

فهرست مطالب

فصل اول: تشریح موضوع و اهداف پایان نامه	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۲-۱- مروری بر کامپوزیت‌ها، خواص و کاربرد آنها	۲
۱-۲-۱- کامپوزیت	۲
۲-۲-۱- FRP	۲
۳-۲-۱- الیاف مورد استفاده در کامپوزیت‌های FRP	۳
۴-۲-۱- رزین‌های موجود در ساخت FRP	۵
۵-۲-۱- انواع کامپوزیت‌های FRP مورد استفاده در مهندسی سازه	۶
۶-۲-۱- مقاوم سازی سازه‌ها با استفاده از کامپوزیت‌های FRP	۱۰
۷-۲-۱- دلایل استفاده روز افزون از کامپوزیت‌های FRP	۱۲
۸-۲-۱- اثرات بالقوه کاربرد کامپوزیت‌های FRP در تقویت سازه‌ها	۱۳
۹-۲-۱- مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌های FRP جهت مدل سازی اجزاء محدود	۱۴
۳-۱- شرح موضوع	۱۶
۴-۱- اهمیت موضوع	۱۷
۵-۱- اهداف پایان نامه	۲۰
۶-۱- فصل بندی پایان نامه	۲۱
فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین	۲۳
۱-۲- مقدمه	۲۳
۲-۲- ارائه منحنی تنش - کرنش بتن محصور شده	۲۳
۳-۲- تحقیقات پیرامون پارامترهای مؤثر در محصور شدگی بتن	۲۷
۴-۲- حل غیر خطی بتن محصور شده با FRP به روش اجزاء محدود	۳۲
فصل سوم: مفاهیم اساسی	
و مدل‌های تنش - کرنش بتن محصور شده در FRP	۳۵
۱-۳- مقدمه	۳۵
۲-۳- مفهوم محصور شدگی	۳۵

۳-۳- رفتار ستون‌های دایره‌ای محصور شده با کامپوزیت FRP	۳۶
۳-۴- اثرات محصور شدگی	۳۷
۳-۵- شکل پذیری و اهمیت آن در سازه‌های بتنی	۳۸
۳-۵-۱- خواص شکل پذیری بتن	۴۰
۳-۵-۲- شکل پذیری در ستون‌های بتنی	۴۰
۳-۶- مدل‌های تنش - کرنش بتن محصور شده در کامپوزیت FRP	۴۱
۳-۶-۱- مدل فردیس و خلیلی (۱۹۸۲)	۴۱
۳-۶-۲- مدل سعادت‌منش و همکاران (۱۹۹۴)	۴۲
۳-۶-۳- مدل کاربهری و گائو (۱۹۹۷)	۴۴
۳-۶-۴- مدل میوچی و همکاران (۱۹۹۷)	۴۶
۳-۶-۵- مدل سامان و همکاران (۱۹۹۸)	۴۷
۳-۶-۶- مدل توتانچی (۱۹۹۸)	۴۹
۳-۶-۷- مدل صافی و همکاران (۱۹۹۸)	۵۰
۳-۶-۸- مدل کونو و همکاران (۱۹۹۸)	۵۰
۳-۶-۹- مدل شیائو و وو (۲۰۰۰)	۵۱
۳-۶-۱۰- مدل پالدیو و همکاران (۲۰۰۰)	۵۲
۳-۶-۱۱- مدل تنگ و لام (۲۰۰۱ و ۲۰۰۲)	۵۳
۳-۶-۱۲- مدل چاللی و همکاران (۲۰۰۳)	۵۶
۳-۶-۱۳- مدل تنگ و همکاران (۲۰۰۶)	۵۷
۳-۶-۱۴- مدل یوسف و همکاران (۲۰۰۷)	۵۹
۳-۷- معیار انهدام بتن محصور در کامپوزیت FRP تحت بار محوری	۶۱

فصل چهارم: مدل سازی غیر خطی در نرم افزار

و بررسی صحت نتایج آن	۶۵
۴-۱- مقدمه	۶۵
۴-۲- مروری بر مفهوم آنالیز غیر خطی	۶۶
۴-۲-۱- تشریح مفاهیم موجود در نرم افزار جهت آنالیز غیر خطی	۶۶
۴-۳- پلاستیسیته‌ی بتن	۷۰
۴-۳-۱- سطح شکست	۷۱
۴-۳-۲- معیار شکست	۷۳

۷۵	مدل‌های یک پارامتری
۷۶	مدل‌های دو پارامتری
۷۶	مدل‌های سه پارامتری
۷۶	مدل چهار پارامتری
۷۷	مدل‌های پنج پارامتری
۷۷	مدل‌های پلاستیسیته‌ی مورد استفاده در نرم افزار
۷۷	مدل ترک هاله‌ای
۷۸	مدل دراگر- پراگر
۷۹	مدل پلاستیسیته‌ی آسیب بتن
۸۶	معرفی پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی بتن در نرم افزار
۸۷	۱-۵-۴ رابطه‌ی تنش- کرنش فشاری تک محوره بتن
۸۹	۲-۵-۴ منحنی تنش- کرنش بتن تحت کشش
۹۰	۳-۵-۴ معیار انرژی شکست در ترک خوردگی بتن
۹۱	۴-۵-۴ مدل سازی فولاد
۹۲	۵-۵-۴ مدل سازی نواحی تکیه گاهی و نواحی بارگذاری
۹۳	۶-۵-۴ شبکه بندی و المان مورد استفاده
۹۴	۷-۵-۴ مدل سازی کامپوزیت FRP
۹۵	۶-۴ بررسی صحت مدل سازی اعضای بتن آرمه در نرم افزار
۹۵	۱-۶-۴ مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی رحیمی و هوتچینسن با نتایج مدل نرم افزاری
۹۸	۲-۶-۴ مدل سازی بتن محصور نشده
۹۹	۳-۶-۴ مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی صافی و همکاران با نتایج مدل نرم افزاری

