

پروفیسر



# نقش فیبر کربنی در مقاوم سازی بتن

مؤلف

مهدی نیک عزم

انتشارات فرزندگان دانشگاه

۱۳۹۷

نیک‌عزم، مهدی، ۱۳۶۰ -	: نیک‌عزم، مهدی، ۱۳۶۰ -	سرشناسه
نقش فیبر کربنی در مقاوم سازی بتن / مولف مهدی نیک‌عزم.	: نقش فیبر کربنی در مقاوم سازی بتن / مولف مهدی نیک‌عزم.	عنوان و نام پدیدآور
تهران: فرزندگان دانشگاه، ۱۳۹۷.	: تهران: فرزندگان دانشگاه، ۱۳۹۷.	مشخصات نشر
۱۸۰ ص: مصور، جدول، نمودار.	: ۱۸۰ ص: مصور، جدول، نمودار.	مشخصات ظاهری
۳۷۰۰۰۰ ریال: ۹۷۸-۶۰۰-۹۹۸۹۵-۳-۹	: ۳۷۰۰۰۰ ریال: ۹۷۸-۶۰۰-۹۹۸۹۵-۳-۹	شابک
فیبا	: فیبا	وضعیت فهرست نویسی
واژه‌نامه.	: واژه‌نامه.	یادداشت
بتن تقویت‌شده با الیاف	: بتن تقویت‌شده با الیاف	موضوع
Fiber reinforced concrete	: Fiber reinforced concrete	موضوع
سازه‌های بتنی - پایداری	: سازه‌های بتنی - پایداری	موضوع
Concrete structures-- Stability*	: Concrete structures-- Stability*	موضوع
ساختمان‌های بتنی	: ساختمان‌های بتنی	موضوع
Concrete construction	: Concrete construction	موضوع
ساختمان‌سازی با بتن مسلح	: ساختمان‌سازی با بتن مسلح	موضوع
Reinforced concrete construction	: Reinforced concrete construction	موضوع
۱۳۹۷۴۴۴TA / ۹ن	: ۱۳۹۷۴۴۴TA / ۹ن	رده بندی کنگره
۱۸۳۴۱/۶۲۴	: ۱۸۳۴۱/۶۲۴	رده بندی دیویی
۵۴۲۱۷۱۲	: ۵۴۲۱۷۱۲	شماره کتابشناسی ملی

## انشارات فرزندگان دانشگاه

### نقش فیبر کربنی در مقاوم‌سازی بتن

تألیف: مهدی نیک‌عزم

ناشر: فرزندگان دانشگاه

ناظر فنی: محسن فاضلی

نوبت چاپ: اول - ۱۳۹۷

شمارگان: ۲۰۰۰ جلد

قیمت: ۳۶۰۰۰ تومان

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۹۸۹۵-۳-۹

مرکز فروش: تهران، میدان انقلاب، خ منیری جاوید، پلاک ۹۲

تلفن: ۶۶۹۷۳۹۶۰ کتابفروشی رسولی

## فهرست مطالب

پیشگفتار.....	۱۱
<b>فصل اول: معرفی کامپوزیت های FRP و کاربرد آن در مقاوم سازی سازه های بتن مسلح.....</b>	<b>۱۳</b>
۱-۱ مقدمه.....	۱۳
۲-۱ انواع ورق های کامپوزیت FRP.....	۱۳
۳-۱ ویژگی های مکانیکی کامپوزیت های FRP.....	۱۴
۴-۱ رزین ها.....	۱۵
۵-۱ مقایسه عملکرد انواع کامپوزیت های FRP در مقاوم سازی سازه ها.....	۱۵
۶-۱ ضریب ایمنی.....	۱۵
<b>فصل دوم: بررسی مقاومت مرزی در محل اتصال FRP به بتن.....</b>	<b>۱۷</b>
۱-۲ کارهای انجام شده.....	۱۷
۲-۲ مدل های مقاومت مرزی موجود.....	۱۷
۱-۲-۲ مدل های تجربی.....	۱۸
۲-۲-۲ مدل های شکست مکانیکی.....	۱۸
۳-۲-۲ ضوابط طراحی.....	۲۲
۴-۲ پیشنهادات طراحی.....	۲۳
<b>فصل سوم : مقاوم سازی خمشی تیرها.....</b>	<b>۲۵</b>
۱-۳ مطالعات انجام شدن.....	۲۵
۲-۳ روش های مقاوم سازی.....	۲۶
۱-۲-۳ کلیات.....	۲۶
۲-۲-۳ مهار کردن انتهای صفحات FRP بر پائین تیر.....	۲۶
۳-۲-۳ صفحات پیش تنیده.....	۲۷
۳-۳ مودهای شکست و رفتار واقعی.....	۲۷
۱-۳-۳ انواع مودهای شکست.....	۲۷
۲-۳-۳ شکست خمشی.....	۲۹
۳-۳-۳ شکست برشی.....	۳۰
۱-۴-۳-۳ کنده شدن پوشش بتنی.....	۳۱
۵-۳-۳ ایجاد ترک در میانه تیر.....	۳۲
۱-۵-۳-۳ ایجاد ترک خمشی در میانه تیر.....	۳۲
۶-۳-۳ انکر کردن انتهایی با استفاده از گیره های U شکل از نوع FRP.....	۳۳
۴-۳ مقاومت خمشی.....	۳۳

