

بسم الله الرحمن الرحيم



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



شماره: .....  
تاریخ: .....  
پیوست: .....  
FR1EA115

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

اعضای هیات داوران نسخه نهائی پایان نامه خانم / آقای عباس بابری  
تحت عنوان: پایه سستی تریبلی درم تقویت سازه FRP با تقویت بتن مسلح پلاستیک خرد

را از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد پیشنهاد می کنند.

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	فرید عدوی	استاد	
۲- استاد مشاور	-	-	-
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	فرید عدوی	استاد	
۴- استاد ممتحن	وحید رضاملاجاری	-	
۵- استاد ممتحن	کلی کسینیان	-	

فرم شماره ۱۲



پایان نامه کارشناسی ارشد

**آنالیز گسیختگی تیرهای بتن آرمه تقویت شده با FRP، با در نظر گرفتن  
رفتار بتن کششی پس از ترک خوردگی**

ارائه شده به دانشکده مهندسی عمران  
جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

توسط :

عباس باقری

استاد راهنما :

جناب آقای دکتر فرشید علایی

تأیید شده در تاریخ ۱۳۸۴

تقدیم به

پانچواں لاکھ پندرہ ہزار گرامر

و

پندرہ لاکھ پندرہ ہزار گرامر

کہ در عمل سخنهای (تمام) بابا نامہ مرزا باری نمودند

## **قدردانی :**

در ابتدای این پایان نامه لازم می دانم از راهنمایی های جناب آقای دکتر علایی و از زحمات کلیه افرادی که در هدایت و تکمیل این مجموعه مرا راهنمایی کرده اند ، تشکر و قدردانی نموده و کمال موفقیت ایشان را از خداوند متعال خواستارم .

## چکیده :

امروزه در سراسر جهان استفاده از صفحات پلیمری تقویت شده با الیاف (FRP Plates) در جهت مقاوم سازی سازه های بتنی به واسطه مزایای زیاد آن ، رو به پیشرفت بوده و جایگزین صفحات فولادی گردیده است ؛ بدین جهت انجام بررسیها و تحقیقات زیادی برای شناخت هرچه بهتر آن ضروری می باشد . از جمله کاربردهای صفحات FRP ، تقویت خمشی تیرها بوده و با نصب آنها بر روی بستر بتنی تحت کشش به گونه ای که راستای الیافش در جهت طولی تیر قرار گیرد ، باعث افزایش مقاومت خمشی تیر می گردد . برای پیش بینی کامل رفتار تیر تقویت شده در خمش ، از لحظه شروع بارگذاری تا گسیختگی آن ، فعالیت‌های کمی صورت گرفته و در این فعالیتها نیز ، خلاء وجود روابط تئوری نسبتا دقیق و با فرضیاتی نزدیک به واقعیت ، دیده می شود . بعلاوه در این مدلها ، رفتار جداشدگی FRP کنترل نشده است . لذا هدف از این پایان نامه ، برطرف کردن نسبی این خلاء با فرضیاتی نسبتا واقعی و استفاده از رفتار تقریبا واقعی هریک از اجزای تیر که در خمش دخالت می کنند (بتن فشاری ، بتن کششی ، بتن ترک خورده ، آرماتورهای کششی ، آرماتورهای فشاری و صفحات FRP) ، می باشد . همچنین جهت کنترل پدیده جداشدگی ، با توجه به مدل‌های ارائه شده و نتایج نمونه های مختلف ، مناسبترین مدلها برای جداشدگی در انتهای صفحه FRP و جداشدن پوشش بتنی که رایجترین انواع جداشدگی نیز می باشند ، انتخاب شده و در کنار مدل پیشنهادی قرار گرفته اند و نهایتا مدل نسبتا کاملی در جهت بررسی رفتار خمشی تیرهای تقویت شده با FRP ارائه شده است . در جهت بررسی صحت عملکرد مدل پیشنهادی ، نتایج آن با نتایج بیست آزمایش مختلف که از مراجع گوناگون استخراج شده ، کنترل گردیده که نتیجه آن بسیار مطلوب بوده است .

**کلمات کلیدی :** پلیمرهای تقویت شده با الیاف (FRP) ، تیرهای بتن آرمه ، جداشدگی ، گسیختگی

، مقاوم سازی خمشی ، مقاومت ترک .

## فهرست مطالب

۱	فصل اول : مقدمه
۴	فصل دوم : معرفی مواد FRP ، خصوصیات و انواع کاربردهای آن
۴	۱-۲ : مقدمه
۵	۲-۲ : معرفی مواد FRP و اجزای آن
۷	۳-۲ : خصوصیات و رفتار مواد FRP
۷	۱-۳-۲ : خصوصیات فیزیکی سیستمهای مختلف رایج FRP
۷	۱-۱-۳-۲ : چگالی
۷	۲-۱-۳-۲ : ضریب انبساط حرارتی
۸	۲-۳-۲ : خصوصیات مکانیکی
۸	۳-۳-۲ : رفتار سیستم FRP نسبت به زمان
۱۱	۴-۲ : انواع سیستمهای FRP
۱۱	۵-۲ : نحوه مقاوم سازی خمشی سازه های بتنی به کمک مواد FRP
۱۶	فصل سوم : معرفی آیین نامه های طراحی در مقاوم سازی خمشی به کمک صفحات FRP
۱۶	۱-۳ : مقدمه
۱۷	۲-۳ : آیین نامه ACI 440
۲۰	۳-۳ : آیین نامه fib Task Group 9.3
۲۲	۴-۳ : آیین نامه Technical Report No. 55 , UK. Concrete Society
۲۴	۵-۳ : آیین نامه ISIS Canada
۲۷	فصل چهارم : مرور کارهای انجام شده
۲۸	۱-۴ : مدل‌های ارائه شده در مورد تحلیل تیرهای تقویت شده با FRP در خمش
۲۸	۱-۱-۴ : مدل اول
۳۶	۲-۱-۴ : مدل دوم
۳۶	۳-۱-۴ : مدل سوم
۳۷	۴-۱-۴ : مدل چهارم
۳۸	۲-۴ : مدل‌های ارائه شده در رابطه با جداسدگی FRP
۳۹	۱-۲-۴ : مدل‌های مربوط به جداسدگی در انتهای FRP
۴۲	۱-۱-۲-۴ : مدل اول کنترل جداسدگی در انتهای FRP
۴۳	۲-۱-۲-۴ : مدل دوم کنترل جداسدگی در انتهای FRP
۴۴	۳-۱-۲-۴ : مدل سوم کنترل جداسدگی در انتهای FRP
۴۵	۴-۱-۲-۴ : مدل چهارم کنترل جداسدگی در انتهای FRP

۴۵	مدل پنجم کنترل جدادگی در انتهای FRP : ۵-۱-۲-۴
۴۶	مدل ششم کنترل جدادگی در انتهای FRP : ۶-۱-۲-۴
۴۷	مدل هفتم کنترل جدادگی در انتهای FRP : ۷-۱-۲-۴
۴۸	۲-۲-۴ : مدل‌های مربوط به جداسدن پوشش بتنی از محل آرماتورهای طولی
۴۹	۱-۲-۲-۴ : مدل اول کنترل جداسدن پوشش بتنی در انتهای FRP
۴۹	۲-۲-۲-۴ : مدل دوم کنترل جداسدن پوشش بتنی در انتهای FRP
۵۳	۳-۴ : نتایج
۵۴	<b>فصل پنجم : معرفی مدل‌های ارائه شده در پایان نامه</b>
۵۴	۱-۵ : مقدمه
۵۴	۱-۱-۵ : مدل‌های مربوط به تحلیل تیرهای تقویت شده در خمش
۵۶	۲-۱-۵ : مدل‌های مربوط به جدادگی
۵۶	۲-۵ : مدل‌های مربوط به تحلیل تیرهای تحت خمش
۶۰	۱-۲-۵ : بتن فشاری
۶۲	۲-۲-۵ : بتن کششی
۶۳	۳-۲-۵ : بتن ترک خورده
۶۶	۱-۳-۲-۵ : مدل <i>fib</i> برای محاسبه عرض ترک
۶۸	۲-۳-۲-۵ : مدل دوم (مدل ساده شده) برای محاسبه عرض ترک
۶۹	۴-۲-۵ : آرماتورهای کششی و فشاری
۷۱	۵-۲-۵ : صفحات FRP
۷۲	۶-۲-۵ : نحوه محاسبه تغییرمکان در وسط دهانه تیر
۷۳	۱-۶-۲-۵ : روش اول محاسبه تغییرمکان
۷۷	۲-۶-۲-۵ : روش دوم محاسبه تغییرمکان
۷۹	۳-۵ : بررسی و مقایسه مدل‌های جدادگی FRP
۸۳	۴-۵ : نحوه کارکرد و ساختار مدل کامپیوتری
۸۶	<b>فصل ششم : مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی</b>
۸۶	۱-۶ : مقدمه
۸۷	۲-۶ : مقایسه نتایج نمونه ها با نتایج مدل
۸۷	۱-۲-۶ : آزمایش اول
۹۱	۲-۲-۶ : آزمایش دوم
۹۴	۳-۲-۶ : آزمایش سوم
۹۷	۴-۲-۶ : آزمایش چهارم
۹۹	۵-۲-۶ : آزمایش پنجم



۱۰۳	۶-۲-۶: آزمایش ششم
۱۰۶	۷-۲-۶: آزمایش هفتم
۱۰۹	۸-۲-۶: آزمایش هشتم
۱۱۲	۹-۲-۶: آزمایش نهم
۱۱۴	۱۰-۲-۶: آزمایش دهم
۱۱۶	۱۱-۲-۶: آزمایش یازدهم
۱۱۹	۱۲-۲-۶: آزمایش دوازدهم
۱۲۳	۱۳-۲-۶: آزمایش سیزدهم
۱۲۹	۱۴-۲-۶: آزمایش چهاردهم
۱۳۳	۱۵-۲-۶: آزمایش پانزدهم
۱۳۸	۱۶-۲-۶: آزمایش شانزدهم
۱۴۲	۱۷-۲-۶: آزمایش هفدهم
۱۴۴	۱۸-۲-۶: آزمایش هجدهم
۱۴۶	۱۹-۲-۶: آزمایش نوزدهم
۱۴۸	۲۰-۲-۶: آزمایش بیستم
۱۵۳	۳-۶: بررسی نتایج
۱۵۳	۱-۳-۶: مقدمه
۱۵۳	۲-۳-۶: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج آزمایشگاهی
۱۶۰	۳-۳-۶: بررسی اثر سخت شدگی فولاد در مدل
۱۶۵	۴-۳-۶: بررسی اثر مقاومت ترک و بتن کششی
۱۶۹	۵-۳-۶: بررسی اثر نوع مدل به کار رفته در محاسبه عرض ترک
۱۷۹	۶-۳-۶: بررسی دو مدل معرفی شده برای محاسبه تغییرمکان تیر
۱۸۱	<b>فصل هفتم: مقایسه نتایج مدل با نتایج آیین نامه ها</b>
۱۸۱	۱-۷: مقدمه
۱۸۲	۲-۷: مقایسه نتایج مدل با نتایج آیین نامه ها
۱۸۹	<b>فصل هشتم: جمع‌بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات</b>
۱۹۴	۱-۸: نتایج
۱۹۷	۲-۸: پیشنهادات
۱۹۸	<b>مراجع</b>
۲۰۳	<b>پیوست - الف: محاسبه تنش برشی و نرمال بین لایه FRP و بتن</b>
۲۱۳	<b>پیوست - ب: نتایج کلیه مدلها برای نمونه های آزمایش دوم تا بیستم</b>
۲۲۹	<b>پیوست - ج: متن اصلی برنامه مدل پیشنهادی تحت نرم افزار MATLAB 6.5.1</b>

## فهرست شکلها

- شکل ۱-۲ : نحوه مقاوم سازی خمشی ۱۲
- شکل ۲-۲ : انواع گسیختگی های رایج در تیر تقویت شده با FRP در خمش (Teng et al. 2001) ۱۴
- شکل ۱-۳ : توزیع تنش و کرنش در مقطع تیر مستطیلی تقویت شده با FRP ۱۹
- شکل ۲-۳ : نحوه توزیع تنش و کرنش در مقطع ۲۱
- شکل ۳-۳ : توزیع تنش و کرنش در مقطع ۲۳
- شکل ۴-۳ : نحوه توزیع تنش و کرنش در مقطع ۲۵
- شکل ۱-۴ : دیاگرام تنش - کرنش بتن فشاری ۲۹
- شکل ۲-۴ : دیاگرام تنش - کرنش فولاد ۲۹
- شکل ۳-۴ : تقسیم بندی دیاگرام نیرو - تغییرمکان برای تیر تقویت شده با FRP تحت بارگذاری سه نقطه ای ۲۹
- شکل ۴-۴ : نحوه تغییرات کرنش و تنش در ارتفاع مقطع (ناحیه اول) ۳۰
- شکل ۵-۴ : نحوه تغییرات کرنش و تنش در ارتفاع مقطع (ناحیه دوم) ۳۲
- شکل ۶-۴ : نحوه تغییرات کرنش و تنش در ارتفاع مقطع (ناحیه سوم) ۳۴
- شکل ۷-۴ : نحوه تغییرات کرنش و تنش در ارتفاع مقطع (ناحیه چهارم) ۳۵
- شکل ۸-۴ : تقسیم بندی دیاگرام نیرو - تغییرمکان برای تیر تقویت شده با FRP ۳۶
- شکل ۹-۴ : نمایش نیروهای برآیند و نحوه تغییرات کرنش در ارتفاع مقطع ۳۷
- شکل ۱۰-۴ : جداسدگی در انتهای FRP ۳۹
- شکل ۱۱-۴ : معیار شکست مور - کولمب ۴۰
- شکل ۱۲-۴ : نمایش دیگر معیار شکست مور - کولمب ۴۱
- شکل ۱۳-۴ : جداسدن پوشش بتنی ۴۸
- شکل ۱۴-۴ : چگونگی بروز جداسدن پوشش بتنی از محل ترکها ۵۰
- شکل ۱۵-۴ : رفتار بتن به صورت دندانه ای بین دو ترک متوالی ایجاد شده بر روی تیر ۵۱
- شکل ۱-۵ : فلوجارت مدل پیشنهادی ۵۹
- شکل ۲-۵ : دیاگرام تنش - کرنش برای بتن تحت فشار تک محوری ۶۰
- شکل ۳-۵ : دیاگرام تنش - کرنش برای بتن تحت کشش تک محوری ۶۲
- شکل ۴-۵ : دیاگرام تنش - عرض ترک برای بتن ترک خورده ۶۴
- شکل ۵-۵ : دیاگرامهای حقیقی تنش - کرنش برای آرماتورهای فولادی ۷۰
- شکل ۶-۵ : دیاگرام ایده ال تنش - کرنش برای آرماتورهای فولادی ۷۱
- شکل ۷-۵ : دیاگرام تنش - کرنش انواع مواد FRP ۷۲
- شکل ۸-۵ : نمایش پارامترها در بارگذاری چهار نقطه ای ۷۳

- شکل ۵-۹: نحوه محاسبه انحناء با داشتن عمق تار خنثی و کرنش تار فشاری ۷۴
- شکل ۵-۱۰: دیاگرام ممان - انحناء برای یک نمونه آزمایشگاهی بدست آمده توسط مدل پیشنهادی ۷۵
- شکل ۵-۱۱: نحوه محاسبه تغییرمکان در وسط تیر با داشتن دیاگرام ممان - انحناء و تغییرات ممان در طول تیر ۷۷
- شکل ۵-۱۲: نحوه تقسیم بندی تیر از لحاظ ترک خوردگی و تسلیم شدگی برای محاسبه تغییرمکان ۷۸
- شکل ۵-۱۳: نحوه وارد کردن داده ها در نرم افزار تحلیل کننده تیر تقویت شده با FRP ۸۴
- شکل ۵-۱۴: خروجی نرم افزار تحلیل کننده تیر تقویت شده با FRP برای یک نمونه ۸۵
- شکل ۶-۱: نحوه تقویت و بارگذاری نمونه ها ۸۸
- شکل ۶-۲: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها ۹۰
- شکل ۶-۳: خصوصیات ابعادی و نحوه بارگذاری نمونه ها ۹۱
- شکل ۶-۴: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها ۹۳
- شکل ۶-۵: نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها ۹۴
- شکل ۶-۶: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها ۹۶
- شکل ۶-۷: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها ۹۸
- شکل ۶-۸: نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها ۹۹
- شکل ۶-۹: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان وسط تیرهای شاهد و Beam2 (مدل پیشنهادی و نتایج تجربی) ۱۰۱
- شکل ۶-۱۰: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان وسط تیرهای شاهد و Beam3 (مدل پیشنهادی و نتایج تجربی) ۱۰۱
- شکل ۶-۱۱: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان وسط تیرهای شاهد و Beam4 (مدل پیشنهادی و نتایج تجربی) ۱۰۲
- شکل ۶-۱۲: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان وسط تیرهای شاهد و Beam5 (مدل پیشنهادی و نتایج تجربی) ۱۰۲
- شکل ۶-۱۳: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای P1 ، CF1 و GF1 ۱۰۵
- شکل ۶-۱۴: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای P3 و CF3 ۱۰۶
- شکل ۶-۱۵: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها ۱۰۸
- شکل ۶-۱۶: نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها ۱۰۹
- شکل ۶-۱۷: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی) ۱۱۱
- شکل ۶-۱۸: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی) ۱۱۳
- شکل ۶-۱۹: نحوه بارگذاری نمونه ها ۱۱۴

- شکل ۶-۲۰: دیاگرام تغییرات ممان نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها  
۱۱۶
- شکل ۶-۲۱: نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها  
۱۱۷
- شکل ۶-۲۲: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها  
۱۱۸
- شکل ۶-۲۳: نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها  
۱۱۹
- شکل ۶-۲۴: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای F0، F1، F2 و F3  
۱۲۱
- شکل ۶-۲۵: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای F0، F4، F5 و F6  
۱۲۲
- شکل ۶-۲۶: نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها در دو سری A و B  
۱۲۳
- شکل ۶-۲۷: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیر A-AT (مدل پیشنهادی)  
۱۲۶ و نتایج عملی)
- شکل ۶-۲۸: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیر A-AK (مدل پیشنهادی)  
۱۲۷ و نتایج عملی)
- شکل ۶-۲۹: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیر C1-A (مدل پیشنهادی)  
۱۲۷ و نتایج عملی)
- شکل ۶-۳۰: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیر B-AT (مدل پیشنهادی)  
۱۲۸ و نتایج عملی)
- شکل ۶-۳۱: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیر B-AK (مدل پیشنهادی)  
۱۲۸ و نتایج عملی)
- شکل ۶-۳۲: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیر B-C1 (مدل پیشنهادی)  
۱۲۹ و نتایج عملی)
- شکل ۶-۳۳: نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها  
۱۳۰
- شکل ۶-۳۴: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیر سری A (مدل پیشنهادی)  
۱۳۲ و نتایج عملی)
- شکل ۶-۳۵: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیر سری B (مدل پیشنهادی)  
۱۳۲ و نتایج عملی)
- شکل ۶-۳۶: نحوه بارگذاری و آرماتوربندی نمونه ها  
۱۳۳
- شکل ۶-۳۷: دیاگرام نرمالایز شده تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای شاهد  
۱۳۷ و A3
- شکل ۶-۳۸: دیاگرام نرمالایز شده تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای شاهد  
۱۳۷ و B2
- شکل ۶-۳۹: دیاگرام نرمالایز شده تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای شاهد  
۱۳۸ و C3
- شکل ۶-۴۰: نحوه تقویت و آرماتوربندی نمونه ها  
۱۳۹

- شکل ۶-۴۱: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای R2C و R2O ۱۴۱
- شکل ۶-۴۲: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای R3C و R3O ۱۴۱
- شکل ۶-۴۳: نحوه بارگذاری، آرماتوربندی و تقویت نمونه ها ۱۴۲
- شکل ۶-۴۴: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی) ۱۴۳
- شکل ۶-۴۵: نحوه آرماتوربندی و بارگذاری نمونه ها ۱۴۴
- شکل ۶-۴۶: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها ۱۴۵
- شکل ۶-۴۷: نحوه آرماتوربندی و بارگذاری نمونه ها ۱۴۶
- شکل ۶-۴۸: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها ۱۴۸
- شکل ۶-۴۹: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان تیر A4 (مقایسه مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی) ۱۵۱
- شکل ۶-۵۰: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان تیر A5 (مقایسه مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی) ۱۵۱
- شکل ۶-۵۱: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان تیر B2 (مقایسه مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی) ۱۵۲
- شکل ۶-۵۲: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان تیر B3 (مقایسه مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی) ۱۵۲
- شکل ۶-۵۳: مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی برای نیروی معادل شروع ترک خوردگی ۱۵۸
- شکل ۶-۵۴: مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی برای نیروی معادل تسلیم شدگی فولاد ۱۵۸
- شکل ۶-۵۵: مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی برای نیروی نهایی بدون کنترل جداشدگی ۱۵۹
- شکل ۶-۵۶: مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی برای نیروی نهایی همراه با کنترل جداشدگی ۱۵۹
- شکل ۶-۵۷: بررسی اثر سخت شدگی فولاد در نتایج مدل برای یک نمونه شاهد ۱۶۴
- شکل ۶-۵۸: بررسی اثر سخت شدگی فولاد در نتایج مدل برای یک نمونه تقویت شده ۱۶۴
- شکل ۶-۵۹: بررسی اثر مقاومت ترک و بتن کششی در نتایج مدل برای یک نمونه شاهد ۱۶۸
- شکل ۶-۶۰: بررسی اثر مقاومت ترک و بتن کششی در نتایج مدل برای یک نمونه تقویت شده ۱۶۹
- شکل ۶-۶۱: بررسی اثر نوع مدل در محاسبه عرض ترک برای یک نمونه شاهد ۱۷۲
- شکل ۶-۶۲: بررسی اثر نوع مدل در محاسبه عرض ترک برای یک نمونه تقویت شده ۱۷۳
- شکل ۶-۶۳: بررسی اثر نوع مدل در محاسبه عرض ترک برای یک نمونه تقویت شده ۱۷۳
- شکل ۶-۶۴: دیاگرام نیرو - عرض ترک بدست آمده از مدلها برای نمونه F-N و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی ۱۷۴
- شکل ۶-۶۵: دیاگرام نیرو - عرض ترک بدست آمده از مدلها برای نمونه HT-F و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی ۱۷۴

- شکل ۶-۶۶: دیاگرام نیرو - عرض ترک بدست آمده از مدلها برای نمونه HM-F و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی  
۱۷۵
- شکل ۶-۶۷: بررسی اثر نوع مدل در محاسبه عرض ترک برای یک نمونه شاهد و مقایسه مدلها با نتایج آزمایشگاهی  
۱۷۵
- شکل ۶-۶۸: بررسی اثر نوع مدل در محاسبه عرض ترک برای یک نمونه تقویت شده و مقایسه آنها با نتایج تجربی  
۱۷۶
- شکل ۶-۶۹: دیاگرام نیرو - عرض ترک بدست آمده از مدلها برای نمونه SP1 و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی  
۱۷۶
- شکل ۶-۷۰: دیاگرام نیرو - عرض ترک بدست آمده از مدلها برای نمونه SP2 و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی  
۱۷۷
- شکل ۶-۷۱: مقایسه دو روش استفاده شده برای محاسبه تغییرمکان وسط دهانه تیر برای یک نمونه شاهد  
۱۷۹
- شکل ۶-۷۲: مقایسه دو روش استفاده شده برای محاسبه تغییرمکان تیر برای یک نمونه تقویت شده  
۱۸۰
- شکل ۷-۱: نتایج مدل برای کلیه نمونه ها  
۱۸۶
- شکل ۷-۲: نتایج آیین نامه ACI 440 2R.02 برای کلیه نمونه ها  
۱۸۷
- شکل ۷-۳: نتایج آیین نامه UK Technical Report No.55 (BS) برای کلیه نمونه ها  
۱۸۷
- شکل ۷-۴: نتایج آیین نامه *fib* Bulletin 14 (2001) برای کلیه نمونه ها  
۱۸۸
- شکل ۷-۵: نتایج آیین نامه ISIS Canada (2001) برای کلیه نمونه ها  
۱۸۸

## فهرست جداول

۹	جدول ۱-۲ : خصوصیات رزینها
۱۰	جدول ۲-۲ : خصوصیات الیاف
۱۰	جدول ۳-۲ : خصوصیات عمومی سیستمهای FRP رایج
۶۵	جدول ۱-۵ : مقادیر انرژی شکست پایه براساس ماکزیمم قطر سنگدانه ها
۶۵	جدول ۲-۵ : مقادیر ضریب $\alpha_F$ براساس ماکزیمم قطر سنگدانه ها
۸۰	جدول ۳-۵ : مقایسه مدل‌های پیش بینی کننده نیروی جداشدگی در انتهای لایه FRP
۸۲	جدول ۴-۵ : مقایسه مدل‌های پیش بینی کننده نیروی جداشدگی ناشی از جداشدن پوشش بتنی
۸۸	جدول ۱-۶ : خصوصیات نمونه ها
۸۹	جدول ۲-۶ : نتایج مدلها
۸۹	جدول ۳-۶ : نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
۹۱	جدول ۴-۶ : خصوصیات نمونه ها
۹۲	جدول ۵-۶ : نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
۹۲	جدول ۶-۶ : نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
۹۵	جدول ۷-۶ : خصوصیات نمونه ها
۹۵	جدول ۸-۶ : نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
۹۶	جدول ۹-۶ : نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
۹۷	جدول ۱۰-۶ : خصوصیات نمونه ها
۹۸	جدول ۱۱-۶ : نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
۹۸	جدول ۱۲-۶ : نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
۹۹	جدول ۱۳-۶ : خصوصیات نمونه ها
۱۰۰	جدول ۱۴-۶ : نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
۱۰۰	جدول ۱۵-۶ : نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
۱۰۳	جدول ۱۶-۶ : خصوصیات نمونه ها
۱۰۴	جدول ۱۷-۶ : نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
۱۰۵	جدول ۱۸-۶ : نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
۱۰۷	جدول ۱۹-۶ : خصوصیات نمونه ها
۱۰۷	جدول ۲۰-۶ : نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
۱۰۸	جدول ۲۱-۶ : نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
۱۰۹	جدول ۲۲-۶ : خصوصیات نمونه ها
۱۱۰	جدول ۲۳-۶ : نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

- ۱۱۰ جدول ۶-۲۴: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
- ۱۱۲ جدول ۶-۲۵: خصوصیات نمونه‌ها
- ۱۱۳ جدول ۶-۲۶: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
- ۱۱۳ جدول ۶-۲۷: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
- ۱۱۴ جدول ۶-۲۸: خصوصیات نمونه‌ها
- ۱۱۵ جدول ۶-۲۹: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
- ۱۱۵ جدول ۶-۳۰: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
- ۱۱۷ جدول ۶-۳۱: خصوصیات نمونه‌ها
- ۱۱۷ جدول ۶-۳۲: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
- ۱۱۸ جدول ۶-۳۳: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
- ۱۱۹ جدول ۶-۳۴: خصوصیات نمونه‌ها
- ۱۲۰ جدول ۶-۳۵: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
- ۱۲۰ جدول ۶-۳۶: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
- ۱۲۳ جدول ۶-۳۷: خصوصیات نمونه‌های سری A
- ۱۲۴ جدول ۶-۳۸: خصوصیات نمونه‌های سری B
- ۱۲۴ جدول ۶-۳۹: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک (نمونه‌های سری A)
- ۱۲۵ جدول ۶-۴۰: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی (نمونه‌های سری A)
- ۱۲۵ جدول ۶-۴۱: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک (نمونه‌های سری B)
- ۱۲۶ جدول ۶-۴۲: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی (نمونه‌های سری B)
- ۱۳۰ جدول ۶-۴۳: خصوصیات نمونه‌ها
- ۱۳۱ جدول ۶-۴۴: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
- ۱۳۱ جدول ۶-۴۵: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
- ۱۳۴ جدول ۶-۴۶: خصوصیات نمونه‌های سری A و B
- ۱۳۴ جدول ۶-۴۷: خصوصیات نمونه‌های سری C و D
- جدول ۶-۴۸: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک  
(نمونه‌های سری A و B)
- ۱۳۵
- ۱۳۵ جدول ۶-۴۹: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی (نمونه‌های سری A و B)
- جدول ۶-۵۰: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک  
(نمونه‌های سری C و D)
- ۱۳۶
- ۱۳۶ جدول ۶-۵۱: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی (نمونه‌های سری C و D)
- ۱۳۹ جدول ۶-۵۲: خصوصیات نمونه‌ها
- ۱۴۰ جدول ۶-۵۳: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک



- ۱۴۰ جدول ۶-۵۴: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
- ۱۴۲ جدول ۶-۵۵: خصوصیات نمونه‌ها
- ۱۴۳ جدول ۶-۵۶: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
- ۱۴۳ جدول ۶-۵۷: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
- ۱۴۴ جدول ۶-۵۸: خصوصیات نمونه‌ها
- ۱۴۵ جدول ۶-۵۹: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
- ۱۴۵ جدول ۶-۶۰: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
- ۱۴۶ جدول ۶-۶۱: خصوصیات نمونه‌ها
- ۱۴۷ جدول ۶-۶۲: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک
- ۱۴۷ جدول ۶-۶۳: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
- ۱۴۹ جدول ۶-۶۴: خصوصیات نمونه‌ها
- ۱۴۹ جدول ۶-۶۵: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک (نمونه‌های سری A)
- ۱۵۰ جدول ۶-۶۶: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک (نمونه‌های سری B)
- ۱۵۰ جدول ۶-۶۷: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی
- ۱۵۴ جدول ۶-۶۸: بررسی نتایج مدل اصلی برای نمونه‌های شاهد (دسته اول)
- جدول ۶-۶۹: بررسی نتایج مدل اصلی برای نمونه‌هایی که مود گسیختگی آنها پارگی FRP و یا خردشدگی بتن فشاری باشد (دسته دوم)
- ۱۵۵ جدول ۶-۷۰: بررسی نتایج مدل اصلی برای نمونه‌هایی که مود گسیختگی آنها جداشدگی در انتهای FRP و یا جداشدن پوشش بتنی باشد (دسته سوم)
- ۱۵۶ جدول ۶-۷۱: بررسی نتایج مدل اصلی برای کلیه نمونه‌ها
- جدول ۶-۷۲: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدلی که در آن سخت‌شدگی فولاد در نظر گرفته نمی‌شود برای نمونه‌های شاهد (دسته اول)
- ۱۶۱ جدول ۶-۷۳: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدلی که در آن سخت‌شدگی فولاد در نظر گرفته نمی‌شود برای نمونه‌هایی که مود گسیختگی آنها پارگی FRP و یا خردشدگی بتن فشاری باشد (دسته دوم)
- جدول ۶-۷۴: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدلی که در آن سخت‌شدگی فولاد در نظر گرفته نمی‌شود برای نمونه‌هایی که مود گسیختگی آنها جداشدگی در انتهای FRP و یا جداشدن پوشش بتنی باشد (دسته سوم)
- ۱۶۲ جدول ۶-۷۵: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدلی که در آن سخت‌شدگی فولاد در نظر گرفته نمی‌شود برای کلیه نمونه‌ها
- ۱۶۲ جدول ۶-۷۶: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدل‌هایی که در آن مقاومت ترک و بتن کششی در نظر گرفته نمی‌شود برای نمونه‌های شاهد (دسته اول)
- ۱۶۵

- جدول ۶-۷۷: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدل‌هایی که در آن مقاومت ترک و بتن کششی در نظر گرفته نمی‌شود برای نمونه‌هایی که مود گسیختگی آنها پارگی FRP و یا خردشدگی بتن فشاری باشد (دسته دوم) ۱۶۷
- جدول ۶-۷۸: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدل‌هایی که در آن مقاومت ترک و بتن کششی در نظر گرفته نمی‌شود برای نمونه‌هایی که مود گسیختگی آنها جداشدگی در انتهای FRP و یا جداشدن پوشش بتنی باشد (دسته سوم) ۱۶۷
- جدول ۶-۷۹: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدل‌هایی که در آن مقاومت ترک و بتن کششی در نظر گرفته نمی‌شود برای کلیه نمونه‌ها ۱۶۸
- جدول ۶-۸۰: مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک برای نمونه‌های شاهد (دسته اول) ۱۷۰
- جدول ۶-۸۱: مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک برای نمونه‌هایی که مود گسیختگی آنها پارگی FRP و یا خردشدگی بتن فشاری باشد (دسته دوم) ۱۷۱
- جدول ۶-۸۲: مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک برای نمونه‌هایی که مود گسیختگی آنها جداشدگی در انتهای FRP و یا جداشدن پوشش بتنی باشد (دسته سوم) ۱۷۱
- جدول ۶-۸۳: مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک برای کلیه نمونه‌ها ۱۷۲
- جدول ۷-۱: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی حاکم برای نمونه‌های سری اول (آزمایش نهم) ۱۸۲
- جدول ۷-۲: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه‌های سری دوم (آزمایش دوازدهم) ۱۸۲
- جدول ۷-۳: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه‌های سری سوم (آزمایش سیزدهم) ۱۸۳
- جدول ۷-۴: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه‌های سری چهارم (آزمایش چهاردهم) ۱۸۳
- جدول ۷-۵: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه‌های سری پنجم (آزمایش پانزدهم) ۱۸۳
- جدول ۷-۶: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه‌های سری ششم (آزمایش شانزدهم) ۱۸۳
- جدول ۷-۷: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه‌های سری هفتم (آزمایش هفدهم) ۱۸۴
- جدول ۷-۸: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه‌های سری هشتم (آزمایش بیستم) ۱۸۴
- جدول ۷-۹: مقایسه نتایج مدل و آیین نامه‌ها ۱۸۵

## فهرست علائم و نشانه ها

سطح مؤثر کششی	=	$A_{c,eff}$
مساحت بتن کششی	=	$A_e$
سطح مقطع FRP	=	$A_f$
سطح مقطع آرماتورهای فولادی کششی	=	$A_s$
سطح مقطع آرماتورهای فولادی کششی	=	$A_{s1}$
سطح مقطع آرماتورهای فشاری	=	$A_{s2}$
سطح مقطع آرماتورهای فولادی فشاری	=	$A'_s$
عرض سطح مقطع مستطیلی	=	$b$
عرض چسب	=	$b_a$
عرض صفحه FRP	=	$b_f$
عرض جان مقطع مستطیلی	=	$b_w$
چسبندگی یا	=	$C$
نیروی ناشی از بتن فشاری		
عمق تارخشی از تار فشاری	=	$c$
عمق آرماتورهای طولی کششی از تار فشاری	=	$d$
فاصله مرکز فولاد فشاری تا دورترین تار فشاری	=	$d_z$
عمق آرماتورهای فشاری از تار فشاری	=	$d'$
ماکزیمم قطر سنگدانه ها	=	$d_{max}$
مدول الاستیسیته چسب	=	$E_a$
مدول الاستیسیته بتن	=	$E_c$
مدول سکانت بتن	=	$E_{c1}$
مدول تانژانت بتن	=	$E_{ci}$
مدول الاستیسیته کششی FRP	=	$E_f$
مدول الاستیسیته کششی FRP	=	$E_{fd}$
مدول الاستیسیته نهایی FRP	=	$E_{fu}$
مدول الاستیسیته بتونه	=	$E_m$
مدول الاستیسیته فولاد	=	$E_s$
مدول الاستیسیته فولاد بعد از تسلیم شدگی	=	$E_{s2}$
مدول الاستیسیته فولاد بعد از تسلیم شدگی	=	$E_t$
تنش فشاری بتن	=	$f_c$

مقاومت مشخصه فشاری بتن	=	$f_c^*$
مقدار طراحی مقاومت فشاری بتن	=	$f_{cd}$
مقاومت کششی بتن	=	$f_{ct}$
مقاومت کششی بتن	=	$f_{ctm}$
مقاومت مشخصه فشاری مکعبی بتن	=	$f_{cu}$
مقدار تنش در تقویت کننده های FRP	=	$f_f$
مقاومت کششی نهایی طراحی FRP	=	$f_{fu}$
تنش در آرماتورهای فولادی کششی	=	$f_s$
تنش در آرماتورهای فولادی فشاری	=	$f_s^*$
تنش کششی نهایی آرماتورهای فولادی	=	$f_t$
مقاومت مشخصه تسلیم آرماتورهای فولادی کششی	=	$f_y$
مقاومت مشخصه تسلیم آرماتورهای فولادی فشاری	=	$f_y^*$
مقدار طراحی مقاومت تسلیم فولاد	=	$f_{yd}$
مدول برشی چسب	=	$G_a$
انرژی شکست	=	$G_F$
انرژی شکست پایه	=	$G_{F0}$
عمق کلی مقطع	=	$h$
نصف ارتفاع بتن کششی	=	$h_l$
ضخامت پوشش بتنی آرماتورها	=	$h'$
عمق تیر از تار فشاری تا مرکز ضخامت FRP	=	$h_f$
عمق بتونه اپوکسی	=	$h_m$
عمق مؤثر بتن	=	$h_{ref}$
ممان اینرسی بتن	=	$I_c$
ممان اینرسی FRP	=	$I_f$
ممان اینرسی مقطع معادل ترک خورده بتنی	=	$I_{trc}$
ممان اینرسی مقطع معادل نسبت به FRP	=	$I_{trf}$
سختی نرمال چسب	=	$k_n$
سختی برشی چسب	=	$k_s$
کل طول تیر	=	$L$
فاصله تکیه گاه تا نزدیکترین بار متمرکز	=	$L_a$
طول مؤثر	=	$L_{eff}$
فاصله بار تا انتهای لایه FRP	=	$L_f$

طول ناحیه غیر ترک خورده	=	$L_g$
طول از تیر که بعد از آن آرماتورهای فولادی تسلیم می شوند	=	$L_y$
حداقل فاصله ترکها	=	$L_{min}^p$
حداکثر فاصله ترکها	=	$L_{max}^p$
مقدار فشردگی در بالاترین تار فشاری	=	$l$
ظرفیت ممان تیر موجود ، یا	=	$M_o$
ممان وارده ناشی از بارهای خارجی در انتهای FRP	=	$M_{add}$
ظرفیت ممان اضافی لازم	=	$M_{cr}$
ممان ترک خوردگی	=	$M_n$
مقاومت ممان اسمی	=	$M_r$
ممان مقاوم طراحی مقطع تقویت شده	=	$M_{Rd}$
ممان مقاوم طراحی	=	$M_u$
ممان نهایی مقطع	=	$n$
تعداد لایه های FRP	=	$S$
سطح زیر نمودار انحناء	=	$S_{lm}$
مقدار لغزش بین لایه FRP و بتن در $\tau_{lm}$	=	$S_{rm}$
فاصله متوسط ترکها	=	$T_{k,max}$
نیروی نهایی گسیختگی اتصال	=	$t_a$
عرض چسب	=	$t_f$
ضخامت اسمی یک لایه از تقویت کننده FRP	=	$u$
متوسط تنش اتصال بین آرماتورها و بتن	=	$u_f$
محیط اتصال FRP	=	$u_s$
محیط اتصال فولاد	=	$V_o$
برش وارده ناشی از بارهای خارجی در انتهای FRP	=	$V_c$
برش موجود در بتن	=	$V_f$
برش موجود در FRP	=	$w$
عرض ترک	=	$w''$
انحناء	=	$X$
فاصله مرکز هندسی سطح زیر منحنی انحناء بین دو نقطه	=	$x$
عمق ناحیه فشاری	=	$Z$
بازوی لنگر بین نیروی کششی نهایی و نیروی فشاری	=	

تنش محوری حد جداشدن پوشش بتنی در صفحه FRP	=	$\sigma_{f,lim}$
تنش نرمال بین لایه FRP و بتن	=	$\sigma_n$
تنش نرمال بین لایه FRP و بتن	=	$\sigma_y$
تنش برشی بین لایه FRP و بتن	=	$\tau$
تنش برشی حد جداشدن پوشش بتنی در صفحه FRP	=	$\tau_{f,lim}$
تنش متوسط اتصال FRP	=	$\tau_{fm}$
تنش برشی ماکزیمم بین لایه FRP و بتن در کشش خالص	=	$\tau_{lm}$
تنش متوسط اتصال آرماتورهای فولادی	=	$\tau_{sm}$
ضریب ترکیب بار، یا	=	$\psi$
ضریب سطح بلوک تنشی		
ضریب کاهش مقاومت FRP	=	$\psi_f$
ضریب سختی کششی	=	$\zeta$

♦ صفحات مسطح عمود بر محور تیر بعد از بارگذاری مسطح باقی می ماند (فرضیه برنولی). از این فرضیه می توان نتیجه گرفت که تغییرات کرنش در ارتفاع مقطع به صورت خطی است.

♦ اتصال بین FRP و بتن کامل فرض شده و از لغزش بین این دو صرفنظر می شود. از این فرضیه نیز این مطلب استنباط می شود که تغییرات کرنش در ضخامت چسب به صورت خطی تغییر کرده و بدلیل ضخامت کم آن، می توان کرنش در FRP را با کرنش در بستر بتنی برابر دانست.

در مدل ارائه شده با فرض رفتار نسبتاً حقیقی برای بتن فشاری، کششی و بتن ترک خورده در یک تیر بتن آرمه مستطیلی و همچنین در نظر گرفتن رفتار دوخطی برای فولاد و با داشتن خصوصیات FRP، ممان مقطع محاسبه شده و نهایتاً دیاگرام نیرو - تغییرمکان تیر رسم می گردد.

در مدل پیشنهادی، برای وارد کردن اثر مقاومت ترک، ابتدا مقدار بازشدگی آن در انتهای ترک براساس مدل‌های معرفی شده در بخش پنج که وابسته به کرنش در تار کششی بتن هستند، محاسبه شده و سپس با فرض تغییرات خطی آن، مقدار بازشدگی ترک در عمق مقطع محاسبه می گردد.

لازم به ذکر است که جهت تحلیل رفتار تیر از شروع بارگذاری تا انتها، کرنش در بالاترین تار فشاری بتن از مقدار 0 تا 0.0035 به تدریج افزایش یافته و برای هر مقدار کرنش در تار فشاری، با فرض تغییرات خطی کرنش در ارتفاع مقطع، کرنش و نهایتاً تنش و نیروی مقاوم در دیگر اجزاء تیر محاسبه می گردد.

نکته دیگر در رابطه با مدل آنستکه چون تیرهای تقویت شده با FRP، عموماً قبل از اینکه تنش در FRP به مقدار نهایی اش برسد، دچار جداشدگی می شوند؛ لازم است اثر این پدیده برای نزدیکتر شدن نتایج مدل به نتایج عملی لحاظ گردد. در این رابطه با توجه به اینکه جداشدگی در انتهای لایه

FRP و جداشدن پوشش بتنی از شایعترین انواع جداشدگی می باشند ، از دو مدل ارائه شده در فصل پنجم استفاده می گردد تا بتوان مدل نسبتا کاملی در پیش بینی رفتار تیرهای بتنی تقویت شده با FRP به صورت خمشی ارائه نمود .

این پایان نامه مشتمل بر ۸ فصل می باشد . در فصل دوم سیستمهای FRP ، معرفی شده و کاربردهای مختلف آنها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است . در فصل سوم با معرفی چهار آیین نامه و دستورالعمل طراحی ، روابط مربوط به مقاوم سازی خمشی آنها در جهت استفاده در فصل هفتم به طور خلاصه اشاره گردیده است . در فصل چهارم به مرور مدل‌های ارائه شده در زمینه تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه می پردازد . در این فصل علاوه بر معرفی مدل‌های تئوری مربوط به تحلیل خمشی تیرها به معرفی مدل‌های ارائه شده در جهت مدلسازی اثر جداشدگی FRP در تقویت خمشی می پردازد . در فصل پنجم که مهمترین بخش پایان نامه را تشکیل می دهد ، مدل پیشنهادی برای گسیختگی تیرهای تقویت شده با FRP به طور کامل ارائه شده و مورد بررسی قرار می گیرد . در فصل ششم نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی استخراج شده از مراجع و مقالات مختلف ، مقایسه شده و بررسیهای لازمه انجام می شود . در فصل هفتم نتایج آیین نامه های طراحی با نتایج مدل مقایسه شده و مورد ارزیابی قرار می گیرد . در نهایت نتایج و پیشنهادات در فصل آخر جمعبندی شده و بعد از ارائه مراجع و متن اصلی مدل کامپیوتری و حل دقیق محاسبه تنشهای بین لایه FRP و بتن و همچنین تعدادی از جداول نتایج ، در پیوست ، مبحث پایان نامه به انتها می رسد .



## فصل دوم : معرفی مواد FRP ، خصوصیات و انواع کاربردهای آن

### ۱-۲ : مقدمه

در این فصل بعد از معرفی مواد FRP و انواع آن ، خصوصیات آن به طور کلی مورد بحث و بررسی قرار گرفته و نحوه مقاوم سازی سازه های بتنی از جنبه های مختلف خصوصا تقویت خمشی تیرها اشاره گردیده است . به طور مجمل می توان گفت که مواد FRP به شکلهای مختلف صفحه ، میلگرد ، تاندون و انواع دیگر پروفیلها موجود می باشند که البته دو نوع اول آن استفاده بیشتری در صنعت ساختمان داشته و نسبت به دیگر اشکال رایجتر می باشند . صفحات FRP که در تقویت خمشی سازه های موجود استفاده می شوند شامل دو بخش اصلی الیاف و رزین می باشند . الیافهای رایج خود به سه دسته کربن ، شیشه و آرامید تقسیم می گردند . در سیستمهای FRP ، الیاف نقش اصلی باربری را بازی کرده و حال آنکه رزینها با احاطه کردن کامل الیاف نقش انتقال دهنده تنش برشی بین الیاف با یکدیگر و همچنین بین الیاف و بتن را بازی می کنند . مواد FRP به واسطه مقاومت کششی بسیار بالایی که دارند می توانند با قرار گرفتن راستای الیافشان در جهت کشش اعمال شده بر تیر ، مقاومت خمشی آن عضو را بالا ببرند . نحوه مقاوم سازی خمشی و دیگر اطلاعات در جهت شناخت بهتر مواد FRP به صورت کاملتر در بخشهای آتی این فصل ارائه گردیده است .

## ۲-۲: معرفی مواد FRP و اجزای آن

صفحات پلیمری تقویت شده با الیاف<sup>۱</sup>، جزء مواد کامپوزیت بوده که از دو بخش اصلی الیاف و رزین تشکیل می شوند. این مواد در حدود نیم قرن است که در صنایع فضایی کاربرد داشته و از سال ۱۹۹۰ میلادی وارد ساختمان گردیدند. افزایش سریع کاربرد این مواد و جایگزینی آن به جای مواد قدیمی مانند صفحات فولادی ناشی از وجود مزایای زیاد آنها نسبت به مواد رایج قدیمی می باشد. از جمله مزایای اصلی مواد FRP را می توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- ◆ دارای نسبت مقاومت کششی به وزن بسیار بالاتری در مقایسه با فولاد هستند.
- ◆ در برابر خوردگی مقاومند.
- ◆ با توجه به گوناگونی اجزاء تشکیل دهنده، این مواد قابلیت تنوع بسیار زیادی در جهت ارضای نیازهای لازم از جنبه های مختلف دارند.
- ◆ با توجه به سبکی این مواد، حمل و نصب آنها بسیار آسانتر از صفحات فولادی است.
- ◆ بدلیل مقاومت آنها در برابر خوردگی، هزینه نگهداری اندکی چه در انبار و چه بعد از نصب دارند.

اما به هر حال این مواد بی عیب نبوده و در بعضی موارد هنوز صلاح در استفاده از صفحات فولادی می باشد. از جمله معایب قابل ذکر می توان گفت:

- قیمت این مواد بسیار بالاتر از فولاد می باشد.
- این مواد در برابر حرارت های بالا خصوصا در آتش سوزیها دچار مشکل شده و کاربری خود را از دست می دهند.

---

<sup>۱</sup> Fiber Reinforced Polymer

- میزان اطمینان به این مواد در مقایسه با مواد قدیمی (فولاد و بتن) ، با توجه به تنوع آنها و عدم مطالعات و تحقیقات کافی ، کمتر می باشد .
- وجود رفتار خطی و الاستیک این مواد تا لحظه گسیختگی موجب کاهش شکل پذیری در مقاوم سازی های خمشی و بروز گسیختگی های ترد می شود .

همانطور که گفته شد ، دو جزء اصلی صفحات FRP عبارتند از الیاف و رزین . الیافهای رایج استفاده شده در مقاوم سازی سازه ها شامل الیاف کربن (CFRP) ، شیشه (GFRP) و آرامید (AFRP) می باشند . رزینها نیز که یک نوع ماده پلیمری هستند با احاطه کردن الیاف ، انتقال دهنده تنش برشی بین الیاف و بستر می باشند . الیاف FRP در نوع معمولی به صورت موازی با هم در یک راستا قرار می گیرند . در بعضی موارد خصوصا در حالاتی که نیاز به مقاوم سازی برشی است ، راستای الیاف با هم می توانند بیشتر از یک جهت بوده که عموما با زاویه ای ۹۰ درجه نسبت به هم قرار دارند چراکه مواد FRP در راستای عمود بر الیافشان تنها در حد مقاومت رزین تحمل دارند و دیگر الیاف نقشی نخواهد داشت . نحوه ترکیب الیاف در راستاهای مختلف عموما به صورت بافت الیاف به شکل تار و پود می باشد . در بعضی موارد در یک سیستم FRP از چندین نوع الیاف استفاده می شود که می توان از آن به عنوان FRP های هیبرید نام برد . این نوع FRP ها که به تازگی شروع به رشد نموده اند ، با توجه به تفاوت در خصوصیات الیافشان نسبت به هم و نحوه ترکیب آنها ، تنوع بسیار بیشتری را در صنعت این ماده باعث شده و دانشمندان توانسته اند امروزه با یافتن ترکیب مناسبی از الیاف ، مشکل عدم وجود ناحیه تسلیم شدگی در مواد FRP را که یکی از معایب اصلی آن می باشد ، تا حدودی برطرف نمایند .

جزء دیگر مواد FRP یعنی رزینها ، خود به پنج بخش مختلف شامل آسترها ، بتونه های پرکننده ، رزینهای آغشته کننده ، چسبها و پوششهای محافظ تقسیم می شوند . نقش آسترها نفوذ در سطح

بتنی و ایجاد یک سطح چسبنده بهینه می باشد. نقش بتونه های پرکننده همانطور که از نام آن روشن است، پرکردن حفره های خالی کوچک در بستر به جهت جلوگیری از تشکیل حباب هوا در زیر FRP می باشد. رزینهای آغشته کننده جهت آغشته کردن و اشباع کردن الیاف استفاده می شوند، آنها را در جای خود ثابت نموده و یک مسیر بار برشی جهت انتقال بار مؤثر بین الیاف فراهم می نمایند. کار چسبها، چسباندن لایه های FRP پیش ساخته شده به بستر بتنی و یا دیگر لایه های FRP می باشد و نقش پوشش محافظ نیز محافظت از لایه های FRP در برابر آسیبهای محیطی است (ACI 440.2R 2002)،

## ۳-۲: خصوصیات و رفتار مواد FRP

### ۳-۲-۱: خصوصیات فیزیکی سیستمهای مختلف رایج FRP

#### ۳-۲-۱-۱: چگالی

چگالی مواد FRP رایج بین 1.2 تا 2.1 گرم بر سانتیمتر مکعب می باشد که حدود 4 تا 6 برابر کمتر از چگالی فولاد است. ترتیب چگالی FRP ها به گونه ای است که  $GFRP > CFRP > AFRP$  است (ACI 440.2R 2002).

#### ۳-۲-۱-۲: ضریب انبساط حرارتی

ضریب انبساط حرارتی مواد FRP تک جهتی در راستای عمود بر الیاف با مقدار آن در امتداد الیاف متفاوت بوده و بستگی به الیاف و نوع رزین استفاده شده دارد. FRPها دارای ضریب انبساط عرضی به ترتیب  $AFRP > CFRP > GFRP$  بوده در حالیکه ضریب انبساط طولی آنها دقیقاً برعکس

می باشد . این در حالی است که ضریب انبساط طولی CFRP و AFRP منفی است ؛ یعنی آنکه با افزایش درجه حرارت ، منقبض می شوند (ACI 440 .2R 2002) .

### ۳-۳-۲ : خصوصیات مکانیکی

رفتار کششی مواد FRP که یکی از مهمترین خصوصیات آن است ، بستگی به نوع الیاف ، نحوه قرارگیری آنها و مقدار الیاف داشته و در مواردی که از یک نوع الیاف تشکیل شده باشد تا لحظه شکست به صورت رابطه الاستیک خطی بین تنش - کرنش می باشد .

مقاومت فشاری این مواد از 55 ، 78 و 20 درصد مقاومت کششی برای به ترتیب CFRP ، GFRP و AFRP گزارش شده است . همچنین مدول الاستیسیته فشاری برای GFRP حدودا 80 درصد ، CFRP حدودا 85 درصد و AFRP تقریبا 100 درصد مدول الاستیسیته کششی آن است (ACI 440 .2R 2002) .

### ۳-۳-۲ : رفتار سیستم FRP نسبت به زمان

از جمله رفتاری که وابسته به زمان می باشد ، رفتار خزشی ماده است . زمان تحمل و پایداری خزشی مواد FRP وابسته به نسبت تنش کششی ثابت و دائم به مقاومت کوتاه مدت لایه FRP بوده و از شرایط محیطی نیز تأثیر می پذیرد . در حالت کلی ، برای FRP های رایج ، الیاف کربن کمترین حساسیت را نسبت به شکست خزشی دارند . الیاف آرامید به طور میانه حساس بوده و الیاف شیشه بیشتر از همه مستعد این نوع شکست هستند . براساس آزمایشات ، نسبت میزان تنش در شکست خزشی به مقاومت نهایی اولیه بعد از حدود ۵۰ سال برای CFRP ، AFRP و GFRP به ترتیب عبارتست از : 0.3 ، 0.47 و 0.91 (ACI 440 .2R 2002) .

دیگر خصوصیتی که نسبت به زمان مؤثر است ، رفتار خستگی مواد FRP می باشد . در این خصوصیت نیز ترتیب تحمل برای انواع FRP همانند رفتار خزشی می باشد . در منحنی S-N<sup>1</sup> مواد CFRP ، شیب روبه پایین دیاگرام معمولاً حدود 5 درصد مقاومت بار استاتیکی اولیه در هر دهه از لگاریتم زمان است . در یک میلیون سیکل ، مقاومت خستگی CFRP معمولاً بین 60 تا 70 درصد مقاومت نهایی اولیه بوده و به طور نسبی می توان گفت که وابسته به رطوبت و حرارتی که سازه بتنی در معرض آن قرار می گیرد ، نمی باشد . در مواد GFRP این کاهش در منحنی S-N به صورت 10 درصد ظرفیت باربری استاتیکی اولیه در هر دهه از لگاریتم زمان مشاهده می شود . عوامل محیطی نقش مهمی در رفتار خستگی الیافی شیشه بازی می کنند . در مورد الیافی آرامید ، کاهش مقاومت در هر دهه از لگاریتم زمان ، حدود 5 تا 6 درصد می باشد . برای تاندونهای AFRP دیده شده است که بعد از گذشت دو میلیون سیکل ، مقاومت الیاف در حدود 54 تا 73 درصد مقاومت نهایی کششی می باشد . در مورد مواد AFRP دیده شده است که محدودیت عمر در رفتار خستگی آنها تحت تأثیر رطوبت و درجه حرارت بالا سرعت می گیرد (ACI 440.2R 2002) .

در جهت آشنایی بهتر با بعضی از محصولات رایج FRP که مقادیر آن از (2001) ISIS استخراج شده ، جداول ۱-۲ الی ۳-۲ ارائه گردیده است .

جدول ۱-۲ : خصوصیات رزینها

Resin	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Elongation at Failure (%)	Maximum Long-Term Temperature Use (°C)
Polyester	1.2	50-65	3.0	2-3	120
Vinylester	1.15	70-80	3.5	4-6	140
Epoxy	1.1-1.4	50-90	3.0	2-8	120-200

Stress – logarithm of the Number of cycles at failure<sup>1</sup>

جدول ۲-۲ : خصوصیات الیاف

Fibres	Type	Diameter (microns)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Elongation at Failure (%)
Glass	E	10	2.54	3450	72	4.8
	S	10	2.49	4300	87	5.0
Carbon	PAN	7	1.76	3650	231	1.4
	Pitch	10	2.00	2400	380	0.5
Aramid	Kevlar 49	11.9	1.45	3620	131	2.8
	Twaron	12	1.45	3600	127	2.5

جدول ۳-۲ : خصوصیات عمومی سیستمهای FRP رایج

FRP system	Areal Weight (g/m <sup>2</sup> )	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Thickness (mm)	Tensile Strength (MPa)	Modulus in Tension (GPa)	Elongation at Failure (%)
Replark (Mitsubishi)						
Type 20 <sup>2</sup>	200	1.8	0.111	3400	230	1.5
Type 30 <sup>2</sup>	300	1.8	0.167	3400	230	1.5
Type MM <sup>2</sup>			0.165	2900	390	0.7
Type HM <sup>2</sup>	200	2.1	0.143	1900	640	0.3
Mbrace (Master Builders)						
CF 530 <sup>2</sup>	300	1.82	0.165	2940	372	0.8
CF 130 <sup>2</sup>	300	1.82	0.165	3480	227	1.5
EG 900 <sup>1</sup>			0.353	1730	88	2.0
Tyfo Fibwrap (Composite Retrofit International)						
SEH51 <sup>1</sup>	930	0.72	1.3	552	27.6	2.0
SCH41 <sup>2</sup>			1.0	1034	68.9	1.5
Sika						
SikaWrap Hex 100G <sup>1</sup>	913	2.54	1.0	600	26.1	2.2
SikaWrap Hex 103C <sup>2</sup>	618	1.8	1.0	960	73.1	1.3
CarboDur S <sup>2</sup>	2240	1.6	1.2-1.4	2800	165	1.7
CarboDur M <sup>2</sup>	2240	1.6	1.4	2400	210	1.2
CarboDur H <sup>2</sup>	2240	1.6	1.4	1300	300	0.5

1 Glass FRP

2 Carbon FRP

## ۴-۲: انواع سیستمهای FRP

سیستمهای FRP رایج براساس نحوه تحویل به سایت و نحوه نصب آنها به سه دسته زیر تقسیم می شوند:

۱- سیستمهای نصب به صورت خیس<sup>۱</sup>: در این سیستم لایه های FRP که شامل یکسری از الیافی هم جهت و یا چند جهتی خشک است، در محل نصب از رزین آغشته شده و بعد از اتصال به سطح بتن همانجا عمل آوری می گردند که به عبارتی شبیه به ریختن بتن در محل است.

۲- سیستمهای پیش آغشته شده<sup>۲</sup>: در این سیستم لایه های FRP که از ورقه های الیاف تک جهتی و یا چندجهتی که عمل آوری نشده ولی از قبل در محل تولید توسط رزین آغشته و اشباع شده، تشکیل گردیده و همانند روش قبلی در محل نصب عمل آوری می شوند. این روش معمولاً نیاز به حرارت اضافی جهت عمل آوری دارد.

۳- سیستمهای پیش ساخته<sup>۳</sup>: این نوع سیستمها شامل انواع گوناگونی از شکل‌های کامپوزیتی ساخته شده در خارج کارگاه می باشد. معمولاً یک چسب همراه بتونه و آستر خاص جهت چسباندن این ورقه به سطح بتن مورد استفاده قرار می گیرد. این نوع سیستم شبیه به بتن پیش ساخته است (ACI 440.2R 2002).

## ۵-۲: نحوه مقاوم سازی خمشی سازه های بتنی به کمک مواد FRP

همانطور که در مقدمه اشاره شد، به جهت اینکه مواد FRP در راستای الیافیشان توانایی مقاومت در برابر کششهای زیاد را دارند، با نصب آنها در مکانی از تیرکه تحت کشش است، موجب تقویت

---

<sup>۱</sup> Wet lay-up

<sup>۲</sup> Prepreg

<sup>۳</sup> Precured



خمشی آن می گردند. در تیرهای با تکیه گاه ساده و بارگذاری در بالای آن، همانطور که در شکل ۱-۲ دیده می شود، صفحه FRP در زیر تیر و یا دال نصب می گردد. بدلیل آنکه تقویت سازه های بتنی به کمک FRP از طریق انتقال تنش برشی بین FRP و بتن بستر صورت می گیرد، لازم است که مقاومت بتن بستر از یک مقدار حداقل بیشتر بوده که در آیین نامه ها بدان اشاره شده است. همچنین برای این منظور با روش سندبلاست، شیره بتن که دارای مقاومت کمتری است، گرفته شده و FRP بر روی سطح مقاومتر بتن نصب می گردد. تمهیدات دیگری نیز برای برقراری یک ارتباط کامل بین FRP و بتن توسط سازندگان این مواد و آیین نامه ها ارائه شده است که از آنجمله می توان به تمیز کردن سطح و استفاده از آسترها و بتونه های مناسب، اشاره نمود.



شکل ۱-۲: نحوه مقاوم سازی خمشی

نکته قابل توجه دیگر که باید بدان اشاره نمود، انواع گسیختگی هایی است که بعد از مقاوم سازی خمشی تیر با FRP ممکن است رخ دهد. همانطور که در خصوصیات مکانیکی مواد FRP بیان شد، این مواد تا لحظه گسیختگی از خود یک رفتار خطی نشان داده و ناحیه تسلیم شدگی همانند

فولاد ندارند. همچنین کرنش گسیختگی این مواد عموماً کم بوده و بنابراین گسیختگی های ناشی از پاره شدگی FRP به صورت ناگهانی است و نهایتاً مقدار شکل پذیری در این حالت نسبت به قبل از مقاوم سازی افت می کند.

یکی دیگر از رخدادهایی که در مقاوم سازی خمشی تیرهای بتن آرمه اتفاق افتاده و به گسیختگی های ترد و ناگهانی این تیرها بیشتر دامن می زند، بروز پدیده جداشدگی<sup>۱</sup> می باشد. جداشدگی لایه FRP، پدیده ای است که ناشی از عوامل اصلی تمرکز تنش در انتهای FRP و در محل ترکهای خمشی و برشی اتفاق افتاده و کم بودن مقاومت کششی بتن بستر و عدم اجرای مناسب در نصب FRP باعث افزایش احتمال وقوع آن می گردد. انواع گسیختگی های ممکن در تیر تقویت شده با FRP به صورت خمشی در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد دو نوع گسیختگی اول که شامل خردشدگی بتن فشاری و دیگری پارگی FRP است، جزء گسیختگی های بهینه تلقی شده و نسبت به دیگر گسیختگی ها مطلوبتر می باشند. گسیختگی های دیگر، ناشی از جداشدگی FRP می باشد که شامل حالت های مختلف است. گسیختگی های ناشی از جداشدگی به چند صورت ممکن است اتفاق افتد که عبارتند از (fib 2001):

۱- گسیختگی ناشی از جداشدگی بین چسب و بتن

۲- گسیختگی ناشی از جداشدگی بین چسب و FRP

۳- گسیختگی ناشی از جداشدگی در خود لایه چسب

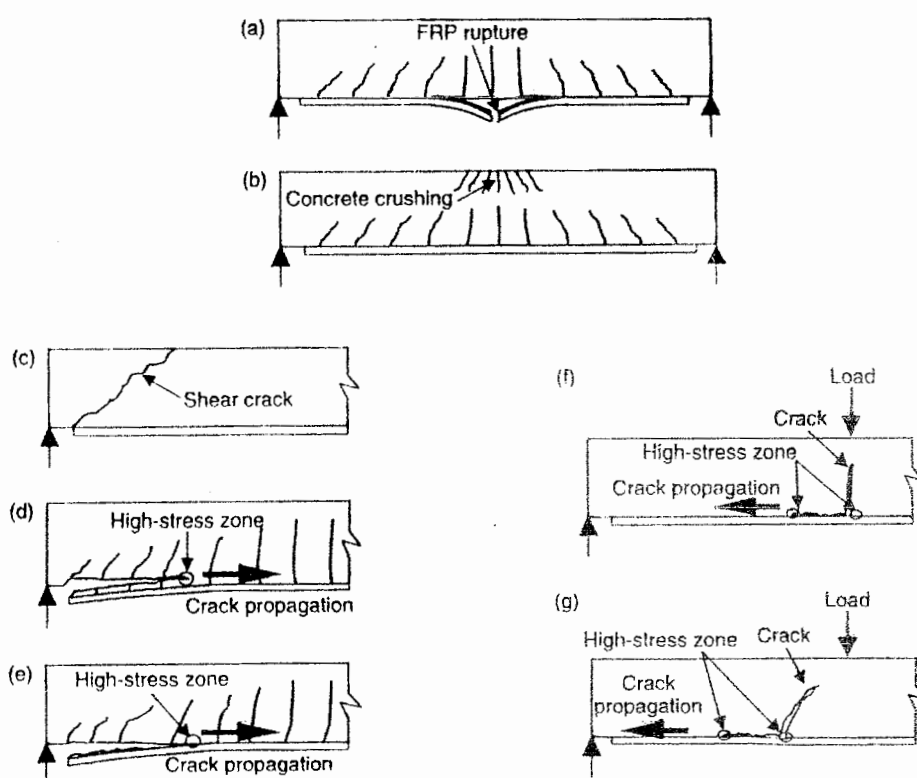
۴- گسیختگی ناشی از جداشدگی در بتن کششی

در موارد عملی با توجه به اینکه مقاومت چسب و همچنین مقاومت اتصال آن به بتن و FRP بیشتر از مقاومت کششی بتن بستر می باشد، دیده شده است که سه حالت اول به ندرت اتفاق افتاده

---

<sup>۱</sup> Debonding

و بیشتر جدادگی ها ناشی از حالت چهارم می باشد. در حالت چهارم نیز جدادگی ها به دو صورت ۱- جدادگی لایه نازکی از بتن به همراه FRP و ۲- جدادگی وسیعی از بتن همراه با FRP (جدادگی پوشش کششی بتن<sup>۱</sup>)، رخ می دهد. حالت پنجم (e) نشان داده شده در شکل ۲-۲ جزء دسته اول بوده به گونه ای که تنها لایه نازکی از بتن همراه با FRP از تیر جدا می شود در حالی که حالت چهارم (d) جزء دسته دوم می باشد.



شکل ۲-۲: انواع گسیختگی های رایج در تیر تقویت شده با FRP در خمش (Teng et al. 2001)

از انواع جدادگی های مطرح شده، جدادگی در انتهای<sup>۲</sup> FRP از شایعترین موارد می باشد، چراکه تمرکز تنش زیادی در این ناحیه وجود دارد. لذا برای جلوگیری از وقوع این گسیختگی و

<sup>۱</sup> Concrete Cover Separation

<sup>۲</sup> Peeling off

بهبود عملکرد مقاوم سازی ، انتهای FRP معمولا با روشهای مختلفی مهار می گردد که از جمله می توان به استفاده از دورپیچهای FRP و یا فولادی و همچنین استفاده از پیچهای<sup>۱</sup> فولادی اشاره نمود . همچنین برای کمترکردن تمرکز تنش در انتهای لایه های FRP در تیرهای با تکیه گاه ساده ، عموما توصیه می شود که این لایه ها تا نزدیکیهای تکیه گاه ادامه پیدا کند .

---

<sup>۱</sup> Bolt

## فصل سوم : معرفی آیین نامه های طراحی در مقاوم سازی خمشی به

### کمک صفحات FRP

#### ۳-۱ : مقدمه

همانطور که بیان شد ، استفاده از مواد FRP در مقاوم سازی خمشی ، برشی و فشاری در پانزده سال اخیر در سازه های بتنی رواج پیدا کرده است . حال با عنایت به گستردگی این مواد و پیچیدگیهای موجود در رفتار آنها ، برای کاربردهای آنها در انواع مقاوم سازی سازه های بتن آرمه ، دستورالعملها و آیین نامه های گوناگونی توسط مؤسسات مختلف در سراسر جهان چاپ شده و منتشر گردیده است . از جمله کشورهای پیشتاز در این رابطه می توان کشور ژاپن را نام برد که با ارائه حدود ۱۰ راهنمای مختلف توسط مؤسسات گوناگون ، نسبت به دیگر کشورها فعالیتهای بیشتری را انجام داده است . کشورهای دیگر از جمله آمریکا ، کانادا و بعضی از کشورهای اروپایی نیز تلاشهایی در این راستا داشته اند .