فصل پنجم: اصلاح مدل پلاستیسیته‌ی دراگر- پراگر

۱۰۱	و بررسی صحت نتایج آن در نرم افزار
۱۰۱	۱-۵- مقدمه
۱۰۲	۲-۵- رفتار عمومی بتن محصور شده در کامپوزیت FRP
۱۰۵	۳-۵- مدل‌های پلاستیسیته‌ی دراگر- پراگر
۱۰۶	۱-۳-۵- معیار تسلیم
۱۱۳	۲-۳-۵- سخت شدگی و نرم شدگی کرنش
۱۱۸	۳-۳-۵- قانون جریان

۱۲۷	..... ۴-۳-۵- جمع بندی مطالب
۱۲۸	..... ۵-۳-۵- اصلاحات پیشنهاد شده
۱۲۹	..... ۶-۳-۵- مدل دراگر- پراگر گسترش یافته در نرم افزار
۱۳۱	..... ۷-۳-۵- متغیرهای وابسته به حل (SDFV) در نرم افزار
۱۳۲	..... ۸-۳-۵- اعمال اصلاحات پیشنهاد شده در نرم افزار
۱۳۴	..... ۴-۵- بررسی صحت نتایج مدل دراگر- پراگر گسترش یافته
۱۳۴	..... ۱-۴-۵- پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی با مدل دراگر- پراگر گسترش یافته
۱۳۶	..... ۲-۴-۵- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی تنگ و همکاران با نتایج مدل نرم افزاری

فصل ششم: اصلاح مدل پلاستیسیته‌ی آسیب بتن

۱۴۵	..... و بررسی صحت نتایج آن در نرم افزار
۱۴۵	..... ۱-۶- مقدمه
۱۴۶	..... ۲-۶- مدل اصلی اصلاح شده جهت بیان رفتار بتن
۱۴۷	..... ۳-۶- مدل پلاستیسیته‌ی آسیب بتن در نرم افزار
۱۴۸	..... ۱-۳-۶- متغیر آسیب
۱۴۹	..... ۲-۳-۶- معیار تسلیم
۱۵۰	..... ۳-۳-۶- قانون سخت شدگی- نرم شدگی کرنش
۱۵۲	..... ۴-۶- اصطلاحات پیشنهاد شده
۱۵۲	..... ۱-۴-۶- متغیر آسیب
۱۵۴	..... ۲-۴-۶- معیار تسلیم
۱۵۵	..... ۳-۴-۶- قانون سخت شدگی- نرم شدگی کرنش
۱۵۵	..... ۴-۴-۶- قانون جریان
۱۵۶	..... ۵-۶- بتن تحت محصور شدگی غیر یکنواخت
۱۵۸	..... ۶-۶- بررسی صحت نتایج مدل پلاستیسیته‌ی آسیب بتن اصلاح شده
۱۵۸	..... ۱-۶-۶- پارامترهای مورد نیاز جهت مدل سازی با مدل پلاستیسیته‌ی آسیب اصلاح شده
۱۶۰	..... ۲-۶-۶- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی تنگ و همکاران با نتایج مدل نرم افزاری
۱۶۴	..... ۳-۶-۶- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی کمپین با نتایج مدل نرم افزاری
۱۷۰	..... ۴-۶-۶- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی لی و یوو با نتایج مدل نرم افزاری

فصل هفتم: رفتار محوری ستون‌های بتنی چهار گوش

با تقویت قائم نوار FRP در گوشه‌ها و دور پیچ افقی FRP ۱۷۵

۱-۷- مقدمه ۱۷۵

۲-۷- رفتار ستون‌های چهار گوش محصور در کامپوزیت FRP ۱۷۶

۱-۲-۷- تأثیر محصور شدگی غیر یکنواخت بر رفتار بتن ۱۷۸

۲-۲-۷- تأثیر محصور شدگی غیر یکنواخت بر رفتار FRP ۱۸۲

۳-۷- مقاوم سازی گوشه‌های ستون چهار گوش با استفاده از تکنیک جدید ۱۸۴

۱-۳-۷- تأثیر حالات مختلف مقاوم سازی بر روی نمودار بار- تغییر مکان ۱۸۷

۴-۷- مقاوم سازی گوشه‌های نمونه‌ی لی و یوو با استفاده از تکنیک جدید ۲۰۵

فصل هشتم: خلاصه، نتیجه گیری و پیشنهادات ۲۰۷

۱-۸- جمع بندی ۲۰۷

۲-۸- نتایج ۲۰۷

۳-۸- پیشنهادات ۲۱۰

منابع و مراجع ۲۱۱

پیوست شماره‌ی یک ۲۱۹

پیوست شماره‌ی دو ۲۲۷

پیوست شماره‌ی سه ۲۴۱

فهرست تصاویر

- شکل ۱-۱- اجزای تشکیل دهنده کامپوزیت‌های FRP ۳
- شکل ۲-۱- پروفیل‌های FRP ۶
- شکل ۳-۱- انواع میلگردهای FRP ۷
- شکل ۴-۱- اجرای صفحات پیش ساخته‌ی FRP ۹
- شکل ۵-۱- نمونه‌هایی از تقویت ستون با پوشش FRP ۱۱
- شکل ۶-۱- حالات مختلف تقویت ستون‌ها با کامپوزیت FRP ۱۲
- شکل ۷-۱- حالات مختلف تقویت اتصال با کامپوزیت FRP ۱۲
- شکل ۸-۱- تقویت دودکش‌ها، دیواره تونل‌ها و لوله‌های بتنی با کامپوزیت FRP ۱۴
- شکل ۹-۱- جهت‌الیاف در کامپوزیت FRP ۱۵
- شکل ۱۰-۱- نمودار تنش - کرنش مصالح ترد و شکل پذیر ۱۸
- شکل ۱۱-۱- شکست برشی ۱۹
- شکل ۱۲-۱- شکست خمشی مفصل پلاستیک ۱۹
- شکل ۱۳-۱- شکست در وصله اتصال ۱۹
- شکل ۱-۲- شکست ستون‌های بتنی محصور شده به علت پارگی کامپوزیت FRP ۲۶
- شکل ۲-۲- تأثیر شعاع گوشه بر محصور شدگی ستون‌های دایره‌ای و چهار گوش ۳۲
- شکل ۳-۲- مدل محصور شده ستون دایره‌ای با ابعاد واقعی ۳۳
- شکل ۱-۳- نحوه اعمال فشار محصورشدگی ۳۷
- شکل ۲-۳- منحنی تنش - کرنش ستون‌های بتنی در شرایط معمولی و محصور شده ۳۸
- شکل ۳-۳- منحنی تنش - کرنش فشاری تک محوره‌ی بتن ۴۱
- شکل ۴-۳- مدل تنش - کرنش ارائه شده برای بتن محصور شده توسط سعادتمنش و همکاران ۴۴
- شکل ۵-۳- منحنی تنش - کرنش بتن محصور شده‌ی مدل کاربهراری و گائو ۴۵
- شکل ۶-۳- منحنی تنش - کرنش بتن محصور شده‌ی مدل سامان و همکاران ۴۸
- شکل ۷-۳- مدل تنش - کرنش ارائه شده توسط تنگ و لام ۵۴

