بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکدهٔ عمران و معماری

گروه عمران ـ سازه

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد

بررسی رفتار ستون‌های بتن‌مسلح مستطیلی مقاوم‌شده با FRP

محقق:

محمد حاج‌صادقی

استاد راهنما:

دکتر فرشید جندقی علائی

استاد مشاور:

مهندس میثم جلالی

پایان‌نامه جهت اخذ درجهٔ کارشناسی ارشد

بهار ۱۳۸۹

پیوست شماره ۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکدهٔ: عمران و معماری

گروه: عمران ـ سازه

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد آقای محمد حاج‌صادقی

تحت عنوان: بررسی رفتار ستون‌های بتن‌مسلح مستطیلی مقاوم‌شده با FRP

در تاریخ ۱۳۸۹/۲/۶ توسط کمیتهٔ تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجهٔ عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

استاد راهنما	امضاء	استاد مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی : دکتر فرشید جندقی علایی		نام و نام خانوادگی : مهندس میثم جلالی	

اساتید داور	امضاء	نمایندهٔ تحصیلات تکمیلی	امضاء
نام و نام خانوادگی : دکتر وحیدرضا کلاتجاری		نام و نام خانوادگی : مهندس عباس محمدی	
نام و نام خانوادگی : دکتر علی کیهانی			

سرآغاز

به نام خدای که نام او راحت روح است و پیغام او مفتاح فتوح است و سلام او وقت صباح مؤمنان را صبوح است و ذکر او مرهم دل مجروح است و مهر او بلانشینان را کشتی نوح است.

ای کریمی که بخشندهٔ عطایی و ای حکیمی که پوشندهٔ خطایی و ای صمدی که از ادراک خلق جدایی و ای احدی که در ذات و صفات، بی همتایی و ای خالقی که راهنمایی و ای قادری که خدایی را سزایی،

جان ما را صفای خود ده و دل ما را هوای خود ده و چشم ما را ضیای خود ده

و ما را آن ده که آن به و مگذار ما را به که و مه.

الهی، عذر ما را بپذیر؛ بر عیب‌های ما مگیر. الهی در دل‌های ما جز تخم محبّت خود مکار و بر تن و جان‌های ما جز الطاف و مرحمت خود مگار و بر کشته‌های ما جز باران رحمت خود مبار.

(یکی از مناجات‌های خواجه عبدالله انصاری)

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزتر از جانم

آنانی که با راهنمایی ها و زحمات بی دریغشان مسیر پیشرفت و خوشبختی را آشکار ساخته،

دعای خالصانه شان بدرقه راه و وجودشان دلگرمی وجودم است.

آنانی که کوشیدند تا بدانم هدف غایی وجود این است

که هستی را پروردگاریست بی مانند.

قدردانی

حال که به لطف و رحمت لایتناهی حضرت حق، مراحل این پایان نامه رو به اتمام نهاده، بر خود لازم دانسته تا از همه دوستانی که در پیشبرد اهداف این پایان نامه اینجانب را مساعدت و یاری نموده اند، سپاس و قدردانی به عمل آورم.

ابتدا بر خود لازم می دانم تا از زحمات و پشتیبانی شبانه روزی، بی دریغ و بی شائبه استاد محترم، جناب آقای دکتر فرشید علائی که راهنمائی این تحقیق را بر عهده داشته و از هرگونه راهنمایی و مساعدت مضایقه نکردند، تشکر و قدردانی ویژه ای داشته باشم. بی شک بدون حمایت و پشتیبانی ایشان انجام این تحقیق مقدور نمی بود.

هم چنین از جناب آقای مهندس میثم جلالی که به عنوان استاد مشاور، نقشی ارزنده و مکمل در انجام این پایان نامه داشتند سپاس گزاری کرده و موفقیت ایشان در مقطع دکترای تخصصی عمران - سازه و دیگر مراحل زندگی را از خداوند متعال مسألت دارم.

از جناب آقای دکتر احمد احمدی ریاست محترم دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود به جهت مساعدت هایشان در طی دوره کارشناسی ارشد قدردانی می نمایم.

در انتها سپاس گزار کلیه دوستان و عزیزانی هستم که در مراحل مختلف تحصیلی مرا یاری نمودند؛ هرچند مجالی برای بیان نام تک تک این دوستان نیست، لیکن همیشه خود را مرهون لطف و مهربانی آن ها دانسته و امید دارم به لطف الهی روزی توان جبران محبت هایشان را داشته باشم.

