بسم الله الرحمن الرحيم

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و
نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه رازی است.

دانشکده فنی مهندسی

گروه عمران

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی عمران گرایش سازه

عنوان پایان نامه

تحلیل مکانیزم شکست قاب‌های بتن آرمه تحت بارگذاری سیکلی با استفاده از روش اجزای محدود

استاد راهنما:

دکتر امیرهوشنگ اخویسی

نگارش:

بیتا امیری

بهمن ماه ۱۳۹۰

تقدیر و تشکر:

دانش کلی مانند خلیجی است، که من و همکارانم تنها چند دانه ریگ جالب از این پهنای گسترده برداشته‌ایم.

آیزاک نیوتن

سپاس و ستایش مر خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید. سر تعظیم بر آستان جانان می‌نهم که توفیق انجام این پژوهش را نصیب این بنده حقیر نمود.
بدینوسیله از زحمات بی‌دریغ، راهنمایی‌های ارزشمند و حمایت‌های همه‌جانبه جناب آقای دکتر امیرهوشنگ اخویسی، استاد راهنمای محترم پایان نامه حاضر کمال تشکر و قدردانی را دارم.
و در پایان از تمامی دوستان و عزیزانی که به نوعی از همکاریشان بهره برده‌ام، نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

بیتا امیری

بهمن ماه ۱۳۹۰

تقدیم به:

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

و به مادرم، دریای بی‌کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

خواهران و برادرانم به پاس عشق، محبت و همراهی بی‌دریغشان

و به:

همسر مهربان و فرهیخته‌ام که از آغاز راه همواره مشوق، پشتیبان و همگام من بوده و کمک‌های شایانی در به ثمر رسیدن پایان‌نامه نموده‌اند.

چکیده

کاربرد روش‌های اجزای محدود برای بررسی و توصیف رفتار غیرخطی سازه‌های بتن آرمه، به چنان مرحله‌ای رسیده است، که نتایج به‌دست آمده از این تحلیل‌ها، می‌تواند با تراز بالایی از اعتماد مورد قبول واقع گردد. زمانی‌که زلزله‌ای رخ داده و ارتعاشات لرزه‌ای اتفاق می‌افتد، حرکت زمین باعث ایجاد ارتعاش در سازه می‌شود، و بنابراین سازه به‌طور مکرر، تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار می‌گیرد. در بسیاری از موارد، استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی سازه‌ها تحت این شرایط سخت و پیچیده، یا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست و یا این‌که اساساً ساخت نمونه‌ها از نظر فیزیکی غیرممکن است. بنابراین، در این شرایط باید از ابزار و روش‌های تحلیلی یا همان روش‌های شبیه‌سازی محاسباتی استفاده نمود. اعتبار و صحت نتایج به‌دست آمده از این روش‌ها، به مدل‌سازی قانون‌های مشخصه غیرخطی مصالح سازه‌های بتن آرمه(یعنی بتن و فولاد) وابسته است. شناخت و پیش‌بینی رفتار واقعی سازه مستلزم در دست داشتن مدل‌های واقعی تنش–کرنش مصالح می‌باشد. بنابراین، آنالیز محاسباتی سازه-های بتن آرمه تحت بارگذاری دوره‌ای، مستلزم دسترسی به مدل‌های واقعی تنش–کرنش مصالح می‌باشد.