- شکل ۳-۸ - سطح مقطع مؤثر محصور شده در مقاطع چهار گوش ۵۵
- شکل ۳-۹ - قطر معادل در مقاطع چهار گوش ۵۵
- شکل ۳-۱۰ - تبدیل مقطع چهار گوش به مقطع بیضوی ۵۶
- شکل ۳-۱۱ - درون‌یابی نمودار تنش - کرنش بتن محصور در FRP در فشار محصور شدگی فعال ۵۸
- شکل ۳-۱۲ - مدل تنش - کرنش ستون‌های چهار گوش ارائه شده توسط یوسف و همکاران ۵۹
- شکل ۳-۱۳ - مقایسه مدل تنش - کرنش یوسف و همکاران با نتایج آزمایشگاهی ۶۰
- شکل ۳-۱۴ - کرنش جانبی یکنواخت بدون چسبندگی بین کامپوزیت و بتن ۶۲
- شکل ۳-۱۵ - کرنش موضعی حداکثر به علت چسبندگی میان کامپوزیت و بتن ۶۳
- شکل ۳-۱۶ - منحنی‌های شکست تنش دو محوره‌ی تسای - وو ۶۴
- شکل ۴-۱ - مفهوم گام و نمو در آنالیز غیر خطی ۶۷
- شکل ۴-۲ - نیروهای داخلی و خارجی وارد بر جرم ۶۸
- شکل ۴-۳ - تکرار اول یک نمو در آنالیز غیر خطی ۶۹
- شکل ۴-۴ - تکرار دوم یک نمو در آنالیز غیر خطی ۷۰
- شکل ۴-۵ - سطح شکست شماتیک بتن در فضای تنش‌های سه بعدی ۷۱
- شکل ۴-۶ - مقاطع انحرافی سطح شکست ۷۲
- شکل ۴-۷ - نصف النهارهای سطح شکست ۷۳
- شکل ۴-۸ - مختصات ξ و ρ ۷۴
- شکل ۴-۹ - حالت تنش در یک نقطه‌ی تصویر شده روی صفحه‌ی انحرافی ۷۵
- شکل ۴-۱۰ - اثر K_c روی مقطع عرضی سطوح تسلیم در صفحه‌ی انحرافی ۸۱
- شکل ۴-۱۱ - سطح تسلیم تنش مستوی ۸۲
- شکل ۴-۱۲ - رفتار تک محوره‌ی بتن، الف - تحت کشش، ب - تحت فشار ۸۳
- شکل ۴-۱۳ - اثر پارامتر بازیافت سختی فشاری ۸۵
- شکل ۴-۱۴ - رفتار بتن در فشار تک محوره ۸۸
- شکل ۴-۱۵ - رفتار بتن در کشش تک محوری ۹۰
- شکل ۴-۱۶ - منحنی تنش - انرژی شکست پس از ترک خوردگی ۹۱
- شکل ۴-۱۷ - مدل سازی فولادها به صورتی اعضای یک بعدی در نرم افزار ۹۲

- شکل ۴-۱۸- مشخصات هندسی و چیدمان آرماتورها در نمونه مدل سازی شده..... ۹۶
- شکل ۴-۱۹- شبکه بندی تیر بتن آرمه در نرم افزار..... ۹۶
- شکل ۴-۲۰- شبکه بندی فولاد و کامپوزیت در نرم افزار..... ۹۷
- شکل ۴-۲۱- نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر، حاصل از نتایج آزمایش و حل نرم افزار..... ۹۷
- شکل ۴-۲۲- نمودار تنش- کرنش بتن محصور نشده..... ۹۸
- شکل ۴-۲۳- بارگذاری و شبکه بندی بتن و کامپوزیت در نرم افزار..... ۹۹
- شکل ۴-۲۴- نمودار تنش محوری- کرنش محوری حاصل از نتایج آزمایش و حل نرم افزار..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱- نمودار تنش- کرنش بتن محصور شده..... ۱۰۲
- شکل ۵-۲- ویژگی‌های اتساع بتن محصور شده..... ۱۰۳
- شکل ۵-۳- سطوح تسلیم دراکر- پراگر در صفحه‌ی نصف النهاری..... ۱۰۶
- شکل ۵-۴- سطوح تسلیم اولیه و ثانویه دراکر- پراگر در صفحه‌ی نصف النهاری..... ۱۰۸
- شکل ۵-۵- سطوح تسلیم در صفحه‌ی انحرافی..... ۱۰۸
- شکل ۵-۶- نمودار تنش- کرنش بتن محصور شده تحت فشار..... ۱۱۵
- شکل ۵-۷- نمودار تئوری منحنی تنش- کرنش بتن محصور شده‌ی فعال و محصور شده با FRP..... ۱۱۶
- شکل ۵-۸- نمودار تنش- کرنش بتن محصور نشده و محصور شده، ارائه شده توسط یوو..... ۱۱۷
- شکل ۵-۹- نمودار کرنش جانبی- کرنش محوری بتن محصور شده‌ی فعال..... ۱۲۱
- شکل ۵-۱۰- زاویه‌ی اتساع بتن محصور شده بر اساس روابط ارائه شده توسط تنگ و همکاران..... ۱۲۲
- شکل ۵-۱۱- نمودار تنش- کرنش محوری مدل دراکر- پراگر با زاویه اتساع ثابت..... ۱۲۳
- شکل ۵-۱۲- نمودار کرنش جانبی- کرنش محوری مدل دراکر- پراگر با زاویه اتساع ثابت..... ۱۲۵
- شکل ۵-۱۳- مقایسه بین بتن محصور شده‌ی فعال و محصور شده با کامپوزیت FRP..... ۱۲۶
- شکل ۵-۱۴- سطح شکست مدل دراکر- پراگر گسترش یافته در نرم افزار
- الف- سطح شکست در صفحات نصف النهاری، ب- سطح شکست در صفحات انحرافی..... ۱۳۱
- شکل ۵-۱۵- بارگذاری و شبکه بندی بتن و کامپوزیت در نرم افزار..... ۱۳۷
- شکل ۵-۱۶- نمودارهای تنش- کرنش بتن در فشارهای محصور شدگی متفاوت..... ۱۳۸
- شکل ۵-۱۷- نمودار تنش محوری- کرنش محوری و کرنش جانبی
- حاصل از نتایج آزمایش و حل نرم افزار..... ۱۳۹