۳۳	..... کلیات ۱-۴-۳
۳۴	..... ضوابط طراحی ۲-۴-۳
۳۹	..... در نظر گرفتن پیش بارگذاری ۳-۴-۳
۴۱	..... توصیه های طراحی ۵-۳
۴۱	..... کنترل کردن مقاطع بحرانی وانکر نقاط انتهایی صفحه FRP ۱-۵-۳
۴۵	<b>فصل چهارم: مقاوم سازی برشی تیرها</b>
۴۵	..... مقدمه ۱-۴
۴۵	..... روش های مقاوم سازی ۲-۴
۴۵	..... طرح های مقاوم سازی ۱-۲-۴
۴۷	..... انتخاب روش مقاوم سازی ۲-۲-۴
۴۹	..... مودهای شکست ۳-۴
۴۹	..... کلیات ۱-۳-۴
۵۰	..... FRP از گسیختگی ناشی از شکست برشی ۲-۳-۴
۵۰	..... FRP بدون گسیختگی ۳-۳-۴
۵۰	..... FRP همراه با جدا شدگی ۴-۳-۴
۵۱	..... مکانیکی انکرهای مکانیکی ۵-۳-۴
۵۱	..... تحقیقات موجود بر روی مدل های مقاومت برشی ۴-۴
۵۴	..... Teng, Chen مدل مقاومت برشی ۵-۴
۵۴	..... توضیحات کلی ۱-۵-۴
۵۶	..... FRP شونده توسط گسیختگی ۲-۵-۴
۵۸	..... FRP جدا شدن توسط گسیختگی ۳-۵-۴
۶۰	..... مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ۶-۴
۶۱	..... نتیجه گیری ۷-۴
۶۳	<b>فصل پنجم: مقاوم سازی ستون ها در برابر نیروهای محوری و نیروهای خارج از محور</b>
۶۳	..... مقدمه ۱-۵
۶۴	..... روش های مقاوم سازی ۲-۵
۶۴	..... ملاحظات اجرایی ۱-۲-۵
۶۴	..... اصلاح شکل مقطع ۲-۲-۵
۶۵	..... مودهای شکست و رفتار واقعی ستون های بتنی پوشیده شده با FRP ۳-۵
۶۵	..... ستون های بتنی دایره ای شکل ۱-۳-۵
۶۶	..... ستون های بتنی مستطیلی شکل ۲-۳-۵