در این پایان نامه مقایسه ای بین نتایج مدل ارائه شده با نتایج آیین نامه ها صورت گرفته است ؛ لذا در این فصل چهار دستورالعمل در دسترس و روابط طراحی آنان در مقاوم سازی خمشی تیرهای بتنی آورده شده و معرفی گردیده اند . این دستورالعملها عبارتند از :

□ راهنمای ACI 440-2R ، چاپ سال ۲۰۰۲ توسط انجمن بتن آمریکا با عنوان :

"راهنمای طراحی و ساخت سیستم ورقه های FRP برای مقاوم سازی سازه های بتنی"

□ راهنمای منتشر شده توسط انجمن بین المللی بتن در اروپا در سال ۲۰۰۱ ، با علامت

اختصاری fib Task Group 9.3 , bulletin 14 با عنوان :

"تقویت کننده های FRP برای سازه های بتنی"

□ راهنمای منتشر شده توسط انجمن بتن انگلستان ،

UK. Concrete Society Technical Report , No 55 در سال ۲۰۰۰ با عنوان :

"راهنمای طراحی برای مقاوم سازی سازه های بتنی با استفاده از مواد کامپوزیتی الیافی"

□ راهنمای منتشر شده توسط انجمن ISIS کانادا ، در سال ۲۰۰۱ ، با عنوان :

"سازه های بتنی مقاوم سازی شده با پلیمرهای تقویت شده با الیاف"

روابط مربوط به محاسبه میزان مقاومت خمشی تیر تقویت شده با FRP براساس این چهار آیین

نامه در زیرفصلهای ذیل آورده شده است .

### ۲-۳ : آیین نامه ACI 440

در ابتدا لازم به تذکر است که پایه اصول طراحی این آیین نامه، براساس ACI 318-99 می باشد.

از جمله فرضیات مشترک در بین این چهار راهنمای طراحی در مقاوم سازی خمشی را می توان در

موارد زیر خلاصه نمود :

۱- صفحات مسطح عمود بر محور تیر ، بعد از بارگذاری مسطح باقی می ماند (فرضیه برنولی) .

۲- از تغییرشکل‌های برشی در لایه چسب صرف نظر می شود .

۳- مقاومت کششی بتن ناچیز فرض شده و صرف نظر می شود .

روند طراحی خمشی در آیین نامه ACI 440 را می توان در بندهای زیر خلاصه کرد :

۱- محاسبه کرنش اولیه بستر با توجه به مقطع ترک خورده معادل از روابط ACI 318-99 .

۲- محاسبه ضریب چسبندگی جهت مدل کردن اثر جداسازی در ورقه های FRP از رابطه زیر :

$$K_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left( 1 - \frac{nE_f t_f}{360,000} \right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f \leq 180,000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left( \frac{90,000}{nE_f t_f} \right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f > 180,000 \end{cases} \quad (1-3)$$

که در آن  $K_m$  ، ضریب چسبندگی ؛  $\varepsilon_{fu}$  ، کرنش نهایی FRP و  $n$  ،  $E_f$  و  $t_f$  نیز به ترتیب تعداد ، مدول الاستیسیته و ضخامت لایه های FRP می باشند .

۳- محاسبه عمق تارخنثی به کمک روند سعی و خطا و رابطه تعادل نیروها در مقطع المان بتنی.

در مقاطع مستطیلی می توان این روند را به صورت زیر نشان داد :

الف) فرض یک مقدار اولیه برای عمق تارخنثی ( c ) .

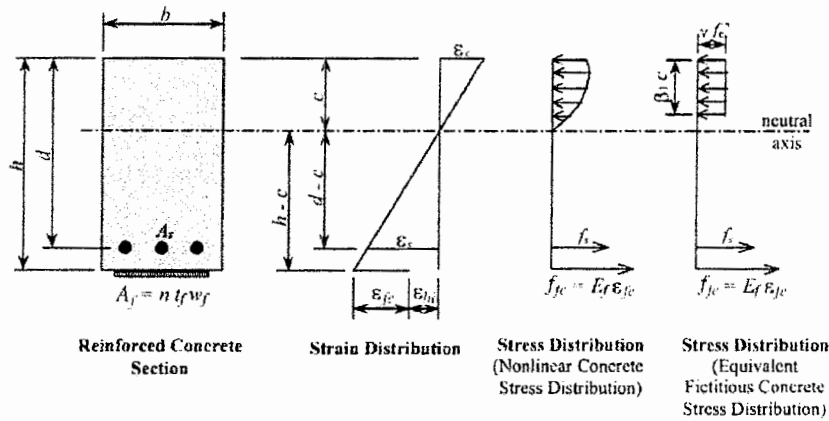
ب) محاسبه کرنش مؤثر در FRP از رابطه زیر براساس تشابه مثلثها و فرض اینکه بتن فشاری به

حد کرنش گسیختگی اش یعنی 0.003 رسیده است .

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left[ \frac{h-c}{c} \right] - \varepsilon_{bi} \leq K_m \varepsilon_{fu} \quad (2-3)$$

که در آن  $\varepsilon_{fe}$  ، کرنش مؤثر FRP ؛  $\varepsilon_{bi}$  ، کرنش اولیه بستر کششی ؛  $\varepsilon_{cu}$  ، کرنش نهایی خردشدگی

بتن فشاری ( 0.003 ) و  $h$  و  $c$  به ترتیب عمق مقطع و عمق تارخنثی می باشند .



شکل ۳-۱: توزیع تنش و کرنش در مقطع تیر مستطیلی تقویت شده با FRP

ج) محاسبه تنش در آرماتورهای کششی و فشاری از تشابه مثلثها از دو رابطه زیر:

$$f_s = E_s (\varepsilon_{fc} + \varepsilon_{hi}) \left( \frac{d-c}{h-c} \right) \leq f_y \quad (3-3)$$

$$f'_s = E_s (\varepsilon_{fc} + \varepsilon_{hi}) \left( \frac{c-d'}{h-c} \right) \leq f'_y \quad (4-3)$$

که در آن  $f_s$  و  $f'_s$  به ترتیب تنش در فولاد کششی و تنش در فولاد فشاری می باشد.

د) محاسبه عمق تارخشی جدید براساس تعادل نیروها از رابطه زیر (فرض بلوک تنش معادل

برای بتن فشاری با ضرایب  $\gamma$  و  $\beta_1$  استخراج شده از ACI 318).

$$c_{new} = \frac{A_s f_s + A_f E_f \varepsilon_{fc} - A'_s f'_s}{\gamma f'_c \beta_1 b} \quad (5-3)$$

که در آن  $A_s$ ،  $A'_s$  و  $A_f$  به ترتیب سطح مقطع آرماتورهای کششی، آرماتورهای فشاری و

FRP می باشد.  $b$  نیز نماد عرض مقطع بتنی است.



ه) کنترل مقدار عمق تارخشی جدید نسبت به مقدار اولیه اش . در صورت عدم تطابق ، لازم است که مراحل بند ۳ دوباره با مقدار  $c$  جدید تا رسیدن به  $c$  حقیقی ادامه پیدا کند .

۴- محاسبه ممان اسمی نهایی تیر ( $M_n$ ) از رابطه زیر برای مقاطع مستطیلی .

$$M_n = A_s f_s \left[ d - \frac{\beta_1 c}{2} \right] + \psi_f A_f f_{f_0} \left( h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + A'_s f'_s \left[ \frac{\beta_1 c}{2} - d' \right] \quad (۶-۳)$$

که در آن  $\psi_f$  ، ضریب کاهشده مقاومت FRP بوده و برابر 0.85 می باشد .

۵- محاسبه ضریب کاهش مقاومت ( $\phi$ ) با توجه به کرنش در فولاد کششی از رابطه زیر :

$$\phi = \begin{cases} 0.9 & \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.7 + \frac{0.2(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.7 & \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (۷-۳)$$

۶- نهایتاً محاسبه ممان نهایی مقطع از ضرب ضریب کاهشده در ممان اسمی نهایی به صورت زیر :

$$\phi M_n \geq M_u \quad (۷-۳)$$

### ۳-۳ : آیین نامه 9.3 Task Group fib

پایه طراحی این آیین نامه براساس Eurocode2 (1991) می باشد . فرضیات نیز همانند آیین

نامه ACI 440 است . در این بخش روند طراحی را می تواند در بندهای زیر خلاصه نمود :

۱- محاسبه کرنش اولیه بستر براساس روابط Eurocode2 .

۲- فرض اولیه در عملکرد کامل اتصال بین FRP و بتن .

۳- فرض خردشدگی بتن برای مود گسیختگی حاکم در شروع طراحی .

۴- محاسبه عمق تارخنتی براساس تعادل نیروها از رابطه زیر ( استفاده از ضرایب  $\psi$  و  $\delta_G$  برای

بلوک تنشی معادل بتن فشاری به جای  $\gamma$  و  $\beta_1$  در ACI).

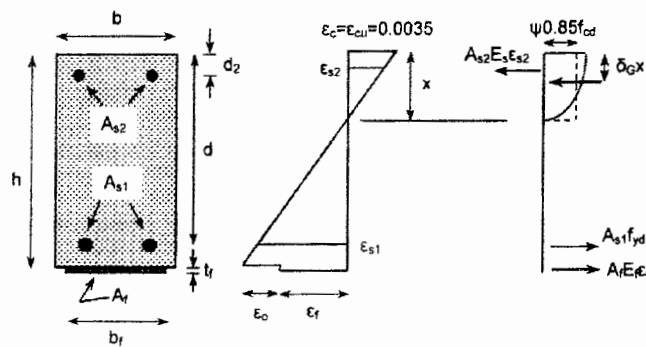
$$0.85\psi f_{cd}bx + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2} = A_{s1}f_{yd} + A_fE_{fu}\varepsilon_f \quad (۸-۳)$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x - d_2}{x} \leq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (۹-۳)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \quad (۱۰-۳)$$

$$\psi = 0.8 \quad (۱۱-۳)$$

$$\delta_G = 0.4 \quad (۱۲-۳)$$



شکل ۳-۲: نحوه توزیع تنش و کرنش در مقطع

۵- کنترل مود گسیختگی به جهت آنکه گسیختگی ناشی از پارگی در ورقه FRP نباشد با

استفاده از رابطه زیر :

$$\varepsilon_f \leq \varepsilon_{fud} \quad (۱۳-۳)$$

۶- در صورت برقراری رابطه بالا می توان ممان نهایی را از رابطه زیر محاسبه نمود .

$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd} (d - \delta_G x) + A_f E_f \varepsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} (\delta_G x - d_2) \quad (14-3)$$

۷- در صورت عدم برقراری رابطه بند ۵ ، لازم است که مقادیر  $\psi$  و  $\delta_G$  جدید از روابط زیر برحسب مقدار کرنش در تار فشاری بتن در لحظه گسیختگی FRP محاسبه شده و جایگزین روابط بند ۴ و ۶ گردد . لازم به تذکر است که مقدار کرنش در تار فشاری بتن وابسته به عمق تارخشی بوده ولذا روند سعی و خطا آنقدر تکرار شده تا نتایج همگرا گردد .

$$\psi = \begin{cases} 1000\varepsilon_c \left( 0.5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_c \right) & \text{for } \varepsilon_c \leq 0.002 \\ 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_c} & \text{for } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases} \quad (15-3)$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000\varepsilon_c}{4(6 - 1000\varepsilon_c)} & \text{for } \varepsilon_c \leq 0.002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 2)} & \text{for } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases} \quad (16-3)$$

اما در آیین نامه *fib* جهت کنترل موده‌های جداول مختلف ، شامل جداولی در انتهای FRP ، در محل ترکهای خمشی و برشی ، ضوابط مختلف زیادی ارائه کرده است که در آیین نامه *fib* قابل دسترس می باشد .

### ۳-۴ : آیین نامه UK. Concrete Society , Technical Report No. 55

در این آیین نامه ، فرضیات مقاوم سازی خمشی همانند قبل بوده و پایه آن برای طراحی مقاوم سازی ساختمانها براساس BS 8110-1997 و برای پلها BS 5400 می باشد . روند طراحی طبق این آیین نامه را می توان در بندهای زیر خلاصه نمود :

۱- محاسبه کرنش اولیه بستر براساس BS 8110 و یا BS 5400 .

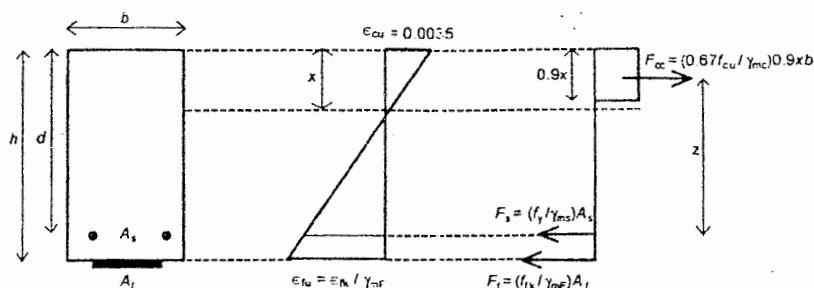
۲- فرض اینکه مود گسیختگی حاکم ، خردشدگی بتن در تار فشاری در کرنشی برابر 0.0035 باشد . با این فرض عمق تارخنشی از تعادل نیروها و فرض بلوک تنشی معادل مندرج در آیین نامه BS برای بتن فشاری ، از رابطه زیر محاسبه می شود .

$$\frac{0.9 \times 0.67}{\gamma_{mc}} f_{cu} b x^2 + [E_s \varepsilon_{cu} (A_s + A'_s) + E_{fd} A_f (\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{cit})] x - [E_s \varepsilon_{cu} (A_s d + A'_s d') + E_{fd} A_f h \varepsilon_{cu}] = 0 \quad (17-3)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h-x}{x} - \varepsilon_{cit} \quad (18-3)$$

۳- محاسبه کرنش ماکزیمم ممکن در FRP با توجه به روابط کنترل کننده جداشدگی و دیگر معیارهای محافظه کارانه براساس روابط زیر .

$$\left. \begin{aligned} f_{ctm} &= 0.18(f_{cu})^{2/3} \\ k_b &= 1.06 \sqrt{\frac{z-b_f/b_w}{1+b_f/400}} \geq 1.0 \\ T_{k,max} &= 0.5 k_b b_f \sqrt{E_{fd} f_f f_{ctm}} \end{aligned} \right\} \varepsilon_{f,max} = \min \left\{ \frac{T_{k,max}}{E_f A_f}, 0.5 \varepsilon_{fu}, 0.006 \right\} \quad (19-3)$$



شکل ۳-۳: توزیع تنش و کرنش در مقطع

۴- در صورتی که کرنش FRP از مقدار حد کمتر باشد ، می توان ممان نهایی مقطع را از رابطه زیر محاسبه کرد .

$$M_r = f_s A_s (d - 0.45x) - f'_s A'_s (d' - 0.45x) + E_{fd} \varepsilon_f A_f (h - 0.45x) \quad (20-3)$$

۵- در صورتی که شرط بند ۴ ، صادق نبود باید براساس این آیین نامه ، ممان مقطع را از جمع ممان در حالت مقطع تقویت نشده ( $M_o$ ) و ممان افزایشی ناشی از FRP ( $M_{add}$ ) بدست آورد .

$$M_{add} = A_f f_{f,max} z \quad (21-3)$$

$$z = d - \frac{0.9x}{2} \quad (22-3)$$

$$M_r = M_o + M_{add} \quad (23-3)$$

### ۳-۵: آیین نامه ISIS Canada

در این آیین نامه که پایه آن در طراحی ساختمانها براساس CSA A23.3-94 و برای پلها CSA S6-88 می باشد ، در مقاوم سازی خمشی علاوه بر فرضیات قبل ، فرض می گردد که اتصال بین FRP و بتن همواره کامل بوده و پدیده جداشدگی رخ نخواهد داد . روند طراحی به صورت زیر می باشد :

۱- محاسبه کرنش اولیه بستر با توجه به روابط CSA A23.3 و یا CSA S6 .

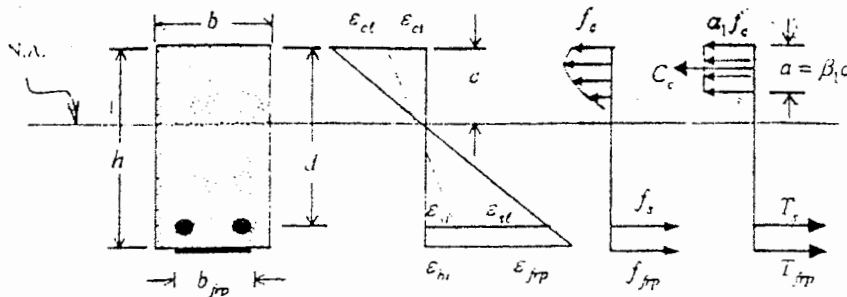
۲- محاسبه عمق تار خنثی در حالت بالانس از رابطه زیر ( حالت بالانس ، حالتی است که پاره شدگی FRP و خردشدگی بتن در تار فشاری بطور همزمان اتفاق می افتد ) :

$$c_h = \frac{h \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fpu} + \varepsilon_{bi}} \quad (24-3)$$

۳- محاسبه عمق تار خنثی جدید از روابط تعادل نیروها با فرض بلوک تنش معادل برای بتن

فشاری از رابطه زیر :

$$c = \frac{\phi_s f_s A_s + \phi_{frp} E_{frp} \varepsilon_{frpu} A_{frp} - \phi_s f'_s A'_s}{\alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 b} \quad (25-3)$$



شکل ۳-۴: نحوه توزیع تنش و کرنش در مقطع

۴- در صورتی که عمق تارخنثی جدید با مقدار حالت بالانس برابر باشد ، گسیختگی به صورت

بالانس خواهد بود و در نتیجه ممان نهایی مقطع از رابطه زیر قابل محاسبه است .

$$M_r = \phi_s f_s A_s \left( d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) - \phi_s f'_s A'_s \left( d' - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) + \phi_{frp} E_{frp} \varepsilon_{frpu} A_{frp} \left( h - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (26-3)$$

۵- در صورتی که عمق تارخنثی جدید بیشتر از عمق تار خنثی در حالت بالانس باشد ،

نشانه‌دهنده آنستکه گسیختگی ، ناشی از خردشدگی بتن در تار فشاری زودتر از پاره شدگی

FRP رخ خواهد داد و بنابراین با برقراری رابطه تعادل نیروها و فرض خردشدگی بتن ، مقدار

عمق تارخنثی از رابطه زیر محاسبه شده و در نهایت ممان نهایی نیز قابل محاسبه است .

$$\alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 b c^2 + (\phi_s E_s \varepsilon_{cu} (A_s + A'_s) + \phi_{frp} E_{frp} A_{frp} (\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{bi})) c - (\phi_s E_s \varepsilon_{cu} (A_s d + A'_s d') + \phi_{frp} E_{frp} A_{frp} h \varepsilon_{cu}) = 0 \quad (27-3)$$

$$M_r = \phi_s f_s A_s \left( d - \frac{a}{2} \right) - \phi_s f'_s A'_s \left( d' - \frac{a}{2} \right) + \phi_{frp} E_{frp} \varepsilon_{frpu} A_{frp} \left( h - \frac{a}{2} \right) \quad (28-3)$$

۶- در صورت عدم برقراری ضوابط بند ۴ و ۵، گسیختگی تیر ناشی از پاره شدگی FRP خواهد بود و بنابراین مقدار عمق تارخنتی با فرض رسیدن FRP به کرنش نهایی اش از روابط زیر قابل دستیابی است.

$$\alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 c b + \phi_s f'_s A'_s = \phi_s f_y A_s + \phi_{frp} E_{frp} \varepsilon_{frpu} A_{frp} \quad (۲۹-۳)$$

$$M_r = \phi_s \left[ f_y A_s \left( d - \frac{a}{2} \right) - f'_s A'_s \left( d' - \frac{a}{2} \right) \right] + \phi_{frp} E_{frp} \varepsilon_{frpu} A_{frp} \left( h - \frac{a}{2} \right) \quad (۳۰-۳)$$

## فصل چهارم : مرور کارهای انجام شده

همانطور که در فصل اول اشاره شد ، عمر مواد FRP در صنعت ساختمان حدود پانزده سال بوده و یک صنعت جدید خصوصا در جهت مقاومسازی سازه های بتن آرمه می باشد . بدین جهت حوزه کارها و مطالعات انجام شده در این زمینه هنوز محدود بوده و تحقیقات بیشتری در این علم ضروری می باشد . در این رابطه تاکنون همایشهای بسیاری برگزار گردیده است و دانشمندان زیادی با انجام آزمایشهای مختلف خصوصا بر روی ورقه های FRP در جهت تقویت خمشی تیرهای بتنی ، که موضوع اصلی پایان نامه است ، در جهت شناخت هرچه بیشتر این مواد و ارائه روابطی برای دیگر طراحان ، تلاشهایی را انجام داده اند . در این راستا می توان به آزمایشات انجام شده توسط Lamanna et al. , Kage et al. (1999), Kachlakev and Barnes (1999) , Alfarabi et al. (1994) , Sergio et al. (2003) , Weijian and Huiming (2001) , Kishi et al. (2001) , (2001) , Zhang et al. (2003) , Leong and Maalej (2003) و Takahashi and Sato (2003) اشاره کرد . همچنین از لحاظ آنالیز عددی و اجزاء محدود ، تلاشهایی صورت گرفته است که از آن جمله می توان به کارهای انجام شده توسط (1997) Arduini et al. , (2001) Beber et al. , (2001) Shokrieh and Mousavi و (2003) Shin and Lee اشاره کرد . آنالیزهای عددی عموما توسط نرم افزارهای کامپیوتری مختلف اجزاء محدود صورت گرفته است .

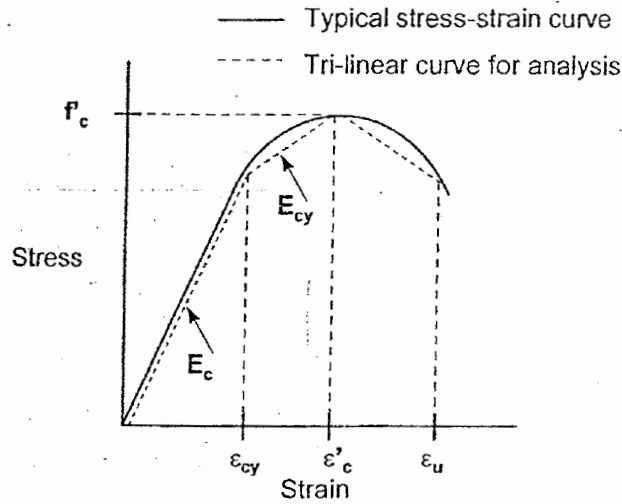


#### ۱-۴: مدل‌های ارائه شده در مورد تحلیل تیرهای تقویت شده با FRP در خمش

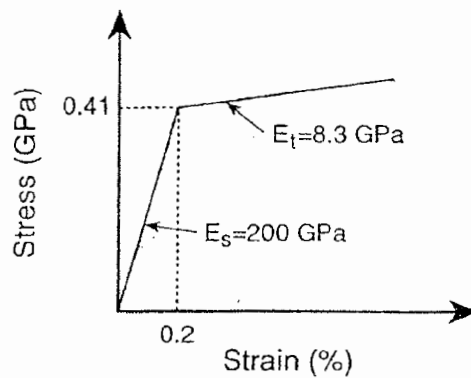
در رابطه با تحلیل تیرهای بتنی که توسط FRP به صورت خمشی تقویت شده اند ، علاوه بر آیین نامه ها که روابطی را ارائه نموده اند و تعدادی از آنها در فصل قبل اشاره شد ، چندین مدل تئوری نیز توسط محققین مختلف ، ارائه گردیده است . از جمله این مدلها می توان به مدل Toutanji et al. (2001) ، Tann et al. (2001) ، Mihilmy et al. (2000) ، Ross et al. (1999) اشاره کرد . هر کدام از این مدلها به طور مختصری در بندهای زیر توضیح داده شده اند.

#### ۱-۱-۴: مدل اول

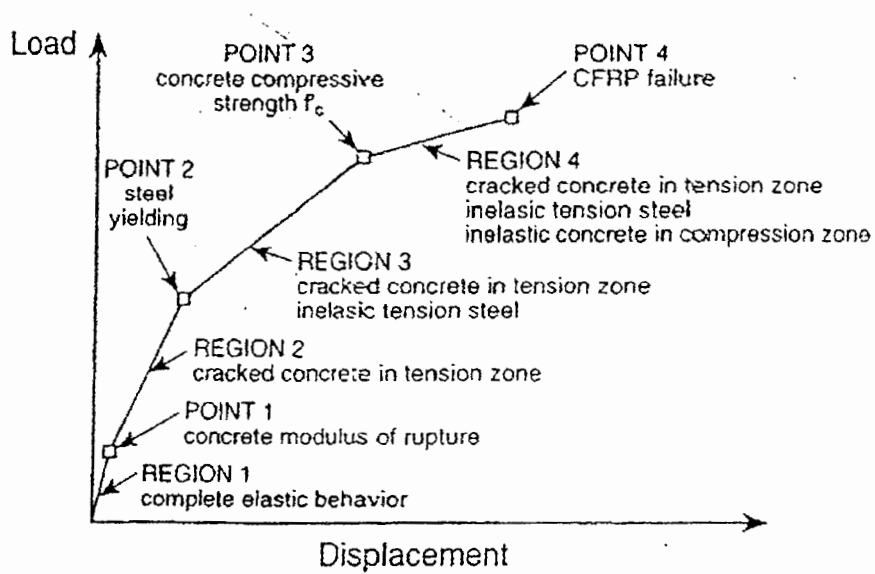
در این مدل که توسط Ross et al. (1999) ارائه شده است و یک آنالیز الاستیک - پلاستیک مقطع بتن آرمه تقویت شده با FRP می باشد ، خصوصیات بتن فشاری و فولاد به ترتیب براساس شکل‌های ۱-۴ و ۲-۴ معرفی شده است . رفتار FRP به صورت خطی تا لحظه گسیختگی تغییر می کند . در این مدل از مقاومت بتن کششی و ترک صرفنظر نموده است . برای بررسی رفتار نیرو - تغییر مکان تیر در طی افزایش بار متمرکز به صورت سه نقطه ای ، در این مدل در ابتدا حالات تیر را به چهار ناحیه تقسیم بندی کرده که در شکل ۳-۴ مشاهده می شود . همانطور که ملاحظه می گردد ، این تقسیم بندی براساس حالات مختلف که در طول بارگذاری اتفاق می افتد ، بوده و روند تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان وسط تیر بین هر حالت به صورت خطی تغییر می کند . از جمله فرضیات به کار رفته در مدل ، فرض تغییرات خطی کرنش در ارتفاع مقطع می باشد .



شکل ۱-۴: دیاگرام تنش - کرنش بتن فشاری



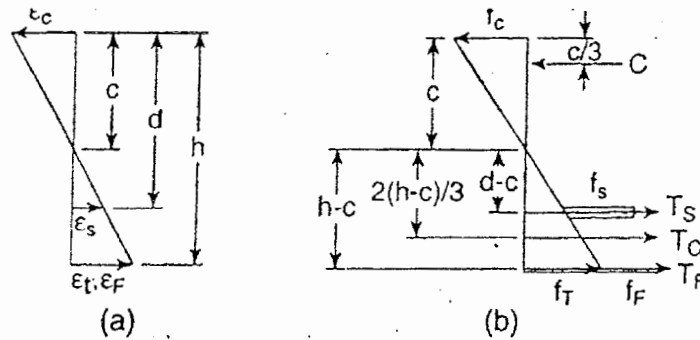
شکل ۲-۴: دیاگرام تنش - کرنش فولاد



شکل ۳-۴: تقسیم بندی دیاگرام نیرو - تغییر مکان برای تیر تقویت شده با FRP تحت بارگذاری سه نقطه ای

ناحیه اول :

در این ناحیه ، رفتار تمامی مواد به صورت الاستیک خطی بوده و نقطه انتهایی آن وقتی است که تنش در تار کششی بتن از مقدار نهایی مقاومت کششی بتن بیشتر گردد . در نهایت با این فرض و دقت در شکل ۴-۴ ، عمق تارخشی از تعادل نیروها به صورت زیر براحتی محاسبه می گردد .



شکل ۴-۴ : نحوه تغییرات کرنش و تنش در ارتفاع مقطع (ناحیه اول)

$$c = \frac{h^2 + \frac{2N_s A_s d}{b} + 2N_f t_f h}{2h + \frac{2N_s A_s}{b} + 2N_f t_f} \quad (1-4)$$

$$N_s = \frac{E_s}{E_c} \quad (2-4)$$

$$N_f = \frac{E_f}{E_c} \quad (3-4)$$

که در آن  $c$  ، عمق تارخشی ؛  $h$  ، ارتفاع تیر ،  $N_s$  و  $N_f$  به ترتیب نسبت مدول الاستیسیته فولاد و FRP به مدول الاستیسیته بتن ؛  $b$  ، عرض تیر ؛  $d$  ، عمق آرماتورهای کششی ؛  $A_s$  ، سطح مقطع آرماتورهای کششی و  $t_f$  ، ضخامت لایه های FRP می باشد . مقدار شیب تغییرات نیرو نسبت به تغییرشکل وسط دهانه تیر در ناحیه اول  $(P/\delta)_1$  ، از رابطه زیر بدست می آید .

$$\left(\frac{P}{\delta}\right)_1 = K(EI)_1 \quad (4-4)$$

که در آن ،  $(EI)_1$  سختی خمشی مقطع در ناحیه اول و  $K$  یک ثابت بوده که از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$K = \frac{1296}{23L^3} \quad (5-4)$$

مقدار  $(EI)_1$  براساس عمق تارخنتی از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$(EI)_1 = \frac{E_c b c^3}{3} + \frac{E_c b (h-c)^3}{3} + E_s A_s (d-c)^2 + E_f b t_f (h-c)^2 \quad (6-4)$$

زمان شروع ترک خوردگی و در واقع انتهای ناحیه اول ، با داشتن مقادیر  $P_1$  و  $\delta_1$  (نیروی وارده بر تیر و تغییر مکان وسط دهانه آن) مشخص می شود که از روابط زیر قابل محاسبه هستند :

$$I_1 = \frac{(EI)_1}{E_c} \quad (7-4)$$

$$f_{ct} = \frac{M_1 (h-c)}{I_1} = \frac{P_1 L (h-c)}{6I_1} \quad (8-4)$$

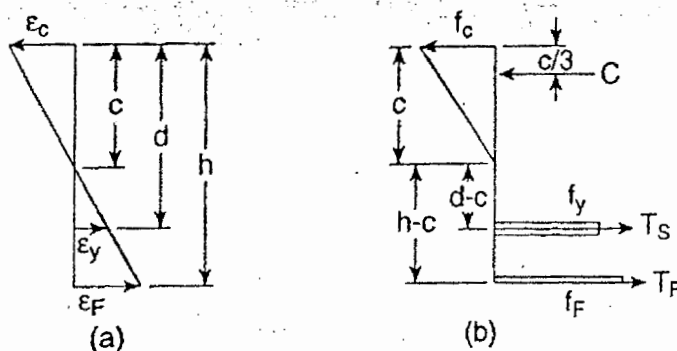
$$\delta_1 = \frac{P_1}{\left(\frac{P}{\delta}\right)_1} \quad (9-4)$$

که در آن  $I_1$  ، ممان اینرسی مقطع کامپوزیت ؛  $M_1$  ، ممان خمشی وارده در انتهای ناحیه اول و  $f_{ct}$  مقاومت کششی بتن می باشد .

ناحیه دوم :

در این ناحیه با فرض ترک خوردگی مقطع ، از مقاومت کششی و بتن ترک خورده صرفنظر شده و دیاگرام تغییرات تنش و کرنش در عمق مقطع به صورت شکل ۴-۵ فرض می گردد . با اعمال تعادل

نیروها، مقدار عمق تارخشی و در نهایت تغییرات نیرو نسبت به تغییرشکل از روابط زیر محاسبه خواهد شد.



شکل ۴-۵: نحوه تغییرات کرنش و تنش در ارتفاع مقطع (ناحیه دوم)

$$c^2 + 2\left(\frac{N_s A_s}{b} + N_f t_f\right)c - 2\left(\frac{N_s A_s d}{b} + N_f t_f h\right) = 0 \quad (10-4)$$

که پارامترهای استفاده شده در آن همانند پارامترهای تعریف شده در رابطه (۴-۱) هستند. مقدار شیب تغییرات نیرو نسبت به تغییرشکل وسط دهانه تیر در ناحیه دوم  $(P/\delta)_2$ ، از رابطه زیر بدست می آید.

$$\left(\frac{P}{\delta}\right)_2 = K(EI)_2 \quad (11-4)$$

که در آن،  $(EI)_2$  سختی خمشی مقطع در ناحیه دوم و  $K$  یک ثابت بوده که از رابطه (۴-۵) محاسبه می شود:

$$(EI)_2 = \frac{E_c b c^3}{3} + E_s A_s (d - c)^2 + E_f b t_f (h - c)^2 \quad (12-4)$$

زمان تسلیم شدگی فولاد و در واقع انتهای ناحیه دوم، همانند ناحیه اول، با داشتن مقادیر  $P_2$  و  $\delta_2$  (نیروی وارده بر تیر و تغییر مکان وسط دهانه آن) مشخص می شود که از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$M_2 = \frac{\varepsilon_y E_c b c^3}{3(d-c)} + f_y A_s (d-c) + \frac{\varepsilon_y E_f b t_f (h-c)^2}{d-c} \quad (13-4)$$

$$P_2 = \frac{6M_2}{L} \quad (14-4)$$

$$\Delta_2 = \frac{P_1 - P_2}{\left(\frac{P}{\delta}\right)_2} \quad (15-4)$$

که در آن  $\varepsilon_y$  و  $f_y$  به ترتیب کرنش و تنش فولاد در لحظه تسلیم شدگی آن می باشند.  $\Delta_2$ ، میزان افزایش تغییرمکان در انتهای ناحیه دوم نسبت به انتهای ناحیه اول بوده و لذا مقدار  $\delta_2$  از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta_2 \quad (16-4)$$

ناحیه سوم:

در این ناحیه فولاد وارد ناحیه پلاستیک شده و تنش آن در مرحله سخت شدگی قرار می گیرد. با توجه به توزیع تنش و کرنش نشان داده شده در شکل ۴-۶، روابط این قسمت نیز به صورت زیر خواهد بود.

محاسبه عمق تار خنثی:

$$f'_c b c^2 - 2[f_y A_s - \varepsilon'_c (E_f b t_f + E_t A_s) - \varepsilon_y E_t C A_s] c - 2\varepsilon'_c (A_s E_t d + b t_f h E_f) = 0 \quad (17-4)$$

که در آن  $E_t$  مدول الاستیسی فولاد بعد از تسلیم شدگی؛  $f'_c$ ، مقاومت مشخصه بتن فشاری؛  $\varepsilon'_c$ ، کرنش بتن فشاری نظیر  $f'_c$  و  $C$  نیروی ناشی از بتن فشاری بوده که برابر  $C = f'_c b c / 2$  می باشد. جهت محاسبه  $P_3$  و  $d_3$  می توان همانند نواحی قبل از روابطی مشابه، به صورت زیر استفاده کرد.

$$M_3 = \frac{f'_c b c^2}{3} + (f_y + (\varepsilon_s - \varepsilon_y) E_t) A_s (d - c) + \frac{\varepsilon'_c E_f b t_f (h - c)^2}{c} \quad (18-4)$$

$$P_3 = \frac{6M_3}{L} \quad (19-4)$$

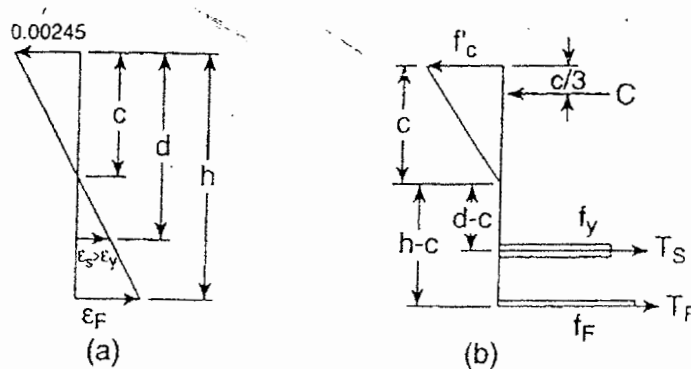
$$\left(\frac{P}{\delta}\right)_3 = K(EI)_3 \quad (20-4)$$

$$(EI)_3 = \frac{E_{cy} b c^3}{3} + E_f b t_f (h - c)^2 + E_t A_s (d - c)^2 \quad (21-4)$$

$$\Delta_3 = \frac{P_3 - P_2}{\left(\frac{P}{\delta}\right)_3} \quad (22-4)$$

همانند ناحیه دوم،  $\Delta_3$ ، میزان افزایش تغییرمکان در انتهای ناحیه سوم نسبت به انتهای ناحیه دوم بوده و لذا مقدار  $\delta_3$  از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\delta_3 = \delta_2 + \Delta_3 \quad (23-4)$$



شکل ۴-۶: نحوه تغییرات کرنش و تنش در ارتفاع مقطع (ناحیه سوم)

ناحیه چهارم:

در این ناحیه جهت محاسبه عمق تارخشی، برای بتن فشاری از بلوک معادل تنشی با پارامترهای تجربی  $\alpha = 0.56$  و  $\beta = 0.325$  استفاده می شود (شکل ۴-۷). تحت این شرایط فرض

می گردد که بتن در تار فشاری خود به کرنش ماکزیمم 0.003 ( $\epsilon_u$ ) رسیده است. حال با این فرض و فرض تغییرات خطی کرنش در عمق مقطع، مقدار عمق تارخشی براساس تعادل نیروها از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$f'_c b c^2 + [\epsilon_u (E_t A_s + E_f b t_f) + (\epsilon_y E_t + f_y) A_s] c - \epsilon_u (E_t d A_s + E_f b t_f h) = 0 \quad (24-4)$$

مقدار تغییرمکان و نیرو در انتهای این ناحیه همانند نواحی دیگر، از روابط زیر بدست خواهد آمد. در رابطه (25-4)،  $f_{fu}$ ، تنش کششی نهایی FRP می باشد.

$$M_4 = \alpha f'_c b c^2 (1 - \beta) + \left[ f_y + \frac{E_t \epsilon_c (d - c)}{c} - E_t \epsilon_y \right] (d - c) A_s + f_{fu} b t_f (h - c) \quad (25-4)$$

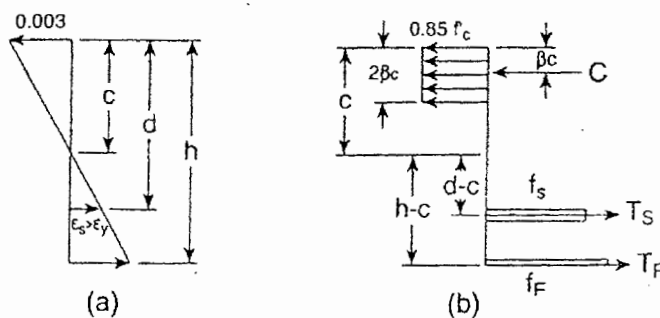
$$P_4 = \frac{6M_4}{L} \quad (26-4)$$

$$\left( \frac{P}{\delta} \right)_4 = K(EI)_4 \quad (27-4)$$

$$(EI)_4 = E_f b t_f (h - c)^2 + E_t A_s (d - c)^2 \quad (28-4)$$

$$\Delta_4 = \frac{P_4}{\left( \frac{P}{\delta} \right)_4} \quad (29-4)$$

$$\delta_4 = \delta_3 + \Delta_4 \quad (30-4)$$

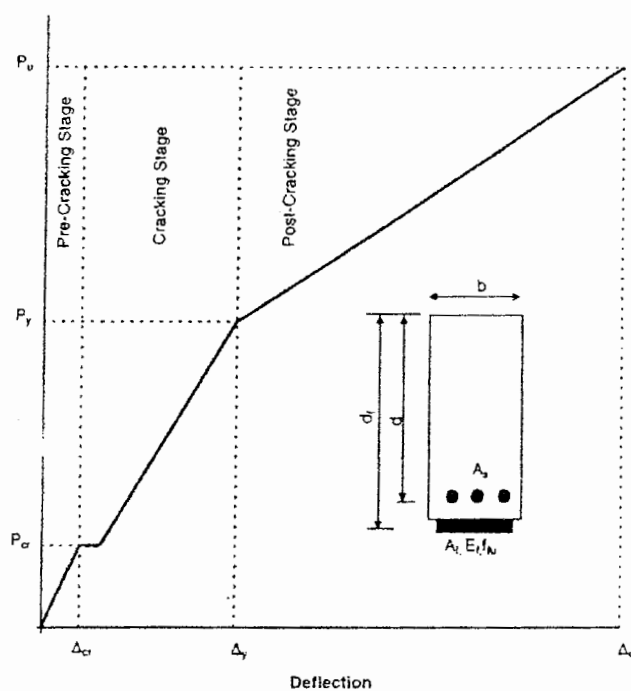


شکل ۴-۷: نحوه تغییرات کرنش و تنش در ارتفاع مقطع (ناحیه چهارم)



#### ۲-۱-۴: مدل دوم

در این مدل که توسط (Mihilmy et al. (2000) ارائه شده است؛ همانند مدل قبل، مراحل مختلف مقطع را در طول بارگذاری به چند ناحیه تقسیم کرده است. همانطور که در شکل ۸-۴ مشاهده می‌گردد، این نواحی عبارتند از ناحیه قبل از ترک خوردگی، ناحیه ترک خورده و ناحیه بعد از ترک خوردگی. روابط این مدل نیز تقریباً شبیه به مدل قبل بوده که از تکرار آنها صرف‌نظر می‌گردد. جهت آشنایی بیشتر با این مدل می‌توان به مرجع مربوطه مراجعه نمود.

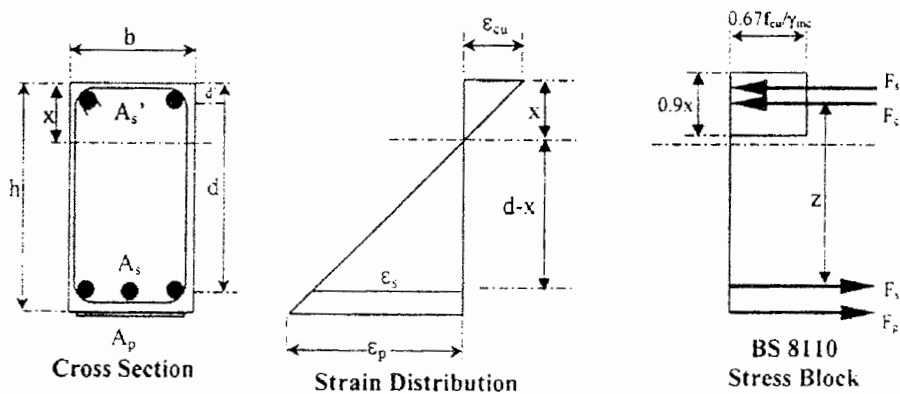


شکل ۸-۴: تقسیم بندی دیاگرام نیرو - تغییر مکان برای تیر تقویت شده با FRP

#### ۳-۱-۴: مدل سوم

در این مدل که توسط (Tann et al. (2001) ارائه شده است، تنها به حالت نهایی تیر تحت خمش که توسط FRP تقویت شده است پرداخته و در واقع یک مدل طراحی ارائه کرده است. روند کار این مدل شبیه به آیین نامه (UK. Concrete Society (2000) می‌باشد که در فصل سوم بدان

اشاره شد . جهت محاسبه مقاومت نهایی مقطع همانطور که در شکل ۴-۹ دیده می شود ، تغییرات کرنش به صورت خطی فرض شده و از مقاومت بتن کششی صرفنظر نموده است . علاوه بر آن ، برای در نظر گرفتن مقاومت فشاری بتن ، از بلوک تنشی معادل استفاده نموده است .



شکل ۴-۹ : نمایش نیروهای برآیند و نحوه تغییرات کرنش در ارتفاع مقطع

در این راستا مدل‌های طراحی مختلفی در آیین نامه های مختلف وجود دارد که تعدادی از آنها در فصل سوم معرفی شده اند . همانطور که ملاحظه شد ، معمولا در این روابط طراحی ، حالت نهایی بررسی شده و رفتار تیر در طول بارگذاری بررسی نمی گردد .

#### ۴-۱-۴ : مدل چهارم

در این مدل که توسط Toutanji et al. (2001) ارائه شده است ، با ارائه تعدادی روابط ساده زیر برای یک تیر تحت بارگذاری چهار نقطه ای، نتایج تئوری و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده است . در ابتدا عمق تارخشی را با فرض بلوک تنشی معادل برای بتن فشاری و صرفنظر کردن از بتن کششی از رابطه زیر محاسبه کرده و در نهایت ممان مقاوم مقطع را از رابطه (۴-۳۲) بدست آورده است .

$$c = \frac{A_f \cdot f_f + A_s \cdot f_s}{0.5b \cdot f'_c} \quad (۴-۳۱)$$

$$M = A_s \cdot f_s \cdot (d - \frac{c}{2}) + A_f \cdot f_f \cdot (h - \frac{c}{2}) \quad (۳۲-۴)$$

در نهایت با کمک رابطه ساده زیر مقدار تغییرمکان در وسط دهانه تیر را محاسبه نموده است .

$$\Delta = \frac{F \cdot c}{24EI} (3l^2 - 4c^2) \quad (۳۳-۴)$$

#### ۲-۴ : مدل‌های ارائه شده در رابطه با جداشدگی FRP

اما مسئله مهمی که همیشه مدنظر محققین این فن بوده و استفاده از FRP را کمی دچار مشکل می نماید ، بروز گسیختگی های غیرشکل پذیر و ترد تیرهای تقویت شده با FRP ناشی از جداشدگی آنها می باشد . براساس (Teng et al. (2001) جداشدگیهای ورقه های FRP در تقویت خمشی به چهار دسته اصلی تقسیم می شود که عبارتند از :

۱. شروع جداشدگی در بتن کششی
۲. جداشدگی بین لایه چسب و سطح بتنی
۳. جداشدگی در خود چسب
۴. جداشدگی بین لایه چسب و FRP

مطالعات و آزمایشات انجام شده توسط دانشمندان مختلف نشان داده است که جداشدگی نوع اول به دلیل کمتر بودن مقاومت کششی بتن نسبت به چسب و اتصال آن ، بسیار رایجتر بوده و سه نوع جداشدگی دیگر به ندرت رخ می دهد ((fib (2001)). اما خود جداشدگی نوع اول به چند نوع تقسیم می شود که عبارتند از :

۱. جداشدگی در انتهای لایه FRP در ضخامت کمی از بتن کششی
۲. جداشدگی به صورت جداشدن پوشش کششی بتن از محل آرماتورهای کششی طولی

۳. جداشدگی در محل ترکهای خمشی

۴. جداشدگی در محل ترکهای برشی

برای هریک از این نوع چهار جداشدگی ، مدل‌هایی برای پیش بینی آن توسط دانشمندان مختلف ارائه شده است . اما در بین این چهار مود گسیختگی ، دو مود اول رایجتر بوده و لذا توسط محققین بیشتری مورد مطالعه قرار گرفته است . در زیر چندین مدل ارائه شده در رابطه با این دو مود گردآوری شده اند .

#### ۴-۲-۱ : مدل‌های مربوط به جداشدگی در انتهای FRP

در مود اول همانطور که در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است ، جداشدگی به همراه لایه نازکی از بتن چسبیده به FRP رخ داده که به علت تمرکز تنش ، از انتهای FRP شروع شده و به سمت وسط دهانه ادامه پیدا می کند و در نهایت FRP از حیز ارتفاع ساقط شده و تیر گسیخته می گردد .



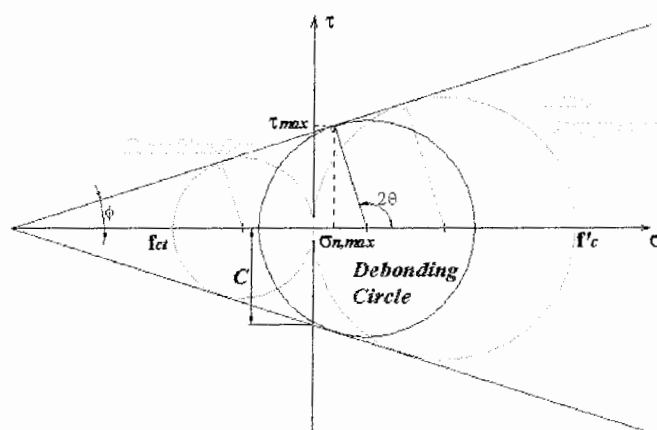
شکل ۴-۱۰ : جداشدگی در انتهای FRP

اساس کار تمام مدل‌های ارائه شده در این مورد، بر پایه محاسبه تنش برشی و تنش نرمال ماکزیمم بین FRP و بتن بوده که در انتهای لایه FRP رخ می‌دهد. روابط این مدل‌ها در حالیکه توسط محققین مختلف ارائه شده است، بسیار شبیه به هم بوده و تفاوت اندکی دارند؛ لذا روند محاسبه تنش برشی و تنش نرمال ماکزیمم برای مدل اول به طور کامل در پیوست - الف ارائه شده و از تکرار آنها برای مدل‌های دیگر اجتناب شده است.

همانطور که اشاره شد، با توجه به اینکه معمولاً بتن نسبت به چسب و FRP، خصوصاً در کشش ضعیفتر می‌باشد، گسیختگی در بتن زودتر از دیگر اجزاء رخ داده و می‌توان با کمک معیار شکست مور - کولمب<sup>۱</sup>، جداسدگی لایه FRP را در انتهای آن بررسی نمود. اساس معیار این شکست بر پایه رابطه زیر می‌باشد، به گونه‌ای که اگر تنش برشی و نرمال از این نامعادله تبعیت کنند، گسیختگی رخ نخواهد داد (Brosens & Van Gemert 2001). به عبارت دیگر اگر، مختصات تنش نرمال و برشی در درون دو خط رسم شده در شکل ۴-۱۱ قرار گیرد، شرایط ایمن خواهد بود.

$$\tau + \sigma_n \tan \phi \leq C \quad (4-34)$$

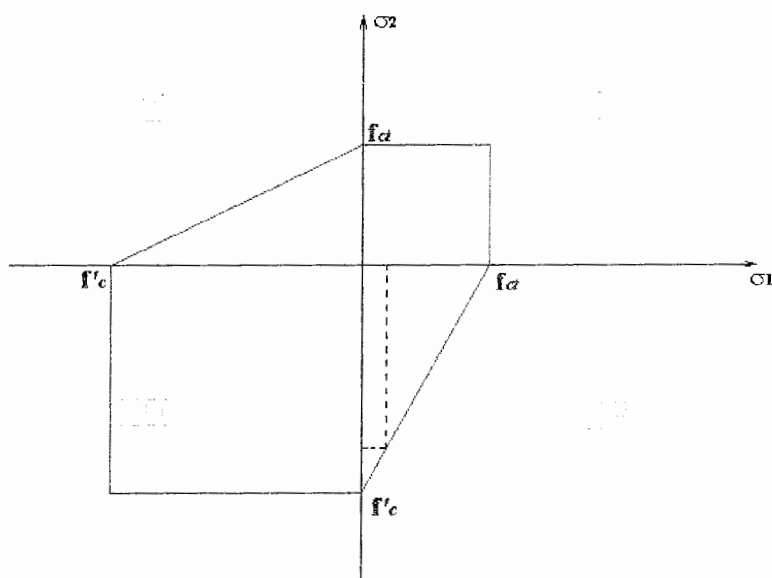
که در آن C، چسبندگی؛  $\phi$ ، زاویه اصطکاک داخلی؛  $\sigma_n$ ، تنش نرمال و  $\tau$  تنش برشی می‌باشد.



شکل ۴-۱۱: معیار شکست مور - کولمب

<sup>۱</sup> Mohr - Coulomb failure criterion

معیار شکست مور - کولمب را می توان به بیان دیگر براساس تنشهای اصلی ، به صورت شکل ۴-۱۲ نشان داد (Benham & Crawford 1990). براساس این شکل ، المان بتنی هنگامی گسیخته می شود که از مرز شش ضلعی نشان داده شده در شکل فراتر رود .



شکل ۴-۱۲: نمایش دیگر معیار شکست مور - کولمب

با داشتن مقادیر  $\sigma_n$  و  $\tau$  در انتهای FRP در المان بتنی ، می توان براساس دواير مور - کولمب ، تنشهای اصلی  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  را از روابط زیر محاسبه نمود .

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_n}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_n^2}{4} + \tau^2} \quad (۴-۳۵)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_n}{2} - \sqrt{\frac{\sigma_n^2}{4} + \tau^2} \quad (۴-۳۶)$$

با توجه به دو رابطه بالا ،  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  دارای علامتهای مختلف بوده و بنابراین در شکل ۴-۱۲ در ناحیه II یا IV قرار می گیرند ؛ اما با فرض اینکه راستای کشش مثبت باشد ، مقدار  $\sigma_1$  بزرگتر از صفر و  $\sigma_2$  کوچکتر از صفر شده و بنابراین در ناحیه IV قرار می گیرند . گسیختگی هنگامی رخ می دهد که مختصات مقادیر  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  از خط رسم شده در ناحیه IV فراتر رود . بنابراین خواهیم داشت :

$$\sigma_2 \leq \frac{f'_c}{f_{ct}} (\sigma_1 - f_{ct}) \quad (37-4)$$

که در آن  $f'_c$  و  $f_{ct}$  به ترتیب مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن می باشند. با جایگذاری دو رابطه (35-4) و (36-4) در رابطه (37-4)، خواهیم داشت:

$$\frac{\sigma_{n,max}}{2} - \sqrt{\frac{\sigma_{n,max}^2}{4} + \tau_{max}^2} \leq \frac{f'_c}{f_{ct}} \left( \frac{\sigma_{n,max}}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_{n,max}^2}{4} + \tau_{max}^2} - f_{ct} \right) \quad (38-4)$$

نهایتاً با ساده سازی رابطه بالا، به رابطه زیر خواهیم رسید:

$$\tau_{max}^2 \leq \frac{f'_c f_{ct}}{(f'_c + f_{ct})^2} f'_c f_{ct} - \frac{f'_c f_{ct}}{(f'_c + f_{ct})^2} (f'_c - f_{ct}) \sigma_{n,max} - \frac{f'_c f_{ct}}{(f'_c + f_{ct})^2} \sigma_{n,max}^2 \quad (39-4)$$

بنابراین با داشتن مقادیر تنش برشی و تنش نرمال ماکزیمم ( $\sigma_{n,max}$  و  $\tau_{max}$ )، می توان جداسدگی در انتهای FRP را کنترل نمود.

مدلهای ارائه شده را می توان به صورت زیر معرفی نمود. همانطور که در فصلهای آتی خواهیم دید، هدف از معرفی این مدلها، انتخاب مناسبترین آن جهت استفاده در مدل اصلی می باشد.

#### ۴-۱-۱-۲-۱: مدل اول کنترل جداسدگی در انتهای FRP

در این مدل که توسط Malek et al. (1998) ارائه گردیده، به طور کامل در پیوست معرفی شده است. اساس این مدل بر پایه محاسبه تنش برشی و نرمال ماکزیمم و جایگزینی آن در رابطه تئوری شکست مور - کولمب برای کنترل عدم گسیختگی در بتن و نهایتاً کنترل عدم جداسدگی در انتهای لایه FRP می باشد. مقدار تنش برشی و نرمال ماکزیمم که در ناحیه انتهایی لایه FRP رخ می دهد به ترتیب از دو رابطه (40-4) و (41-4) محاسبه می شوند. پارامترهای به کار رفته در این روابط، در پیوست - الف تعریف شده که از معرفی مجدد آنها اجتناب می گردد.

$$\tau_{\max} = t_f n_f (b_3 \sqrt{A} + b_2) \quad (40-4)$$

$$\sigma_{n,\max} = \frac{k_n}{2\beta^3} \left( \frac{V_f}{E_f I_f} - \frac{V_c + \beta M_0}{E_c I_c} \right) + \frac{q E_f I_f}{b_f E_c I_c} \quad (41-4)$$

#### ۲-۱-۲-۴: مدل دوم کنترل جدانشدگی در انتهای FRP

در این مدل که توسط Alfarabi et al. (1994) معرفی شده است، پایه آن نیز براساس تنش‌های بین لایه ای نرمال و برشی می باشد. اساس این مدل توسط Roberts (1989) برای صفحات فولادی ارائه شده است. مقدار تنش برشی و تنش نرمال ماکزیمم در این مدل نسبت به مدل اول تفاوت داشته و از روابط زیر محاسبه می شود:

$$\tau_{\max} = \left\{ V_0 + \left[ \frac{k_s}{E_f b_f t_f n_f} \right]^{1/2} M_0 \right\} \frac{b_f t_f n_f}{I_{ff} b_f} (h_f - c) \quad (42-4)$$

$$\sigma_{n,\max} = \tau t_f n_f \left[ \frac{k_n}{4 E_f I_f} \right]^{1/4} \quad (43-4)$$

در دو رابطه بالا  $E_f$ ،  $b_f$ ،  $t_f$  و  $n_f$  به ترتیب مدول الاستیسیته، عرض، ضخامت و تعداد لایه های FRP بوده و  $V_0$  و  $M_0$  به ترتیب نیروی برشی و ممان وارده ناشی از بارهای خارجی در محل قطع FRP می باشند.  $h_f$ ، عمق تیر از تار فشاری تا مرکز ضخامت FRP و  $I_{ff}$  و  $I_f$  به ترتیب ممان اینرسی مقطع معادل نسبت به FRP و ممان اینرسی صفحه FRP می باشند. تفاوت دیگر این مدل در دو پارامتر سختی برشی و سختی نرمال چسب ( $k_n$  و  $k_s$ ) بوده که از روابط زیر محاسبه می گردند.

$$k_s = G_a \frac{b_a}{t_a} \quad (44-4)$$



$$k_n = E_a \frac{b_a}{t_a} \quad (45-4)$$

در دو رابطه بالا ،  $E_a$  ،  $G_a$  ،  $b_a$  و  $t_a$  به ترتیب مدول برشی ، مدول الاستیسیته ، عرض و ضخامت چسب می باشند .

#### ۳-۱-۲-۴ : مدل سوم کنترل جدشدگی در انتهای FRP

در این مدل که توسط (Brosens et al. (2001 ارائه گردیده است ، اساس کار همانند دو مدل قبلی می باشد ، با این تفاوت که اندکی در روابط خود با مدل اول اختلاف دارد . این اختلافها در روابط زیر آورده شده اند . دیگر روابط دقیقا همانند مدل اول بوده که از تکرار آنها اجتناب می شود .

$$A = \frac{\tau_{lm}}{s_{lm}} \cdot \frac{1}{E_f t_f n_f} \quad (46-4)$$

$$\frac{s_{lm}}{\tau_{lm}} = 2.4 \frac{h_{ref}}{E_c} + 2.5 \frac{h_m}{E_m} + n_f \frac{t_a}{G_a} \quad (47-4)$$

که در آن  $\tau_{lm}$  تنش برشی ماکزیمم در بین لایه FRP و بتن در کشش خالص بوده و  $s_{lm}$  مقدار لغزش بین FRP و بتن در محلی که تنش برشی برابر  $\tau_{lm}$  می شود ، است .  $E_f$  ،  $t_f$  و  $n_f$  نیز به ترتیب مدول الاستیسیته ، ضخامت و تعداد لایه های FRP می باشد . پارامترهای  $h_m$  و  $h_{ref}$  به ترتیب عمق مؤثر بتن (که معمولا بین 35 تا 45 میلیمتر می باشد) و ضخامت لایه بتونه اپوکسی (معمولا بین 2 تا 5 میلیمتر تغییر می کند) بوده و  $E_m$  و  $E_c$  به ترتیب مدول الاستیسیته بتونه و مدول الاستیسیته بتن می باشند . تفاوت دیگر روابط این مدل با مدل اول در رابطه ارائه شده برای محاسبه تنش نرمال است که قدری ساده تر شده است .

$$\sigma_n = \frac{k_n M_0}{2\beta^2 E_c I_c} e^{-\beta x} [\cos(\beta x) - \sin(\beta x)] \quad (48-4)$$

$$\sigma_{n,max} \approx \frac{k_n M_0}{2\beta^2 E_c I_c} \quad (49-4)$$

در این مدل جهت کنترل جداسدگی براساس معیار شکست مور - کولمب از همان رابطه (۴-۳۹) استفاده می شود ، با این تفاوت که به جای  $f_c$  از  $f_{cm}$  و به جای  $f_{ct}$  از  $f_{ctm}$  استفاده می گردد که براساس آیین نامه CEB و یا Eurocode2 قابل محاسبه هستند . بنابراین رابطه (۴-۳۹) به صورت زیر بازنویسی می شود .

$$\tau_{\max}^2 \leq \frac{f_{cm} f_{ctm}}{(f_{cm} + f_{ctm})^2} f_{cm} f_{ctm} - \frac{f_{cm} f_{ctm}}{(f_{cm} + f_{ctm})^2} (f_{cm} - f_{ctm}) \sigma_{n,\max} - \frac{f_{cm} f_{ctm}}{(f_{cm} + f_{ctm})^2} \sigma_{n,\max}^2 \quad (۴-۵۰)$$

#### ۴-۱-۲-۴ : مدل چهارم کنترل جداسدگی در انتهای FRP

این مدل توسط Rizkalla et al. (2003) ارائه گردیده است . در این مدل نیز با محاسبه تنش برشی و نرمال ماکزیمم بین لایه FRP و بتن در ناحیه انتهایی لایه FRP و استفاده از معیار شکست مور - کولمب برای بتن (رابطه ۴-۳۹) ، می توان نیروی جداسدگی را برای تیر بتنی با بارگذاری سه نقطه ای و یا چهار نقطه ای ، محاسبه نمود . روابط این مدل دقیقاً همانند روابط مدل اول بوده با این تفاوت که بارگذاری به صورت متمرکز فرض شده و در رابطه محاسبه تنش نرمال ماکزیمم به جای استفاده از ممان اینرسی بتن ، از ممان اینرسی مقطع معادل استفاده می شود .

$$a_2 = \frac{F}{2} \quad (۴-۵۱)$$

$$\sigma_{n,\max} = \frac{k_n}{2\beta^3} \left( \frac{V_f}{E_f I_f} - \frac{V_c + \beta M_0}{E_c I_{trc}} \right) \quad (۴-۵۲)$$

#### ۵-۱-۲-۴ : مدل پنجم کنترل جداسدگی در انتهای FRP

این مدل که توسط Saadatmanesh et al. (1998) ارائه شده است ، بسیار شبیه به مدل اول بوده و فقط اندکی در روابط خود تفاوت دارد . این تفاوت در نحوه محاسبه  $V_c$  و  $M_0$  می باشد به گونه

ای که مقادیر جدید آنها از روابط زیر بدست می آید. پارامتر  $M_0^*$  جایگزین  $M_0$  در رابطه (۴-۴۱) می شود.

$$V_c = V_0 - 0.5hb_f t_f n_f (b_3 \sqrt{A} + b_2) \quad (۵۳-۴)$$

$$M_0^* = M_0 + 0.5t_a b_f \tau_{\max} \quad (۵۴-۴)$$

#### ۶-۱-۲-۴: مدل ششم کنترل جداشدگی در انتهای FRP

این مدل توسط Ziraba et al. (1994) ارائه شده است. شرط کنترل جداشدگی در این مدلها نیز همان معیار گسیختگی مور - کولمب می باشد. در این مدل با توجه به رابطه کنترل کننده (۴-۵۵) که شکل دیگری از معیار شکست مور - کولمب است و قبلا بدان اشاره شد، مقدار برش ماکزیمم ممکن در انتهای FRP در آستانه جداشدگی آن را براساس رابطه (۴-۵۶) محاسبه می نماید.

$$\tau + \sigma_y \tan \phi \leq C \quad (۵۵-۴)$$

$$V_{db,end} = \frac{f'_c}{C_{R1}} \left[ \frac{C}{\alpha_1 f_{ct} (1 + \alpha_2 C_{R2} \tan \phi)} \right]^{4/5} \quad \text{for } \frac{L_1}{h} < 3 \quad (۵۶-۴)$$

در رابطه (۴-۵۶)،  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  دو ضریب بوده و به ترتیب با مقادیر 35 و 1.1 برابرند.  $\phi$  نیز، زاویه اصطکاک داخلی بوده و در این مدل برابر  $28^\circ$  در نظر گرفته می شود. مقدار  $C$  که ضریب چسبندگی می باشد، در این مدل بین 2.68 MPa تا 5.36 MPa پیشنهاد شده است. اما در مدل Ziraba et al. (1995) این دامنه به مقادیر 4.8 MPa تا 9.5 MPa ارتقاء پیدا کرده است. Teng et al. (2001) مقدار 7.15 MPa را برای زاویه اصطکاک داخلی،  $C$ ، پیشنهاد نموده است. پارامترهای  $C_{R1}$  و  $C_{R2}$  از روابط زیر بدست می آیند.

$$C_{R1} = \left[ 1 + \left( \frac{k_s}{E_f t_f n_f b_f} \right)^{1/2} \frac{M_0}{V_0} \right] \frac{b_f t_f n_f}{I_{trf} b_a} (h - c) \quad (57-4)$$

$$C_{R2} = t_f n_f \left( \frac{k_n}{4E_f I_f} \right)^{1/4} \quad (58-4)$$

سختی برشی و سختی نرمال چسب ( $k_n$  و  $k_s$ ) از دو رابطه زیر محاسبه می شوند که نسبت به مدل اول قدری متفاوت است ، چراکه در مدل اول سختی برشی و سختی نرمال در واحد عرض محاسبه گردید .

$$k_s = \frac{G_a b_a}{t_a} \quad (59-4)$$

$$k_n = \frac{E_a b_a}{t_a} \quad (60-4)$$

#### ۷-۱-۲-۴: مدل هفتم کنترل جداشدگی در انتهای FRP

این مدل براساس نتایج تحقیقات (Tumialan et al. (1999) می باشد . روابط مربوط به محاسبه تنش برشی و نرمال ماکزیمم در بین لایه FRP و بتن در ناحیه انتهایی لایه ، کمی با مدل‌های قبل تفاوت داشته و به صورت زیر می باشد .

$$\tau = \overline{C_{R1}} \frac{E_f}{E_c} V_0 \quad (61-4)$$

$$\sigma_y = C_{R2} \cdot \tau \quad (62-4)$$

که در آن  $\overline{C_{R1}}$  فرم اصلاح شده رابطه (57-4) بوده و  $C_{R2}$  نیز از رابطه (58-4) محاسبه می گردد .

$$\overline{C_{R1}} = \left[ 1 + \left( \frac{k_s}{E_f t_f n_f b_f} \right)^{1/2} \frac{M_0}{V_0} \right] \frac{b_f t_f n_f}{I_{trc} b_a} (h - c) \quad (63-4)$$

#### ۲-۲-۴: مدل‌های مربوط به جداسدن پوشش بتنی از محل آرماتورهای طولی

در مود دوم جداسدگی همانطور که در شکل ۴-۱۳ مشاهده می‌شود، جداسدگی با یک ترک برشی در انتهای FRP شروع شده و بعد از رسیدن این ترک به آرماتورهای طولی کششی موجود در داخل تیر، به علت کاهش سطح مقطع بتن در راستای آرماتورها، ترک تغییر زاویه داده و در امتداد آرماتورها رشد می‌کند به طوری که نهایتاً، پوشش بتنی، از تیر جدا می‌گردد. این نوع جداسدگی نسبت به مود اول کمتر رخ داده ولی احتمال وقوع آن بسته به شرایط، بیشتر از دو مود سوم و چهارم می‌باشد. در این پایان نامه دو مدل که کنترل کننده این نوع جداسدگی می‌باشند، گردآوری شده که به صورت زیر می‌باشند.



شکل ۴-۱۳: جداسدن پوشش بتنی

#### ۴-۲-۲-۱: مدل اول کنترل جداشدن پوشش بتنی در انتهای FRP

این مدل که توسط Shehata et al. (2001) ارائه گردیده است، با محدود کردن تنش برشی بین FRP و بتن و محاسبه تنش ماکزیمم در FRP براساس این تنش برشی، رابطه ساده ای جهت کنترل جداشدن پوشش بتنی مورد استفاده قرار گرفته است که در زیر آورده شده است.

$$\sigma_{f,lim} = \frac{\tau_{lim} \cdot L_f}{l_f n_f} \quad (۴-۶۴)$$

$$\tau_{lim} = 0.3 f_{ct} \quad (۴-۶۵)$$

در روابط بالا  $f_{ct}$ ، مقاومت کششی بتن و  $L_f$  فاصله بار تا انتهای لایه FRP می باشد.

#### ۴-۲-۲-۲: مدل دوم کنترل جداشدن پوشش بتنی در انتهای FRP

در این مدل که از مدل اول پیچیده تر بوده و از لحاظ تئوری بسیار قویتر می باشد، توسط Raouf et al. (2000) ارائه شده است. این مدل از اصلاح مدل نیمه تجربی در رابطه با تقویت خمشی تیرهای بتنی با صفحات فولادی شکل گرفته و با تعیین تنش حداقل و حداکثر برای صفحه FRP، بازه ای را به عنوان مرز احتمالی جداشدن پوشش بتنی معرفی نموده است.

این روش وابستگی زیادی به فاصله ترکهای تشکیل شده بر روی تیر دارد. همانطور که در شکل ۴-۱۴ نیز مشاهده می شود، شروع جداشدگی بتن از محل ترکها و در بین دو ترک، رخ خواهد داد. لذا جهت محاسبه فاصله حداقل و حداکثر ترکهای ایجاد شده، از یک رابطه تئوری کلاسیک به صورت زیر استفاده می شود.

$$L_{min}^p = \frac{A_e f_{ct}}{u \left[ \sum O_{bars} + b_f \right]} \quad (۴-۶۶)$$

$$L_{max}^p = 2L_{min}^p \quad (۴-۶۷)$$

که در آنها  $L_{min}^P$  و  $L_{max}^P$  به ترتیب حداقل و حداکثر فاصله ترکها؛  $\Sigma O_{bars}$ ، مجموع محیط آرماتورهای کششی؛  $b_f$ ، عرض لایه FRP؛  $u$ ؛ متوسط تنش اتصال بین آرماتورها و بتن؛  $f_{ct}$ ، مقاومت کششی بتن و نهایتاً  $A_e$ ، مساحت بتن کششی می باشد. جهت محاسبه  $A_e$ ،  $u$  و  $f_{ct}$  از روابط زیر استفاده می گردد.