- شکل ۵-۱۸- نمودار تغییرات زاویه‌ی اتساع وابسته به کرنش پلاستیک محوری در مدل تنگ و همکاران ۱۴۰
- شکل ۵-۱۹- مقایسه‌ی نتایج مدل سازی با در نظر گرفتن زاویه‌ی اتساع ثابت و متغیر ۱۴۰
- شکل ۵-۲۰- انواع المان‌های موجود در نرم افزار؛ الف- سه گرهی، ب- هشت گرهی و ج- شش گرهی ۱۴۱
- شکل ۵-۲۱- تاثیر اندازه‌ی شبکه‌ی بندی بر نتایج حاصل از حل غیر خطی نمونه‌ی بتنی محصور شده ۱۴۲
- شکل ۵-۲۲- تأثیر نوع شبکه بندی بر نتایج حاصل از حل غیر خطی نمونه‌ی بتنی محصور شده ۱۴۳
- شکل ۵-۲۳- کانتورهای تنش، الف- معیار شکست تسای- وو، ب- تنش در راستای الیاف FRP ۱۴۴
- شکل ۶-۱- نمودار تنش- کرنش بتن تحت فشار ۱۴۶
- شکل ۶-۲- سطح تسلیم مدل پلاستیسیته‌ی آسیب در نرم افزار الف- سطح شکست در صفحات نصف النهاری، ب- سطح شکست در صفحات انحرافی ۱۵۱
- شکل ۶-۳- نمودار پتانسیل جریان در صفحه‌ی نصف النهاری ۱۵۱
- شکل ۶-۴- قطر مقطع دایره‌ای هم سطح با مقطع چهار گوش ۱۵۷
- شکل ۶-۵- نمودارهای متغیر آسیب در کرنش‌های محوری و فشارهای محصور شدگی متفاوت در مدل تنگ و همکاران ۱۶۱
- شکل ۶-۶- نمودار تنش محوری- کرنش محوری حاصل از نتایج آزمایش و حل نرم افزار ۱۶۲
- شکل ۶-۷- مقایسه‌ی نمودار تنش محوری- کرنش محوری حاصل از مدل‌های اصلاح شده ۱۶۲
- شکل ۶-۸- مقایسه‌ی نتایج مدل سازی با در نظر گرفتن زاویه‌ی اتساع ثابت و متغیر ۱۶۳
- شکل ۶-۹- کانتورهای تنش؛ الف- تنش در راستای الیاف FRP، ب- معیار شکست تسای- وو ۱۶۴
- شکل ۶-۱۰- حالت بارگذاری و شبکه بندی بتن و کامپوزیت در نرم افزار ۱۶۵
- شکل ۶-۱۱- نمودارهای تنش- کرنش بتن در فشارهای محصور شدگی متفاوت در مدل کمپیون ۱۶۶
- شکل ۶-۱۲- نمودارهای متغیر آسیب در کرنش‌های محوری و فشارهای محصور شدگی متفاوت در مدل کمپیون ۱۶۷
- شکل ۶-۱۳- نمودار تغییرات زاویه‌ی اتساع وابسته به کرنش پلاستیک محوری در مدل کمپیون ۱۶۸
- شکل ۶-۱۴- نمودار بار- تغییر مکان حاصل از نتایج آزمایش و حل نرم افزار ۱۶۹
- شکل ۶-۱۵- تانسورهای تنش؛ الف- تنش در راستای الیاف FRP، ب- معیار شکست تسای- وو ۱۷۰
- شکل ۶-۱۶- حالت بارگذاری و شبکه بندی بتن و کامپوزیت در نرم افزار ۱۷۱