در این تحقیق دو گروه از مدل‌های مربوط به رفتار دوره‌ای بتن، شامل مدل‌های براساس تئوری الاستیسیته غیرخطی و مدل‌های براساس تئوری پلاستیسیته مورد توجه قرار گرفته است. در زمینه مدل‌های براساس تئوری الاستیسیته غیرخطی، با مطالعه و بررسی برخی مهم‌ترین مدل‌های موجود، و شناخت نقاط ضعف و قوت آن‌ها، مدل‌هایی برای پیش‌بینی رفتار بتن در فشار، کشش و انتقال بین آن دو، پیشنهاد گردید. مقایسه مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی، نشان‌دهنده تطابق خوب این مدل با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. در ادامه به مدل‌های براساس تئوری پلاستیسیته پرداخته شد. از میان مدل‌های پلاستیسیته موجود از مدل HISS، استفاده گردید. مدل HISS با یک سطح تسلیم منفرد، یک مدل یکتا شده و سلسله مراتبی است، که تغییرشکل‌های ناشی از خزش و تغییرشکل‌های الاستیک، پلاستیک، ترک‌خوردگی‌های ریز که منجر به گسیختگی و شکست می‌شوند، را در نظر می‌گیرد. این مدل می‌تواند به‌طور موفقیت‌آمیزی برای محدوده وسیعی از مصالح مورد استفاده قرار گیرد، همچنین در فرایندهای اجزای محدود غیرخطی که برای حل محدوده وسیعی از مسائل مهندسی شامل مسائل دو و سه یعدی و مسائل بارگذاری سیکلی استفاده می‌شود، نیز کاربرد دارد. لذا به کمک سطح تسلیم HISS، مدلی برای پیش‌بینی رفتار تنش–کرنش بتن تحت فشار، کشش و انتقال بین این دو حالت برای یک نقطه تنش ارائه گردید. این مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد، نتایج نشان‌دهنده قابلیت مناسب این مدل در پیش‌بینی رفتار تنش–کرنش بتن می-باشد. همچنین به‌منظور بررسی توانایی این مدل برای آنالیز اجزای محدود غیرخطی سازه‌های بتن آرمه، برنامه‌ای به زبان فرترن در قالب اجزای محدود نوشته شد. مقایسه این مدل با نتایج آزمایشگاهی، قابلیت و توانایی مدل ارائه شده در این تحقیق را در بررسی رفتار غیرخطی سازه‌های بتن آرمه نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: قاب‌های بتن آرمه، مکانیزم شکست، رفتار تنش–کرنش بتن، مدل‌های الاستیسیته غیرخطی، تئوری پلاستیسیته، بارگذاری سیکلی، تحلیل اجزای محدود غیرخطی، مدل HISS.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول(پیشگفتار) ۱
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- فرضیات و محدوده پژوهش ۵
۱-۳- چیدمان پایان نامه ۶
فصل دوم(ادبیات تحقیق) ۷
۲-۱- مقدمه ۸
۲-۲- مدل‌های براساس تئوری الاستیسیته غیرخطی ۸
۲-۲-۱- سینها و همکاران ۸
۲-۲-۲- کارسان و جیرسا ۹
۲-۲-۳- یانکلوسکی و رینهارد ۱۰
۲-۲-۴- بان و شو ۱۱
۲-۲-۵- ماندر و همکاران ۱۲
۲-۲-۶- رودا و النشای ۱۷
۲-۲-۷- ویکیو ۱۹
۲-۲-۸- پالرمو و ویکیو ۱۹
۲-۲-۹- کواک و کیم ۲۳
۲-۲-۱۰- او و بای ۲۵
۲-۲-۱۱- سیما و همکاران ۲۹
۲-۲-۱۲- هی و همکاران ۳۲
۲-۲-۱۳- زیمرمن ۴۳
۲-۲-۱۴- بروزووسکی و همکاران ۴۴
۲-۳- مدل‌های براساس تئوری پلاستیسیته ۴۴
۲-۳-۱- پارک و کیم ۴۶
۲-۳-۲- وانگ و شو ۵۰
۲-۳-۳- لمپروپالوس و دریتسوس ۵۳
۲-۳-۴- الیویرا و همکاران ۵۳
۲-۳-۵- کولکارنی و همکاران ۵۵
۲-۳-۶- هیو و اسچنوبریچ ۵۵
۲-۳-۷- نائوهیرو و همکاران ۵۸
۲-۳-۸- نوگین و چن ۶۰

۲-۳-۹- هاشمی و همکاران ۶۱
۲-۳-۱۰- چوی و کواک ۶۳
۲-۳-۱۱- فیلیپو و عیسی ۶۳
۲-۳-۱۲- ویلیام و وارنکه ۶۳
۲-۳-۱۳- الوا و ای دبس ۶۴
۲-۳-۱۴- تسنیمی و همکاران ۶۴
۲-۳-۱۵- دسای ۶۴
۲-۳-۱۵-۱- سطح تسلیم HISS ۶۴
۲-۳-۱۵-۲- استخراج سایر مدل‌های پلاستیسیته کلاسیک از مدل HISS ۶۵
۲-۳-۱۶- دسای و سلامی ۷۳
۲-۳-۱۷- دسای و فیشمن ۷۴
۲-۳-۱۸- اخویسی و دسای ۷۴
فصل سوم(تئوری موضوع) ۷۶
۳-۱- مدل‌های براساس تئوری الاستیسیته غیرخطی ۷۷
۳-۱-۱- منحنی‌های پوش برای بتن ۷۷
۳-۱-۲- منحنی پوش فشاری ۷۸
۳-۱-۳- منحنی پوش کششی ۷۹
۳-۱-۴- منحنی‌های باربرداری و بارگذاری مجدد در حالت فشاری ۷۹
۳-۱-۵- منحنی‌های باربرداری و بارگذاری مجدد در حالت کششی ۸۱
۳-۱-۶- انتقال از کشش به فشار(مدل بسته شدن ترک) ۸۴
۳-۲- مدل HISS ۸۵
۳-۲-۱- مدل $HISS-\delta_0$ ۸۶
۳-۲-۱-۱- پارامترهای β,γ ۸۸
۳-۲-۱-۲- تنش پیوستگی R ۸۹
۳-۲-۱-۳- پارامتر تغییر فاز یا تغییر حالت ۹۰
۳-۲-۱-۴- پارامترهای سخت شدگی یا رشد ۹۰
۳-۲-۱-۵- استخراج معادلات الاستو پلاستیک ۹۱
۳-۲-۱-۶- جزییات مشتق گیری‌ها ۹۴
۳-۲-۲- بارگذاری سیکلی ۹۶
۳-۲-۲-۱- باربرداری ۹۷
۳-۲-۲-۲- بارگذاری مجدد ۹۹
۳-۳- رابطه تنش- کرنش برای فولاد ۱۰۲
۳-۴- روش آنالیز غیرخطی ۱۰۳
فصل چهارم(تحلیل عددی مدل ارائه شده براساس تئوری الاستیسیته غیرخطی) ۱۰۶