تعهد نامه

اینجانب محمد حاج‌صادقی دانشجوی دوره کارشناسی‌ارشد رشتهٔ عمران ـ سازه، دانشکدهٔ عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامهٔ بررسی رفتار ستون‌های بتن‌مسلح مستطیلی مقاوم‌شده با FRP، تحت راهنمائی دکتر فرشید جندقی علایی به عنوان استاد راهنمای اول متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه / رساله تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیهٔ حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام <<دانشگاه صنعتی شاهرود>> و یا <<shahrood university of technology>> به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان‌نامه / رساله تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه / رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه / رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیهٔ مراحل انجام این پایان‌نامه / رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۸۹/۲/۶

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

***متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیرشده پایان‌نامه / رساله وجود داشته باشد.**

چکیده

امروزه استفاده از پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف (FRP)، یکی از پرکاربردترین روش‌های مقاوم‌سازی اعضای بتن‌مسلح از جمله ستون‌ها می‌باشد. در اعضای فشاری لایه‌های FRP به دور ستون‌ها پیچیده شده و از طریق محصورکنندگیِ بتن، سبب افزایش مقاومت محوری آن‌ها می‌گردد.

اهتمام اصلی در این پایان‌نامه، مدل‌سازی رفتار غیرخطّیِ بتن محصورشده با استفاده از نرم‌افزار ANSYS می‌باشد. به منظور مدل‌سازی رفتار غیرخطّیِ بتن، از معیار تسلیمِ دراکر-پراگر که همان معیار بهبود یافتهٔ موهر-کولمب است، استفاده شده است. صحت مدل‌های ارائه شده بر مبنای نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده توسط سایر محققین مورد تأیید قرار گرفته است.

در این تحقیق ابتدا بهبود اثر محصورکنندگی دورپیچ FRP بر ستون‌های بتن‌مسلح مستطیلی توسط اصلاح سطح مقطع ستون مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش مقاوم‌سازیِ ستون، قبل از اقدام به دورپیچ کردن ستون، سطح مقطع آن توسط اجرای پوششی بتنی به اشکال دایروی و یا بیضوی اصلاح شده و سپس اقدام به دورپیچ کردن آن می‌شود. این کار سبب توزیعِ یکنواخت‌تر فشار محصورکنندگیِ دورپیچ FRP می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر اصلاح سطح مقطع ستون از کارآمدترین و اقتصادی‌ترین روش‌های افزایش اثر محصورکنندگی است. البته محدودیّت‌های معماری، کاربرد این روش را محدود می‌کند.

پس از آن تأثیر اعمال بار با خروج از مرکزی در ظرفیت باربری ستون‌های بتن‌مسلح مستطیلی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامهٔ این بررسی، دیاگرام اندرکنش بارـ ممان ستون‌ها به دست آمده از اجزای محدود با دیاگرام‌های پیشنهادیِ ACI 440.2R-08 مقایسه شده است. نتایج حاصل از مدل‌ها حاکی از آن است که با اعمال خروج از مرکزیّتی هر چند ناچیز، ظرفیت باربری ستون محصورشده به شدّت کاهش می‌یابد. با افزایش خروج از مرکزی از کارایی محصورکنندگی کاسته شده؛ به طوری‌که در ناحیهٔ کنترل کشش به خصوص نقطهٔ خمش خالص، محصورشدگی ستون بسیار بسیار کم می‌شود. هم‌چنین مقایسهٔ دیاگرام‌های حاصل از مدل‌سازیِ اجزای محدود و پیشنهادیِ ACI 440.2R-08 نشان می‌دهد که در ناحیهٔ کنترل فشار، نتایج ACI محافظه‌کارانه بوده؛ با این وجود نتایج ویرایش ۲۰۰۸ این راهنمای طرّاحی، نسبت به ویرایش ۲۰۰۲ آن بسیار واقع‌گرایانه‌تر شده است.

واژگان کلیدی: اجزای محدود، ستون‌های بتن‌مسلح، محصورکنندگی، دورپیچ FRP.