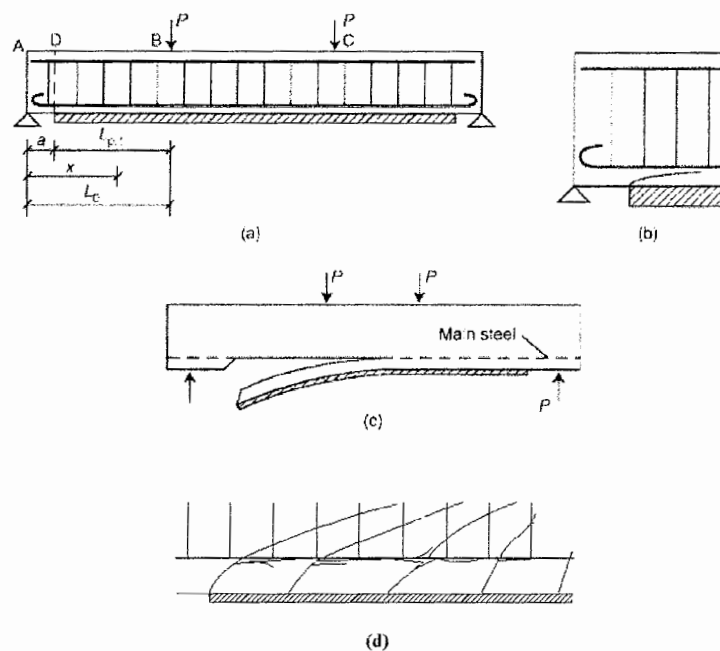
$$A_e = 2h_1b \quad (۶۸-۴)$$

که در آن  $h_1$  نصف ارتفاع بتن کششی است.

$$u = 0.28\sqrt{f_{cu}} \quad (۶۹-۴)$$

$$f_{ct} = 0.36\sqrt{f_{cu}} \quad (۷۰-۴)$$

که در آنها  $f_{cu}$ ، مقاومت فشاری مکعبی بتن بوده و برحسب MPa می باشد.



شکل ۴-۱۴: چگونگی بروز جداشدن پوشش بتنی از محل ترکها

جهت کنترل جداسدن پوشش بتنی در این مدل ، یک ناحیه از پوشش بتنی را که بین دو ترک متوالی قرار دارد ، جدا نموده و همانند یک تیر بتنی عمیق که به صورت طره بارگذاری شده است ، مورد بررسی قرار می گیرد (شکل ۴-۱۵) . با توجه با این شکل ، تنش در انتهای فوقانی پوشش بتنی از رابطه زیر محاسبه می شود .

$$\sigma_A = \frac{M_A \left( \frac{L}{2} \right)}{I_A} \quad (4-71)$$

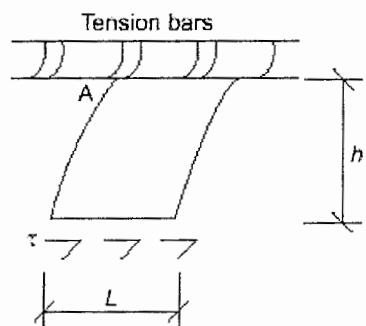
که در آن :

$$M_A = \tau L b_f h' \quad (4-72)$$

$$I_A = \frac{b L^3}{12} \quad (4-73)$$

در دو رابطه بالا ،  $b_f$  ، عرض لایه FRP ،  $b$  ، عرض تیر بتنی ؛  $\tau$  ، تنش برشی بین بتن و صفحه FRP ؛  $L$  ، فاصله بین دو ترک و  $h'$  ، ارتفاع پوشش بتنی آرماتورها می باشد . با جایگذاری دو رابطه (۴-۷۲) و (۴-۷۳) در رابطه (۴-۷۱) ، مقدار تنش در نقطه A ( $\sigma_A$ ) از رابطه زیر بدست خواهد آمد .

$$\sigma_A = \frac{6\tau h' b_f}{L b} \quad (4-74)$$



شکل ۴-۱۵ : رفتار بتن به صورت دندانه ای بین دو ترک متوالی ایجاد شده بر روی تیر



در لحظه جداشدن پوشش بتنی،  $\sigma_A$  برابر با  $f_{ct}$  (مقاومت کششی بتن) خواهد شد. بنابراین، تنش برشی بین FRP و بتن که باعث جداشدن پوشش بتنی می‌گردد، از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\tau = \frac{f_{ct} L b}{6 h' b_f} \quad (75-4)$$

با توجه به مقادیر حداقل و حداکثر فاصله ترکها، مرز ماکزیمم و مینیمم تنش برشی از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$\tau_{\min} = \frac{f_{ct} L_{\min}^p b}{6 h' b_f} \quad (76-4)$$

$$\tau_{\max} = \frac{f_{ct} L_{\min}^p b}{3 h' b_f} \quad (77-4)$$

با توجه به ناحیه ای از تیر که در برش قرار گرفته است، رابطه زیر برقرار خواهد بود.

$$\sigma_s = \frac{z L_p}{t_f} \quad (78-4)$$

که در آن  $\sigma_s$ ، تنش طولی لایه FRP در فاصله  $L_p$  از انتهای آن؛  $t_f$ ، ضخامت لایه FRP و  $L_p$ ، طول مؤثری از FRP که در ناحیه برشی قرار داشته و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$L_p = \min\{L_{p,1}, L_{p,2}\} \quad (79-4)$$

که در آن  $L_{p,1}$ ، فاصله محل بار تا انتهای FRP بوده و  $L_{p,2}$  براساس یک رابطه نیمه تجربی به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\begin{cases} L_{p,2} = L_{\min}^p (24 - 0.5 L_{\min}^p) & L_{\min}^p \leq 40 \text{ mm} \\ L_{p,2} = 4 L_{\min}^p & L_{\min}^p > 40 \text{ mm} \end{cases} \quad (80-4)$$

که در آن  $L_{min}^P$  ، فاصله حداقل ترکهای ایجاد شده بر روی تیر بوده که از رابطه (۴-۶۶) محاسبه می گردد . نهایتاً با جایگذاری روابط (۴-۶۶) ، (۴-۷۶) و (۴-۷۷) در رابطه (۴-۷۸) ، می توان مرز حداقل و حداکثر برای تنش در طول FRP در آستانه جداشدن پوشش بتنی را از روابط زیر بدست آوریم .

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{f(\min)} = 0.154 \frac{L_p h_1 b^2 \sqrt{f_{cu}}}{h' b_f t_f n_f (\sum O_{bars} + b_f)} \\ \sigma_{f(\max)} = 2 \sigma_{f(\min)} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (۸۱-۴) \\ (۸۲-۴) \end{array}$$

### ۳-۴ : نتایج

با دقت در بخش ۴-۱ از این فصل به خوبی می توان دید که خلاء وجود روابط تئوری نسبتاً دقیق و با فرضیاتی نزدیکتر به واقعیت در مدل‌های ارائه شده جهت تحلیل تیرهای بتنی تقویت شده با FRP در خمش ، به خوبی احساس شده و به نظر می رسد یک فعالیت مدون جهت بررسی دقیقتر رفتار FRP و اثر آن در تمامی مراحل از شروع بارگذاری ، ترک خوردگی بتن ، تسلیم شدگی فولاد و نهایتاً تا گسیختگی تیر ، ضروری است . علاوه براین در بیشتر مدل‌های ارائه شده (چه مدل‌های طراحی خمشی و چه مدل‌های مربوط به مودهای مختلف جداشدگی) به جنبه موضوعی پرداخته و جامعیت لازم برای طراحی را ندارند . لذا هدف از این پایان نامه ، برطرف کردن نسبی این خلاء با فرضیات نسبتاً واقعی بوده است . در این رابطه با استفاده از رفتار تقریباً واقعی هر یک از اجزای تیر که در خمش دخالت می کنند (بتن فشاری ، بتن کششی ، بتن ترک خورده ، آرماتورهای فشاری ، آرماتورهای کششی و مواد FRP) ، رفتار تیر از شروع بارگذاری تا لحظه گسیختگی مورد مطالعه قرار می گیرد . همچنین جهت کنترل پدیده جداشدگی ، با توجه به مدل‌های ارائه شده و نتایج نمونه های مختلف ، مناسبترین مدلها برای دو مود جداشدگی اول و دوم (جداشدگی در انتهای FRP و جداشدن پوشش بتنی) که رایجترین انواع جداشدگی نیز می باشند ، انتخاب شده و در کنار مدل اصلی قرار گرفته اند و نهایتاً مدل نسبتاً کاملی ارائه خواهد شد .

## فصل پنجم : معرفی مدل‌های ارائه شده در پایان نامه

### ۵-۱ : مقدمه

#### ۵-۱-۱ : مدل‌های مربوط به تحلیل تیرهای تقویت شده در خمش

در این پایان نامه به جهت بررسی رفتار یک تیر که به وسیله FRP تقویت خمشی گردیده ، مدل‌های تئوری نسبتاً دقیقی ارائه شده است . در این مدل‌ها سعی بر آن بوده است که از فرضیات ساده شده که معمولاً در آیین نامه ها مورد استفاده قرار می گیرد ، استفاده نکرده و تنها چند فرض نسبتاً معقول را در دستور کار خود قرار داده است . همچنین در این مدل‌ها ، رفتار تیر از بدو بارگذاری تا مراحل ترک خوردگی بتن ، تسلیم شدگی فولاد و در نهایت گسیختگی تیر مورد بررسی قرار می گیرد . این در حالی است که در آیین نامه ها ، تنها به محاسبه مقاومت نهایی می پردازد . بنابراین با داشتن رفتار نیرو- تغییرمکان در وسط تیر ، اطلاعات جامعی را می توان بدست آورد که از آنجمله می توان به محاسبه شکل پذیری تیر اشاره کرد . همچنین به جهت آنکه رفتار واقعی اجزاء در این مدل‌ها استفاده شده است ، نتایج آنها نسبت به نتایج تجربی بسیار نزدیک بوده و می توان از این مدل به جای انجام آزمایشات پرهزینه و زمان بر در جهت بررسی رفتار تیرها بعد از تقویت با FRP و قبل از

آن ، استفاده نمود . همچنین با استفاده از یک ضریب ایمنی می توان از این مدل برای روابط طراحی استفاده کرد .

از جمله فرضیات استفاده شده در این مدلها که به واقعیت نیز بسیار نزدیک می باشند ، می توان به موارد زیر اشاره کرد :

۱. فرضیه برنولی : صفحات مسطح عمود بر محور تیر بعد از بارگذاری مسطح باقی می مانند .

۲. اتصال بین FRP و بتن کامل فرض شده و از لغزش بین این دو صرفنظر می شود .

برای بررسی رفتار واقعی اجزاء تیر از جمله بتن در فشار ، کشش و حالت ترک خورده و همچنین فولاد ، از آیین نامه CEB-FIP استفاده شده که روابط نسبتاً دقیقی را ارائه نموده است . برای بتن فشاری به جای استفاده از بلوک تنشی معادل که معمولاً در آیین نامه ها به کار برده می شود ، رفتار سهموی آن مورد استفاده قرار می گیرد . در مورد بتن کششی ، این آیین نامه با ارائه یک رفتار دوخطی ، مدلی را در اختیار قرارداده است . این نکته لازم به ذکر است که در آیین نامه های طراحی تقویت با FRP ، کلاً از رفتار بتن کششی و بتن ترک خورده صرفنظر می کند . در آیین نامه CEB-FIP جهت بررسی رفتار ترک نیز از یک دیاگرام دوخطی که وابسته به عرض ترک می باشد ، استفاده می کند . در مدل ارائه شده در پایان نامه ، جهت بررسی مقاومت ترک در هر لحظه از این دیاگرام استفاده می گردد . در نظر گرفتن مقاومت ترک در مدل تأثیر چندانی بر مقاومت نهایی نخواهد گذاشت اما رفتار مدل در ناحیه شروع ترک خوردگی را بسیار نزدیکتر به نتایج عملی خواهد کرد .

برای فولاد نیز از یک دیاگرام دو خطی استفاده شده است . در مدل اصلی ، سخت شدگی فولاد نیز براساس نتایج آزمایش نمونه و در غیراینصورت براساس آیین نامه CEB-FIP در نظر گرفته شده و رفتار آن با حالتی که این سخت شدگی لحاظ نشود ، مقایسه گردیده است. تأثیر سخت شدگی فولاد تنها بعد از تسلیم شدن آن می باشد .

برای مواد FRP نیز با توجه به داده های گرفته شده از سازنده آن و یا آزمایشات انجام شده ، به صورت الاستیک تا لحظه گسیختگی ، فرض می گردد .

#### ۲-۱-۵ : مدل‌های مربوط به جداسدگی

همانطور که در فصل چهارم اشاره شد ، تا به امروز مدل‌های زیادی برای پیش بینی نیروی جداسدگی FRP ارائه گردیده است . از جمله رایجترین جداسدگیهایی که در تقویت خمشی تیرها با FRP رخ می دهد ، جداسدگی در انتهای لایه FRP بین FRP و بستر بتنی و جداسدگی پوشش کششی بتن در راستای میلگردهای طولی می باشد . در حالت اول همانطور که قبلا توضیح داده شد ، به دلیل بالاتر بودن مقاومت چسب نسبت به بتن در اغلب مواقع ، جداسدگی در نزدیکی سطح خارجی بتن اتفاق می افتد به گونه ای که لایه FRP به همراه پوسته نازکی از بتن از تیر جدا می گردد . به هرحال به دلیل بالا بودن امکان این دو نوع جداسدگی نسبت به دیگر جداسدگیها که در فصل ۴ آورده شده است ، بیشتر مدلها برپایه این دو نوع متمرکز شده و لذا دو مدل ارائه شده در این پایان نامه بابررسی مدل‌های موجود نسبت به نتایج آزمایشگاهی ، یک مدل برای جداسدگی در انتهای FRP (Malek et al. 1998) و یک مدل برای کنترل پدیده جداسدگی پوشش بتنی (Raouf et al. 2001) مورد استفاده قرار گرفته که نتایج آن در فصل جاری آورده شده است .

#### ۲-۵ : مدل‌های مربوط به تحلیل تیرهای تحت خمش

پایه مدل‌های ارائه شده براساس تغییرات کرنش در بالاترین تار فشاری بتن از مقدار 0 تا 0.0035 که معادل کرنش خردشدگی بتن طبق آیین نامه CEB-FIP است ، می باشد . روند کار اینگونه است که با افزایش کرنش در بالاترین تار فشاری بتن ، و توجه به فرضیه برنولی که نتیجه آن تغییرات

خطی کرنش در ارتفاع تیر است ، مقدار کرنش در هر ارتفاعی از مقطع با روابط ساده هندسی قابل محاسبه می باشد .

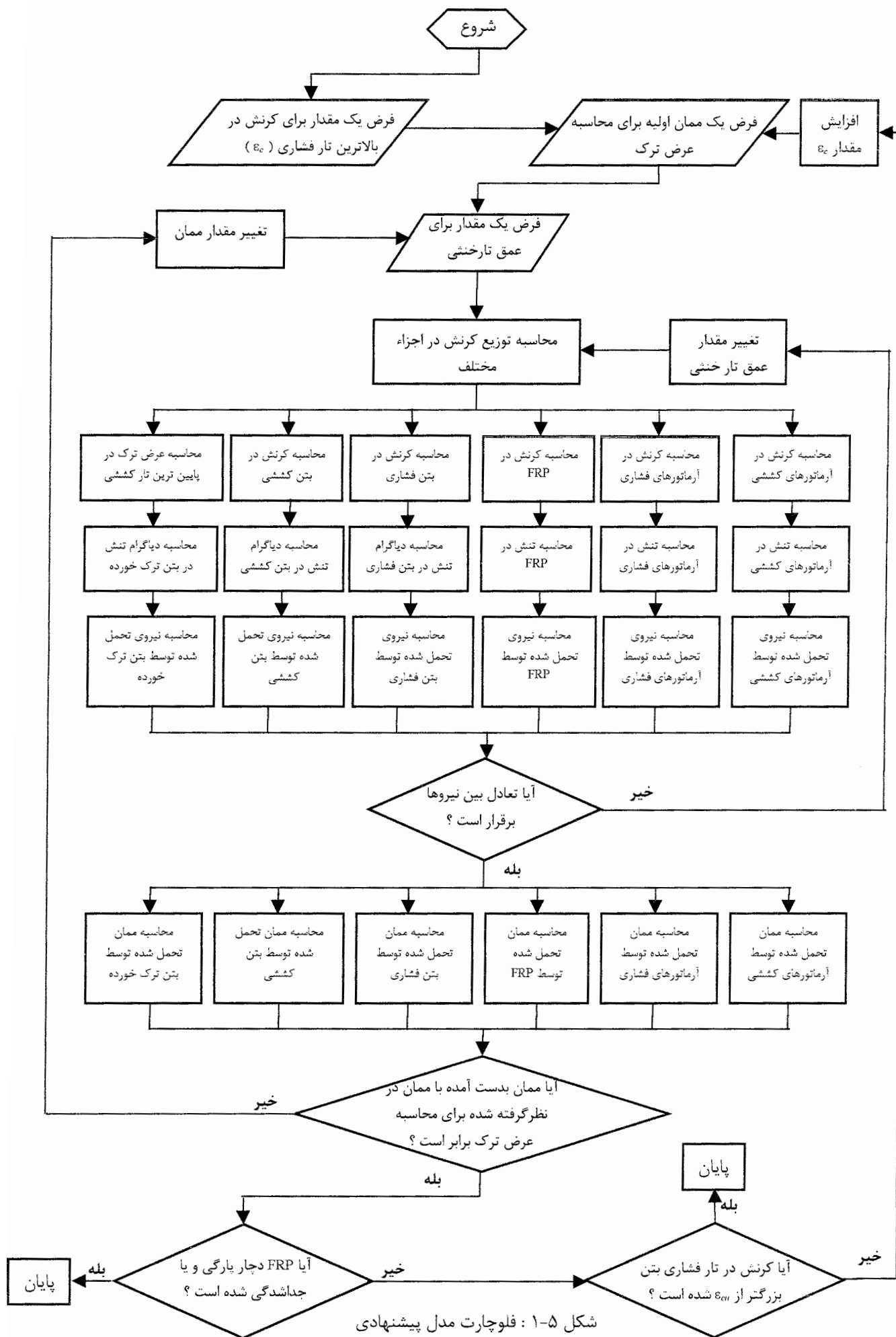
مدل پیشنهادی به شش قسمت عمده تقسیم می گردد که در فلوجارت شکل ۵-۱ نشان داده شده است . این قسمتها به ترتیب عبارتند از محاسبه ممان تحمل شده توسط آرماتورهای کششی ، آرماتورهای فشاری ، صفحات FRP ، بتن فشاری ، بتن کششی و در نهایت بتن ترک خورده .

برای محاسبه سهم هریک از اجزاء در مقاومت مقطع لازم است مقدار تنش و به تبع آن کرنش برای آن عضو محاسبه گردد . همانطور که گفته شد ، برای محاسبه کرنش برای هر یک از اجزاء می توانیم با داشتن کرنش در تار فشاری بتن ، مقدرا آن را از روابط ساده هندسی با فرض تغییرات خطی کرنش در ارتفاع تیر ، محاسبه کنیم ؛ اما این امر مستلزم آنستکه مقدار عمق تارخنثی را برای هر مقدار از کرنش در تار فشاری بتن داشته باشیم . برای رفع این مشکل از یک روند سعی و خطا استفاده می کنیم ، چراکه مقدار عمق تارخنثی خود وابسته به روابط تعادل نیروهای موجود در هر یک از اجزاء است . لذا برای هر مقدار از کرنش در تار فشاری بتن در ابتدا یک مقدار برای عمق تارخنثی حدس زده می شود . حال با داشتن عمق تارخنثی و روابط ارائه شده در این فصل ، می توان تنش و نهایتا نیرو در هریک از اجزاء را محاسبه نموده و با کمک تعادل نیروها ، صحت عمق تارخنثی قبلی را کنترل نماییم . در صورتی که اختلاف عمق تارخنثی بدست آمده با مقدار قبلی از دقتی که بدان احتیاج است ، کمتر بود ، می توانیم روند تکرار را قطع کرده و از مقدار عمق تارخنثی جدید در ادامه محاسبات استفاده کنیم .

حال با داشتن مقدار عمق تارخنثی ، می توان بازوی لنگر را برای نیروی مقاوم هریک از اجزاء ذکر شده محاسبه نموده و با ضرب آن در مقدار نیروی مقاوم ، ممان تحمل شده توسط هر جزء را بدست آوریم .

نکته ای که در رابطه با محاسبه ممان تحمل شده توسط ترک وجود دارد، آنستکه با داشتن کرنش در بالاترین تار فشاری بتن، عرض ترک در پایین ترین تار کششی توسط مدل ارائه شده در بخش ۵-۲-۳-۱، محاسبه شده و با فرض تغییرات خطی آن در ارتفاع تیر، مقدار بازشدگی ترک در هر ارتفاعی محاسبه می شود و نهایتاً تنش کششی و نیروی تحمل شده توسط ترک بدست می آید. در واقع در ناحیه ترک خورده، کرنش کششی موجود، آزاد شده و به صورت بازشدگی ترک نمایان می گردد؛ اما نکته قابل ذکر که در فلوچارت مشاهده می شود، آنستکه در مدل پیشنهادی، مقدار بازشدگی عرض ترک خود وابسته به ممان اعمال شده بر تیر می باشد، اما در ابتدای امر این مشکل وجود دارد که مقدار ممان نیز خود وابسته به جمع ممانهای تحمل شده توسط اجزاء مختلف بوده که خود ترک یکی از این اجزا می باشد. برای رفع این مشکل، در ابتدا از مدل ساده تر ارائه شده در بخش ۵-۲-۳-۲ که وابسته به ممان اعمال شده بر مقطع نمی باشد، عرض ترک را محاسبه نموده و با این مقدار، طبق الگوریتم نشان داده شده در شکل ۵-۱، ممان مقطع محاسبه می گردد. حال با توجه به این ممان بدست آمده، عرض ترک از روش اصلی محاسبه شده و در نتیجه ممان جدید حساب می گردد. در صورتی که ممان جدید با ممان قبلی تفاوت داشته باشد، روند تکرار ادامه پیدا کرده تا نهایتاً نتایج همگرا شده و به دقت مطلوب برسد.

افزایش کرنش در بالاترین تار فشاری بتن (ec)، هنگامی که مقدار آن به کرنش نهایی خردشدگی بتن (0.0035) برسد، متوقف شده و ممان نهایی تیر محاسبه می گردد. در این حالت همانطور که بیان شد، گسیختگی به صورت خردشدگی بتن فشاری خواهد بود؛ اما در صورتی که قبل از رسیدن ec به مقدار حد خردشدگی، تنش در FRP از حد نهایی آن و یا حد جدشدگی بیشتر گردد، روند افزایش کرنش در تار فشاری متوقف شده و گسیختگی به صورت پارگی FRP و یا جدشدگی آن خواهد بود.



شکل ۵-۱: فلوچارت مدل پیشنهادی

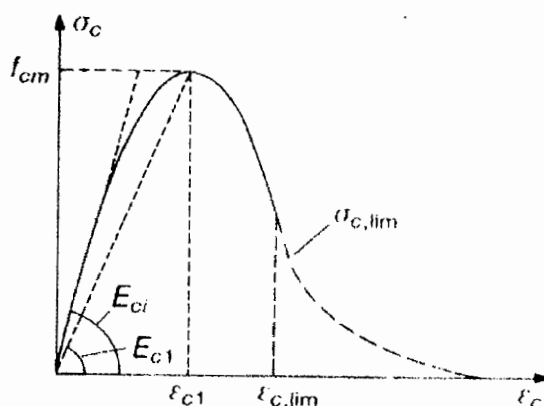


همانطور که مشاهده می شود ، در مدل پیشنهادی سه حلقه تکرار درون هم بوده که موجب حجیم شدن و مشکل شدن محاسبات ، خواهد شد ؛ لذا باید این عملیات به کمک کامپیوتر صورت گیرد . در این رابطه برای مدل برنامه ای توسط نرم افزار MATALAB 6.5.1 براساس الگوریتم شکل ۱-۵ تنظیم شده است که متن آن در پیوست موجود می باشد .

اما نکته ای که هنوز باید روشن شود ، نحوه محاسبه تنش در هر یک از اجزاء می باشد . همانطور که گفته شد ، این اجزاء شامل شش عضو بتن فشاری ، بتن کششی ، بتن ترک خورده ، آرماتورهای کششی ، آرماتورهای فشاری و در نهایت صفحات FRP می باشد . روند محاسبه تنش در این اجزاء در بندهای بعدی از این فصل به طور کامل تشریح شده اند .

#### ۱-۲-۵: بتن فشاری

برای محاسبه نیروی مقاوم ناشی از بتن فشاری ، با داشتن کرنش در بالاترین تار فشاری و فرض تغییرات خطی کرنش در بتن ، تا مقدار صفر در تار خنثی می توان برای هر عمق از مقطع تا تارخنثی ، تنش فشاری موجود در بتن را براساس روابط CEB-FIP به صورت زیر محاسبه نمود .



شکل ۲-۵: دیاگرام تنش - کرنش برای بتن تحت فشار تک محوری

$$\sigma_c = -\frac{\frac{E_{ci}}{E_{cl}} \varepsilon_c - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}}\right)^2}{1 + \left(\frac{E_{ci}}{E_{cl}} - 2\right) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}}} f_{cm} \quad \text{for} \quad |\varepsilon_c| < |\varepsilon_{c,lim}| \quad (1-5)$$

که در آن  $E_{ci}$ ، مدول تانژانت ؛  $\sigma_c$ ، تنش فشاری (برحسب MPa) ؛  $\varepsilon_c$ ، کرنش فشاری ؛  $E_{cl}$ ، مدول سکانت بوده و مقادیر آنها از روابط زیر محاسبه می گردد (شکل ۲-۵).

$$E_{ci} = E_{co} \left[ \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right]^{1/3} \quad (2-5)$$

که در آن :

$$E_{co} = 2.15 \times 10^4 \text{ MPa} \quad (3-5)$$

$$f_{cmo} = 10 \text{ MPa} \quad (4-5)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa} \quad (5-5)$$

$$\varepsilon_{cl} = -0.0022 \quad (6-5)$$

$$E_{cl} = \frac{f_{cm}}{0.0022} \quad (7-5)$$

رابطه (۱-۵) تا وقتی صادق است که نسبت تنش در انتهای دیاگرام به  $f_{cm}$  از حد زیر بیشتر باشد .

$$\frac{|\sigma_c|}{f_{cm}} \geq 0.5 \quad (8-5)$$

حال با توجه به اینکه در نهایت مقدار تنش فشاری در بتن به مقدار  $\sigma_{c,lim} = -0.5f_{cm}$  محدود

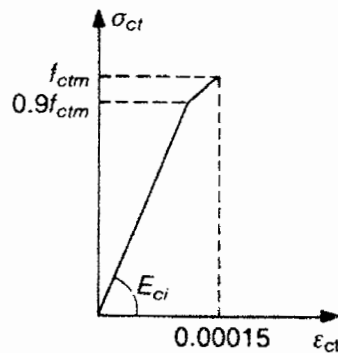
می شود ، می توان از رابطه (۱-۵) مقدار کرنش حد ،  $\varepsilon_{c,lim}$  ، را از رابطه زیر بدست آورد .

$$\frac{\varepsilon_{c,lim}}{\varepsilon_{c,l}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \frac{E_{ci}}{E_{cl}} + 1 \right) + \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{1}{2} \frac{E_{ci}}{E_{cl}} + 1 \right)^2 - \frac{1}{2} \right]^{1/2} \quad (9-5)$$

نهایتاً بعد از محاسبه تنش در هر نقطه از عمق بتن فشاری و با انتگرالگیری از آنها و ضرب آن در مساحت بتن فشاری ، می توان نیروی مقاوم اعمالی توسط بتن فشاری را محاسبه نمود . همچنین فاصله مرکز سطح این دیاگرام بدست آمده تا تارخشی ، بازوی لنگر نیروی بتن فشاری می باشد . با ضرب این مقدار در نیروی فشاری بتن ، سهم بتن در ممان مقاوم مقطع بدست می آید .

### ۲-۲-۵: بتن کششی

برای محاسبه نیروی مقاوم بتن کششی نیز از روابط CEB-FIP استفاده می شود . این آیین نامه برای مدلسازی بتن در کشش از یک دیاگرام دوخطی استفاده می کند (شکل ۳-۵) . روابط ارائه شده به صورت زیر است .



شکل ۳-۵: دیاگرام تنش - کرنش برای بتن تحت کشش تک محوری

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{ct} = E_{ct} \varepsilon_{ct} \quad \text{for } \sigma_{ct} \leq 0.9 f_{ctm} \\ \sigma_{ct} = f_{ctm} - \frac{0.1 f_{ctm}}{0.00015 - \frac{0.9 f_{ctm}}{E_{ct}}} (0.00015 - \varepsilon_{ct}) \quad \text{for } 0.9 f_{ctm} < \sigma_{ct} \leq f_{ctm} \end{array} \right. \quad (10-5)$$

که در آن  $E_{ct}$  ، مدول تانژانت الاستیسیته (بر حسب MPa) بوده که از رابطه (۲-۵) محاسبه می شود .  $f_{ctm}$  ، مقاومت کششی و  $\sigma_{ct}$  ، تنش کششی بر حسب MPa هستند .  $\varepsilon_{ct}$  نیز کرنش کششی می باشد . مقدار  $f_{ctm}$  براساس روابط CEB-FIP به صورت زیر محاسبه می شود .

$$f_{ctm} = f_{ctko,m} \left( \frac{f_{ck}}{f_{cko}} \right)^{2/3} \quad (11-5)$$

که در آن :

$$f_{cko} = 10MPa \quad (12-5)$$

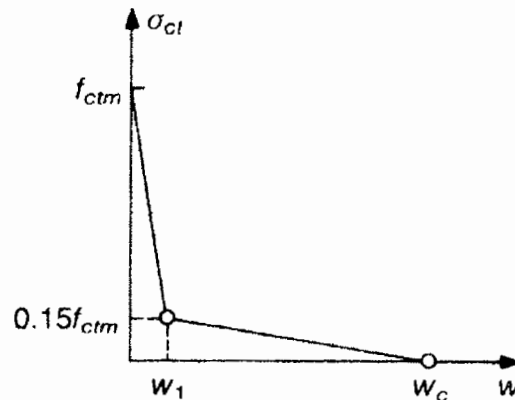
$$f_{ctko,m} = 1.4MPa \quad (13-5)$$

در این ناحیه نیز همانند بتن فشاری ، با داشتن کرنش در هر عمق از بتن کششی می توان از روابط بالا مقدار تنش در آن عمق را محاسبه نموده و با انتگرالگیری از دیاگرام دو خطی بدست آمده ، نیروی مقاوم بتن کششی را محاسبه کنیم . همچنین بازوی لنگر این ناحیه نیز برابر فاصله مرکز سطح این دیاگرام دو خطی تا تارخشی می باشد . همانطور که در دیاگرام شکل ۳-۵ مشاهده می شود ، کرنش نهایی ممکن در بتن کششی برابر 0.00015 بوده و در صورتی که با افزایش کرنش در تار فشاری بتن ، مقدار کرنش در تار کششی نیز افزایش یابد و از این مقدار حد بیشتر گردد ، تیر وارد ناحیه ترک خوردگی خواهد شد ؛ چراکه بتن طبق روابط CEB-FIP ، کرنشی بیشتر از این حد را نمی تواند در کشش تحمل کند .

#### ۳-۴-۵ : بتن ترک خورده

این ناحیه از بتن همانطور که در بخش ۲-۲-۵ اشاره شد ، طبق روابط CEB-FIP هنگامی وجود خواهد داشت که کرنش در بتن کششی بیشتر از مقدار 0.00015 گردد . از لحاظ مکانیک شکست بتن ، روابط ترک خوردگی ، شکل آن و نحوه محاسبه میزان مقاومت کششی ترک، بسیار پیچیده می باشد . اما در CEB-FIP با استفاده از یک دیاگرام دو خطی توانسته است رفتاری تا حدودی مشابه با واقعیت را برای تنش کششی مقاوم ترک لحاظ کند . در مدل پایان نامه از این روابط استفاده کرده و همچنین فرض می کند که تغییرات بازشدگی ترک از تارکششی بتن تا محلی که کرنش در بتن برابر 0.00015 است ، به صورت خطی تغییر می کند . بنابراین با داشتن اندازه بازشدگی ترک در تار کششی بتن و

همچنین عمقی از بتن که کرنش در آن برابر 0.00015 است، می توان از روابط CEB-FIP برای محاسبه نیروی مقاوم کششی بتن ترک خورده استفاده کرد. این روابط به صورت زیر می باشد (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵: دیاگرام تنش - عرض ترک برای بتن ترک خورده

$$\begin{cases} \sigma_{ct} = f_{ctm} \left( 1 - 0.85 \frac{w}{w_1} \right) & \text{for } 0.15 f_{ctm} \leq \sigma_{ct} \leq f_{ctm} \\ \sigma_{ct} = \frac{0.15 f_{ctm}}{w_c - w_1} (w_c - w) & \text{for } 0 \leq \sigma_{ct} < 0.15 f_{ctm} \end{cases} \quad (14-5)$$

$$w_1 = 2 \frac{G_F}{f_{ctm}} - 0.15 w_c \quad (15-5)$$

$$w_c = \alpha_F \frac{G_F}{f_{ctm}} \quad (16-5)$$

$$G_F = G_{Fo} \left( \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right)^{0.7} \quad (17-5)$$

$$f_{cmo} = 10 \text{ MPa} \quad (18-5)$$

که در آنها  $w$ ، بازشدگی ترک؛  $f_{ctm}$ ، مقاومت کششی بتن (رابطه (۱۱-۵))؛  $G_F$ ، انرژی شکست و  $G_{Fo}$  و  $\alpha_F$  به ترتیب انرژی شکست پایه و یک ضریب می باشند که هر دو وابسته به اندازه ماکزیمم قطر سنگدانه ها هستند و به ترتیب از جداول ۱-۵ و ۲-۵ براساس CEB-FIP محاسبه می شوند.

$\varepsilon_2$  کرنش تقویت کننده در حالت ترک خورده کامل می باشد. با فرض  $\varepsilon_2 \approx \varepsilon_{sl} \approx \varepsilon_f + \varepsilon_0$  و

$N_{rk} = N_{sl} + N_f$  از رابطه زیر تعیین می شود:

$$\varepsilon_2 = \frac{N_{rk} + E_f A_f \varepsilon_0}{E_s A_s + E_f A_f} \quad (21-5)$$

با  $N_{rk} = M_k / z_e$  و  $z_e$  بازوی لنگر بین نیروی کششی نهایی ( $N_{sl} + N_f$ ) و نیروی فشاری ( $N_{s2} + N_c$ ) است.

فاصله متوسط ترکها، برای به حساب آوردن اثر هردو تقویت کننده خارجی و داخلی می تواند از رابطه زیر محاسبه شود:

$$s_{rm} = \frac{2f_{ctm} A_{c,eff} E_s A_s}{\tau_{sm} u_s (E_s A_s + \xi_b E_f A_f)} = \frac{2f_{ctm} A_{c,eff} \xi_b E_f A_f}{\tau_{fm} u_f (E_s A_s + \xi_b E_f A_f)} \quad (22-5)$$

که در آن  $A_{c,eff}$  سطح مؤثر کششی که حداقل مقدار  $2.5(h-d)b$  و  $(h-x)b/3$  (Eurocode2) بوده،  $\tau_{sm} = 1.8 f_{ctm}$  (CEB 1993) و  $\tau_{fm} = 1.25 f_{ctm}$  به ترتیب تنش متوسط اتصال آرماتور فولادی و FRP بوده و  $u_s$  و  $u_f$  به ترتیب محیط اتصال فولاد و FRP در واحد طول بوده و  $\xi_b$  یک پارامتر اتصال است که از رابطه زیر تعیین می شود:

$$\xi_b = \frac{\tau_{fm} E_s A_s u_f}{\tau_{sm} E_f A_f u_s} = \frac{\tau_{fm} E_s d_s}{\tau_{sm} E_f 4t_f} \quad (23-5)$$

که در آن  $d_s$  قطر (متوسط) میلگردهای فولادی و  $t$  ضخامت FRP می باشد.

با صرفنظر از اثر سختی کششی ( $\zeta = 1.0$ ) و فرض اینکه  $\varepsilon_0 \approx 0$ ، عرض ترک از روابط (19-5)

تا (23-5) به صورت زیر استخراج می شود:

$$w_k = 2.1 \rho_{c,eff} \frac{M_k}{E_s d \rho_{eq}} \frac{1}{(u_s + 0.694 u_f)} \quad (24-5)$$

که در آن  $\rho_{c,eff} = A_{c,eff} / bd$  نسبت سطح مؤثر در کشش و  $\rho_{eq}$  نسبت تقویت کننده های معادل

می باشد که از رابطه زیر محاسبه می شود .

$$\rho_{eq} = \frac{A_s + A_f \frac{E_f}{E_s}}{bd} \quad (25-5)$$

همانطور که در روابط این مدل دیده می شود ، مقدار بازشدگی عرض ترک وابسته به ممان وارده می باشد و حال آنکه در مدل اصلی تحلیل تیر ، قبل از داشتن ممان مقاوم تیر ، به مقدار بازشدگی ترک برای محاسبه سهم ترک در مقاومت مقطع نیاز است . بنابراین در این مرحله نیز استفاده از یک روند تکرار ، ضروری است . برای رسیدن به همگرایی بیشتر در ابتدا عرض ترک را از مدل بعدی (مدل ساده شده) که وابسته به ممان وارده نیست ، محاسبه نموده و سپس ممان مقاوم محاسبه می گردد . در مرتبه دوم تکرار با کمک این ممان بدست آمده ، عرض ترک از مدل اول (مدل *fib*) محاسبه شده و نهایتاً ممان مقاوم جدید برای مقطع بدست می آید . در صورتی که این مقدار جدید با مقدار قبلی تفاوت داشته باشد ، این روند تا رسیدن به یک همگرایی مناسب ادامه پیدا می کند .

#### ۲-۳-۲-۵ : مدل دوم (مدل ساده شده) برای محاسبه عرض ترک

در این مدل که برای تقویت خمشی تیرهای بتنی توسط یک پوشش خاص از بتنهای الیافی ارائه شده است (Alaee and Karihaloo (2003) روش بسیار ساده تری را نسبت به مدل اول بیان کرده و همانطور که در فصل بعد نیز خواهیم دید ، نتایج نسبتاً خوبی را ارائه داده است و بنابراین می توان از آن به عنوان یک مدل ساده برای محاسبه عرض ترک استفاده نمود . روند مدل اینگونه است که با در نظر گرفتن یک طول مؤثر  $L_{eff}$  در انتهای تار کششی بتن ، فرض می گردد که کرنش بتن در این طول به صورت ترک موضعی ، آزاد شده است . بازشدگی ترک در پایین ترین تار کششی بتن ، با ضرب کرنش بدست آمده در این نقطه در طول مؤثر قابل محاسبه است . طبق این مدل ، مقدار این

طول مؤثر با دو برابر پوشش بتنی ( $h-d$ ) ، برابر خواهد بود . بنابراین بازشدگی ترک از رابطه زیر محاسبه می گردد .

$$w = \varepsilon_{bot} \cdot 2(h-d) \quad (۲۶-۵)$$

حال همانطور که قبلا توضیح داده شد ، با داشتن مقدار بازشدگی ترک در پایین ترین تار کششی بتن و فرض تغییرات خطی عرض ترک در عمق بتن ، می توان از روابط ارائه شده مقاومت کششی ترک را محاسبه نمود .

نکته قابل ذکر آنستکه همانطور که ملاحظه شد در استفاده از مدل اول (مدل *fib*) ، دو روند تکرار در مدل اصلی تحلیل تیر وجود خواهد داشت که باعث پیچیده شدن روند محاسبه و طولانی شدن مدت آن می گردد . اما در این مدل با ارائه یک مدل ساده می توان از پیچیدگی آن کاسته و در زمان کمتری به جواب دست یافت .

#### ۵-۲-۴ : آرماتورهای کششی و فشاری

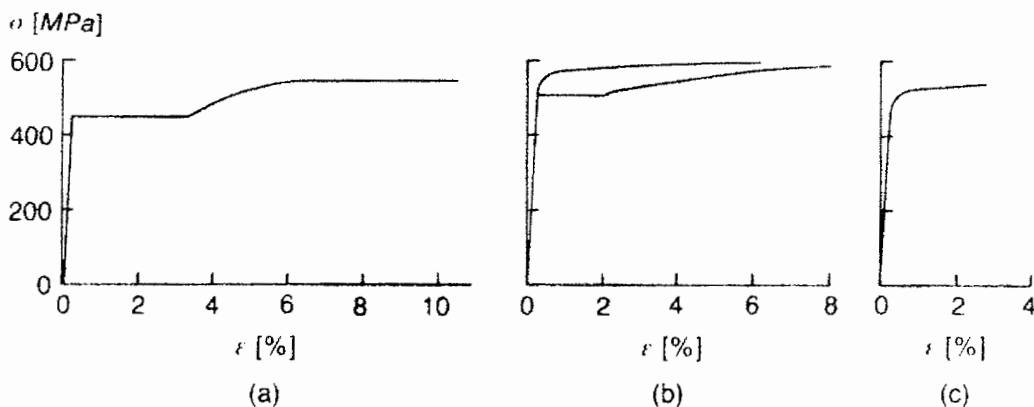
برای مدلسازی نحوه عملکرد آرماتورهای کششی و فشاری ، براساس روابط CEB-FIP از یک دیاگرام دو خطی استفاده می گردد . همانطور که در شکل ۵-۵ مشاهده می شود ، این آیین نامه آرماتورهای فولادی را به سه دسته  $a$  ،  $b$  و  $c$  تقسیم کرده است . معمولا در نمونه های مورد آزمایش که در فصل بعد معرفی خواهند شد ، خصوصیات آرماتور از جمله مدول الاستیسیته ، تنش تسلیم ، کرنش تسلیم ، تنش نهایی و کرنش نهایی آن به کمک آزمایشهای کشش محاسبه می گردد . لذا در این موارد از این داده ها استفاده خواهد شد . نحوه سخت شدگی فولاد نیز اینگونه در نظر گرفته می شود که تغییرات تنش بعد از تسلیم شدن نسبت به کرنش با یک شیب معین که نمایانگر  $E_{s2}$  است ، تا تنش و کرنش نهایی فولاد تغییر می کند . این در حالی است که در آیین نامه های طراحی ،



معمولا اثر سخت شدگی<sup>۱</sup> فولاد را در نظر گرفته و بعد از تسلیم شدن فولاد ، مقدار تنش نهایی برابر همان تنش تسلیم خواهد بود (شکل ۵-۶) . در این پایان نامه ، دو مدل جهت بررسی در نظر گرفتن سخت شدگی فولاد ، در فصل بعدی مقایسه گردیده اند .

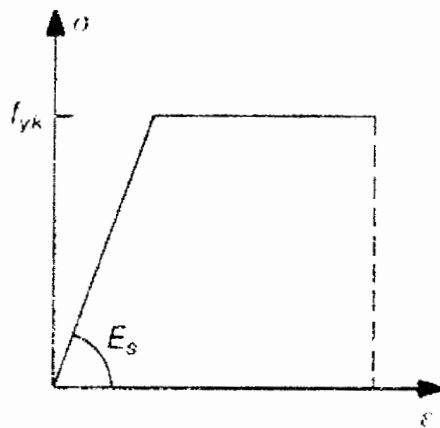
اما در صورتی که داده های کافی برای در نظر گرفتن سخت شدگی فولاد وجود نداشته باشد ، از دسته بندی ارائه شده در CEB-FIP استفاده می شود با این تفاوت که رفتار بعد از تسلیم شدگی به صورت خطی فرض می گردد . دسته بندی CEB برای این سه گروه به صورت زیر است :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Class A: } \left( \frac{f_t}{f_y} \right)_k \geq 1.08 \text{ and } \varepsilon_{ik} \geq 5\% \\ \text{Class B: } \left( \frac{f_t}{f_y} \right)_k \geq 1.05 \text{ and } \varepsilon_{ik} \geq 2.5\% \\ \text{Class S: } \left( \frac{f_t}{f_y} \right)_k \geq 1.15 \text{ and } \varepsilon_{ik} \geq 6\% \end{array} \right. \quad (۲۷-۵)$$



شکل ۵-۵ : دیاگرامهای حقیقی تنش - کرنش برای آرماتورهای فولادی

Stress hardening<sup>۱</sup>



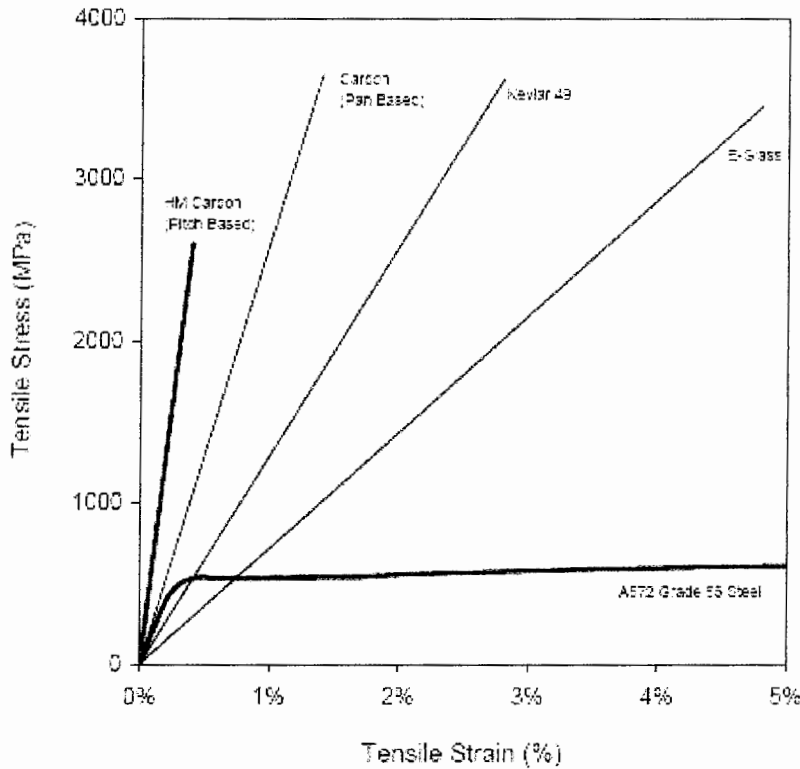
شکل ۵-۶: دیاگرام ایده ال تنش - کرنش برای آرماتورهای فولادی

برای نمونه هایی که تنها تنش تسلیم و مدول الاستیسیته آنها در دسترس است، از مقدار میانگین کلاسهای مختلف معرفی شده در رابطه (۲۷-۵) برای محاسبه  $E_{s2}$ ، استفاده می گردد. از رابطه (۲۷-۵) می توان مقادیر  $E_{s2}$  را برای هر یک از کلاسها به صورت زیر محاسبه کرد.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Class A:} \\ \text{Class B:} \\ \text{Class S:} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} E_{s2} = \frac{0.08 f_y}{0.05 - f_y/E_s} \\ E_{s2} = \frac{0.05 f_y}{0.025 - f_y/E_s} \\ E_{s2} = \frac{0.15 f_y}{0.06 - f_y/E_s} \end{array} \quad (28-5)$$

#### ۵-۲-۵: صفحات FRP

در تمامی مدل‌های ارائه شده برای تحلیل تیرها تحت خمش، رفتار FRP به صورت تغییرات خطی تنش - کرنش تا لحظه گسیختگی فرض می گردد (شکل ۷-۵). بنابراین با داشتن تنش و کرنش نهایی (گسیختگی) FRP در کشش که معمولاً توسط سازنده این مواد داده می شود، رفتار آنها شناخته شده می باشد. مدول الاستیسیته آن نیز از تقسیم تنش نهایی بر کرنش نهایی قابل محاسبه است.

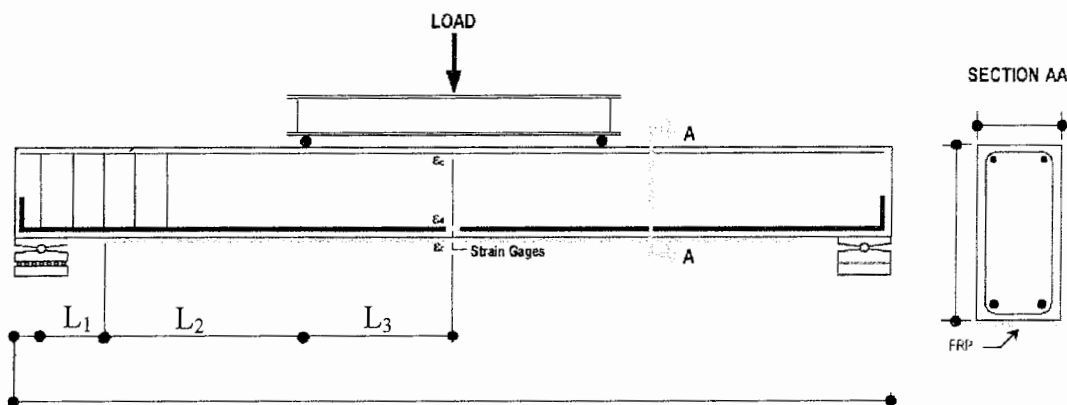


شکل ۵-۷: دیاگرام تنش - کرنش انواع مواد FRP

#### ۵-۲-۶: نحوه محاسبه تغییرمکان در وسط دهانه تیر

با توجه به روابط و مطالب ارائه شده در بندهای قبل، دیاگرام ممان - کرنش در بالاترین تار فشاری، برای یک تیر مفروض قابل دستیابی است؛ اما دیاگرامی که معمولاً در نتایج نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و اطلاعات مفیدتری را می‌توان از آن استخراج نمود، دیاگرام نیرو - تغییرمکان در وسط دهانه تیر، می‌باشد. برای تبدیل دیاگرام ممان - کرنش به دیاگرام نیرو - تغییرمکان، لازم است که دو مؤلفه نیرو و تغییرمکان به طور جداگانه برای هر نقطه از دیاگرام ممان - کرنش، محاسبه شود. با فرض تکیه گاههای ساده برای تیر و بارگذاری متمرکز سه نقطه‌ای یا چهار نقطه‌ای بر روی آن، مقدار نیرو با توجه به شکل ۵-۸ و رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$F = \frac{2M}{L_1 + L_2} \quad (۲۹-۵)$$



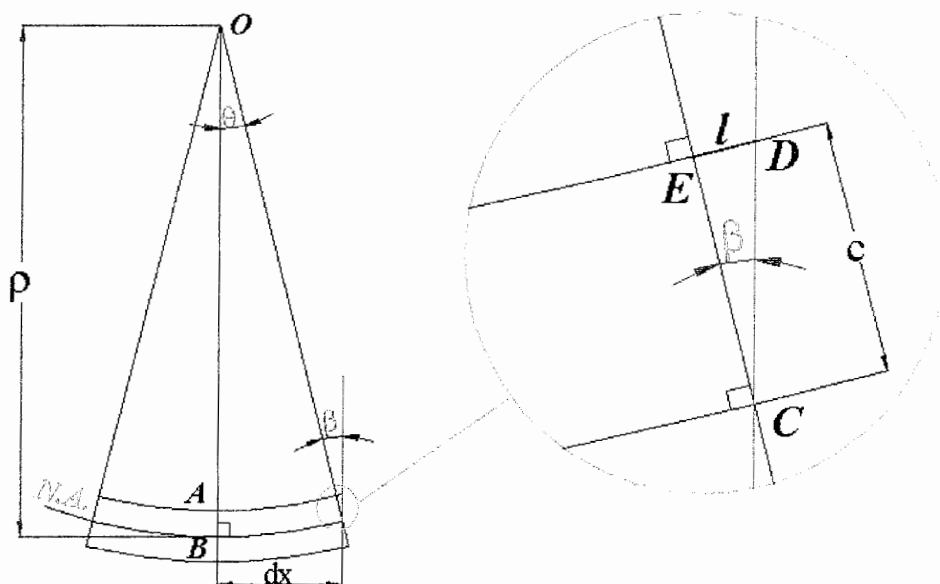
شکل ۵-۸: نمایش پارامترها در بارگذاری چهار نقطه ای

در رابطه (۵-۲۹)،  $L_1$  فاصله تکیه گاه تا انتهای FRP؛  $L_2$ ، فاصله انتهای FRP تا نزدیکترین نیروی متمرکز و  $L_3$  نصف فاصله بین دو بار متمرکز اعمال شده می باشد (شکل ۵-۸). در صورتی که بارگذاری سه نقطه ای باشد نیز می توان از همین روابط بالا استفاده نمود. اما برای محاسبه تغییرمکان در هر نقطه، از دو مدل استفاده می شود که نتایج این دو مدل نیز در فصل بعد مقایسه خواهند شد. هر دو مدل بر پایه قضیه دوم لنگر - سطح می باشند، که با داشتن دیاگرام انحناء در طول تیر، تغییرمکان وسط دهانه تیر محاسبه می شود. تفاوت روش اول و دوم در آنستکه در روش دوم با یکسری فرضیات، قدری ساده سازی نموده و روابطی را ارائه نموده است که در بندهای زیر هر دو روش به طور جداگانه توضیح داده می شوند.

#### ۵-۲-۶-۱: روش اول محاسبه تغییرمکان

در شکل ۵-۹، طول  $dx$  از یک تیر، بعد از بارگذاری نشان داده شده است. در این شکل،  $c$ ، عمق تارخنشی و  $\rho$ ، شعاع انحناء تیر بعد از بارگذاری می باشد. با دقت در شکل می توان رابطه زیر را به کمک روابط مثلثاتی استخراج نمود.

$$\rho = \frac{dx}{\tan \theta} \quad (۵-۳۰)$$



شکل ۵-۹: نحوه محاسبه انحناء با داشتن عمق تار خنثی و کرنش تار فشاری

همانطور که دیده می شود، با رسم خط  $CD$  موازی با  $AB$ ، مقدار فشردگی در بالاترین تار فشاری برابر  $l$  خواهد بود. با توجه به فرضیه برنولی و مسطح ماندن صفحات عمود بر محور تیر، خط  $CO$  به صورت یک خط صاف بوده و دارای موج نخواهد شد؛ لذا می توان نتیجه گرفت که زاویه بین خطوط  $OA$  و  $OE$  ( $\theta$ )، برابر زاویه بین خطوط  $CD$  و  $CE$  می باشد. یعنی  $\beta = \theta$ . بنابراین خواهیم داشت:

$$\tan \theta = \frac{l}{c} \quad (31-5)$$

که در آن  $l$ ، مقدار فشردگی در بالاترین تار فشاری تیر و  $c$  عمق تارخنثی است. از جایگذاری رابطه (31-5) در رابطه (30-5)، خواهیم داشت:

$$\rho = \frac{dx}{\frac{l}{c}} \quad (32-5)$$

مقدار کرنش در طول  $dx$  در بالاترین تار فشاری تیر از رابطه زیر بدست می آید.

$$\varepsilon_c = \frac{l}{dx} \quad (33-5)$$

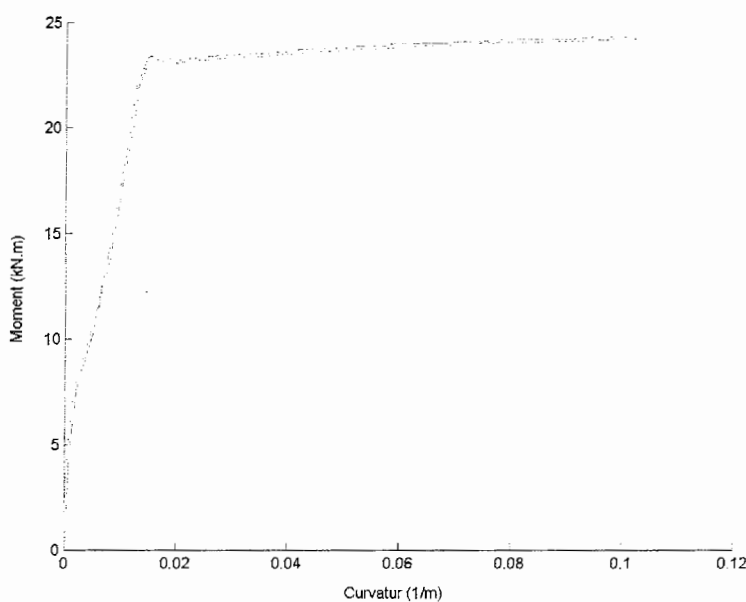
با جایگذاری رابطه (۳۳-۵) در رابطه (۳۲-۵) ، مقدار شعاع انحناء برحسب کرنش در بالاترین تار فشاری و عمق تار خنثی به صورت زیر محاسبه می شود .

$$\rho = \frac{c}{\varepsilon_c} \quad (34-5)$$

اما همانطور که می دانیم ، مقدار انحناء با معکوس شعاع انحناء برابر بوده و بنابراین نهایتاً با داشتن کرنش در بالاترین تار فشاری و عمق تار خنثی ، می توانیم انحناء تیر را در هر لحظه از رابطه زیر بدست آوریم .

$$w'' = \frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_c}{c} \quad (35-5)$$

بنابراین در مدل پیشنهادی می توانیم در هر لحظه با محاسبه ممان مقطع و انحناء ، دیاگرام ممان - انحناء مقطع را از لحظه شروع بارگذاری تا هنگام گسیختگی آن در اختیار داشته باشیم . در شکل ۵-۱۰ ، دیاگرام ممان - انحناء یک نمونه آزمایشگاهی توسط مدل رسم شده است . حال با داشتن دیاگرام ممان - انحناء و همچنین تغییرات ممان در طول تیر ، می توان تغییرات انحناء در طول تیر را نیز بدست آورد .



شکل ۵-۱۰ : دیاگرام ممان - انحناء برای یک نمونه آزمایشگاهی بدست آمده توسط مدل پیشنهادی

برای محاسبه تغییرمکان در وسط دهانه تیر که تحت بارگذاری سه نقطه ای و یا چهار نقطه ای قرار گرفته است ، با داشتن تغییرات انحناء در طول تیر ، می توان از قضیه دوم لنگر - سطح<sup>۱</sup> استفاده نمود . این قضیه بیان می دارد که برای محاسبه فاصله قائم بین یک نقطه تا مماس مرسوم بر نقطه دیگر (t<sub>C/D</sub>) ، می توان از رابطه زیر استفاده نمود .

$$t_{C/D} = \int_C^D x_1 w''(x) dx \quad (36-5)$$

که در آن ،  $x_1$  فاصله مرکز هندسی سطح زیر منحنی انحناء بین دو نقطه مورد نظر تا نقطه اول بوده و  $w''(x)$  معرف تغییرات انحناء در بین دو نقطه می باشد .

حال با توجه به این قضیه ، اگر رابطه (۳۶-۵) برای نقاط تکیه گاه و وسط دهانه تیر ، نوشته شود ، مقدار فاصله قائم بین تکیه گاه و مماس مرسوم بر وسط تیر ، معادل تغییرمکان وسط دهانه تیر خواهد بود . بنابراین وسط دهانه تیر از رابطه زیر بدست می آید .

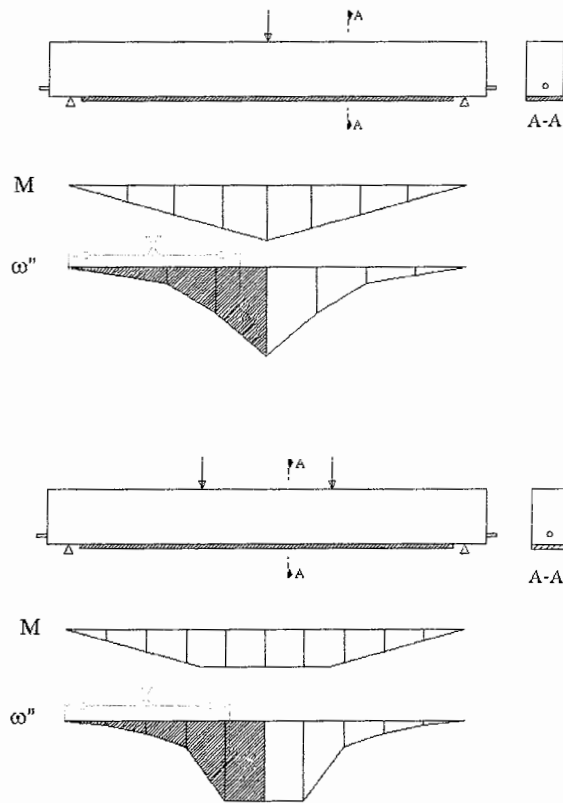
$$\delta_{Midspan} = t_{A/E} = X \int_A^E w''(x) dx \quad (37-5)$$

که در آن A و E به ترتیب معرف نقاط تکیه گاه و وسط دهانه تیر بوده و X فاصله مرکز هندسی سطح زیر منحنی انحناء بین وسط تیر تا تکیه گاه بوده که در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است . با توجه به اینکه انتگرال معین موجود در رابطه (۳۷-۵) معرف سطح زیر نمودار انحناء از تکیه گاه تا وسط دهانه تیر (S) می باشد ، می توان رابطه (۳۷-۵) را به صورت زیر بازنویسی کرد .

$$\delta_{Midspan} = S.X \quad (38-5)$$

---

<sup>۱</sup> Second moment – area theorem



شکل ۵-۱۱: نحوه محاسبه تغییرمکان در وسط تیر با داشتن دیاگرام ممان - انحناء و تغییرات ممان در طول تیر

#### ۵-۲-۶-۲: روش دوم محاسبه تغییرمکان

اساس این روش که توسط Charkas et al. (2002) معرفی شده است بر پایه تقسیم تیر تقویت شده با FRP به سه ناحیه غیرترک خورده، به صورت جزئی ترک خورده و بعد از تسلیم شدگی فولاد می باشد (شکل ۵-۹). در این مدل با فرض یک دیاگرام سه خطی برای دیاگرام ممان - انحناء، رابطه زیر برای محاسبه تغییرمکان در وسط دهانه تیر برای بارگذاری چهار نقطه ای ارائه شده است. لازم به ذکر است که اصول و پایه این روش، مشابه روش قبل بوده و تنها قدری ساده سازی در آن اعمال شده است.

$$\delta_{Midspan} = \frac{w_a''}{24}(3L^2 - 4L_a^2) + \frac{L_y}{6} [w_{cr}''(L_y + L_g) - w_a''(L_y + L_a)] + \frac{w_y''}{6}(L_a - L_g)(L_a + L_y + L_g) \quad (۳۲-۵)$$



که در آن،  $w_a''$ ، انحناء در هر لحظه برای وسط دهانه تیر بوده که از رابطه (۳۰-۵) قابل محاسبه است؛  $L$ ، کل طول تیر (فاصله دو تکیه گاه از یکدیگر)؛  $L_a$ ، فاصله تکیه گاه تا نزدیکترین بار متمرکز؛  $L_g$ ، طول ناحیه غیرترک خورده که از رابطه زیر بدست می آید:

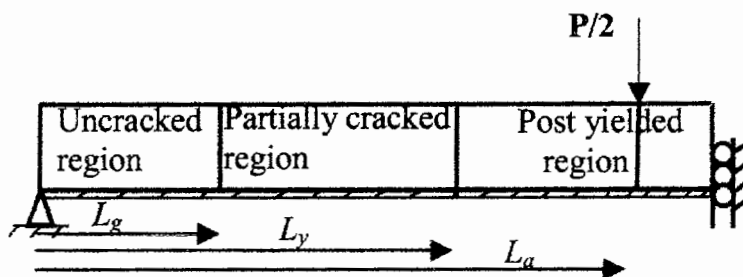
$$L_g = \frac{2M_{cr}}{F} \quad (۳۳-۵)$$

مقدار ممان ترک خوردگی ( $M_{cr}$ ) با فرض اینکه در لحظه ترک خوردگی کرنش در پایین ترین تار کششی بیشتر از 0.00015 می گردد قابل محاسبه است، همچنین مقدار انحناء بدست آمده تحت این شرایط برابر انحناء در لحظه ترک خوردگی ( $w_{cr}''$ ) خواهد بود؛ مقدار  $F$  نیز نیروی مقاوم تیر در هر لحظه می باشد که براساس رابطه (۲۹-۵) محاسبه می شود.

$L_y$  طولی از تیر است که بعد از آن آرماتورها دچار تسلیم شدگی می شوند. مقدار آن از رابطه زیر بدست می آید.

$$L_y = \frac{2M_y}{F} \quad (۳۴-۵)$$

در رابطه (۳۴-۵) مقدار  $M_y$  با فرض شروع تسلیم شدگی فولاد برای وسط دهانه تیر، از مدل قابل محاسبه است؛ یعنی ممان بدست آمده از مدل اصلی در لحظه ای که تنش در فولاد برابر تنش تسلیم آن گردد، برابر ممان تسلیم ( $M_y$ ) خواهد بود. همچنین انحناء بدست آمده به کمک رابطه (۳۰-۵) در این شرایط برابر انحناء در لحظه تسلیم شدگی ( $w_y''$ ) خواهد بود.



شکل ۵-۱۲: نحوه تقسیم بندی تیر از لحاظ ترک خوردگی و تسلیم شدگی برای محاسبه تغییرمکان

### ۳-۵: بررسی و مقایسه مدل‌های جداسازی FRP

همانطور که در فصل چهارم مشاهده شد، هفت مدل برای کنترل جداسازی در انتهای لایه FRP و دو مدل برای کنترل جداسازی پوشش بتنی، معرفی گردید. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، این دو مدل جداسازی نسبت به مودهای دیگر رایجتر بوده و لذا در این دو مورد، مطالعات بیشتری صورت گرفته است. در مدل اصلی ارائه شده در این پایان نامه برای کامل کردن بحث تقویت خمشی تیرهای بتنی به کمک FRP و پیش بینی مناسبی از رفتار آن، لازم دیده شد که این دو مود جداسازی نیز که رایجترین مودها هستند، کنترل گردد. البته لازم به ذکر است که معمولاً ورقه های FRP قبل از پارگی به علت وجود تمرکز تنش در انتهای آنها، دچار جداسازی خواهند شد. بنابراین ضرورت بحث در این رابطه الزامی است. در این راستا با توجه به مدل‌های معرفی شده و نتایج آزمایشگاهی نمونه های مختلف که در دسترس بود، مقایسه ای در نحوه تخمین نیروی جداسازی توسط این مدل‌ها صورت گرفت تا بتوان یک مدل مناسب برای کنترل جداسازی در انتهای ورقه FRP و یک مدل مناسب دیگر برای کنترل جداسازی پوشش کششی بتن، در کنار مدل اصلی پایان نامه، قرار داد.

بدین جهت نمونه های تقویت شده به صورت خمشی با FRP به چهار دسته براساس مود گسیختگی آنها با توجه به نتایج آزمایشگاهی شان، تقسیم شدند. این چهار دسته عبارت بودند از:

۱. نمونه هایی که بر اثر خردشدگی بتن دچار گسیختگی شده اند.
۲. نمونه هایی که بر اثر پارگی FRP دچار گسیختگی شده اند.
۳. نمونه هایی که به جهت بروز پدیده جداسازی در انتهای FRP دچار گسیختگی شده اند.
۴. نمونه هایی که به جهت بروز پدیده جداسازی پوشش بتنی از محل آرماتورهای طولی دچار گسیختگی شده اند.

(لازم به ذکر است که داده های نمونه ها و نتایج آنها به طور جزئی در فصل بعد آورده شده اند)

حال با کمک این نمونه ها ، نتایج مدل‌های مختلف برای هریک از این چهار دسته در جدول ۳-۵ و ۴-۵ آورده شده است . لازم به توضیح است که در بین مدل‌ها مدلی مناسبتر است که در نمونه های با مود گسیختگی مشترک با مدل ، در مجموع پیش بینی نزدیکتری را ارائه دهد . یعنی مقدار نسبت نزدیکتر به یک (ستون سوم) ، انحراف معیار کمتر (ستون چهارم) و درصد تطابق گسیختگی بیشتری در رابطه با شباهت به نتایج آزمایشگاهی (ستون هفتم) ارائه دهد . همچنین در نمونه هایی که مود گسیختگی نتایج آزمایشگاهی با مود گسیختگی مدل مشترک نیست ، هرچه درصد تطابق گسیختگی بیشتر باشد ، مدل مناسبتر بوده و نشاندهنده آنستکه نمونه های مورد نظر بر اثر مدل جداشدگی مربوطه ، گسیخته نخواهند شد و مود گسیختگی حاکم آنها به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر است (ستونهای هشتم تا دهم) .