۴-۱- مقدمه ۱۰۷
۴-۲- مقایسه مدل پیشنهادی در فشار با نتایج آزمایشگاهی ۱۰۷
۴-۳- مقایسه مدل پیشنهادی در کشش با نتایج آزمایشگاهی ۱۰۹
۴-۴- تحلیل نتایج به‌دست آمده از منحنی‌های باربرداری و بارگذاری مجدد در فشار و کشش ۱۰۹
۴-۵- مقایسه مدل پیشنهادی در انتقال ۱۱۰
فصل پنجم(تحلیل عددی مدل ارائه شده براساس تئوری پلاستیسیته و آنالیز اجزای محدود) ۱۱۱
۵-۱- مقدمه ۱۱۲
۵-۲- صحت سنجی مدل پلاستیسیته ارائه شده برای یک نقطه تنش ۱۱۲
۵-۲-۱- منحنی پوش ۱۱۲
۵-۲-۲- منحنی‌های باربرداری و بارگذاری مجدد ۱۱۴
۵-۲-۳- تحلیل نتایج به‌دست آمده از مقایسه منحنی پوش و منحنی‌های باربرداری و بارگذاری مجدد بر اساس مدل ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی ۱۱۵
۵-۳- مقایسه مدل پلاستیسیته اجزای محدود غیرخطی ارائه شده برای رفتار دوره‌ای سازه‌های بتن آرمه با نتایج آزمایشگاهی ۱۱۵
۵-۳-۱- تیر برسلر و اسکوردلیز تحت بارگذاری یکنواخت ۱۱۶
۵-۳-۲- قاب زایو و همکاران تحت بارگذاری یکنواخت ۱۱۸
۵-۳-۳- تیر بوردری و همکاران تحت بارگذاری دوره ای ۱۲۱
۵-۳-۴- قاب آلین و آلتین تحت بارگذاری دوره ای ۱۲۳
فصل ششم(نتیجه گیری و پیشنهادات) ۱۲۶
۶-۱- مقدمه ۱۲۷
۶-۲- بحث و نتیجه گیری ۱۲۸
۶-۳- پیشنهادات ۱۳۰
منابع ۱۳۱

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

فصل دوم ۷
جدول ۲-۱- مروری بر مدل‌های پلاستیسیته مختلف ۶۹
جدول ۲-۲- مقایسه مدل‌های $HISS - \delta_0$، کپ (حالت بحرانی) و مدل لید ۷۰
فصل پنجم ۱۱۱
جدول ۵-۱- مقادیر ثابت‌ها در مدل $HISS$ ۱۱۲
جدول ۵-۲- مقادیر ثابت‌ها در مدل $HISS$ ۱۱۷
جدول ۵-۳- مقادیر ثابت‌ها در مدل $HISS$ ۱۱۹
جدول ۵-۴- مشخصات مصالح ۱۲۱
جدول ۵-۵- مقادیر ثابت‌ها در مدل $HISS$ ۱۲۲
جدول ۵-۶- مشخصات مصالح ۱۲۴
جدول ۵-۷- مقادیر ثابت‌ها در مدل $HISS$ ۱۲۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

