وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
دانشکده فنی و مهندسی-گروه عمران

# تعیین مشخصات مفاصل پلاستیک تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP برای استفاده در تحلیل استاتیکی غیر خطی

**پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد**

در رشته مهندسی عمران گرایش سازه

**دانشجو:**

سارا زرکش

۸۷۶۱۷۲۰۰۷

**استاد راهنما:**

دکتر مرتضی بسطامی

**استاد مشاور:**

مهندس بنیامین محبی

اسفند ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحیم

**Abstract**

In recent decades, retrofitting of structures and increasing of their strength and flexibility against earthquake loads was interested. Strengthening of the structures consists of retrofitting of structural members, as beams and columns and their connections and walls and also frames, so various works in relation to strengthening of concrete member were implemented. Among those ones, researchers for increasing the flexural strength and its ductility have considered retrofitting beams. Several methods are customary like connecting steel plates, gluing polymer plates, using composite plates, using external prestressed tendons and ordinary bars in tension part of the beam section.

For many long years, steel reinforcements have been considered as the only concrete confinements and studied widely, but in these days, application of Fiber Reinforced Polymer (FRP) as an effective alternative is developed.

The characteristics to model plastic hinges (i.e. parameters used to measure deformation capacity in component load-deformation curves and to measure residual strength) of RC beams have been determined in FEMA-356 as well as the Iranian Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, but for evaluation a retrofitted beam, these plastic hinge parameters are not determined; which is an important deficiency of these codes.

Object of this study is finding the plastic hinge parameters by study of RC beams that are retrofitted by FRP. These characteristics of plastic hinges can be used in nonlinear static analysis instead of dynamic nonlinear analysis for retrofitted beams as a popular retrofitting analysis method in engineering practice.

In this study a finite element model for RC beams has been modeled by LS- DYNA software. These specimens subjected under cyclic displacement, and the hysteresis curves to obtain the plastic hinge parameters are drawn.

Finally characteristic of plastic hinges have been proposed to use in nonlinear static (pushover) analysis.

Ministry of Science, Research and Technology

Imam Khomeini International University

Faculty of Engineering

MSc. Thesis

In Civil Engineering

# Determination of plastic hinges in RC beams retrofitted by FRP for using in nonlinear static analysis

**By**

Sara Zarkesh

**Supervised by**

Dr. M. Bastami

**Advised by**

B. Mohebi

March 2011

تقدیم به مهربان فرشتگانی که؛

لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، شکوه توانستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز آن هاست.

## پیشگفتار

پس از زلزله ۱۹۷۱ سانفرناندو در کالیفرنیا و زلزله ۱۹۸۹ لوما پریتا در سانفرانسیسکو و زلزله نور ثریج در سال ۱۹۹۴ و زلزله ۱۹۹۵ کوبه تغییرات زیادی در آیین نامه طراحی لرزه ای به خصوص در مناطق با لرزه خیزی زیاد بوجود آمد. سازه های بتن آرمه موجود برای بارهای گرانشی و بارهای جانبی کمتر از آیین نا مه های اخیر طراحی شده بودند و مشکلاتی چون عدم همپوشانی و پیوستگی آرماتورهای طولی تیرها و ستون ها، فواصل زیاد آرماتورهای عرضی و خاموت های باز با خم ۹۰ درجه، کیفیت اجرای نامطلوب اعضای باربر، ازدحام آرماتور در محل اتصالات، عدم تأمین پوشش کافی، فقدان محصور شدگی در ناحیه مفصل خمشی و ... در جزئیات سازه های طراحی شده قبل از ۱۹۷۰ به وضوح دیده می شد تا اینکه در دهه ۹۰ میلادی اداره فدرال مدیریت شرایط اضطراری FEMA بر اثر تحقیقات انجام شده اقدام به ارزیابی لرزه ای و روش های تقویت و بازسازی سازه های موجود نمود و نتایج این تحقیقات را ارائه داده است.