فهرست مطالب:

فصل اول: کلّیات ۱

۱-۱ - مقدّمه ۲

۱-۲ - مقاوم‌سازی و اهمیّت آن ۲

۱-۳ - تاریخچهٔ سازه‌هایِ بتن‌مسلح و اهمیّت مقاوم‌سازی این سازه‌ها ۵

۱-۴ - مقاوم‌سازی ستون‌های بتن‌مسلح ۶

۱-۴-۱ - ژاکت بتن‌مسلح ۷

۱-۴-۲ - ژاکت فولادی ۹

۱-۴-۳ - پس‌کشیدگی ۱۰

۱-۴-۴ - ژاکت FRP ۱۲

۱-۵ - مفهوم محصورشدگی ۱۶

۱-۶ - اهمیّت موضوع محصورشدگیِ بتن توسط FRP ۱۸

۱-۷ - آن‌چه در این پایان‌نامه انجام خواهد شد ۲۰

فصل دوم: آشنایی با موادّ پلیمری الیافی ۲۲

۲-۱ - تاریخچه ۲۳

۲-۲ - کاربرد و شرایط استفاده ۲۵

۲-۳ - مواد تشکیل‌دهندهٔ FRP ۲۵

۲-۳-۱ - رزین‌ها ۲۶

۲-۳-۲ - الیاف ۲۶

۲-۴ - اشکال مختلف مورد استفاده FRP در مهندسی عمران ۳۱

۲-۴-۱ - میلگردهای FRP ۳۲

۲-۴-۲ - پوشش‌های FRP ۳۳

۲-۵ - خصوصیّات مکانیکی ۳۴

۲-۵-۱ - چگالی ۳۴

۲-۵-۲ - اثرات دمایی بالا ۳۵

۲-۵-۳ - رفتار کششی ۳۵

۲-۵-۴ - رفتار فشاری ۳۵

۲-۶ - انتخاب نوع سیستم FRP ۳۶

۲-۶-۱ - ملاحظات محیطی ۳۶

۲-۶-۲ - ملاحظات بارگذاری ۳۷

۲-۷ - چرا از کامپوزیت‌ها برای تقویت و بهسازیِ سازه‌ها استفاده می‌کنند؟ ۳۷

فصل سوم: پیشینهٔ تحقیقات انجام شده و مدل‌های ارائه شده برای تبیین رفتار بتن محصور در FRP ۴۰

۳-۱ - پیشینهٔ تحقیقات انجام شده در زمینهٔ محصورشدگی بتن توسط FRP ۴۱

۳-۱-۱ - تعیین منحنیِ تنش-کرنش بتن محصور ۴۱

۳-۱-۲ - مطالعات پارامتری بر محصورشدگیِ بتن ۴۷

۳-۱-۳ - تأثیر ترکیبات بارگذاری بر محصورشدگیِ ستون‌های بتنی ۵۱

۳-۱-۴ - محصورشدگیِ ستون بتن‌آرمه تحت بار محوری ثابت و بار جانبی لرزه‌ای..... ۵۳

۳-۱-۵ - مدل‌سازی رفتار غیرخطّی بتن به وسیلهٔ نرم‌افزارهای اجزای محدود..... ۵۴

۳-۲ - مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی رفتار بتن محصور در FRP..... ۵۵

۳-۲-۱ - مدل ارائه شده توسط صافی و همکاران [۱۸]..... ۵۶

۳-۲-۲ - مدل ارائه شده توسط سامان و همکاران [۱۹]..... ۵۸

۳-۲-۳ - مدل ارائه شده توسط توتانجی [۲۲]..... ۵۹

۳-۲-۴ - مدل ارائه شده توسط کاربهاری و گائو [۲۳]..... ۶۱

۳-۲-۵ - روابط ارائه شده توسط زیائو و وو [۲۴]..... ۶۲

۳-۲-۶ - روابط ارائه شده توسط سعادت‌منش و همکاران [۳۸]..... ۶۳

۳-۲-۷ - مدل ارائه شده توسط لام و تِنگ [۴۴و۴۳]..... ۶۵

۳-۳ - ارزیابی تحقیقات انجام شده در زمینهٔ محصورکنندگیِ دورپیچ FRP..... ۶۷

فصل چهارم: نحوهٔ مدل‌سازی اعضای بتن‌آرمه در نرم‌افزار ANSYS (محصورنشده و محصورشده)..... ۶۹

