلیل غیرخطی سازه‌ها بوده است. برنامه‌ای براساس الگوریتم ارائه شده در نرم افزار متلب[2] نوشته شده که شامل روش‌های گرادیان مزدوج دوگانه‌ی پیش‌شرط‌دار[3] و الگوریتم گرادیان مزدوج دوگانه‌ی بهبود یافته[4] پیش‌شرط‌دار است، تا نتایج کار-های ارائه شده را به همراه کارهایی که قبلا ارائه شده است، مورد مقایسه قرار گیرند و نتایج اعمال سه پیش‌شرط مختلف بر روی هر کدام از الگوریتم‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد.

این پایان نامه در هفت فصل تدوین شده است. پس از شرح مسئله و اهداف آن در فصل اول، مختصر اشاره‌ای به تحقیقات پیشین صورت گرفته است. در فصل دوم با مثال‌هایی ساده سعی بر ارائه و آشنایی با مفاهیم تحلیل های غیرخطی بوده است. سپس در فصل سوم تحلیل غیرخطی سازه های اسکلتی با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی هندسی و رفتار غیرخطی مصالح بیان شده است. در فصل چهارم انواع روش‌های حل معادلات تعادل غیرخطی معرفی گردیده است، از آنجایی که در این تحقیق جهت رفع مشکل بررسی نقاط حدی در تحلیل‌ها از الگوریتم جریان استفاده شده است، این روش به طور مفصل مورد شرح و توضیح قرار گرفته است. روش پیشنهادی که بر اساس الگوریتم گرادیان مزدوج دوگانه پیش‌شرط‌دار به حل مسائل غیرخطی سازه ها می‌پردازد در فصل پنجم به تفضیل بیان گردیده است. در فصل ششم، برای بررسی صحت و همچنین توانایی روش پیشنهادی تعدادی مثال عددی موجود در مراجع قبلی، مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادات در فصل هفتم ارائه شده است.

[1] Improved BCG algorithm
[2] MATLAB
[3] Preconditioned BCG algorithm
[4] Preconditioned improved BCG algorithm

فصل دوّم

آشنایی با مفاهیم اساسی در روش تحلیل غیرخطی