۶۶	..... ۳-۳-۵ ستون های بتنی بیضوی شکل
۶۷	..... ۴-۵ مقاومت فشاری بتن پوشیده شده با FRP
۶۷	..... ۱-۴-۵ کلیات
۶۷	..... ۲-۴-۵ مروری بر مدل های مقاومتی
۷۰	..... ۳-۴-۵ کارهای آزمایشگاهی صورت گرفته
۷۰	..... ۴-۴-۵ بررسی داده های آزمایشگاهی
۷۱	..... ۵-۴-۵ بررسی مدل های مقاومتی
۷۲	..... ۶-۴-۵ مدل Lam و Teng
۷۳	..... ۵-۵ رفتار تنش-کرنش بتن پوشیده شده با FRP
۷۳	..... ۱-۵-۵ کلیات
۷۳	..... ۲-۵-۵ مروری بر مدل های تنش-کرنش
۷۵	..... ۳-۵-۵ بررسی داده های آزمایشگاهی
۷۵	..... ۱-۳-۵-۵ کرنش محوری نهایی
۷۶	..... ۲-۳-۵-۵ منحنی های تنش-کرنش
۷۷	..... ۴-۵-۵ مدل تنش-کرنش LAM و TENG
۷۷	..... ۱-۴-۵-۵ بهترین بر ارزش مدل تنش-کرنش
۷۸	..... ۲-۴-۵-۵ مدل تنش-کرنش جهت استفاده در کارهای طراحی
۷۹	..... ۵-۵ ستون های بتنی مستطیل شکل با جکت FRP
۷۹	..... ۱-۵-۵ کلیات
۷۹	..... ۲-۵-۵ مدل های موجود
۷۹	..... ۱-۲-۵-۵ معادلات عمومی
۸۰	..... ۲-۲-۵-۵ ضریب شکل
۸۱	..... ۳-۲-۵-۵ قطر ستون معادل دایروی شکل
۸۱	..... ۳-۶-۵ مدل Lam و Teng
۸۲	..... ۶-۵ ستون های بیضوی شکل پوشش داده شده با FRP
۸۲	..... ۷-۵ توصیه های طراحی برای ستون ها با بار محوری
۸۲	..... ۱-۷-۵ کلیات مقاوم سازی ستون های بتنی پوشیده شده با FRP در مقابل بارهای محوری
۸۳	..... ۲-۷-۵ مقاومت نهایی ستون های بتنی مسلح با جکت FRP در مقابل بارهای محوری
۸۴	..... ۸-۵ توصیه های طراحی برای ستون ها با بار خارج از محور
۸۴	..... ۱-۸-۵ کلیات
۸۵	..... ۲-۸-۵ مطالعات انجام گرفته بر روی ستون ها با بار خارج از محور و پوشیده شده با FRP

۸۵	۳-۸-۵ مقاومت نهایی ستون های بتنی جکت شده با FRP بارهای خارج از محور
۸۷	<b>فصل ششم: مقاوم سازی لرزه ای ستون ها</b>
۸۷	۱-۶ مقدمه
۸۸	۲-۶ مودهای شکست ستون های بتنی تحت اثر بارهای لرزه ای
۸۸	۱-۲-۶ کلیات
۸۸	۲-۲-۶ شکست برشی
۸۹	۳-۲-۶ شکست ناشی از ایجاد مفصل پلاستیک خمشی
۸۹	۴-۲-۶ شکست موضعی
۸۹	۵-۲-۶ شکست برشی خمشی ستون ها ناشی از قطع میلگردهای طولی
۹۰	۳-۶ روش های مقاوم سازی
۹۰	۱-۳-۶ جکت FRP با الیاف افقی
۹۱	۲-۳-۶ پوشش طولی FRP
۹۱	۴-۶ شکل پذیری خمشی ستون های مقاوم شده
۹۱	۱-۴-۶ عوامل شکل پذیری
۹۲	۲-۴-۶ شکل پذیری ستون های بتنی مقاوم شده
۹۵	۵-۶ توصیه های طراحی
۹۵	۱-۵-۶ مقاومت برشی
۹۸	۲-۵-۶ پوشش مفصل پلاستیک خمشی
۹۹	۳-۵-۶ جزئیات اصول طراحی
۹۹	نتیجه گیری
۱۰۳	<b>فصل هفتم: مدل‌های رفتاری مصالح و مبانی مدلسازی به روش اجزا محدود</b>
۱۰۳	۱-۴ مقدمه
۱۰۴	۲-۴ معرفی نرم افزار
۱۰۸	۲-۴ معرفی مصالح
۱۰۸	۱-۲-۴ بتن
۱۱۰	۱-۲-۴ فولاد
۱۱۳	۱-۲-۴ الیاف پلیمری FRP
۱۱۵	۳-۴ مدلسازی در نرم افزار اجزا محدود Abaqus
۱۱۵	۱-۳-۴ علت انتخاب نرم اجزا محدود ABAQUS
۱۱۶	۲-۳-۴ تعریف مختصات هندسی مسئله
۱۱۸	۳-۳-۴ تعریف مدل رفتاری مصالح