۴-۱ - مقدّمه..... ۷۰

۴-۲ - مروری بر مفهوم تحلیل غیرخطّی..... ۷۱

۴-۳ - جایگاه و اهمیّت کالیبراسیون نمونه‌ها..... ۷۳

۴-۴ - نکات قابل توجّه در مدل‌سازیِ اجزای محدود یک عضو بتن‌آرمه..... ۷۴

۴-۵ - معرفی گزینه‌های المان‌ها، مدل‌های رفتاری و ثابت‌های حقیقی..... ۷۵

۴-۶ - مدل‌سازیِ بتن در نرم‌افزار ANSYS..... ۷۶

۴-۶-۱ - المان SOLID65 ..... ۷۶
۴-۶-۲ - مصالح (مدل رفتاری) مورد استفاده در شبیه‌سازی بتن ۷۷
۴-۷ - مدل‌سازیِ آرماتورهایِ طولی و عرضی در نرم‌افزار ANSYS ۸۲
۴-۷-۱ - قابلیّت مدل‌سازیِ آرماتور در المان SOLID65 ..... ۸۲
۴-۷-۲ - المان LINK8 ..... ۸۳
۴-۷-۳ - مصالح (مدل رفتاری) مورد استفاده در شبیه‌سازیِ فولادِ آرماتورها ۸۵
۴-۸ - مدل‌سازیِ صفحات بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها در نرم‌افزار ANSYS ۸۶
۴-۸-۱ - المان SOLID45 ..... ۸۶
۴-۸-۲ - مدل‌های رفتاری در شبیه‌سازی صفحات بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها ۸۶
۴-۹ - نحوهٔ مدل‌سازی یک عضو بتن‌آرمه در ANSYS ۸۷
۴-۱۰ - کالیبراسیون یک ستون بتن‌مسلح ۹۱
۴-۱۰-۱ - مشخّصات مصالح ستون بتن‌مسلح NS-C-145-0 ..... ۹۱
۴-۱۰-۲ - نکاتِ کلّیِ مدل‌سازی اجزای محدود ستون بتن‌مسلح NS-C-145-0 ..... ۹۲
۴-۱۰-۳ - داده‌های ورودی اجزای محدود ۹۴
۴-۱۰-۴ - شبکه‌بندیِ مدل ۹۹
۴-۱۰-۵ - بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی ۱۰۱
۴-۱۰-۶ - روش تحلیل ۱۰۲
۴-۱۰-۷ - نتایج به دست آمده از تحلیلِ اجزای محدود و مقایسهٔ آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی ۱۰۵

۴-۱۱ - مدل‌سازی محصورشدگی اعضای بتن‌مسلح در نرم‌افزار ANSYS.....۱۰۸

۴-۱۱-۱ - المان و مدل رفتاری، برای مدل‌سازی محصورشدگی بتن.....۱۰۸

۴-۱۱-۲ - کرنش خرابیِ صفحات FRP.....۱۱۲

۴-۱۱-۳ - محصورشدگی بتن، و نحوهٔ مدل‌سازی آن در نرم‌افزار ANSYS.....۱۱۳

۴-۱۱-۴ - مدل‌سازی رفتار تنش‌ـکرنش هستهٔ بتنی محصور در دورپیچ FRP.....۱۱۴

۴-۱۲ - کالیبراسیون ستون بتن‌مسلح دایروی، محصورشده در دورپیچ FRP.....۱۱۴

۴-۱۲-۱ - محاسبهٔ پارامترهای معیار تسلیم دراکر‌ـپراگر (ستون‌های دایروی).....۱۱۵

۴-۱۲-۲ - مقایسهٔ نتایج حاصل از تحلیل المان محدود و نتایج آزمایشگاهی.....۱۱۶

۴-۱۳ - کالیبراسیون ستون بتن‌مسلح مستطیلی، محصورشده در دورپیچ FRP.....۱۲۰

۴-۱۳-۱ - محاسبهٔ پارامترهای معیار تسلیم دراکر‌ـپراگر (ستون‌های مستطیلی).....۱۲۰

۴-۱۳-۲ - مقایسهٔ نتایج حاصل از تحلیل المان محدود و نتایج آزمایشگاهی.....۱۲۲

۴-۱۳-۳ - زبان پارامتری ANSYS و ساخت مَکرو.....۱۲۳

فصل پنجم: تحلیل اجزای محدود محصورشدگیِ ستون‌های بتن‌مسلح (توسط نرم‌افزار ANSYS).....۱۲۵

۵-۱ - بهبود اثر محصورکنندگی دورپیچ FRP بر ستون‌های بتن‌مسلح مستطیلی توسط اصلاح سطح مقطع ستون.....۱۲۶