با توجه به زلزله خیز بودن کشور ایران و وجود ساختمان های ضعیف و غیر مقاوم در برابر زلزله، اهمیت بحث مقاوم سازی برای این نوع از ساختمان ها علی الخصوص مراکز مهم درمانی، نظامی، اداری و صنعتی بیش از گذشته محسوس و اجتناب ناپذیر می باشد. در این میان استفاده از مواد FRP در صنعت ساختمان کشورمان روز به روز گسترده تر از پیش می شود. اولین تحقیقات انجام شده در این زمینه از اوایل دهه ۱۹۸۰ آغاز شد. اما زلزله سال ۱۹۹۰ کالیفرنیا و ۱۹۹۵ کوبه ژاپن عامل مهم و مؤثری جهت بررسی همه جانبه کاربرد کامپوزیت های پلیمری ساخته شده از الیاف FRP جهت تقویت و مقاوم سازی سازه های بتنی و بنایی در مناطق زلزله خیز گردید. این مطالعات که دامنه و وسعت آن روز به روز در حال افزایش است زمینه ای وسیع جهت استفاده از این کامپوزیت ها را در سازه های نیازمند به تقویت، بهسازی و یا ترمیم فراهم نموده است.

هم اکنون تعداد زیادی از محققان و پژوهشگران صنعت سازه در سراسر جهان در حال بررسی، مطالعه و انجام آزمایشات تقویت سازه ها با کامپوزیت های FRP می باشند. در این تحقیق نیز سعی بر آن است تا تأثیر کامپوزیت های پلیمری روی بهسازی تیرهای بتن آرمه بررسی شود و هدف اصلی نیز بدست آوردن پارامترهای مفاصل پلاستیک برای تیرهای بتن آرمه تقویت شده با الیاف پلیمری می باشد تا با داشتن این مشخصات بتوان از تحلیل استاتیکی غیرخطی برای آنالیز این اعضا استفاده کرد.

## تقدیر و تشکر

با سپاس از خداوند متعال که توفیق انجام این پروژه را داد، لازم می دانم کـه از آقـای دکتـر مرتضـی بسطامی که به عنوان استاد راهنما و نیز آقای مهندس بنیامین محبی که در سمت استاد مشـاور، مـرا یاری فرمودند کمال تشکر را داشته باشم. هـم چنـین از جنـاب آقـای دکتـر ساسـان عشـقی و دکتـر رمضانعلی ایزدی فرد که زحمت داوری این پایان نامه را متقبل شدند کمال تشکر را دارا می باشم.

## چکیده

نگاهی به خسارت های ناشی از زلزله های گذشته دنیا نشان می دهد که در صد بالایی از ساختمان-های بتن مسلح در برابر زلزله مقاوم نیستند و یا مقاومت کافی و قابل قبولی ندارند، زیرا سازه های بتن مسلح موجود غالباً بر اساس آیین نامه های قدیمی طراحی شده و اکثر آنها الزامات آیین نامه های جدید را ارضا نمی کنند. از این رو ضرورت تقویت این ساختمان ها به خصوص برای مقابله با نیرو های جانبی و با روش های مقاوم سازی قابل اعتماد، آسان، سریع و اقتصادی، احساس می شود.

تیرها از جمله اعضایی هستند که مقاوم سازی آن ها از اهمیت بسزایی برخوردار است، و ناحیه مفصل پلاستیک، ناحیه بسیار آسیب پذیردراین اعضا می باشد چرا که شکست تیر ابتدا از این ناحیه شروع می شود. بنابراین با توجه به این مسئله روش های متعددی برای مقاوم سازی تیرها در ناحیه مفصل پلاستیک ارائه شده که از میان آن ها استفاده از مصالح FRP به دلیل داشتن مزایا نسبت به سایر روش ها متداول ترین روش محسوب می شود. ازمسائل مهمی که بعد از تقویت باید به آن توجه کرد بررسی کفایت این تقویت ها است که از طریق مدل سازی مشخصات مصالح و با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی امکان پذیر می باشد.

با توجه به آن که دردستور العمل FEMA-356، برای تیرهای معمولی (تقویت نشده) مشخصات مفاصل پلاستیک، تعیین شده در این جا نیز سعی بر آن است تا برای تیرهای تقویت شده با مصالح FRP نیز مشخصات مفاصل پلاستیک به صورت ساده شده ای تعیین شود تا بدین ترتیب با داشتن این مشخصات تیرهای تقویت شده بتوان به جای استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی، ازتحلیل استاتیکی غیرخطی جهت آنالیز این اعضا استفاده کرد که این مسئله یعنی استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی به جای تحلیل دینامیکی غیرخطی موجب ساده سازی قابل قبولی در تحلیل این اعضا می شود.