جدول ۳-۵ : مقایسه مدل‌های پیش بینی کننده نیروی جداشدگی در انتهای لایه FRP

شماره مدل	مدل	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$				درصد تطابق گسیختگی			
		میانگین	انحراف استاندارد	ماکزیمم	مینیمم	۲۹ نمونه ، جداشده در انتها	۱۴ نمونه، جداشده در پوشش بتنی	۵ نمونه ، خردشده در بتن فشاری	۲۴ نمونه ، پاره شدگی FRP
۱	Malek	0.97	0.11	1.21	0.76	79.31	100	100	95.83
۲	Alfarabi	0.75	0.13	1.04	0.52	100	78.57	80	62.5
۳	Brosens	0.88	0.13	1.15	0.68	86.21	92.86	80	91.67
۴	Rizkalla	0.96	0.12	1.21	0.68	79.31	100	100	95.83
۵	Saadatmanesh	1.06	0.11	1.3	0.84	68.97	100	100	100
۶	Tumialan	0.95	0.14	1.28	0.72	79.31	85.71	80	87.5
۷	Ziraba	0.93	0.14	1.24	0.68	82.76	85.71	80	83.33

همانطور که در جدول ۳-۵ مشاهده می شود ، ۲۹ نمونه دچار گسیختگی ناشی از جداسدگی شده اند . با دقت در ستون سوم از این جدول دیده می شود که به استثنای مدل‌های ۲ و ۳ ، دیگر مدل‌ها نتایج خوبی را برای پیش بینی نیروی جداسدگی در انتهای FRP ، ارائه داده اند . از لحاظ انحراف معیار ، مدل‌های ۱ ، ۴ و ۵ مقادیر کمتری را نسبت به بقیه مدل‌ها از خود نشان داده اند . با دقت در ستون هفتم می توان دید در بین سه نمونه ذکر شده ، دو نمونه ۱ و ۴ شرایط بهتری دارند . بنابراین در ابتدا می توان با دقت دوباره در ستون سوم ، مدل ۱ را برای کنترل جداسدگی در انتهای FRP ، انتخاب نمود . با دقت در دیگر ستونها این جدول خواهیم دید که انتخاب این مدل (مدل ۱) ، انتخاب صحیحی بوده است چراکه در دیگر نمونه ها درصد تطابق مود گسیختگی حاکم نسبت به نتایج آزمایشگاهی به جز در یک مورد بقیه 100% بوده است و در مورد استثناء نیز مقدار آن بسیار نزدیک به صد درصد بوده و برابر 95.83% می باشد . بنابراین مدل گسیختگی ناشی از جداسدگی در انتهای FRP که در مدل اصلی مورد استفاده قرار خواهد گرفت ، مدل (Malek et al. (1998 خواهد بود . این مدل همانطور که در فصل چهار توضیح داده شده است ، براساس یک مطالعه دقیق در جهت محاسبه تنش‌های بین لایه ای FRP و بتن (تنش نرمال و برشی) بوده و با کمک معیار گسیختگی مور - کولمب برای بتن شکل گرفته است . روند کامل این مدل در پیوست - الف قابل دسترسی می باشد .

جدول ۴-۵: مقایسه مدل‌های پیش‌بینی کننده نیروی جداشدگی ناشی از جداشدن پوشش بتنی

شماره مدل	مدل	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$				درصد تطابق گسیختگی			
		میانگین	انحراف استاندارد	ماکزیمم	مینیمم	۱۴ نمونه، جداشده در پوشش بتنی	۲۹ نمونه ، جداشده در انتها	۵ نمونه ، خردشده در بتن فشاری	۲۴ نمونه ، پاره شدگی FRP
۱	Raof (min)	1.0	0.14	1.3	0.76	85.71	93.1	100	100
۲	Raof (max)	1.13	0.23	1.63	0.82	7.14	100	100	100
۳	Raof (mid)	1.06	0.17	1.47	0.79	78.57	100	100	100
۴	Shehata	0.95	0.2	1.3	0.6	92.86	41.38	60	75

با دقت در جدول ۴-۵ می‌توان دید که برای نمونه‌هایی که گسیختگی آنها ناشی از جداشدن پوشش بتنی است (۱۴ نمونه)، مقدار حداقل معرفی شده توسط مدل (Raof et al. (2000)، مناسبترین جواب را ارائه داده است. با دقت در دیگر نمونه‌ها که مود گسیختگی آنها غیر از جداشدن پوشش بتنی می‌باشد و همچنین دقت در مقدار انحراف معیار نتایج مدل‌ها می‌توان گفت که انتخاب مقدار حداقل (Raof et al. (2000) مناسبترین انتخاب برای پیش‌بینی نیروی جداشدن پوشش بتنی برای قراردعی در مدل اصلی خواهد بود. روابط این مدل در فصل ۴، ارائه گردیده است.

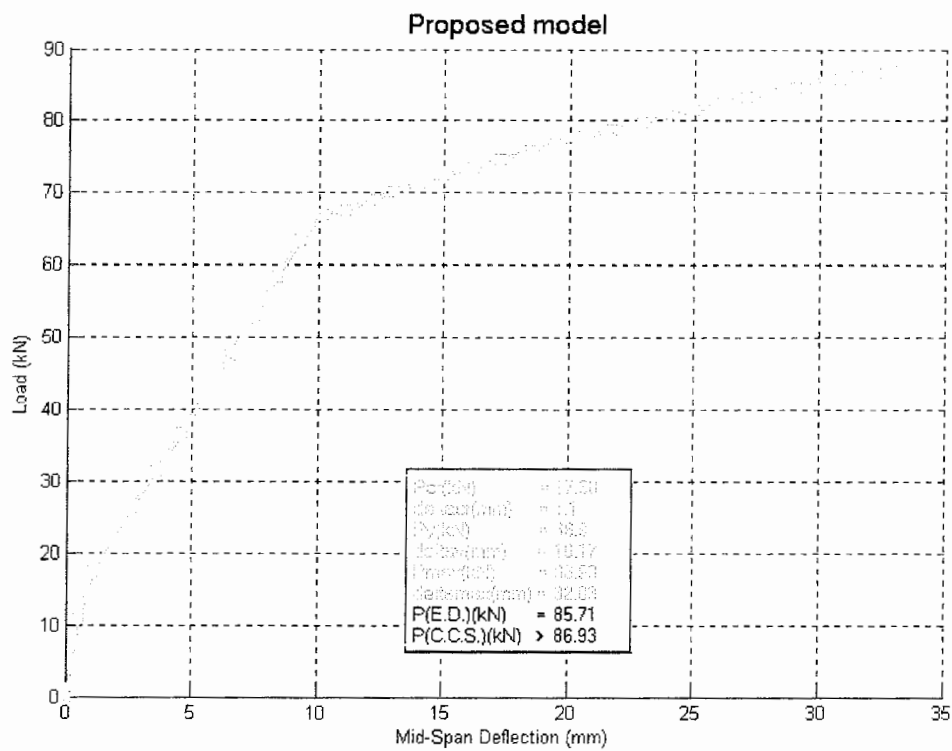
## ۴-۵: نحوه کارکرد و ساختار مدل کامپیوتری

با توجه به مطالب گفته شده در مورد تئوری مدل، در این بخش ساختار مدل معرفی می‌گردد. مدل کامپیوتری ارائه شده با کمک نرم افزار MATLAB 6.5.1 نوشته شده است. نرم افزار در ابتدا با گرفتن داده های لازم جهت رسم دیاگرام نیرو - تغییرمکان به صورت نشان داده شده در شکل ۵-۱۰، قابلیت استفاده از آن را برای استفاده کننده آسان نموده است. این داده ها هر کدام به طور مجزا قابل تغییر بوده و در نهایت قابلیت ذخیره شدن برای استفاده های مجدد از آنها نیز وجود دارد. داده های ورودی شامل شش قسمت مجزا می باشند. در قسمت اول تا چهارم به ترتیب داده های اجزاء مختلف بتن، فولاد کششی، فولاد فشاری و FRP برای نمونه های مختلف گرفته می شود. در قاب وسط، بالای صفحه خصوصیات نحوه بارگذاری و نصب FRP گرفته شده به گونه ای که L1، فاصله تکیه گاه تا انتهای FRP؛ L2، فاصله انتهای FRP تا نزدیکترین بار متمرکز و L3 فاصله بار متمرکز تا وسط تیر می باشد. بعد از مشخص شدن خصوصیات نمونه در این پنج قسمت، نوع آنالیز براساس مدل‌های توضیح داده شده در بندهای قبل از این فصل مشخص می گردد. این مدلها به ترتیب عبارتند از: ۱) مدلی که برای محاسبه عرض ترک از روش ارائه شده در *fib* استفاده می نماید (مدل پیشنهادی)؛ ۲) مدلی که برای محاسبه عرض ترک از روش ساده شده استفاده می کند؛ ۳) مدلی که از مقاومت ترک صرفنظر می کند؛ ۴) مدلی که کلاً از مقاومت بتن کششی و ترک صرفنظر می کند و نهایتاً ۵) مدلی که همانند مدل ۱ بوده با این تفاوت که از سخت شدگی فولاد صرفنظر می کند. لازم به ذکر است که در چهار مدل اول سخت شدگی فولاد در نظر گرفته می شود. در نهایت بعد از تکمیل شدن داده ها، با فشار بر روی دکمه RUN، می توان دیاگرام نیرو - تغییرمکان وسط دهانه تیر را بدست آورد.

Concrete		Load Definition		Steel in Compression	
Width of Beam (b)[mm]	150	Support-End of FRP distance (L1)[mm]	100	Depth of Bars (dc)[mm]	40
Depth of Beam (h)[mm]	250	Force-End of FRP distance (L2)[mm]	950	Diameter of Bars (dsc)[mm]	8
Maximum aggregate size (dmax)[mm]	25	Midspan-Force distance (L3)[mm]	250	Yield stress (fyc)[MPa]	407
Cylindric compressive strength (fc)[MPa]	31.5			Module of elasticity (Esc)[GPa]	200
Cubic compressive strength (fcu)[MPa]	39.4				
Steel in Tension		Models			
Depth of Bars (d)[mm]	210	<input checked="" type="radio"/> Proposed model <input type="radio"/> Simplified crack model <input type="radio"/> Without crack strength <input type="radio"/> Without tension concrete <input type="radio"/> Without stress hardening			
Diameter of Bars (ds)[mm]	16			Width of FRP (bf)[mm]	130
Number of Bars (ns)	2			Thickness of FRP (tf)[mm]	0.286
Yield stress (fy)[MPa]	407			Number of layers (nf)	1
Ultimate stress (fsu)[MPa]	520			Ultimate stress (ffu)[MPa]	2060
Ultimate strain (εpsu)	0.1			Module of elasticity (E <sub>f</sub> )[GPa]	118
Module of elasticity (E <sub>s</sub> )[GPa]	200			Thickness of adhesive (t <sub>a</sub> )[mm]	0.636
				Module of elasticity of adhesive (E <sub>a</sub> )[GPa]	4
				Shear module of adhesive (G <sub>a</sub> )[GPa]	1.54
		<input type="button" value="RUN"/> <input type="button" value="Save File"/> <input type="button" value="Open File"/>			

شکل ۵-۱۳: نحوه وارد کردن داده ها در نرم افزار تحلیل کننده تیر تقویت شده با FRP

در شکل ۵-۱۴ دیاگرام نیرو - تغییرمکان یک نمونه با توجه به داده های نشان داده شده در شکل ۵-۱۳ برای مدل اول (مدل پیشنهادی) رسم شده است. همانطور که در شکل ۵-۱۴ دیده می شود داده های عددی نیز در یک جعبه ای کنار دیاگرام ارائه شده اند. مقادیر این داده ها به ترتیب از بالا به پایین عبارتند از نیرو و تغییرمکان وسط تیر در لحظه شروع ترک خوردگی بتن، نیرو و تغییرمکان وسط تیر در لحظه تسلیم شدگی فولاد و نیرو و تغییرمکان وسط تیر در لحظه گسیختگی FRP. در صورتی که گسیختگی تیر ناشی از یکی از دو مود جداشدگی (جداشدگی در انتهای FRP و جداشدن پوشش بتنی) باشد، مقدار نیروی جداشدگی نمایش داده می شود.



شکل ۵-۱۴ : خروجی نرم افزار تحلیل کننده تیر تقویت شده با FRP برای یک نمونه (دیاگرام نیرو - تغییر مکان برای مدل پیشنهادی)



## فصل ششم : مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی

### ۶-۱ : مقدمه

در این فصل جهت بررسی صحت عملکرد مدل ، نمونه های مختلفی که توسط محققین مختلف مورد آزمایش قرار گرفته اند ارزیابی شده و نتایج عملی آنها با نتایج مدل های ارائه شده در فصل قبل مقایسه می گردد . همانطور که در فصل پنجم توضیح داده شد ، این مدلها عبارتند از : (۱) مدلی که عرض ترک براساس روش ارائه شده در *fib* محاسبه شود (proposed model) ؛ (۲) مدلی که عرض ترک را براساس روش (Alaee and Karihaloo (2003) محاسبه کند (Simplified model) . مدل های سوم تا پنجم هرکدام برگرفته از مدل پیشنهادی هستند (مدل اول) با این تفاوت که در مدل سوم از مقاومت ترک و در مدل چهارم از مقاومت بتن کششی و ترک و در مدل پنجم از سخت شدگی آرماتورهای فولادی ، صرف نظر می کند . تنها در آزمایش اول ، نتایج مقایسه کلیه مدلها ارائه شده و در دیگر آزمایشها تنها نتایج مقایسه دو مدل اول در متن پایان نامه ذکر گردیده و نتایج مقایسه کلیه مدلها برای این آزمایشها در پیوست - ب ارائه شده است . در این مقایسه مدلها با یکدیگر و همچنین نسبت به نتایج عملی ، هفت پارامتر اصلی ارزیابی شده اند که به ترتیب عبارتند از : نسبت نیرو و تغییرمکان وسط دهانه تیر بدست آمده توسط مدل به نیرو و تغییرمکان وسط دهانه تیر بدست آمده

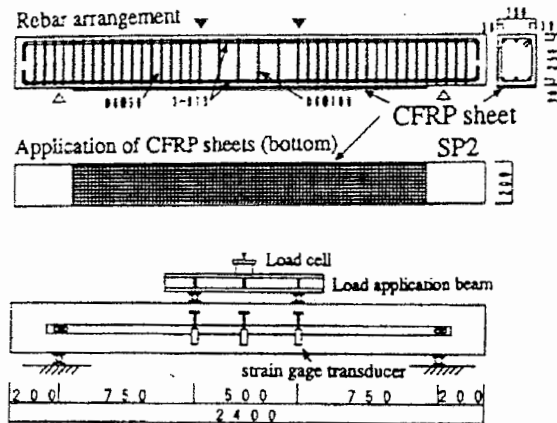
از نتایج عملی در سه حالت شروع ترک خوردگی ، شروع تسلیم شدگی فولاد و حالت نهایی ؛ هفتمین پارامتر ، مود گسیختگی بوده که مورد مقایسه قرار می گیرد .

بعد از مقایسه این پارامترها برای هر نمونه و همچنین رسم دیاگرام نیرو - تغییرمکان آن برپایه مدل پیشنهادی ، در نهایت از نتایج تمامی نمونه ها میانگین گیری شده و برای مدل‌های مختلف مقایسه می گردد . همچنین در آخر فصل ، هر کدام از مدل‌های ارائه شده به طور جداگانه با رسم دیاگرام‌هایی مقایسه می شوند .

## ۲-۶ : مقایسه نتایج نمونه ها با نتایج مدل

### ۱-۲-۶ : آزمایش اول

در این سری آزمایش که توسط Kage et al. (1999) انجام شده ، دو نمونه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با نتایج بدست آمده از مدل مقایسه گردیده است . یکی از این دو نمونه ، نمونه شاهد بوده و دیگری توسط CFRP به صورت خمشی تقویت شده است . نحوه بارگذاری و تقویت نمونه در شکل ۱-۶ نشان داده شده است . مشخصات نمونه ها نیز در جدول ۱-۶ و همچنین نتایج مدل و نتایج آزمایش در جدول ۲-۶ ارائه گردیده است . همانطور که در مقدمه گفته شد ، تنها برای این آزمایش نتایج هر پنج مدل ارائه شده و در آزمایش‌های دیگر ، نتایج سه مدل آخر در پیوست - ب به دلیل جلوگیری از حجیم شدن متن اصلی پایان نامه ، آورده شده است . دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان برای هر دو نمونه با توجه به مدل اصلی در شکل ۲-۶ رسم شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است .



شکل ۶-۱: نحوه تقویت و بارگذاری نمونه ها

جدول ۶-۱: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	SP1	SP2
Width of beam (b) [mm]	200	200
Depth of beam (h) [mm]	250	250
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	25	25
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	29.9	29.9
Cubic compressive strength ( $f_{cu}$ ) [MPa]	36.9	36.9
Depth of tension bars (d) [mm]	220	220
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	398.2	398.2
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	122.5	122.5
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	345	345
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	491	491
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	206	206
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	30	30
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	398.2	398.2
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	345	345
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	206	206
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	200
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.111
Number of layer ( $n_f$ )	---	1
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	4101
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	273
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	1
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	11
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	4.4
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	750	50
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	700
Midspace-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	250	250

جدول ۲-۶ : نتایج مدلها

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
SP1	Proposed	0.92	1.03	1.0	1.07	1.02	1.0	C
	Simplified	0.92	1.03	1.03	1.04	0.98	1.0	C
	No Crack	0.92	1.03	1.04	1.02	1.0	1.0	C
	No T.C.	0.86	1.27	1.09	1.09	1.0	1.0	C
	No S.H.	0.92	1.03	1.0	1.07	1.0	1.0	C
SP2	Proposed	0.95	1.01	1.0	1.07	0.94	1.0	R
	Simplified	0.95	1.01	1.0	1.07	0.99	1.0	R
	No Crack	0.95	1.01	1.0	0.95	0.98	1.0	R
	No T.C.	0.97	0.98	1.0	1.11	0.95	1.0	R
	No S.H.	0.95	1.07	1.0	1.01	1.03	1.0	R

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

<sup>2</sup> Proposed model without contribution of Crack strength

<sup>3</sup> Proposed model without contribution of Concrete in Tension and Crack strength

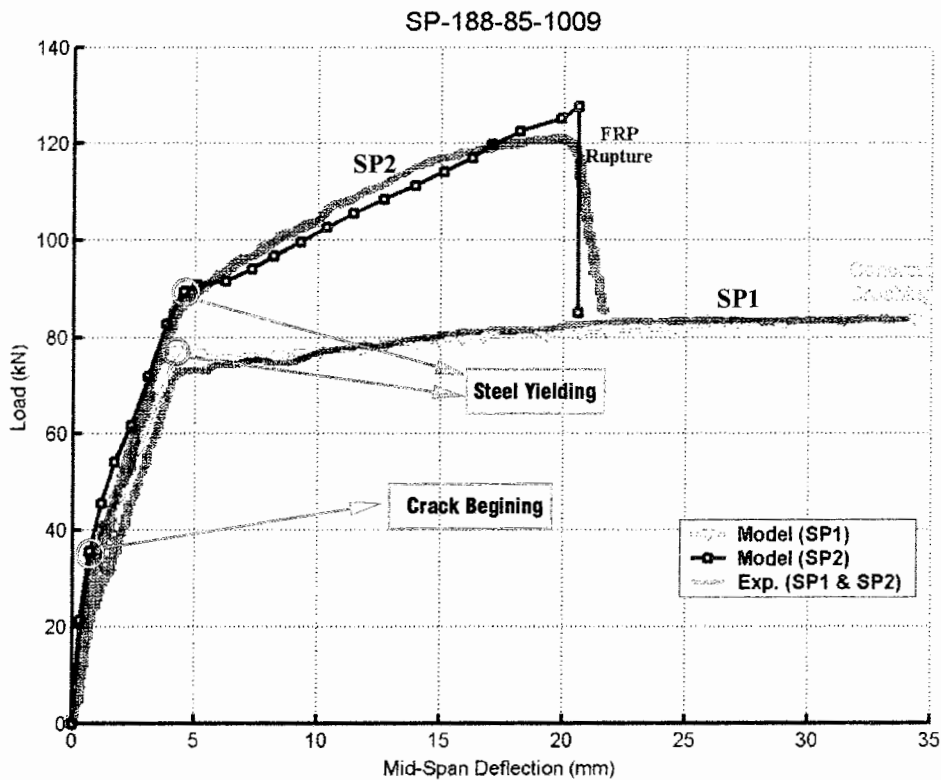
<sup>1</sup> Proposed model without consideration of strain hardening in steel

جدول ۳-۶ : نتایج مدلهای کنترل کننده جداشدگی

Samples	Models	Ultimate			Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
SP2	No Debonding Control	125.14	0.94	1.11	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	> 125.14	---	---	
	Concrete Cover Separation Control	> 125.14	---	---	

همانطور که در جدول ۳-۶ مشاهده می شود ، سه حالت بررسی شده است . حالت اول مربوط به مدل پیشنهادی بدون کنترل جداشدگی بوده و حالت دوم ، مدلی است که در آن جداشدگی در انتهای FRP کنترل می گردد . در حالت سوم ، جداشدن پوشش بتنی بررسی می شود . در کنترل جداشدگیها ، اگر نیروی جداشدگی کمتر از نیروی نهایی بدست آمده از مدل پیشنهادی (مدل اول در جدول ۳-۶) بود ، مود گسیختگی حاکم ، نوعی از جداشدگی است که نیروی نهایی آن کمتر باشد .

اگر هر دو مدل جادشدهگی ، نیروی نهایی بیشتری از خود نسبت به مدل پیشنهادی ارائه کردند ، گسیختگی به صورت خمشی (پارگی FRP و یا خرد شدن بتن فشاری) خواهد بود .

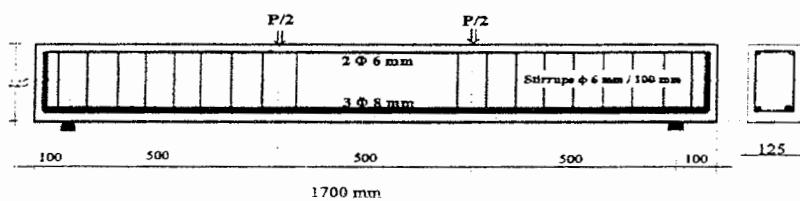


شکل ۶-۲ : دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی)

همانطور که در شکل ۶-۲ مشاهده می شود ، نتایج مدل ، رفتار نسبتاً مشابهی با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان داده است . در این شکل ، محل شروع دو مرحله ترک خوردگی بتن کششی و تسلیم شدگی آرماتورهای کششی نشان داده شده است . همانطور که ملاحظه می گردد با تسلیم شدگی فولاد ، رفتار نیرو - تغییر مکان نمونه به شدت تغییر کرده که ناشی از کاهش آبی سختی فولاد و در نتیجه سختی کل نمونه خواهد بود . این رفتار در سایر نمونه ها نیز دیده شده که از علامت گذاری شروع مراحل مختلف همانند شکل ۶-۲ در دیاگرام دیگر نمونه ها اجتناب می شود .

## ۲-۲-۶: آزمایش دوم

در این آزمایش که توسط (Ahmed and Van Gemert (1999) انجام شده، پنج نمونه از آن مورد بررسی قرار گرفته است. از این پنج نمونه، یک نمونه به عنوان نمونه شاهد بوده و چهار نمونه دیگر به ترتیب با یک، دو، سه و چهار لایه CFRP تقویت شده اند. خصوصیات ابعادی تیر و نحوه بارگذاری نمونه ها در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. پارامترهای لازم جهت استفاده در مدل نیز در جدول ۴-۶ گردآوری شده اند. در نهایت همانند مثال قبل نتایج و دیاگرامهای مربوطه ارائه شده اند.



شکل ۳-۶: خصوصیات ابعادی و نحوه بارگذاری نمونه ها

جدول ۴-۶: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	CF3	DF-1	DF-2	DF-3	DF-4
Width of beam (b) [mm]	125	125	125	125	125
Depth of beam (h) [mm]	225	225	225	225	225
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	16	16	16	16	16
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	43	43	43	43	43
Cubic compressive strength ( $f_{cu}$ ) [MPa]	53	53	53	53	53
Depth of tension bars (d) [mm]	190	190	190	190	190
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	150.8	150.8	150.8	150.8	150.8
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	75.4	75.4	75.4	75.4	75.4
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	568	568	568	568	568
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	654	654	654	654	654
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	185	185	185	185	185
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	35	35	35	35	35
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	553	553	553	553	553
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	195	195	195	195	195
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	75	75	75	75
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.167	0.167	0.167	0.167
Number of layer ( $n_f$ )	---	1	2	3	4
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	3500	3500	3500	3500
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	240	240	240	240
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	1.5	2.25	3	3.75
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	1.47	1.47	1.47	1.47
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	0.56	0.56	0.56	0.56
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	500	50	50	50	50
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	450	450	450	450
Midspace-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	250	250	250	250	250

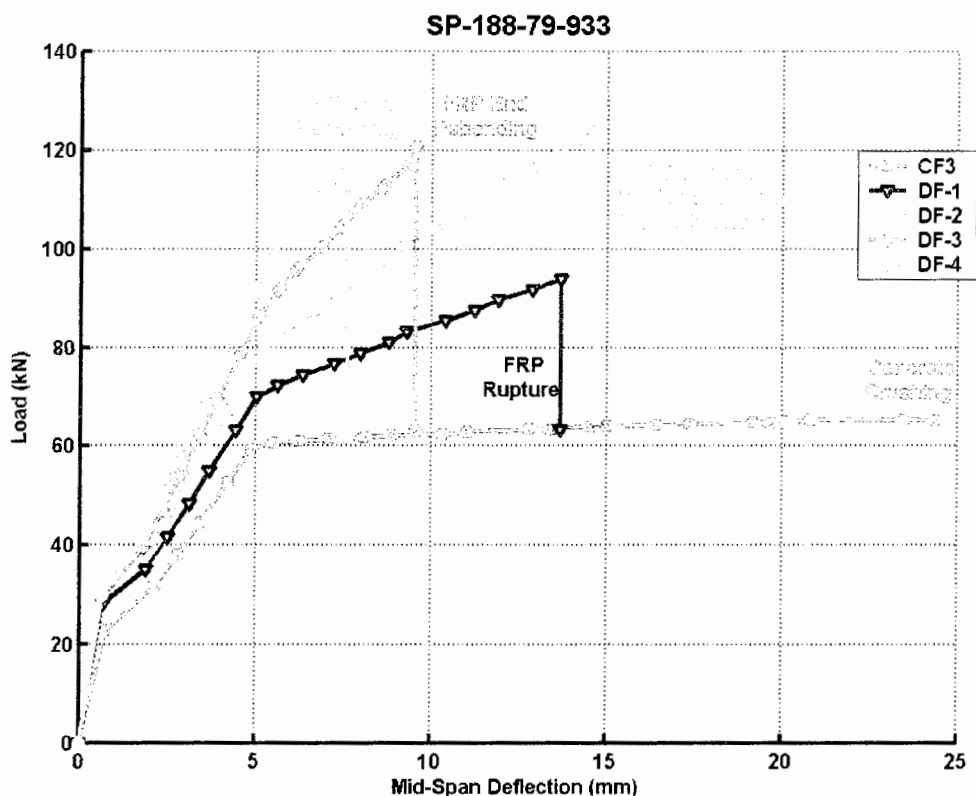
جدول ۵-۶: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
CF3	Proposed	---	0.82	---	---	---	0.81	C
	Simplified	---	0.82	---	---	---	0.87	C
DF-1	Proposed	---	0.97	---	---	---	0.93	R
	Simplified	---	0.87	---	---	---	0.97	R
DF-2	Proposed	---	0.73	---	---	---	1.04	R
	Simplified	---	0.73	---	---	---	1.04	R
DF-3	Proposed	---	0.73	---	---	---	1.04	R
	Simplified	---	0.78	---	---	---	1.04	C
DF-4	Proposed	---	0.73	---	---	---	1.04	C
	Simplified	---	0.99	---	---	---	1.04	C

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۶-۶: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$		
DF-1	No Debonding Control	93.80	---	0.79	FRP Rupture	FRP Rupture
	FRP End Debonding Control	> 93.80	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 93.80	---	---		
DF-2	No Debonding Control	124.20	---	1.03	FRP Rupture with delamination	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	124.20	---	1.03		
	Concrete Cover Separation Control	> 124.20	---	---		
DF-3	No Debonding Control	156.23	---	1.30	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	156.23	---	1.01		
	Concrete Cover Separation Control	> 156.23	---	---		
DF-4	No Debonding Control	173.06	---	1.38	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	118.22	---	0.93		
	Concrete Cover Separation Control	159.44	---	1.27		



شکل ۴-۶: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی)

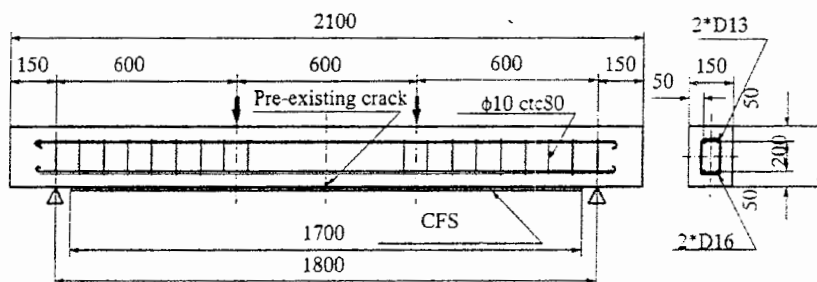
همانطور که در شکل ۴-۶ مشاهده می شود با افزایش تعداد لایه های FRP، سختی تیر افزایش می یابد. در نمونه DF-1 بدلیل آنکه تنها از یک لایه FRP استفاده شده است، FRP از تیر جدا نشده و در نهایت نیروی تیر به حد نیروی پارگی FRP می رسد. اما با افزایش تعداد لایه ها به اندازه دو لایه (DF-2)، طبق نتایج مدل، پدیده جداشدگی با پارگی FRP همزمان می گردد با این حال مقاومت تیر نسبت به حالت قبل و نمونه شاهد افزایش می یابد. با افزایش تعداد لایه های FRP به سه و چهار لایه (DF-3 و DF-4)، تمرکز تنش در انتهای FRP به شدت بالا رفته به گونه ای که پدیده جداشدگی در انتهای FRP قبل از پاره شدن FRP رخ خواهد داد. این اثر موجب می گردد که نیروی گسیختگی در این دو حالت نسبت به نمونه DF-2 افزایشی از خود نشان ندهد. این فرایندها با توجه به جدول ۵-۶ در نتایج تجربی نیز تکرار شده و رفتار مدل تأیید می گردد. نکته دیگری که



در جدول ۶-۶ برای نمونه DF-4 قابل بررسی است ، آنستکه دو مدل کنترل جداشدگی ، نیروی نهایی تیر را محدود نموده و به عبارتی بیان می دارند که جداشدگی زودتر از شکست خمشی که شامل خردشدگی بتن و یا پارگی FRP است رخ می دهد ؛ اما در عین حال مدل کنترل کننده جداشدگی FRP در انتها ، نیروی نهایی کمتری را نسبت به مدل کنترل جداشدن پوشش بتنی ارائه داده و بنابراین می توان گفت که نمونه دچار گسیختگی جداشدگی در انتهای FRP می گردد که مطابق با نتایج عملی نیز است .

### ۳-۲-۶ : آزمایش سوم

در این آزمایش که توسط Yoshizawa and Wu (1999) انجام شده ، سه نمونه از آن مورد بررسی قرار گرفته است . از این سه نمونه ، یک نمونه به عنوان نمونه شاهد تقویت نشده و دو نمونه دیگر با دو نوع CFRP به صورت خمشی تقویت شده است . نحوه تقویت و بارگذاری در شکل ۵-۶ نشان داده شده است .



شکل ۵-۶ : نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها

جدول ۶-۷: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	F-N	F-HT	F-HM
Width of beam (b) [mm]	150	150	150
Depth of beam (h) [mm]	200	200	200
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	20	20	20
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	33.8	33.8	33.8
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	43.08	43.08	43.08
Depth of tension bars (d) [mm]	158	158	158
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	402	402	402
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	100.5	100.5	100.5
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	390	390	390
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	580	580	580
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200	200
Depth of compression bars (d') [mm]	42	42	42
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	265.5	265.5	265.5
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	390	390	390
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	100	100
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.167	0.165
Number of layer ( $n_f$ )	---	2	2
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	4200	4000
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	230	390
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	2.5	2.5
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	1.47	1.47
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	0.54	0.54
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	600	50	50
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	550	550
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	300	300	300

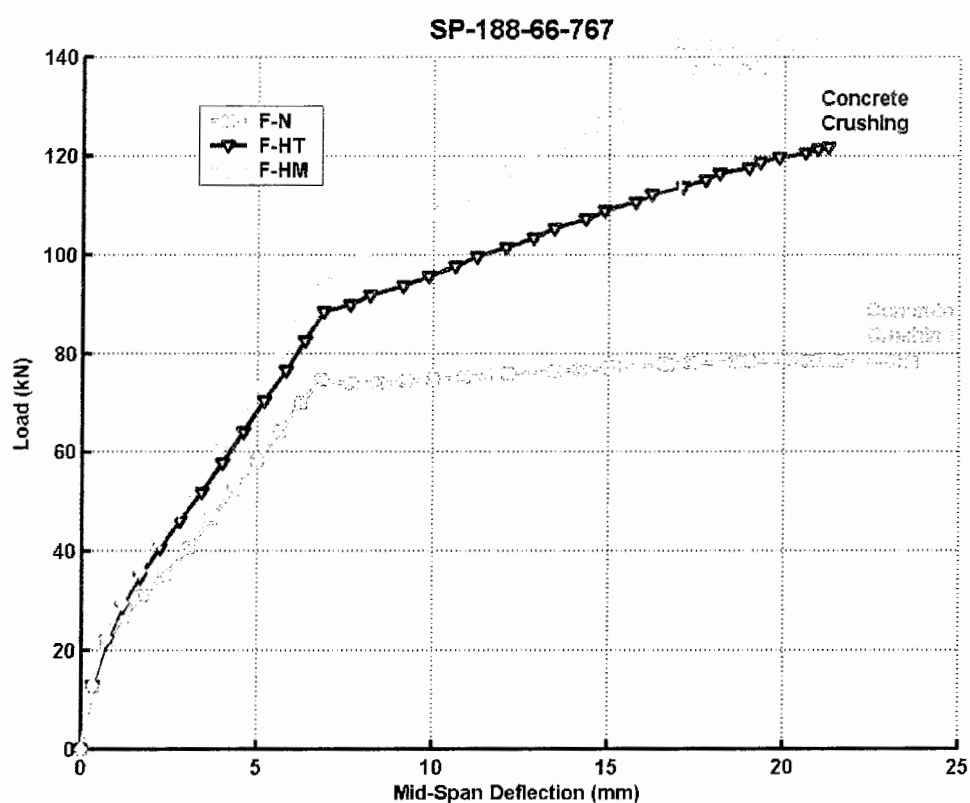
جدول ۶-۸: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
F-N	Proposed	---	0.98	---	0.99	---	0.99	C
	Simplified	---	0.99	---	1.0	---	0.98	C
F-HT	Proposed	---	1.0	---	1.0	---	0.99	C
	Simplified	---	1.0	---	0.97	---	0.99	C
F-HM	Proposed	---	0.97	---	0.97	---	0.97	C
	Simplified	---	0.94	---	0.96	---	0.97	C

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۹-۶: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

Samples	Models	Ultimate			Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
F-HT	No Debonding Control	121.85	---	0.88	Concrete Crushing
	FRP End Debonding Control	> 121.85	---	---	
	Concrete Cover Separation Control	> 121.85	---	---	
F-HM	No Debonding Control	141.79	---	0.91	Concrete Cover Separation
	FRP End Debonding Control	> 141.79	---	---	
	Concrete Cover Separation Control	132.47	---	0.83	



شکل ۶-۶: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی)

در دو نمونه تقویت شده طبق نتایج مدل، نمونه F-HT که سختی FRP در آن از نمونه F-HM کمتر است، نیروی ماکزیمم کمتری را نسبت به F-HM ارائه داده و برخلاف این نمونه، دچار جداشدگی نشده است. ولی نمونه F-HM قبل از شکست خمشی دچار جداشدگی پوشش بتنی می‌گردد. این پدیده در نتایج تجربی نیز دیده می‌شود (جدول ۹-۶).

## ۴-۲-۶: آزمایش چهارم

در این آزمایش که توسط Wu et al. (1999) انجام شده است، دو نمونه از آن که یکی نمونه شاهد و دیگری نمونه تقویت شده با CFRP می باشد، بررسی می گردد. نمونه ها به صورت بار متمرکز در وسط دهانه تیر بارگذاری شده اند (بارگذاری سه نقطه ای). خصوصیات ابعادی و مکانیکی اجزای مختلف تیر در جدول ۶-۱۰ آورده شده است. نتایج نیز در جداول ۶-۱۱ و ۶-۱۲ ارائه شده است. دیاگرام نیرو - تغییرمکان برای نمونه تقویت شده با توجه به مدل اصلی رسم شده است (شکل ۶-۷). نکته قابل ذکر در این شکل و کلیه دیاگرامهای نیرو - تغییرمکان، آنستکه مرجع نمونه ها به طور اختصاری در بالای هر دیاگرام نوشته شده است.

جدول ۶-۱۰: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	Normal RC beam	RC beam S.W.CFS
Width of beam (b) [mm]	150	150
Depth of beam (h) [mm]	200	200
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	20	20
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	43.5	43.5
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	53.5	53.5
Depth of tension bars (d) [mm]	160	160
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	402	402
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	100.5	100.5
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	360	360
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	520	520
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	210	210
Depth of compression bars (d') [mm]	40	40
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	265.5	265.5
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	360	360
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	210	210
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	150
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.11
Number of layer ( $n_f$ )	---	2
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	3200
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	230
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	1
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	3.43
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	1.27
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	900	50
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	850
Midspace-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	0	0

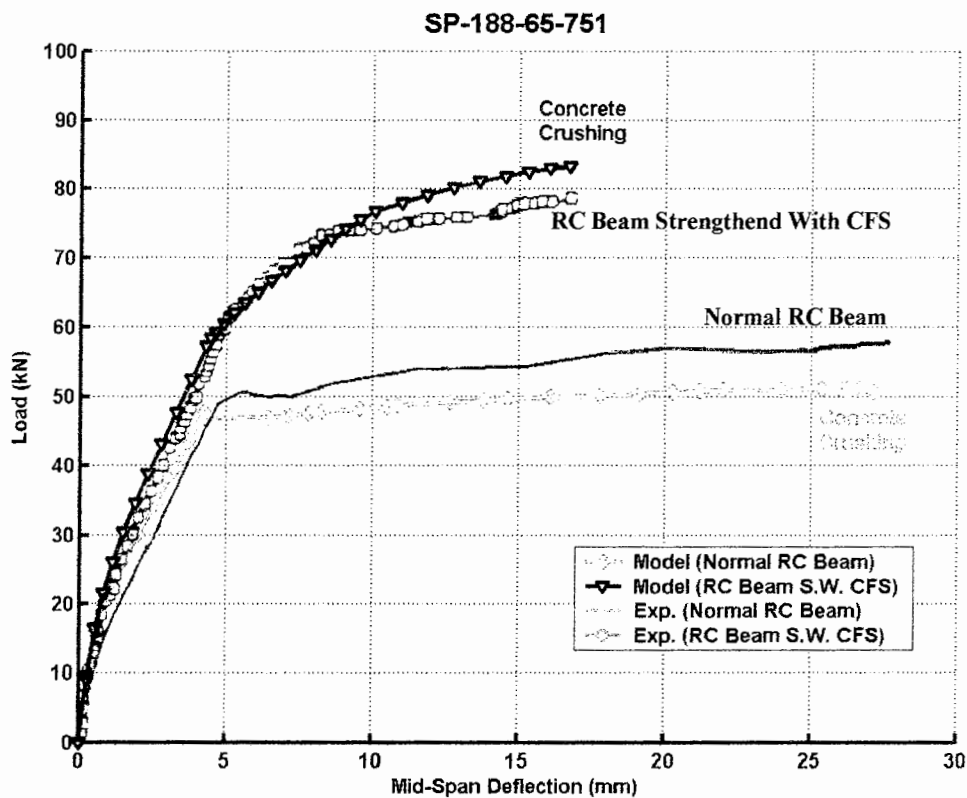
جدول ۱۱-۶ : نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
		Normal RC beam	Proposed	0.90	1.04	0.84	0.93	
	Simplified	0.90	1.04	0.87	0.97	0.98	0.95	C
RC Beam S.W. CFS	Proposed	0.99	1.07	0.89	0.97	1.0	0.93	C
	Simplified	0.99	1.01	0.90	0.96	1.0	0.97	C

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۱۲-۶ : نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

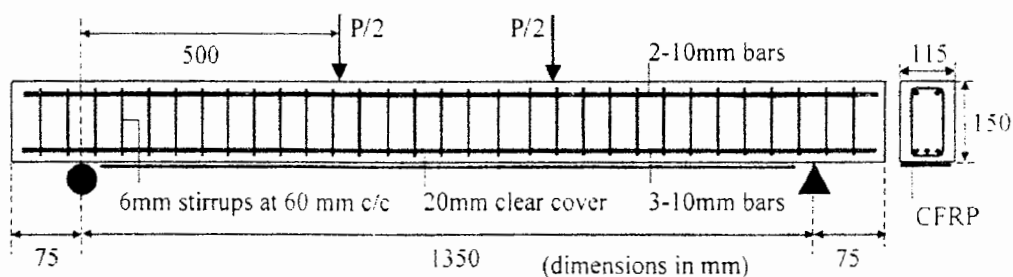
Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
SP2	No Debonding Control	83.22	1.0	1.05	Concrete Crushing	Concrete Crushing
	FRP End Debonding Control	> 83.22	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 83.22	---	---		



شکل ۷-۶ : دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی)

## ۵-۲-۶: آزمایش پنجم

در این آزمایش که توسط (Maalej and Bian (2001) انجام شده است، پنج نمونه مورد بررسی قرار گرفته که یک نمونه به عنوان نمونه شاهد و چهار نمونه دیگر به ترتیب با یک، دو، سه و چهار لایه FRP به صورت خمشی تقویت شده اند. نحوه بارگذاری نمونه ها و تقویت آنها در شکل ۸-۶ نشان داده شده است.



شکل ۸-۶: نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها

جدول ۶-۱۳: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	Beam 1	Beam 2	Beam 3	Beam 4	Beam 5
Width of beam (b) [mm]	115	115	115	115	115
Depth of beam (h) [mm]	150	150	150	150	150
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	10	10	10	10	10
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	30	30	30	30	30
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	43.3	43.3	43.3	43.3	43.3
Depth of tension bars (d) [mm]	130	130	130	130	130
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	235.6	235.6	235.6	235.6	235.6
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	94	94	94	94	94
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	534	534	534	534	534
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	622	622	622	622	622
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	184	184	184	184	184
Depth of compression bars (d') [mm]	20	20	20	20	20
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	157	157	157	157	157
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	534	534	534	534	534
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	184	184	184	184	184
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	115	115	115	115
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.111	0.111	0.111	0.111
Number of layer ( $n_f$ )	---	1	2	3	4
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	3400	3400	3400	3400
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	230	230	230	230
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	0.636	1	1.5	2
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	1.47	1.47	1.47	1.47
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	0.56	0.56	0.56	0.56
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	500	30	30	30	30
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	470	470	470	470
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	175	175	175	175	175

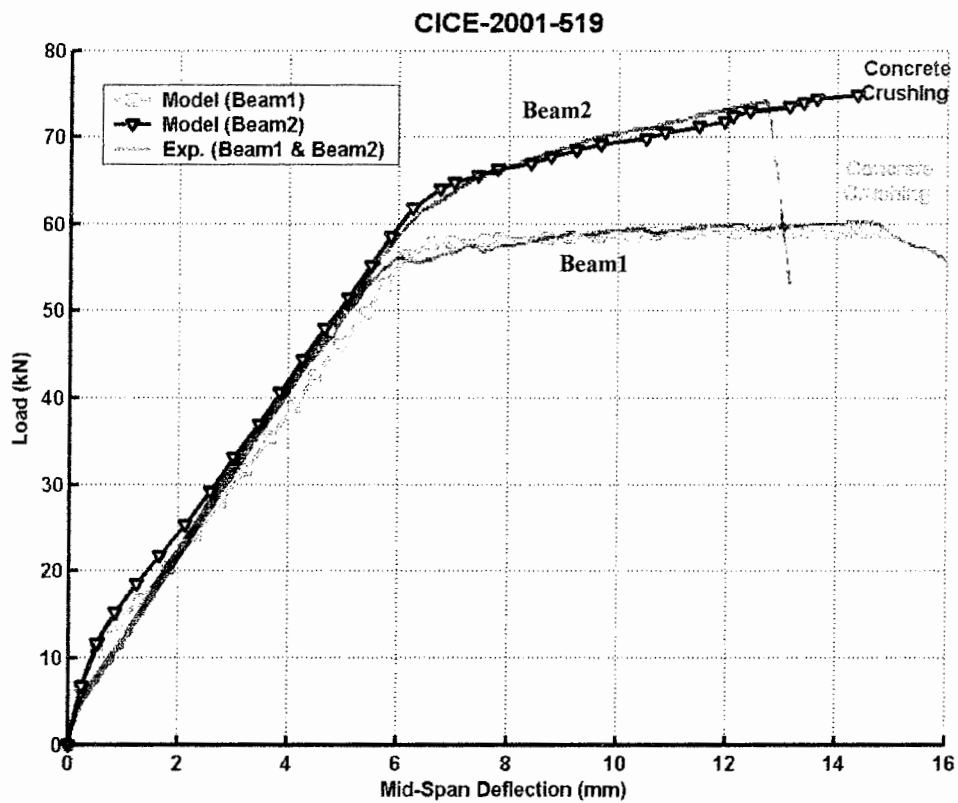
جدول ۶-۱۴: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
Beam1	Proposed	---	---	1.0	1.0	0.94	1.0	C
	Simplified	---	---	0.99	1.01	0.93	1.0	C
Beam2	Proposed	---	---	1.0	1.0	1.11	1.05	C
	Simplified	---	---	1.01	1.01	1.13	1.01	C
Beam3	Proposed	---	---	1.0	0.99	1.07	1.0	C
	Simplified	---	---	1.0	0.99	1.07	1.0	C
Beam4	Proposed	---	---	1.0	1.03	1.30	1.05	C
	Simplified	---	---	1.0	1.03	1.29	1.05	C
Beam5	Proposed	---	---	1.0	0.99	1.19	1.07	C
	Simplified	---	---	1.01	0.99	1.20	1.07	C

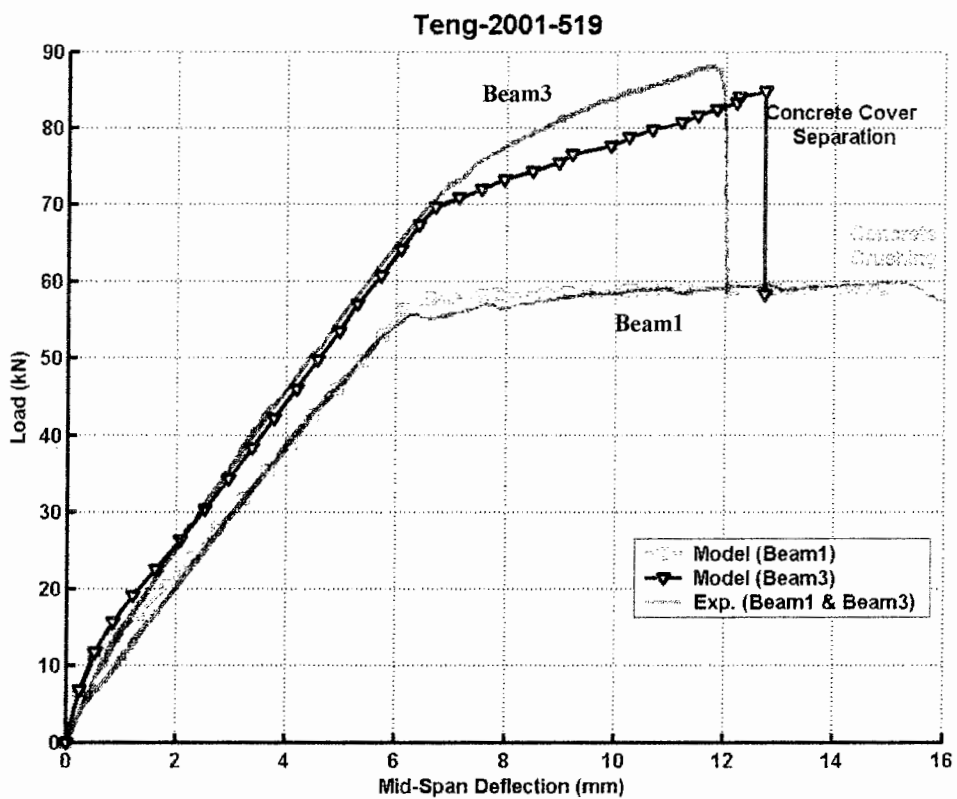
C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۶-۱۵: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
Beam2	No Debonding Control	75.24	1.11	1.05	Concrete Cover Separation	Concrete Crushing
	FRP End Debonding Control	> 75.24	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 75.24	---	---		
Beam3	No Debonding Control	86.0	1.07	1.0	Concrete Cover Separation	Concrete Cover Separation
	FRP End Debonding Control	> 86.0	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	81.05	1.03	0.92		
Beam4	No Debonding Control	94.14	1.30	1.15	Concrete Cover Separation	Concrete Cover Separation
	FRP End Debonding Control	> 94.14	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	81.17	0.95	0.99		
Beam5	No Debonding Control	100.70	1.19	1.27	Concrete Cover Separation	Concrete Cover Separation
	FRP End Debonding Control	> 100.70	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	78.24	0.99	1.0		

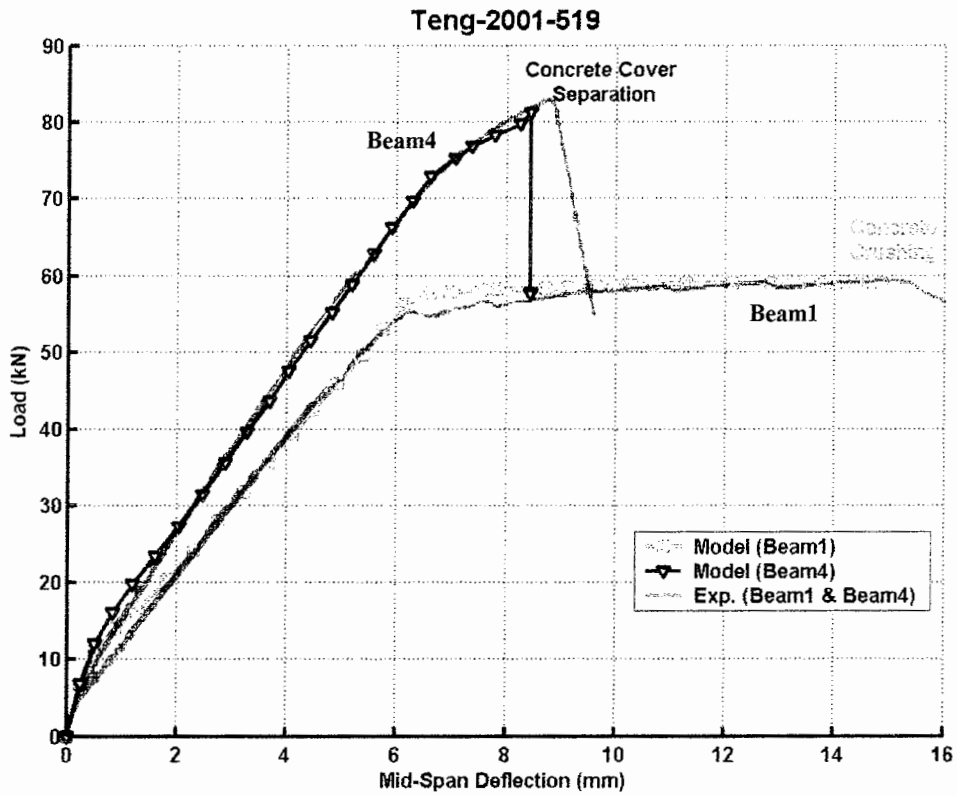


شکل ۹-۶: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان وسط تیرهای شاهد و Beam2 (مدل پیشنهادی و نتایج تجربی)

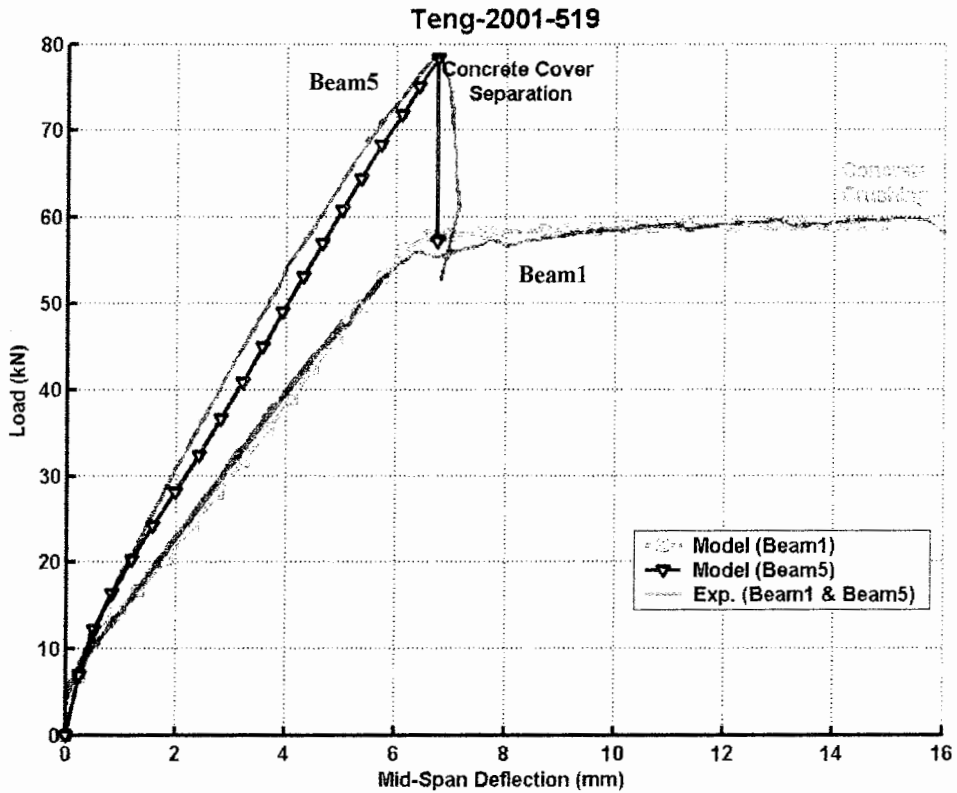


شکل ۱۰-۶: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان وسط تیرهای شاهد و Beam3 (مدل پیشنهادی و نتایج تجربی)





شکل ۶-۱۱: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان وسط تیرهای شاهد و Beam4 (مدل پیشنهادی و نتایج تجربی)



شکل ۶-۱۲: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان وسط تیرهای شاهد و Beam5 (مدل پیشنهادی و نتایج تجربی)

همانطور که در نتایج شکل‌های ۶-۹ الی ۶-۱۲ مشاهده می‌شود، مقادیر نیروی نهایی گسیختگی تیر و رفتار نمونه‌ها بسیار مشابه با نتایج عملی می‌باشد. در سه نمونه آخر Beam3، Beam4 و Beam5، مود گسیختگی جداشدن پوشش بتنی بوده که سازگاری خوبی با نتایج عملی دارد. در نمونه Beam5 جداشدن پوشش بتنی در هنگام تسلیم شدن فولاد رخ می‌دهد، چراکه وجود تعداد لایه‌های زیاد FRP مانع از افزایش قابل ملاحظه کرنش در آرماتورهای کششی می‌گردد.

### ۶-۲-۶: آزمایش ششم

در این آزمایش که توسط Xiong et al. (2001) انجام شده است شامل دو سری نمونه با ابعاد مختلف می‌باشد. جهت تقویت خمشی این نمونه‌ها از دو نوع FRP (یکی با الیافهای کربن، CF1، و دیگری با الیافهای شیشه، GF1) استفاده شده است. خصوصیات نمونه‌ها در جدول ۶-۱۶ گردآوری شده است. نتایج نیز همانند دیگر آزمایشها در جداول و دیاگرامهایی ارائه شده اند.

جدول ۶-۱۶: خصوصیات نمونه‌ها

پارامترها	P1	CF1	GF1	P3	CF3
Width of beam (b) [mm]	120	120	120	80	80
Depth of beam (h) [mm]	150	150	150	120	120
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	10	10	10	10	10
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6
Depth of tension bars (d) [mm]	120	120	120	100	100
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	226.2	226.2	226.2	226.2	226.2
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	75.4	75.4	75.4	75.4	75.4
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	569	569	569	346.7	346.7
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	700	700	700	450	450
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	30	30	30	20	20
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	534	534	534	534	534
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	80	80	---	50
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.11	0.08	---	0.11
Number of layer ( $n_f$ )	---	1	1	---	1
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	3652	350	---	3652
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	252	17	---	252

ادامه جدول ۱۶-۶ : خصوصیات نمونه ها

پارامترها	P1	CF1	GF1	P3	CF3
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	1	1	---	1
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	11	11	---	11
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	4.4	4.4	---	4.4
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	600	0	0	600	0
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	600	600	0	600
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	300	300	300	300	300

همانطور که در جدول ۱۶-۶ مشاهده می شود ، نمونه ها به دو سری با ابعاد مختلف تقسیم می شوند که در سری دوم جهت تقویت خمشی نمونه شاهد تنها از CFRP استفاده شده است ؛ لذا دیاگرامهای آنها در دو شکل مختلف (شکلهای ۱۳-۶ و ۱۴-۶) رسم شده است .

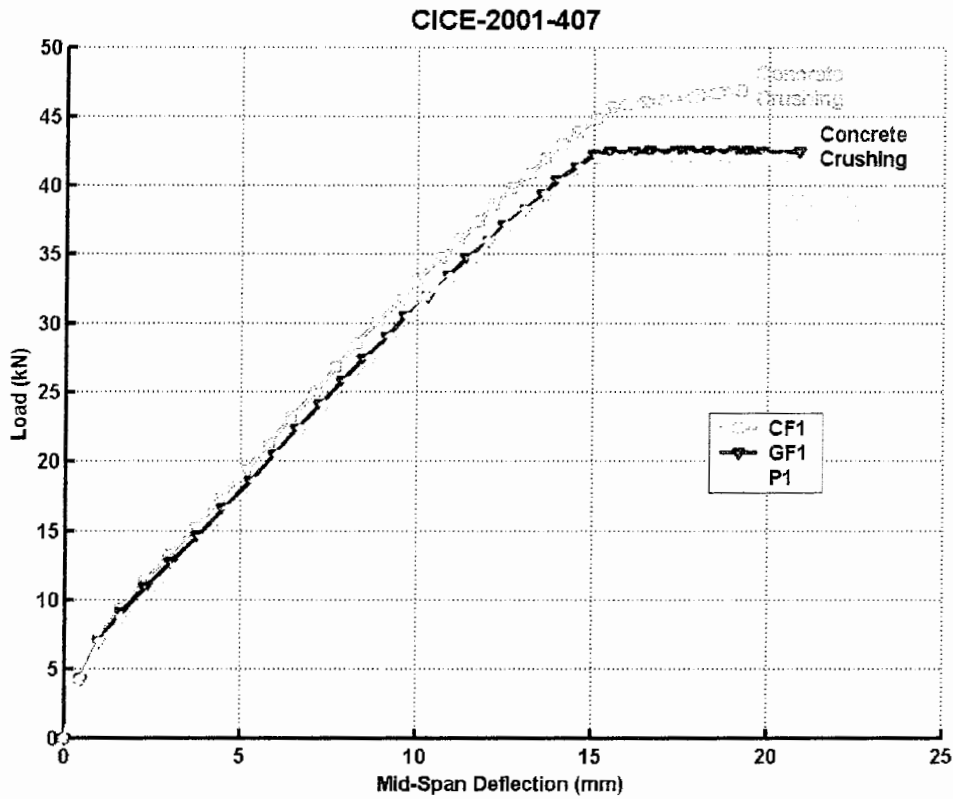
جدول ۱۷-۶ : نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
P1	Proposed	---	---	1.04	0.98	---	0.97	C
	Simplified	---	---	1.04	0.98	---	0.97	C
CF1	Proposed	---	---	1.26	0.95	1.29	0.95	C
	Simplified	---	---	1.23	0.95	1.32	0.95	C
GF1	Proposed	---	---	1.10	0.93	1.19	0.93	C
	Simplified	---	---	1.07	0.93	1.17	0.93	C
P3	Proposed	---	---	---	---	---	0.91	C
	Simplified	---	---	---	---	---	0.91	C
CF3	Proposed	---	---	---	---	---	0.92	C
	Simplified	---	---	---	---	---	0.92	C

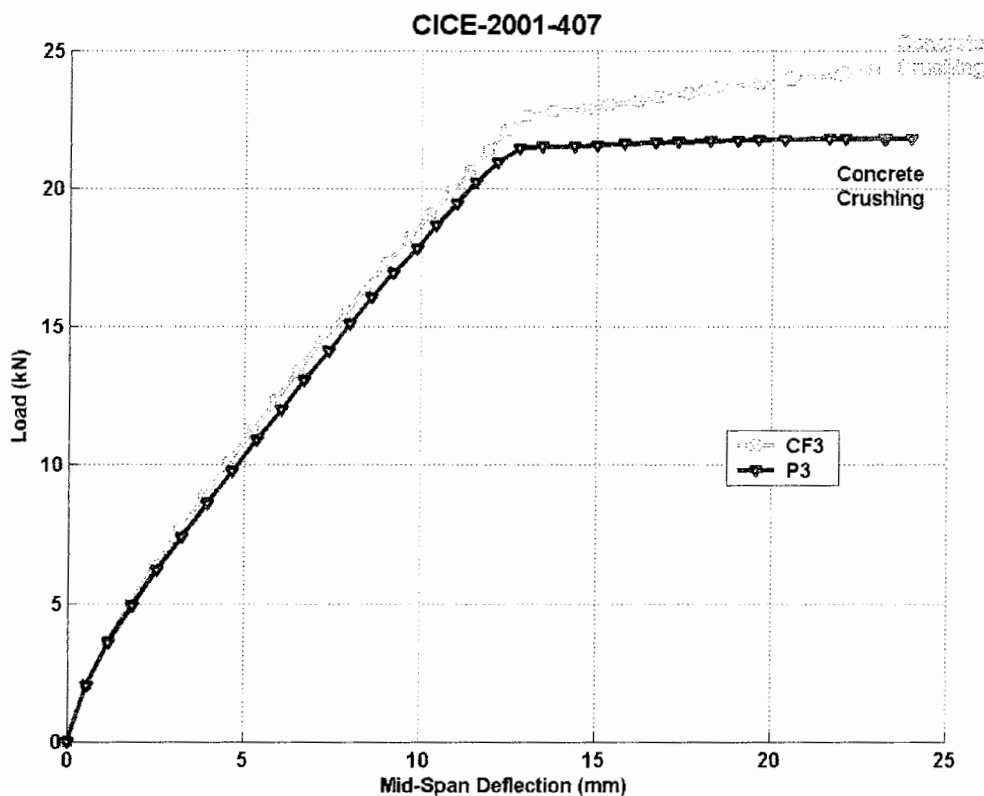
C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۶-۱۸: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
CF1	No Debonding Control	46.89	1.29	0.91	Concrete Crushing	Concrete Crushing
	FRP End Debonding Control	> 46.89	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 46.89	---	---		
GF1	No Debonding Control	42.53	1.19	0.89	Concrete Crushing	Concrete Crushing
	FRP End Debonding Control	> 42.53	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 42.53	---	---		
CF3	No Debonding Control	24.29	---	0.80	Concrete Crushing	Concrete Crushing
	FRP End Debonding Control	> 24.29	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 24.29	---	---		



شکل ۶-۱۳: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیرهای CF1، GF1 و P1 (بدست آمده از مدل پیشنهادی)



شکل ۶-۱۴: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای P3 و CF3 (بدست آمده از مدل پیشنهادی)

#### ۶-۲-۷: آزمایش هفتم

این آزمایش توسط (Weijian and Huiming (2001) انجام شده است که در این قسمت سه نمونه از آن مورد بررسی قرار می گیرد. نمونه اول نمونه شاهد بوده و دو نمونه دیگر هرکدام توسط دو و سه لایه CFRP به صورت خمشی تقویت شده اند. داده های لازم برای مدلها در جدول ۶-۱۹ گردآوری شده اند. نتایج نیز در جداول ۶-۲۰ و ۶-۲۱ ارائه گردیده اند. دیاگرام نیرو - تغییرمکان در وسط دهانه نیز برای هر سه نمونه در شکل ۶-۱۵ آورده شده است.

جدول ۶-۱۹: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	# 6	# 8	# 10
Width of beam (b) [mm]	100	100	100
Depth of beam (h) [mm]	180	180	180
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	20	20	20
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	35	35	35
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	44.8	44.8	44.8
Depth of tension bars (d) [mm]	155	155	155
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	150.8	150.8	150.8
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	75.4	75.4	75.4
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	324	324	324
Ultimate stress of tension bars ( $f_{st}$ ) [MPa]	410	410	410
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200	200
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	25	25	25
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	56.5	56.5	56.5
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	324	324	324
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	100	100	---
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	0.111	0.111	---
Number of layer ( $n_f$ )	2	3	---
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	3550	3550	---
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	235	235	---
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	1.5	2	---
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	11	11	---
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	4.4	4.4	---
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	0	0	700
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	700	700	0
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	300	300	300

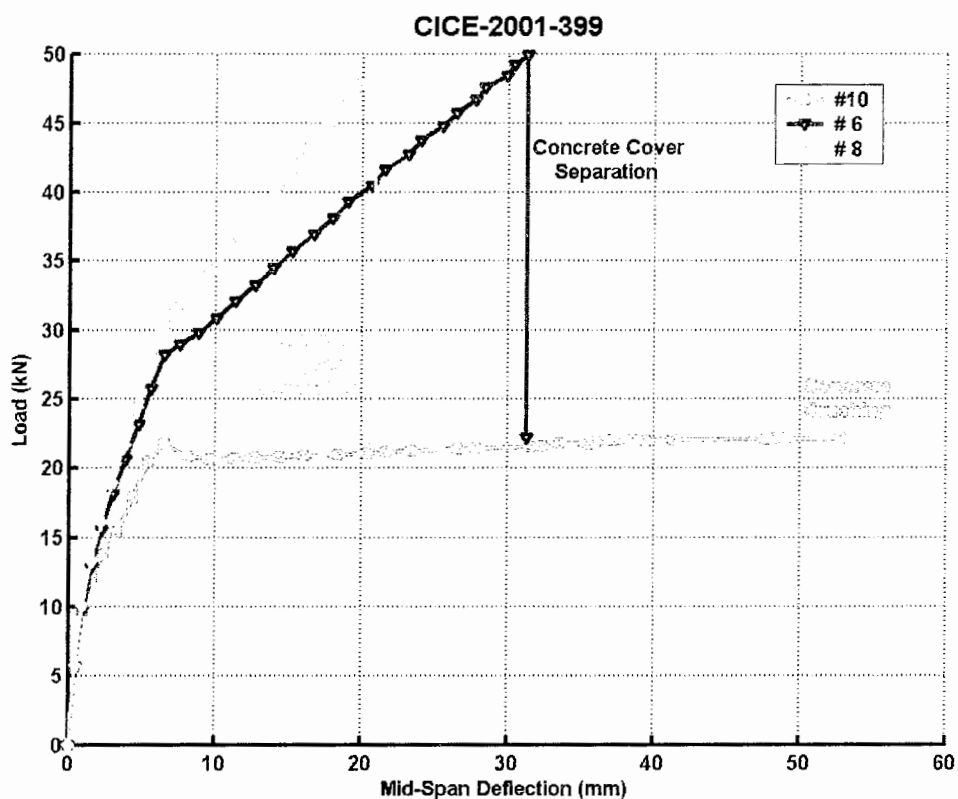
جدول ۶-۲۰: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
#10	Proposed	---	---	---	---	---	---	C
	Simplified	---	---	---	---	---	---	C
#8	Proposed	---	---	---	---	---	---	C
	Simplified	---	---	---	---	---	---	C
#6	Proposed	---	---	---	---	---	---	C
	Simplified	---	---	---	---	---	---	C

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۶-۲۱: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

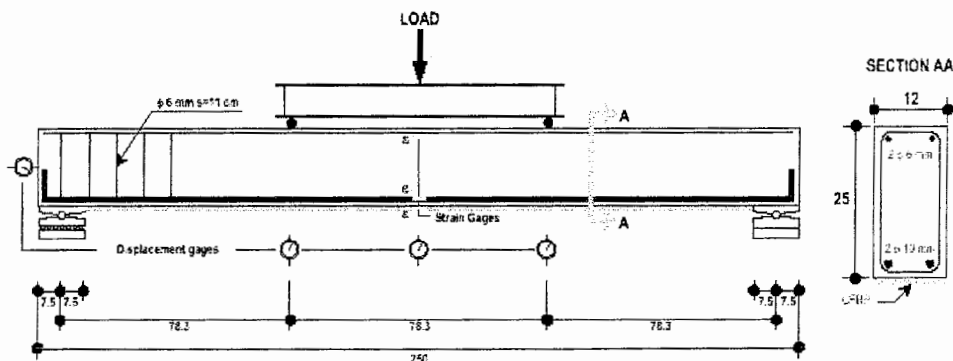
Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp}}$		
#6	No Debonding Control	52.61	---	1.22	Concrete Cover Separation	Concrete Cover Separation
	FRP End Debonding Control	> 52.61	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	49.92	---	1.13		
#8	No Debonding Control	60.96	---	1.62	Concrete Cover Separation	Concrete Cover Separation
	FRP End Debonding Control	> 60.96	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	49.14	---	1.3		



شکل ۶-۱۵: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی)

## ۶-۲-۸: آزمایش هشتم

در این آزمایش که توسط Beber et al. (2001) انجام شده است، اثر تعداد لایه های FRP در میزان مقاومت خمشی و اثر آن بر روی دیاگرام نیرو - تغییرمکان بررسی شده است. در این آزمایش پنج نمونه مورد بررسی قرار گرفته که یکی از آنها به عنوان نمونه شاهد، تقویت نشده است. چهار نمونه بعدی هر کدام به ترتیب با یک، چهار، هفت و ده لایه CFRP به صورت خمشی تقویت شده اند. نحوه بارگذاری و مقاومت سازی نمونه ها در شکل ۶-۱۶ نشان داده شده است. داده های لازم جهت استفاده در مدلها نیز در جدول ۶-۲۲ گردآوری شده است.