۱۱۸	..... ۴-۳-۳-۱- تعریف مدل رفتاری بتن:
۱۲۵	..... ۴-۳-۳-۲- تعریف مدل رفتاری فولاد:
۱۲۵	..... ۴-۳-۳-۳- تعریف مدل رفتاری FRP:
۱۲۹	..... ۴-۳-۴- سوار کردن قطعات (Assembly)
۱۳۱	..... ۴-۳-۴- تعریف گامهای تحلیل
۱۳۲	..... ۴-۳-۴- تعریف اندرکنش بین قطعات
۱۴۳	..... ۴-۳-۴- مش بندی
۱۴۵	..... ۴-۳-۴- پردازش مدلسازی (تعریف Job)
۱۴۷	..... فصل هشتم: بررسی نتایج تحلیل عددی
۱۴۷	..... ۵-۱- مقدمه
۱۴۷	..... ۵-۲- صحت سنجی مدلسازی عددی
۱۵۰	..... ۵-۳- بررسی اثر FRP بر رفتار تیرهای بتنی
۱۵۴	..... ۵-۳-۱- تأثیر تغییر طول ورق FRP
۱۵۹	..... ۵-۳-۲- بررسی تأثیر تغییر عرض ورق FRP
۱۷۷	..... فصل نهم: نتایج و پیشنهادات
۱۷۷	..... ۶-۱- نتایج
۱۷۸	..... ۵-۳- پیشنهادات برای تحقیقات آتی
۱۷۹	..... مراجع



## پیشگفتار

سازه های بتن مسلح اغلب با اصلاح و بهبود عملکردشان در طول عمر خدمات خود مواجهه هستند عوامل اصلی شرکت کننده در این اصلاح عبارتند از تغییرات استفاده از آنها ، استانداردهای طراحی جدید، تخریب به خاطر خوردگی فولاد به خاطر قرار گرفتن در معرض یک محیط مهاجم و رویداد حادثه مثل زلزله. در چنین شرایطی دو راه حل ممکن وجود دارد: جایگزینی یا مقاوم سازی جایگزینی سازه ای کامل ممکن است معایبی از قبیل هزینه های بالا برای مواد و نیروی کار، تاثیر محیطی قویتر و ناسازگاری به علت وقفه در عملکرد سازه به همراه داشته باشد که در این هنگام بهتر است برای تعمیر یا ارتقا سازه در خصوص مقاوم سازی اقدام نمود. در دهه گذشته توسعه چسبهای قوی از جمله اپوکسی منجر به بوجود آمدن تکنیکی شامل چسباندن صفحات فولادی یا صفحات الیاف پلیمری (FRP) به سطح بتن شده است. این صفحات با بتن بطور مرکب عمل می کنند و به حمل بار کمک می کنند. FRP در مقایسه با فولاد دارای مزایای متعددی است. این مواد مقاومت نهایی بالاتری دارند و چگالی کمتری نسبت به فولاد دارند. علاوه بر آن نصب و راه اندازی آنها آسانتر می باشد. از FRP در تقویت ستون ها، تیرها، دال ها، اتصالات، دیوارهای برشی بتنی، دیوارهای آجری، پایه و عرشه پل ها و ... می توان استفاده نمود. تکنیک مقاوم سازی ستون های مسلح بتنی با استفاده از کامپوزیت های FRP به طور گسترده ای به جای پوشش به وسیله فولاد مورد کاربرد قرار گرفته است. در مقایسه با استفاده از تنگ ها و مارپیچ فولادی، تکنیک محصور سازی با استفاده از FRP قابلیت این را دارد که محصور شدگی را به صورت پیوسته برای تمام مقطع عرضی ستون تامین کند. FRP می تواند در تیرها و دال های بتنی به عنوان جایگزین تمام یا بخشی از میلگرد کششی مورد نیاز بکار رود. همچنین در اتصالات بتنی می تواند استفاده گردد و شکل پذیری اتصال را افزایش دهد. از FRP در تقویت دیوارهای برشی نیز استفاده می گردد. FRP می تواند شکل پذیری دیوارهای بنایی را افزایش داده و آنها را مهار نماید. با توجه به اینکه این کامپوزیت جدیداً وارد کارهای مهندسی در ایران شده اند ضروری است که با انجام مطالعات رفتار آنها در ترکیب با المانهای مختلف بررسی گردد.



## فصل اول: معرفی کامپوزیت های FRP و کاربرد آن در مقاوم سازی

### سازه های بتن مسلح

#### ۱-۱ مقدمه

استفاده از ورق های فولادی جهت مقاوم سازی سازه های بتن مسلح رایج و معمول می باشد. در سال های اخیر مطالعات زیادی بر روی FRP انجام گرفته که بتوان از آن ها بجای ورق های فولادی در مقاوم سازی سازه های بتنی استفاده کرد. از این روش بصورت گسترده در مقاوم سازی ستون ها استفاده شده است (دورپیچی ستون ها توسط ورق های FRP).