- شکل ۶-۱۷- نمودارهای تنش- کرنش بتن در فشارهای محصور شدگی متفاوت در مدل لی و یوو ... ۱۷۲
- شکل ۶-۱۸- نمودارهای متغیر آسیب در کرنش‌های محوری و فشارهای محصور شدگی متفاوت در مدل لی و یوو..... ۱۷۳
- شکل ۶-۱۹- نمودار تغییرات زاویه‌ی اتساع وابسته به کرنش پلاستیک محوری در مدل لی و یوو.... ۱۷۴
- شکل ۶-۲۰- نمودار تنش- کرنش حاصل از نتایج آزمایش و حل نرم افزار..... ۱۷۴
- شکل ۷-۱- تغییر در توزیع فشار محصور شدگی بر اساس تغییر در شعاع گوشه..... ۱۷۷
- شکل ۷-۲- سطح مقطع مؤثر محصور شده..... ۱۷۷
- شکل ۷-۳- تنش جانبی بر حسب MPa در مقطع چهار گوش با شعاع گوشه‌های مختلف..... ۱۷۹
- شکل ۷-۴- نمودار تنش محوری بر حسب MPa در شعاع گوشه‌های متفاوت..... ۱۸۰
- شکل ۷-۵- نمودار تنش جانبی بر حسب MPa در شعاع گوشه‌های متفاوت..... ۱۸۰
- شکل ۷-۶- نمودار تنش جانبی بر حسب MPa در شعاع گوشه‌های متفاوت..... ۱۸۱
- شکل ۷-۷- توزیع تنش محوری بر حسب MPa در ارتفاع نمونه..... ۱۸۱
- شکل ۷-۸- توزیع کرنش حلقوی در ارتفاع نمونه..... ۱۸۳
- شکل ۷-۹- شکست نمونه در آزمایشگاه..... ۱۸۳
- شکل ۷-۱۰- مود شکست در نمونه‌ی محصور شده با لایه‌های پیوسته‌ی CFRP..... ۱۸۵
- شکل ۷-۱۱- تکنیک ارائه شده جهت مقاوم سازی موضعی گوشه‌های ستون‌های چهار گوش..... ۱۸۶
- شکل ۷-۱۲- نمایی از شبکه بندی نوارهای گوشه در نرم افزار..... ۱۸۶
- شکل ۷-۱۳- نمایی از نمونه‌های مقاوم سازی با تکنیک جدید ارائه شده..... ۱۸۷
- شکل ۷-۱۴- نمودار بار- تغییر مکان حاصل از نتایج آزمایش و حل نرم افزار..... ۱۸۷
- شکل ۷-۱۵- نمودار بار- تغییر مکان حاصل از نتایج آزمایش و حل نرم افزار..... ۱۸۸
- شکل ۷-۱۶- نمودار بار- تغییر مکان حاصل از نتایج آزمایش و حل نرم افزار..... ۱۸۸
- شکل ۷-۱۷- نمودار بار- تغییر مکان حاصل از نتایج آزمایش و حل نرم افزار..... ۱۸۸
- شکل ۷-۱۸- نمودار بار- تغییر مکان حاصل از نتایج آزمایش و حل نرم افزار..... ۱۸۹
- شکل ۷-۱۹- نمودار بار- تغییر مکان حاصل از نتایج آزمایش و حل نرم افزار..... ۱۸۹

شکل ۷-۲۰- کانتورهای تنش کششی

الف- نمونه‌ی محصور شده با مقاوم سازی موضعی در گوشه‌ها

ب- نمونه‌ی محصور شده بدون مقاوم سازی موضعی در گوشه‌ها ۱۹۱

شکل ۷-۲۱- نمودار تنش جانبی بر حسب MPa در نمونه‌ی محصور شده به صورت عادی ۱۹۲

شکل ۷-۲۲- نمودار تنش جانبی بر حسب MPa در نمونه‌ی محصور شده با تکنیک جدید ۱۹۳

شکل ۷-۲۳- نمودار تنش جانبی بر حسب MPa در نمونه‌ی محصور شده با تکنیک جدید ۱۹۴

شکل ۷-۲۴- نمودار تنش جانبی بر حسب MPa در نمونه‌ی محصور شده با تکنیک جدید ۱۹۴

شکل ۷-۲۵- کانتورهای تنش کششی ۱۹۵

الف- لایه‌های پیوسته در نمونه‌ی محصور شده با مقاوم سازی موضعی در گوشه‌ها

ب- نوارهای گوشه در نمونه‌ی محصور شده با مقاوم سازی موضعی در گوشه‌ها

شکل ۷-۲۶- کانتورهای تنش؛ الف- تنش در راستای الیاف FRP، ب- معیار شکست تسای-وو ۱۹۶

شکل ۷-۲۷- نمایی از حالات محصور شدگی با لایه‌های ناپیوسته‌ی کامپوزیت CFRP ۱۹۷

شکل ۷-۲۸- نمایی از شبکه بندی نوارهای گوشه

و لایه‌های ناپیوسته‌ی کامپوزیت CFRP در نرم افزار ۱۹۷

شکل ۷-۲۹- نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌ی محصور شده با حالات مختلف مقاوم سازی ۱۹۸

شکل ۷-۳۰- مود شکست در نمونه‌ی محصور شده با لایه‌های ناپیوسته‌ی CFRP ۱۹۸

شکل ۷-۳۱- نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌ی محصور شده با حالات مختلف مقاوم سازی ۱۹۹

شکل ۷-۳۲- کانتورهای تنش کششی در نمونه‌ی محصور شده با مقاوم سازی موضعی ۲۰۰

الف- B/B=2.05، ب- B/B=2.05

شکل ۷-۳۳- نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌ی محصور شده در شعاع گوشه‌های متفاوت ۲۰۲

شکل ۷-۳۴- نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌ی محصور شده

در شعاع گوشه‌های متفاوت و مقاوم سازی شده با تکنیک جدید ۲۰۳

شکل ۷-۳۵- نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌ی محصور شده با حالات مختلف مقاوم سازی ۲۰۴

شکل ۷-۳۶- کانتورهای تنش کششی در نمونه‌ی محصور شده با دو لایه کامپوزیت CFRP؛ ۲۰۵

الف- با شعاع گوشه‌ی ۱۰ میلی‌متر؛ ب- با شعاع گوشه ۱۰ میلی‌متر و نوارهای گوشه

شکل ۷-۳۷- نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌ی محصور شده در حالت مقاوم سازی شده ۲۰۴

فصل اول

تشریح موضوع و اهداف پایان نامه

۱-۱- مقدمه

در بسیاری از سازه‌های بتن آرمه، به علت ضعف اجرای بتن و یا تغییر کاربری، ستون‌های بسیاری را می‌توان یافت که نیاز به تقویت دارند. بر اساس آنچه در اجرای سازه‌ها به چشم می‌خورد، می‌توان بیش از ۶۰ درصد سازه‌ها را دچار ضعف در اجرای بتن و در نتیجه، دارای ضعف مقاومت در بتن ایجاد شده دانست. در حال حاضر روش‌های مختلفی برای تقویت ستون‌ها وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به افزایش سطح مقطع ستون، محصور سازی با استفاده از ژاکت‌های فولادی و همچنین محصور شدگی^۱ با استفاده از ورق‌های FRP^۲ اشاره کرد. در همه‌ی این روش‌ها، با توجه به اثر پواسون، کرنش جانبی ستون محصور شده، سبب ایجاد نیروی کششی در اعضای محصور کننده و در نتیجه، اعمال فشار جانبی به ستون محصور شده می‌گردد. این وضعیت در هسته‌ی بتنی ستون‌ها در اثر وجود خاموت دور هسته مشاهده می‌شود.