شکل ۶-۱۶: نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها

جدول ۶-۲۲: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	VT1	VR3	VR5	VR7	VR9
Width of beam (b) [mm]	120	120	120	120	120
Depth of beam (h) [mm]	250	250	250	250	250
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	20	20	20	20	20
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	42.76	42.76	42.76	42.76	42.76
Depth of tension bars (d) [mm]	220	220	220	220	220
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	157	157	157	157	157
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	62.8	62.8	62.8	62.8	62.8
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	565	565	565	565	565
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	700	700	700	700	700
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200
Depth of compression bars (d') [mm]	30	30	30	30	30
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	738	738	738	738	738
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	120	120	120	120
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.167	0.167	0.167	0.167
Number of layer ( $n_f$ )	---	1	4	7	10



ادامه جدول ۶-۲۲: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	VT1	VR3	VR5	VR7	VR9
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	3400	3400	3400	3400
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	230	230	230	230
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	1	3.25	5.5	7.75
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	3.034	3.034	3.034	3.034
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	1.08	1.08	1.08	1.08
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	783	75	75	75	75
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	708	708	708	708
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	391.5	391.5	391.5	391.5	391.5

جدول ۶-۲۳: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
VT1	Proposed	1.01	1.0	1.11	0.99	---	1.06	C
	Simplified	1.01	1.0	1.0	1.0	---	1.06	C
VR3	Proposed	1.03	1.0	1.03	1.03	---	1.06	R
	Simplified	1.03	1.01	1.0	1.0	---	1.01	R
VR5	Proposed	1.05	1.03	0.87	1.0	---	1.06	C
	Simplified	1.05	1.09	0.94	1.01	---	1.06	C
VR7	Proposed	1.07	1.04	0.86	1.02	---	1.07	C
	Simplified	1.07	1.04	0.85	1.02	---	1.07	C
VR9	Proposed	1.07	1.04	0.86	1.02	---	1.07	C
	Simplified	1.07	1.04	0.85	1.02	---	1.07	C

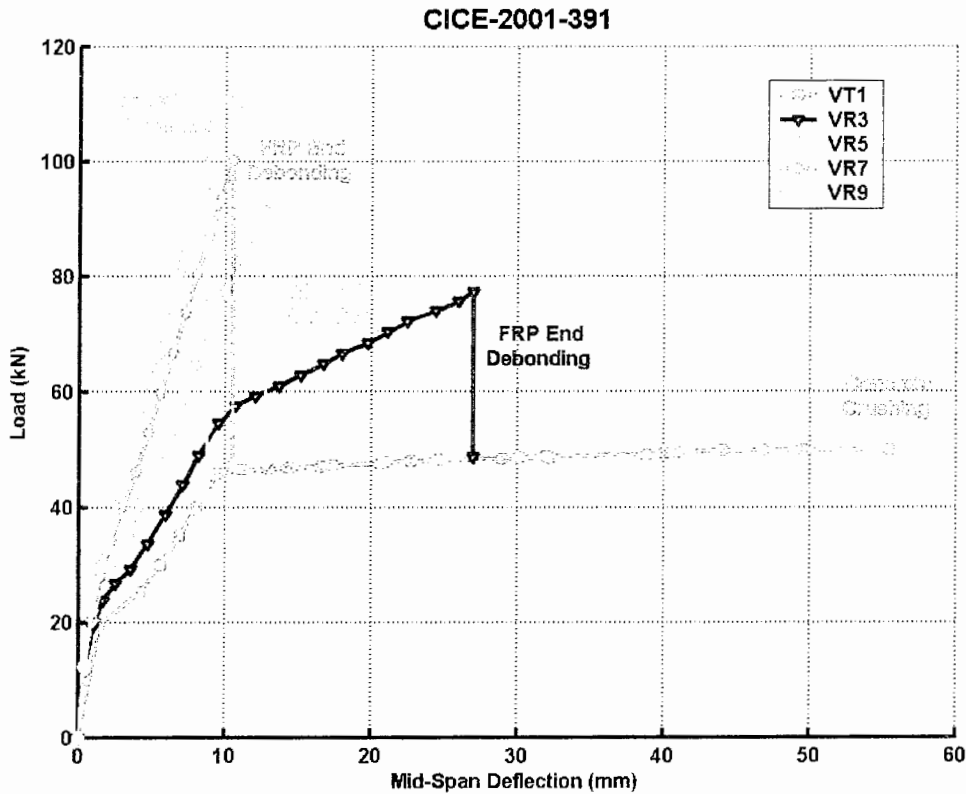
C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۶-۲۴: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
VR3	No Debonding Control	81.92	---	1.29	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	77.23	---	1.21		
	Concrete Cover Separation Control	> 81.92	---	---		
VR5	No Debonding Control	142.12	---	1.40	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	90.98	---	0.99		
	Concrete Cover Separation Control	129.68	---	1.28		
VR7	No Debonding Control	168.86	---	1.36	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	100.21	---	0.81		
	Concrete Cover Separation Control	116.40	---	0.94		

ادامه جدول ۶-۲۴: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

Samples	Models	Ultimate			Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp}}$	
VR9	No Debonding Control	187.37	---	1.41	Concrete Cover Separation
	FRP End Debonding Control	108.86	---	0.82	
	Concrete Cover Separation Control	102.06	---	0.77	



شکل ۶-۱۷: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی)

همانطور که در جدول ۶-۲۴ و شکل ۶-۱۷ مشاهده می شود، تمامی نمونه های تقویت شده بر اثر پدیده جداشدگی گسیخته می گردند. در نمونه های VR5، VR7 و VR9 هر دو مدل کنترل جداشدگی، نیروی نهایی تیر را محدود کرده و پیش بینی می نمایند که این نمونه ها قبل از گسیختگی خمشی، دچار جداشدگی می شوند. اما در دو نمونه VR5 و VR7 مقدار نیروی نهایی پیش بینی شده توسط مدل جداشدگی در انتهای FRP کمتر از مقدار نظیر آن برای مدل جداشدن پوشش بتنی می باشد. لذا این دو نمونه بر اثر جداشدن FRP در انتهایش، گسیخته خواهند شد. اما

در نمونه VR9 برعکس بوده و لذا گسیختگی، ناشی از جدا شدن پوشش بتنی پیش بینی می گردد. نکته دیگر آنستکه با افزایش تعداد لایه ها، سختی تیر بیشتر شده و همانطور که انتظار می رود، تغییر مکان وسط دهانه تیر کاهش می یابد؛ بنابراین تغییر شکل تیر قبل از گسیختگی کاهش یافته و شکل پذیری آن به طور قابل توجهی کاهش خواهد یافت.

### ۹-۲-۶: آزمایش نهم

در این آزمایش که توسط (Shokrieh and Mousavi (2001) انجام شده است، دو نمونه مورد بررسی قرار گرفته اند. نمونه اول (Beam-A) نمونه شاهد بوده و نمونه دوم (Beam-B) به وسیله پنج لایه GFRP به صورت خمشی تقویت شده است. مشخصات این دو نمونه در جدول ۶-۲۵ آورده شده است. نتایج مدلها نیز در جداول ۶-۲۶ و ۶-۲۷ گردآوری شده است.

جدول ۶-۲۵: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	Beam-A	Beam-B
Width of beam (b) [mm]	152	152
Depth of beam (h) [mm]	152	152
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	25	25
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	37	37
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	47	47
Depth of tension bars (d) [mm]	116	116
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	157	157
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	62.8	62.8
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	450	450
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	550	550
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200
Depth of compression bars (d') [mm]	36	36
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	56.52	56.52
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	450	450
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	152
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.3
Number of layer ( $n_f$ )	---	5
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	210
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	42
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	4.5
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	3
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	1.07
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	420	70
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	350
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	210	210

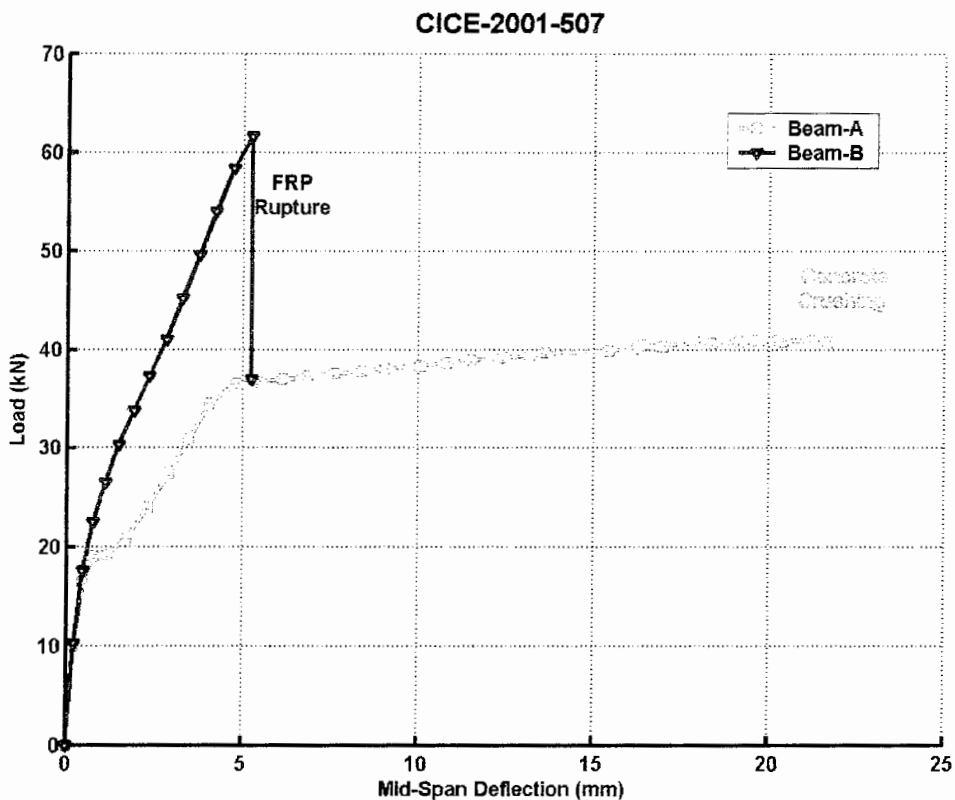
جدول ۶-۲۶: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
Beam A	Proposed	1.03	1.10	0.95	0.94	---	0.90	C
	Simplified	1.03	1.10	0.92	0.89	---	0.90	C
Beam B	Proposed	1.03	1.09	0.95	1.28	---	1.07	R
	Simplified	1.03	1.09	0.90	1.16	---	0.90	R

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۶-۲۷: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

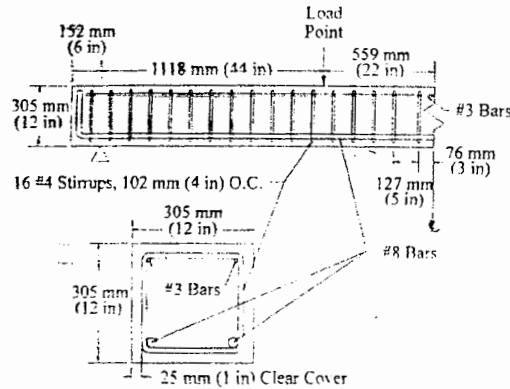
Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
Beam B	No Debonding Control	64.24	---	0.71	FRP Rupture	FRP Rupture
	FRP End Debonding Control	> 64.24	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 64.24	---	---		



شکل ۶-۱۸: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی)

## ۶-۲-۱۰: آزمایش دهم

در این آزمایش که توسط Lamanna et al. (2001) انجام شده است، نتایج دو نمونه از آن با نتایج مدل مقایسه شده است. نمونه اول به عنوان نمونه شاهد و نمونه دوم به وسیله نوعی کامپوزیت FRP که ترکیبی از الیافهای شیشه ای و کربنی می باشد، به صورت خمشی تقویت شده است. نحوه بارگذاری نمونه ها در شکل ۶-۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۹: نحوه بارگذاری نمونه ها

جدول ۶-۲۸: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	Control	Bonded Beam
Width of beam (b) [mm]	350	350
Depth of beam (h) [mm]	350	350
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	25	25
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	32.7	32.7
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	41.32	41.32
Depth of tension bars (d) [mm]	310	310
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	1020	1020
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	159.6	159.6
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	410	410
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	520	520
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	40	40
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	142	142
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	410	410
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	102
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	3.175
Number of layer ( $n_f$ )	---	1

ادامه جدول ۶-۲۸ : خصوصیات نمونه ها

پارامترها	Control	Bonded Beam
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	862
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	59.4
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	3.5
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	3.43
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	1.27
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	1118	153
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	965
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	559	559

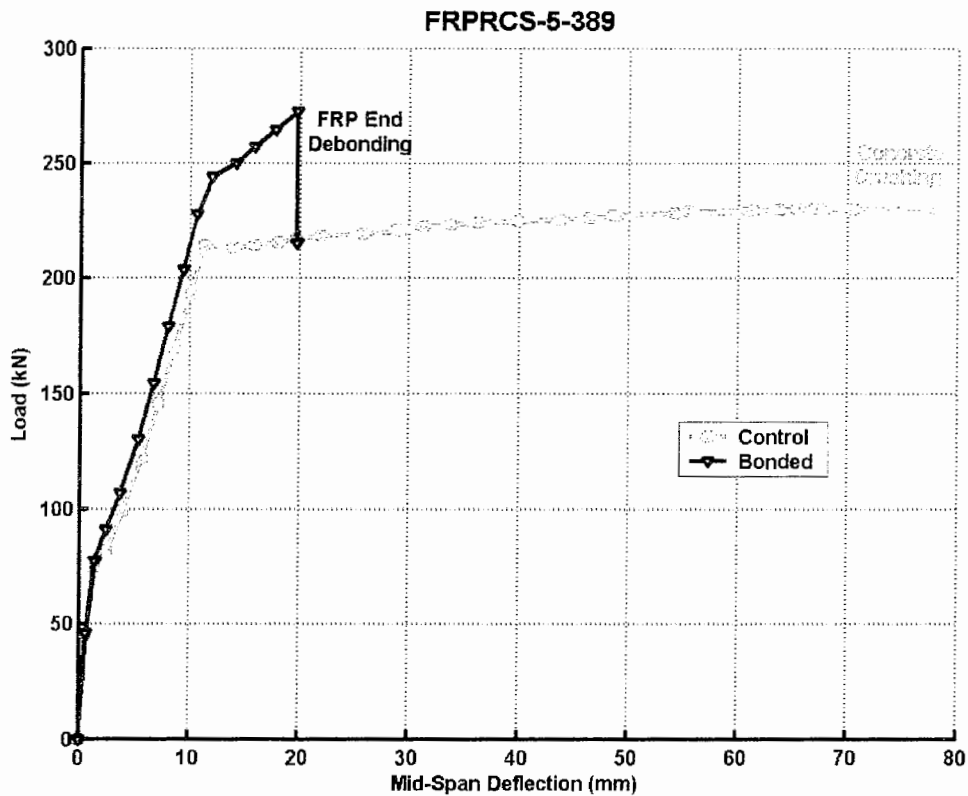
جدول ۶-۲۹ : نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
Control Beam	Proposed	1.0	1.52	---	0.98	1.20	0.94	C
	Simplified	1.0	1.52	---	0.98	1.09	0.94	C
Bonded Beam	Proposed	1.07	1.53	---	0.92	---	0.74	R
	Simplified	1.07	1.53	---	0.93	---	0.73	R

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۶-۳۰ : نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

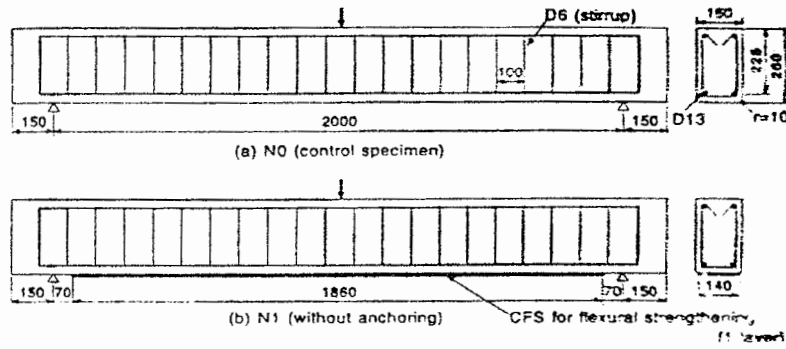
Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
Bonded Beam	No Debonding Control	361.18	---	1.24	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	372.03	---	0.93		
	Concrete Cover Separation Control	> 361.18	---	---		



شکل ۶-۲۰: دیاگرام تغییرات ممان نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی)

#### ۶-۲-۱۱: آزمایش یازدهم

از این آزمایش که توسط Sagawa et al. (2001) انجام شده، سه نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه اول (N0) نمونه شاهد بوده و دو نمونه دیگر (N1، M1) به کمک CFRP به صورت خمشی تقویت شده اند. بارگذاری نمونه ها به صورت سه نقطه ای می باشد. نحوه تقویت و بارگذاری این سه نمونه در شکل ۶-۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۶-۲۱: نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها

جدول ۶-۳۱: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	N0	N1	N1
Width of beam (b) [mm]	160	160	160
Depth of beam (h) [mm]	250	250	250
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	25	25	25
Cylindric compressive strength ( $f_c$ ) [MPa]	31.3	31.3	39
Cubic compressive strength ( $f_{cu}$ ) [MPa]	39.08	39.08	49
Depth of tension bars (d) [mm]	225	225	225
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	265	265	265
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	81.7	81.7	81.7
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	341	341	341
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	503	503	503
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	179	179	179
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	25	25	25
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	265	265	265
Yield stress of compression bars ( $f_y$ ) [MPa]	341	341	341
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	179	179	179
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	140	140
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.165	0.165
Number of layer ( $n_f$ )	---	1	1
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	3480	3480
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	230	230
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	1.5	1.5
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	11	11
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	4.23	4.23
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	1000	70	70
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	930	930
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	0	0	0

جدول ۶-۳۲: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
N0	Proposed	---	---	0.98	0.27	1.01	0.97	C
	Simplified	---	---	0.93	0.07	1.01	0.92	C
N1	Proposed	---	---	1.0	0.96	1.0	0.97	R
	Simplified	---	---	1.0	1.0	1.0	0.94	R



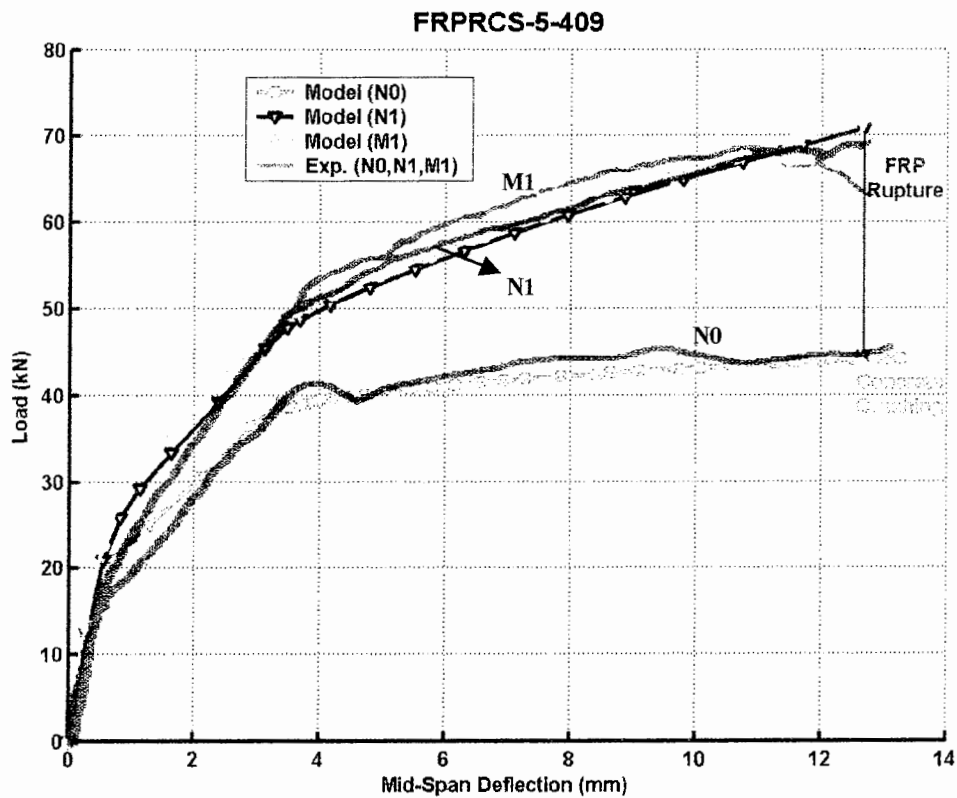
ادامه جدول ۳۲-۶ : نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
M1	Proposed	---	---	0.91	0.98	---	1.02	R
	Simplified	---	---	0.93	1.02	---	1.01	R

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۳۳-۶ : نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

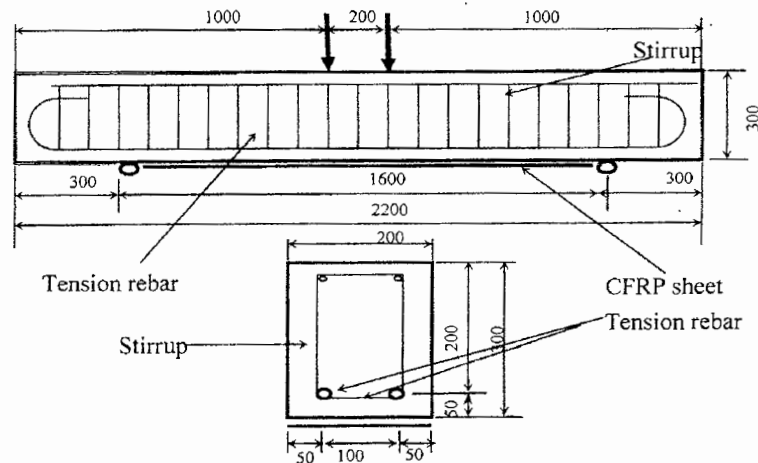
Samples	Models	Ultimate				Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	Failure Mode	
N1	No Debonding Control	70.80	1.0	1.02	FRP Rupture	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	> 70.80	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 70.80	---	---		
M1	No Debonding Control	71.78	---	1.02	FRP Rupture	FRP Rupture
	FRP End Debonding Control	> 71.78	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 71.78	---	---		



شکل ۲۲-۶ : دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی و نتایج عملی)

## ۱۲-۲-۶: آزمایش دوازدهم

در این آزمایش که توسط (Takahashi and Sato (2003) انجام شده، هفت نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. یک نمونه به عنوان نمونه شاهد تقویت نشده و دیگر نمونه ها با تعداد لایه های مختلف که در جدول ۳۴-۶ آورده شده است به صورت خمشی تقویت شده اند. نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها در شکل ۲۳-۶ نشان داده شده است.



شکل ۲۳-۶: نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها

جدول ۳۴-۶: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Width of beam (b) [mm]	200	200	200	200	200	200	200
Depth of beam (h) [mm]	300	300	300	300	300	300	300
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	25	25	25	25	25	25	25
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	47.5	35.8	40.2	39	50.3	50.3	49.5
Cubic compressive strength ( $f_{cu}$ ) [MPa]	57.5	45.8	50.2	49	60.3	60.3	59.5
Depth of tension bars (d) [mm]	250	250	250	250	250	250	250
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	573	573	573	573	573	573	573
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	120	120	120	120	120	120	120
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	371	371	371	371	371	371	371
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	570	570	570	570	570	570	570
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200	200	200
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	50	50	50	50	50	50	50
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	63.34	63.34	63.34	63.34	63.34	63.34	63.34
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	377	377	377	377	377	377	377
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	200	200	200	200	200	200
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167
Number of layer ( $n_f$ )	---	1	2	3	1	2	3
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	3480	3480	3480	3480	3480	3480
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	230	230	230	230	230	230

ادامه جدول ۳۴-۶ : خصوصیات نمونه ها

پارامترها	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	6.04	6.04	6.04	6.04	6.04	6.04
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	700	20	20	20	20	20	20
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	680	680	680	680	680	680
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	100	100	100	100	100	100	100

جدول ۳۵-۶ : نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
F0	Proposed	1.28	3.15	0.76	0.85	0.98	0.73	C
	Simplified	1.28	3.15	0.75	0.87	0.99	0.73	C
F1	Proposed	---	0.93	0.77	0.91	0.97	0.72	R
	Simplified	---	0.93	0.80	0.94	1.06	0.74	R
F2	Proposed	0.88	0.97	0.84	0.90	1.59	0.72	C
	Simplified	0.88	0.97	0.79	0.87	1.60	0.72	C
F3	Proposed	---	0.97	---	0.92	---	0.74	C
	Simplified	---	0.97	---	0.92	---	0.74	C
F4	Proposed	0.88	1.04	0.86	0.85	0.88	0.81	R
	Simplified	0.88	0.94	0.91	0.90	0.90	0.81	R
F5	Proposed	0.88	0.93	0.74	0.91	0.71	0.73	C
	Simplified	0.88	0.93	0.77	0.90	0.72	0.73	C
F6	Proposed	1.28	1.72	0.81	0.95	1.22	0.74	C
	Simplified	1.28	1.42	0.75	0.81	1.24	0.74	C

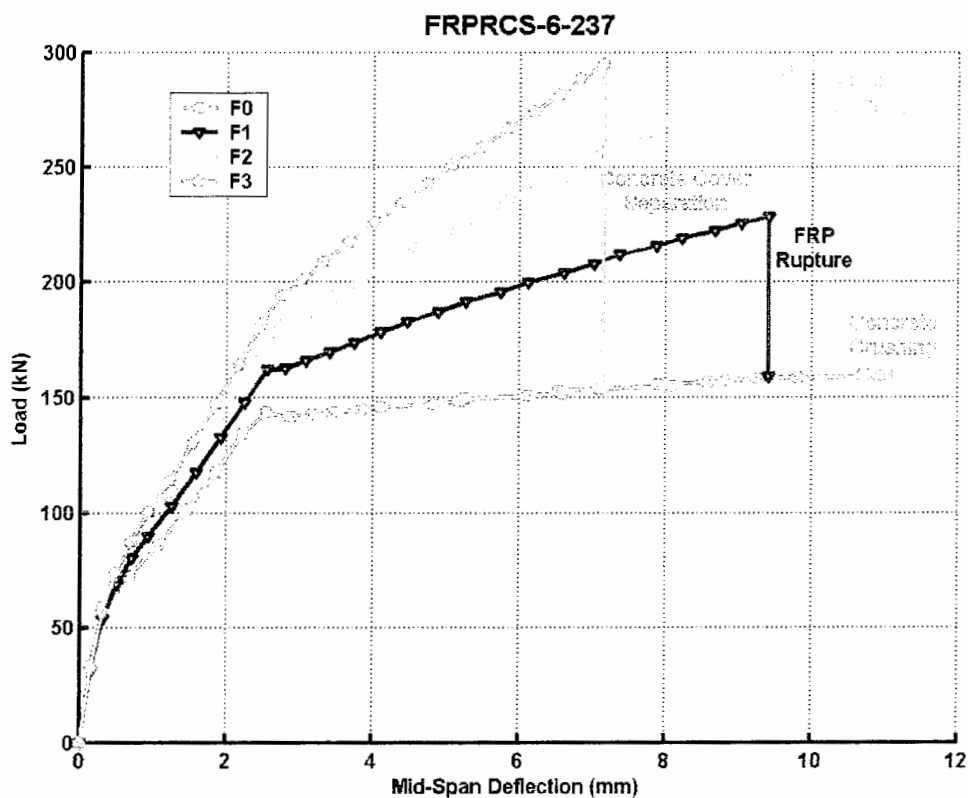
C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۳۶-۶ : نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

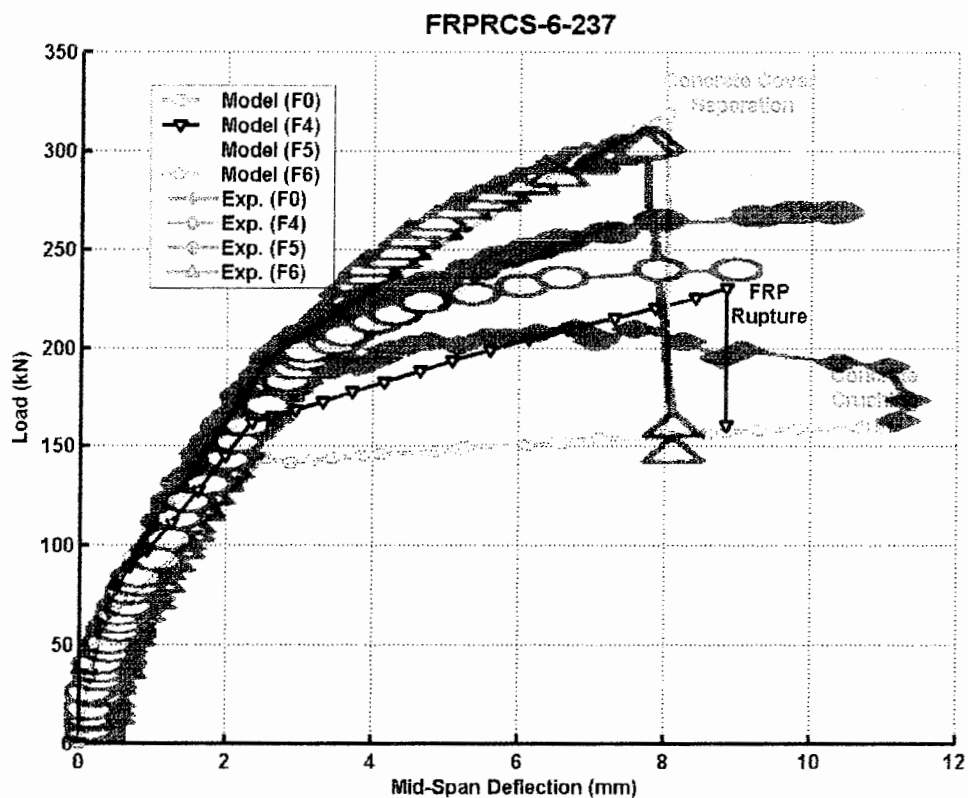
Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
F1	No Debonding Control	230.78	0.97	1.02	FRP Rupture	FRP Rupture
	FRP End Debonding Control	> 230.78	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 230.78	---	---		
F2	No Debonding Control	298.09	1.59	1.22	Concrete Crushing	Concrete Crushing
	FRP End Debonding Control	> 298.09	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 298.09	---	---		

ادامه جدول ۶-۳۶: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp}}$		
F3	No Debonding Control	334.48	---	1.24	Concrete Cover Separation	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	307.19	---	1.14		
	Concrete Cover Separation Control	295.0	---	1.09		
F4	No Debonding Control	230.32	0.88	0.91	FRP Rupture	FRP Rupture
	FRP End Debonding Control	> 230.32	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 230.32	---	---		
F5	No Debonding Control	311.50	0.71	1.12	Concrete Push	Concrete Cover Separation
	FRP End Debonding Control	> 311.50	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 311.50	---	---		
F6	No Debonding Control	352.76	1.22	1.13	Concrete Cover Separation	Concrete Cover Separation
	FRP End Debonding Control	> 352.76	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	319.36	1.0	1.03		



شکل ۶-۲۴: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیرهای F0، F1، F2 و F3 (بدست آمده از مدل پیشنهادی)

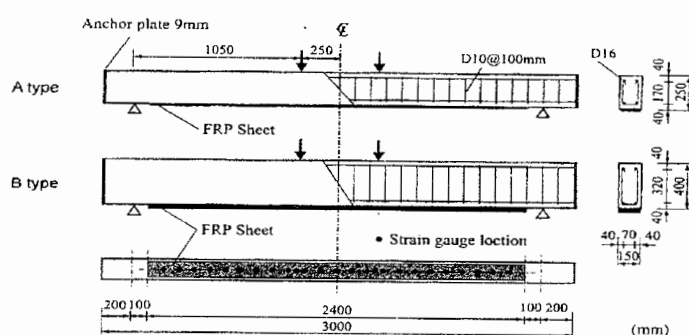


شکل ۶-۲۵: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیرهای F0، F4، F5 و F6 (بدست آمده از مدل پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی)

همانطور که در مقایسه دو شکل ۶-۲۴ و ۶-۲۵ مشاهده می شود اثر افزایش مقاومت بتن در مدل پیشنهادی برای نمونه ها، زیاد نمی باشد. اما در مقایسه دو نمونه F3 و F6 مشاهده می شود که نیروی جداشدگی پوشش بتنی در نمونه F6 نسبت به F3 افزایش داشته که ناشی از افزایش مقاومت بتن می باشد، چراکه این نوع جداشدگی تأثیر زیادی از تغییرات مقاومت بتن می پذیرد.

### ۱۳-۲-۶: آزمایش سیزدهم

در این آزمایش که توسط Zhang et al. (2003) انجام شده، دو سری نمونه A و B مورد بررسی قرار گرفته است. در سری اول یک نمونه به عنوان شاهد و سه نمونه دیگر هر کدام با انواع مختلف FRP به صورت خمشی تقویت شده اند. در سری دوم، B، نیز یک نمونه به عنوان شاهد و چهار نمونه دیگر با انواع مختلف FRP تقویت گردیده اند. نحوه مقاومسازی و بارگذاری نمونه ها در شکل ۲۶-۶ نشان داده شده است.



شکل ۲۶-۶: نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها در دو سری A و B

جدول ۳۷-۶: خصوصیات نمونه های سری A

پارامترها	A-Control	A-AT	A-AK	A-CI
Width of beam (b) [mm]	150	150	150	150
Depth of beam (h) [mm]	250	250	250	250
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	25	25	25	25
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	31.5	31.5	31.5	31.5
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	39.4	39.4	39.4	39.4
Depth of tension bars (d) [mm]	210	210	210	210
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	402.12	402.12	402.12	402.12
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	100.5	100.5	100.5	100.5
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	407	407	407	407
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	520	520	520	520
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200	200	200
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	40	40	40	40
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	402.12	402.12	402.12	402.12
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	407	407	407	407
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	130	130	130
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.378	0.286	0.167
Number of layer ( $n_f$ )	---	1	1	1
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	2350	2060	3400
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	78.5	118	230
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	0.636	0.636	0.636

ادامه جدول ۶-۳۷: خصوصیات نمونه های سری A

پارامترها	A-Control	A-AT	A-AK	A-C1
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	4	4	4
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	1.54	1.54	1.54
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	1050	100	100	100
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	950	950	950
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	250	250	250	250

جدول ۶-۳۸: خصوصیات نمونه های سری B

پارامترها	B-Control	B-AT	B-AK	B-C1	B-C2
Width of beam (b) [mm]	150	150	150	150	150
Depth of beam (h) [mm]	400	400	400	400	400
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	25	25	25	25	25
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4
Depth of tension bars (d) [mm]	360	360	360	360	360
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	402	402	402	402	402
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	100.5	100.5	100.5	100.5	100.5
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	407	407	407	407	407
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	520	520	520	520	520
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	40	40	40	40	40
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	402	402	402	402	402
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	407	407	407	407	407
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	130	130	130	130
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.378	0.286	0.167	0.185
Number of layer ( $n_f$ )	---	2	2	2	1
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	2350	2060	3400	2400
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	78.5	118	230	440
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	1	1	1	0.636
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	4	4	4	4
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	1.54	1.54	1.54	1.54
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	1050	100	100	100	100
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	950	950	950	950
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	250	250	250	250	250

جدول ۶-۳۹: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک (نمونه های سری A)

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_y,model$	$P_y,model$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
A-Control	Proposed	1.04	1.97	1.05	1.99	1.0	1.94	C
	Simplified	1.04	1.91	1.14	1.96	0.95	1.97	C
A-AT	Proposed	1.04	1.91	0.95	1.96	---	1.91	C
	Simplified	1.04	1.91	0.97	1.96	---	1.91	C
A-AK	Proposed	1.03	1.92	1.00	1.99	---	1.93	C
	Simplified	1.03	1.92	1.02	1.99	---	1.93	C

ادامه جدول ۶-۳۹: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک (نمونه های سری A)

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	Failure Mode
A-C1	Proposed	1.04	1.02	1.01	1.03	---	---	C
	Simplified	1.04	1.02	1.03	1.02	---	---	C

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۶-۴۰: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی (نمونه های سری A)

Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
A-AT	No Debonding Control	84.45	---	1.0	Concrete Crushing	Concrete Crushing
	FRP End Debonding Control	> 84.45	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 84.45	---	---		
A-AK	No Debonding Control	86.76	---	1.03	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	85.45	---	1.01		
	Concrete Cover Separation Control	> 86.76	---	---		
A-C1	No Debonding Control	88.40	---	1.11	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	76.28	---	0.99		
	Concrete Cover Separation Control	> 88.40	---	---		

جدول ۶-۴۱: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک (نمونه های سری B)

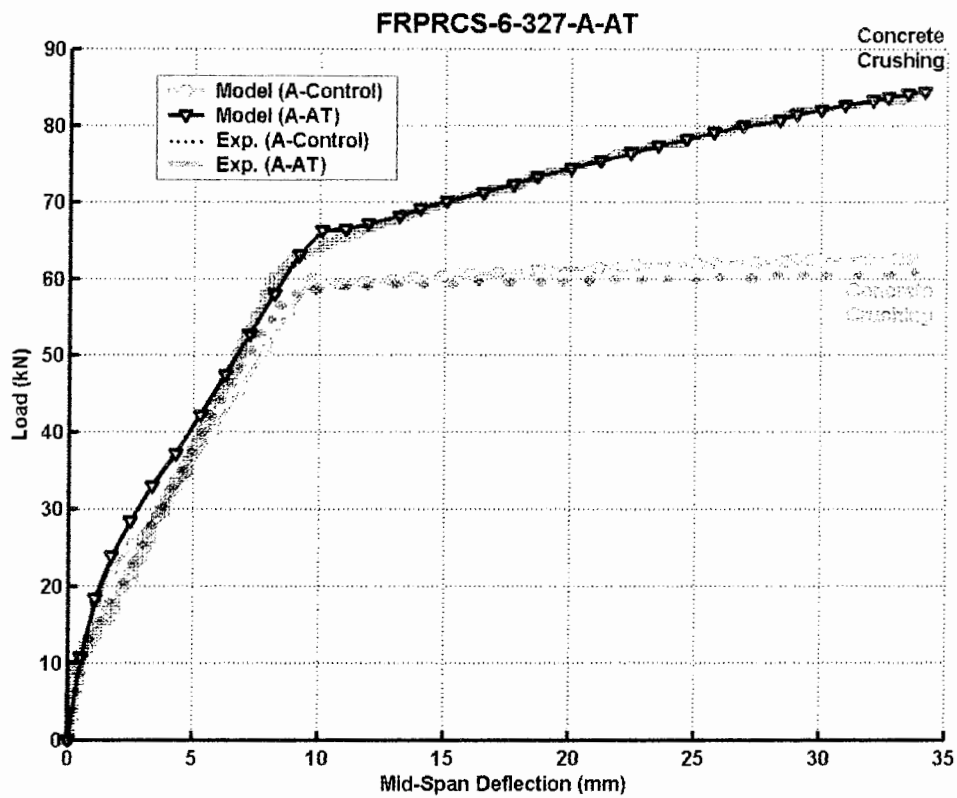
Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	Failure Mode
B-Control	Proposed	0.98	1.02	1.04	1.05	1.27	1.05	C
	Simplified	0.98	1.02	1.11	1.09	1.18	1.06	C
B-AT	Proposed	0.92	1.03	1.0	1.02	---	1.25	C
	Simplified	0.92	1.03	0.98	1.04	---	1.23	C
B-AK	Proposed	1.06	1.02	1.01	0.99	---	1.21	C
	Simplified	1.06	1.02	1.0	1.04	---	1.09	R
B-C1	Proposed	0.92	1.03	1.04	1.05	---	1.25	R
	Simplified	0.92	1.03	1.03	1.07	---	1.43	R
B-C2	Proposed	---	---	---	---	---	1.07	R
	Simplified	---	---	---	---	---	1.12	R

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

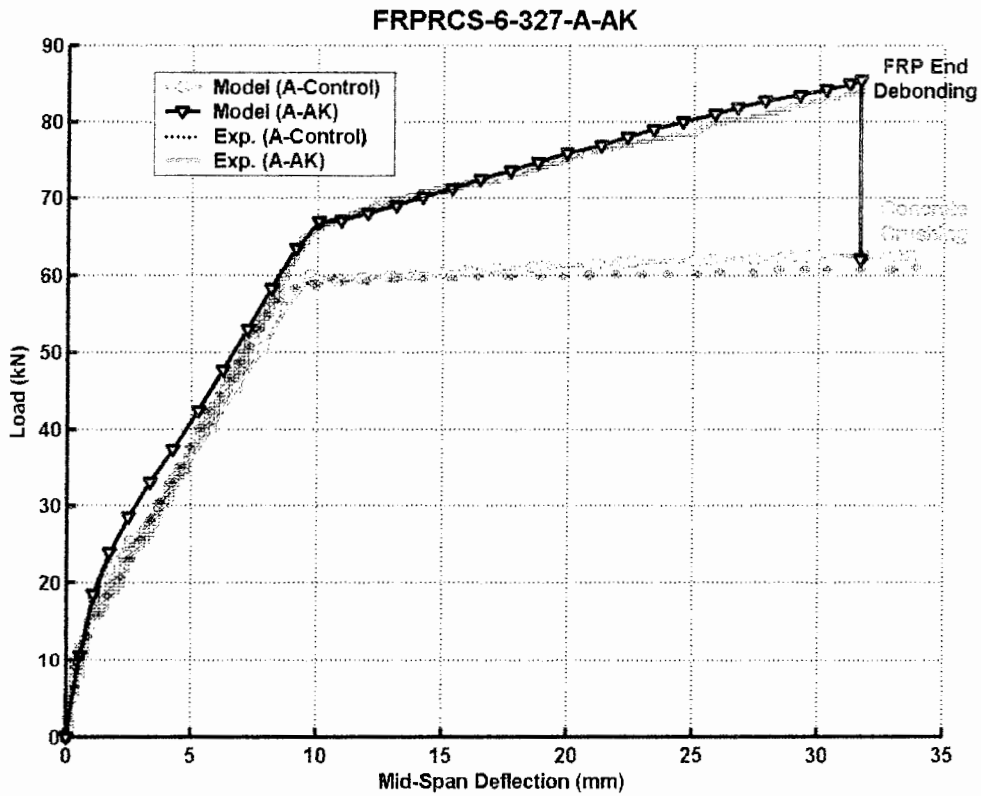


جدول ۶-۴۲: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی (نمونه های سری B)

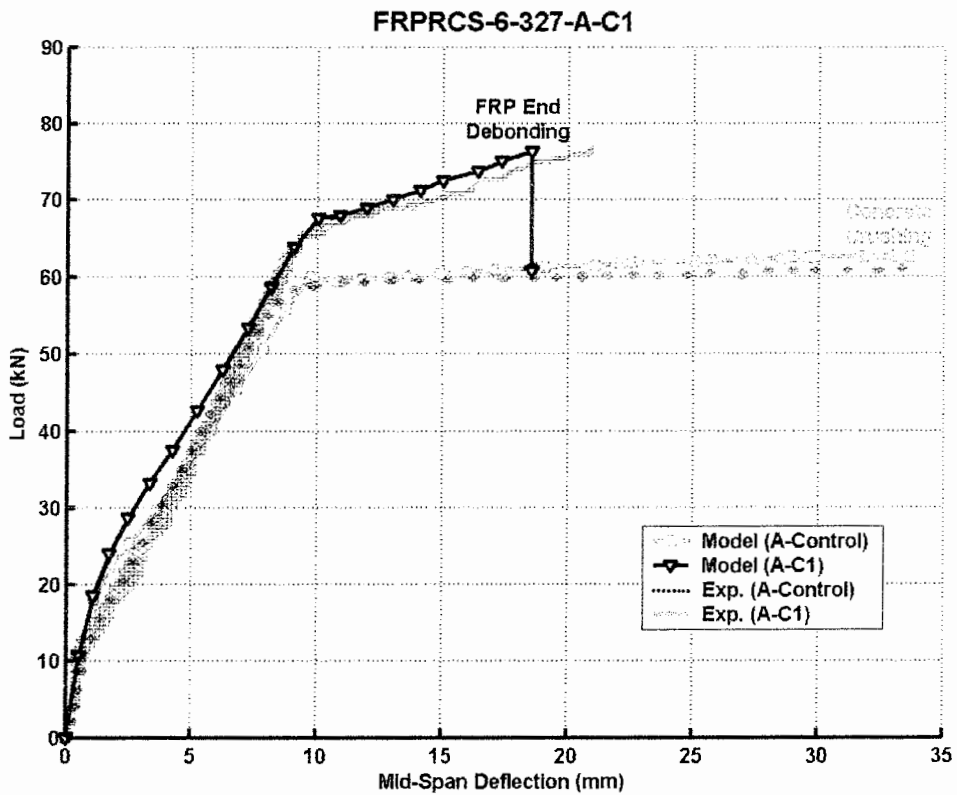
Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
B-AT	No Debonding Control	205.74	---	1.25	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	172.55	---	1.05		
	Concrete Cover Separation Control	> 205.74	---	---		
B-AK	No Debonding Control	201.29	---	1.26	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	157.60	---	0.98		
	Concrete Cover Separation Control	> 201.29	---	---		
B-C1	No Debonding Control	196.08	---	1.25	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	130.40	---	0.88		
	Concrete Cover Separation Control	> 196.08	---	---		
B-C2	No Debonding Control	139.83	---	1.08	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	116.56	---	0.90		
	Concrete Cover Separation Control	> 139.83	---	---		



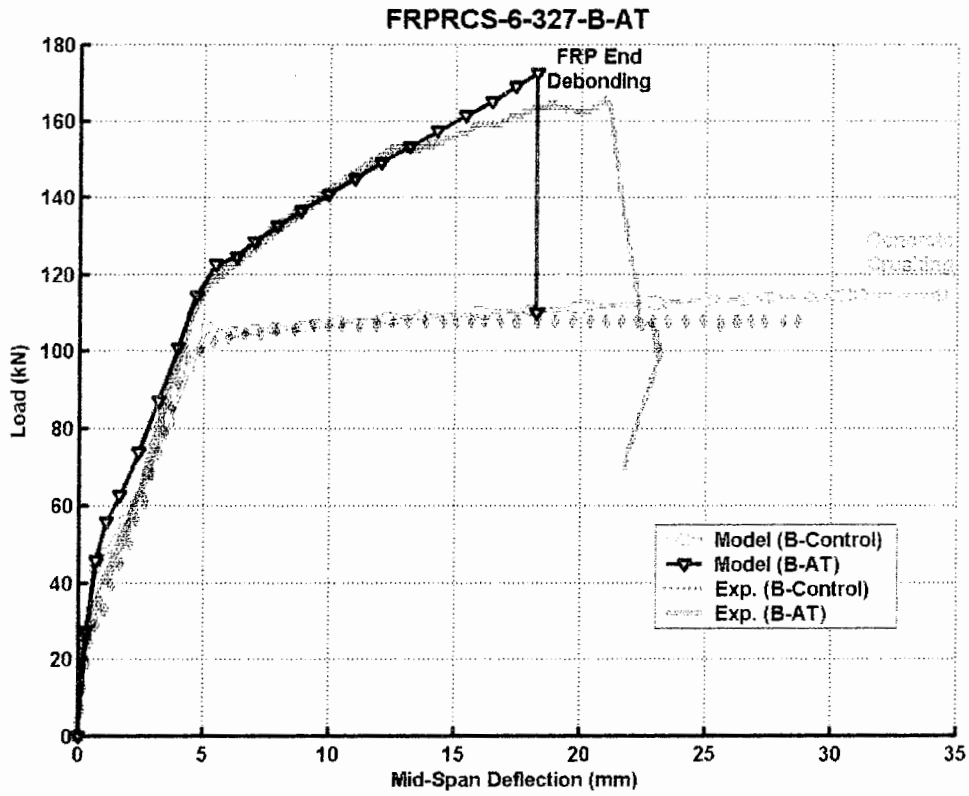
شکل ۶-۲۷: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیر A-AT (مدل پیشنهادی و نتایج عملی)



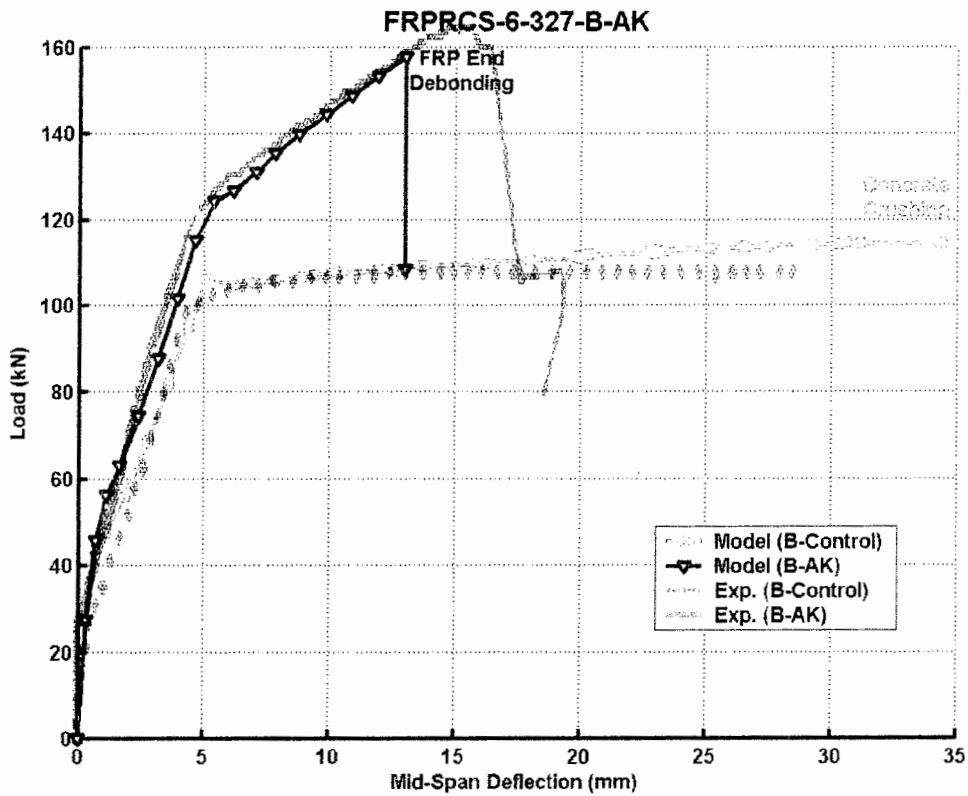
شکل ۶-۲۸: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیر A-AK (مدل پیشنهادی و نتایج عملی)



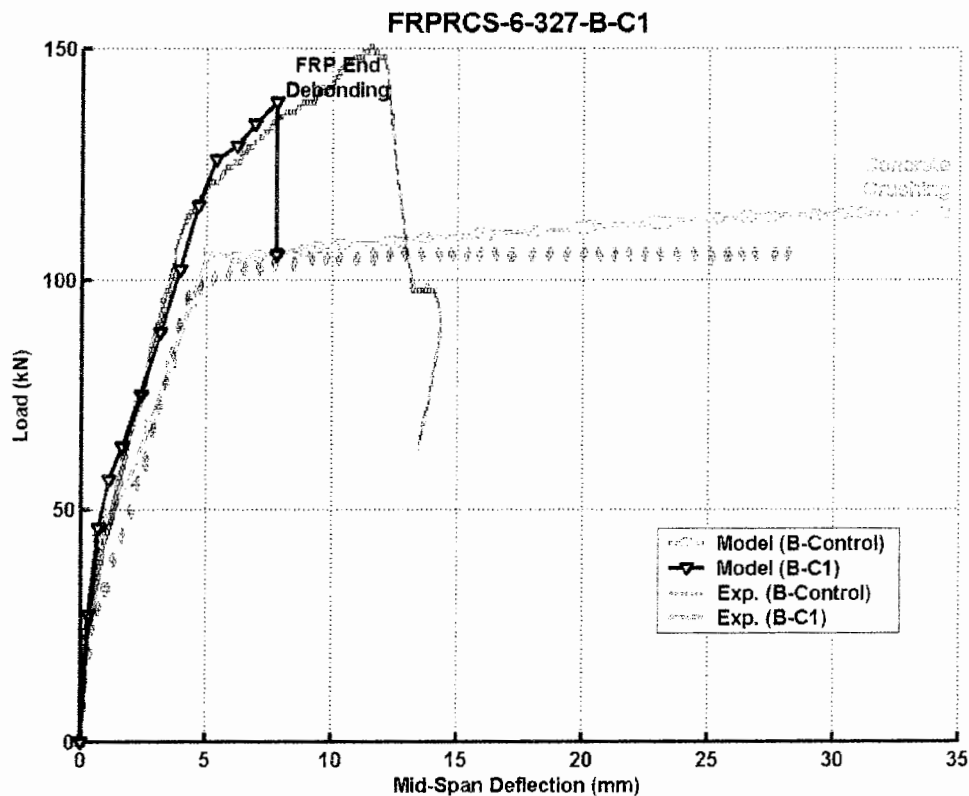
شکل ۶-۲۹: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیر A-C1 (مدل پیشنهادی و نتایج عملی)



شکل ۳۰-۶: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیر B-AT (مدل پیشنهادی و نتایج عملی)



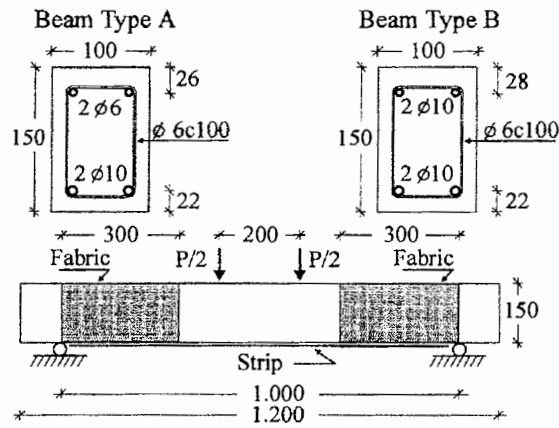
شکل ۳۱-۶: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیر B-AK (مدل پیشنهادی و نتایج عملی)



شکل ۳۲-۶: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیر B-C1 (مدل پیشنهادی و نتایج عملی)

#### ۱۴-۲-۶: آزمایش چهاردهم

در این آزمایش که توسط Valcuende et al. (2003) انجام شده، پنج نمونه مورد بررسی قرار گرفته است که در دو سری A و B تقسیم بندی شده اند. در این پنج نمونه، دو نمونه شاهد بوده و سه نمونه دیگر به وسیله FRP تقویت گردیده اند. یک نمونه از این سه نمونه (B-SF) به کمک FRPهای برشی در انتها مهار شده است. نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها در شکل ۳۳-۶ نشان داده شده است.



شکل ۶-۳۳: نحوه بارگذاری و تقویت نمونه ها

جدول ۶-۴۳: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	A-C	A-SI	B-C	B-SI	B-SF
Width of beam (b) [mm]	100	100	100	100	100
Depth of beam (h) [mm]	150	150	150	150	150
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	12	12	12	12	12
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	38.24	39.45	37.31	41.56	37.31
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	48.24	49.45	47.31	51.56	47.31
Depth of tension bars (d) [mm]	128	128	128	128	128
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	157	157	157	157	157
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	62.8	62.8	62.8	62.8	62.8
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	500	500	500	500	500
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	600	600	600	600	600
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	26	26	28	28	28
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	56.5	56.5	157	157	157
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	500	500	500	500	500
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	50	---	50	50
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	1.2	---	1.2	1.2
Number of layer ( $n_f$ )	---	1	---	1	1
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	2600	---	2600	2600
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	165	---	165	165
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	2.5	---	2.5	2.5
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	7.2	---	7.2	7.2
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	2.67	---	2.67	2.67
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	400	20	400	20	20
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	380	0	380	380
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	100	100	100	100	100

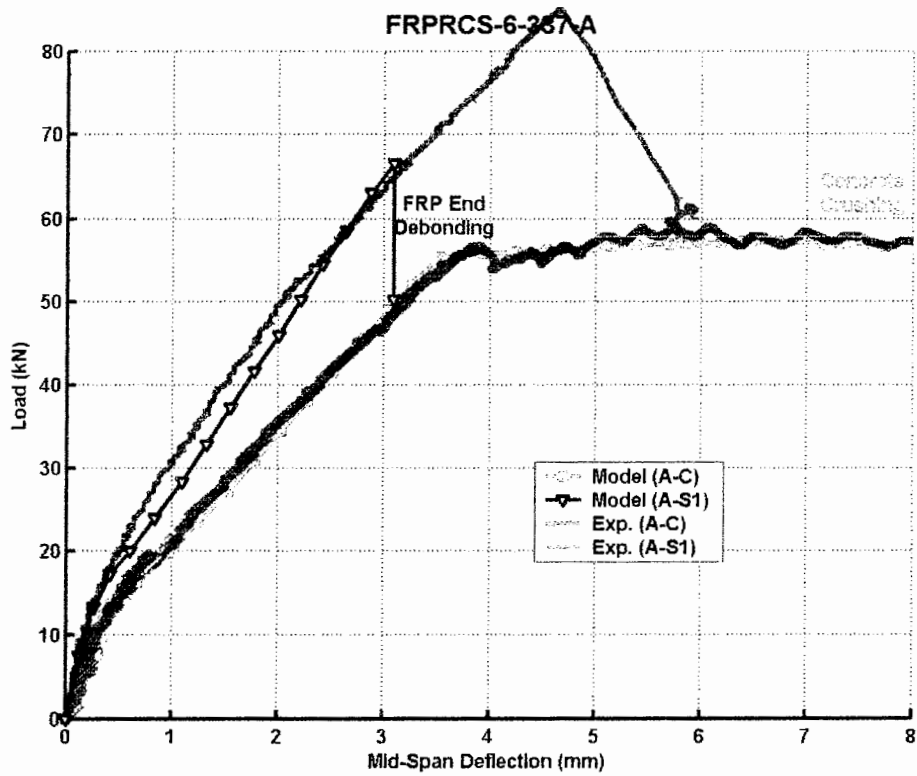
جدول ۴۴-۶: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
A-C	Proposed	0.90	1.01	0.98	1.0	0.97	0.98	C
	Simplified	0.90	1.01	1.02	1.01	0.95	0.98	C
A-S1	Proposed	0.99	1.01	0.97	0.98	1.32	1.32	C
	Simplified	0.99	1.01	0.97	0.98	1.31	1.32	C
B-C	Proposed	0.90	0.96	0.64	0.82	---	0.75	C
	Simplified	0.90	0.96	0.63	0.83	---	0.76	C
B-S1	Proposed	1.90	1.08	---	---	1.80	1.75	C
	Simplified	1.90	1.08	---	---	1.79	1.75	C
B-SF	Proposed	---	---	---	---	---	1.74	C
	Simplified	---	---	---	---	---	1.75	C

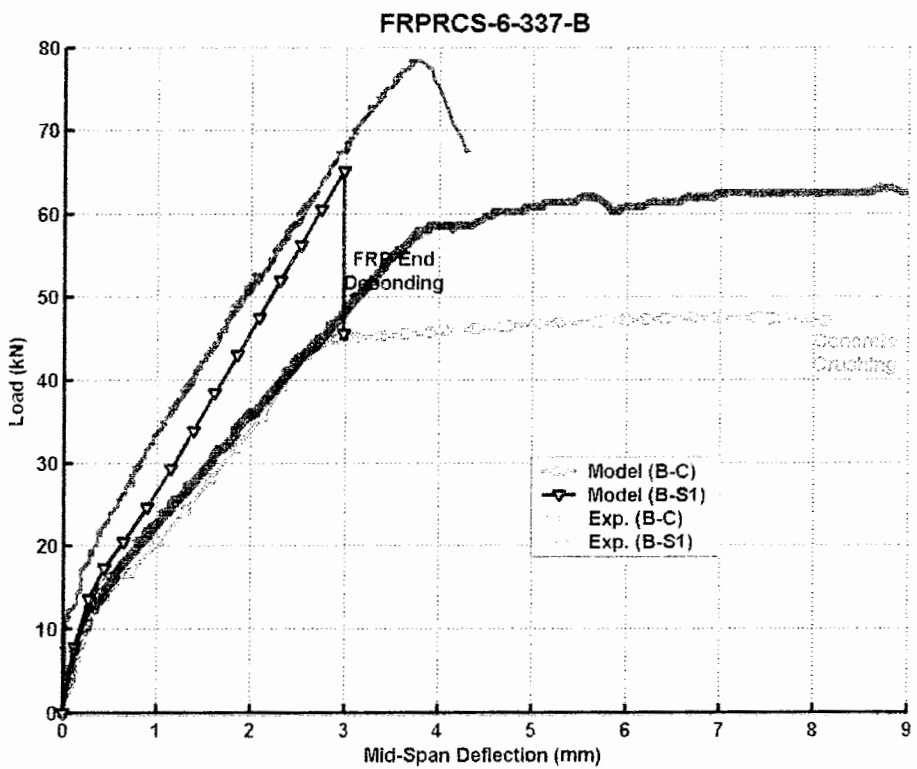
C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۴۵-۶: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
A-S1	No Debonding Control	96.28	1.32	1.23	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	66.53	0.62	0.85		
	Concrete Cover Separation Control	> 96.28	---	---		
B-S1	No Debonding Control	102.57	1.80	1.46	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	69.01	0.67	0.88		
	Concrete Cover Separation Control	100.60	1.70	1.43		
B-SF	No Debonding Control	101.04	---	1.43	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	65.14	---	0.97		
	Concrete Cover Separation Control	97.85	---	1.40		



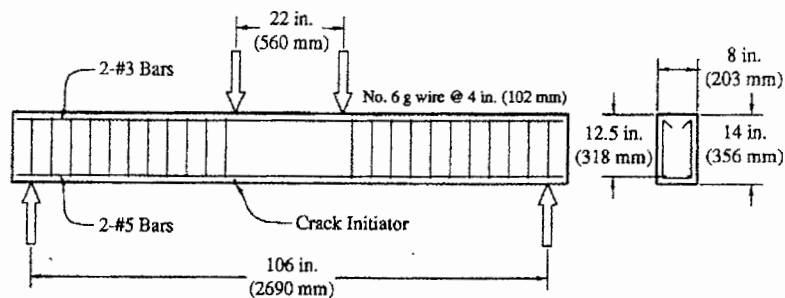
شکل ۳۴-۶: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیر سری A (مدل پیشنهادی و نتایج عملی)



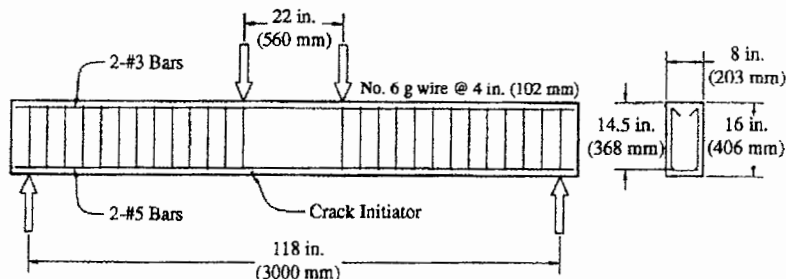
شکل ۳۵-۶: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیر سری B (مدل پیشنهادی و نتایج عملی)

## ۶-۲-۱۵: آزمایش پانزدهم

در این آزمایش که توسط Brena et al. (2003) انجام شده، دو سری نمونه مورد آزمایش قرار گرفته اند. از این نمونه ها، ۹ نمونه جهت مقایسه نتایج آن با نتایج مدلها مورد ارزیابی قرار می گیرند. خصوصیات این نمونه ها در جداول ۶-۴۶ و ۶-۴۷ گردآوری شده اند. نحوه بارگذاری و آرماتوربندی نمونه ها در شکل ۶-۳۶ نشان داده شده است.