بنابراین هدف اصلی این پایان نامه تعیین پارامترهای مورد نیاز مفاصل پلاستیک در تحلیل استاتیکی غیرخطی برای تیرهای تقویت شده با FRP می باشد. در این تحقیق با توجه به جدول آیین نامه بهسازی ایران ۱۸ نوع تیر بتن آرمه با ابعاد و درصد آرماتور متفاوت و با پوشش FRP توسط نرم افزار اجزا محدود LS-DYNA و نیز ۳ نمونه از این نمونه ها قبل از تقویت با FRP مدل و تحلیل شدند.

در انتها نیز مشخصات مفاصل پلاستیک بدست آمده برا ی تیرهای تقویت شده با FRP به صورت جدولی ارائه شده است.

# فهرست مطالب


فصل اول- مقدمه ..... ۱

۱-۱- مقدمه ..... ۲

۱-۲- تعریف بهسازی ..... ۲

۱-۳- چه ساختمان هایی نیاز به مقاوم سازی دارند ..... ۳

۱-۴- لزوم انجام و هدف تحقیق ..... ۴

۱-۵- دامنه کار ..... ۵

۱-۶- چهارچوب تحقیق حاضر ..... ۵

فصل دوم- پیشینه تحقیقات انجام شده ..... ۶

۲-۱- سوابق مطالعات انجام شده در زمینه تیرهای تقویت شده با ورق های FRP ..... ۷

۲-۲- بررسی مدل های تنش کرنش بتن محصور شده ..... ۱۷

۲-۲-۱ محصور شدگی اکتیو ..... ۱۸

۲-۲-۲- محصور شدگی پاسیو با فولاد ..... ۱۹

۲-۲-۳ محصور شدگی پاسیو با **FRP** ..... ۲۲

۲-۳-جمع بندی ..... ۳۳

فصل سوم- مبانی نظری تحقیق و شناخت مصالح FRP ..... ۳۴

۳-۱- شکل پذیری و اهمیت آن در سازه های بتن آرمه ..... ۳۵

۳-۲- شکل پذیری در تیر ..... ۳۶

۳-۳- رفتار اجزای سازه ..... ۳۷

۳-۴- معرفی روش تحلیل استاتیکی غیر خطی ..... ۳۹

۳-۴- ۱- مقدمه ..... ۳۹

۳-۴- ۲- انواع روش های موجود برای آنالیز استاتیکی غیر خطی ..... ۴۰

۳-۴- ۳- آنالیز استاتیکی غیر خطی به شیوه طیف ظرفیت آیین نامه ATC 40 ..... ۴۱

۳-۵- مفصل و لنگر پلاستیک ..... ۴۱
۳-۵-۱- مقدمه ..... ۴۱
۳-۵-۲- انواع مفصل پلاستیک ..... ۴۲
۳-۵-۳- معرفی مفاصل پلاستیک مطابق FEMA 356 ..... ۴۲
۳-۵-۴- مفاصل پلاستیک تیرها ..... ۴۴
۳-۶- آشنایی با مصالح FRP ..... ۴۶
۳-۶-۱- مقدمه ..... ۴۶
۳-۶-۲-تعریف FRP ..... ۴۷
۳-۶-۳- مقایسه کامپوزیت های مختلف FRP ..... ۴۷
۳-۶-۴- مبانی فنی سیستم FRP ..... ۴۹
۳-۶-۵- بررسی چگالی ..... ۴۹
۳-۶-۶- بررسی اقتصادی ..... ۴۹
۳-۶-۷- بررسی اثرات دما ..... ۴۹
۳-۶-۸- بررسی اثرات محیطی ..... ۵۰
۳-۶-۹- خصوصیات مکانیکی ..... ۵۰
۳-۶-۱۰- کاربرد الیاف کامپوزیت (FRC) در سازه ها به شکل ورق ..... ۵۱
۳-۶-۱۱- مراحل نصب ورق FRP ..... ۵۱
۳-۶-۱۲- تقویت خمشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP ..... ۵۲
۳-۶-۱۲-۱- روش های مقاوم سازی ..... ۵۳
۳-۶-۱۲-۱-۱- مهار کردن انتهای صفحات **FRP** بر پایین تیر ..... ۵۳
۳-۶-۱۲-۱-۲- صفحات پیش تنیده ..... ۵۴
۳-۶-۱۳- بررسی نحوه گسترش ترک و انواع گسیختگی در تیرهای تقویت شده با ورق FRP ..... ۵۴
۳-۶-۱۴- تأثیر ورق FRP بر شکل پذیری تیر ..... ۵۹

