بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی سازه

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل غیرخطی تیر و ستون بتن آرمه
با ملاحظه
اثرات خوردگی و پیوستگی-لغزش

امیر صفیعی

استاد راهنما :

دکترمحسنعلی شایانفر

پائیز ۱۳۸۳

تشکر و قدردانی

از آقای" دکتر محسنعلی شایانفر" استاد راهنمای گرامی بـدلیل زحمـاتی کـه در مـدّت تقریبـاً یک سال برای به ثمر رسیدن این تحقیق کشیده اند تشکر می کنم. همچنـین بـر خـود لازم مـی دانـم از آقای "دکتر منصور قلعه نوی" بدلیل همکاریهایشان با من، در این پژوهش تشـکر کـنم. از آقـای "دکتـر محمّد صادق معرفت "و آقای" دکتر غلامرضا قدرتی امیری" اعضای هیأت محترم داوران نیز، قـدردانی به عمل می آورم. نهایتاً مراتب سپاسگذاری خود را به پدر ومادرم بزرگـوارم کـه مـرا در مسـیر علـم و دانش قرار دادند ابراز داشته و این اثر ناچیز را به ایشان تقدیم می کنم.

چکیده

در این پژوهش ابتداً مروری بر تحقیقات گذشتگان با موضوع تأثیر خوردگی آرماتور بر رفتار سازه های بتن مسلح صورت می پذیرد. همانطور که مشخص است از مهمترین تبعات منفی پدیده خوردگی آرماتور در سازه های بتن مسلح، خرابی پیوستگی فولاد و بتن می باشد، به همین دلیل، یک مدل جدید برای سخت شوندگی کششی بتن معرفی می شود. این مدل می تواند اثرات رفتار لغزش-پیوستگی و خوردگی آرماتور را در بر بگیرد. مدل پیشنهادی، منحنی تنش-کرنش کششی را برای یک المان بتن مسلح با توجه به ویژگیهای آن المان تولید می کند. این مدل در یک نرم افزار تحلیل غیرخطی سازه های بتن آرمه(HODA) بکار بسته می شود، سپس به کمک آن چند نمونه از اعضای بتن آرمه که نتایج آزمایشگاهی آنها موجود است مورد تحلیل قرار می گیرد. نهایتاً با مقایسه بین نتایج تئوری و آزمایشگاهی نتیجه گیریهای لازم صورت می پذیرد. در این تحلیلها اکثر پدیده های مربوط به رفتار غیر خطی مصالح بتن آرمه در نظر گرفته شده است که می توان به رفتار غیر خطی تنش-کرنش در فشار، ترک خوردگی بتن، قفل وبست دانه ای، اثرزبانه ای و رفتار لغزش-پیوستگی فولاد خورده شده و نشده اشاره کرد. مقایسه های انجام گرفته نشان داده است که پاسخ محاسباتی و نتایج آزمایشگاهی از توافق خوبی برخوردارند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل

اول:مقدمه و اصول اولیه

۱-۱-کلیات..... ۱

۱-۲-موضوعات پایان نامه..... ۳

۱-۳-ساختار پایان نامه..... ۳

فصل دوم:مروری بر تحقیقات

۲-۱-کلیات..... ۵

۲-۲-تاثیر خوردگی بررفتار سازه های بتن آرمه..... ۶

۲-۲-۱-روشهای تحقیقاتی تحلیلی..... ۶

۲-۲-۲-روشهای تحقیقاتی آزمایشگاهی..... ۸

۲-۳-جمع بندی مطالب فصل..... ۱۱

فصل سوم: رفتار پیوستگی-لغزش و آزمایشات مربوطه

۳-۱-برنامه آزمایشگاهی..... ۱۲

۳-۲-آزمایشات کششی نمونه های بتن مسلح..... ۱۳

۳-۳-نتایج تجربی..... ۱۴

۳-۴-بررسی فواصل حداقل و حداکثر ترک ها..... ۱۵

۳-۵-بررسی فواصل متوسط ترک ها..... ۱۶

۳-۶-بررسی تنش پیوستگی..... ۱۷

۳-۷- منحنی‌های تنش-کرنش کل نمونه بتن مسلح..... ۱۹

۳-۸- منحنی‌های تنش-کرنش کششی سهم بتن..... ۲۰

۳-۹- تغییرات تنش پیوستگی برحسب لغزش ۲۲

فصل چهارم:اثرات خوردگی بر رفتار پیوستگی-لغزش و آزمایشات مربوطه

۴-۱-کلیات..... ۳۳
۴-۲- تهیه و آماده کردن نمونه‌ها..... ۳۴
۴-۳- برنامه خوردگی تسریع شده..... ۳۴
۴-۴- آزمایشات کششی نمونه‌های بتن مسلح ۳۵
۴-۵- نتایج تجربی ۳۵
۴-۶-بررسی ترازهای مهم خوردگی..... ۳۶
۴-۷-بررسی فاصله متوسط ترک‌ها..... ۳۷
۴-۸- اثر خوردگی بر مقاومت پیوستگی ۳۸
۴-۹- اثر خوردگی بر سطح مقطع فولاد ۳۹
۴-۱۰-منحنی‌های مقاومت کل نمونه بتن مسلح ۴۰
۴-۱۱-منحنی‌های تنش-کرنش کششی سهم بتن..... ۴۱