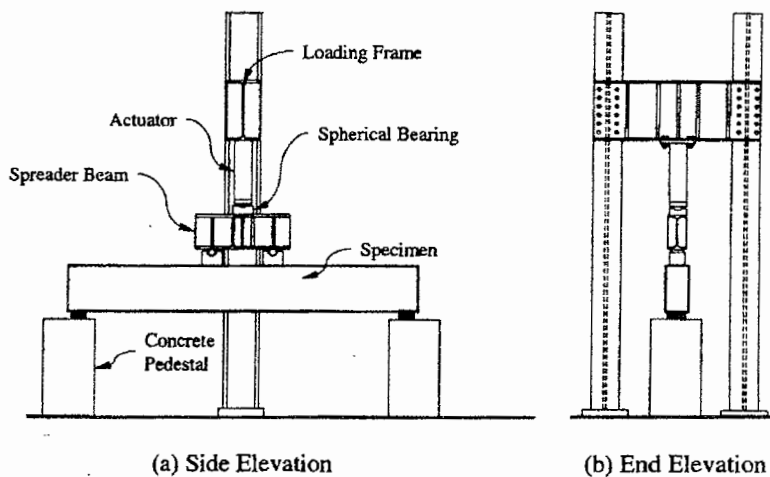


(a) Beams Strengthened using Composite Systems A and B



(b) Beams Strengthened using Composite Systems C and D

### Reinforcement details for test specimens.



(a) Side Elevation

(b) End Elevation

شکل ۶-۳۶: نحوه بارگذاری و آرماتوربندی نمونه ها



جدول ۴۶-۶ : خصوصیات نمونه های سری A و B

پارامترها	Control A/B	A3	B1	B2	B4
Width of beam (b) [mm]	203	203	203	203	203
Depth of beam (h) [mm]	356	356	356	356	356
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	25	25	25	25	25
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	35.1	35.1	37.2	37.2	34.3
Cubic compressive strength ( $f_{cu}$ ) [MPa]	45.1	45.1	47.2	47.2	43.9
Depth of tension bars (d) [mm]	318	318	318	318	318
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	400	400	400	400	400
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	100	100	100	100	100
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	440	440	440	440	438
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	520	520	520	520	520
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200
Depth of compression bars (d') [mm]	38	38	38	38	38
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	142	142	142	142	142
Yield stress of compression bars ( $f_y$ ) [MPa]	440	440	440	440	438
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	50	75	50	50
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.165	0.168	0.168	0.168
Number of layer ( $n_f$ )	---	2	2	2	2
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	3790	3400	3400	3400
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	230	230	230	230
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	3.5	2	2	2
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	1.47	1.47	1.47	1.47
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	0.525	0.525	0.525	0.525
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	1065	303	176	176	176
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	762	889	889	889
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	280	280	280	280	280

جدول ۴۷-۶ : خصوصیات نمونه های سری C و D

پارامترها	Control C/D	C3	D2
Width of beam (b) [mm]	203	203	203
Depth of beam (h) [mm]	406	406	406
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	25	25	25
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	35.1	35.1	37.2
Cubic compressive strength ( $f_{cu}$ ) [MPa]	45.1	45.1	47.2
Depth of tension bars (d) [mm]	368	368	368
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	400	400	400
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	100	100	100
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	440	440	440
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	520	520	520
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200	200
Depth of compression bars (d') [mm]	38	38	38
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	142	142	142
Yield stress of compression bars ( $f_y$ ) [MPa]	440	440	440
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	50	50
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	1.04	1.19
Number of layer ( $n_f$ )	---	2	2

ادامه جدول ۶-۴۷ : خصوصیات نمونه های سری C و D

پارامترها	Control C/D	C3	D2
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	760	2400
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	62	155
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	2.5	2.5
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	3	3
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	1.154	1.154
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	1220	128	128
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	1092	1092
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	280	280	280

جدول ۶-۴۸ : نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک (نمونه های سری A و B)

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
Control A/B	Proposed	0.50	1.17	0.96	0.98	---	1.02	C
	Simplified	0.50	1.17	1.00	1.01	---	1.04	C
A3	Proposed	0.49	0.75	0.82	1.07	---	0.99	R
	Simplified	0.49	0.75	0.90	1.05	---	0.97	R
B1	Proposed	0.55	1.07	0.82	1.03	1.09	1.03	R
	Simplified	0.55	1.07	0.91	1.05	1.07	1.03	R
B2	Proposed	0.67	1.05	0.84	0.93	0.89	0.94	R
	Simplified	0.67	1.05	0.94	1.01	0.77	0.96	R
B4	Proposed	0.74	1.16	0.84	1.02	0.78	1.03	R
	Simplified	0.74	1.16	0.92	1.07	0.74	0.99	R

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۶-۴۹ : نتایج مدل های کنترل کننده جادشگی (نمونه های سری A و B)

Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
A3	No Debonding Control	137.18	---	0.99	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	129.43	---	0.94		
	Concrete Cover Separation Control	> 137.18	---	---		
B1	No Debonding Control	145.23	1.09	1.10	FRP Rupture	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	> 145.23	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 145.23	---	---		
B2	No Debonding Control	133.65	0.89	0.94	FRP Rupture	FRP Rupture
	FRP End Debonding Control	> 133.65	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 133.65	---	---		

ادامه جدول ۴۹-۶: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی (نمونه های سری A و B)

Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
B4	No Debonding Control	131.73	0.78	0.99	FRP Rupture	FRP Rupture
	FRP End Debonding Control	> 131.73	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 131.73	---	---		

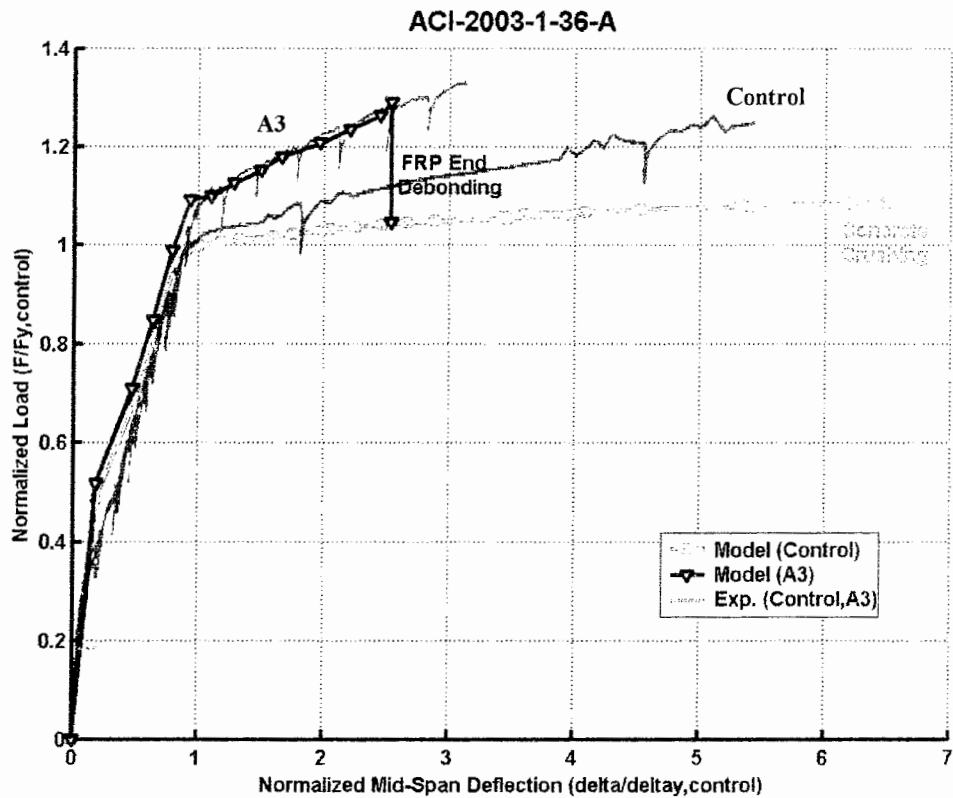
جدول ۵۰-۶: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک (نمونه های سری C و D)

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	Failure Mode
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
Control C/D	Proposed	0.34	1.10	0.86	1.04	0.90	0.97	C
	Simplified	0.34	1.10	0.90	1.05	0.87	0.97	C
C3	Proposed	0.49	0.90	0.83	0.95	0.74	0.95	R
	Simplified	0.49	0.98	0.74	0.95	0.77	0.95	R
D2	Proposed	0.81	0.90	0.83	0.90	---	0.97	R
	Simplified	0.81	0.95	0.90	0.95	---	0.95	R

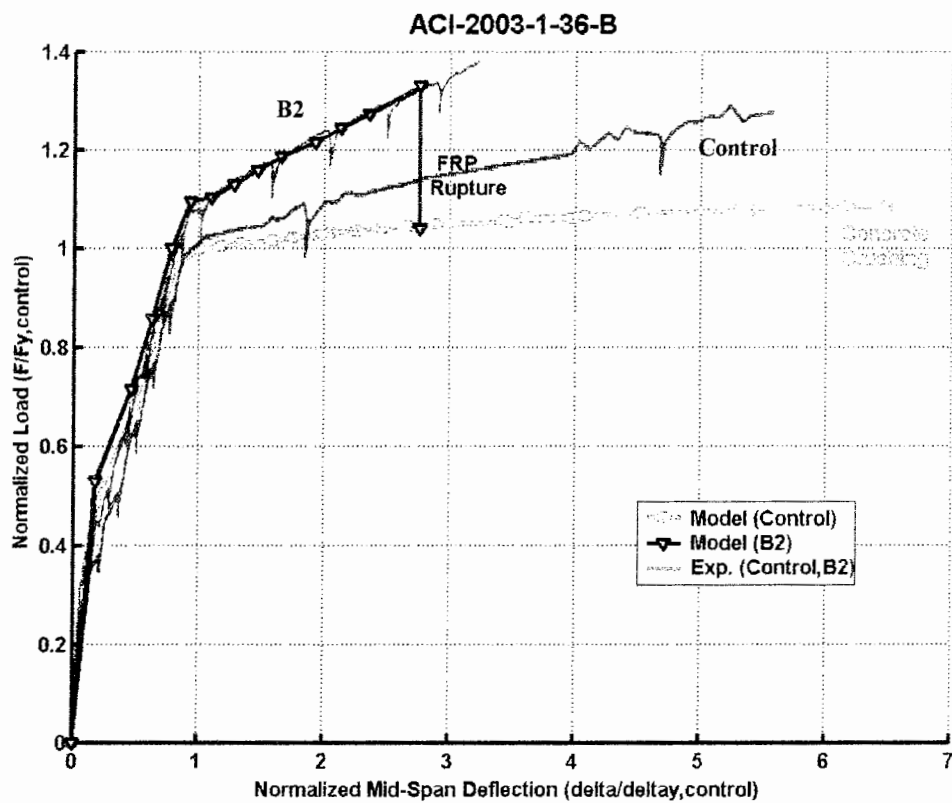
C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۵۱-۶: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی (نمونه های سری C و D)

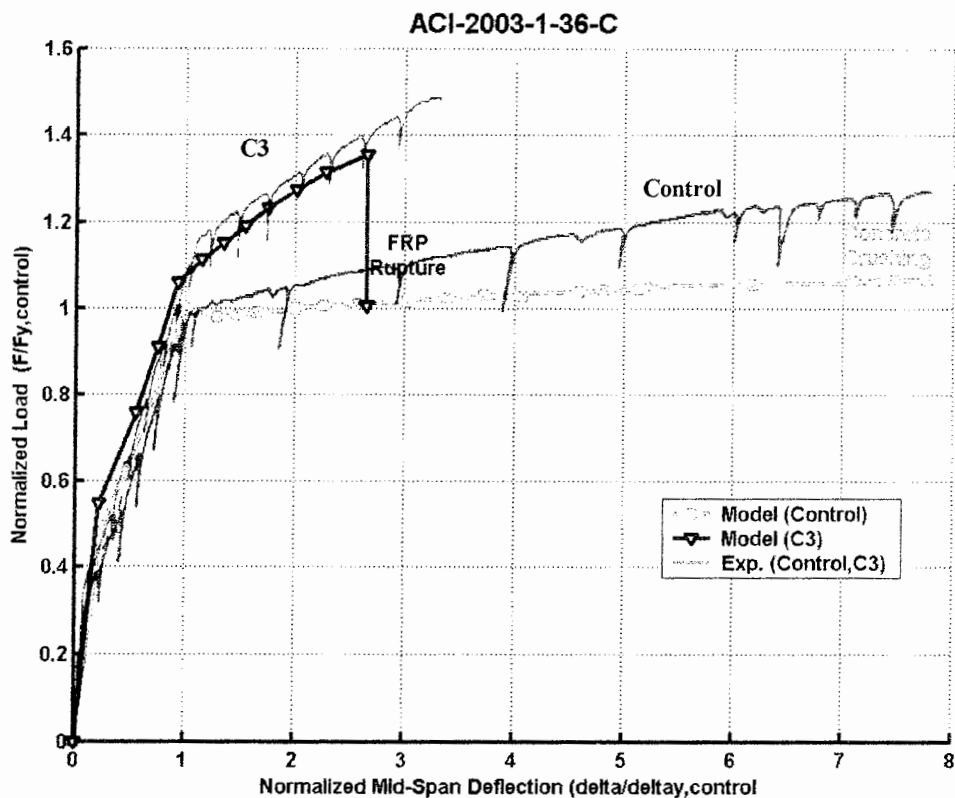
Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
C3	No Debonding Control	142.66	0.74	0.96	FRP Rupture	FRP Rupture
	FRP End Debonding Control	> 142.66	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 142.66	---	---		
D2	No Debonding Control	249.97	---	1.87	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	118.49	---	0.88		
	Concrete Cover Separation Control	> 249.97	---	---		



شکل ۶-۳۷: دیاگرام نرمالایز شده تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای شاهد و A3



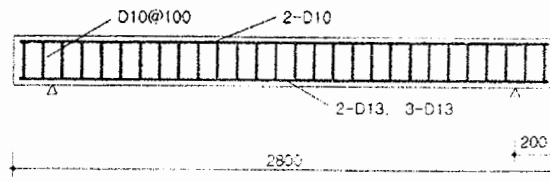
شکل ۶-۳۸: دیاگرام نرمالایز شده تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای شاهد و B2



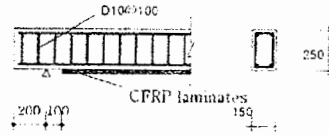
شکل ۶-۳۹: دیاگرام نرمالایز شده تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیرهای شاهد و C3 (بدست آمده از مدل پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی)

#### ۶-۲-۱۶: آزمایش شانزدهم

از این آزمایش که توسط Shin and Lee (2003) انجام شده، چهار نمونه جهت مقایسه نتایج مدلها با نتایج عملی مورد ارزیابی قرار گرفته اند. این چهار نمونه شامل دو سری نمونه هستند که در هر سری یک نمونه شاهد و دیگری توسط CFRP به صورت خمشی تقویت شده است. نحوه آرماتوربندی و تقویت نمونه ها در شکل ۶-۴۰ نشان داده شده است. بارگذاری نمونه ها نیز به صورت چهار نقطه ای می باشد.



(a) reinforcements



(b) strengthening

شکل ۶-۴۰: نحوه تقویت و آرماتوربندی نمونه ها

جدول ۶-۵۲: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	R2C	R2O	R3C	R3O
Width of beam (b) [mm]	150	150	150	150
Depth of beam (h) [mm]	250	250	250	250
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	25	25	25	25
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	18	18	18	18
Cubic compressive strength ( $f_{cu}$ ) [MPa]	22.5	22.5	22.5	22.5
Depth of tension bars (d) [mm]	220	220	220	220
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	265	265	398.2	398.2
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	81.7	81.7	122.4	122.4
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	435	435	435	435
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	520	520	520	520
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200	200	200
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	30	30	30	30
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	157	157	157	157
Yield stress of compression bars ( $f_{cy}$ ) [MPa]	435	435	435	435
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	13	---	13
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.22	---	0.22
Number of layer ( $n_f$ )	---	2	---	2
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	3000	---	3000
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	375	---	375
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	2.5	---	2.5
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	0.3	---	0.3
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	0.12	---	0.12
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	850	100	850	100
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	750	0	750
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	350	350	350	350

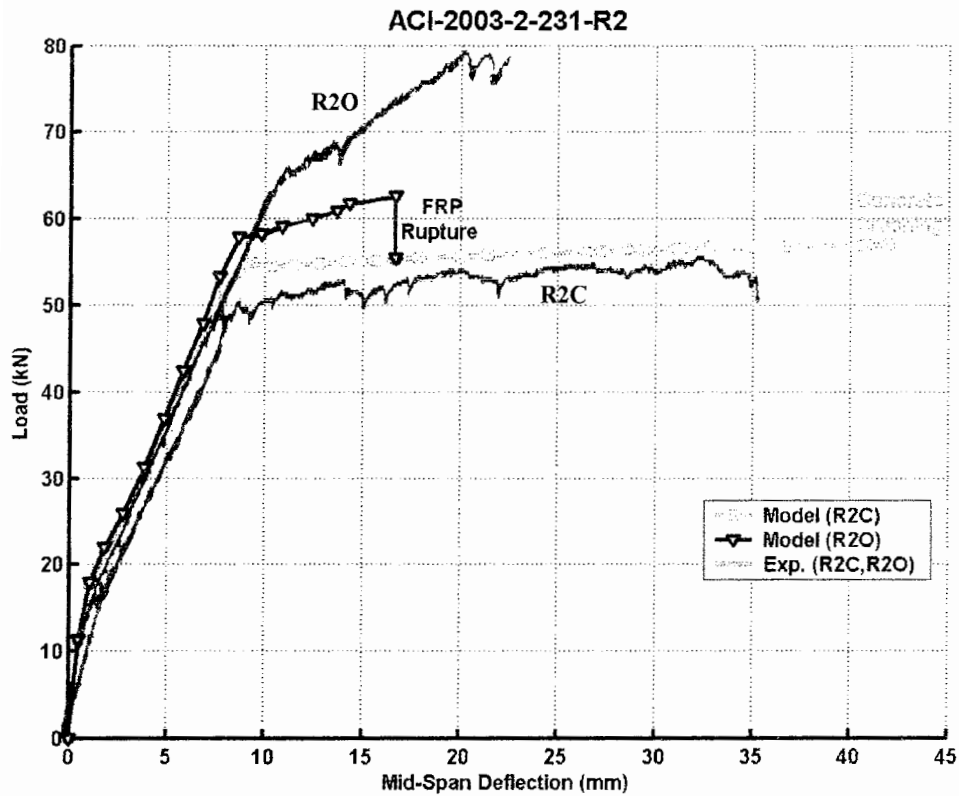
جدول ۵۳-۶: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
R2C	Proposed	0.83	1.08	1.03	1.09	1.24	1.08	C
	Simplified	0.83	1.02	1.05	1.14	1.26	1.04	C
R2O	Proposed	0.83	1.04	0.74	0.89	0.89	1.04	R
	Simplified	0.83	1.04	0.80	0.92	0.78	0.95	R
R3C	Proposed	0.80	1.12	0.95	1.04	1.0	1.07	C
	Simplified	0.80	1.12	0.93	1.04	0.96	1.01	C
R3O	Proposed	0.93	1.00	0.98	0.96	0.76	1.00	R
	Simplified	0.93	1.08	1.01	0.97	0.76	0.94	R

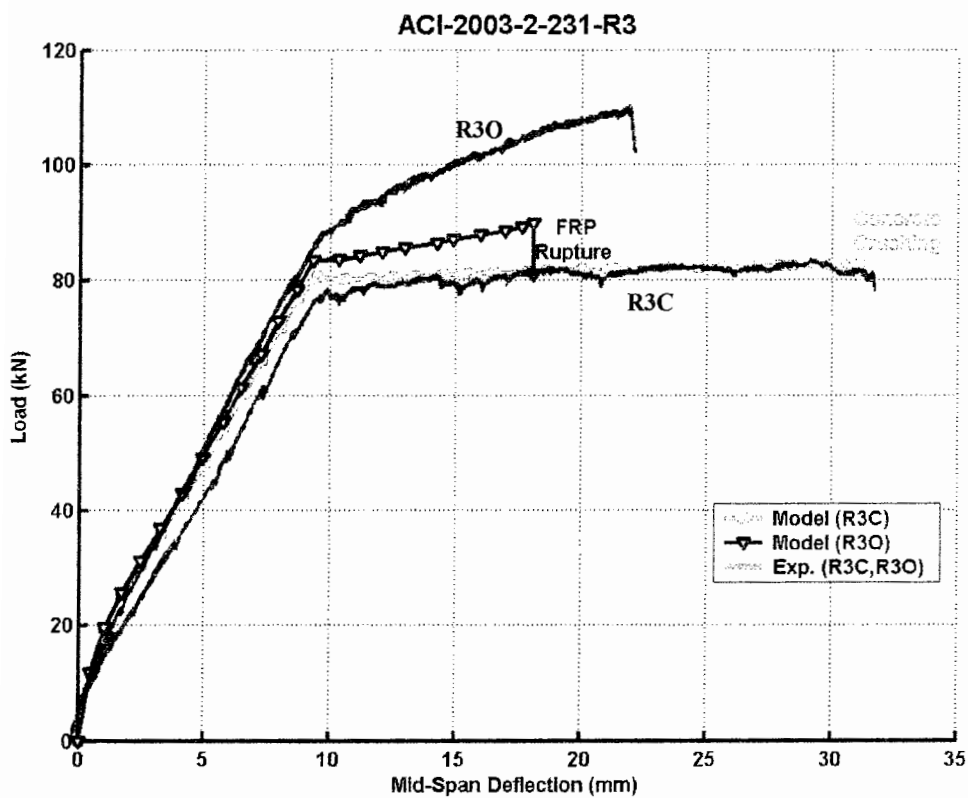
C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۵۴-۶: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
R2O	No Debonding Control	63.46	0.89	0.86	FRP Rupture	FRP Rupture
	FRP End Debonding Control	> 63.46	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 63.46	---	---		
R3O	No Debonding Control	89.87	0.76	0.83	FRP Rupture	FRP Rupture
	FRP End Debonding Control	> 89.87	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 89.87	---	---		



شکل ۶-۴۱: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای R2C و R2O

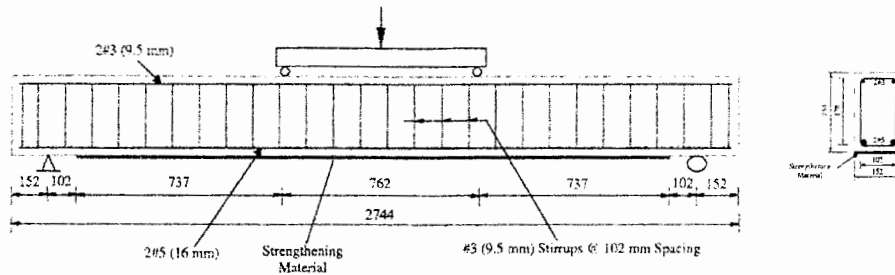


شکل ۶-۴۲: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرهای R3C و R3O



۶-۲-۱۷: آزمایش هفدهم

در این آزمایش که توسط Grace et al. (2002) انجام شده، سه نمونه از آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. از این سه نمونه یک نمونه، به عنوان نمونه شاهد تقویت نشده و دو نمونه دیگر هر کدام با دو نوع CFRP به صورت خمشی مقاومسازی شده اند. نحوه بارگذاری، آرماتوربندی و تقویت نمونه ها در شکل ۶-۴۳ نشان داده شده است.



شکل ۶-۴۳: نحوه بارگذاری، آرماتوربندی و تقویت نمونه ها

جدول ۶-۵۵: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	Control	C-1	C-2
Width of beam (b) [mm]	152	152	152
Depth of beam (h) [mm]	254	254	254
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	25	25	25
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	55.2	55.2	55.2
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	65.2	65.2	65.2
Depth of tension bars (d) [mm]	216	216	216
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	400	400	400
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	102	102	102
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	415	415	415
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	550	550	550
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200	200
Depth of compression bars (d') [mm]	38	38	38
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	142	142	142
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	415	415	415
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	152	152
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.13	1.9
Number of layer ( $n_f$ )	---	1	1
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	340	1310
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	28.333	93.571
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	1.5	1.5
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	4	4
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	1.538	1.538
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	839	102	102
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	737	737
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	381	381	381

جدول ۵۶-۶: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

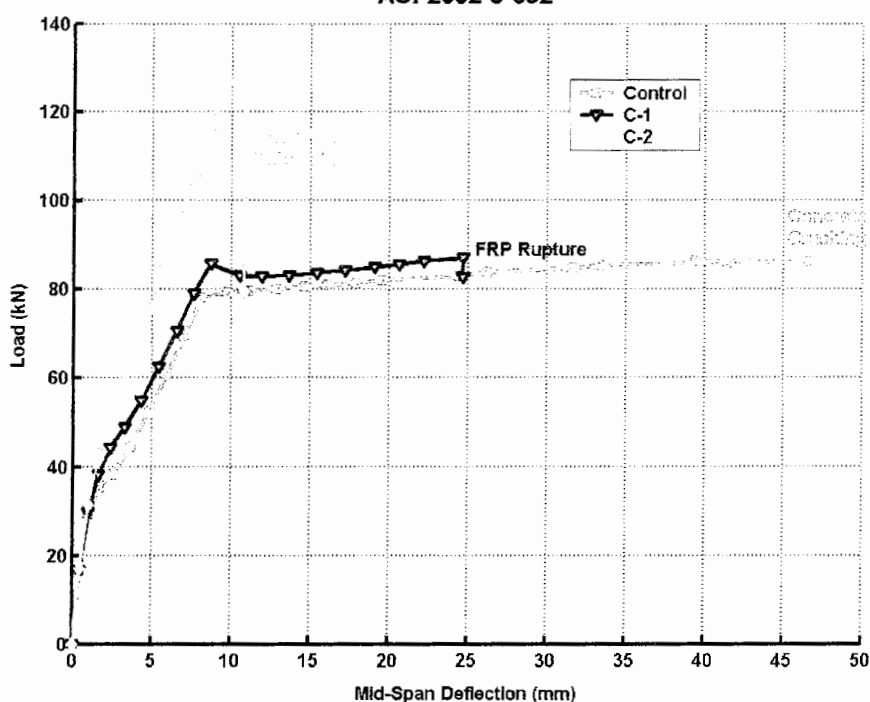
Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$ $\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,model}$ $P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,model}$ $\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,model}$ $P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,model}$ $\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,model}$ $P_{max,Exp.}$	
Control	Proposed	0.97	0.99	0.68	0.96	0.92	0.90	C
	Simplified	0.97	0.99	0.64	0.92	0.95	0.90	C
C-1	Proposed	0.97	0.97	0.66	1.0	0.83	0.82	R
	Simplified	0.97	0.97	0.68	0.94	0.88	0.80	R
C-2	Proposed	0.96	1.0	0.74	0.93	1.72	0.90	C
	Simplified	0.96	1.0	0.74	0.90	1.74	0.80	C

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۵۷-۶: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\Delta_{max,model}$ $\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,model}$ $P_{max,Exp.}$		
C-1	No Debonding Control	86.96	0.83	0.85	FRP Rupture	FRP Rupture
	FRP End Debonding Control	> 86.96	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 86.96	---	---		
C-2	No Debonding Control	212.10	1.72	1.60	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	150.02	0.67	0.92		
	Concrete Cover Separation Control	166.85	1.10	1.26		

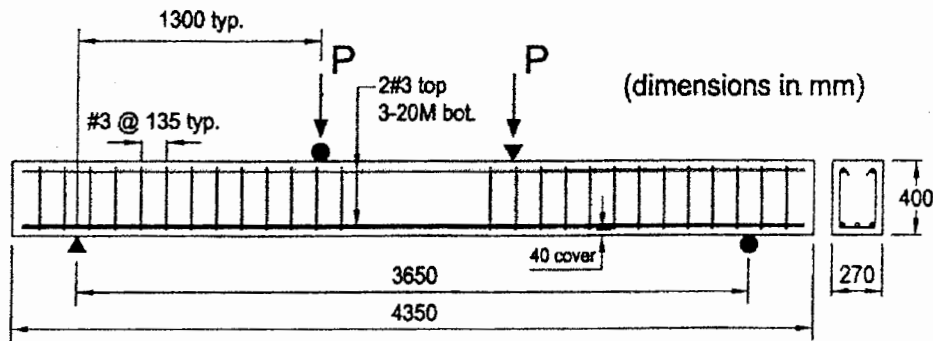
ACI-2002-5-692



شکل ۴۴-۶: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی)

۶-۲-۱۸: آزمایش هجدهم

در این آزمایش که توسط Bonacci and Maalej (2000) انجام شده دو نمونه از آن مورد ارزیابی قرار گرفته است که یک نمونه شاهد بوده و دیگری به وسیله FRP تقویت خمشی شده است. نحوه آرماتوربندی و بارگذاری نمونه ها در شکل ۶-۴۵ نشان داده شده است.



شکل ۶-۴۵: نحوه آرماتوربندی و بارگذاری نمونه ها

جدول ۶-۵۸: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	B1	B2
Width of beam (b) [mm]	270	270
Depth of beam (h) [mm]	400	400
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	20	20
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	29.3	29.3
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	36	36
Depth of tension bars (d) [mm]	360	360
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	900	900
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	188.5	188.5
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	484	484
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	666	666
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	201	201
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	40	40
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	142	142
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	507	507
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	199	199
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	250
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.167
Number of layer ( $n_f$ )	---	2
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	3400
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	230
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	2
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	7.2
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	2.88
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	1300	100
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	1200
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	525	525

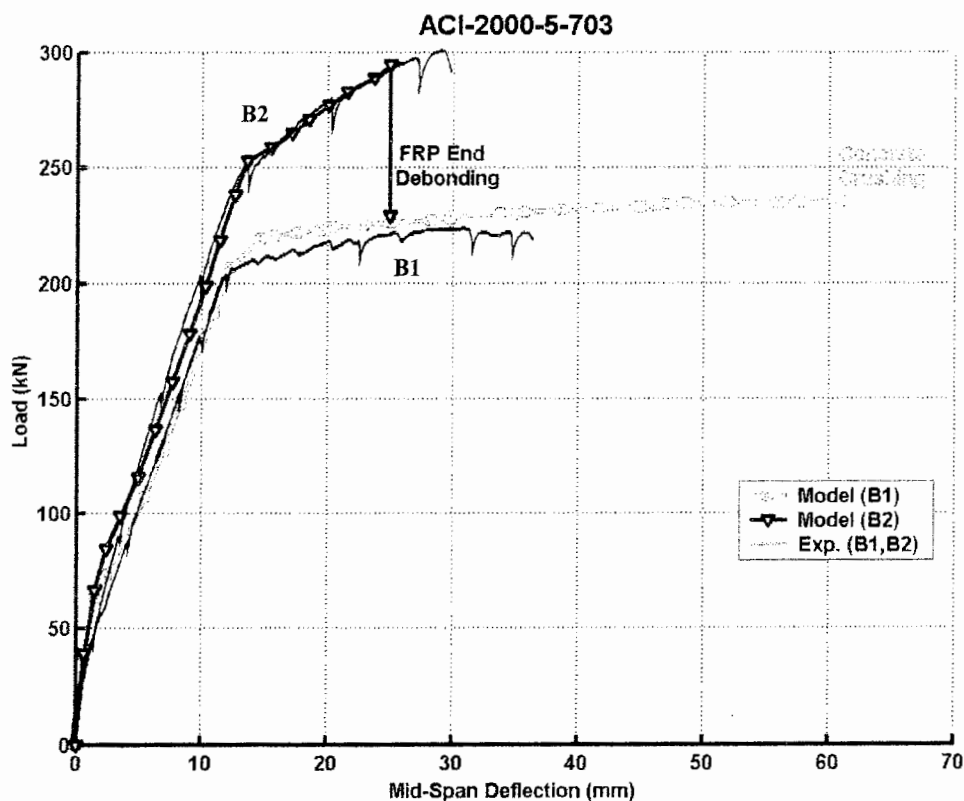
جدول ۶-۵۹: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
B1	Proposed	1.0	1.0%	1.20	1.09	1.70	1.07	C
	Simplified	1.0	1.0%	1.25	1.11	1.68	1.07	C
B2	Proposed	0.99	1.0%	1.0	1.04	---	1.27	C
	Simplified	0.99	1.0%	1.03	1.05	---	1.27	C

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۶-۶۰: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

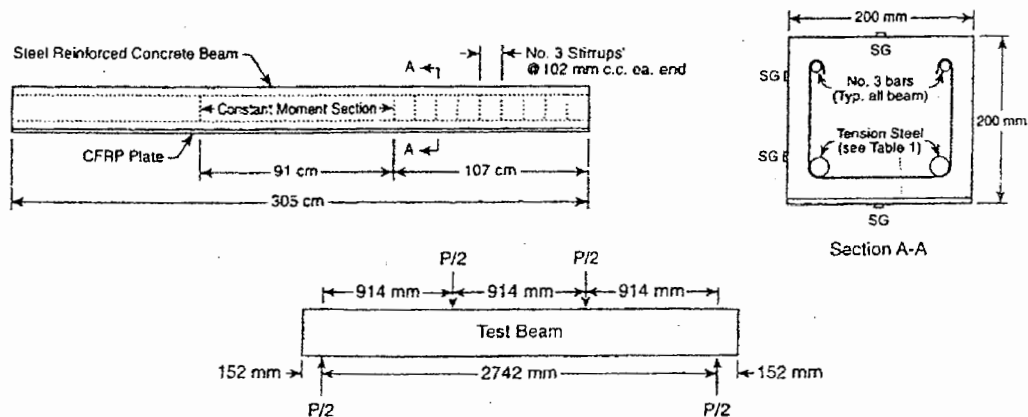
Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
B2	No Debonding Control	359.93	---	1.22	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	294.15	---	0.99		
	Concrete Cover Separation Control	> 359.93	---	---		



شکل ۶-۴۶: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی)

## ۶-۲-۱۹: آزمایش نوزدهم

در این آزمایش که توسط Ross et al. (1999) انجام شده، دو نمونه از آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این آزمایش نیز یک نمونه به عنوان نمونه شاهد بوده و تقویت نمی گردد. نمونه دیگر به وسیله سه لایه CFRP تقویت شده است. نحوه آرماتوربندی و بارگذاری نمونه ها در شکل ۶-۴۷ نشان داده شده است.



شکل ۶-۴۷: نحوه آرماتوربندی و بارگذاری نمونه ها

جدول ۶-۶۱: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	A2	B2
Width of beam (b) [mm]	200	200
Depth of beam (h) [mm]	200	200
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	10	10
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	54.8	54.8
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	65	65
Depth of tension bars (d) [mm]	152	152
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	259	259
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	80	80
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	410	410
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	520	520
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	48	48
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	142	142
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	410	410
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	200
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.45
Number of layer ( $n_f$ )	---	3
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	2206
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	138
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	1

ادامه جدول ۶-۶۱: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	A2	B2
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	11
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	4.4
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	914	4
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	910
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	457	457

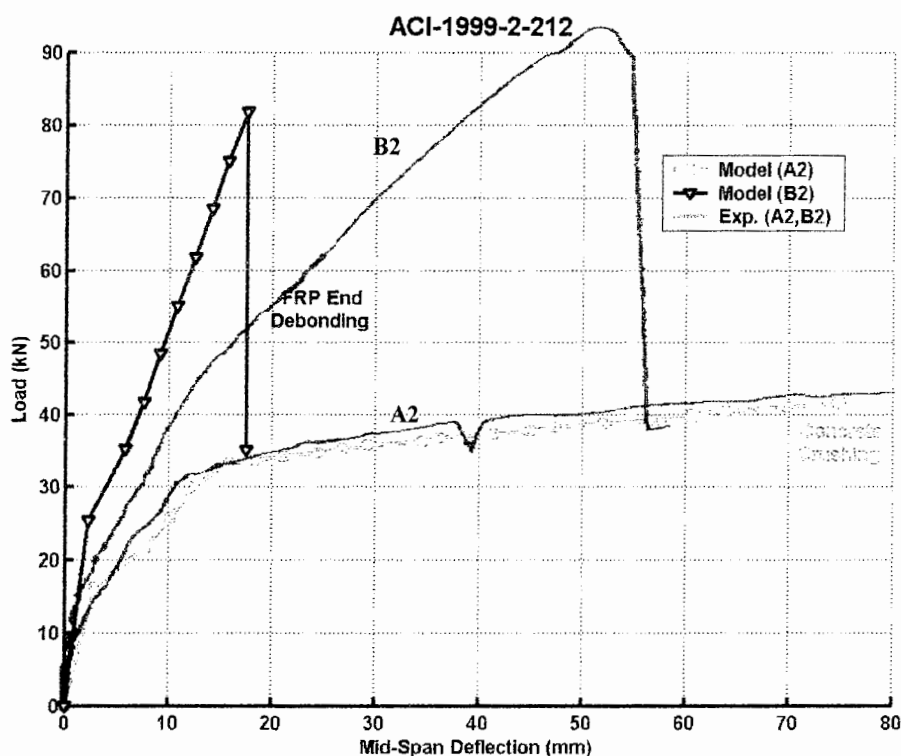
جدول ۶-۶۲: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
		A2	Proposed	0.94	1.01	1.18	1.01	
	Simplified	0.94	1.01	1.16	1.02	0.93	0.88	C
B2	Proposed	0.92	1.05	1.34	1.02	0.89	0.80	C
	Simplified	0.92	1.06	1.38	1.03	0.89	0.80	C

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۶-۶۳: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
B2	No Debonding Control	156.49	0.89	1.60	Concrete Cover Separation	Concrete Cover Separation
	FRP End Debonding Control	> 156.49	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	87.34	0.58	0.39		



شکل ۶-۴۸: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییرمکان در وسط دهانه تیرها (بدست آمده از مدل پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی)

همانطور که در شکل ۶-۴۸ مشاهده می شود، در این آزمایش و در تعداد دیگری از نمونه ها، نتایج مدل از نتایج آزمایشگاهی فاصله گرفته است. از آنجایی که نتایج مدل کاملا وابسته به داده های ورودی آن می باشد، در صورتی که داده ها نادرست وارد شوند، نتایج مدل از نتایج آزمایشگاهی فاصله خواهد گرفت. علت آن را می توان در این دانست که در آزمایشهای انجام شده توسط محققین مختلف، ممکن است خصوصیات مواد مصرفی در تیر آزمایش شده (بتن، فولاد و FRP) با خصوصیات تعریف شده براساس آزمایش نمونه های مختلف از این مواد، تفاوت داشته باشد.

#### ۶-۲-۲۰: آزمایش بیستم

در این آزمایش که توسط (Arduini et al. (1997) انجام شده، شش نمونه از آن در دو سری مورد ارزیابی قرار گرفته است (سری A و B). در سری اول دو نمونه به ترتیب با یک و دو لایه CFRP

و در سری دوم دو نمونه با یک و سه لایه CFRP به صورت خمشی تقویت شده اند. نوع CFRP ها و ابعاد نمونه ها در دو سری با یکدیگر تفاوت دارد.

جدول ۶-۶۴: خصوصیات نمونه ها

پارامترها	A1	A4	A5	B1	B2	B3
Width of beam (b) [mm]	200	200	200	300	300	300
Depth of beam (h) [mm]	200	200	200	400	400	400
Maximum aggregate ( $d_{max}$ ) [mm]	25	25	25	25	25	25
Cylindric compressive strength ( $f'_c$ ) [MPa]	33	33	33	30	30	30
Cubic compressive strength ( $f'_{cu}$ ) [MPa]	41.8	41.8	41.8	37	37	37
Depth of tension bars (d) [mm]	163	163	163	350	350	350
Area of tension bars ( $A_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	308	308	308	400	400	400
Perimeter of tension bars ( $u_s$ ) [mm]	88	88	88	122.5	122.5	122.5
Yield stress of tension bars ( $f_y$ ) [MPa]	540	540	540	340	340	340
Ultimate stress of tension bars ( $f_{su}$ ) [MPa]	700	700	700	530	530	530
Module of elasticity of tension bars ( $E_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200	200
Depth of compression bars ( $d'$ ) [mm]	37	37	37	50	50	50
Area of compression bars ( $A'_s$ ) [mm <sup>2</sup> ]	308	308	308	265.5	265.5	265.5
Yield stress of compression bars ( $f'_y$ ) [MPa]	540	540	540	340	340	340
Module of elasticity of compression bars ( $E'_s$ ) [GPa]	200	200	200	200	200	200
Width of FRP ( $b_f$ ) [mm]	---	150	150	---	300	300
Thickness of FRP ( $t_f$ ) [mm]	---	0.13	0.13	---	0.17	0.17
Number of layer ( $n_f$ )	---	1	2	---	1	3
Ultimate stress of FRP ( $f_{fu}$ ) [MPa]	---	2906	2906	---	3000	3000
Module of elasticity of FRP ( $E_f$ ) [GPa]	---	167	167	---	400	400
Thickness of adhesive ( $t_a$ ) [mm]	---	4	4	---	1.5	3
Module of elasticity of adhesive ( $E_a$ ) [GPa]	---	1.1	1.1	---	4	4
Shear Module of adhesive ( $G_a$ ) [GPa]	---	0.393	0.393	---	1.48	1.48
Support-End of FRP distance ( $L_1$ ) [mm]	700	150	150	1100	100	100
Force-End of FRP distance ( $L_2$ ) [mm]	0	550	550	0	1000	1000
Midspan-Force distance ( $L_3$ ) [mm]	300	300	300	150	150	150

جدول ۶-۶۵: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک (نمونه های سری A)

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	Failure Mode
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
A1	Proposed	0.68	1.09	1.0	1.0	---	1.03	C
	Simplified	0.68	1.05	0.98	1.02	---	1.03	C
A4	Proposed	0.97	1.09	---	---	---	1.07	C
	Simplified	0.97	1.07	---	---	---	1.07	C
A5	Proposed	1.0	1.0	---	---	---	1.07	C
	Simplified	1.0	1.0	---	---	---	1.07	C

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation



جدول ۶-۶۶: نتایج مدل پیشنهادی و مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک (نمونه های سری B)

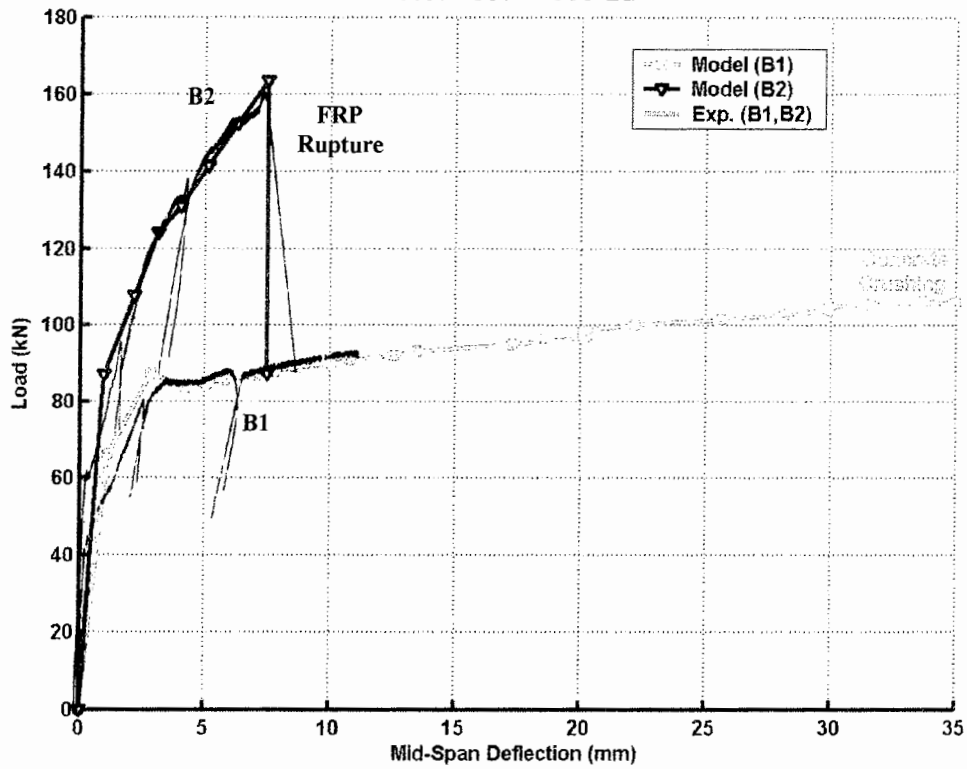
Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
B1	Proposed	1.0	1.04	0.80	0.95	---	1.05	C
	Simplified	1.0	1.04	0.99	1.04	---	1.06	C
B2	Proposed	0.87	0.97	0.99	1.0	1.1	1.07	R
	Simplified	0.87	0.97	1.03	1.02	1.08	1.02	R
B3	Proposed	0.85	1.0	1.0	1.01	1.41	1.03	R
	Simplified	0.85	1.0	1.01	1.02	1.56	1.03	R

C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

جدول ۶-۶۷: نتایج مدل‌های کنترل کننده جداشدگی

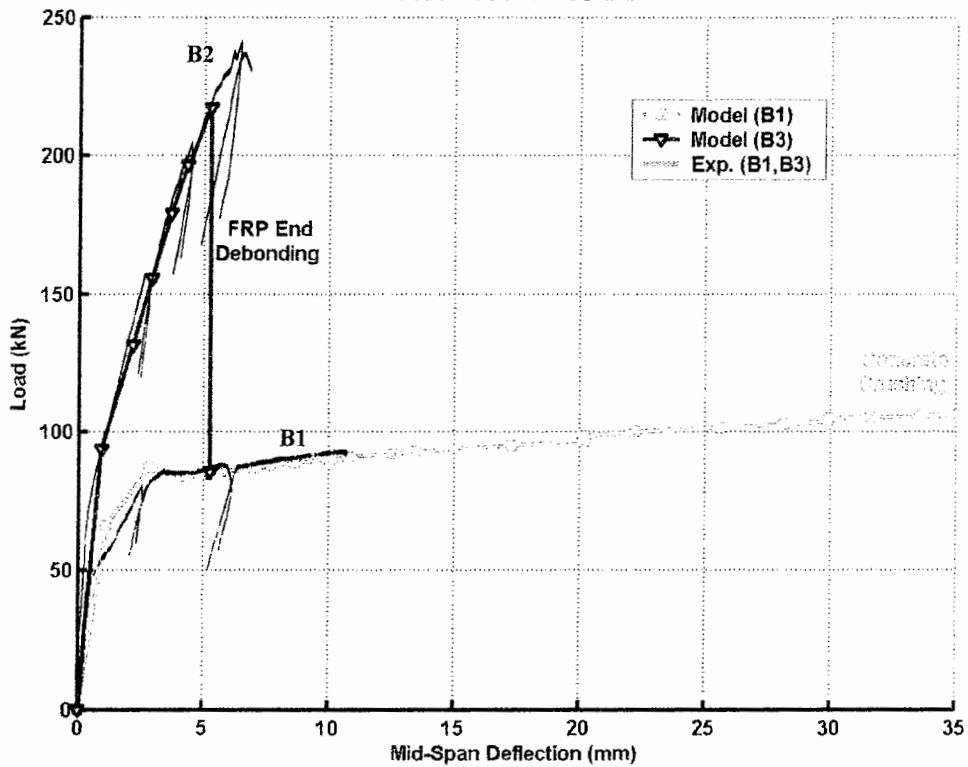
Samples	Models	Ultimate			Failure Mode	Exp. Failure Mode
		$P_{max}$ (kN)	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$		
A4	No Debonding Control	196.49	---	1.79	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	93.13	---	0.83		
	Concrete Cover Separation Control	153.65	---	1.40		
A5	No Debonding Control	244.74	---	2.72	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	91.95	---	1.02		
	Concrete Cover Separation Control	119.36	---	1.33		
B2	No Debonding Control	174.30	1.1	1.01	FRP Rupture	FRP Rupture
	FRP End Debonding Control	> 174.30	---	---		
	Concrete Cover Separation Control	> 174.30	---	---		
B3	No Debonding Control	356.99	1.41	1.58	FRP End Debonding	FRP End Debonding
	FRP End Debonding Control	217.14	0.85	0.97		
	Concrete Cover Separation Control	> 356.99	---	---		

ACI-1997-4-363-B2



شکل ۶-۵۱: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان تیر B2 (مقایسه مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی)

ACI-1997-4-363-B3



شکل ۶-۵۲: دیاگرام تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان تیر B3 (مقایسه مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی)

## ۳-۶: بررسی نتایج

### ۱-۳-۶: مقدمه

در این قسمت با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات ارائه شده در بند قبل، یک بررسی کلی از آنها صورت می‌گیرد. این بررسی به پنج دسته تقسیم می‌شود. در قسمت اول بررسی، هدف اصلی ارزیابی عملکرد صحت مدل اصلی نسبت به نتایج عملی می‌باشد. در چهار بررسی آخر، نتایج مدل‌های مختلف با نتایج مدل اصلی و نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد.

در دومین ارزیابی، اثر سخت‌شدگی در آرماتورهای فولادی بررسی شده و با نتایج مدل اصلی مقایسه می‌گردد. در قسمت سوم، اثر در نظر گرفتن مقاومت ترک و بتن کششی ارزیابی می‌شود. در مرحله چهارم، با توجه به مدل (Alaee and Karihaloo, 2003) و مقایسه نتایج آن با نتایج مدل اصلی، این مدل نسبتاً ساده در محاسبه عرض ترک بررسی می‌گردد. در قسمت نهایی، روش محاسبه تغییرمکان با کمک مدل (Charkas et al., 2002) نسبت به مدل به کار رفته در مدل اصلی ارزیابی می‌گردد.

### ۲-۳-۶: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج آزمایشگاهی

در این قسمت جهت بررسی صحت عملکرد مدل پیشنهادی نسبت به نتایج آزمایشگاهی، با توجه به نتایج بدست آمده توسط مدل از آزمایش‌های مختلف که در بخش ۲-۶ ارائه شد، یک جمع‌بندی صورت می‌گیرد. جهت ارزیابی بهتر، نمونه‌های آزمایشگاهی به سه دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند که عبارتند از: (۱) نمونه‌های شاهد؛ (۲) نمونه‌های تقویت شده ای که مود گسیختگی حاکم آنها پارگی FRP و یا خردشدگی بتن فشاری می‌باشد (گسیختگی خمشی)<sup>۱</sup>؛

---

<sup>۱</sup> Flexural Failure

۳) نمونه های تقویت شده ای که مود گسیختگی آنها جداشدگی FRP در انتها و یا جداشدن پوشش بتنی باشد (گسیختگی ناشی از جداشدگی<sup>۱</sup>).

برای دسته اول (نمونه های شاهد)، جدول ۶-۶۸ با توجه به یک میانگین گیری از نتایج بخش ۶-۲ تنظیم شده است. این عمل برای دو دسته دیگر و همچنین برای کلیه نمونه ها که شامل هر سه دسته است در جداول ۶-۶۹ الی ۶-۷۱ صورت گرفته است. در این جداول میانگین نسبت نیرو و تغییرمکان وسط دهانه بدست آمده از مدل به نیرو و تغییرمکان وسط دهانه بدست آمده از نتایج عملی در سه حالت شروع ترک خوردگی بتن، شروع تسلیم شدگی آرماتورهای کششی و حالت نهایی گسیختگی تیر و همچنین انحراف معیار آنها محاسبه شده است. در جداول ۶-۶۹ الی ۶-۷۱ که مربوط به نمونه های تقویت شده می باشد، دو مود جداشدگی در انتهای FRP و جداشدن پوشش بتنی با توجه به دو مدل معرفی شده در فصل پنج کنترل شده و نتایج آن در مدل اصلی دخالت داده شده است.

جدول ۶-۶۸: بررسی نتایج مدل اصلی برای نمونه های شاهد (دسته اول)

Control Samples						
تعداد نمونه ها = ۲۶	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$					
	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
نتایج مدل اصلی	1.06	0.12	1.00	0.07	0.95	0.09
نتایج مدل اصلی	$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$					
	0.88	0.18	0.87	0.15	1.01	0.19

Debonding Failure<sup>۱</sup>

جدول ۶-۶: بررسی نتایج مدل اصلی برای نمونه هایی که مود گسیختگی آنها پارگی FRP و یا خردشدگی بتن فشاری باشد (دسته دوم)

Flexural Failure Samples								
تعداد نمونه ها = ۲۲	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$							
	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate			
					No Debonding Control		Debonding Control	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
نتایج مدل اصلی	1.01	0.08	0.99	0.08	0.93	0.11	0.93	0.11
$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$								
نتایج مدل اصلی	0.88	0.17	0.87	0.16	0.96	0.26	0.96	0.26

همانطور که در جدول ۶-۶ مشاهده می شود، میانگین نتایج مدل پیشنهادی در حالت نهایی برای نسبت نیروها برابر 0.95 می باشد و در حالت شروع تسلیم شدگی برابر 1.00 بوده که نشاندهنده این موضوع است که نتایج مدل در نمونه های شاهد بسیار نزدیک به نتایج عملی می باشد. این رفتار در نمونه های جدول ۶-۶ البته با اندکی کاهش مجددا مشاهده می شود به گونه ای که نسبت نیروهای نهایی برابر 0.93 و نسبت نیروهای تسلیم شدگی 0.96 می باشد. نکته ای که در جدول ۶-۶ قابل ملاحظه است، آنستکه نتایج مدل همراه با مدلهای کنترل کننده جداشدگی و بدون آنها یکسان بوده و نشاندهنده این موضوع است که مودهای گسیختگی این نمونه ها همانطور که انتظار می رفت جداشدگی نبوده و یکی از حالات پارگی FRP و یا خردشدگی بتن فشاری می باشد چراکه درغیراینصورت وجود مدلهای کنترل جداشدگی باعث کاهش نسبت نیروهای نهایی خواهد شد.

جدول ۶-۷۰: بررسی نتایج مدل اصلی برای نمونه هایی که مود گسیختگی آنها جداشدگی در انتهای FRP و یا جداشدن پوشش بتنی باشد (دسته سوم)

Debonded Samples								
تعداد نمونه ها = ۳۷	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$							
	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate			
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	No Debonding Control		Debonding Control	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
نتایج مدل اصلی	1.03	0.13	1.05	0.12	1.35	0.34	0.98	0.12
$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$								
نتایج مدل اصلی	0.90	0.16	0.86	0.14	1.10	0.37	0.71	0.23

جدول ۶-۷۱: بررسی نتایج مدل اصلی برای کلیه نمونه ها

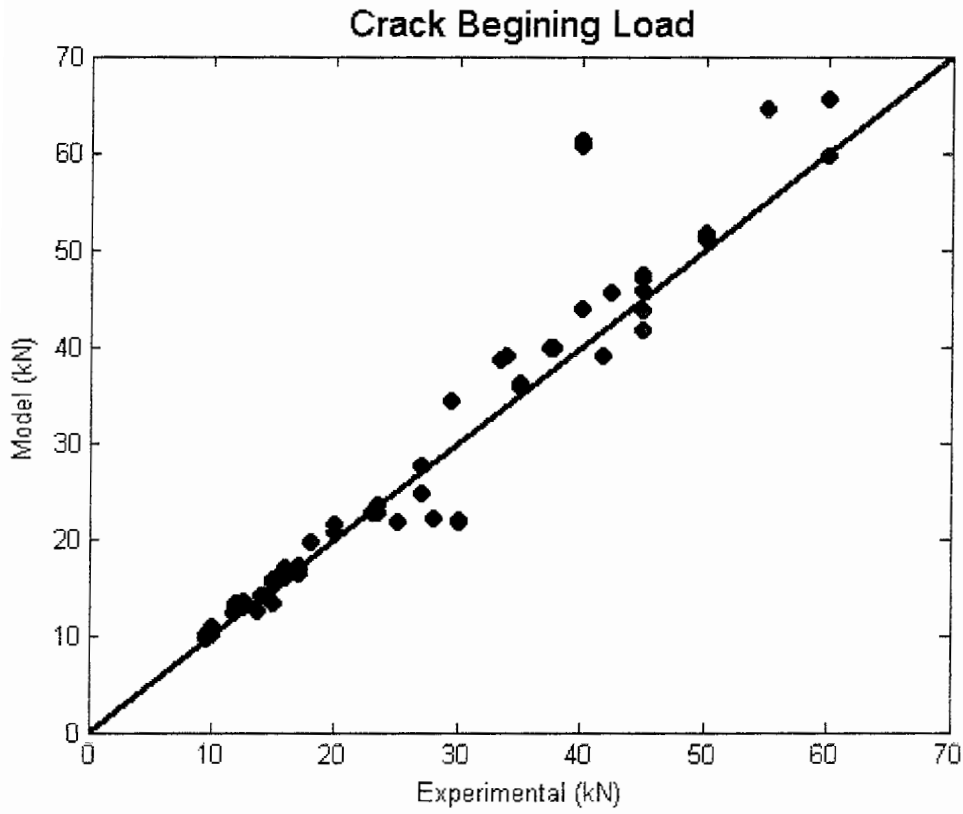
Total Samples								
تعداد نمونه ها = ۸۵	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$							
	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate			
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	No Debonding Control		Debonding Control	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
نتایج مدل اصلی	1.03	0.12	1.02	0.10	1.12	0.31	0.96	0.12
$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$								
نتایج مدل اصلی	0.89	0.17	0.87	0.15	1.03	0.29	0.83	0.27

با دقت در جدول ۶-۷۰ می توان دید که نسبت نیروهای تسلیم شدگی کمی نسبت به نمونه های قبل افزایش یافته و به مقدار 1.05 رسیده است. در نتایج نیروهای نهایی نیز همانطور که دیده

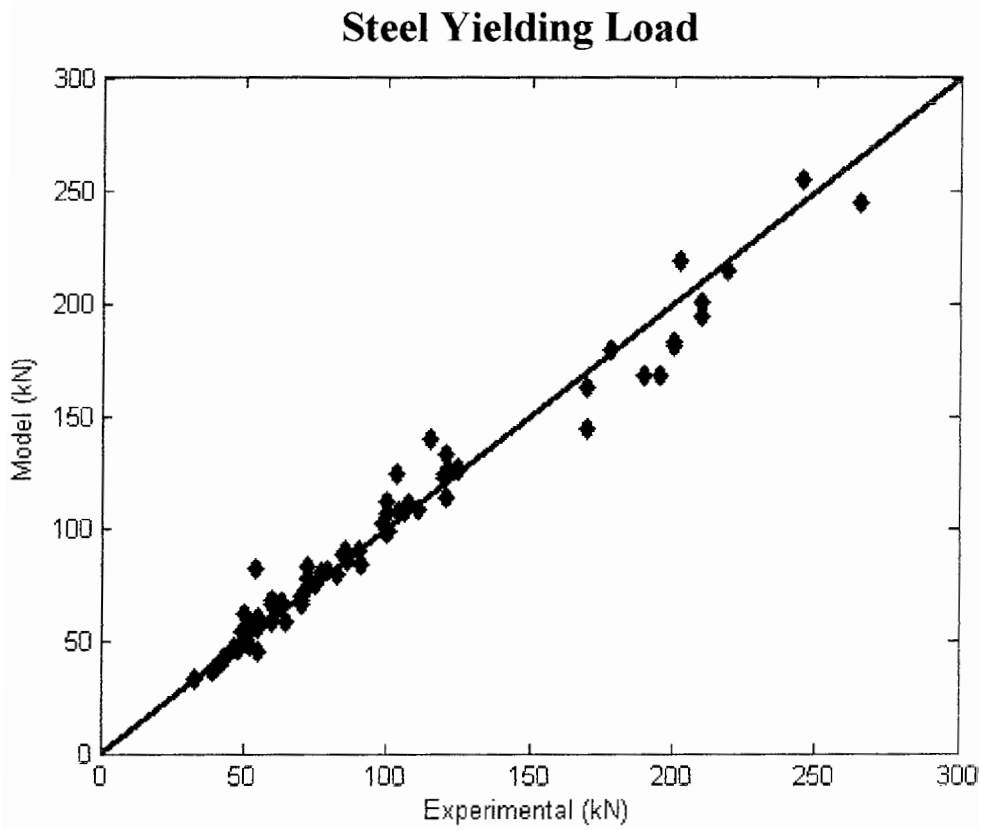
می شود ، مقادیر آن بسیار بیشتر از 1.0 بوده و برابر 1.35 است . علت آن را می توان در این دانست که چون این نمونه ها در نیروی کمتر در اثر جداسازی گسیخته می شوند ، برای نزدیک شدن نتایج مدل به نتایج عملی لازم است که مدلهایی این اثرات جداسازی را کنترل نموده و نیروی جداسازی را محاسبه کنند . همانطور که مشاهده می شود با در نظر گرفتن مدلهای جداسازی معرفی شده در فصل پنجم ، نتایج نسبت نیروهای نهایی مدل به نتایج نیروهای نهایی بدست آمده از آزمایش ، بسیار نزدیک به هم شده و برابر 0.98 می گردد .

در جدول ۶-۷۱ در نهایت می توان یک نتیجه گیری کلی از مدل ارائه نمود . همانطور که مشاهده می شود برای تمامی حالات گسیختگی که مجموعاً ۸۵ نمونه می باشند ، میانگین نتایج نسبت نیروهای بدست آمده از مدل به نیروهای بدست آمده از آزمایش با توجه به مدلهای کنترل جداسازی برابر 0.96 می باشد . مقدار انحراف معیار آن نیز بسیار اندک بوده و برابر 0.12 است . در حالت تسلیم شدگی این مقدار میانگین نسبتها به 1.02 ارتقاء می یابد . در این جدول نیز همانند جدول ۶-۷۰ ، مقدار نتایج نسبت نیروهای نهایی بدون کنترل جداسازی بزرگتر از 1.0 بوده و برابر 1.12 است که علت آن وجود نمونه هایی است که قبل از پاره شدن FRP و یا خرد شدن بتن ، دچار یک مود از جداسازی شده اند .

در شکل ۶-۵۳ الی ۶-۵۶ ، برای نمونه های مختلف مقادیر تئوری بدست آمده از مدل با نتایج آزمایشگاهی به ترتیب برای لحظه شروع ترک خوردگی بتن ، شروع تسلیم شدگی آرماتورهای فولادی ، نیروی نهایی بدون کنترل جداسازی و نیروی نهایی همراه با کنترل جداسازی مقایسه شده است . با دقت در این اشکال و جداول ۶-۶۸ الی ۶-۷۱ می توان دید که نتایج مدل بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی بوده و می تواند به عنوان یک مدل مناسب ، حتی در موارد عملی مورد استفاده قرار گیرد . در مقایسه دو شکل ۶-۵۵ و ۶-۵۶ می توانیم تأثیر کنترل جداسازی را در نزدیک شدن نتایج مدل به نتایج آزمایشگاهی مشاهده نمائیم .

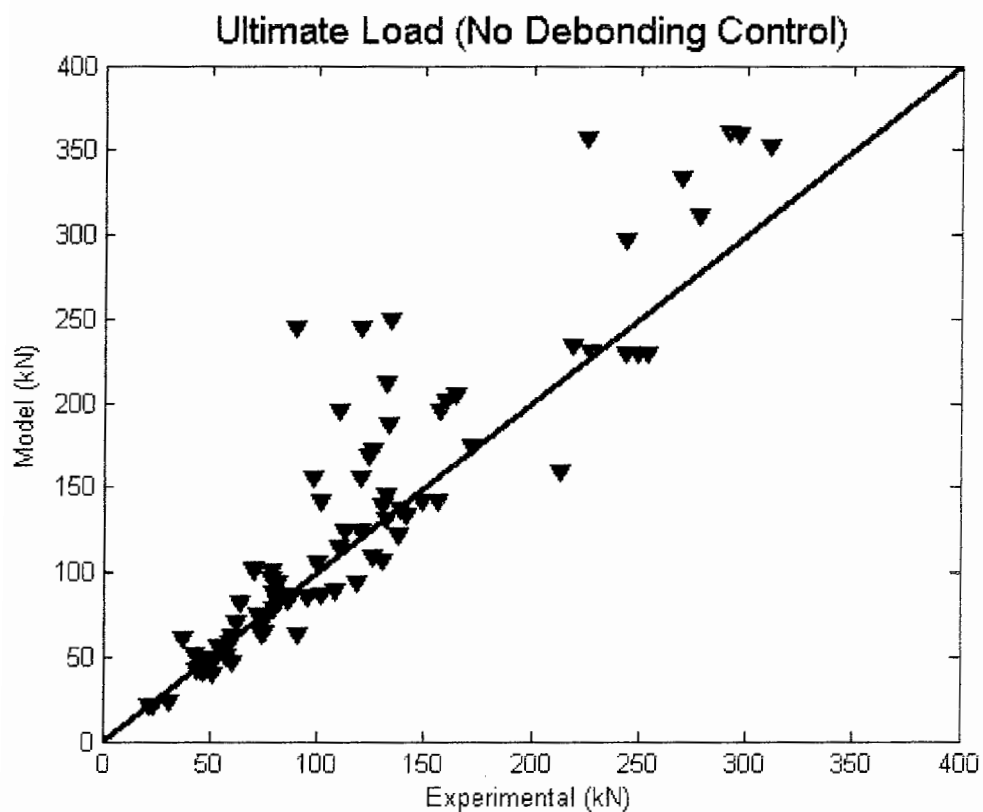


شکل ۵۳-۶: مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی برای نیروی معادل شروع ترک خوردگی

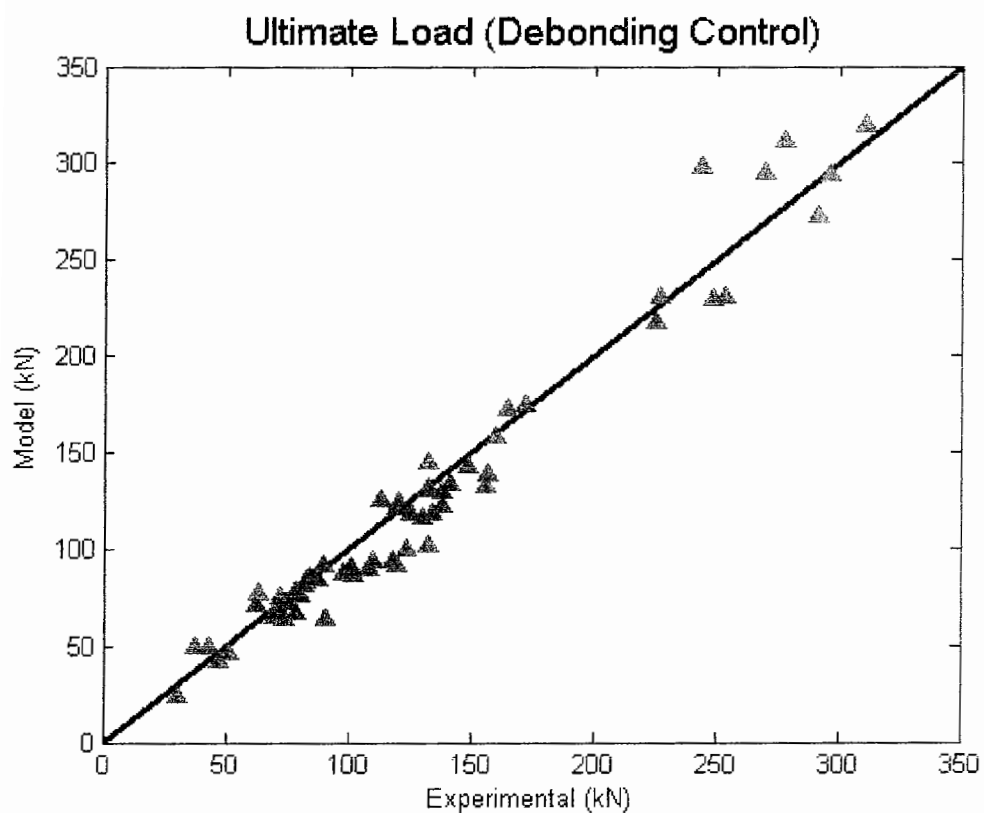


شکل ۵۴-۶: مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی برای نیروی معادل تسلیم شدگی فولاد





شکل ۶-۵۵: مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی برای نیروی نهایی بدون کنترل جداشدگی



شکل ۶-۵۶: مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی برای نیروی نهایی همراه با کنترل جداشدگی

### ۳-۳-۶: بررسی اثر سخت شدگی فولاد در مدل

همانطور که در فصل پنجم در معرفی مدل اشاره شد، عملکرد سخت شدگی برای آرماتورهای فولادی در نظر گرفته می شود به گونه ای که بعد از تسلیم شدن فولاد، یک افزایش نسبتاً کم در تنش مقاوم آن تا لحظه گسیختگی خواهیم داشت. در مدل‌های ایده آل که معمولاً در آیین نامه‌ها نیز استفاده می شود، این سخت شدگی در جهت محافظه کاری بیشتر، در نظر گرفته نمی شود؛ اما در مدل اصلی ارائه شده در این پایان نامه برای نزدیکتر شدن نتایج مدل با نتایج عملی، این اثر لحاظ می گردد. برای بررسی این اثر، نتایج مدل هنگامی که سخت شدگی فولاد در نظر گرفته نشود، برای هر نمونه در بخش ۶-۲ محاسبه گردید. نتایج میانگین نسبت نیروی پیش بینی شده توسط مدل به نیروی بدست آمده از آزمایش و همچنین مقادیر نسبت تغییر مکان وسط دهانه آنها در سه ناحیه شروع ترک خوردگی، شروع تسلیم شدگی و حالت نهایی گسیختگی تیر با توجه به نتایج بخش ۶-۲ در جداول ۶-۷۲ الی ۶-۷۵ جمع آوری شده است. جدول ۶-۷۲ مربوط به نمونه‌هایی است که تقویت نشده و به عنوان نمونه‌های شاهد در نظر گرفته می شوند که تعداد آنها ۲۶ عدد می باشد. جدول ۶-۷۳ مربوط به نمونه‌های تقویت شده ای است که از لحاظ نتایج آزمایشگاهی بر اثر پارگی و یا خردشدگی بتن فشاری دچار گسیختگی شده اند. جدول ۶-۷۴ مربوط به نمونه‌های تقویت شده ای است که مود گسیختگی آنها جداشدگی در انتهای FRP و یا جداشدن پوشش بتنی می باشد. جدول ۶-۷۵ نیز مربوط به کلیه نمونه‌ها خواهد بود.