۵-۱-۱ - مقدّمه.....۱۲۶

۵-۱-۲ - نمونه‌ها.....۱۲۸

۵-۱-۳ - مدل اجزای محدود نمونه‌های اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده.....۱۳۰

۵-۱-۴ - مد خرابی نمونه‌ها ۱۳۱
۵-۱-۵ - نتایج تحلیل اجزای محدود و بررسی آن ۱۳۲
۵-۲ - تأثیر اعمال بار با خروج از مرکزی در ظرفیت باربری ستون‌های بتن‌مسلح مستطیلی و ترسیم دیاگرام اندرکنش بارـ ممان و مقایسهٔ آن با دیاگرام پیشنهادیِ ACI 440.2R-08. ..... ۱۴۰
۵-۲-۱ - مقدّمه ۱۴۰
۵-۲-۲ - نمونه‌ها ۱۴۳
۵-۲-۳ - مد خرابی نمونه‌ها ۱۴۵
۵-۲-۴ - نتایج تحلیل اجزای محدود و بررسی آن ۱۴۶
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۵۱
۶-۱ - پیش‌گفتار ۱۵۲
۶-۲ - مشخّصات مدل‌ها ۱۵۲
۶-۳ - نتیجه‌گیری ۱۵۳
۶-۳-۱ - اصلاح سطح مقطع ستون ۱۵۳
۶-۳-۲ - تأثیر خروج از مرکزیت بار محوری ۱۵۵
۶-۴ - پیشنهادات ۱۵۶
پیوست ۱: بررسی برنامهٔ ترسیم دیاگرام اندرکنش بارـ ممان ستون‌های مستطیلی (DID) ۱۵۷
۷-۱ - مقدمه ۱۵۸

۷-۲ - بررسی قسمت‌های مختلف برنامه.....۱۵۸

پیوست ۲: محصورکنندگی FRP از دیدگاه آیین‌نامهٔ ACI ۱۶۱

۸-۱ - مقدّمه.....۱۶۲

۸-۲ - استفاده از خاصیت محصورکنندگی FRP به منظور مقاوم‌سازی محوری.....۱۷۳

۸-۳ - خدمت‌پذیری اعضاء با بار محوری مقاوم‌شده با FRP.....۱۷۷

۸-۴ - روند طرّاحی به منظور مقاوم‌سازی محوری ستون‌های بتن‌مسلح دایروی، دورپیچ‌شده با FRP.....۱۷۸

۸-۵ - ستون‌های مقاوم‌شده تحت بار با خروج از مرکزی.....۱۸۸

۸-۶ - تغییرات ACI 440.2R در ویرایش سالِ ۲۰۰۸.....۲۰۵

۸-۶-۱ - ظرفیت نهایی بار محوری (خالص).....۲۰۵

۸-۶-۲ - ظرفیت نهایی بار با خروج از مرکزیت.....۲۰۷

مراجع:.....۲۱۰

فهرست اشکال:

شکل ۱-۱- خرابی‌های ناشی از زمین‌لرزه ۳

شکل ۱-۲- یکی از اولین و بزرگ‌ترین سازه‌های بتن‌مسلح مربوط به سال ۱۹۱۰ میلادی ۶

شکل ۱-۳- خرابی پایهٔ یک پل در لس‌آنجلس به دلیل کمبود آرماتورهای عرضی ۷

شکل ۱-۴- اجرای ژاکت بتن‌مسلح به منظور مقاوم‌سازی ستون با مقطع مستطیلی ۸

شکل ۱-۵- ستون بتن‌مسلح مستطیلی مقاوم‌شده با ژاکت فولادی ۹

شکل ۱-۶- پس‌کشیدگی خارجی جهت تقویت لرزه‌ای ستون بتن‌آرمهٔ مربعی ۱۱

شکل ۱-۷- پس‌کشیدگی داخلی جهت تقویت لرزه‌ای ستون بتن‌آرمه دایروی ۱۱

شکل ۱-۸- دورپیچ کردن ستون‌های بتن‌مسلح مستطیلی با ژاکت FRP ۱۲

شکل ۱-۹- روش‌های پوشش با FRP ۱۳

شکل ۱-۱۰- دورپیچ کردن ستون بتنی دایروی با استفاده از دستگاه‌های مکانیکی ۱۴

شکل ۱-۱۱- نمودار تنش-کرنش استوانه‌های بتنی در فشار هیدرواستاتیک [۷] ۱۷

شکل ۱-۱۲- خرابی پایهٔ یک پل در مد خرابی برشی بر اثر زمین‌لرزه ۱۸

شکل ۱-۱۳- خرابی ستون در زلزلهٔ نورثریج به علّت ناکافی بودن فشار محصورکنندگی آرماتور دورپیچ ۱۹