مطالعاتی که برای درک رفتار ستون‌های بتنی محصور شده انجام گرفته است، شامل تحقیقات آزمایشگاهی و مدل سازی‌های نرم افزاری می‌باشد، تمایل به مدل سازی و تحلیل سازه‌های بتنی، به دلیل نیاز به پیش بینی دقیق پاسخ غیر خطی این سازه‌ها تحت بارهای استاتیکی و متناوب، افزایش یافته است.

در این فصل پس از آشنایی در مورد خصوصیات و انواع کامپوزیت‌های FRP و روش‌های استفاده از آن در ساخت و مقاوم سازی سازه‌های بتنی، به بیان شرح و اهمیت موضوع محصور

^۱-Confinement

^۲-Fiber Reinforced Polimer

سازی ستون‌های بتنی پرداخته و سپس توضیحاتی در مورد محصور شدگی ستون‌های چهار گوش بیان شده و در انتها نیز به اهداف و فصل بندی پایان نامه اشاره می‌گردد.

۲-۱- مروری بر کامپوزیت‌ها، خواص و کاربرد آنها

از آنجا که در این پایان‌نامه‌ی از کامپوزیت FRP برای مقاوم سازی ستون‌های بتن‌آرمه استفاده خواهد شد، لازم است ابتدا این مواد به طور کامل معرفی گردند. به این منظور در این قسمت، مطالبی جهت شناخت بهتر این مواد و کاربرد آنها در مهندسی سازه ذکر می‌گردد.

۱-۲-۱- کامپوزیت^۱

کامپوزیت‌ها موادی هستند که از دو قسمت تشکیل می‌شوند. این دو قسمت، اجزاء میکروسکوپی هستند و قابل تحلیل در یکدیگر نمی‌باشند [۱]. چوب را می‌توان به عنوان یک کامپوزیت طبیعی نام برد [۲]. فیبرهای سلولزی چوب، مقاومت مورد نیاز را تأمین می‌کند، این فیبرها به وسیله شیرهی گیاه در کنار یکدیگر نگه داشته می‌شود. کامپوزیت های FRP، جدیدترین ترکیب در مهندسی سازه به شمار خواهند رفت.

۱-۲-۲-۱- FRP^۲

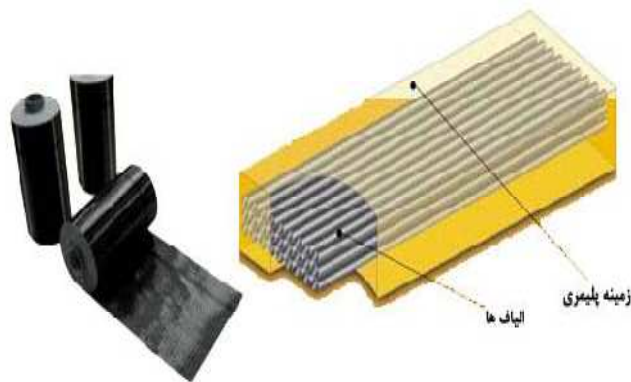
کامپوزیت‌های پلیمری انواع مصنوعی مواد مرکب هستند. این مواد از اجزایی تشکیل شده‌اند که از لحاظ مکانیکی رفتار مجزایی دارند؛ ولی ماده‌ی کامپوزیت حاصل می‌تواند خواص کاملاً متفاوتی نسبت به مواد تشکیل دهنده‌ی خود داشته باشد [۲]. قسمت اول از ماده کامپوزیت که قسمت برابر آن نیز به شمار می‌آید، الیاف‌ها^۳ هستند و زمینه پلیمری آن که بیشتر نقش نگهداری الیاف را در کنار یکدیگر بر عهده دارند، چسب یا رزین^۴ نامیده می‌شود. (شکل ۱-۱) [۳].

^۱-Composite

^۲- Fiber Rainforced Polimer

^۳-Fiber

^۴-Resin



شکل ۱-۱- اجزای اصلی تشکیل دهنده کامپوزیت‌های FRP [۴]

۱-۲-۳- الیاف مورد استفاده در کامپوزیت‌های FRP

قسمت عمده‌ی ظرفیت باربری یک ماده‌ی کامپوزیت توسط الیاف تأمین می‌شود. این الیاف از موادی کاملاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم ساخته می‌شوند [۳]. قطر این الیاف بسته به جنس آنها بین ۵ تا ۲۵ میکرون می‌باشد [۳]. الیاف مذکور امروزه در شکل‌ها، درجه‌ها و جنس‌های مختلف موجود هستند [۲].

جنس الیاف می‌تواند از شیشه، کربن، آرامید باشد که در این صورت محصولات FRP مربوطه به ترتیب به نام‌های GFRP، CFRP، AFRP شناخته می‌شوند. هر یک از الیاف مورد بحث، مشخصات فیزیکی - مکانیکی خاصی دارند که به بخشی از آنها اشاره می‌گردد.

الف- الیاف شیشه

این الیاف به چهار دسته تقسیم می‌شوند [۳ و ۵ و ۶]؛

۱- E-Glass^۱: این نوع الیاف شیشه متداول‌ترین نوع موجود در بازار هستند که کمترین مقدار مواد قلیایی در ساخت آنها به کار می‌رود. استفاده‌ی عمده‌ی این نوع الیاف در صنعت است. مدول الاستیسیته‌ی این الیاف $E=70 \text{ Gpa}$ و مقاومت نهایی آنها $\sigma_u = 1500-2500 \text{ MPa}$ و حداکثر کرنش قابل تحمل آنها $\epsilon_u = 1.8\% - 3\%$ است.

^۱-Electrical Glass

۲-Z-Glass^۱: این نوع الیاف مقاومت بسیار زیادی در مقابل محیط‌های قلیایی دارند و در تولید بتن الیافی نیز به کار می‌روند.

۳-A-Glass^۲: این نوع الیاف شیشه که درصد مواد قلیایی موجود در آنها بسیار زیاد است، امروزه از چرخه‌ی تولید خارج گردیده‌اند.