جدول ۶-۷۲: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدلی که در آن سخت شدگی فولاد در نظر گرفته نمی شود برای نمونه های شاهد (دسته اول)

<b>Control Samples</b>								
تعداد نمونه ها = ۲۶	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$							
	<b>Crack Begining</b>		<b>Steel Yielding</b>		<b>Ultimate</b>			
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد		
نتایج مدل اصلی	1.06	0.12	1.00	0.07	0.95	0.09		
بدون سخت شدگی فولاد	1.06	0.12	1.00	0.07	0.91	0.09		
	$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$							
	0.88		0.18		0.87		0.15	
	0.88		0.18		0.87		0.15	
نتایج مدل اصلی	0.88	0.18	0.87	0.15	1.01	0.19		
بدون سخت شدگی فولاد	0.88	0.18	0.87	0.15	0.96	0.17		

جدول ۶-۷۳: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدلی که در آن سخت شدگی فولاد در نظر گرفته نمی شود برای نمونه هایی که مود گسیختگی آنها پارگی FRP و یا خردشدگی بتن فشاری باشد (دسته دوم)

<b>Flexural Failure Samples</b>								
تعداد نمونه ها = ۲۲	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$							
	<b>Crack Begining</b>		<b>Steel Yielding</b>		<b>Ultimate</b>			
					<b>No Debonding Control</b>		<b>Debonding Control</b>	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
نتایج مدل اصلی	1.01	0.08	0.99	0.08	0.93	0.11	0.93	0.11
بدون سخت شدگی فولاد	1.01	0.08	0.99	0.08	0.92	0.10	0.92	0.10
	$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$							
	0.88		0.17		0.87		0.16	
	0.88		0.17		0.87		0.16	
نتایج مدل اصلی	0.88	0.17	0.87	0.16	0.96	0.26	0.96	0.26
بدون سخت شدگی فولاد	0.88	0.17	0.87	0.16	0.96	0.27	0.96	0.27

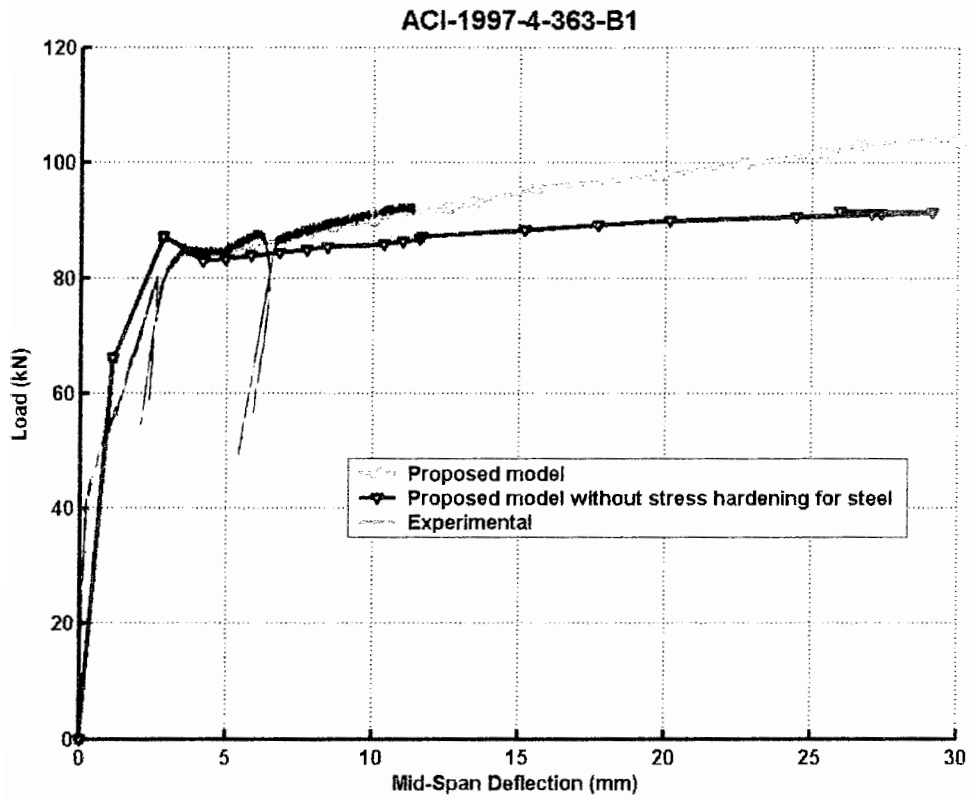
جدول ۶-۷۴: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدلی که در آن سخت شدگی فولاد در نظر گرفته نمی شود برای نمونه هایی که مود گسیختگی آنها جداشدگی در انتهای FRP و یا جداشدن پوشش بتنی باشد (دسته سوم)

Debonded Samples								
تعداد نمونه ها = ۳۷	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$							
	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate			
					No Debonding Control		Debonding Control	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
نتایج مدل اصلی	1.03	0.13	1.05	0.12	1.35	0.34	0.98	0.12
بدون سخت شدگی فولاد	1.03	0.13	1.05	0.12	1.34	0.34	0.98	0.12
	$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$							
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
نتایج مدل اصلی	0.90	0.16	0.86	0.14	1.10	0.37	0.71	0.23
بدون سخت شدگی فولاد	0.90	0.16	0.86	0.14	1.09	0.38	0.71	0.23

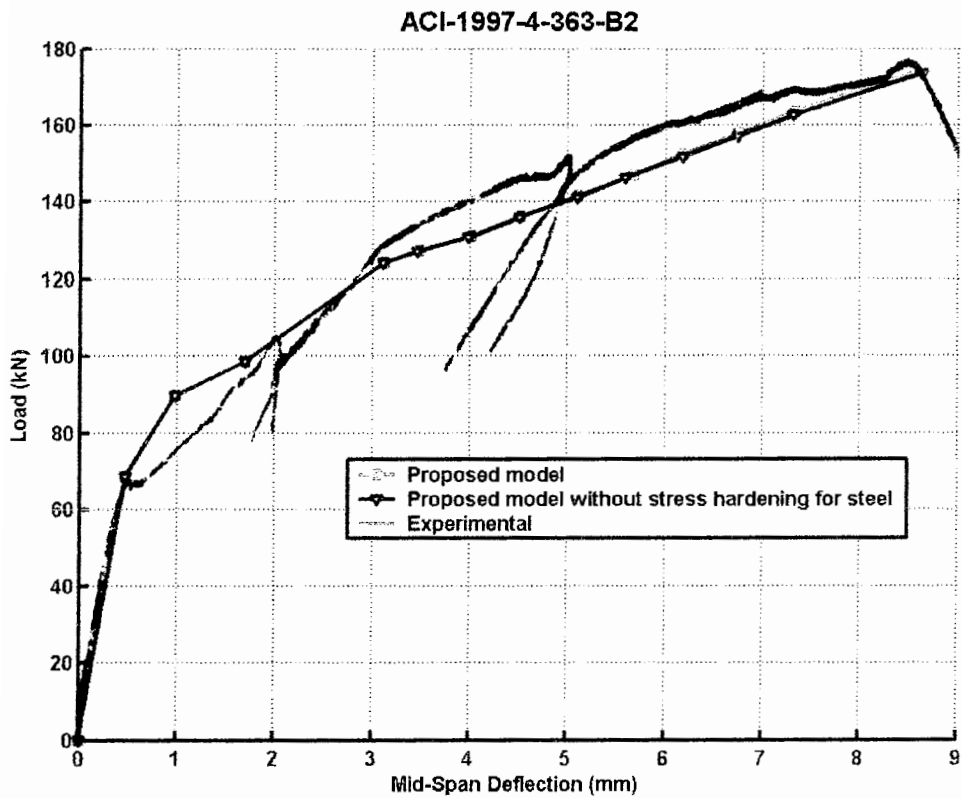
جدول ۶-۷۵: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدلی که در آن سخت شدگی فولاد در نظر گرفته نمی شود برای کلیه نمونه ها

Total Samples								
تعداد نمونه ها = ۸۵	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$							
	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate			
					No Debonding Control		Debonding Control	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
نتایج مدل اصلی	1.03	0.12	1.02	0.10	1.12	0.31	0.96	0.12
بدون سخت شدگی فولاد	1.03	0.12	1.02	0.10	1.10	0.32	0.96	0.11
	$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$							
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
نتایج مدل اصلی	0.89	0.16	0.86	0.15	1.03	0.29	0.83	0.27
بدون سخت شدگی فولاد	0.89	0.16	0.86	0.15	1.01	0.29	0.82	0.28

همانطور که انتظار می رفت در نتایج جداول ۶-۷۲ تا ۶-۷۵ تفاوت اثر در نظر گرفتن سخت شدگی فولاد ، تنها بعد از ناحیه تسلیم شدگی مشاهده می شود و قبل از آن نتایج دو مدل کاملاً همانند یکدیگر هستند . بعد از تسلیم شدن آرماتورهای کششی و وارد شدن به ناحیه سوم ، نتایج مدل اصلی از مدلی که سخت شدگی در نظر گرفته نمی شود بیشتر شده و از آن جدا می گردد و با توجه به میانگین بدست آمده از نتایج آزمایشها ، نتایج مدل به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر می گردد ، به عبارتی با اعمال اثر سخت شدگی ، تاحدی به رفتار واقعی تیر نزدیکتر می شویم . نحوه تأثیر این اثر به خوبی در شکل ۶-۵۷ که یکی از نمونه های شاهد آزمایش بیستم است ، دیده می شود . رفتار سخت شدگی فولاد در یکی از نمونه های تقویت شده از سری نمونه های آزمایش بیستم نیز در شکل ۶-۵۸ نشان داده شده است . همانطور که در مقایسه شکل های ۶-۵۷ و ۶-۵۸ و همچنین نتایج جداول ۶-۷۲ الی ۶-۷۵ دیده می شود ، در نمونه های شاهد ، اثر سخت شدگی تأثیر خود را واضحت بر روی رفتار تیر بعد از تسلیم شدگی آرماتورها گذاشته است . علت آن را می توان در وجود FRP های خمشی دانست ، چراکه با وجود این تقویت کننده ها ، کرنش در آرماتورها نسبت به نمونه های شاهد کمتر شده و در نتیجه اثر سخت شدگی که به صورت خطی با تغییرات کرنش رشد می نماید ، تأثیر کمتری در نتایج خواهد گذاشت .



شکل ۵۷-۶: بررسی اثر سخت شدگی فولاد در نتایج مدل برای یک نمونه شاهد



شکل ۵۸-۶: بررسی اثر سخت شدگی فولاد در نتایج مدل برای یک نمونه تقویت شده

### ۴-۳-۶: بررسی اثر مقاومت ترک و بتن کششی

در این بخش ، اثر در نظر گرفتن مقاومت ترک و همچنین مقاومت بتن کششی و عدم لحاظ آن در مدل اصلی ، مقایسه می گردد . در این قسمت نیز همانند بخش ۳-۳-۶ ، چهار جدول (جداول ۶-۶ تا ۶-۷۹) تنظیم می شود که از تکرار معرفی پارامترهای به کار رفته در این جداول اجتناب می گردد .

جدول ۶-۶ : مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدلهایی که در آن مقاومت ترک و بتن کششی در نظر گرفته نمی شود برای نمونه های شاهد (دسته اول)

Control Samples						
تعداد نمونه ها = ۲۶	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$					
	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
نتایج مدل اصلی	1.06	0.12	1.00	0.07	0.95	0.09
بدون مقاومت ترک	1.06	0.12	0.98	0.07	0.95	0.09
بدون مقاومت بتن کششی	0.24	0.08	0.97	0.07	0.91	0.09
	$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$					
	0.88	0.18	0.87	0.15	1.01	0.19
	0.88	0.18	0.92	0.15	1.01	0.19
بدون مقاومت بتن کششی	0.78	0.17	0.92	0.16	1.01	0.19

همانطور که در این جداول و شکل‌های ۶-۵۹ و ۶-۶۰ (نمونه ها از آزمایش چهاردهم استخراج شده اند) مشاهده می شود ، اثر در نظر گرفتن مقاومت ترک و مقاومت بتن کششی در شروع ترک خوردگی و در ناحیه ابتدایی از منحنی نیرو - تغییرمکان دیده شده و در ناحیه تسلیم شدگی فولاد و حالت نهایی اندکی کاهش نسبت به نتایج مدل اصلی مشاهده می گردد که کاملاً منطقی می باشد

چراکه سهم بتن کششی و ترک در این مدلها حذف می گردد . نکته قابل ذکر دیگر از این جداول آنستکه با حذف مقاومت ترک و سپس مقاومت بتن کششی ، تغییرمکان وسط دهانه در دو حالت نهایی و تسلیم شدگی فولاد بیشتر می شود و علت آن نیز کاهش سختی تیر به واسطه حذف یک نیروی مقاوم ناشی از ترک و بتن کششی ، می باشد . البته این افزایش تغییرمکان خیلی نبوده و مقدار آن اندکی با مدل اصلی تفاوت دارد ؛ و اما در لحظه شروع ترک خوردگی دو مدل اصلی و مدلی که مقاومت ترک در آن حذف شده است نباید با یکدیگر تفاوت داشته باشند ، چراکه هنوز عمل ترک خوردگی شروع نشده که بخواهیم از مقاومت ترک صرفنظر کنیم . با شروع بازشدگی ترک در بتن کششی ، نتایج مدل اصلی از مدلی که مقاومت ترک لحاظ نمی شود فاصله گرفته و البته با دقت در نتایج عملی ، این فاصله گرفتن باعث نزدیکتر شدن نتایج مدل اصلی به نتایج حقیقی می گردد .

در مقایسه بین دو حالتی که تنها مقاومت ترک لحاظ نشود و حالتی که کلاً از بتن کششی و ترک صرفنظر گردد ، با توجه به جداول و شکلها ، تا قبل از ترک خوردگی مدل اول با مدل دوم بدلیل وجود مقاومت بتن کششی اختلاف نسبتاً زیادی دارد . اما بعد از بازشدگی ترکها و امتداد آنها تا نزدیکیهای تارخشی و در واقع حذف اثر مقاومت بتن کششی بدلیل کم شدن محدوده آن ، دو مدل به یکدیگر نزدیک شده به گونه ای که اختلاف کمی در ناحیه تسلیم شدگی و حالت نهایی با یکدیگر دارند . بنابراین می توان اینگونه نتیجه گیری کرد که با در نظر گرفتن مقاومت ترک و مقاومت بتن کششی ، در ابتدای رفتار نیرو - تغییرمکان ، نتایج مدل به نتایج عملی نزدیکتر شده و البته اثر اندکی نیز در ادامه رفتار تا بعد از تسلیم شدگی و حالت نهایی خواهد گذاشت .



جدول ۶-۷۷: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدل‌هایی که در آن مقاومت ترک و بتن کششی در نظر گرفته نمی شود برای نمونه هایی که مود گسیختگی آنها پارگی FRP و یا خردشدگی بتن فشاری باشد (دسته دوم)

Flexural Failure Samples									
تعداد نمونه ها = ۲۲	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$								
	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate				
					No Debonding Control		Debonding Control		
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	
نتایج مدل اصلی	1.01	0.08	0.99	0.08	0.93	0.11	0.93	0.11	
بدون مقاومت ترک	1.01	0.08	0.94	0.08	0.93	0.11	0.93	0.11	
بدون مقاومت بتن کششی	0.24	0.07	0.93	0.09	0.93	0.11	0.93	0.11	
	$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$								
	نتایج مدل اصلی	0.88	0.17	0.87	0.16	0.96	0.26	0.96	0.26
	بدون مقاومت ترک	0.88	0.17	0.93	0.16	0.98	0.28	0.98	0.28
	بدون مقاومت بتن کششی	0.74	0.16	0.91	0.15	0.98	0.28	0.98	0.28

جدول ۶-۷۸: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدل‌هایی که در آن مقاومت ترک و بتن کششی در نظر گرفته نمی شود برای نمونه هایی که مود گسیختگی آنها جداسازی در انتهای FRP و یا جداسازی پوشش بتنی باشد (دسته سوم)

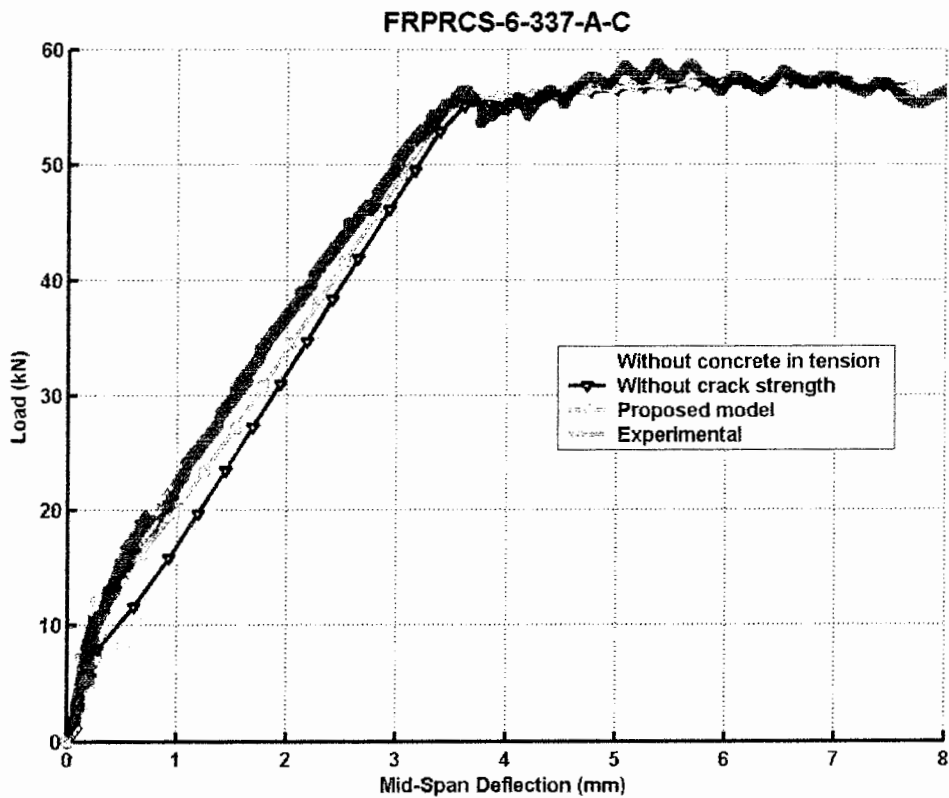
Debonded Samples									
تعداد نمونه ها = ۳۷	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$								
	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate				
					No Debonding Control		Debonding Control		
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	
نتایج مدل اصلی	1.03	0.13	1.05	0.12	1.35	0.34	0.98	0.12	
بدون مقاومت ترک	1.03	0.13	1.01	0.13	1.35	0.35	0.98	0.12	
بدون مقاومت بتن کششی	0.29	0.08	1.00	0.12	1.35	0.35	0.98	0.12	
	$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$								
	نتایج مدل اصلی	0.90	0.16	0.86	0.14	1.10	0.37	0.71	0.23
	بدون مقاومت ترک	0.90	0.16	0.91	0.17	1.12	0.39	0.71	0.23
	بدون مقاومت بتن کششی	0.81	0.17	0.89	0.14	1.12	0.39	0.71	0.23

جدول ۶-۷۹: مقایسه نتایج مدل اصلی با نتایج مدل‌هایی که در آن مقاومت ترک و بتن کششی در نظر گرفته نمی شود  
برای کلیه نمونه ها

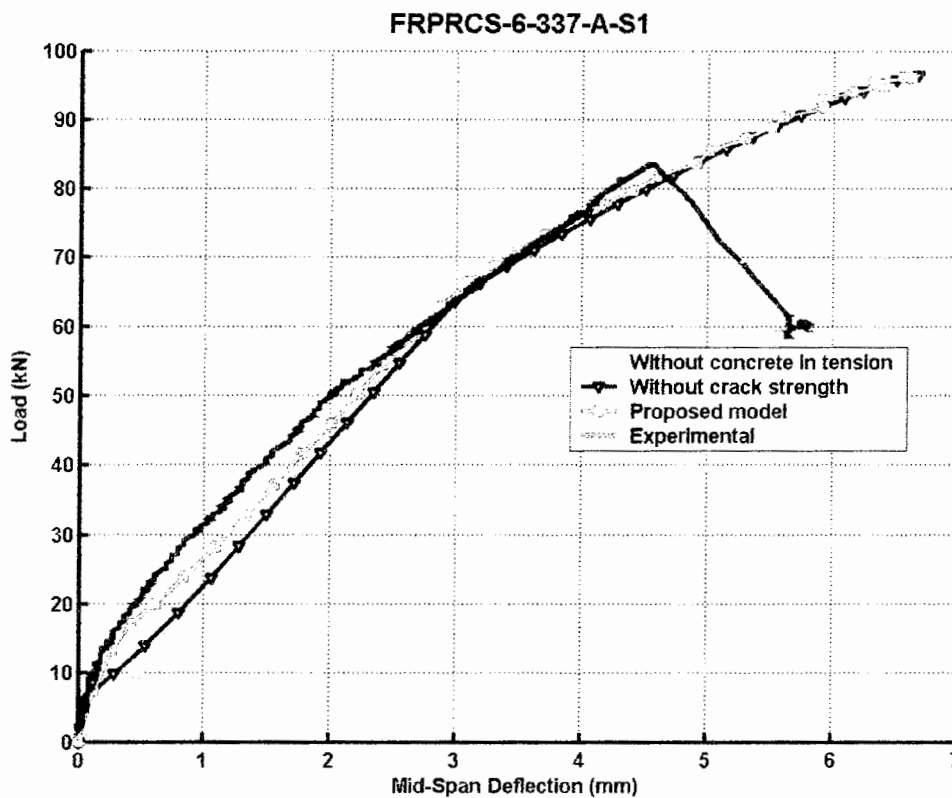
Total Samples								
تعداد نمونه ها = ۸۵	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$							
	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate			
					No Debonding Control		Debonding Control	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
نتایج مدل اصلی	1.03	0.12	1.02	0.10	1.12	0.31	0.96	0.12
بدون مقاومت ترک	1.03	0.12	0.98	0.11	1.12	0.32	0.96	0.12
بدون مقاومت بتن کششی	0.26	0.08	0.97	0.10	1.12	0.32	0.96	0.12

	$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$							
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
	نتایج مدل اصلی	0.89	0.16	0.86	0.15	1.03	0.29	0.83
بدون مقاومت ترک	0.89	0.16	0.92	0.16	1.04	0.30	0.83	0.28
بدون مقاومت بتن کششی	0.78	0.17	0.90	0.15	1.04	0.30	0.84	0.28



شکل ۶-۵۹: بررسی اثر مقاومت ترک و بتن کششی در نتایج مدل برای یک نمونه شاهد



شکل ۶-۶: بررسی اثر مقاومت ترک و بتن کششی در نتایج مدل برای یک نمونه تقویت شده

### ۶-۳-۵: بررسی اثر نوع مدل به کار رفته در محاسبه عرض ترک

همانطور که در فصل پنجم بیان شد، جهت محاسبه عرض ترک علاوه بر روش به کار رفته در مدل پیشنهادی (Proposed model)، یک مدل ساده تر که توسط (Alaee and Karihaloo (2003 ارائه شده است، معرفی گردید. در این قسمت، نتایج بدست آمده از مدل پیشنهادی با مدلی که عرض ترک توسط مدل Alaee and Karihaloo محاسبه می شود (Simplified model)، مقایسه می گردد. در این بخش نیز نتایج در چهار جدول گردآوری می شود.

جدول ۶-۸۰: مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک برای نمونه های شاهد (دسته اول)

Control Samples						
تعداد نمونه ها = ۲۶	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$					
	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
<b>Proposed Model</b>	1.06	0.12	1.00	0.07	0.95	0.09
<b>Simplified Model</b>	1.06	0.12	1.04	0.08	0.95	0.09
	$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$					
<b>Proposed Model</b>	0.88	0.18	0.87	0.15	1.01	0.19
<b>Simplified Model</b>	0.88	0.18	0.88	0.15	0.98	0.18

همانطور که در نتایج جداول ۶-۸۰ الی ۶-۸۳ و همچنین شکل‌های ۶-۶۱ الی ۶-۶۳ و شکل‌های ۶-۶۷ و ۶-۶۸ مشاهده می‌شود، این دو مدل نتایج نسبتاً نزدیکی به یکدیگر ارائه داده‌اند. تنها در مواردی از جمله شکل ۶-۶۷ این دو مدل کمی تفاوت دارند؛ البته این تفاوت در اکثر نمونه‌ها تنها در ناحیه بعد از ترک خوردگی بتن بوده و تا مقدار اندکی بعد از تسلیم شدگی فولاد ادامه دارد. جهت بررسی علت اختلاف این دو مدل لازم است که دیاگرام‌های تغییرات عرض ترک نسبت به نیروی نهایی در تمام مراحل بارگذاری برای دو مدل ارزیابی شده و با نتایج عملی مقایسه شود. در این راستا پنج نمونه که تغییرات آزمایشگاهی عرض ترک آنها موجود بود مورد بررسی قرار گرفته که سه نمونه اول مربوط به آزمایش سوم مطرح شده در بخش ۶-۲ (نمونه های F-N، F-HT و F-HM) و دو نمونه دیگر مربوط به آزمایش اول (SP1 و SP2) می‌باشند.

جدول ۶-۸۱: مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک برای نمونه هایی که مود گسیختگی آنها پارگی FRP و یا خردشدگی بتن فشاری باشد (دسته دوم)

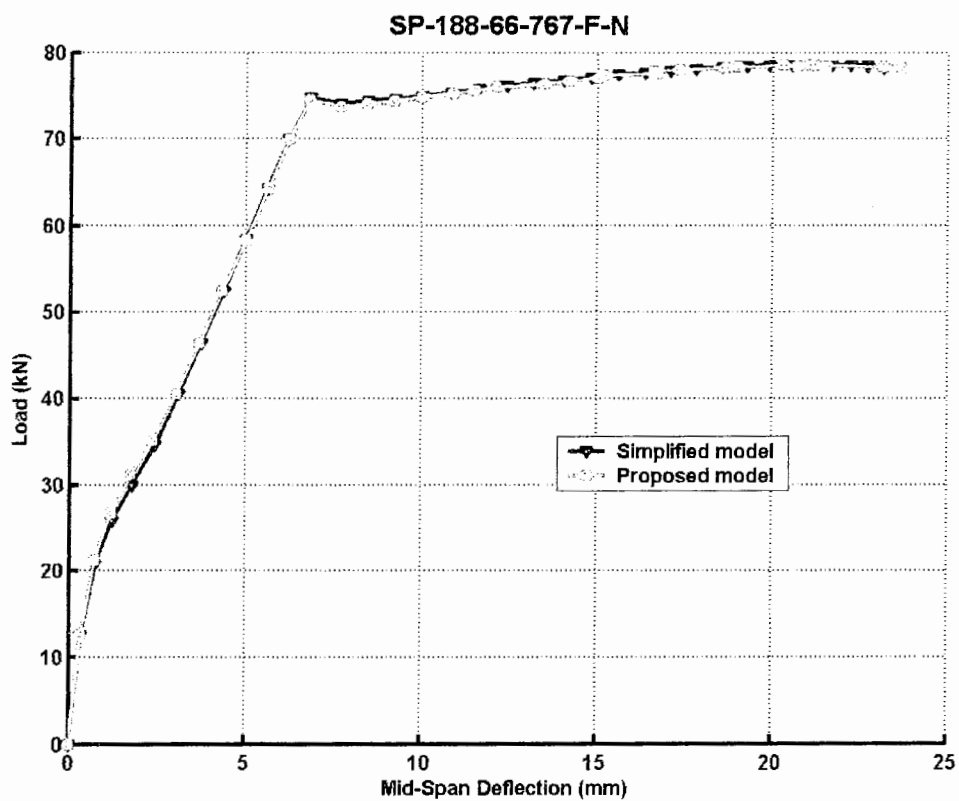
Flexural Failure Samples								
تعداد نمونه ها = ۲۲	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$							
	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate			
					No Debonding Control		Debonding Control	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
Proposed Model	1.01	0.08	0.99	0.08	0.93	0.11	0.93	0.11
Simplified Model	1.01	0.08	0.98	0.08	0.93	0.11	0.93	0.11
$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$								
Proposed Model	0.88	0.17	0.87	0.16	0.96	0.26	0.96	0.26
Simplified Model	0.88	0.17	0.88	0.15	0.96	0.28	0.96	0.28

جدول ۶-۸۲: مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک برای نمونه هایی که مود گسیختگی آنها جداشدگی در انتهای FRP و یا جداشدن پوشش بتنی باشد (دسته سوم)

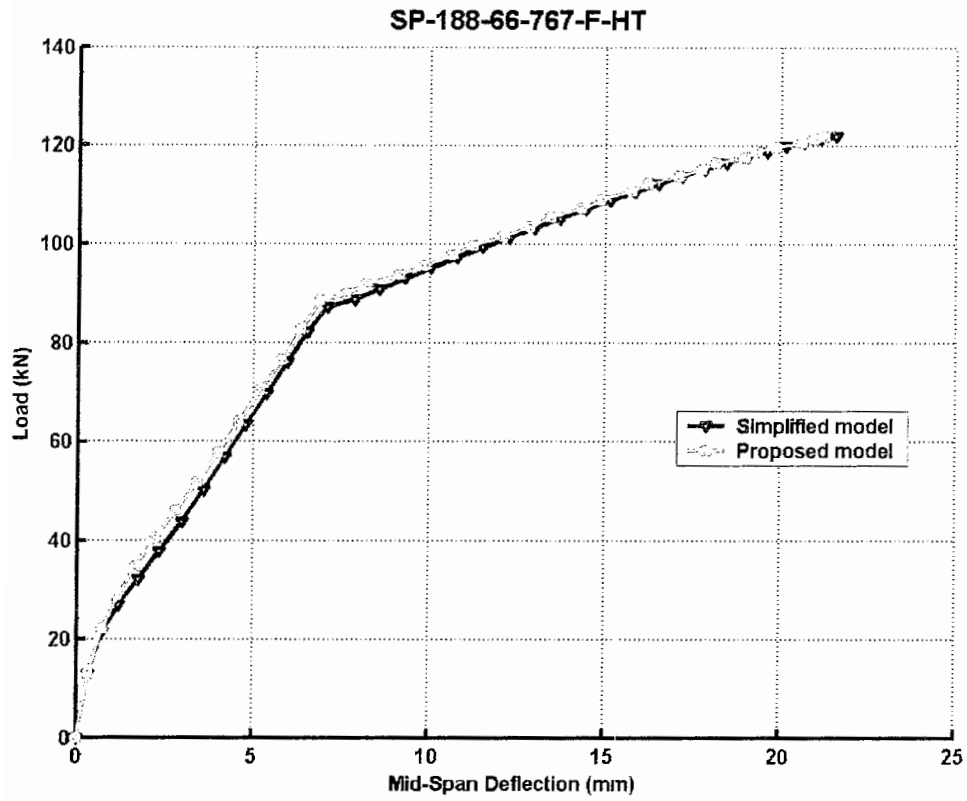
Debonded Samples								
تعداد نمونه ها = ۳۷	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$							
	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate			
					No Debonding Control		Debonding Control	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
Proposed Model	1.03	0.13	1.05	0.12	1.35	0.34	0.98	0.12
Simplified Model	1.03	0.13	1.06	0.13	1.36	0.35	0.98	0.12
$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$								
Proposed Model	0.90	0.16	0.86	0.14	1.10	0.37	0.71	0.23
Simplified Model	0.90	0.16	0.87	0.15	1.11	0.39	0.71	0.23

جدول ۶-۸۳: مقایسه نتایج نتایج مدل پیشنهادی با مدل ساده شده در محاسبه عرض ترک برای کلیه نمونه ها

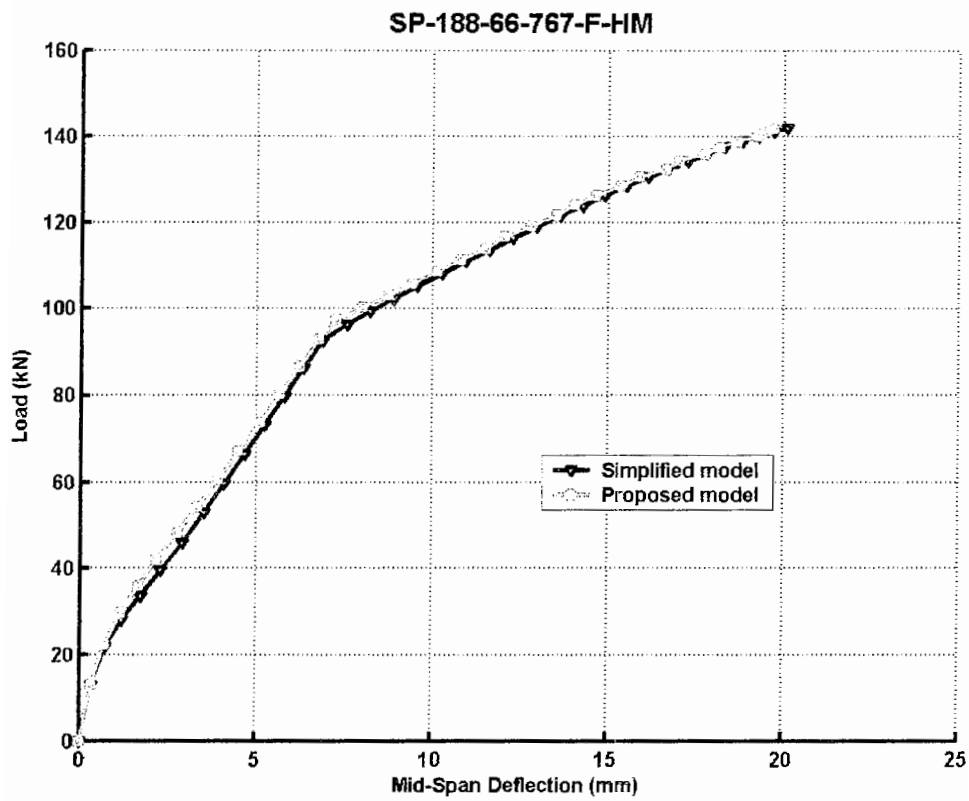
Total Samples								
تعداد نمونه ها = ۸۵	$\frac{F_{Pred.}}{F_{Exp.}}$							
	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate			
					No Debonding Control		Debonding Control	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
Proposed Model	1.03	0.12	1.02	0.10	1.12	0.31	0.96	0.12
Simplified Model	1.03	0.12	1.03	0.10	1.13	0.32	0.96	0.12
$\frac{\delta_{Pred.}}{\delta_{Exp.}}$								
Proposed Model	0.89	0.16	0.86	0.15	1.03	0.29	0.83	0.27
Simplified Model	0.89	0.16	0.88	0.15	1.02	0.29	0.82	0.28



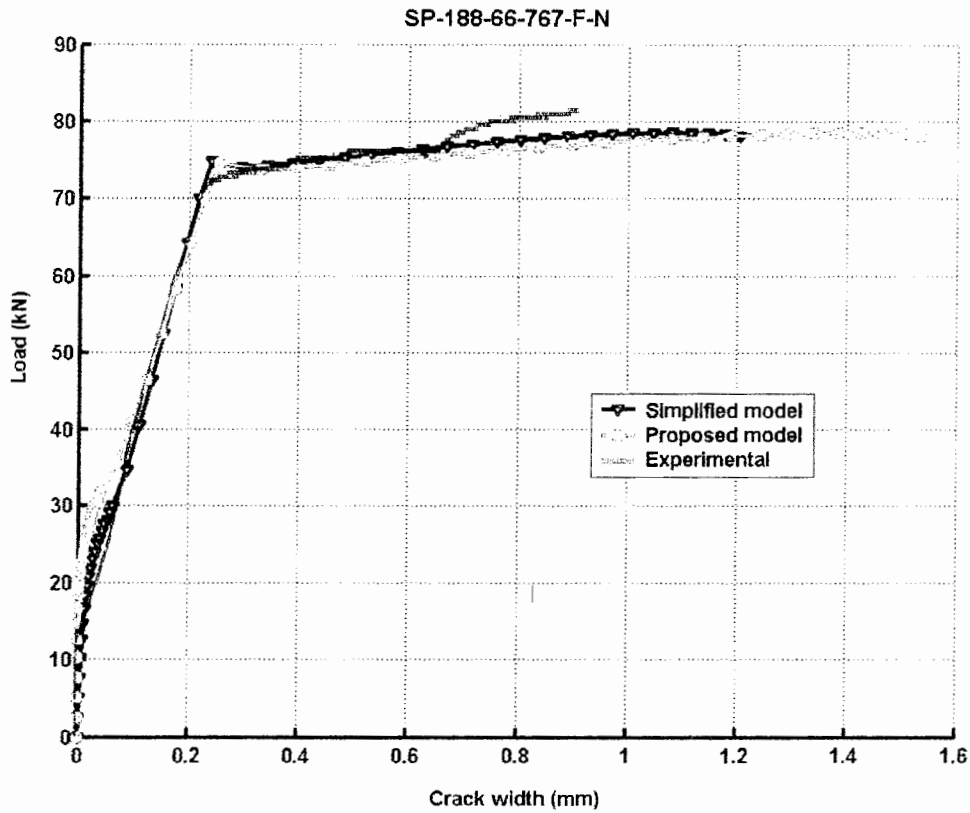
شکل ۶-۶۱: بررسی اثر نوع مدل در محاسبه عرض ترک برای یک نمونه شاهد



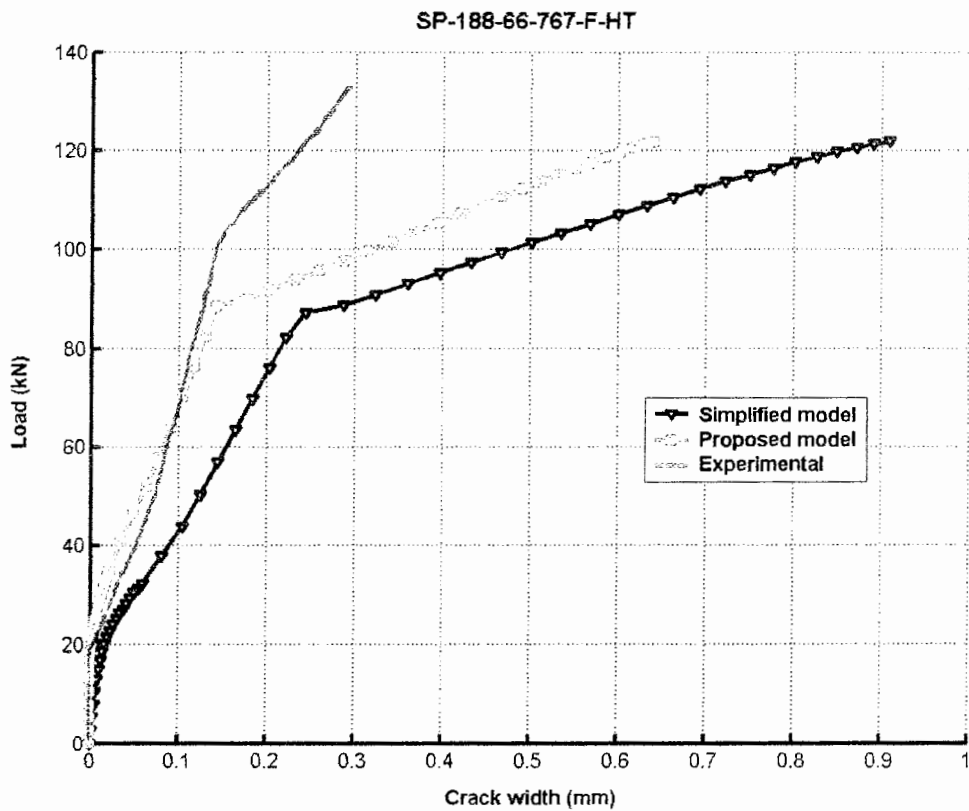
شکل ۶-۶۲: بررسی اثر نوع مدل در محاسبه عرض ترک برای یک نمونه تقویت شده



شکل ۶-۶۳: بررسی اثر نوع مدل در محاسبه عرض ترک برای یک نمونه تقویت شده

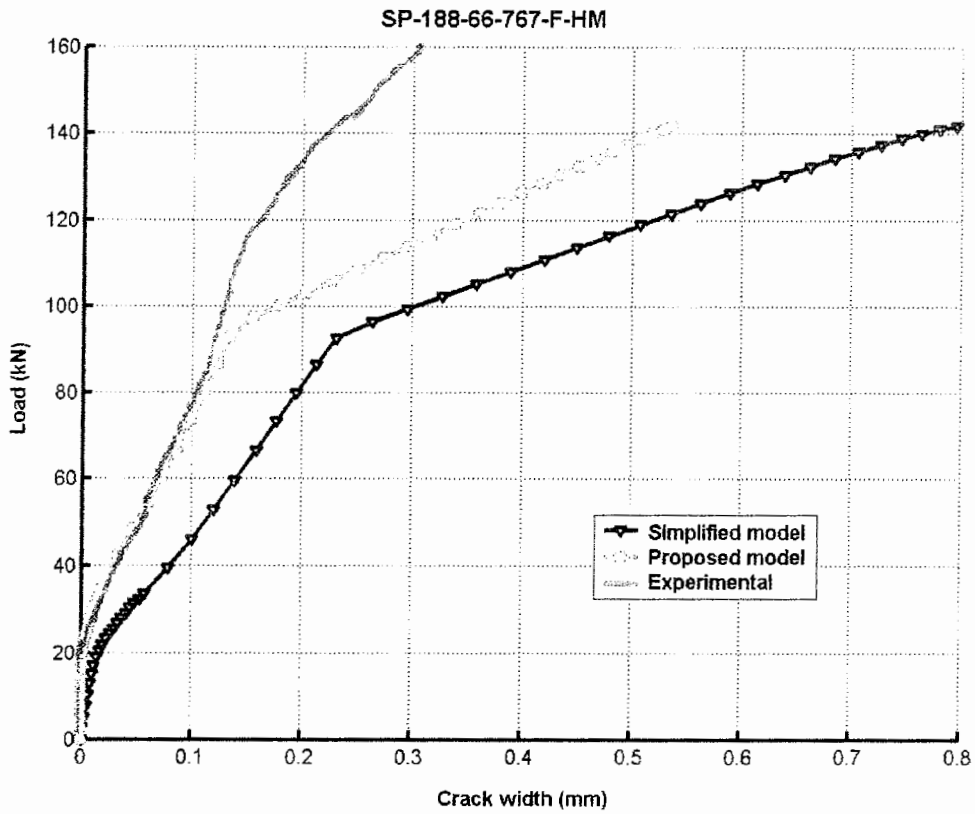


شکل ۶-۶: دیاگرام نیرو - عرض ترک بدست آمده از مدلها برای نمونه F-N و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

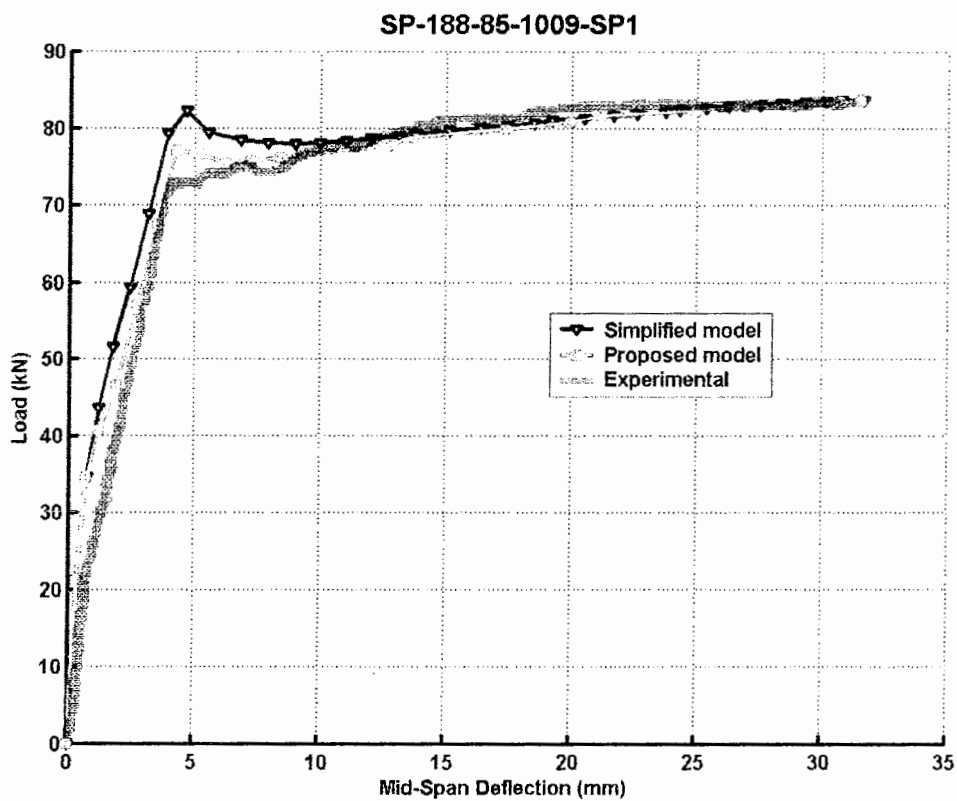


شکل ۶-۶: دیاگرام نیرو - عرض ترک بدست آمده از مدلها برای نمونه F-HT و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

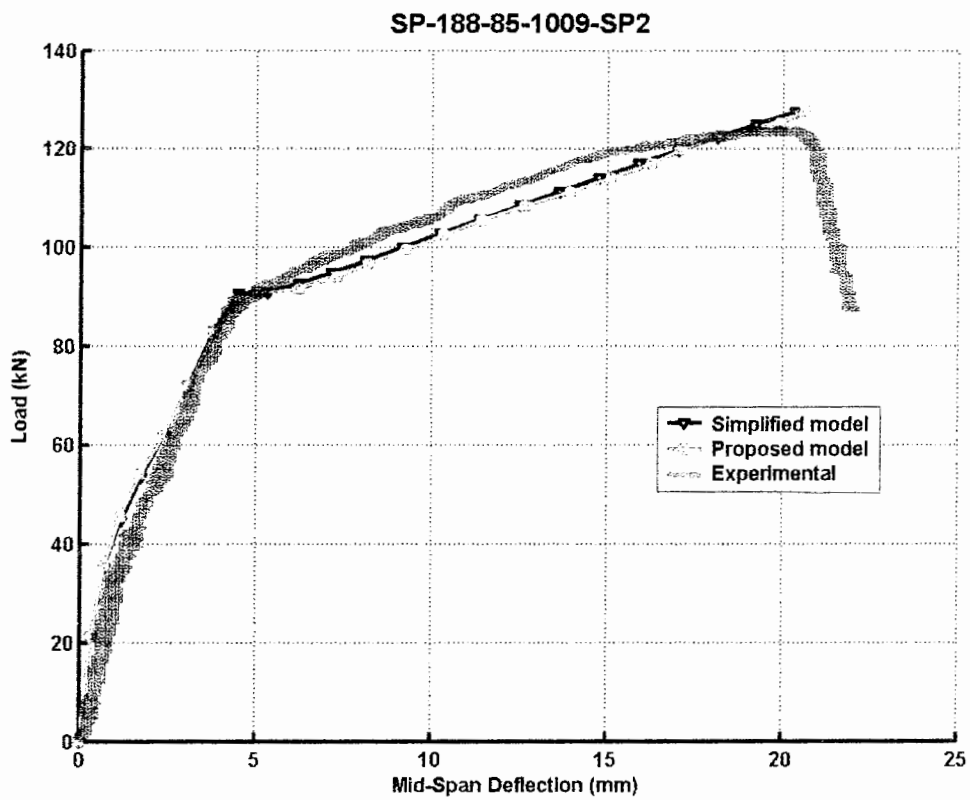




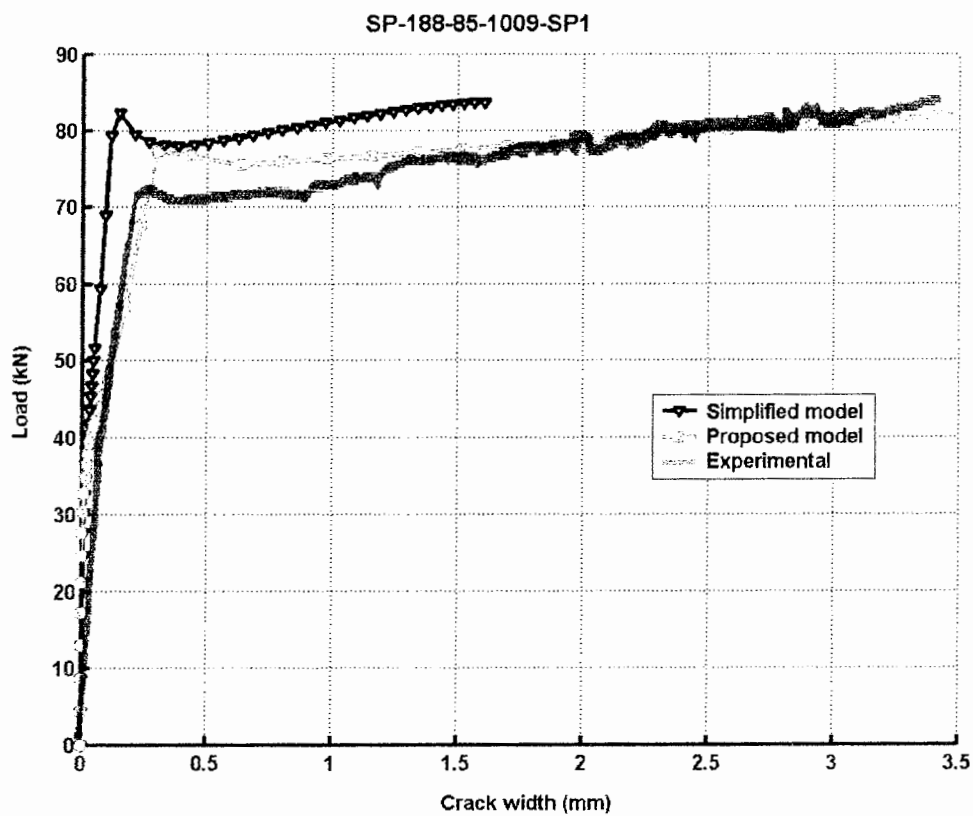
شکل ۶-۶۶: دیاگرام نیرو - عرض ترک بدست آمده از مدلها برای نمونه F-HM و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی



شکل ۶-۶۷: بررسی اثر نوع مدل در محاسبه عرض ترک برای یک نمونه شاهد و مقایسه مدلها با نتایج آزمایشگاهی

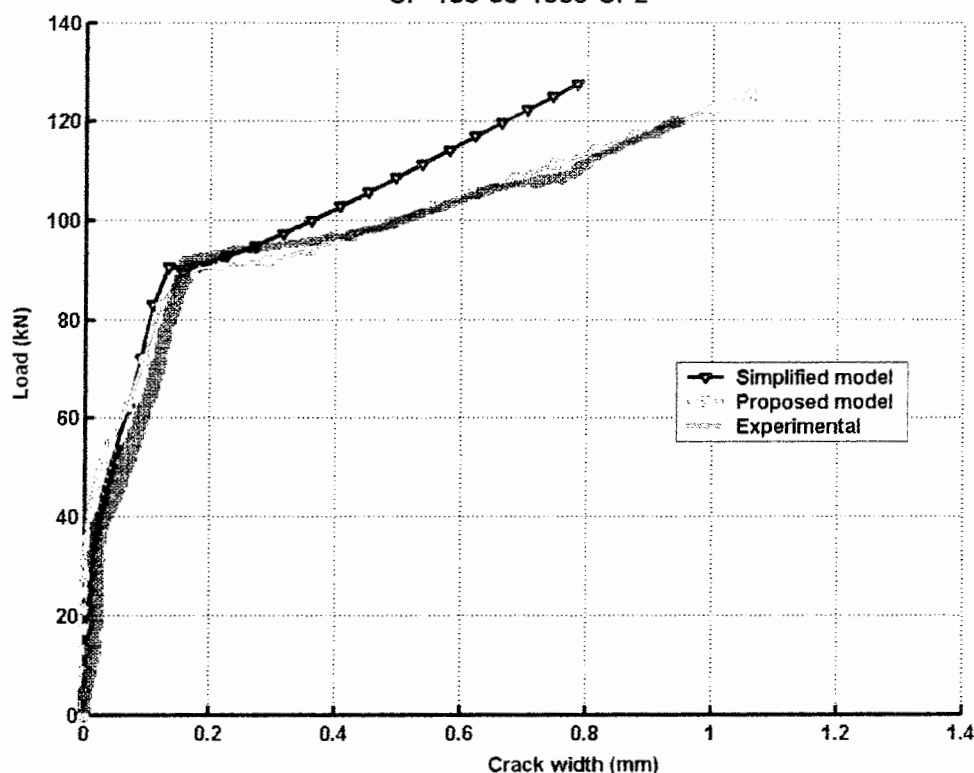


شکل ۶-۶۸: بررسی اثر نوع مدل در محاسبه عرض ترک برای یک نمونه تقویت شده و مقایسه آنها با نتایج تجربی



شکل ۶-۶۹: دیاگرام نیرو - عرض ترک بدست آمده از مدلها برای نمونه SP1 و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

SP-188-85-1009-SP2



شکل ۶-۷۰: دیاگرام نیرو - عرض ترک بدست آمده از مدلها برای نمونه SP2 و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

با دقت در دیاگرام تغییرات عرض ترک برای این پنج نمونه و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی ، می توان گفت که روش استفاده شده در مدل پیشنهادی (مدل *fib*) نتایج بسیار نزدیکی به نتایج عملی ارائه داده است . این در حالی است که نتایج مدل ساده شده نیز نسبتاً نزدیک به نتایج آزمایشگاهی است . با دقت در نمونه های سری اول مشاهده می گردد که در نمونه شاهد این سری ، روند تغییرات عرض ترک برای دو مدل دقیقاً مشابه یکدیگر بوده و هر دو تا حدودی همانند نتایج عملی رفتار می کنند . در نمونه های تقویت شده ، مدل ساده شده از نتایج آزمایشگاهی فاصله گرفته در حالی که نتایج مدل اصلی تطابق نسبتاً خوبی در ناحیه اول دیاگرام ، با نتایج تجربی دارد . در مقایسه عرض ترک در دو مدل می توان دید که چگونه کمتر شدن عرض ترک در مدل اصلی باعث بیشتر شدن نیرو برای این مدل نسبت به مدل ساده شده در شکل های ۶-۶۲ و ۶-۶۳ می گردد . علت آن نیز روشن است ؛ چراکه هرچه عرض ترک کمتر باشد با توجه به دیاگرام ارائه شده در شکل ۵-۳ مقاومت

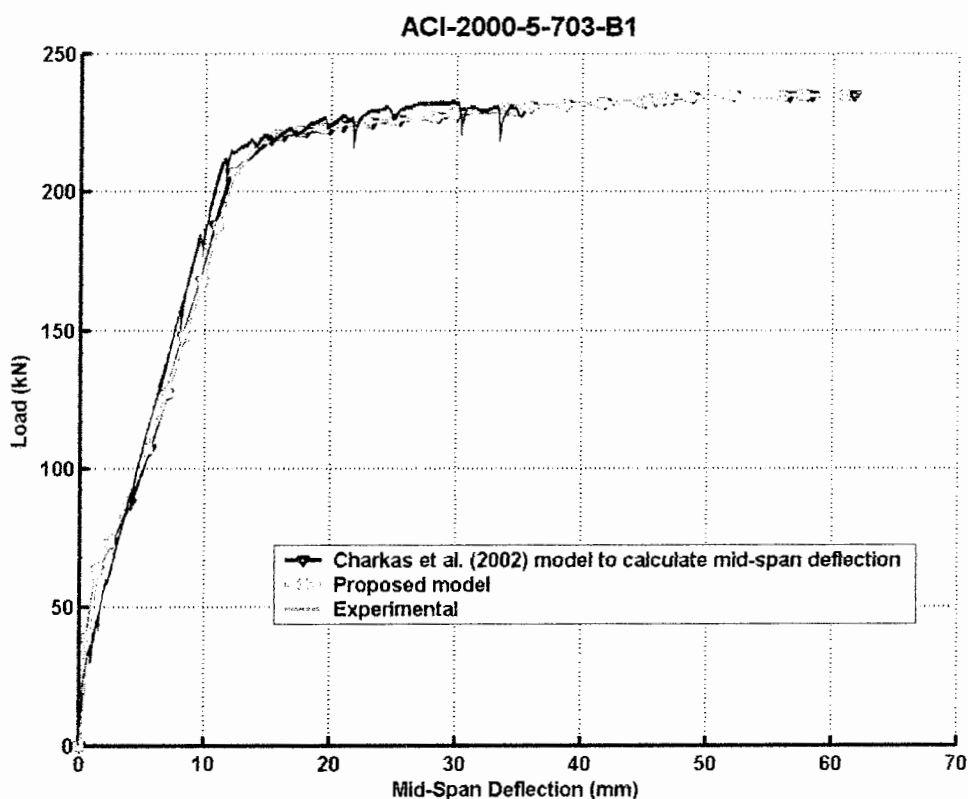
ترک بیشتر شده و در نتیجه مقاومت کل مقطع افزایش خواهد یافت. البته چون سهم ترک در مقاومت خمشی اندک می باشد این اختلاف در عرض ترک همانطور که در شکل‌های این مبحث دیده می شود، تأثیر چندانی بر رفتار نیرو - تغییرمکان وسط دهانه تیر نخواهد گذاشت.

در نمونه های سری دوم، برعکس سری اول، بازشدگی عرض ترک برای مدل پیشنهادی در نیروهای یکسان نسبت به مدل ساده شده، بیشتر بوده و در نتیجه دیاگرام نیرو - تغییرمکان در مدل (Alaee and Karihaloo (2003 بالای مدل اول قرار خواهد گرفت. البته لازم به ذکر است که نتایج مدل اصلی با توجه به شکل‌های ۶-۶۹ و ۶-۷۰، بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی می باشد. لذا همانطور که ملاحظه می گردد، مدل استفاده شده در تحلیل رفتار خمشی تیر، مدل نسبتاً مناسبی می باشد. در این جا نکته ای که حائز اهمیت است، آنستکه اختلاف عرض ترک محاسبه شده در مدل هنگامی تأثیر بیشتری در اختلاف رفتار دو روش خواهد گذارد که این اختلاف در عرض‌های کم ترک وجود داشته باشد که در شکل‌های ۶-۶۹ و ۶-۷۰ برای نمونه شاهد مشاهده می شود. اما در صورتی که اختلاف عرض ترک در ابتدا اندک باشد، دیاگرام‌های دو مدل تفاوت چندانی با یکدیگر نخواهند کرد، چراکه با بازشدگی ترک بیشتر از یک حد خاص، مقاومت ترک صفر می گردد.

با توجه به این بررسیها می توان در مجموع گفت که مدل (Alaee and Karihaloo (2003 عملکرد بسیار مناسبی داشته و مدل ارائه شده توسط (Alaee and Karihaloo (2003 در عین سادگی، نتایج نسبتاً خوبی ارائه کرده است که البته خطای آن اندک می باشد و تأثیر چندانی در نتایج نخواهد گذاشت. لذا می توان از این مدل که از پیچیدگی کمتری برخوردار است، برای افزایش سرعت عملیات بهره برد.

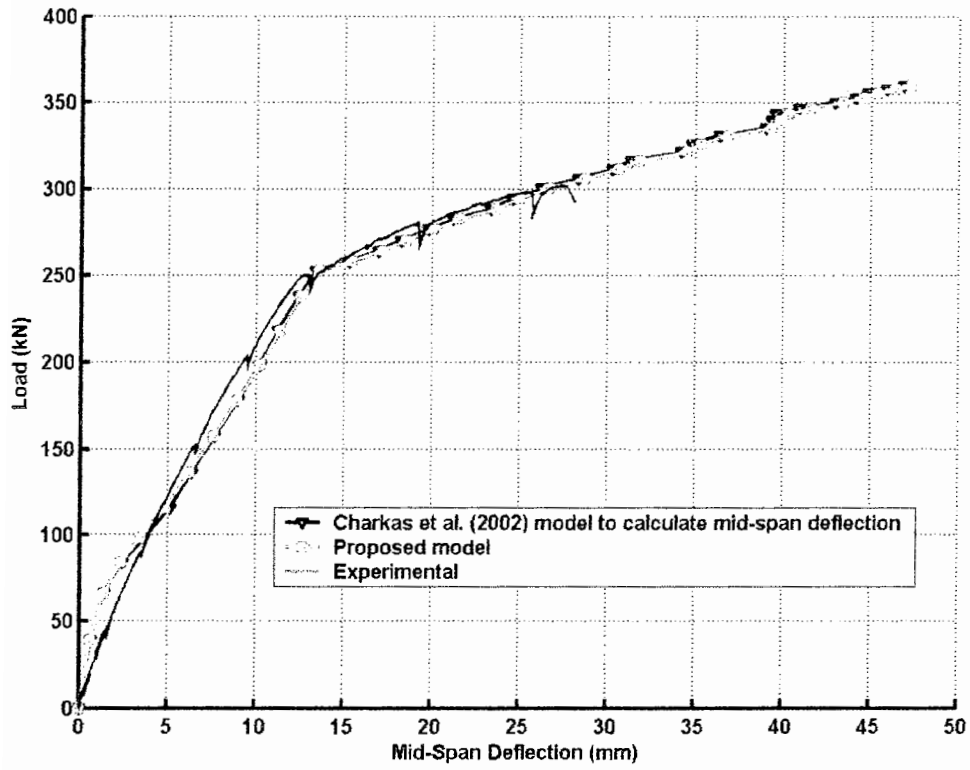
### ۶-۳-۶: بررسی و مقایسه دو مدل معرفی شده برای محاسبه تغییرمکان تیر در وسط دهانه

در این قسمت با توجه به دو مدل معرفی شده برای محاسبه تغییرمکان در وسط دهانه در فصل پنج، مقایسه ای بین آنها صورت می گیرد. روش استفاده شده در مدل اصلی برمبنای قضیه دوم لنگر سطح تیر از تکیه گاه تا وسط دهانه می باشد که قبلاً معرفی گردید. اما روش دوم که توسط Charkas et.al (2002) ارائه شده است نیز با توجه به شکل‌های ۶-۷۱ و ۶-۷۲ بسیار نزدیک به مدل اصلی می باشد. این شباهت و نزدیکی نتایج در سایر نمونه های دیگر نیز مشاهده شده و لذا می توانیم از این مدل به عنوان یک مدل ساده تر به جای روش به کار رفته در مدل اصلی استفاده نمائیم.



شکل ۶-۷۱: مقایسه دو روش استفاده شده برای محاسبه تغییرمکان وسط دهانه تیر برای یک نمونه شاهد

ACI-2000-5-703-B2



شکل ۶-۷۲: مقایسه دو روش استفاده شده برای محاسبه تغییرمکان تیر برای یک نمونه تقویت شده

## فصل هفتم : مقایسه نتایج مدل با نتایج آیین نامه ها

### ۷-۱ : مقدمه

همانطور که در فصل سوم بیان شد ، جهت استفاده از صفحات FRP در تقویت خمشی ، وجود راهنماهای طراحی الزامی است تا عملکرد مناسبی از این مواد صورت گیرد . در سراسر جهان و حدوداً در پنج سال اخیر راهنماها و آیین نامه های زیادی در سراسر جهان توسط مؤسسات مختلف منتشر شده است . برای مقایسه مدل ارائه شده با نتایج آیین نامه ها در این پایان نامه نیز با توجه به منابع در دسترس ، چهار آیین نامه در فصل سوم معرفی شده و تاحدودی نحوه عملکرد و روابط آنها در محاسبه ظرفیت خمشی تیر بتن آرمه ارائه گردید که عبارت بودند از ACI 440.2R-02 ، *fib* (2001) Bulletin 14 ، UK Technical Report No.55 (2000) و ISIS Canada (2001) . در این بخش ۳۹ نمونه آزمایش شده مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آزمایشگاهی آنها با نتایج آیین نامه ها و نتایج مدل مقایسه می گردد . همانطور که ملاحظه خواهد شد ، پارامتری که بین نتایج مقایسه می شود ، ممان نهایی مقطع تیر بتن آرمه است ؛ چراکه در آیین نامه ها تنها این پارامتر محاسبه شده و در طراحی ها مورد استفاده قرار می گیرد . این در حالی است که در مدل ارائه شده رفتار تیر از شروع بارگذاری تا لحظه نهایی بررسی شده و همچنین مقدار تغییرمکان وسط دهانه تیر و به عبارتی رفتار

نیرو - تغییرمکان آن قابل دستیابی است که در تحلیل رفتار تیر بسیار مفید بوده و یکی مزایای اصلی مدل می باشد .

## ۷-۲: مقایسه نتایج مدل با نتایج آیین نامه ها

همانطور که در مقدمه اشاره شد ، جهت مقایسه نتایج مدل با نتایج آیین نامه ها ، ممان نهایی مقطع مورد بررسی قرار می گیرد . نتایج براساس نمونه های آزمایشهای نهم ، دوازدهم ، سیزدهم ، چهاردهم ، پانزدهم ، شانزدهم ، هفدهم و بیستم از فصل ۶-۲ می باشد . این نمونه های بررسی شده شامل ۱۰ نمونه شاهد و ۲۹ نمونه تقویت شده هستند . با کمک نرم افزارهای نوشته شده در جهت محاسبه ممان نهایی تیر طبق دستور هر یک از آیین نامه ها ، و همچنین نتایج بدست آمده از مدل ، جداول ۷-۱ الی ۷-۸ تنظیم شده است . در این جداول مقدار ممان نهایی و همچنین نوع مود گسیختگی حاکم برای هر یک از آیین نامه ها و نتایج آزمایشگاهی و مدل آورده شده است . از این نتایج در جهت مقایسه آیین نامه ها و مدل استفاده خواهد شد .

جدول ۷-۱: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی حاکم برای نمونه های سری اول (آزمایش نهم)

نمونه ها	$M_{ur}$ (kN.m)						Failure Mode					
	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS
Beam-A	10.71	8.6	7.2	6.74	6.7	6.4	C	C	C	C	C	C
Beam-B	19.11	13.49	8.07	7.6	10.92	10.14	R	R	R	R	R	R

جدول ۷-۲: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه های سری دوم (آزمایش دوازدهم)

نمونه ها	$M_{ur}$ (kN.m)						Failure Mode					
	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS
F0	74.55	55.99	45.53	43	43.13	41.45	C	C	C	C	C	C
F1	79.45	80.77	62.17	53.17	55.96	54.9	C	C	C	D	D	C
F2	85.4	104.33	75.33	58.66	62.97	66.69	C	C	C	D	D	C
F3	94.5	103.25	83	62.05	66.79	72.9	D	D	C	D	D	C
F4	88.9	80.61	65.74	55.4	59.6	60.91	R	R	R	D	D	C
F5	97.3	109.02	79.73	60.45	66	72.45	D	C	C	D	D	C
F6	108.85	111.78	88.9	64.18	70.54	80.47	D	D	C	D	D	C



جدول ۳-۷: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه های سری سوم (آزمایش سیزدهم)

نمونه ها	$M_{ur}$ (kN.m)						Failure Mode					
	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS
A-AT	45.78	44.34	35.39	29.53	32.8	32.54	C	C	C	D	D	C
A-AK	44.415	44.86	36.25	29.7	33.21	33.37	C	D	C	D	D	C
A-C1	42	40.05	37.2	30	33.66	34.8	D	D	C	D	D	C
B-AT	86.415	90.59	79.18	58.53	62.87	79.63	D	D	D	D	D	C
B-AK	84.05	82.78	81.81	58.94	63.85	82.73	D	D	R	D	D	C
B-C1	82.37	72.66	84.22	59.64	64.88	85.48	D	D	R	D	D	R
B-C2	68.25	61.19	59.2	54.07	63.78	61.26	D	D	R	R	R	R

جدول ۴-۷: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه های سری چهارم (آزمایش چهاردهم)

نمونه ها	$M_{ur}$ (kN.m)						Failure Mode					
	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS
A-C	11.58	7.2	8.18	7.7	7.7	7.4	C	C	C	C	C	C
A-S1	15.7	8.07	13.84	11.8	12.44	12.3	D	R	C	D	D	C
B-C	12.02	8.07	8.16	7.66	7.65	7.37	C	R	C	C	C	C
B-S1	14.05	8.07	14.9	11.87	12.7	13.9	D	R	C	D	D	C
B-SF	15.21	8.07	14.5	15.7	15.71	13.51	D	R	C	C	C	C

C: خرد شدگی بتن فشاری (Concrete Crushing)

D: جداشدگی FRP (FRP Debonding)

R: پارگی FRP (FRP Rupture)

جدول ۵-۷: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه های سری پنجم (آزمایش پانزدهم)

نمونه ها	$M_{ur}$ (kN.m)						Failure Mode					
	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS
Control	64.32	56.81	48.1	45.8	45.75	44.34	C	C	C	C	C	C
A3	67.04	68.92	60.3	52.45	53.5	59	D	D	D	D	D	R
B1	70.61	77.33	66.15	55.43	57.36	64.56	D	R	R	D	D	R
B2	75.56	71.17	61.54	54.3	60.77	57.93	R	R	R	R	R	R
B3	70.61	70.15	61.05	53.9	60.31	57.46	R	R	R	R	R	R

جدول ۶-۷: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه های سری ششم (آزمایش شانزدهم)

نمونه ها	$M_{ur}$ (kN.m)						Failure Mode					
	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS
R2C	23.1	24.25	19.77	18.84	18.89	18.28	C	C	C	C	C	C
R2O	31.5	26.97	22.05	20.25	20.35	20.81	R	R	R	D	D	R
R3C	34.8	35.13	28.72	27.38	27.42	26.4	C	C	C	C	C	C
R3O	46	38.19	30.83	28.79	28.65	28.6	R	R	R	D	D	R

جدول ۷-۷: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه های سری هفتم (آزمایش هفدهم)

نمونه ها	$M_{ur}$ (kN.m)						Failure Mode					
	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS
Control	40.15	36.16	30.57	28.84	29	27.88	C	C	C	C	C	C
C-1	42.75	36.48	31.55	29.5	29.74	29	R	R	R	R	R	R
C-2	55.62	54.54	64.66	46.44	51.43	60.3	D	D	C	D	D	C

جدول ۸-۷: نتایج مقاومت نهایی و مود گسیختگی برای نمونه های سری هشتم (آزمایش بیستم)

نمونه ها	$M_{ur}$ (kN.m)						Failure Mode					
	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS	Exp.	Model	ACI	BS	FIB	ISIS
A1	25.55	26.25	22.19	20.77	20.74	19.97	C	C	C	C	C	C
A4	38.5	32.60	45.7	33.58	35.13	43.46	D	D	C	D	D	C
A5	31.5	32.18	36.9	38.9	36.14	52.23	D	D	D	D	D	C
B1	55	58.32	43.53	40.94	40.87	39.51	C	C	C	C	C	C
B2	94.6	95.86	78.92	63.8	77.75	77.44	R	R	R	R	D	R
B3	123.75	119.43	148.5	87.65	103.9	149.3	D	D	R	D	D	R

C: خرد شدگی بتن فشاری (Concrete Crushing)

D: جداشدگی FRP (FRP Debonding)

R: پارگی FRP (FRP Rupture)

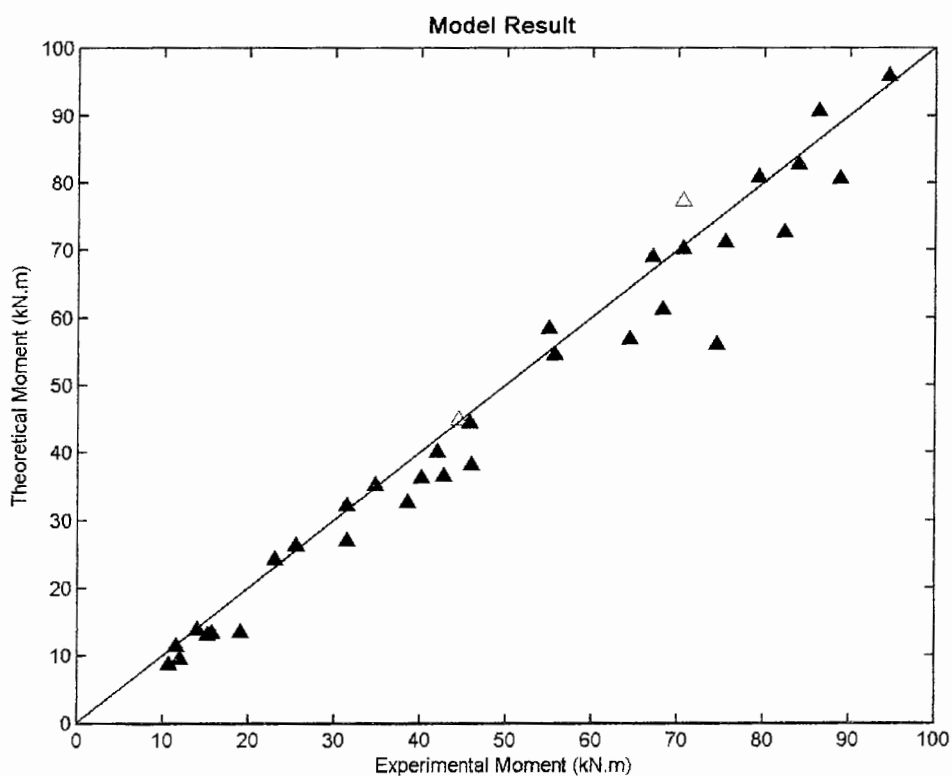
همانطور که در نتایج این جداول مشاهده می شود، نتایج مدل به نتایج آزمایشگاهی نسبت به نتایج آیین نامه ها در اغلب موارد نزدیکتر می باشد. جهت بررسی بهتر و دقیقتر میانگین نسبت ممان نهایی بدست آمده توسط آیین نامه ها و مدل به ممان نهایی بدست آمده از نتایج آزمایش، در جدول ۹-۷ آورده شده است. همچنین درصد تطابق مود گسیختگی حاکم نیز برای هر یک از آیین نامه ها و مدل برای مجموع نمونه های تقویت شده محاسبه گردیده و در جدول ۹-۷ ارائه شده است. برای محاسبه این درصد، تعداد نمونه هایی که مود گسیختگی بدست آمده برای آنها در هر مدل با مود گسیختگی بدست آمده از آزمایش تطابق داشت بر تعداد کل نمونه ها تقسیم شده و در عدد 100 ضرب می گردد.