۳-۶-۱۵- تأثیر لایه های FRP بر مقاومت خمشی تیر ۶۰
۳-۶-۱۶- تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP ۶۱
۳-۶-۱۶-۱- طرح های مقاوم سازی ۶۱
۳-۶-۱۶-۲- انتخاب روش مقاوم سازی ۶۳
۳-۷- جمع بندی ۶۴
فصل چهارم- مدل سازی ۶۵۶۵
۴-۱- مقدمه ۶۶
۴-۲- معرفی نرم افزار LS- DYNA ۶۶
۴-۳- المان های مورد استفاده در برنامه ۶۷
۴-۴- مش ۶۹
۴-۵- تعریف مصالح ۷۰
۴-۵-۱- رفتار الاستیک ۷۰
۴-۵-۲- رفتارغیر الاستیک ۷۰
۴-۵-۲-۱- رفتارغیرخطی فولاد ۷۰
۴-۵-۲-۲- رفتار بتن ۷۳
۴-۶- صحت مدل سازی تیر در حالت بدون FRP ۷۶
۴-۶-۱- مدل سازی تیر هاتچینسون و رحیمی در حالت بدون **FRP** ۷۶
۴-۷- مدل سازی مدل شماره ۱، ۲ و۳ بدون FRP ۷۷
۴-۷-۱- مشخصات مصالح بتن ۷۸
۴-۷-۲- مشخصات مصالح آرماتور ۷۸
۴-۷-۳- بارگذاری اعمال شده ۷۸
۴-۷-۴- بدست آوردن منحنی های هیسترزیس مدل های ۲،۱ و۳ در حالت بدون **FRP** ۷۹
۴-۸- چگونگی تعیین مشخصات مفاصل پلاستیک ۸۲

۴-۹- بدست آوردن پارامترهای a، b و c برای مدل ۱، ۲ و۳ در حالت بدون FRP.....۸۴
۴-۱۰- نتیجه گیری.....۸۶
فصل پنجم- آنالیز مدل های تقویت شده با FRP ..... ۸۷
۵-۱- معرفی مسئله.....۸۸
۵-۲-صحت مدل سازی تیر هاتچینسون و رحیمی درحالت تقویت شده با FRP.....۸۸
۵-۳- مشخصات نمونه ها.....۸۹
۵-۴- مشخصات مصالح لایه CFRP.....۹۱
۵-۵- اعمال بارگذاری.....۹۱
۵-۶- استخراج نتایج.....۹۲
۵-۶-۱- مدل شماره ۱.....۹۲
۵-۶-۲- مدل شماره ۲.....۹۴
۵-۶-۳- مدل شماره ۳.....۹۵
۵-۶-۴- مدل شماره ۴.....۹۶
۵-۶-۵- مدل شماره ۵.....۹۷
۵-۶-۶- مدل شماره ۶.....۹۸
۵-۶-۷- مدل شماره ۷.....۹۹
۵-۶-۸- مدل شماره ۸.....۱۰۰
۵-۶-۹- مدل شماره ۹.....۱۰۱
۵-۶-۱۰- مدل شماره ۱۰.....۱۰۲
۵-۶-۱۱- مدل شماره ۱۱.....۱۰۳
۵-۶-۱۲- مدل شماره ۱۲.....۱۰۴
۵-۶-۱۳- مدل شماره ۱۳.....۱۰۵
۵-۶-۱۴- مدل شماره ۱۴.....۱۰۶