فصل دوم ۷
شکل۲-۱- منحنی های تنش-کرنش آزمایشگاهی بتن تحت بارگذاری کامل(سینها وهمکاران[۳]) ۸
شکل ۲-۲- منحنی تعمیم یافته تنش-کرنش بتن(سینها وهمکاران[۳]) ۹
شکل ۲-۳- منحنی های باربرداری و بارگذاری مجدد(کارسان و جیرسا[۳]) ۱۰
شکل ۲-۴- پاسخ تک محوری بتن در کشش برای رژیم‌های مختلف بارگذاری[۸] ۱۱
شکل ۲-۵- منحنی نمونه وار تنش-کرنش برای بتن تحت بارگذاری دوره ای[۱۰] ۱۳
شکل ۲-۶- منحنی های تنش-کرنش برای شاخه های باربرداری و بارگذاری مجدد(ماندر و همکاران[۱۰]) ۱۵
شکل ۲-۷- منحنی تنش- کرنش برای شاخه های باربرداری و بارگذاری مجدد در روش رودا و النشای[۱۱] ۱۸
شکل ۲-۸- پاسخ مدل شده برای المان تحت کرنش های گردشی تک محوری (ویکیو[۱۲]) ۱۹
شکل ۲-۹- باربرداری/بارگذاری مجدد برای بتن در فشار(پالرمو و ویکیو[۱۳]) ۲۱
شکل ۲-۱۰- پیش بینی پاسخ بتن برای بارگذاری دوره ای فشاری(پالرمول و ویکیو[۱۳]) ۲۲
شکل ۲-۱۱- مدل ترک بسته برای بتن (پالرمول و ویکیو[۱۳]) ۲۳
شکل ۲-۱۲- رابطه فرض شده تش-کرنش برای بتن؛ (الف) انتقال از کشش به فشار، (ب) انتقال از فشاربه کشش (کواک و کیم[۱۴]) ۲۴
شکل ۲-۱۳- پاسخ یکنواخت و دوره ای تک محوری بتن غیرمسلح(او و بای[۱۵]) ۲۵
شکل ۲-۱۴- پاسخ یکنواخت و دوره ای آرماتورهای فولادی[۱۵] ۲۸
شکل ۲-۱۵- منحنی پوش بتن(سیما و همکاران[۱۶]) ۲۹
شکل ۲-۱۶- منحنی باربرداری- بارگذاری مجدد کامل در فشار(سیما و همکاران[۱۶]) ۳۰
شکل ۲-۱۷- بارگذاری مجدد از باربرداری جزئی در فشار(سیما و همکاران[۱۶]) ۳۰
شکل ۲-۱۸- منحنی پوش کششی برای بتن(سیما و همکاران[۱۶]) ۳۱
شکل ۲-۱۹- مدل ترک بسته(سیما و همکاران[۱۶]) ۳۲
شکل ۲-۲۰- منحنی های پوش بتن(هی و همکاران[۱۷]) ۳۵
شکل ۲-۲۱- طرح هیسترتیک برای بتن(هی و همکاران [۱۷]) ۳۹
شکل ۲-۲۲- کرنش پلاستیک کششی(هی و همکاران [۱۷]) ۴۰
شکل ۲-۲۳- فاکتور شکل برای منحنی باربرداری کششی(هی و همکاران [۱۷]) ۴۰
شکل ۲-۲۴- طرح‌هایی از پاسخ (الف) حالت الاستیک (ب) حالت الاستو پلاستیک[۶] ۴۵
شکل ۲-۲۵- مولفه‌های تنش[۵] ۴۶
شکل ۲-۲۶- سطوح گسیختگی $\overline{\sigma}_1$، $\overline{\sigma}_2$ و $\overline{\sigma}_3$ [۵] ۴۷
شکل ۲-۲۷- تابع سطح تسلیم برای ضابطه گسیختگی خرد شدگی[۲۳] ۴۹
شکل ۲-۲۸- منحنی تنش-کرنش فشاری نرم شده بتن[۲۵] ۵۱
شکل ۲-۲۹- منحنی تنش- کرنش کششی متوسط[۲۵] ۵۱
شکل ۲-۳۰- منحنی تنش- کرنش میانگین میلگردهای فولادی قرار گرفته در بتن[۲۵] ۵۲