شکل ۲-۱- نصب صفحات CFRP به منظور مقاوم‌سازی خمشیِ تیر ۲۴

شکل ۲-۲- استفاده از کامپوزیت FRP در صنعت پایل (شمع) ۲۴

شکل ۲-۳- اجزای تشکیل‌دهندهٔ FRP ۲۵

شکل ۲-۴- مقاطع I شکل از جنس کامپوزیت ۳۱

شکل ۲-۵- میلگردهای کامپوزیتی از جنس کربن و شیشه ۳۲

شکل ۲-۶- نمونه‌ای از پوشش‌های دست‌ساز از جنس شیشه ۳۳

شکل ۳-۱- نحوهٔ شکست لوله‌های کامپوزیتی پرشده از بتن ۴۳
شکل ۳-۲- منحنی تنش-کرنش بتن محصور در FRP در مدل صافی و همکاران و مدل توتانجی [۱۸]..... ۵۷
شکل ۳-۳- مشخّصات نمودار تنش-کرنش محوری در مدل سامان [۱۹]..... ۵۸
شکل ۳-۴- مشخّصات منحنیِ تنش-کرنش در مدل کاربهاری [۲۳]..... ۶۲
شکل ۳-۵- مدل پیشنهای لام و تِنگ برای بتن محصور در FRP [۴۳]..... ۶۶
شکل ۴-۱- مفهوم گام بارگذاری و زیرگام در تحلیل غیرخطّی..... ۷۲
شکل ۴-۲- المان SOLID65 به همراه دستگاه مختصات محلی [۴۸]..... ۷۶
شکل ۴-۳- سطح سه بعدی شکست بتن در فضای تنش‌های اصلی بر اساس معیار شکست ویلیام-وارنک [۴۷]..... ۸۱
شکل ۴-۴- مدل در نظر گرفته شده برای بتن تحت تنش کششی و پس از ترک‌خوردگی [۴۷]..... ۸۱
شکل ۴-۵- جهت‌های المان پخش‌شده (Smeared)، با دستگاه مختصات SOLID65 [۴۸]..... ۸۳
شکل ۴-۶- المان LINK8 به همراه دستگاه مختصات محلی [۴۸]..... ۸۴
شکل ۴-۷- المان SOLID45 به همراه دستگاه مختصات محلی [۴۸]..... ۸۶
شکل ۴-۸- مراحل اعمال گام‌های بارگذاری..... ۹۰
شکل ۴-۹- جزییات ابعاد و آرماتورهای ستون NS-C-145-0..... ۹۱
شکل ۴-۱۰- مدل شبکه‌بندی شدهٔ ستون NS-C-145-0 با در نظرگیریِ تقارن نسبت به دو صفحه ۹۲
شکل ۴-۱۱- مدل شبکه‌بندی شدهٔ ستون NS-C-145-0 و استفاده از خاصیتِ گسترشِ تقارن..... ۹۳
شکل ۴-۱۲- منحنی تنش-کرنش تک‌محوری فشاری بتن [۴۷]..... ۹۵
شکل ۴-۱۳- منحنی هاگنستاد و منحنیِ اصلاح‌شدهٔ آن [۳]..... ۹۶
شکل ۴-۱۴- تأثیر تعداد المان‌ها در دقّت نتایج حاصل از اجزای محدود..... ۱۰۰