۵-۶-۱۵- مدل شماره ۱۵ ..... ۱۰۷
۵-۶-۱۶- مدل شماره ۱۶ ..... ۱۰۸
۵-۶-۱۷- مدل شماره ۱۷ ..... ۱۰۹
۵-۶-۱۸- مدل شماره ۱۸ ..... ۱۱۰
فصل ششم- نتایج ..... ۱۱۱
۶-۱- نتیجه گیری ..... ۱۱۲
۶-۲- نمایش مفاصل پلاستیک در یک قاب مدل سازی شده ..... ۱۲۳
فصل هفتم- نتیجه گیری و پیشنهادات ..... ۱۲۶
۵-۲- پیشنهادات ..... ۱۲۹
فهرست مراجع ..... ۱۳۰
۱-مراجع انگلیسی ..... ۱۳۰
۲-مراجع اقتباسی ..... ۱۳۳
۳-مراجع فارسی ..... ۱۳۳

# فهرست اشکال


شکل۲- ۱- رفتار تیرهای مسلح شده با AFRP ..... ۱۵
شکل۲- ۲- رفتار تیرهای مسلح شده با فولاد ..... ۱۵
شکل۲- ۳- رابطه فشار محصور شدگی و نیروی حلقوی شده فولاد..... ۲۰
شکل۲- ۴- مدل مندر و همکاران برای بتن محصور شده با فولاد..... ۲۲
شکل۲- ۵- مکانیزم عمل دورگیری برای مقاطع بتنی دایره ای شکل..... ۲۳
شکل۲- ۶- مدل تنش و کرنش محوری بتن محصور شده با FRP (کارباهاری و گائو)..... ۲۴
شکل۲- ۷- مقایسه نمودار تنش- کرنش محوری بتن محصور شده با FRP، پوشش فولادی و بتن محصور نشده ..... ۲۵
شکل۲- ۸- کرنش حجمی بتن محصور شده با FRP، پوشش فولادی و بتن محصور نشده ..... ۲۵
شکل۲- ۹-مقایسه نرخ انبساط بتن محصور شده با FRP، پوشش فولادی و بتن محصور نشده..... ۲۶
شکل۲- ۱۰- منحنی تنش- کرنش بتن محصور شده با FRP (میرمیران و همکاران ۱۹۹۸)..... ۲۷
شکل۲- ۱۱- مدل تنش-کرنش Lam ,Teng برای بتن محصور شده با FRP..... ۳۰
شکل۲- ۱۲- مدل کلی تنش-کرنش ارائه شده برای بتن محصور شده توسط یوسف و همکاران..... ۳۱
شکل۲- ۱۳- مقایسه مدل تنش- کرنش یوسف و همکاران با نتایج آزمایشگاهی..... ۳۲
شکل۲- ۱۴- منحنی تنش- کرنش پیشنهادی مسلم و همکاران..... ۳۲
شکل۳- ۱- مقایسه دو رفتار نرم وترد از یک عضو خمشی ..... ۳۶
شکل۳- ۲- منحنی رفتار عضو شکل پذیر ..... ۳۸
شکل۳- ۳-منحنی رفتار عضو نیمه شکل پذیر..... ۳۸
شکل۳- ۴- منحنی رفتار عضو شکننده..... ۳۹
شکل۳- ۵- رابطه بار- تغییر شکل کلی (تعمیم یافته) برای اعضا و اجزای بتنی ..... ۴۳
شکل۳- ۶-تقویت خمشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP ..... ۵۲
شکل۳- ۷- الگو های مختلف تقویت برشی تیر بتن آرمه مستطیلی و T شکل با ورقه FRP..... ۵۲
شکل۳- ۸- مدل Chen و Teng..... ۵۳
شکل۳- ۹- تقویت خمشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP و نوار انتهایی U شکل..... ۵۴
شکل۳- ۱۰- تقویت خمشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP پیش تنیده..... ۵۴