در حال حاضر چندین گروه تحقیقاتی در سراسر دنیا در این مورد مطالعات گسترده ای را آغاز کرده اند. Drewett و Shaw در سال ۱۹۹۹ تحقیقات خود را در این زمینه آغاز کردند. در سال ۲۰۰۰ این تحقیقات توسط Bonacci و Maalej و همچنین Hamilton و Dolan ادامه یافت تا اینکه مطالب جامعی در این زمینه در سال ۲۰۰۰ توسط Karbhari و Seible و همچنین Neale تهیه و جمع آوری گردید. تکنولوژی استفاده از ورق های FRP اولین بار در سال ۱۹۸۴ در سوئیس مورد استفاده قرار گرفت که در آن ورق های CFRP جهت مقاوم سازی تیرهای بتنی آزمایش شد. بزرگترین مزیت ورق های FRP داشتن نسبت مقاومت به وزن بالای آنها می باشد. ورق های FRP بطور معمول حداقل دو برابر و حتی می توانند ده برابر مقاومت ورق های فولادی را داشته باشند در صورتی که وزن آنها تنها ۲۰٪ وزن ورق های فولادی می باشد (Darby ۱۹۹۹). کامپوزیت های FRP طی سالیان دراز در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته است و خصوصیات این مصالح به خوبی شناخته شده است. اما دلیل محدودیت استفاده از این مصالح در مهندسی عمران هزینه بالای آن می باشد و کاهش هزینه این کامپوزیت ها استفاده از آن را در مهندسی عمران گسترش خواهد داد.

#### ۱-۲ انواع ورق های کامپوزیت FRP

کامپوزیت های FRP از ترکیب فیبرورزین بوجود می آیند. انواع مختلف فیبرها عبارتند از: فیبرهای کربنی، فیبرهای شیشه ای و فیبرهای آرامید و رزین هایی که در این روش مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از: رزین های اپوکسی، پلی استر و نیلی استر.

بسته به نوع فیبر مورد استفاده قرار گرفته، کامپوزیت های FRP به سه دسته تقسیم می شوند:

پلیمر مسلح فیبر شیشه ای (G FRP)، فیبر کربنی (C FRP) و فیبر آرامید (A FRP).

اطلاعات مربوط به جزئیات این مصالح را می توان از (ACI 440R-96-1 (۱۹۹۶)) بدست آورد.

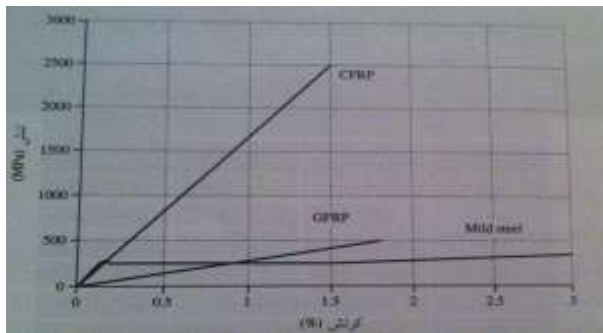
## ۳-۱ ویژگی های مکانیکی کامپوزیت های FRP

مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بسته به ضخامت ورق های کامپوزیت می تواند تفاوت بسیار زیادی نسبت به اعداد آورده شده در جدول ۱-۱ داشته باشند.

بدون توجه به نوع فیبرها و یا روش ساختن آنها هر سه نوع این کامپوزیت ها رفتار تنش - کرنش یکسانی از خود نشان می دهند و این یکی از ویژگی های بسیار مهم کامپوزیت های FRP در استفاده سازه ای آنها می باشد. شکل ۱-۱ نوعی از منحنی های تنش - کرنش را برای کامپوزیت های G FRP، C FRP و و فولاد نرم نشان می دهد. با توجه به این نمودار مشاهده می شود که شکل پذیری فولاد بیشتر از مواد کامپوزیت می باشد و می توان دو نتیجه مهم سازه ای از این مسئله گرفت: اول اینکه این مصالح (FRP) شکل پذیری فولاد را ندارند و ممکن است شکل پذیری اعضای سازه بتن مسلح را که با استفاده از FRP ها مقاوم شده اند، محدود کند. با وجود این در مواقعی که برای جکت کردن بتن مورد استفاده قرار می گیرند، این مصالح می توانند بطور قابل توجهی مقاومت و شکل پذیری ستون ها را افزایش دهند.