۴-S-Glass^۳: این دسته از الیاف، مقاومت و مدول الاستیسته‌ی زیادی دارند و بیشتر در صنایع هوا- فضا و تحقیقات فضایی به کار می‌روند. ($E=87GPa, \sigma_u=3900MPa$)

ب- الیاف کربن

این الیاف مقاومت زیادی در محیط‌های قلیایی و اسیدی داشته، این الیاف به دو دسته تقسیم می‌شود؛

۱- الیاف مصنوعی، که با نام شیمیایی پلی آکریلونیتریل^۴ شناخته می‌شوند، که مقاومت بسیار زیادی دارند؛ ولی قیمت این نوع الیاف گران است. سه نوع از الیاف PAN موجود هستند: نوع I سخت‌ترین الیاف کربن است و بیشترین مدول الاستیسته را دارا می‌باشد.

$$(\varepsilon_u = 0.5\%, \sigma_u = 2000MPa, E = 380GPa)$$

نوع II که مقاوم‌ترین نوع الیاف کربن است.

$$(\varepsilon_u = 1\%, \sigma_u = 2800MPa, E = 240GPa)$$

و نوع III که نرم‌ترین این سه نوع الیاف با مقاومتی بین نوع I و II می‌باشد [۳ و ۵].

۲- الیاف با اساس قیری^۵، که از تقطیر زغال سنگ بدست می‌آیند، از الیاف PAN ارزانتر

هستند؛ ولی مقاومت و مدول الاستیسته‌ی کمتری دارند [۳].

$$(\varepsilon_u = 2.1\%, \sigma_u = 765-2350 MPa, E = 37.5-140GPa)$$

¹-Zeolite Glass

²-Alkali Glass

³-Strength Glass

⁴-Polyacrylonitrile(PAN)

⁵-Pitch Based

ج- الیاف آرامید

آرامید الیاف مصنوعی است که اولین بار توسط دوپونت^۱ آلمانی با نام کولار^۲ ساخته شد. امروزه چهار نوع از الیاف کولار موجود هستند. که از بین آنها کولار ۴۹ برای مسلح سازی بتن، طراحی و ساخته شده، مشخصات مکانیکی کولار ۴۹ بدین قرار است [۵]:

$$(\epsilon_u = 2.0\% - 2.7\%, \sigma_u = 2700 - 3500 \text{ MPa}, E = 120 \text{ GPa})$$

عموماً مقاومت کششی الیاف کولار حدود ۵۵٪ و مقاومت برشی این الیاف ۱۸٪ بیش از الیاف شیشه است [۳]. کاربرد الیاف کولار نسبت به دو نوع کربن و شیشه بیشتر است. با وجود آنکه مقاومت کششی الیاف کولار در حدود ۱۰٪ کمتر از مقاومت کششی الیاف کربن است، قیمت الیاف کربن تقریباً دو برابر الیاف کولار می باشد [۷].

۱-۲-۴- رزین‌های موجود در ساخت FRP

رزین یا ماتریس به کار رفته در ساخت FRP به صورت یک محیط چسباننده برای نگهداری الیاف‌ها در کنار هم عمل می کند [۳]، بنابراین رزین با مقاومت پائینی که دارد، نقش چندانی در خواص مکانیکی کامپوزیت ساخته شده ندارد. رزین موجود در کامپوزیت FRP علاوه بر نگهداری الیاف‌ها در کنار هم، به عنوان عاملی برای محافظت الیاف‌ها در برابر عوامل محیطی و همچنین توزیع تنش روی ورقه‌ی کامپوزیت نیز به کار می آید [۲]. چسب به کار رفته در کامپوزیت می تواند یک ترکیب ترموست^۳ یا ترموپلاستیک^۴ باشد. رزین‌های ترموست دارای ویسکوزیته‌ی پایین بوده و با اعمال حرارت سخت شده و دیگر به حالت مایع یا روان در نمی آیند؛ در حالی که رزین‌های ترموپلاستیک دارای ویسکوزیته‌ی بالا می باشند و در مقابل حرارت ذوب و در اثر سرد شدن مجدد سخت می شوند [۵ و ۸].

^۱-DuPont

^۲-Kevlar

^۳-Thermoset

^۴-Thermoplastic

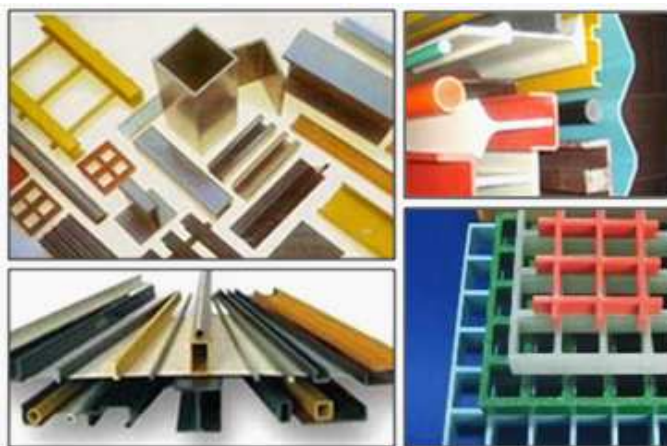
رزین‌های ساخته شده با پلی استرهای غیر اشباع^۱، اپوکسی^۲، آمینو^۳، فنولیک^۴، متاکریلات^۵ و اورتان^۶ انواع رزین‌های ترموست هستند و از انواع رزین‌های ترموپلاستیک می‌توان به پلی وینیل کلراید^۷(PVC)، پلی اتیلن^۸ (PE) و پلی پروپیلن^۹ (PP) اشاره نمود [۲ و ۸].

۱-۲-۵- انواع کامپوزیت‌های FRP مورد استفاده در مهندسی سازه

در حال حاضر دو نوع کلی از کامپوزیت‌های FRP- میلگردها^{۱۰} و پوشش‌های FRP^{۱۱}- بیشترین کاربرد را در ساخت و مقاوم سازی سازه‌ها دارا می‌باشند. علاوه بر این دو نوع، مقاطع ساخته شده‌ی کامپوزیت به صورت I شکل، ناودانی، نبشی، قوطی و غیره نیز امروزه در نقاط مختلفی از جهان در حال تولید می‌باشد (شکل ۱-۲) [۹].