شکل ۲-۳۱- سطح گسیختگی کوپفر و گرستل[۲۵] ۵۳
شکل ۲-۳۲- اجزای محدود لایه ای[۲۷] ۵۴
شکل ۲-۳۳- رابطه تنش- کرنش[۲۷] ۵۴
شکل ۲-۳۴- منحنی تنش- کرنش ایده آل شده برای فولاد[۲] ۵۶
شکل ۲-۳۵- سطح تسلیم بتن در تنش مسطح اصلی دوبعدی[۲۹] ۵۶
شکل ۲-۳۶- مدل لایه ای(رشته‌ای)[۲۹] ۵۷
شکل ۲-۳۷- نمودار تنش برای مقطع بتنی[۲۹] ۵۷
شکل ۲-۳۸- تنش- کرنش تک محوره قبل از ترک خوردگی[۳۰] ۵۹
شکل ۲-۳۹- سطح تسلیم و ترک[۳۰] ۵۹
شکل ۲-۴۰- منحنی پوش تنش- کرنش بتن[۳۰] ۵۹
شکل ۲-۴۱- منحنی هیسترتیک آرماتور[۳۰] ۶۰
شکل ۲-۴۲- فلوچارت حل غیرخطی[۳۲] ۶۲
شکل ۲-۴۳- شکل تابع تسلیم F [۶] ۶۶
شکل ۲-۴۴- طرحی از سطوح تسلیم فشاری و کششی $HISS$ [۴۳] ۷۵
فصل سوم ۷۶
شکل ۳-۱- منحنی پوش ۷۹
شکل ۳-۲- منحنی‌های تنش- کرنش برای شاخه‌های باربرداری و بارگذاری مجدد در فشار ۸۰
شکل ۳-۳- مقایسه کرنش پلاستیک کششی ارائه شده در این تحقیق با نتایج آزمایشگاهی آل[۱۷] ۸۲
شکل ۳-۴- منحنی های تنش-کرنش برای شاخه های باربرداری و بارگذاری مجدد درکشش [۱۷] ۸۳
شکل ۳-۵- طرح شماتیکی مسیر انتقالی(مدل ترک بسته[۱۰]) ۸۴
شکل ۳-۶- حالات پاسخ RI و FA برای مصالح در مدل HISS [۶] ۸۵
شکل ۳-۷- (الف)سطح تسلیم $HISS$ فضای تنش $\sqrt{J_{2D}} - J_1$ (ب) صفحه چندوجهی(برای تحدب $\beta < 0.756$)[۶] ۸۸
شکل ۳-۸- پارامترهای β,γ در مدل $HISS$ [۶] ۸۹
شکل ۳-۹- پاسخ الاستو پلاستیک با باربرداری و بارگذاری مجدد[۶] ۹۷
شکل ۳-۱۰- تابع درونیاب برای آزمایش فشار سه محوره[۶] ۹۹
شکل۳-۱۱- دو حالت بارگذاری مجدد[۶] ۱۰۰
شکل۳-۱۲- رابطه تنش- کرنش برای فولاد ۱۰۳
شکل۳-۱۳- روش اصلاح شده نیوتن-رافسون[۴۶] ۱۰۳
شکل۳-۱۴- فلوچارت برنامه تحلیل غیرخطی ۱۰۵
فصل چهارم ۱۰۶
شکل۴-۱- مقایسه مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی بان و شو[۹] ۱۰۷
شکل۴-۲- مقایسه مدل هی و همکاران[۱۷] با نتایج آزمایشگاهی بان و شو[۹] ۱۰۸
شکل۴-۳- مقایسه مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی تانیگاوا و همکاران[۴۴] ۱۰۸

شکل۴-۴- مقایسه مدل پیشنهادی درکشش با نتایج آزمایشگاهی یانکلوسکی و رینهارد[۸] ۱۰۹
شکل۴-۵- مقایسه مدل پیشنهادی در انتقال از کشش به فشار با نتایج آزمایشگاهی رینهارد[۴۵] ۱۱۰
فصل پنجم ۱۱۱
شکل۵-۱- مقایسه منحنی پوش فشاری بتن با استفاده از سطح تسلیم HISS، با نتایج آزمایشگاهی سینها و همکاران[۳] ۱۱۳
شکل۵-۲- مقایسه منحنی پوش فشاری بتن با استفاده از سطح تسلیم HISS، با نتایج آزمایشگاهی تانیگاوا و همکاران[۴۴] ۱۱۳
شکل۵-۳- مقایسه مدل فشار دوره ای ارائه شده برای بتن، با نتایج آزمایشگاهی تانیگاوا و همکاران[۴۴] ۱۱۴
شکل۵-۴- مقایسه مدل فشار دوره ای ارائه شده برای بتن، با نتایج آزمایشگاهی بان و شو[۹] ۱۱۴
شکل۵-۵- تیر آزمایش شده توسط برسلر و اسکوردلیز(تمامی ابعاد به میلی متر)[۲۵] ۱۱۶
شکل۵-۶- مش اجزای محدود برای تحلیل تیر برسلر و اسکوردلیز[۲۵] ۱۱۷
شکل۵-۷- نمودار بار- تغییرمکان در وسط دهانه برای تیر [۲۵] ۱۱۷
شکل۵-۸- جزییات قاب (تمامی ابعاد برحسب میلی متر است) [۷] ۱۱۸
شکل۵-۹- مش اجزای محدود برای تحلیل قاب [۷] ۱۱۹
شکل۵-۱۰- مقایسه تغییرمکان جانبی در قسمت بالای قاب براساس مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی زایو و همکاران[۷] ۱۲۰
شکل۵-۱۱- جزییات تیر[۴۷] ۱۲۱
شکل۵-۱۲- مش اجزای محدود برای تحلیل تیر [۴۷] ۱۲۲
شکل۵-۱۳- مقایسه بین منحنی‌های بار- تغییرمکان وسط دهانه، براساس مدل ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی بوردری و همکاران[۴۷] ۱۲۲
شکل۵-۱۴- جزییات قاب(ابعاد به میلی متر) [۳۲] ۱۲۳
شکل۵-۱۵- مش اجزای محدود برای تحلیل قاب[۳۲] ۱۲۴
شکل۵-۱۶- مقایسه بین منحنی‌های بار- تغییرمکان، براساس مدل ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی آلین و آلتین[۳۲] ۱۲۵