جدول ۱ ویژگی های مکانیکی کامپوزیت های G FRP، C FRP و A FRP (Head ۱۹۹۶)

نوع کامپوزیت با فیبر یکطرفه	محتوای فیبری (درصدی از وزن ورق)	دانسیته ( $\text{Kg/m}^3$ )	مدول الاستیسیته (Gpa)	مقاومت ششی (Mpa)
G FRP	۵۰-۸۰	۱۶۰۰-۲۰۰۰	۲۰-۵۵	۴۰۰-۱۸۰۰
C FRP	۶۵-۷۵	۱۶۰۰-۱۹۰۰	۱۲۰-۲۵۰	۱۲۰۰-۲۲۵۰
A FRP	۶۰-۷۰	۱۰۵۰-۱۲۵۰	۴۰-۱۲۵	۱۰۰۰-۱۸۰۰



شکل ۱-۱ منحنی های تنش - کرنش برای فولاد نرم و چند نوع از مصالح FRP

استنباط دوم از رفتار شکننده مصالح کامپوزیت FRP، با توزیع تنش هست که از سخت شدگی دوباره این مصالح بعلت عدم شکل پذیری آنها حاصل می شود.

### ۴-۱ رزین ها

رزین های پلیمری جهت اتصال ورق های FRP به بتن مورد استفاده قرار می گیرند. بایستی توجه داشت که اتصال ضعیف FRP ها به بتن ممکن است جداولدگی بین بتن و FRP را موجب شود. استفاده از چسب های اپوکسی، شکل پذیری و مقاومت برشی تیرها را بالا می برد و این چسب ها به اندازه ای قوی هستند که باعث جلوگیری از جداولدگی ورق های FRP از مصالح بتنی می گردند. مشخصات این چسب ها می توانند توسط آزمایش های مناسب استاندارد مانند ( ۱۹۹۳ ) ASTM- D۶۳۸-M-۹۳ مشخص گردد.

### ۵-۱ مقایسه عملکرد انواع کامپوزیت های FRP در مقاوم سازی سازه ها

کامپوزیت های C FRP و ویژگی های بهتری نسبت به G FRP دارند و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه هستند. جدول ۱-۲ که توسط Meier و Winistorfer در سال ۱۹۹۵ تدوین یافته است، ویژگی های انواع کامپوزیت های FRP را در مقاوم سازی سازه های بتنی مسلح با هم مقایسه کرده است.

جدول ۲ مقایسه بین ویژگی های انواع FRP ها

معیار	ورق های کامپوزیت ساخته شده از		
	فیبرهای شیشه ای	فیبرهای کربنی	فیبرهای آرامید
مقاومت کششی	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب
مقاومت فشاری	خوب	خیلی خوب	نامناسب
مدول یانگ	مناسب	خیلی خوب	خوب
رفتار بلند مدت	مناسب	خیلی خوب	خوب
رفتار گسیختگی	مناسب	عالی	خوب
دانسیته وزنی	مناسب	خوب	عالی
مقاومت قلیائی	نامناسب	خیلی خوب	خوب
هزینه	خیلی خوب	مناسب	مناسب

### ۶-۱ ضریب ایمنی

جدول ۳ ضرایب ایمنی جزئی برای بتن، فولاد و FRP (آئین نامه ( ۱۹۹۷ ) BS ۸۱۱۰)

مقاومت	ضریب ایمنی جزئی
بتن تحت فشار محوری، $\gamma_c$	۱,۵

۱,۰۵	$\gamma_s$ فولاد،
۱,۲۵	مقاومت کششی FRP، $\gamma_{frp}$
۱,۲۵	مقاومت بتن با جکت FRP، $\gamma_b$



## فصل دوم: بررسی مقاومت مرزی در محل اتصال FRP به بتن

### ۱-۲ کارهای انجام شده

کارهای تجربی انجام گرفته شده در این زمینه عبارتند از :

• آزمایش برشی یکطرفه ( ۱۹۹۴ ) Taljsten

• آزمایش های برشی دو طرفه ( ۱۹۹۷ ) Van Gemert

• آزمایش های مربوط به تیر اصلاح شده ( ۱۹۸۰ ) Van Gemert

یکی از نتایج مهمی که در بخش های بعدی به آن پرداخته خواهد شد این است که همواره با افزایش طول پوشش داده شده ( L ) ، مقاومت عضو افزایش نمی یابد. و تنش کشش نهایی ممکن است هرگز در طول کلی ورق پخش نشود. بر این اساس بایستی یک طول موثر برای پوشش دادن اعضای بتنی مشخص گردد که این عمل توسط بسیاری از مطالعات تجربی در سال های ۱۹۴۴ تا ۲۰۰۱ و توسط افرادی مثل Taljsten, Maeda, Yuan, Holzenkämpfer و... مورد بررسی قرار گرفته است. در هر حال افزایش طول پوشش داده شده می تواند مکانیزم گسیختگی را بهبود بخشد.