فصل پنجم:مدل پیشنهادی

۵-۱-کلیات..... ۶۱
۵-۲- مدل سخت شوندگی کششی پیشنهادی..... ۶۳
۵-۲-۱-توصیف کیفی مدل پیشنهادی..... ۶۴
۵-۲-۲-پیاده سازی مدل پیشنهادی در نرم افزارHODA..... ۶۵
۵-۲-۳-پیاده سازی مدل چوی و چونگ در نرم افزار HODA..... ۷۱
۵-۳-جمع بندی مطالب فصل..... ۷۳

فصل ششم:اجزای محدود غیر خطی سازه های بتن آرمه

۶-۱- کلیات..... ۸۲
۶-۲-مدل مصالح در نرم افزارHODA ۸۳
۶-۳- فرمولبندی جابجایی در اجزا محدود..... ۸۴
۶-۴- کتابخانه المان نرم افزار..... ۸۷
۶-۵- تکنیک جداسازی لایه ای..... ۹۰
۶-۶- الگوریتم های عددی جهت آنالیز غیرخطی..... ۹۲

۶-۶-۱- روش حل..... ۹۲
۶-۶-۲- نیروهای نامتعادل..... ۹۳
۶-۶-۳- معیار همگرایی ۹۳
۶-۶-۴- معیار واگرایی..... ۹۴

فصل هفتم:تحلیل نمونه های آزمایشگاهی

۷-۱-کلیات..... ۱۰۳
۷-۲-تیرهای بتن مسلح با آرماتور خورده شده ۱۰۴
۷-۲-۱-توصیف تیرهای بتن مسلح با آرماتور خورده شده..... ۱۰۴
۷-۲-۲-مدلسازی اجزا محدود..... ۱۰۴
۷-۲-۳- پاسخ محاسباتی تیرهای بتن مسلح با آرماتور خورده شده..... ۱۰۵
۷-۳-ستونهای بتن مسلح..... ۱۰۶
۷-۳-۱-توصیف ستونهای بتن مسلح..... ۱۰۶
۷-۳-۲-مدلسازی اجزا محدود..... ۱۰۷
۷-۳-۳-پاسخ محاسباتی ستونهای بتن مسلح.....۱۰۸
۷-۴-جمع بندی مطالب فصل.....۱۰۸

فصل هشتم:نتایج

۸-۱-مدل پیشنهادی..... ۱۱۸
۸-۲-پیاده سازی رفتار سخت شوندگی کششی در نرم افزارHODA ۱۱۹
۸-۳-تحلیل نمونه های آزمایشگاهی..... ۱۱۹
۸-۴-پیشنهاداتی برای مطالعات آتی.....۱۱۹

مراجع..... ۱۲۱

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱- مشخصات نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح..... ۳۱
جدول ۳-۲- مشخصات مکانیکی میلگردها..... ۳۱
جدول ۳-۳- مشخصات بتن C۲۶ ..... ۳۲
جدول ۳-۴- نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح..... ۳۲
جدول ۴-۱- مشخصات بتن C۲۶ ..... ۵۴
جدول ۴-۲-مشخصات مکانیکی میلگردها..... ۵۴
جدول ۴-۳- مشخصات کلی نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح..... ۵۴
جدول ۴-۴-الف-نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح..... ۵۵
جدول ۴-۴-ب- نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح..... ۵۵
جدول ۴-۴-پ- نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح..... ۵۶
جدول ۴-۴-ت-نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح..... ۵۷
جدول ۴-۴-ث- نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح..... ۵۸
جدول ۴-۴-ج- نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح..... ۵۹
جدول ۴-۴-چ- نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح..... ۶۰
جدول ۴-۵- نتایج ترازهای مهم خوردگی..... ۶۱
جدول ۷-۱-مشخصات مکانیکی مصالح..... ۱۱۶
جدول ۷-۲- درصد خوردگی تیرها..... ۱۱۶
جدول ۷-۳-مشخصات مکانیکی مصالح ستونها..... ۱۱۷