شکل۳- ۱۱- تیر تقویت نشده ۵۵
شکل۳- ۱۲- تیر تقویت شده با ورق FRP ۵۵
شکل۳-۱۳- مکانیزم های شکست تقویت شده با عملکرد کامل کامپوزیت ۵۶
شکل۳-۱۴- منحنی های بار-تغییر مکان در تیرهای مقاوم شده و مقاوم نشده ۵۶
شکل۳-۱۵- کنده شدن بتن پوشش در تیر بتنی جکت شده با FRP ۵۸
شکل۳-۱۶- (d) جداشدگی پوشش بتن (e) جداشدگی انتهای ورقه ۵۸
شکل۳- ۱۷- نمودار بار-تغییرمکان وسط تیر ۵۹
شکل۳- ۱۸- گسترش ترک در تیر مقاوم سازی شده ۵۹
شکل۳- ۱۹- نمونه هایی از مقاوم سازی برشی تیرها به وسیله FRP ۶۲
شکل۳-۲۰- رکابی های U شکل محکم شده با بست مکانیکی ۶۲
شکل ۴- ۱- نمای کلی از محیط LS- DYNA ۶۶
شکل ۴- ۲- المان های Solid چهار، شش و هشت گره ای ۶۷
شکل ۴- ۳- المان شش وجهی هشت گره ای ۶۸
شکل ۴- ۴- المان Truss ۶۸
شکل ۴- ۵- المان Shell ۶۹
شکل ۴- ۶- جهت راستای ماده ۶۹
شکل ۴- ۷- منحنی تنش- کرنش ورق های FRP ۷۰
شکل ۴- ۸- مدل دو خطی الاستو پلاستیک ۷۱
شکل ۴- ۹- مدل دو خطی ۷۲
شکل ۴- ۱۰- رفتار الاستوپلاستیک با سخت شوندگی کینماتیک و ایزوتروپیک ۷۲
شکل ۴- ۱۱- منحنی تنش- کرنش فشاری و کششی تک محوره بتن ۷۳
شکل ۴- ۱۲- منحنی فشردگی حجمی برای بتن ۷۴
شکل ۴- ۱۳- مشخصات تیر مدل شده ۷۶
شکل ۴- ۱۴- مقایسه نمودارهای نیرو- تغییر مکان برای نمونه بدون FRP ۷۷
شکل ۴- ۱۵- نمودار بارگذاری اعمال شده ۷۹
شکل ۴- ۱۶- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۱ (بدون FRP) ۷۹
شکل ۴- ۱۷- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۱ (بدون FRP) ۸۰
شکل ۴- ۱۸- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۲ (بدون FRP) ۸۰

شکل ۴- ۱۹- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۲ (بدون FRP) ۸۱
شکل ۴- ۲۰- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۳ (بدون FRP) ۸۱
شکل ۴- ۲۱- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۳ (بدون FRP) ۸۲
شکل ۴- ۲۲- رسم پوش منحنی هیسترزیس ۸۳
شکل ۴- ۲۳- ایده آل سازی پوش منحنی هیسترزیس ۸۳
شکل ۴- ۲۴- تعریف θ ۸۳
شکل ۴- ۲۵- رابطهٔ بار- تغییر شکل کلی برای اعضاء اجزای بتنی ۸۴
شکل ۴- ۲۶- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۱ (بدون FRP) ۸۴
شکل ۴- ۲۷- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۲ (بدون FRP) ۸۵
شکل ۴- ۲۸- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۲ (بدون FRP) ۸۵
شکل ۵- ۱- مقایسه نمودارهای نیرو- تغییر مکان برای نمونه با FRP ۸۸
شکل ۵- ۲- نمونه ای از تیر مدل شده در نرم افزار ۹۰
شکل ۵- ۳- نمودار بارگذاری اعمال شده ۹۱
شکل ۵- ۴- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۱ ۹۲
شکل ۵- ۵- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۱ ۹۲
شکل ۵- ۶- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۱ ۹۳
شکل ۵- ۷- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۲ ۹۴
شکل ۵- ۸- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۲ ۹۴
شکل ۵- ۹- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۲ ۹۴
شکل ۵- ۱۰- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۳ ۹۵
شکل ۵- ۱۱- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۳ ۹۵
شکل ۵- ۱۲- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۳ ۹۵
شکل ۵- ۱۳- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۴ ۹۶
شکل ۵- ۱۴- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۴ ۹۶
شکل ۵- ۱۵- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره۴ ۹۶
شکل ۵- ۱۶- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۵ ۹۷
شکل ۵- ۱۷- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۵ ۹۷
شکل ۵- ۱۸- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۵ ۹۷