شکل ۴-۱۵- شبکه‌بندیِ آرماتورهای طولی و عرضیِ ستون NS-C-145-0 ..... ۱۰۰
شکل ۴-۱۶- شرایط تکیه‌گاهی و اعمالِ بار ستون NS-C-145-0 ..... ۱۰۱
شکل ۴-۱۷- اعمال شرایط تکیه‌گاهی، به منظورِ مدل‌سازیِ تقارن در ستون NS-C-145-0 ..... ۱۰۱
شکل ۴-۱۸- روش تکرارِ نیوتن-رافسون [۴۷] ۱۰۳
شکل ۴-۱۹- رفتار همگراییِ طول کمان [۵۱] ۱۰۴
شکل ۴-۲۰- نمودارهای تنش-کرنش آزمایشگاهی و اجزای محدود نمونهٔ NS-C-145-0 ..... ۱۰۵
شکل ۴-۲۱- تغییرشکل ستون NS-C-145-0 (تغییرشکل‌ها ۱۶ برابر شده‌اند) ۱۰۶
شکل ۴-۲۲- کانتور تنش محوری آرماتورهایِ ستون NS-C-145-0 (تغییرشکل‌ها ۱۶ برابر شده‌اند) ۱۰۶
شکل ۴-۲۳- منحنیِ تنش-کرنش ستون بتنی (غیرمسلح) به دست آمده از اجزای محدود ۱۰۷
شکل ۴-۲۴- الف) سطوح تسلیم در فضای سه بعدیِ تنش‌های اصلی، ب) معیار تسلیم دراکر-پراگر [۸] ۱۰۹
شکل ۴-۲۵- نمودار تغییرات حجم بتن فشاری [۸] ۱۱۰
شکل ۴-۲۶- المان SHELL41 به همراه دستگاه مختصات محلی [۴۸] ۱۱۲
شکل ۴-۲۷- مدل اجزای محدود نمونهٔ NS-C-145-3 ..... ۱۱۶
شکل ۴-۲۸- منحنیِ تنش-کرنش ستون NS-C-145-3، به دست آمده از اجزای محدود و نتایج آزمایشگاهی ۱۱۷
شکل ۴-۲۹- کانتور تنش محوریِ آرماتورهای نمونهٔ NS-C-145-3 ..... ۱۱۷
شکل ۴-۳۰- منحنی‌های تنش-کرنش بتن محصورنشده و محصورشده در FRP ۱۱۹
شکل ۴-۳۱- منحنیِ تنش-کرنش ستون NS-R-2-175-3-40، به دست آمده از اجزای محدود و نتایج آزمایشگاهی ۱۲۲

شکل ۵-۱- توزیع فشار محصورکننده در مقاطع دایروی و چهارگوش..... ۱۲۷
شکل ۵-۲- مشخّصات نمونه‌ها (ابعاد بر حسب میلی‌متر) ۱۲۸
شکل ۵-۳- مدل اجزای محدود نمونه‌های مربعی به همراه مدل اصلاح‌شدهٔ آن‌ها..... ۱۳۰
شکل ۵-۴- مدل اجزای محدود نمونه‌های مستطیلی به همراه مدل اصلاح‌شدهٔ آن‌ها..... ۱۳۰
شکل ۵-۵- کانتور کرنش طولیِ دورپیچ FRP برای نمونهٔ R-3 (اصلاح‌نشده) ۱۳۱
شکل ۵-۶- کانتور تنش فشاری در وسط ارتفاع ستون‌های مربعی (اصلاح‌نشده) بر حسب مگاپاسکال ۱۳۲
شکل ۵-۷- کانتور تنش فشاری بتن در وسط ارتفاع ستون‌های مستطیلی (اصلاح‌نشده) بر حسب مگاپاسکال..... ۱۳۲
شکل ۵-۸- توزیع تنش‌های پیرامونی در نمونهٔ R-3، در بارهای اعمالیِ مختلف..... ۱۳۳
شکل ۵-۹- توزیع تنش فشاری پیرامون وسط ارتفاع ستون‌های مستطیلی در هنگام اعمال بار نهایی ۱۳۳
شکل ۵-۱۰- کانتور تنش فشاری بتن در وسط ارتفاع ستون‌های دایروی بر حسب مگاپاسکال..... ۱۳۴
شکل ۵-۱۱- کانتور تنش فشاری بتن در وسط ارتفاع ستون‌های بیضوی بر حسب مگاپاسکال..... ۱۳۴
شکل ۵-۱۲- منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های مربعی ۱۳۶
شکل ۵-۱۳- منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های مستطیلی..... ۱۳۶
شکل ۵-۱۴- منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های دایروی..... ۱۳۷
شکل ۵-۱۵- منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های بیضوی..... ۱۳۷
شکل ۵-۱۶- میزان تأثیر دورپیچ در ۱۲ نمونهٔ اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده..... ۱۳۹
شکل ۵-۱۷- توزیع تنش محصورکنندهٔ جانبی ناشی از آرماتور عرضی و نمودار تنش-کرنش بتن محصورشده..... ۱۴۱