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل۳-۱- نمونه بتن مسلح..... ۲۵
شکل ۳-۲- تغییرات حداقل و حداکثر فاصله ترک‌ها نسبت به متوسط فاصله ترک‌ها ۲۵
شکل ۳-۳- تغییرات فاصله متوسط ترک‌ها بر حسب بتن محافظ ۲۵
شکل ۳-۴- توزیع تنش کششی بتن و تنش پیوستگی در فاصله ترک s_m ۲۶
شکل ۳-۵-الف- تغییرات متوسط مقاومت نهائی پیوستگی بر حسب نسبت c/d ۲۶
شکل ۳-۵-ب- تغییرات متوسط مقاومت نهائی پیوستگی بر حسب بتن محافظ..... ۲۷
شکل ۳-۶- منحنی مقاومت کششی کل نمونه برحسب کرنش متوسط میلگرد برای نمونه‌های با میلگرد ۱۸..... ۲۷

شکل ۳-۷- منحنی مقاومت کششی کل نمونه برحسب کرنش متوسط میلگرد برای نمونه‌های با میلگرد ۱۲..... ۲۷
شکل ۳-۸- منحنی مقاومت کششی کل نمونه برحسب کرنش متوسط میلگرد برای نمونه‌های با میلگرد ۲۵ ..... ۲۸
شکل ۳-۹-مقایسه مقاومت کششی کل برای دو نمونه با درصد فولاد یکسان ولی مقاومت تسلیم متفاوت ۲۸
شکل ۳-۱۰- منحنی مقاومت کششی مؤثر بتن برحسب کرنش متوسط برای نمونه‌های با میلگرد ۱۸ ..... ۲۸
شکل ۳-۱۱- منحنی مقاومت کششی مؤثر بتن برحسب کرنش متوسط برای نمونه‌های با میلگرد ۱۲ ..... ۲۹
شکل ۳-۱۲- منحنی مقاومت کششی مؤثر بتن برحسب کرنش متوسط برای نمونه‌های با میلگرد ۲۵ ..... ۲۹
شکل ۳-۱۳- تغییرات متوسط تنش پیوستگی (f_{bm}) برحسب مجموع لغزش در انتهای قطعه ترک خورده (Δ_e) برای نمونه‌های با میلگرد ۱۸ ..... ۲۹
شکل ۳-۱۴- تغییرات متوسط تنش پیوستگی(f_{bm}) برحسب مجموع لغزش در انتهای قطعه ترک خورده (Δ_e) برای نمونه‌های با میلگرد ۱۲ ..... ۳۰
شکل ۳-۱۵- تغییرات متوسط تنش پیوستگی (f_{bm}) برحسب مجموع لغزش در انتهای قطعه ترک خورده (Δ_e) برای نمونه‌های با میلگرد ۲۵ ..... ۳۰
شکل ۴-۱- تغییرات ترازهای مهم خوردگی نسبت به c/d ۴۲
شکل ۴-۲- تغییرات Sm/Smo نسبت به Cw برای نمونه ها با قطر میلگرد یکسان..... ۴۲
شکل ۴-۳- تغییرات Sm/Smo نسبت به Cw برای نمونه ها با قطر بتن یکسان..... ۴۳
شکل ۴-۴- تغییرات Sm/Smo نسبت به Cw برای تمام نمونه ها..... ۴۳
شکل ۴-۵-الف-مقایسه نتایج تجربی و تئوری تغییرات Sm/Smo نسبت به Cw برای نمونه‌های S18 (قطر میلگرد یکسان) ۴۴
شکل ۴-۵-ب- مقایسه نتایج تجربی و تئوری تغییرات Sm/Smo نسبت به Cwبرای نمونه‌های D=100mm (با قطر بتن یکسان)..... ۴۴
شکل ۴-۶-الف- تغییرات fbu/fbuo نسبت به Cw برای نمونه ها با قطر میلگرد یکسان ۴۵
شکل ۴-۶-ب- تغییرات fbu/fbuo نسبت به Cw برای نمونه ها با قطر بتن یکسان..... ۴۶
شکل ۴-۶-پ- تغییرات fbu/fbuo نسبت به Cw برای تمام نمونه ها..... ۴۶
شکل ۴-۷-الف- مقایسه نتایج تجربی و تئوری تغییرات fbu/fbuo نسبت به Cw برای نمونه ها با قطر میلگرد یکسان..... ۴۶
شکل ۴-۷-ب- مقایسه نتایج تجربی و تئوری تغییرات fbu/fbuo نسبت به Cw برای نمونه ها با قطر بتن یکسان (D=100) ۴۷
شکل ۴-۸- تغییرات As/Aso نسبت به Cw برای تمام نمونه ها ۴۷
شکل ۴-۹- اثر خوردگی بر روی منحنی مقاومت کل برای نمونه S18-60 ..... ۴۸
شکل ۴-۱۰- اثر خوردگی بر روی منحنی مقاومت کل برای نمونه S18-100 ..... ۴۸
شکل ۴-۱۱- اثر خوردگی بر روی منحنی مقاومت کل برای نمونه S18-150 ..... ۴۹
شکل ۴-۱۲- اثر خوردگی بر روی منحنی مقاومت کل برای نمونه S25-100 ..... ۴۹