### ۲-۲ مدل های مقاومت مرزی موجود

مدل های مقاومت مرزی را که در سال های اخیر ارائه شده اند می توان به سه دسته به شرح ذیل تقسیم نمود:

• **مدل های تجربی :** این مدل ها بر اساس مشخصات آزمایش گسترش یافته اند. این روش در سال ۱۹۹۶ توسط Tanaka، سال ۱۹۹۷ توسط Hiroyuki و Wu و همچنین Maeda و همکارانش در سال ۱۹۹۷ مورد بررسی قرار گرفت.

• **مدل های شکست مکانیکی:**

مطالعات انجام گرفته بر روی این مدل بصورت زیر می باشد :

Taljsten سال ۱۹۹۴، Holzenkämpfer سال ۱۹۹۴، Rostasy سال ۱۹۹۷، Yuan و Wu سال ۱۹۹۹ و Yuan و همکارانش سال ۲۰۰۱.

• **ارائه ضوابط طراحی:** که با استفاده از برخی فرضیات ساده و توسط افراد زیر مورد بحث قرار گرفت : Van Gemert سال ۱۹۸۰، Khalifa و همکارانش سال ۱۹۹۸.

در این فصل بر روی این سه مدل و اساس آنها که توسط Cehn و Teng در سال ۲۰۰۱ مورد بحث قرار گرفته است، بشرح پیوست مروری انجام می گیرد.

### ۲-۲-۱ مدل های تجربی

Wu و Hiroyuki در سال ۱۹۹۷ آزمایش هایی را بر روی اعضای بتنی مسلح مقاوم شده با فیبر های کربنی (بصورت برش دو طرفه) انجام دادند و رابطه ای بین طول پوشش (L, cm) و تنش برشی متوسط نهایی ایجاد شده در مرز پوششی ( $\tau_u$ ) بدست آوردند:

$$\tau_u = 5.881^{-0.669} \quad (\text{MPa, cm}) \quad (1-2)$$

رابطه دیگری توسط Tanaka در سال ۱۹۹۶ بصورت زیر بدست آمده است:

$$\tau_u = 6.13 \cdot \ln \quad (\text{MPa, mm}) \quad (2-2)$$

$P_u$  مقاومت نهایی ناشی از پوشش FRP از حاصلضرب مساحت صفحه FRP ( $L \cdot b_p$ ) در مقدار  $\tau_u$  برای هر دو مدل فوق بدست می آید.

Maeda و همکارانش در سال ۱۹۹۷ یک مدل بهتری را ارائه دادند که طول موثر پوشش ( $l_e$ ) را مشخص می کند:

$$\tau_u = 110.2 \times 10^{-6} E_p t_p \quad (\text{MPa}) \quad (2-3 \text{ الف})$$

در رابطه فوق  $E_p$  برحسب (MPa) و  $t_p$  بر حسب (mm) به ترتیب برابر مدول الاستیسیته و ضخامت صفحه پوششی (FRP) می باشند.  $P_u$  مقاومت نهایی ناشی از پوشش FRP از حاصلضرب  $\tau_u$  در مساحت پوششی موثر ( $L_e \cdot b_p$ ) بدست می آید. که در آن طول موثر پوششی ( $L_e$ ) از رابطه زیر حساب می شود:

$$L_e = e^{7.13 - 0.58 \ln(E_p t_p)} \quad (\text{mm}) \quad (2-3 \text{ ب})$$

در رابطه بالا  $E_p t_p$  بر حسب GPa-mm می باشد. این مدل زمانی صادق است که  $L \geq L_e$  باشد.