در این قسمت مطالبی در مورد میلگردها و پوشش‌های FRP ذکر می‌گردد.

الف- میلگردهای FRP



شکل ۱-۲- پروفیل‌های FRP [۱۰]

¹-Unsaturated PolyEsters

²-Epoxy

³-Amino

⁴-Fnylyk

⁵-Mtakrylat

⁶-Urethane

⁷-Poly Vinyl Chloride

⁸-Poly Ethylene

⁹-Poly Propylene

¹⁰-FRP Bars

¹¹-FRP Coatings

یکی از کاربردهای FRP استفاده از آن به صورت میلگرد است (شکل ۱-۳). بسیاری از سازه‌های بتنی در محیط‌های خورنده در اثر حمله‌ی سولفات‌ها، کلریدها و انواع مواد خورنده‌ی دیگر، دچار خرابی‌های مختلفی از قبیل ریزش بتن پوشش و خوردگی آرماتورها می‌شوند. تعمیر این سازه‌ها هزینه‌ی بسیار زیادی را در برخواهد داشت [۳]. برای رفع این مشکل تکنیک‌های مختلفی تاکنون توسعه داده شده است. از بین این روش‌ها می‌توان به حفاظت کاتودیک و همچنین ایجاد پوشش اپوکسی روی آرماتورها اشاره کرد. با این وجود هر یک از این روش‌ها موفقیت نسبی داشته‌اند. برای رفع کامل این مشکل استفاده از میلگردهای FRP به دلیل مقاومت بسیار زیاد کامپوزیت FRP در مقابل خوردگی راه حل منطقی و معقولی می‌باشد [۳]. الیاف به کار رفته در ساخت میلگردهای FRP از هر سه نوع کربن، شیشه و کولار هستند.

از خواص میلگردهای FRP می‌توان به مواد زیر اشاره کرد [۳].

۱- مقاومت در برابر خوردگی^۱: مقاومت FRP در برابر خوردگی مهمترین ویژگی آرماتورهای FRP می‌باشد. این ویژگی میلگردهای FRP مهمترین عاملی است که سبب استفاده از آنها به جای آرماتورهای فولادی شده است. در مناطق ساحلی با توجه به رطوبت بسیار زیاد و خوردگی بالای محیط، استفاده از آنها حائز اهمیت است.



شکل ۱-۳- انواع میلگردهای FRP [۱۰]

^۱-Corrosion

۲- مقاومت^۱: عموماً کامپوزیت‌های FRP مقاومت کششی بسیار زیادی دارند که از مقاومت آرماتورهای فولادی بسیار بیشتر است. مقاومت کششی میلگردهای FRP به مقاومت کششی، میزان الیاف و به سطح مقطع الیاف مورد استفاده در ساخت آن بستگی دارد.

۳- مدول الاستیسیته^۲: مدول الاستیسیته‌ی میلگردهای FRP کمتر از آرماتورهای فولادی است.

۴- وزن واحد حجم^۳: وزن واحد حجم آرماتور FRP بسیار کمتر از وزن مخصوص آرماتورهای فولادی است. نسبت زیاد، مقاومت به وزن میلگردهای FRP یکی از مهمترین مزایای آن می‌باشد.

۵- عایق بودن الکتریکی^۴: کامپوزیت FRP قابلیت عدم هدایت الکتریکی خوبی دارد. به این دلیل استفاده از آرماتورهای FRP، در اماکنی که سازه‌ی بتنی در معرض میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی مانند بیمارستان‌ها، فرودگاه‌ها و مراکز رادار قرار دارد، بسیار مناسب می‌باشد.

۶- خستگی^۵: خستگی یکی از پدیده‌های مهم در مهندسی سازه می‌باشد و عدم توجه به آن زمینه ساز شکست‌های غیر منتظره‌ای در سازه‌ها می‌باشد. در مقایسه با فولاد، کامپوزیت‌های FRP در مقابل خستگی رفتار خوبی دارند.

۷- خم شدن آرماتورهای FRP: برای اجرای آرماتوربندی در تنگ‌ها و قلاب‌ها و حتی در انتهای آرماتور طولی لازم است آرماتور خم گردد. اما خم کردن آرماتورهای FRP بسیار سخت‌تر از آرماتورهای فولادی است. در این صورت این مساله می‌تواند در کارخانه‌ی سازنده‌ی آرماتورهای FRP انجام پذیرد.

ضمناً آئین نامه‌ی ACI440.IR ضوابط لازم برای طراحی و ساخت سازه‌های بتنی مسلح به کامپوزیت FRP را، ذکر نموده است [۵].

ب- پوشش‌های FRP [۲].

¹-Strength

²-Modulus of Elasticity

³-Density

⁴-Electrical insulation

⁵-Fatigue

پوشش‌های FRP معمولاً برای مقاوم سازی سازه‌های موجود به کار می‌روند. این پوشش‌ها به بیرون یک عضو بتن آرمه می‌چسبند.

سه نوع از این پوشش‌ها برای تعمیر و مقاوم سازی سازه‌ها به کار می‌روند.

۱- پوشش‌های دست ساز^۱

در این نوع پوشش ابتدا سطح عضو بتن آرمه آماده شده و الیاف خشک با رزین مایع طبق نسبت‌های کنترل شده و بصورت دستی استفاده می‌شود. از مزایای این روش انعطاف پذیری بیشتر به خصوص در گوشه‌ها و اشکال خاص می‌باشد.

۲- ورقه‌های پیش ساخته‌ی کامپوزیتی

در این حالت، کامپوزیت‌ها به صورت صفحات یک جهته ساخته می‌شوند. در اعضای تخت مانند دال‌ها و تیرها صفحات پیش ساخته‌ی FRP روی سطح تمیز شده‌ی عضو با استفاده از چسب، چسبانده می‌شوند (شکل ۱-۴).

۳- دورپیچ به صورت خودکار و اتوماتیک^۲

در این روش صفحات پیش ساخته‌ی FRP در حین اجرا از محفظه‌ی حرارتی عبور داده شده و همزمان مورد کشش قرار می‌گیرند.



شکل ۱-۴-۱- اجرای صفحات پیش ساخته‌ی FRP [۱۰]

^۱-Wet-lay-up

^۲- Pultrusion