شکل ۴-۱۳- مقایسه نتایج بدست آمده برای نمونه‌های با پوشش بتنی متفاوت تحت تاثیر درصدخوردگی یکسان ۵۰
شکل ۴-۱۴- مقایسه نتایج بدست آمده برای نمونه‌های با قطر بتن یکسان ولی میلگرد متفاوت تحت تاثیر درصد خوردگی یکسان ۵۰
شکل ۴-۱۵-اثر خوردگی بر روی سهم کششی مؤثر بتن برای نمونهS18-60 ..... ۵۱
شکل ۴-۱۶-اثر خوردگی بر روی سهم کششی مؤثر بتن برای نمونهS18-100 ..... ۵۱
شکل ۴-۱۷-اثر خوردگی بر روی سهم کششی مؤثر بتن برای نمونهS18-150 ..... ۵۲
شکل ۴-۱۸-اثر خوردگی بر روی سهم کششی مؤثر بتن برای نمونهS25-100 ..... ۵۲
شکل ۴-۱۹- مقایسه نتایج بدست آمده برای نمونه‌های با پوشش بتنی متفاوت تحت تاثیر درصدخوردگی یکسان ۵۳
شکل ۴-۲۰- مقایسه نتایج بدست آمده برای نمونه‌های با قطر بتن یکسان ولی میلگرد متفاوت تحت تاثیر درصد خوردگی یکسان ۵۳
شکل ۵-۱- منحنی تنش-کزنش کششی تکمحوره بتن ۷۵
شکل ۵-۲- منحنی کششی تکمحوره بتن مسلح با آرماتور خورده نشده ۷۵
شکل ۵-۳- منحنی کششی تکمحوره بتن مسلح با آرماتور خورده شده ۷۶
شکل ۵-۴- نمائی از یک المان بتن مسلح و پارامترهای مورد نیاز زیرروالtsb ۷۶
شکل ۵-۵- فلوچارت زیرروال tsb ۷۷
شکل ۵-۶- معرفی برخی پارامترها در مدل چوی وچونگ tsb ۸۰
شکل ۵-۷- فلوچارت بخشهای اصلی زیرروال tsb ۸۱
شکل ۵-۸- مقایسه توزیع تنش پیوستگی قبل و بعد از نقطه ترک نهائی در مدل چوی وچونگ با مدل پیشنهادی ۸۱
شکل ۶-۱- منحنی تنش-کرنش فولاد ۹۶
شکل ۶-۲- انواع المانهای بکار رفته در برنامه HODA و درجات آزادی مربوط به آنها ۹۷
شکل ۶-۳- یک نمونه از المان میله‌ای ۹۸
شکل ۶-۴- المان لایه‌لایه شده ۹۹
شکل ۶-۵- شاخص‌های (KC) برای بارهای یکنواخت افزایشی ۱۰۰
شکل ۶-۶- سیستم مختصات کلی ۱۰۰
شکل ۶-۷- سیستم مختصات محلی ۱۰۱
شکل ۶-۸- سیستم‌های مختصات جدید و قدیم ۱۰۲
شکل ۶-۹- نمایشی از روش پله‌ای - تکراری همراه با سختی مماسی ۱۰۲
شکل۷-۱-جزئیات ابعاد وبارگذاری نمونه های تیر BCD ۱۱۰
شکل۷-۲-نحوه المانبندی نمونه های تیرBCD ۱۱۰

شکل۷-۳-معرفی درجات آزادی المانهای QLC3وRBE ۱۱۰
شکل۷-۴- نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی تیرBCD1 ..... ۱۱۱
شکل۷-۵-نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی تیرBCD2 ..... ۱۱۱
شکل ۷-۶- نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی تیرBCD3 ..... ۱۱۲
شکل ۷-۷-نسبت نتایج تحلیلی به نتایج آزمایشگاهی در مقابل در صد خوردگی..... ۱۱۲
شکل۷-۸- ابعاد ستونهای آزمایش شده توسط پریسلی و همکاران ۱۱۳
شکل۷-۹- ابعاد ستونهای آزمایش شده توسط پریسلی وهمکاران ۱۱۴
شکل ۷-۱۰-پاسخ نیرو-تغییرمکان جانبی ستون R1 ..... ۱۱۴
شکل ۷-۱۱-پاسخ نیرو-تغییرمکان جانبی ستون R3 ..... ۱۱۵
شکل ۷-۱۲-پاسخ نیرو-تغییرمکان جانبی ستون R5 ..... ۱۱۵