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱- مقدمه

کاربرد روش‌های اجزای محدود[1] برای بررسی و توصیف رفتار غیرخطی[2] سازه‌ها به چنان مرحله‌ای رسیده است، که نتایج به‌دست آمده از این تحلیل‌ها، می‌تواند با تراز اعتماد بالایی مورد قبول واقع شود. همچنین، پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی کامپیوتر، منجر به تولید کامپیوترهایی با ظرفیت ذخیره‌سازی بالاتر و سرعت بیشتر شده است. در نتیجه، تحلیل غیرخطی می‌تواند با یک هزینه معقولی انجام گردد. ب ەعلاوه، نیاز به ابزارهای تحلیلی برای آنالیز سازه‌ها، تحت بارگذاری دوره‌ای در حال رشد می‌باشد. زمانی‌که زلزله‌ای رخ داده و ارتعاشات لرزه‌ای اتفاق می‌افتد، حرکت زمین باعث ایجاد ارتعاش در سازه می‌شود، و بنابراین سازه به‌طور مکرر، تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار می‌گیرد. در بسیاری از موارد، استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی سازه‌ها تحت این شرایط سخت و پیچیده، یا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست و یا اینکه اساساً ساخت نمونه‌ها از نظر فیزیکی غیرممکن است. بنابراین در این شرایط باید از ابزار و روش‌های تحلیلی یا همان روش‌های شبیه‌سازی محاسباتی استفاده نمود[۱].

امروزه استفاده از روش شبیه‌سازی محاسباتی برای پیش‌بینی رفتار غیرخطی سازه‌های بتن آرمه در حال گسترش می‌باشد. اعتبار و صحت نتایج به‌دست آمده از این روش، به مدل‌سازی قانون‌های مشخصه[3] غیرخطی مصالح سازه‌های بتن آرمه(یعنی بتن و فولاد) وابسته است[۲]. شناخت و پیش‌بینی رفتار واقعی سازه مستلزم دردست داشتن مدل‌های واقعی تنش-کرنش مصالح می‌باشد. بنابراین آنالیز محاسباتی سازه‌های بتن آرمه تحت بارگذاری دوره‌ای، مستلزم دسترسی به مدل‌های واقعی تنش - کرنش مصالح می‌باشد[۳]. قبل از اواسط دهه پنجاه میلادی، تحقیق بر روی رفتار بتن، تنها محدود به حالات بارگذاری یکنواخت بود. در واقع در آن زمان، تئوری‌های طراحی براساس رفتار یکنواخت بتن بود. از این‌رو بعد از آن زمان، توجهات قابل ملاحظه‌ای در مورد مقاومت اعضای بتنی تحت بارگذاری دور ای توسعه یافت. تحقیقات انجام گرفته نه تنها مربوط به به‌دست آوردن تاثیرات خستگی[4] می‌باشد، بلکه همچنین این تحقیقات، رفتار بتن تحت تعداد کمی از سیکل‌های بار با تنش‌های نسبتا بالا را نیز مورد توجه قرار می‌دهد. این مسئله به سه دلیل قابل توجه است:

---

[1] Finite Element Methods

[2] Nonlinear Behavior

[3] Constitutive Laws

[4] Fatigue

اول این‌که اتخاذ فرایندهای طرح مقاومت نهایی و استفاده از مصالح با مقاومت بالا، مستلزم آن است که اعضای سازه‌ای بتنی تحت ترازهای تنش بالا، به‌صورت رضایت‌بخش اجرا شوند، از این‌رو، برای سازه‌هایی که تحت بارهای دوره‌ای با تراز بالا قرار دارند، به عنوان مثال؛ دال پل، اطلاعات مفید زیادی در مورد رفتار بتن مورد نیاز است. دوماً تحقیقات نشان می‌دهد، که تاثیر بارگذاری لرزه‌ای بر روی سازه‌های بتنی، به‌ویژه برای سازه‌های بتن مسلح مرکب مانند؛ راکتورهای هسته‌ای و سیستم دیوار برشی کوپل، بسیار مهم و ضروری می‌باشد. در زمان طراحی این سازه‌های پیچیده، اطلاعات معتبر و قابل اعتمادی در مورد مقاومت، شکست و ظرفیت جذب انرژی بتن مورد نیاز است. سوماً، حتی اگر سازه تحت بارهای مکرر گسیخته نشود، شکل ترک‌ها، می‌تواند مشخصات حمل بار سازه بتنی را تغییر دهد. بنابراین تاریخچه‌های کامل بار برای بتن تحت بارهای دوره‌ای، باید مورد بررسی و تحقیق قرار گیرد[۴].

از زمانی‌که اولین کارهای انجام گرفته در ارتباط با تعیین رفتار دوره‌ای تک محوره بتن منتشر شد (سینها و همکاران[۵])، کارهای تخصصی ارزشمندی در این زمینه انجام شده است، که با پیشرفت‌های اخیر در روش‌های عددی، رشد بیشتری یافته است[۳].

برای تحلیل غیرخطی بتن، مدل‌های مصالح مختلفی همچون مدل‌های الاستیسیته غیرخطی، مدل‌های براساس تئوری پلاستیسیته، مدل‌های براساس تئوری خسارت(خسارت پیش‌رونده)، مدل‌های براساس تئوری خسارت و تئوری پلاستیسیته[۳]، مدل‌های براساس روش لایه‌ای(رشته‌ای)، مدل‌های ریز صفحه[۶] ، مدل ترک پخش‌شده، مدل ترک چرخشی و غیره توسعه یافته‌اند. بر اساس مطالعات عددی بیشمار و نتایج آزمایشگاهی، این مدل‌ها به‌منظور توصیف واقعی مشخصات رفتاری بتن در حالات تنش فشاری مختلف، مورد استفاده قرار می‌گیرند[۵].

مدل‌های براساس تئوری الاستیسیته غیرخطی شامل مدل‌های ساده شده‌ای هستند، که به‌صورت فرمول-های ریاضیاتی(براساس نتایج آزمایشگاهی بتن تحت بارگذاری‌های مختلف)، درآمده‌اند. این مدل‌ها پیچیدگی‌های سایر مدل‌ها را نداشته و در حالات تنش تک محوره می‌توان به‌راحتی از آنها استفاده نمود [۳].

---

[5] Sinha et al.

[6] - Micro plane

مدل‌های پلاستیسیته کلاسیک مختلفی همچون مدل فون میسز[۷] ، مور-کولمب[۸] و دراگر-پراگر[۹]، مدل‌های تسلیم‌شدگی پیوسته همچون حالت بحرانی و کپ[۱۰] و دیگر مدل‌ها همچون مدل‌های ارائه شده توسط ماستوکا و ناکایی[۱۱]، لید و دانکن[۱۲] و ورمر[۱۳] وجود دارند، که این مدل‌ها می‌توانند به عنوان حالات خاصی از مدل HISS [۱۴] استخراج شوند. همچنین نسخه‌های ناهمسانگرد و کینماتیک[۱۵] مدل HISS، می‌تواند توصیف‌های مشخصه متناوبی برای مدل‌های ارائه شده توسط مروز و همکاران[۱۶]، کریج[۱۷] و پریو[۱۸] و دافالایز و همکاران[۱۹] را فراهم نماید. بنابراین، مدل HISS یک مدل بسیار کامل‌تری نسبت به سایر مدل-های پلاستیسیته بوده و در واقع تعدادی از مهم‌ترین مدل‌های موجود به عنوان حالات خاصی از این مدل قابل استخراج می باشند[۶].

مدل HISS با یک سطح تسلیم منفرد، یک مدل یکتا شده[۲۰] و سلسله مراتبی[۲۱] است، که تغییرشکل‌های ناشی از خزش و تغییرشکل‌های الاستیک، پلاستیک، ترک‌خوردگی‌های ریز که منجر به گسیختگی و شکست می‌شوند، را در نظر می‌گیرد.