### ۲-۲-۲ مدل های شکست مکانیکی

Holzenkampfer در سال ۱۹۹۴ مقاومت مرزی بین فولاد و بتن را در حالت شکست مکانیکی غیر خطی (NLFM) مورد بررسی قرار داد. فرم اصلاح شده این مدل در سال ۱۹۹۸ توسط Blaschko و همکارانش کار شد و روابط مقاومت مرزی مطابق زیر بدست آمدند:

$$P_u = \begin{cases} 0.78 b_p \sqrt{\gamma G_f E_p t_p} & L \geq L_e \\ 0.78 b_p \sqrt{\gamma G_f E_p t_p \frac{L}{L_e} \left( \gamma - \frac{L}{L_e} \right)} & L < L_e \end{cases}$$

(۲-۴ الف)

$$L \geq L_e$$

در رابطه فوق  $E_p t_p$  بر حسب MPa-mm و  $P_u$  بر حسب N می باشد. طول موثر پوشش ( $L_e$ ) و انرژی گسیختگی ( $G_f$ ) از روابط زیر بدست می آیند:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{\epsilon f_{ctm}}} \quad (\text{mm}) \quad (2-4 \text{ ب})$$

$$G_f = G_f k_p \gamma f_{ctm} \quad (2-4 \text{ ج})$$

در این رابطه  $f_{ctm}$  بر حسب (MPa) مقاومت کشش سطحی متوسط بتن است که مطابق آئین نامه (۱۹۹۱) DIN ۱۰۴۸ مشخص می شود،  $G_f$  یک مقدار ثابت است که از آنالیز خطی نتایج حاصله از آزمایش برش دو طرفه و یا آزمایش های مشابه بدست می آید و  $k_p$  یک فاکتور هندسی است که ارتباط بین عرض صفحه پوششی ( $b_p$ , mm) و عرض عضو بتنی ( $b_c$ , mm) را بیان می کند:

$$k_p = \sqrt{1.125 \frac{\gamma - b_p/b_c}{1 + b_p/\epsilon}} \quad (2-4 \text{ د})$$

همچنین با استفاده از آنالیز NLFM، Taljsten در سال ۱۹۹۴ مشابهی را ارائه داد:

$$P_u^* = \sqrt{\frac{\gamma E_p t_p G_f}{1 + \alpha_T}} b_p \quad (2-5 \text{ الف})$$

$$\alpha_T = \frac{E_p t_p}{E_c t_c} \quad (2-5 \text{ ب})$$

در رابطه فوق  $E_c$  و  $t_c$  به ترتیب برابر مدول الاستیسیته و ضخامت عضو بتنی می باشند. Yuan و Wu در سال ۱۹۹۹ و Yuan و همکارانش در سال ۲۰۰۱ مقاومت مرزی بین FRP و بتن را با استفاده از شکست مکانیکی الاستیک خطی (LEFM) و غیر خطی (NLFM) مورد بررسی قرار دادند. مطالعه LEFM آنان (Yuan و Wu در سال ۱۹۹۹) همان نتایج نشان داده

\* نحوه بدست آوردن  $G_f$  در رابطه  $P_u$  قابل دسترسی نبود.

شده در معادله ( ۲-۵ الف ) را تأیید کرد، اما شامل تأثیر عرض ورق و بتن نیز بود. در این مدل مقدار  $\alpha_T$  در رابطه ( ۲-۵ الف ) جای خود را به  $\alpha_Y$  می دهد که برابر است با:

$$\alpha_Y = \frac{b_p E_p t_p}{b_c E_c t_c} \quad (۲-۶)$$

آنها همچنین معادله NLFM را برای پنج حالت مختلف رابطه تنش - کرنش حل کردند که نتایج حاصله در شکل ۱-۲ آورده شده است.

حداکثر ظرفیت باربری در این حالت از رابطه زیر بدست می آید (Yuan و همکارانش ۲۰۰۱):

$$P_u = \frac{\delta_f}{\delta_f - \delta_1} \sin(\lambda_r \alpha) \frac{\tau_f b_p}{\lambda_r} \quad (۲-۷ الف)$$

مقدار  $\alpha$  از حل معادله زیر بدست می آید:

$$\tanh[\lambda_r (L - \alpha)] = \frac{\lambda_r}{\lambda_1} \tan(\lambda_r \alpha)$$

(۲-۷ ب)

در روابط فوق  $\tau_f$  برابر تنش ماکزیمم بر روی منحنی تنش - کرنش می باشد،  $\delta_1$  کرنش مربوط به تنش  $\tau_f$  و  $\delta_1$  برابر کرنش ماکزیمم می باشد.

$\lambda_1$  و  $\lambda_r$  از روابط زیر بدست می آیند.

$$\lambda_1^r = \frac{\tau_f}{\delta_f E_p t_p} (1 + \alpha_y) \quad (۲-۷ ج)$$

$$\lambda_r^r = \frac{\tau_f}{(\delta_f - \delta_1) E_p t_p} (1 + \alpha_y) \quad (۲-۷ د)$$