شکل ۵- ۱۹- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۶ ..... ۹۸
شکل ۵- ۲۰- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۶ ..... ۹۸
شکل ۵- ۲۱- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۶ ..... ۹۸
شکل ۵- ۲۲- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۷ ..... ۹۹
شکل ۵- ۲۳- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۷ ..... ۹۹
شکل ۵- ۲۴- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۷ ..... ۹۹
شکل ۵- ۲۵- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۸ ..... ۱۰۰
شکل ۵- ۲۶- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۸ ..... ۱۰۰
شکل ۵- ۲۷- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۸ ..... ۱۰۰
شکل ۵- ۲۸- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۹ ..... ۱۰۱
شکل ۵- ۲۹- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۹ ..... ۱۰۱
شکل ۵- ۳۰- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۹ ..... ۱۰۱
شکل ۵- ۳۱- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره۱۰ ..... ۱۰۲
شکل ۵- ۳۲- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۱۰ ..... ۱۰۲
شکل ۵- ۳۳- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۱۰ ..... ۱۰۲
شکل ۵- ۳۴- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۱۱ ..... ۱۰۳
شکل ۵- ۳۵- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۱۱ ..... ۱۰۳
شکل ۵- ۳۶- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۱۱ ..... ۱۰۳
شکل ۵- ۳۷- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره۱۲ ..... ۱۰۴
شکل ۵- ۳۸- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۱۲ ..... ۱۰۴
شکل ۵- ۳۹- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۱۲ ..... ۱۰۴
شکل ۵- ۴۰- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره۱۳ ..... ۱۰۵
شکل ۵- ۴۱- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۱۳ ..... ۱۰۵
شکل ۵- ۴۲- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۱۳ ..... ۱۰۵
شکل ۵- ۴۳- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره۱۴ ..... ۱۰۶
شکل ۵- ۴۴- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۱۴ ..... ۱۰۶
شکل ۵- ۴۵- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۱۴ ..... ۱۰۶
شکل ۵- ۴۶- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۱۵ ..... ۱۰۷

شکل ۵- ۴۷- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۱۵.....۱۰۷
شکل ۵- ۴۸- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۱۵.....۱۰۷
شکل ۵- ۴۹- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۱۶.....۱۰۸
شکل ۵- ۵۰- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۱۶.....۱۰۸
شکل ۵- ۵۱- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۱۶.....۱۰۸
شکل ۵- ۵۲- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۱۷.....۱۰۹
شکل ۵- ۵۳- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۱۷.....۱۰۹
شکل ۵- ۵۴- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۱۷.....۱۰۹
شکل ۵- ۵۵- منحنی نیرو- جابجایی مدل شماره ۱۸.....۱۱۰
شکل ۵- ۵۶- منحنی لنگر- دوران مدل شماره ۱۸.....۱۱۰
شکل ۵- ۵۷- منحنی پوش و ایده آل مدل شماره ۱۸.....۱۱۰
شکل ۶- ۱- نمودار پارامتر a نسبت به $\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$ برای حالت برش $\frac{3.77V}{b_w.d\sqrt{f'_c}}=3$ و شرایط (NC).....۱۱۳
شکل ۶- ۲- نمودار پارامتر a نسبت به $\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$ برای حالت برش $\frac{3.77V}{b_w.d\sqrt{f'_c}}=2$ و شرایط (NC).....۱۱۴
شکل ۶- ۳- نمودار پارامتر a نسبت به $\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$ برای حالت برش $\frac{3.77V}{b_w.d\sqrt{f'_c}}=4.5$ و شرایط (NC).....۱۱۴
شکل ۶- ۴- نمودار پارامتر a نسبت به $\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$ برای حالت برش $\frac{3.77V}{b_w.d\sqrt{f'_c}}=6$ و شرایط (NC).....۱۱۵
شکل ۶- ۵- نمودار پارامتر a نسبت به $\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$ برای حالت برش $\frac{3.77V}{b_w.d\sqrt{f'_c}}=4.5$ و شرایط (C).....۱۱۵
شکل ۶- ۶- نمودار پارامتر a نسبت به $\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$ برای حالت برش $\frac{3.77V}{b_w.d\sqrt{f'_c}}=6$ و شرایط (C).....۱۱۶
شکل ۶- ۷- مقایسه پارامتر a در حالت های مختلف برش در شرایط (NC).....۱۱۶
شکل ۶- ۸- مقایسه پارامتر a در حالت های مختلف برش در شرایط (C).....۱۱۷
شکل ۶- ۹- نمودار پارامتر b نسبت به $\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$ برای حالت برش $\frac{3.77V}{b_w.d\sqrt{f'_c}}=3$ و شرایط (NC).....۱۱۸
شکل ۶- ۱۰- نمودار پارامتر b نسبت به $\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$ برای حالت برش $\frac{3.77V}{b_w.d\sqrt{f'_c}}=2$ و شرایط (NC).....۱۱۸
شکل ۶- ۱۱- نمودار پارامتر b نسبت به $\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$ برای حالت برش $\frac{3.77V}{b_w.d\sqrt{f'_c}}=4.5$ و شرایط (NC) ۱۱۹
شکل ۶- ۱۲- نمودار پارامتر b نسبت به $\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$ برای حالت برش $\frac{3.77V}{b_w.d\sqrt{f'_c}}=6$ و شرایط (NC).....۱۱۹