---

[7] Von-Mises

[8] Mohr-Coulomb

[9] Drucker-Prager

[10] Cap

[11] Matsuka And Nakai

[12] Lade and Duncan

[13] Vermer

[14] - Hierarchical Single Surface

[15] Kinematic

[16] Mroz and Co-Workers

[17] Krieg

[18] Prevost

[19] Dafalias and Co-Workers

[20] - Unified

[21] - Hierarchical

این مدل می‌تواند به‌طور موفقیت‌آمیزی برای محدوده وسیعی از مصالح مانند؛ رس‌ها، ماسه‌ها، سرامیک، فلزات، آلیاژها، سیلسیوم، سطوح مشترک و اتصالات مورد استفاده قرار گیرد، همچنین در فرایندهای اجزای محدود غیرخطی که برای حل محدوده وسیعی از مسائل مهندسی شامل مسائل دو و سه یعدی و مسائل بارگذاری سیکلی استفاده می‌شود، نیز کاربرد دارد. به‌ویژه برای سازه‌های بتن آرمه، مدل HISS، امتیازات ویژه‌ای دارد، که شامل؛ استفاده از سطوح تسلیم پیوسته، که مشکلات محاسباتی را سبک می‌کند، توانایی محاسبه و به شمار آوردن تسلیم پیوسته که وابسته به رفتار پلاستیک ارائه شده توسط بتن از شروع بارگذاری می‌باشد، در نظر گرفتن تغییرات(کاهش) حجم تحت بارگذاری برشی، توانایی در کاربرد قالب‌بندی ریاضیاتی یکسان برای هر دو مصالح (بتن) جامد و سطوح مشترک و اتصالات در مقایسه با مدل‌های مشابه، نیاز به شمار کم‌تری از پارامترها برای فاکتورهایی همچون کرنش‌های الاستیک و پلاستیک، تغییرات (کاهش) حجم تحت برش، تأثیرات مسیر تنش، ریز ترک‌خوردگی‌ها، و گسیختگی می‌باشد. لازم به ذکر است، که تابع تسلیم HISS، هم برای تسلیم شدن کششی و هم فشاری قابل استفاده می‌باشد[۷]. با توجه به موارد ذکر شده در بالا، در این تحقیق، برای مدل‌سازی بتن از ضابطه تسلیم HISS، استفاده شده است.

۲-۱- فرضیات و محدوده پژوهش

۱- در این تحقیق از مدل‌هایی که براساس تئوری الاستیسیته غیرخطی و مدل‌های براساس تئوری پلاستیسیته می‌باشند، استفاده می‌شود.
۲- مدل‌های مشخصه بتن تحت بارگذاری فشاری و کششی یکنواخت و دوره‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند.
۳- مدل‌های مشخصه حالت انتقالی از کشش به فشار برای بتن مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.
۴- از مدل پلاستیسیته HISS، به عنوان سطح تسلیم در تئوری پلاستیسیته، برای مدل‌سازی بتن استفاده می‌گردد.
۵- مدل‌های پلاستیسیته برای یک نقطه تنش، به‌منظور تحلیل غیرخطی سازه‌های بتن آرمه در برنامه اجزای محدود غیرخطی که به زبان فرترن نوشته شده است، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۳- چیدمان پایان نامه

در فصل دوم مروری بر مدل‌های مشخصه براساس تئوری الاستیسیته غیرخطی، مدل‌های براساس تئوری پلاستیسیته، و همچنین کارهای انجام گرفته در قالب اجزای محدود غیرخطی انجام خواهد گرفت. در این فصل نقاط ضعف و قوت مدل‌های پیشین تا حد امکان به‌طور خلاصه‌وار مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

سپس در فصل سوم، به ارائه مدل پیشنهادی در این تحقیق در زمینه تئوری الاستیسیته غیرخطی، مدل ارائه شده براساس تئوری پلاستیسیته و برنامه اجزای محدود غیرخطی و فرمول‌بندی و توضیحات کامل آن‌ها پرداخته شده است. لازم به ذکر است، در این تحقیق تمامی مدل‌ها با استفاده از زبان برنامه نویسی فرترن نوشته شده است. فصل چهارم و پنجم به مقایسه مدل‌های ارائه شده، با نتایج آزمایشگاهی اختصاص دارد. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق به‌طور خلاصه‌وار در فصل ششم گنجانده شده است. و در نهایت، پیشنهاداتی برای ادامه تحقیق حاضر برای محققین و علاقه مندان ارائه شده است.

فصل دوم

ادبیات تحقیق