فهرست تصاویر

عنوان **صفحه**

تصویر ۳-۱جزئیات آزمایش کششی..... ۳۲

فهرست علائم

a	نصف فاصله دو ترک مجاور
A	مساحت المان
A_c	سطح مقطع المان بدون احتساب مساحت آرماتورها
A_g	سطح مقطع المان
A_s	سطح مقطع فولادها (با احتساب خوردگی آرماتور در صورت لزوم)
A_{s0}	سطح مقطع فولادها (بدون احتساب خوردگی آرماتور در صورت لزوم)
B	پارامتر کمکی در مدل چای وچونگ
$[B]$	ماتریس کرنش-جابجائی
$[B_b]$	ماتریس تغییرمکان خمشی-کرنش
$[B_P]$	ماتریس تغییر مکان درون صفحه ای- کرنش
c	پوشش آرماتور
$[C]$	ماتریس الحاقی
$[C_C]_i$	ماتریس الحاقی بتن لایه i ام
$[C_{i-1}]$	ماتریس الحاقی مماسی در آغاز تکرار i ام
$[C_S]_i$	ماتریس الحاقی لایه پخش شده فولادی i ام
$[C_{sp}]_i$	ماتریس الحاقی لایه صفحه فولادی i ام
c_{cr}	در صد خوردگی مربوط به بروز اولین ترک طولی
c_u	درصد خوردگی نهائی
c_w	درصد خوردگی
d	قطر آرماتور
$\{D\}$	بردار تغییر مکان گره ای سازه در دستگاه مختصات جهانی
$\{D_i\}$	بردار تغییر مکان گره ای سازه در دستگاه مختصات جهانی در تکرار i ام
$\{D\}_n$	بردار تغییر مکان گره ای المان در دستگاه مختصات جهانی
d_0	قطر آرماتور با احتساب اثرات خوردگی
$d\varepsilon_{ij}$	جز کرنش
$d\sigma_{ij}$	جز تنش
$\{esm\}$	بردار شامل کرنشهای اصلی منحنی تنش-کرنش کششی
E_b	مدول مماسی اولیه منحنی تنش پیوستگی-لغزش، مدول مماسی آرماتور
E_c	مدول مماسی اولیه منحنی تنش-کرنش بتن
E_i	مدول مماسی منحنی تنش-کرنش در جهت i ام

مدول مماسی اولیه منحنی تنش-کرنش آرماتور	E_s
مدول اولیه آرماتور در مرحله سخت شوندگی کرنش	E^*_s
بردار نیروهای گره ای معادل سازه	$\{F\}$
بردار نُرم	$\{F_0\}^i$
بردار نیروهای گره ای المان در دستگاه مختصات جهانی	$\{F\}_n$
تنش پیوستگی	f_b
تنش پیوستگی متوسط	f_{bm}
تنش پیوستگی نهائی	f_{bu}
تنش پیوستگی نهائی بدون احتساب خوردگی	f_{bu0}
مقاومت فشاری تک محوره بتن	f_c
نیروی کششی سهم بتن	F_c
نیروی کششی سهم فولاد	F_s
مقاومت کششی بتن	f_t
مقاومت کششی تک محوره بتن	f_t'
مقاومت جاری شدن آرماتور	f_y
پارامترشمارنده در الگوریتم پیشنهادی	i
شدت جریان الکتریکی	I
پارامتر کمکی در الگوریتم مدل پیشنهادی ،	k
پارامتر زوال مقاومت پس از نقطه اوج در معادله پوپویکس	
ماتریس سختی سازه در دستگاه مختصات جهانی	$[K]$
ماتریس سختی المان خمشی	$[k]_{bb}$
ماتریس سختی درون صفحه ای ناشی از المانهای میله ای	$[K_{BP}]$
ماتریس سختی سازه در تکرار i ام	$[K_i]$
ماتریس سختی المان در دستگاه مختصات محلی	$[K_m]_n$
ماتریس سختی المان در دستگاه مختصات جهانی	$\lfloor K \rfloor_n$
ماتریس سختی کوپله المان	$[k]_{pb}$
ماتریس سختی درون صفحه ای المان	$[k]_{pp}$
طول انتقال	l_t
طول انتقال در وضعیت بروز ترک کششی	l_t^{cr}
جرم	m
جرم نهایی	m_f