شکل ۶- ۱۳- نمودار پارامتر b نسبت به $\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$ برای حالت برش $\frac{3.7V}{b_w.d\sqrt{f_c'}}=4.5$ و شرایط (C) ..... ۱۲۰
شکل ۶- ۱۴- نمودار پارامتر b نسبت به $\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$ برای حالت برش $\frac{3.7V}{b_w.d\sqrt{f_c'}}=6$ و شرایط (C)..... ۱۲۰
شکل ۶- ۱۵- مقایسه پارامتر b در حالت های مختلف برش در شرایط (NC)..... ۱۲۱
شکل ۶- ۱۶- مقایسه پارامتر b در حالت های مختلف برش در شرایط (C)..... ۱۲۱
شکل ۶- ۱۷- مقایسه پارامتر c در حالت های مختلف برش در شرایط (NC)..... ۱۲۲
شکل ۶- ۱۸- مقایسه پارامتر c در حالت های مختلف برش در شرایط (C)..... ۱۲۲
شکل ۶-۱۹- نمایش محل مفاصل پلاستیک در یک قاب مدل سازی شده..... ۱۲۵

# فهرست جداول

جدول ۱- ۱- مشخصات تیرهای مورد استفاده در آزمایش ..... ۱۲
جدول ۱- ۲- نتایج حاصل از بارگذاری نمونه های ذکر شده در بالا ..... ۱۲
جدول ۲- ۱- فاکتورهای شکل مدل عمومی پیشنهادی ..... ۳۳
جدول ۳- ۱- مقادیر سختی های مؤثر ..... ۴۴
جدول ۳- ۲- پارامترهای مدل سازی و معیارهای پذیرش برای روش های غیر خطی- تیرهای بتن مسلح ..... ۴۵
جدول ۳- ۳- خصوصیات کاربردی الیاف FRP ..... ۴۸
جدول ۳- ۴- چگالی فولاد و مصالح FRP بر حسب $kg/m^3$ ..... ۴۹
جدول ۳- ۵- مقادیر ضریب انبساط حرارتی مصالح FRP ($1\times10^{-6}$) ..... ۵۰
جدول ۳- ۶- مشخصات مکانیکی سه نوع الیاف کربن، شیشه و آرامید ..... ۵۰
جدول ۳- ۷– نتایج مقدار بار نهایی و بار تسلیم تیرها در آزمایش ..... ۶۰
جدول ۳- ۸- ملاحظات اجرایی در روش تقویت تیرها با پوشش ..... ۶۳
جدول ۴- ۱- مقادیر پیش فرض منحنی فشار- کرنش حجمی ..... ۷۵
جدول ۴- ۲- مشخصات مصالح ..... ۷۶
جدول ۴- ۳ - مشخصات بتن مورد استفاده برای نمونه ها ..... ۷۸
جدول ۴- ۴- مشخصات آرماتور مورد استفاده برای نمونه ها ..... ۷۸
جدول ۴- ۵- مقایسه پارامترهای مفاصل پلاستیک بدست آمده از نرم افزار با مقادیر دستورالعمل بهسازی ..... ۸۶
جدول ۵- ۱- مشخصات هندسی نمونه ها ..... ۸۹
جدول ۵- ۲- مشخصات CFRP مورد استفاده برای نمونه ها ..... ۹۱
جدول ۶- ۱- ضرایب مفاصل پلاستیک ..... ۱۱۲
جدول ۷- ۱- ضرایب مفاصل پلاستیک ..... ۱۲۷