جرم اولیه	m_i
گزینه اتنخاب نوع منحنی سخت شوندگی کششی در نرم افزار HODA	$MDEP$
گزینه اتنخاب نوع واحد رایج در نرم افزارHODA	$MUNIT$
نسبت مدول مماسی اولیه منحنی تنش-کرنش فولاد به بتن، پارامتر شمارنده در الگوریتم مدل پیشنهادی، پارامتر برازش منحنی در معادله پوپویکس	n
تعداد لایه های بتن در المان پوسته	n_c
تعداد لایه های صفحات فولادی در المان پوسته	n_{sp}
تعداد لایه های فولاد پخش شده در المان پوسته	n_s
ماتریس توابع شکل	$[N]$
تعداد ترک کششی نمونه	N_{cr}
بار خارجی اعمالی به سازه	P
بردار نیروهای حجمی	$\{P\}$
پارامترشمارنده در الگوریتم مدل پیشنهادی	r
بردار نیروهای خارجی	$\{R\}$
فاصله دو ترک متوالی	S
بردار نیروهای گره ای المان در دستگاه مختصات محلی	$\{S\}_n$
بردار شامل تنشهای اصلی منحنی تنش-کرنش کششی	$\{scm\}$
فاصله متوسط ترک پایدار با احتساب اثرات خوردگی در صورت لزوم	s_m
فاصله متوسط ترک محاسبه شده در مدل چوی و چونگ	s'_m
فاصله متوسط ترک پایدار بدون احتساب اثرات خوردگی	s_{m0}
حداکثر فاصله دو ترک متوالی	$s_{\max}$
حداقل فاصله دو ترک متوالی	$s_{\min}$
ضخامت المان ، زمان	t
ماتریس تبدیل کرنش المان میله ای	$[t]$
بردار نیروهای سطحی	$\{T\}$
ضخامت لایه فولادی پخش شده i ام	t_{si}
نیروی کششی	T
نیروی کششی مربوط به جاری شدن آرماتور	T_y
نیروی کششی مربوط جاری شدن آرماتور بدون احتساب خوردگی	T_{y0}
درجه آزادی انتقالی در جهت محور x	u
بردار تغییر مکان در هر نقطه سازه	$\{U\}$
بردار تغییر مکان خمشی گره ای المان	$\{U_b\}$

بردار تغییر مکان در دستگاه مختصات محلی	$\{U\}_n$
بردار تغییر مکان درون صفحه ای گره ای المان	$\{U_p\}$
تغییرمکان بتن	U_c
تغییر مکان میلگرد	U_s
درجه آزادی انتقالی در جهت محور y	v
درجه آزادی انتقالی در جهت محور z	w
اندازه المان	x
فاصله جاری شدن آرماتور از مرکز ترک	x_y
دستگاه مختصات کارتزین	x, y, z
دستگاه مختصات محلی	x^*, y^*, z^*
دستگاه مختصات اصلی	x', y', z'
دستگاه مختصات جهانی(کلی)	X, Y, Z
بَردار انحنا	$\{\chi\}$
لغزش در ترک هنگام جاری شدن آرماتور	δ_y
لغزش در انتهای نمونه	Δ_e
بَردار کرنش در هر نقطه درون المان	$\{\varepsilon\}$
بَردار کرنش اولیه	$\{\bar{\varepsilon}\}$
کرنش	ε
کرنش معادل مقاومت کششی بتن	ε_{cr}
کرنش معادل مقاومت کششی تک محوره بتن	ε'_{cr}
کرنش معادل مقاومت فشاری تک محوره بتن	ε_{cu}
کرنش متوسط آرماتور	ε_{sm}
کرنش گسیختگی آرماتور	ε_{su}
کرنش گسیختگی بتن تحت کشش	ε_{tu}
کرنش گسیختگی بتن تحت فشار	ε_u
کرنش نهائی کششی بتن مسلح	ε_{cw}
کرنش کششی ترک	ε_w
کرنش جاری شدن آرماتور	ε_y
پارامتر کمکی در مدل چوی وچونگ، پارامتر نرم شوندگی ، کرنش مهندسی	γ
پارامتر کمکی در مدل چوی وچونگ	η
ضریب پواسن	ν

درجه آزادی دورانی حول محور x	θ_x
درجه آزادی دورانی حول محور y	θ_y
درصد آرماتور	ρ
تنش	σ
بردار تنش در هر نقطه درون المان	$\{\sigma\}$
بردار تنشهای اولیه	$\{\overline{\sigma}\}$
تنش متوسط در بتن	σ_{cm}
حداکثر تنش بتن	$\sigma_{c\max}$
درآزادی دورانی حول محور z	ω
پارامتر کمکی در مدل چوی وچونگ	ξ
محیط آرماتور	Ψ

۱

مقدمه و اصول اولیه

۱-۱-کلیات

بتن مسلح به عنوان یکی از پر کاربردترین مصالح در مهندسی عمران به دلایل متعددی رفتاری غیرخطی را تحت شرایط متفاوت بارگذاری از خود نشان می دهد. یکی از دلایل بروز این رفتار، لغزش بین آرماتور و بتن است. اغماض از رفتار لغزش-پیوستگی تبعات ناخوشایندی بهمراه دارد، بطور مثال شواهد آزمایشگاهی متعددی نشان می دهد که رفتار لغزش-پیوستگی نقش مهمی در افزایش نرمی قابهای بتن مسلح دارد[۱]. همچنین رفتار لغزش-پیوستگی الگوی ترک را نیز متاثر می سازد[۲].

امّا از جهتی دیگر برای تحلیل یک سازه دچار آسیب شده، نیاز است تا آسیبهای وارده، مانند خوردگی آرماتور را به نوعی در مدل کامپیوتری اعمال نمود. خوردگی آرماتور تأثیرات شناخته شده و نشده متعددی بر رفتار سازه های بتن مسلح می گذارد. یکی از مهمترین تأثیرات شناخته شده این فرآیند، تأثیر بر پیوستگی بین فولاد و بتن می باشد[۳]. اعمال رفتار لغزش-پیوستگی و اثر خوردگی آرماتور روی آن در مدل ترک پخش شده مهمترین هدف این تحقیق می باشد. درصدهای کم خوردگی آرماتور درون بتن باعث افزایش اصطکاک بین فولاد و بتن شده و نهایتاً رفتار لغزش-پیوستگی را بهبود می بخشد امّا این دوره بسیار کوتاه است زیرا به عقیده

اکثر محققین ایجاد ترک ناشی از خوردگی آرماتور روی سطح عضو بتن مسلح، پیوستگی بین فولاد و بتن را کاهش می دهد[۴]. البُته ذکر این نکته لازم است که در تمام این تحقیق خوردگی میلگرد پس از اجرای سازه و درون بتن مدنظر می باشد.

از آنجاییکه از مهمترین اثرات رفتار لغزش-پیوستگی ایجاد پدیده ای بنام "سخت شوندگی کششی" در سازه های بتنی می باشد لذا با توجه به مطالب فوق، مدلی ساده وکارا برای مدلسازی رفتار سخت شوندگی کششی با ملاحظه اثرات رفتار لغزش-پیوستگی ارائه شده است، این مدل در یک نرم افزار تحلیل غیرخطی سازه های بتن مسلح (HODA) بصورت الگوریتمی گام به گام پیاده سازی گردیده است. آخرین نسخه برنامه HODA که در این تحقیق از آن برای پیاده سازی مدل پیشنهادی استفاده شده است توسط آقای شایانفرتهیه شده است. مهمترین قابلیتهای برنامه HODA که از برخی از این توانمندیها در مدلسازیهای موجود در این تحقیق از آنها استفاده شده است، اینچنین است: توانایی آنالیز بتن های با مقاومت بالا و متوسط، بکارگیری مدلهای ترک خوردگی متفاوت شامل مدلهای ترک ثابت و ترک چرخان، قابلیت حذف پدیده اثر اندازه المان با استفاده از روش های مقاومت یا مکانیک شکست و همچنین قابلیت آنالیز سازه ها تحت بارهای رفت و برگشتی[1] و بارهای یکنوا[2]. این برنامه می تواند پاسخ استاتیکی سازه های سه بعدی اعم از بتن ساده، بتن مسلح و یا بتن پیش تنیده را، که شامل صفحات نازک تحت تنش صفحه ای می باشند، تحت بارهای رفت و برگشتی و یکنوا ارائه نماید. اثرات وابسته به زمان نظیر خزش و انقباض حرارتی نیز می توانند در نظر گرفته شوند.

برنامه HODA از روش المان محدود لایه ای استفاده میکند. در این روش سازه بصورت مجموعه ای از المانهای صفحه ای نازک و با ضخامت ثابت، که هر کدام از المانها نیز به تعداد مشخصی لایه بتنی و فولادی تقسیم می شوند، مدل می گردد. تعداد لایه ها بستگی به رفتار سازه مورد آنالیز دارد. انواع المانهای برنامه HODA عبارتند از: المانهای غشایی، صفحه خمشی، پوسته ها، میله یک بعدی و المانهای مرزی.که البته در فصول آتی این تواناییها بیشتر تبیین می شود[۵].

قابلیت مدلسازی پدیده سخت شوندگی کششی با ملاحظه رفتارلغزش-پیوستگی و اثرات خوردگی آرماتور در راستای تقویت نرم افزار فوق، به برنامه افزوده شد. این مدل در حقیقت یک الگوریتم گام به گام با قابلیت پیش بینی نقطه ترک نهایی می باشد. این الگوریتم طوری تهیه شده

[1] cyclic
[2] monotonic

که منحنی سخت شوندگی کششی را بر اساس ویژگیهای هر المان تولید می کند. این مدل بر اساس مبانی تجربی و آزمایشگاهی تهیه شده است. همچنین مدل پیشنهادی با تحلیل نمونه های آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. این نمونه ها شامل نمونه های تیر وستون می شود. مدل مشابه دیگر پیشنهادی چوی[1] و چونگ[2] نیز در نرم افزار پیاده سازی شده و در تحلیل نمونه های ستون استفاده شده است.

۱-۲-موضوعات پایان نامه

موضوعات زیر در این پایان نامه مدنظر بوده است:

۱) ارائه مروری بر تحقیقات برخی از پژوهشگران در زمینه تأثیر خوردگی بر رفتار سازه های بتن مسلح.

۲) ارائه روندِ محاسباتی کارا و در عین حال قابل اعمال در مدل ترک پخش شده برای رفتار لغزش-پیوستگی با ملاحظه اثرات خوردگی روی آن.

۳) پیاده سازی مدل های سخت شوندگی کششی در نرم افزار شامل مدل پیشنهادی و مدل چوی وچونگ.

۴) ارائه مثالهائی از تحلیل تیرهای نمونه به کمک مدل پیشنهادی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی.

۵) ارائه مثالهایی از تحلیل ستونهای نمونه به کمک مدل پیشنهادی و مدل چوی و چونگ و همچنین مقایسه نتایج حاصل از تحلیل به کمک دو مدل سخت شوندگی کششی با یکدیگر و نتایج آزمایشگاهی.

۱-۳-ساختار پایان نامه

این نوشتار پنج فصل را به شرح زیر شامل می شود:

- فصل اول با عنوان " مقدمه و اصول اولیه" اهمیت و مبانی کار را اعلام می دارد.
- فصل دوم با عنوان "مروری بر تحقیقات" برنامه های تحقیقاتی را که توسط دیگر پژوهشگران برای بررسی اثرات نامطلوب خوردگی آرماتور بر رفتار سازه ای اعضای بتن مسلح صورت گرفته را، تشریح می کند. این تحقیقات در دوسته

[1] Choi C.K.
[2] Cheung S.H.

کلی، تحلیلی و آزمایشگاهی گنجانده شده و خلاصه ای از عملکرد سایر محققین در این فصل آورده شده است.

- فصل سوم با عنوان "رفتارپیوستگی-لغزش و آزمایشات مربوطه" برنامه آزمایشگاهی انجام شده در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن را تشریح می کند. در این برنامه آزمایشات کشش مستقیم بر نمونه های بدون خوردگی آرماتور صورت گرفته است. بر اساس این آزمایشات روابطی استخراج شده که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.
- فصل چهارم با عنوان "اثرت خوردگی بر رفتار پیوستگی-لغزش وآزمایشات مربوطه" برنامه آزمایشگاهی انجام شده در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن را تشریح می کند. در این برنامه آزمایشات کشش مستقیم بر نمونه های با درصد خوردگی آرماتور متفاوت صورت گرفته است. بر اساس این آزمایشات روابطی استخراج شده که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.
- فصل پنجم با عنوان "مدل پیشنهادی" مدلهای سخت شوندگی کششی راارائه می نماید. در این فصل نحوه پیاده سازی مدل پیشنهادی در نرم افزار HODA به صورت الگوریتمی گام به گام ارائه می گردد.
- فصل ششم با عنوان " اجزا محدود غیر خطی سازه های بتن آرمه" به دو مطلب مختص شده است: در ابتدا، مدل هیپو الاستیک موجود در نرم افزار تشریح می گردد. سپس، فرمولبندی اجزا محدود غیر خطی ارائه می شود.
- فصل هفتم با عنوان " تحلیل نمونه های آزمایشگاهی" به تحلیل ستونها و تیرهای نمونه توسط نرم افزار و مقایسه پاسخ محاسباتی نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی تخصیص یافته است.
- و بالاخره ، فصل هشتم با عنوان" نتایج" به تجزیه و تحلیل نتایج این پژوهش و ارائه پیشنهاداتی برای کارهای بعدی مختص شده است.