جدول ۷-۹: مقایسه نتایج مدل و آیین نامه ها

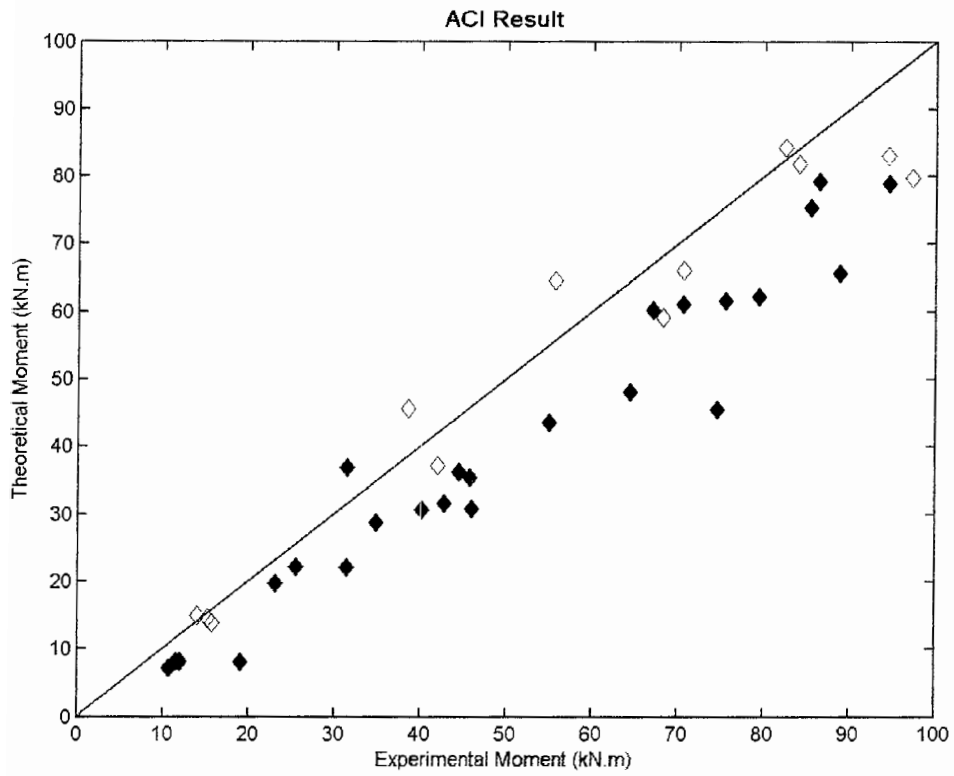
	$\frac{M_{ur,theoretical}}{M_{ur,Exp.}}$		درصد تطابق مود گسیختگی حاکم در نمونه های تقویت شده
	میانگین	انحراف معیار	
<b>Model</b>	0.95	0.11	89.66
<b>ACI</b>	0.85	0.16	51.72
<b>UK. TR. (BS)</b>	0.72	0.13	68.97
<b>FIB</b>	0.77	0.12	65.52
<b>ISIS</b>	0.82	0.21	37.93

همانطور که در جدول ۷-۹ مشاهده می شود، در تمامی پارامترهای مقایسه شده در این جدول، نتایج مدل نسبت به نتایج آیین نامه ها برتری دارد. از لحاظ میانگین نسبت مقاومت‌های نهایی، نتایج مدل برای نمونه های معرفی شده برابر 0.95 می باشد که نسبتاً به نتایج آزمایشگاهی نزدیک است. اما به دنبال مدل، آیین نامه ACI و بعد از آن ISIS نتایج نزدیکتری را نسبت به دو آیین نامه دیگر از خود نشان داده و در واقع دو آیین نامه BS و FIB محافظه کاری بیشتری از خود نشان داده اند. از لحاظ تغییرات محدوده داده ها و انحراف معیار، مدل ارائه شده کمترین مقدار را داشته که دوباره برتری آن نسبت به آیین نامه ها در محاسبه مقاومت خمشی تیر تأیید شده است. اما در مورد مود گسیختگی حاکم نیز مدل نتایج بسیار بهتری نسبت به دیگر آیین نامه ها داشته است، این در حالی است که آیین نامه ISIS در این مورد بسیار نامناسب نتایج خود را ارائه داده است. البته لازم به ذکر است که کاهش زیاد این پارامتر در آیین نامه ISIS ناشی از آن است که در این راهنما، جداسدگی FRP کنترل نشده و فرض می گردد که اتصال بین FRP و بتن همواره به صورت کامل برقرار می باشد؛ اما در دیگر آیین نامه ها خصوصاً BS و FIB نسبت به این مورد حساسیت بیشتری داشته و لذا نتایج آنها به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر شده است، چراکه معمولاً از لحاظ عملی، تیرهای تقویت شده با FRP به صورت خمشی، بر اثر جداسدگی FRP گسیخته می شوند. برای مقایسه بهتر نتایج مدل با نتایج آیین نامه ها، شکل‌های ۷-۱ الی ۷-۵ به صورت زیر رسم شده است. در این شکل‌ها هر

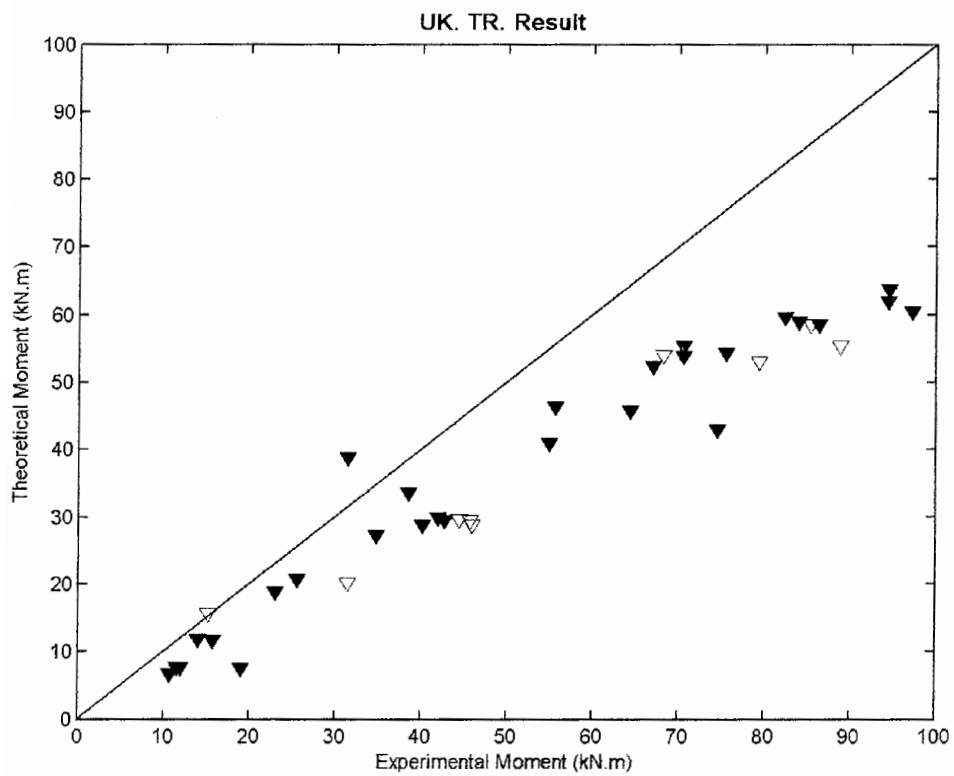
یک از نقاط نشاندهنده یک نمونه بوده و در صورتی که پایین تر از خط رسم شده باشد ، نشانگر آنستکه مقدار محاسبه شده ممان نهایی توسط آیین نامه مربوطه و یا مدل ، کمتر از نتایج آزمایشگاهی است . همچنین توپر بودن نقاط ، نشاندهنده تطابق مود گسیختگی حاکم آن نمونه که از آیین نامه مربوطه و یا مدل بدست آمده است با مود گسیختگی بدست آمده از آزمایش می باشد در غیراینصورت و توخالی بودن آن بیانگر عدم تصابق مود گسیختگی حاکم می باشد . همانطور که در شکل ۱-۷ مشاهده می شود ، نتایج مدل بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی می باشد . در آیین نامه ها ، نتایج بیشتر زیر خط بوده و با افزایش ممان نهایی ، فاصله بیشتری از نتایج آزمایشگاهی می گیرند اما در مدل تقریبا در تمامی محدوده تغییرات ممان نشان داده شده در شکل ، نتایج بدست آمده به نتایج مدل نزدیک است .



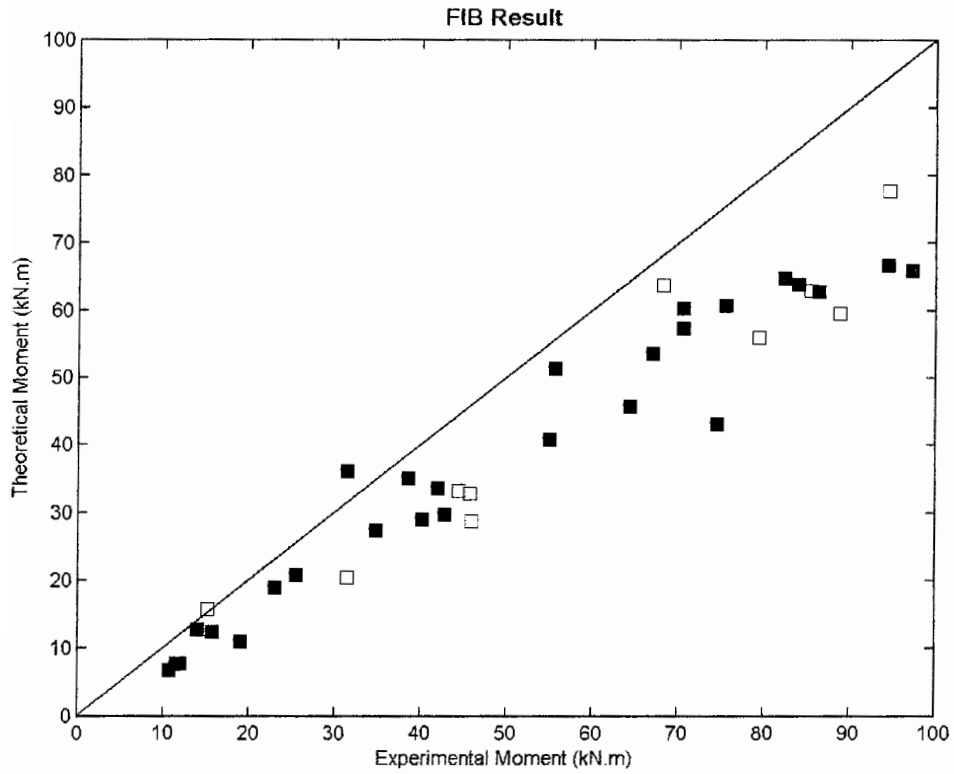
شکل ۱-۷ : نتایج مدل برای کلیه نمونه ها



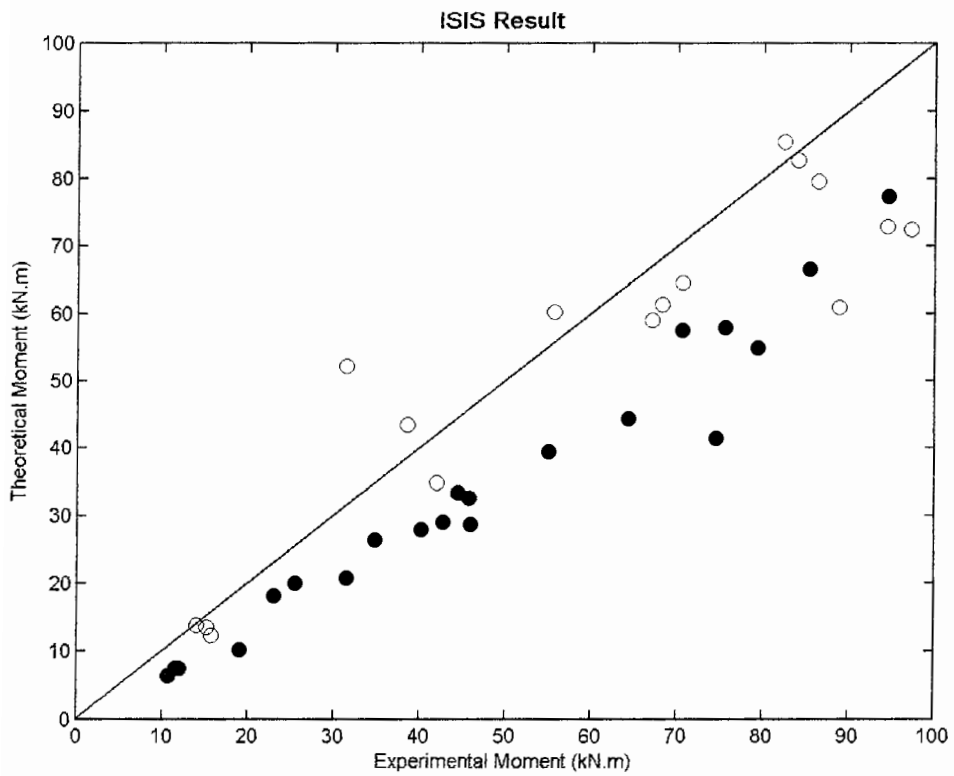
شکل ۳-۷ : نتایج آیین نامه ACI 440 2R.02 برای کلیه نمونه ها



شکل ۳-۷ : نتایج آیین نامه UK Technical Report No.55 (BS) برای کلیه نمونه ها



شکل ۴-۷: نتایج آیین نامه (2001) *fib* Bulletin 14 برای کلیه نمونه ها



شکل ۵-۷: نتایج آیین نامه (2001) ISIS Canada برای کلیه نمونه ها

## فصل هشتم : جمعبندی ، نتیجه گیری و پیشنهادات

در این فصل با توجه به مطالب ارائه شده در پایان نامه می توان یک جمعبندی و نتیجه گیری کلی نمود . همانطور که ملاحظه شد ، برای تحلیل و بررسی تیرهای بتن آرمه تقویت شده با FRP ، مدل‌های تئوری کمی ارائه شده و در این مدلها نیز فرضیات ساده کننده ای استفاده شده است . در مدل اصلی معرفی شده در پایان نامه ، این خلاء برطرف گردیده و یک مدل جامع با فرضیاتی نسبتا دقیق ارائه گردیده است . در مدل مربوطه ، با فرض رفتار نسبتا حقیقی بتن فشاری و همچنین دخالت دادن مقاومت ترک و بتن کششی در مقاومت نهایی مقطع و بعلاوه لحاظ کردن اثر سخت شدگی برای آرماتورهای فولادی ، نتایج بسیار خوبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ، بدست آمد . با وارد کردن مدل‌های کنترل جداشدگی ، این مدل به نتایج مطلوبی در نمونه هایی که مود گسیختگی حاکم آنها جداشدگی می باشد ، دست یافته و در واقع تبدیل به مدلی کامل در تحلیل رفتار تیرهای تقویت شده به صورت خمشی با FRP ، گردید . به طور کلی مطالب و نتایج قابل ذکر در این پایان نامه از ابتدا تا انتها را می توانیم در بندهای زیر جمعبندی نمائیم :

◀ مواد FRP یک نوع کامپوزیت بوده که در شکلهای مختلف از جمله صفحه ، میلگرد و ... موجود می باشند . اجزای تشکیل دهنده صفحات FRP ، الیاف و رزین بوده که مقاومت کششی بالایی در راستای الیاف از خود نشان می دهند .

◀ صفحات FRP در جهت مقاومسازی سازه های بتنی به صورت خمشی ، برشی و فشاری استفاده شده و علل اصلی گسترش کاربرد آنها را می توان در بیشتر بودن نسبت مقاومت به وزن آنها در مقایسه با فولاد و همچنین راحتی نصب و مقاومشان در برابر خوردگی نام برد .

◀ همانطور که در ابتدای این فصل بیان شد ، در جهت تحلیل رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه تقویت شده با FRP ، مدل‌هایی ارائه شده است که با فرضیاتی ساده کننده ، رفتار تیر را بررسی نموده اند . اما در این راستا ، فعالیت‌هایی نیز به کمک آنالیز عددی خصوصا توسط نرم افزارهای اجزاء محدود ، صورت گرفته است .

◀ مودهای گسیختگی تیرهای تقویت شده با FRP در خمش ، به دو دسته گسیختگی خمشی و جداشدگی تقسیم بندی می شوند که دسته اول (گسیختگی خمشی) خود به دو شکل خردشدگی بتن فشاری و پارگی FRP مشاهده می گردد . دسته دوم (جداشدگی) در شکل‌های مختلفی دیده شده که رایجترین آنها جداشدگی صفحه FRP در انتهای آن ، جداشدن پوشش بتنی کششی و جداشدگی صفحه FRP در محل ترکهای خمشی و برشی می باشد .

◀ از سه دسته معرفی شده در گسیختگی تیر ناشی از جداشدگی ، دو مورد اول رایجتر بوده و مورد سوم کمتر اتفاق می افتد ؛ لذا مدل‌های بیشتری در رابطه با پیش بینی پدیده جداشدگی در دو مورد اول در سراسر جهان ارائه شده است .

◀ مدل‌های کنترل جداشدگی در انتهای FRP ، بر پایه تحلیل تنشهای بین لایه FRP و بتن بوده و با تئوری شکست مور - کولمب و با فرض اینکه گسیختگی در بتن و در نزدیکی سطح خارجی آن اتفاق می افتد ، روابطی را ارائه نموده اند که در این پایان نامه هشت مدل از آنها معرفی گردید .

◀ مدل‌های کنترل جداشدن پوشش بتنی بر پایه مقاومت کششی بتن بوده ، چراکه جداشدگی از محل آرماتورهای طولی در بتن کششی رخ داده و با امتداد ترکهای به وجود آمده در راستای



آرماتورها ، پوشش بتنی به همراه لایه FRP چسبیده به آن از تیر جدا می گردد . در این رابطه دو مدل معرفی شده است .

◀ با توجه به نتایج آزمایشگاهی نمونه های مختلف ، یک مدل برای کنترل جداشدگی انتهای FRP و یک مدل برای کنترل جداشدن پوشش بتنی که عملکرد و نتایج بهتری را از خود نشان داده اند ، انتخاب شده است که در مورد اول مدل (Malek et al. (1998 و در مورد دوم مدل (Raouf et al. (2000 برگزیده شدند .

◀ مدل اصلی پایان نامه با دو فرض کلی شکل گرفته است که عبارتند از : (۱ صفحات مسطح عمود بر محور تیر بعد از بارگذاری مسطح باقی می ماند (فرضیه برنولی) ؛ (۲ از لغزش بین FRP و بتن صرفنظر می شود .

◀ عملکرد مدل در بررسی و تحلیل رفتار نیرو - تغییر مکان تیر را می توان به صورت زیر خلاصه نمود :

✓ تغییرات کرنش در بالاترین تار فشاری از مقدار 0 تا 0.0035 ؛ که براساس CEB معادل خردشدگی بتن فشاری است .

✓ محاسبه کرنش در دیگر اجزاء براساس کرنش در بالاترین تار فشاری به تغییرات خطی کرنش در ارتفاع مقطع .

✓ با داشتن کرنش در هر ارتفاع از مقطع می توان مقدار تنش در آن ارتفاع را برای هر جزء از تیر که شامل : بتن فشاری ، بتن کششی ، بتن ترک خورده ، آرماتورهای کششی ، آرماتورهای فشاری و FRP است ، محاسبه نمود و نهایتاً ممان مقطع را بدست آورد .

✓ رابطه تنش - کرنش برای آرماتورها به صورت دوخطی با فرض تأثیر سخت شدگی بعد از تسلیم شدن فولاد فرض می گردد ولی برای FRP به صورت خطی تا لحظه گسیختگی در نظر گرفته می شود .

✓ تغییرات تنش - کرنش برای بتن فشاری به صورت سهموی و برای بتن کششی به صورت دوطبقی براساس CEB فرض می گردد. نکته قابل ذکر در مورد بتن ترک خورده آنستکه، در ترک دیگر رابطه تنش - کرنش معنا نداشته چراکه با بازشدگی ترک، کرنشهای بتن آزاد شده و به صورت بازشدگی اثر خود را نشان می دهد. لذا، رابطه تنش - عرض ترک برای محاسبه مقاومت ترک لحاظ شده که این رابطه به صورت دوطبقی از آیین نامه CEB استخراج می گردد.

✓ برای محاسبه میزان بازشدگی ترک، با داشتن مقدار کرنش در بالاترین تار فشاری بتن، از روابط (2001) *fib* و یا (2003) *Alaee and Karihaloo* میزان این بازشدگی در پایین ترین تار فشاری بتن محاسبه شده و با فرض تغییرات خطی مقدار بازشدگی در ارتفاع مقطع، عرض ترک در هر نقطه از ارتفاع، قابل محاسبه است.

✓ برای هر مقدار از کرنش در بالاترین تار فشاری بتن، می توان بعد از محاسبه ممان مقاوم مقطع و عمق تارخنی، انحناء مقطع برای ممان متناظر آن را از تقسیم کرنش در بالاترین تار فشاری بر عمق تار خنثی بدست آورده و نهایتاً دیاگرام ممان - انحناء مقطع را بدست آورد.

✓ با داشتن توزیع ممان در طول تیر و تغییرات انحناء نسبت به ممان می توان توزیع انحناء در طول تیر را بدست آورده و نهایتاً با کمک استفاده از قضیه دوم لنگر - سطح<sup>۱</sup>، تغییر مکان در مقطع مورد نظر را محاسبه نمود.

✓ با داشتن ممان مقطع و نحوه بارگذاری تیر می توان مقدار نیروی وارده به تیر و با داشتن تغییرمکان در هر ممان، نهایتاً دیاگرام نیرو - تغییرمکان تیر قابل محاسبه است که هدف نهایی مدل می باشد.

---

<sup>۱</sup> Moment - Area

- ✓ کلیه مراحل بالا در پایان نامه با توجه به حجم بودن محاسبات آن ، توسط نرم افزاری که تهیه شده است ، انجام می گیرد که به صورت گرافیکی در ابتدا داده ها را گرفته و سپس خروجی آن به صورت دیاگرام نیرو - تغییر مکان تیر می باشد .
- ✓ در مدل ارائه شده فرض می گردد که تیر به اندازه کافی از لحاظ برشی تقویت شده است.

## ۸-۱: نتایج

◀ در نمونه های شاهد که با FRP تقویت نشده اند و همچنین نمونه های تقویت شده ای که مود گسیختگی حاکم در آنها به صورت خردشدگی بتن فشاری و یا پارگی FRP می باشد ، نتایج مدل نسبت به نتایج آزمایشگاهی در هر سه مرحله شروع ترک خوردگی ، لحظه تسلیم شدگی فولاد و حالت نهایی ، بسیار نزدیک می باشد .

◀ در نمونه های تقویت شده ای که مود گسیختگی حاکم آنها یکی از مودهای جداشدگی باشد ، نتایج مدل بدون دخالت مدلهای کنترل کننده جداشدگی در حالت شروع ترک خوردگی و لحظه تسلیم شدگی فولاد ، نزدیک به نتایج آزمایشگاهی بوده اما در حالت نهایی ، مقداری بیشتر از نتایج عملی است . با وارد کردن مدلهای کنترل جداشدگی در دو حالت جداشدن در انتهای FRP و جداشدن پوشش بتنی ، نتایج مدل به نتایج آزمایشگاهی در حالت نهایی نیز بسیار نزدیک می گردد .

◀ به طور کلی برای تمامی نمونه ها ، چه شاهد و چه تقویت شده به صورت خمشی با FRP ، نتایج مدل اصلی با دخالت و کنترل اثر جداشدگی ، نسبت به نتایج آزمایشگاهی تفاوت اندکی داشته و بسیار نزدیک به آنها می باشند .

◀ تأثیر در نظر گرفتن سخت شدگی فولاد در مدل اصلی تنها بعد از تسلیم شدن فولاد دیده می شود و قبل از آن دیاگرامهای نیرو - تغییر مکان در دو حالت کاملاً مشابه یکدیگر است . بعد از تسلیم شدن فولاد ، مدل اصلی به واسطه در نظر گرفتن اثر سخت شدگی برای فولاد ، اندکی رشد بیشتری نسبت به ندلی که این اثر در آن لحاظ نشده ، از خود نشان می دهد . میزان این افزایش در نمونه های شاهد بیشتر بوده و در نمونه های تقویت شده با FRP کمتر می گردد .

◀ تأثیر در نظر گرفتن مقاومت بتن ترک خورده در مقاومت نهایی مقطع تنها در ناحیه ابتدایی دیاگرام نیرو - تغییر مکان و بعد از شروع ترک خوردگی بتن دیده شده و بعد از تسلیم شدگی

فولاد و در حالت نهایی ، تأثیر اندکی خواهد گذارد چراکه بعد از تسلیم شدگی فولاد ، عرض ترک افزایش یافته و از مقداری که ترک قابلیت تحمل کشش را داشته باشد ، بیشتر می گردد .

◀ تأثیر در نظر گرفتن مقاومت بتن کششی همراه با مقاومت ترک نیز در ناحیه ابتدایی دیاگرام نیرو - تغییر مکان بوده و این اختلاف بین مدل اصلی و مدلی که کلاً از مقاومت بتن کششی و ترک صرف نظر کند ، از همان ابتدای دیاگرام شروع شده و بعد از تسلیم شدگی فولاد و حالت نهایی کمتر می گردد ؛ علت آن نیز در افزایش بازشدگی ترک و کمتر شدن مساحت ناحیه بتن کششی می باشد .

◀ در مقایسه بین دو مدلی که عرض ترک را محاسبه می نمایند ، تفاوت زیادی وجود نداشته و نتایج آنها تقریباً نزدیک به هم می باشد ؛ اما در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ، نتایج مدل *fib* نسبت به نتایج مدل (Alaee and Karihaloo (2003) نزدیکتر می باشد . اما پیچیدگی مدل *fib* بیشتر بوده و لذا می توان از مدل (Alaee and Karihaloo (2003) به عنوان یک مدل ساده تر استفاده نمود .

◀ در جهت محاسبه خیز، نتایج مدل اصلی با مدل معرفی شده توسط (Charkas et al. (2002) بسیار نزدیک بوده و لذا در این مورد نیز با توجه به سادگی مدل دوم نسبت به مدل اصلی می توان از این مدل استفاده کرد .

◀ در نهایت می توان گفت با لحاظ کردن تمام موارد بالا در مدل اصلی ، نتایج مدل به نتایج آزمایشگاهی در سه حالت شروع ترک خوردگی ، تسلیم شدگی فولاد و حالت نهایی نزدیکتر شده و عملکرد بهتری از خود ارائه می دهد .

◀ در مقایسه مدل ارائه شده در پایان نامه با نتایج آزمایشگاهی ، با توجه به اینکه آیین نامه ها تنها حالت نهایی را بررسی کرده و مقاومت نهایی مقطع را مورد محاسبه قرار می دهند ، می توان نتایج مدل را از لحاظ مقاومت نهایی با نتایج آیین نامه ها مقایسه نمود . در این رابطه مود

گسیختگی حاکم نیز که توسط مدل و آیین نامه بدست آمده ، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است . نتیجه این بررسیها نشان می دهد که نتایج مدل بسیار نزدیکتر به نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج آیین نامه ها بود ؛ و این در حالی است که آیین نامه ها به واسطه روابط آنها در طراحی ، لزوما به یک ضریب ایمنی در محاسبات خود احتیاج دارند . در این راستا ، آیین نامه ACI و دنبال آن آیین نامه ISIS نزدیکترین نتایج را نسبت به نتایج آزمایشگاهی ارائه کرده در حالیکه آیین نامه (55) UK. T.R. و به دنبال آن *fib* ، محافظه کارانه ترین نتایج را از خود نشان داده اند .

## ۸-۲: پیشنهادات

در ادامه مبحث این پایان نامه و در راستای تکامل علم مواد FRP برای کاربرد آن در مقاوم سازی سازه ها ، پیشنهاداتی به صورت زیر ارائه می گردد :

- ◀ بررسی رفتار تیر در مقاوم سازیهای برشی با صفحات FRP و ارائه یک مدل تئوری دقیق در جهت تحلیل تیر از لحظه شروع بارگذاری تا گسیخته شدن آن در برش . با تهیه چنین مدلی و تلفیق آن با مدل ارائه شده در پایان نامه ، می توان به یک مدل بسیار کامل در جهت تحلیل هر تیر بتن آرمه ای که با صفحات FRP تقویت شده ، دست یافت .
- ◀ تمرکز بر روی مودهای جداشدگی FRP در مقاوم سازی خمشی و پوشش دادن به کلیه مودهای جداشدگی ممکن که در فصل دوم بدان اشاره شد .
- ◀ انجام آزمایشات عملی در جهت بررسی اثر تغییرات پارامترهای مختلف در میزان افزایش مقاومت تیر تقویت شده با صفحات FRP .
- ◀ ارائه مدل تئوری برای بررسی رفتار تیر تقویت شده با صفحات FRP تحت بارهای دینامیکی .
- ◀ ارائه مدل در جهت بررسی اتصالات بتن آرمه تقویت شده با صفحات FRP .
- ◀ ارائه مدل در جهت بررسی رفتار ستونهای بتن آرمه تقویت شده با صفحات FRP .
- ◀ ارائه مدل در جهت بررسی رفتار تیرهای بتن آرمه تقویت شده به صورت خمشی با صفحات FRP پیش تنیده .

## REFERENCES

### CODES :

- 1) ACI 440.2R (2002) , “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures” , Draft Report by ACI Committee 440 , American Concrete Institute , Farmington Hills .
- 2) Concrete Society Technical Report No. 55 (2000) , “Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials” , Report of a Concrete Society Committee .
- 3) FIB , Federation Internationale du Beton (2001) , Bulletin 14 , “Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures” , Technical Report , Task Group 9.3.
- 4) Model Code 90 , CEB-FIP Committee , Lausanne , 1993 .
- 5) Neale K. (2001) , “Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers” , Design Manual No 4 , ISIS Canada .

### OTHER REFERENCES :

- 6) Ahmed O. and Van Gemert D. (1999) ; “Effect of Longitudinal Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates on Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams” , Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures , ACI International SP-188 , pp. 933-943 .
- 7) Alaae F.J. and Karihaloo B.L. (2003) ; “Fracture Model for Flexural Failure of Beams Retrofitted with CARDIFRC” , ASCE , Journal of Structural Engineering , September 2003 , Vol. 129 , No. 9 , pp. 1028-1038 .
- 8) Arduini M. , Tommaso A.D. and Nanni A. (1997) ; “Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams” , ACI Structural Journal , V. 94 , No. 4 , July – August 1997 , pp. 363-370 .
- 9) Beber A.J. , Campos Filho A. and Campagnolo J.L. (2001) ; “CFRP in the Strengthening of Reinforced Concrete Beams” , Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering , 12 – 15 December 2001 , Hong Kong , China , pp. 391-398 .
- 10) Benham P.P. and Crawford R.J. (1990) ; “ Mechanics of Engineering Materials” , John Wiley & Sons Inc. , Fourth impression published , pp. 356 .



- 11) Bonacci F. and Maalej M. (2000) ; “Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer for Rehabilitation of Corrosion Damaged Concrete Beams” , ACI Structural Journal , V. 97 , No. 5 , September – October 2000, pp. 703-711 .
- 12) Brena S.F. , Bramblett R.M. , Wood S.L. and Kreger M.E. (2003) ; “Increasing Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites” , ACI Structural Journal , V. 100 , No. 1 , January – February 2003 , pp. 36-46 .
- 13) Brosens K. and Van Gemert D. (2001) ; “ Anchorage of Externally Bonded Reinforcements Subjected to Combined Shear/Bending Action” , Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering , 12 – 15 December 2001 , Hong Kong , China , pp. 589-596 .
- 14) Charkas H. , Rasheed H.A. and Melhem H. (2002) ; “Simplified Load-Deflection Calculations of FRP Strengthened RC Beams Based on a Rigorous Approach” , 15<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference , June 2-5 , 2002 , Columbia University , New York , NY , pp. 1-8 .
- 15) Grace N.F. , Abdel-Sayed G. and Ragheb W.F. (2002) ; “Strengthening of Concrete Beams Using Innovative Ductile Fiber-Reinforced Polymer Fabric” , ACI Structural Journal , V. 99 , No. 5 , September – October 2002 , pp. 692-700 .
- 16) Kachlakev D.I. and Barnes W.A. (1999) ; “Flexural and Shear Performance of Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Laminates” , Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures , ACI International SP-188 , pp. 959-972 .
- 17) Kage T. , Masuda Y. and Ina T. (1999) ; “Influence of Separation on Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams Reinforced by Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets” , Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures , ACI International SP-188 , pp. 1009-1021 .
- 18) Kishi N. , Mikami H. , Matsuoka K.G. and Kurihashi Y. (2001) ; “Failure Behavior of Flexural Strengthened RC Beams with AFRP Sheet” , Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Fiber-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-5) , 16 – 18 July 2001 , Cambridge , UK, pp. 87-95 .
- 19) Lamanna A.J. , Bank L.C. and Scott D.W. (2001) ; “Rapid Flexural Strengthening of RC Beams Using Powder Actuated Fasteners and FRP Strips” , Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Fiber-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-5) , 16 – 18 July 2001 , Cambridge , UK, pp. 389-397 .
- 20) Leong K.S. and Maalej M. (2003) ; “Effect of Beam Size on Interfacial Shear Stresses and Failure Mode of FRP-Bonded Beams” , Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6) , 8 – 10 July 2003 , Singapore , pp. 257-266 .

- 21) Maalej M. and Bian Y. (2001) ; “Interfacial Shear Stress Concentration in RC Beams Strengthened in Flexure with Externally – Bonded FRP” , Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering , 12 – 15 December 2001 , Hong Kong , China , pp. 519-526 .
- 22) Malek A.M. , Saadatmanesh H. and Ehsani M.R. (1998) ; “Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened with FRP Plate Due to Stress Concentration at Plate End” , ACI Structural Journal , V. 95 , No. 1 , January – February 1998 , pp. 142-152 .
- 23) Mihilmy M.T. and Tedesco J.W. (2000) ; “Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates” , ASCE , Journal of Structural Engineering , Vol. 126 , No. 6 , June 2000 , pp. 684-691 .
- 24) Raouf M. and Hassanen A.H. (2000) ; “Peeling Failure of Reinforced Concrete Beams with Fiber-Reinforced Plastic or Steel Plates Glued to Their Soffits” , Proceedings of the Institution of Civil Engineers , Structures and Buildings , Vol. 140 , August 2000 , pp. 291-305 .
- 25) Rizkalla S.H. and Hassan T. (2003) ; “Bond Characteristics of Various FRP Strengthening Techniques” , Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6) , 8 – 10 July 2003 , Singapore , pp. 123-132 .
- 26) Ross C. A. , Jerome D.M. , Tedesco J.W. and Hughes M.L. (1999) ; “Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite Laminates” , ACI Structural Journal , V. 96 , No. 2 , March – April 1999 , pp. 212-220 .
- 27) Saadatmanesh H. and Malek A. M. (1998) ; “Design Guidelines for Flexural Strengthening of RC Beams with FRP Plates” , ASCE , Journal of Composite for Construction , Vol.2 , No.4 , pp. 158-164 .
- 28) Sagawa Y. , Matsushita H. and Tsuruta H. (2001) ; “Anchoring Method of Carbon Fiber Sheet for Strengthening of Reinforced Concrete Beams” , Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Fiber-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-5) , 16 – 18 July 2001 , Cambridge , UK, pp. 409-417 .
- 29) Sharif A. , Al-Sulaimani G.J. , Basunbul I.A. , Baluch M.H. and Ghaleb B.N. (1994) ; “Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates” , ACI Structural Journal , V. 91 , No. 2 , March – April 1994 , pp. 160-168 .
- 30) Shehata I.A.E. , Cerqueira E.C. and Pinto C.T.M. (2001) ; “Strengthening of RC Beams in Flexure and Shear Using CFRP Laminate” , Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Fiber-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-5) , 16 – 18 July 2001 , Cambridge , UK, pp. 97-106 .

- 31) Shin Y.S. and Lee C. (2003) ; “Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates at Different Levels of Sustaining Load” , ACI Structural Journal , V. 100 , No. 2 , March – April 2003 , pp. 231-239 .
- 32) Shokrieh M.M. and Mousavi Malevajerdy A. (2001) ; “Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Composite Laminates” , Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering , 12 – 15 December 2001 , Hong Kong , China , pp. 507-515 .
- 33) Takahashi Y. and Sato Y. (2003) ; “Flexural Behavior of RC Beams Externally Reinforced with Carbon Fiber Sheets” , Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6) ,8 – 10 July 2003 ,Singapore , pp. 237-246 .
- 34) Tann D.B. , Shin J.K.C. , Delpak R. and Andreou E. (2001) ; “Optimum Design Approach for FRP Strengthening of RC Elements in Flexure” , Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering , 12 – 15 December 2001 , Hong Kong , China , pp. 475-482 .
- 35) Teng J.G. , Chen J.F. , Smith S.T. and Lam L. (2001) ; “FRP-Strengthened RC Structures” , John Wiley & Sons .
- 36) Toutanji H. , Deng Y. , Zhang Y. and Balaguru P. (2001) ; “The Use of Inorganic Matrix for Strengthening of RC Beams with Carbon Sheets” , Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering , 12 – 15 December 2001 , Hong Kong , China , pp. 1117-1126 .
- 37) Tumialan G. , Serra P. , Nanni A. and Belarbi A. (1999) ; “Concrete Cover Delamination in Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets” , Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures , ACI International SP-188 , pp. 725-735 .
- 38) Valcuende M. , Benlloch J. and Parra C.J. (2003) ; “Ductility of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Strips and Fabric” , Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6) ,8 – 10 July 2003 ,Singapore , pp. 337-346 .
- 39) Weijian Y. and Huiming H. (2001) ; “Experimental Study on the Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with CFRP Laminates” , Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering , 12 – 15 December 2001 , Hong Kong , China , pp. 399-405 .
- 40) Wu Z. , Matsuzaki T. , Yokoyama K. and Kanda T. (1999) ; “Retrofitting Method for Reinforced Concrete Structures with Externally Prestressed Carbon Fiber Sheets” , Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer

Reinforcement for Reinforced Concrete Structures , ACI International SP-188 , pp. 751-765 .

- 41) Xiong G.J. , Jiang H. , Huang J.Z. , Yang J.Z. and XIE H.C. (2001) ; “Behavior of Concrete Beams Strengthened with Hybrid Carbon Fiber – Glass Fiber Sheets” , Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering , 12 – 15 December 2001 , Hong Kong , China , pp. 407-414 .
- 42) Yoshizawa H. and Wu Z. (1999) ; “Crack Behavior of Plain Concrete and Reinforced Concrete Members Strengthened with Carbon Fiber Sheets” , Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures , ACI International SP-188 , pp. 767-779 .
- 43) Zhang G.F. , Kishi N. and Mikami H. (2003) ; “Influence of Material Properties of FRPs on Strength of Flexural Strengthened RC Beams” , Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6) , 8 – 10 July 2003 , Singapore , pp. 327-336 .
- 44) Ziraba Y. N. , Baluch M. H. , Basunbul I. A. , Sharif A. M. , Azad A. K. and Al-Sulaimani G. J. (1994) ; “Guidelines Towards the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates” , ACI Structural Journal , V.91 , No. 6 , pp. 639-646 .

## پیوست - الف : محاسبه تنش برشی و نرمال بین لایه FRP و بتن

این روش توسط Malek et al. (1998) ارائه شده و در این مدل حل دقیقی به منظور محاسبه تنشهای بین لایه FRP و بتن جهت کنترل جداسازی در انتهای FRP، صورت گرفته است. فرضیات این مدل عبارتند از :

- ◆ تغییرات خطی تنش نسبت به کرنش برای FRP، اپوکسی، بتن و آرماتورهای فولادی.
- ◆ فرض عدم وجود لغزش بین FRP و بتن.
- ◆ تغییرات خطی کرنش در ارتفاع مقطع.

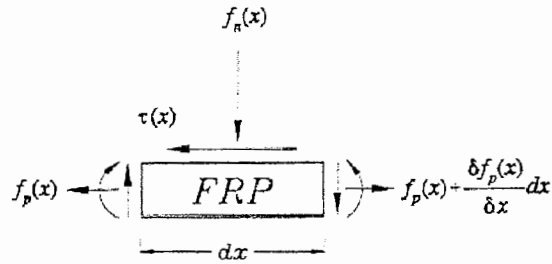
این فرضیات غیرمنطقی نمی باشد؛ چراکه انتهای FRP معمولاً در ناحیه با ممان صفر و یا ممان کم قرار دارد و بنابراین می توان تغییرات تنش - کرنش را برای مواد به صورت خطی فرض نمود.

### الف-۱: محاسبه تنش برشی

براساس شکل الف-۱، تنش برشی اعمال شده به لایه FRP از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\tau(x) = \frac{df_f(x)}{dx} t_f \quad (\text{الف-۱})$$

که در آن  $f_f(x)$ ، تنش کششی در صفحه FRP و  $t_f$ ، ضخامت صفحه می باشد.



شکل الف-۱: تنشهای اعمال شده بر روی صفحه FRP

با فرض رفتار الاستیک خطی، رابطه الف-۱ می تواند به صورت زیر بازنویسی شود.

$$\frac{df_f(x)}{dx} = \frac{G_a}{t_f} \left( \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right) \quad (\text{الف-۲})$$

که در آن  $u$  و  $v$  به ترتیب تغییرمکان افقی و عمودی در لایه چسب بوده و  $G_a$  مدول برشی الاستیسیته چسب می باشد.  $x$  و  $y$  نیز به ترتیب راستای طولی FRP و راستای عمود بر آن می باشند. دیفرانسیل رابطه (الف-۲) نسبت به  $x$  نتیجه خواهد داد.

$$\frac{d^2 f_f(x)}{dx^2} = \frac{G_a}{t_f} \left( \frac{d^2 u}{dx dy} + \frac{d^2 v}{dx^2} \right) \quad (\text{الف-۳})$$

رابطه بین ممان خمشی و تغییرمکان خمشی از رابطه زیر بدست می آید.

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{M}{E_c I_r} \quad (\text{الف-۴})$$

که در آن  $E_c$ ، مدول الاستیسیته بتن در کشش و  $I_r$  ممان اینرسی مقطع معادل براساس بتن می باشد. بعلاوه  $d^2 u / dx dy$  می تواند از رابطه زیر بدست آید.

$$\frac{d^2 u}{dx dy} \cong \frac{1}{t_a} (\epsilon_f - \epsilon_c) \quad (\text{الف-۵})$$

که در آن  $\epsilon_f$  و  $\epsilon_c$  به ترتیب کرنش در پایین و بالای لایه چسب می باشند و  $t_a$ ، ضخامت لایه چسب است. بنابراین رابطه (الف-۲) به صورت زیر بازنویسی می شود.

$$\frac{d^2 f_f(x)}{dx^2} = \frac{G_a}{t_f} \left( \frac{\varepsilon_f}{t_a} - \frac{\varepsilon_c}{t_a} + \frac{M}{E_c I_{tr}} \right) \quad (\text{الف-۶})$$

مقدار مؤلفه سوم از سمت راست این رابطه نسبت به دیگر قسمت‌ها نسبتاً کوچک بوده و بنابراین می‌توان از آن صرف‌نظر نمود. در نتیجه رابطه (الف-۶) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\frac{d^2 f_f(x)}{dx^2} = \frac{G_a}{t_f t_a} (\varepsilon_f - \varepsilon_c) \quad (\text{الف-۷})$$

که در آن  $E_f$ ، مدول الاستیسیته صفحه و  $f_c(x)$ ، تنش کششی در تار پایینی تیر بتنی است. از رابطه (الف-۷) می‌توان معادله دیفرانسیل برحسب تنش کششی در FRP را از رابطه زیر بدست آورد.

$$\frac{d^2 f_f(x)}{dx^2} - \frac{G_a f_f(x)}{t_a t_f E_f} = - \frac{f_c(x) G_a}{t_a t_f E_c} \quad (\text{الف-۸})$$

با حل معادله دیفرانسیل بالا، رابطه زیر برای تنش کششی صفحه FRP بدست می‌آید.

$$f_f(x) = C_1 \sinh(\sqrt{A}x) + C_2 \cosh(\sqrt{A}x) + b_1 x^2 + b_2 x + b_3 \quad (\text{الف-۹})$$

که در آن:

$$A = \frac{G_a}{t_a t_f E_f} \quad (\text{الف-۱۰})$$

$$b_1 = \frac{\bar{y} a_1 E_f}{I_{tr} E_c} \quad (\text{الف-۱۱})$$

$$b_2 = \frac{\bar{y} E_f}{I_{tr} E_c} (2a_1 L_0 + a_2) \quad (\text{الف-۱۲})$$

$$b_3 = E_f \left[ \frac{\bar{y}}{I_{tr} E_c} (a_1 L_0^2 + a_2 L_0 + a_3) + 2b_1 \frac{t_a t_f}{G_a} \right] \quad (\text{الف-۱۳})$$

محل مبدا  $x$ ، در انتهای FRP بوده و برای محاسبه ضرایب  $a_1$ ،  $a_2$  و  $a_3$  می‌توان با داشتن

دیگرام تغییرات ممان در طول تیر از محل تکیه گاه، از رابطه زیر استفاده نمود.

$$M(x_0) = a_1 x_0^2 + a_2 x_0 + a_3 \quad (\text{الف-۱۴})$$

محل مبدا  $x_0$  در تکیه گاه می باشد به طوری که اگر فاصله انتهای صفحه FRP تا تکیه گاه برابر  $L_0$  باشد ، رابطه  $x_0$  نسبت به  $x$  به صورت زیر است .

$$x_0 = x + L_0 \quad (\text{الف-۱۵})$$

$\bar{y}$ ، فاصله بین تارخشی از مقطع تقویت شده تا مرکز ضخامت صفحه FRP می باشد و  $C_1$  و  $C_2$  ثابتهای انتگرال هستند . با جایگذاری مقدار  $f_f(x)$  بدست آمده از رابطه (الف-۹) در رابطه (الف-۱) ، مقدار تنش برشی در طول FRP به صورت زیر بدست می آید .

$$\tau(x) = t_f (C_1 \sqrt{A} \cosh(\sqrt{A}x) + C_2 \sqrt{A} \sinh(\sqrt{A}x) + 2b_1 x + b_2) \quad (\text{الف-۱۶})$$

با توجه به اینکه در  $x = 0$  (انتهای FRP) ، تنش کششی در FRP برابر صفر است ( $f_f(x) = 0$ ) ، به عنوان یک شرط مرزی مورد استفاده قرار گرفته و دیگر شرط مرزی محلی است که نیروی برشی داخلی در تیر صفر شده که موجب می گردد تنش برشی نیز صفر شود . بنابراین شرایط مرزی را می توان به صورت زیر نشان داد .

$$\begin{cases} x = 0 \longrightarrow f_f(x) = 0 \\ V = 0 \longrightarrow \tau(L_s) = 0 \quad \text{Or} \quad \left. \frac{df_f(x)}{dx} \right|_{L_s} = 0 \end{cases} \quad (\text{الف-۱۷})$$

که در آن  $V$  ، برش داخلی در تیر و  $L_s$  ، فاصله بین انتهای FRP تا نقطه ای که در آن نیروی برشی صفر شده است می باشد . با استفاده از این شرایط مرزی ، مقدار  $C_1$  و  $C_2$  از دو رابطه زیر

$$\begin{cases} C_1 = \frac{b_3 \sqrt{A} \sinh(\sqrt{A}L_s) - 2b_1 L_s - b_2}{\sqrt{A} \cosh(\sqrt{A}L_s)} \\ C_2 = -b_3 \end{cases} \quad (\text{الف-۱۸})$$



یک مطالعه پارامتری از متغیرهای رابطه بالا نشان می دهد که  $\cosh(\sqrt{A}L_s)$  و  $\sinh(\sqrt{A}L_s)$  با یکدیگر برابر بوده و نسبت به دیگر مؤلفه های رابطه ، از لحاظ عددی بسیار بزرگتر می باشند . بنابراین مقدار  $C_1$  به طریق ساده تر از رابطه زیر محاسبه می شود .

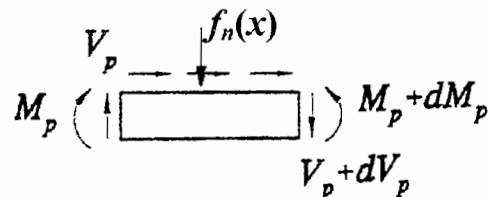
$$C_1 = b_3 \quad (\text{الف-۱۹})$$

با استفاده از  $C_1$  و  $C_2$  بدست آمده و جایگذاری آنها در رابطه (الف-۱۶) ، تنش برشی به صورت زیر محاسبه خواهد شد .

$$\tau(x) = t_f (b_3 \sqrt{A} \cosh(\sqrt{A}x) - b_3 \sqrt{A} \sinh(\sqrt{A}x) + 2b_1x + b_2) \quad (\text{الف-۲۰})$$

ماکزیمم تنش برشی در محل انتهایی FRP ( $x = 0$ ) ، رخ داده و برابر خواهد بود با :

$$\tau_{\max} = t_f (b_3 \sqrt{A} + b_2) \quad (\text{الف-۲۱})$$



شکل الف-۲: نحوه وارد شدن تنشها و نیروهای داخلی بر روی فاصله  $dx$  از صفحه FRP و چگونگی ایجاد تنش نرمال

### الف-۲: محاسبه تنش نرمال

قبل از بدست آوردن رابطه تغییرات تنش نرمال بین FRP و بتن در طول صفحه ، لازم است که علت پیدایش تنش نرمال در طول اتصال FRP به بتن روشن گردد . همانطور که در شکل الف-۱ نشان داده شد ، اختلاف در نیروی کششی داخلی بین دو طرف صفحه FRP در طول  $dx$  ، موجب ایجاد تنشهای برشی بین لایه ای می گردد و با دقت در شکل الف-۲ ، ملاحظه می گردد که اختلاف

برش داخلی موجود در دو طرف صفحه FRP مستلزم به وجود آمدن تنش نرمال بین لایه ای خواهد گردید . اما برای محاسبه مقدار این تنش ، به صورت زیر عمل می شود .

با جداکردن تیر بتنی تقویت شده و صفحه FRP که توسط چسب به تیر نصب می شود به صورت شکل الف-۳ ، رابطه دیفرانسیل مرتبه چهارم هریک از دو جزء به صورت زیر نوشته می شود .

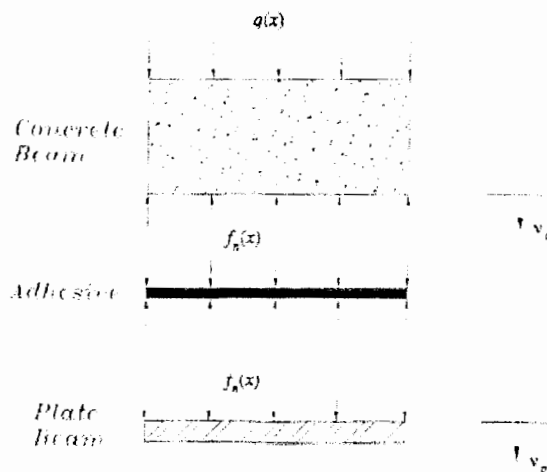
$$-E_c I_c \frac{d^4 v_c}{dx^4} = q - b_f f_n(x) \quad (\text{الف-۲۲})$$

$$-E_f I_f \frac{d^4 v_f}{dx^4} = b_f f_n(x) \quad (\text{الف-۲۳})$$

که در آن  $v_c$  و  $v_f$  به ترتیب تغییرمکان صفحه FRP و تیر بتنی بوده و  $I_c$  و  $I_f$  نیز ممان اینرسی صفحه و تیر بتنی هستند .  $b_f$  عرض FRP بوده و  $q$  بار توزیع شده بر روی تیر بتنی است .  $f_n(x)$  تنش نرمال وارده بر لایه چسب می باشد . مقدار این تنش از رابطه زیر با توجه به قانون هوک ، قابل استخراج است .

$$f_n(x) = k_n (v_f - v_c) \quad (\text{الف-۲۴})$$

که در آن  $k_n = E_a / t_a$  ؛  $E_a$  مدول الاستیسیته چسب و  $t_a$  ، ضخامت چسب است .



شکل الف-۳ : نحوه وارد شدن تنش نرمال به FRP ، چسب و تیر

با چهار بار دیفرانسیل گیری از رابطه (الف-۲۴) ، خواهیم داشت :

$$\frac{d^4 f_n(x)}{dx^4} = k_n \left( \frac{d^4 v_f}{dx^4} - \frac{d^4 v_c}{dx^4} \right) \quad (\text{الف-۲۵})$$

با حل معادلات (الف-۲۲) و (الف-۲۳) برای  $d^4 v_c/dx^4$  و  $d^4 v_f/dx^4$  و جایگذاری آنها در رابطه بالا ،

معادله دیفرانسیل تنش نرمال به صورت زیر بدست می آید .

$$\frac{d^4 f_n(x)}{dx^4} + \frac{k_n}{E_f I_f} b_f f_n(x) = q \frac{k_n}{E_c I_c} \quad (\text{الف-۲۶})$$

با حل معادله دیفرانسیل بالا و جمع جوابهای معادله همگن و جوابهای خصوصی ، رابطه تنش

نرمال به صورت زیر بدست خواهد آمد .

$$f_n(x) = e^{-\beta x} [D_1 \cos(\beta x) + D_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [D_3 \cos(\beta x) + D_4 \sin(\beta x)] + \frac{q E_f I_f}{b_f E_c I_c} \quad (\text{الف-۲۷})$$

که در آن  $D_1$  تا  $D_4$  ثابتهای انتگرال بوده و  $\beta$  از رابطه زیر بدست می آید .

$$\beta = \left( \frac{k_n b_f}{4 E_f I_f} \right)^{1/4} \quad (\text{الف-۲۸})$$

برای مقادیر بزرگ  $x$  ، تنش نرمال به سمت صفر میل کرده و لذا در رابطه بالا جهت برقراری این

شرط باید  $D_3 = D_4 = 0$  باشد ، چراکه  $\beta$  همواره مقداری مثبت دارد . بنابراین رابطه بالا به صورت زیر

ساده می گردد .

$$f_n(x) = e^{-\beta x} [D_1 \cos(\beta x) + D_2 \sin(\beta x)] + \frac{q E_f I_f}{b_f E_c I_c} \quad (\text{الف-۲۹})$$

برای محاسبه ثابتهای  $D_1$  و  $D_2$  از شرایط مرزی ، نیرویی در انتهای FRP استفاده می نمائیم . با

دیفرانسیل گیری از رابطه (الف-۲۴) ، معادله زیر بدست می آید .

$$\frac{d^2 f_n(x)}{dx^2} = k_n \left( \frac{d^2 v_f}{dx^2} - \frac{d^2 v_c}{dx^2} \right) \quad (\text{الف-۳۰})$$

با جدا کردن تیر بتنی و صفحه FRP از یکدیگر و با توجه به رابطه ممان - انحناء ، می توان رابطه بالا را به صورت زیر بازنویسی کرد .

$$\frac{d^2 f_n(x)}{dx^2} = \frac{k_n}{E_f I_f} M_f(x) - \frac{k_n}{E_c I_c} M_c(x) \quad (\text{الف-۳۱})$$

که در آن  $M_c(x)$  و  $M_f(x)$  به ترتیب ممان خمشی صفحه FRP و تیر بتنی هستند . با یکبار دیفرانسیل گیری از رابطه بالا می توان رابطه زیر را بر حسب  $V_f(x)$  و  $V_c(x)$  به صورت زیر بدست آورد.

$$\frac{d^3 f_n(x)}{dx^3} = \frac{k_n}{E_f I_f} V_f(x) - \frac{k_n}{E_c I_c} V_c(x) \quad (\text{الف-۳۲})$$

که در آن  $V_c(x)$  و  $V_f(x)$  به ترتیب نیروهای برشی در صفحه FRP و تیر بتنی می باشد . مقدار هر یک از  $M_c(x)$  و  $M_f(x)$  برابر با جمع دو ممان ایجاد شده توسط نیروهای برشی بین FRP و بتن و ممان ناشی از بارهای خارجی ، می باشد . البته فرض می گردد که ممان ناشی از بارهای خارجی ، تنها در  $M_c(x)$  تأثیر می گذارد . این فرایند برای محاسبه  $V_f(x)$  و  $V_c(x)$  نیز تکرار می گردد . برای محاسبه ممانهای ناشی از تنش برشی برای هر دو جزء بتن و FRP ، با توجه به شکل الف-۴ و رابطه (الف-۳۰) ، از روابط زیر استفاده می شود .

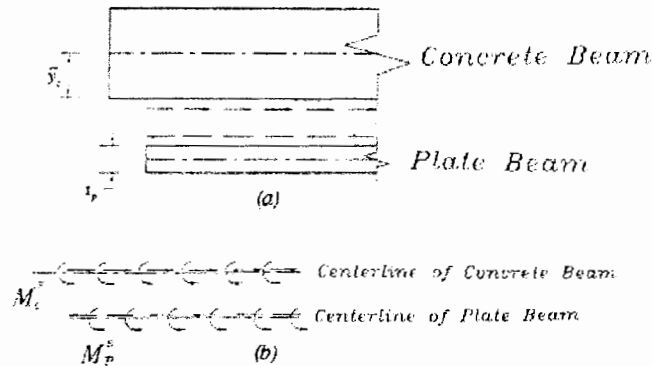
$$M_c^s(x) = -b_f t_f \bar{y}_c \left( b_3 \sinh(\sqrt{Ax}) - b_3 \cosh(\sqrt{Ax}) + b_1 x^2 + b_2 x + b_3 \right) \quad (\text{الف-۳۳})$$

$$M_f^s(x) = -b_f \frac{t_f^2}{2} \left( b_3 \sinh(\sqrt{Ax}) - b_3 \cosh(\sqrt{Ax}) + b_1 x^2 + b_2 x + b_3 \right) \quad (\text{الف-۳۴})$$

در انتهای لایه FRP ( $x = 0$ ) ، هر دو ممان بالا صفر شده و بنابراین ممان خمشی در هر دو جزء تنها ناشی از بارهای اعمالی خارجی بوده که به صورت زیر می باشد .

$$\begin{cases} M_c = M_0 \\ M_f = 0 \end{cases} \quad (\text{الف-۳۵})$$

که در آن  $M_0$ ، ممان خمشی در تیر بتنی در انتهای لایه FRP ناشی از بارهای خارجی است. در روابط بالا فرض می‌گردد که بار خارجی تنها بر تیر بتنی اعمال شده است.



شکل الف-۴: عملکرد تنش برشی بر روی FRP و تیر

با دیفرانسیل گیری از دو رابطه (الف-۳۳) و (الف-۳۴) و قراردادن  $x = 0$ ، نیروهای برشی ناشی از تنشهای برشی در هر جزء (تیر بتنی و صفحه FRP)، به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$V_c^s(x) = -b_f t_f \bar{y}_c (b_3 \sqrt{A} + b_2) \quad (\text{الف-۳۶})$$

$$V_f^s(x) = -b_f \frac{t_f^2}{2} (b_3 \sqrt{A} + b_2) \quad (\text{الف-۳۷})$$

که در آن  $V_c^s$  و  $V_f^s$  به ترتیب نیروهای برشی در انتهای FRP در دو جزء تیر بتنی و FRP ناشی از تنشهای برشی می‌باشد. نیروی برشی نهایی برای این دو جزء نهایتاً برابر خواهد بود با:

$$\begin{cases} V_c = V_0 + V_c^s \\ V_f = V_f^s \end{cases} \quad (\text{الف-۳۸})$$

که در آن  $V_0$ ، نیروی برشی در تیر بتنی در انتهای لایه FRP ناشی از بارهای خارجی می‌باشد. در اینجا نیز، دوباره فرض می‌گردد که تیر بتنی به تنهایی کل نیروی برشی ناشی از بارهای خارجی را تحمل می‌کند.

با جایگذاری روابط (الف-۳۵) و (الف-۳۸) در سمت راست روابط (الف-۳۱) و (الف-۳۲) و قرار دادن رابطه (الف-۲۹) در سمت چپ این دو رابطه اخیر، مقدار ثابتهای  $D_1$  و  $D_2$  به صورت زیر محاسبه خواهد شد.

$$D_1 = \frac{k_n}{E_f I_f} \cdot \frac{V_f}{2\beta^3} - \frac{k_n}{E_c I_c} \cdot \frac{V_c + \beta M_0}{2\beta^3} \quad (\text{الف-۳۹})$$

$$D_2 = \frac{k_n}{E_c I_c} \cdot \frac{M_0}{2\beta^3} \quad (\text{الف-۴۰})$$

با ملاحظه اینکه با افزایش  $x$ ، مقدار  $e^{-\beta x}$  به سمت صفر میل می کند، ماکزیمم مقدار تنش نرمال در محل برش FRP (انتهای لایه FRP) رخ خواهد داد. بنابراین تنش نرمال ماکزیمم با قرار دادن  $x = 0$ ، از رابطه زیر بدست می آید.

$$f_{n,\max} = \frac{k_n}{2\beta^3} \left( \frac{V_f}{E_f I_f} - \frac{V_c + \beta M_0}{E_c I_c} \right) + \frac{q E_f I_f}{b_f E_c I_c} \quad (\text{الف-۴۱})$$

## پیوست - ب : نتایج کلیه مدلها برای نمونه های آزمایش دوم تا بیستم

همانطور که در فصل ششم اشاره شد ، برای نمونه های بیست آزمایش ، نتایج پنج مدل معرفی شده در فصل پنجم محاسبه شد و مورد مقایسه قرار گرفت . اما به جهت عدم حجیم شدن متن اصلی پایان نامه ، تنها برای آزمایش اول ، نتایج هر پنج مدل ارائه گردیده و برای نمونه های دیگر آزمایشها ، تنها نتایج دو مدل اول آورده شده و نتایج دیگر مدلها در این پیوست در جداولی گردآوری شده است . لازم به ذکر است که منظور از سه مدل آخر مدلهایی است که به ترتیب عبارتند از :

۱. مدل پیشنهادی بدون در نظر گرفتن مقاومت بتن ترک خورده (No Crack)
۲. مدل پیشنهادی بدون در نظر گرفتن مقاومت ترک و بتن کششی (No T. C.)
۳. مدل پیشنهادی بدون در نظر گرفتن اثر سخت شدگی برای آرماتورهای فولادی (No S. H.)

جهت روشنتر شدن نتایج جدول ، در هر جدول یک نمونه علامت گذاری شده (<sup>1</sup> ، <sup>2</sup> ، <sup>3</sup> ، <sup>4</sup>) و انواع مختلف گسیختگی تیر و سه مدل توضیح داده شده در بالا ، به ترتیب به صورت زیر معرفی می گردد .

<sup>1</sup> C : Concrete crushing , R : FRP Rupture , ED : FRP End debonding , CCS : Concrete cover separation

<sup>2</sup> Proposed model without contribution of Crack strength

<sup>3</sup> Proposed model without contribution of Concrete in Tension and Crack strength

<sup>4</sup> Proposed model without consideration of Strain Hardening in steel

جدول ب-۱ : آزمایش دوم

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
CF3	Proposed	---	0.82	---	---	---	0.97	C
	Simplified	---	0.82	---	---	---	0.97	C
	No Crack	---	0.82	---	---	---	0.97	C
	No T.C.	---	0.76	---	---	---	0.97	C
	No S.H.	---	0.82	---	---	---	0.96	C
DF-1	Proposed	---	0.97	---	---	---	0.79	R
	Simplified	---	0.97	---	---	---	0.79	R
	No Crack	---	0.87	---	---	---	0.79	R
	No T.C.	---	0.82	---	---	---	0.87	R
	No S.H.	---	0.87	---	---	---	0.79	R
DF-2	Proposed	---	0.73	---	---	---	0.98	R
	Simplified	---	0.73	---	---	---	0.97	R
	No Crack	---	0.73	---	---	---	0.97	R
	No T.C.	---	0.81	---	---	---	0.97	R
	No S.H.	---	0.73	---	---	---	0.97	R
DF-3	Proposed	---	0.73	---	---	---	0.97	R
	Simplified	---	0.73	---	---	---	0.97	C
	No Crack	---	0.73	---	---	---	0.97	R
	No T.C.	---	0.67	---	---	---	0.97	C
	No S.H.	---	0.73	---	---	---	0.97	R
DF-4	Proposed	---	0.73	---	---	---	0.97	C
	Simplified	---	0.73	---	---	---	0.97	C
	No Crack	---	0.73	---	---	---	0.97	C
	No T.C.	---	0.73	---	---	---	0.97	C
	No S.H.	---	0.73	---	---	---	0.97	C

جدول ب-۲ : آزمایش سوم

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
F-N	Proposed	---	0.98	---	0.99	---	0.99	C
	Simplified	---	0.92	---	0.9	---	0.99	C
	No Crack	---	0.98	---	0.98	---	0.99	C
	No T.C.	---	0.94	---	0.98	---	0.99	C
	No S.H.	---	0.98	---	0.99	---	0.99	C



ادامه جدول ب-۲: آزمایش سوم

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
F-HT	Proposed	---	1.0	---	1.0	---	0.99	C
	Simplified	---	1.0	---	0.97	---	0.94	C
	No Crack	---	1.0	---	0.98	---	0.99	C
	No T.C.	---	0.97	---	0.98	---	0.99	C
	No S.H.	---	1.0	---	1.0	---	0.97	C
F-HM	Proposed	---	1.01	---	0.97	---	0.97	C
	Simplified	---	1.03	---	0.96	---	0.94	C
	No Crack	---	1.01	---	0.92	---	0.97	C
	No T.C.	---	0.98	---	0.98	---	0.94	C
	No S.H.	---	1.01	---	0.97	---	0.99	C

جدول ب-۳: آزمایش چهارم

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
Normal RC beam	Proposed	0.90	1.04	0.84	0.98	0.98	0.99	C
	Simplified	0.90	1.04	0.87	0.97	0.98	0.98	C
	No Crack	0.90	1.04	0.92	0.99	0.98	0.99	C
	No T.C.	0.70	0.96	0.92	0.92	0.98	0.99	C
	No S.H.	0.90	1.04	0.84	0.98	0.98	0.99	C
RC Beam S.W. CFS	Proposed	0.99	1.01	0.89	0.97	1.0	0.99	C
	Simplified	0.99	1.01	0.90	0.99	1.0	0.99	C
	No Crack	0.99	1.01	0.97	0.99	1.0	0.99	C
	No T.C.	0.76	0.94	0.94	0.87	1.0	0.99	C
	No S.H.	0.99	1.01	0.89	0.97	1.0	0.99	C

جدول ب-۴: آزمایش پنجم

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
		---	---	---	---	---	---	
Beam1	Proposed	---	---	1.0	1.0	0.94	1.0	C
	Simplified	---	---	0.99	1.0	0.93	1.0	C
	No Crack	---	---	1.02	0.99	0.94	1.0	C
	No T.C.	---	---	1.02	0.99	0.94	1.0	C
	No S.H.	---	---	1.0	1.0	0.93	1.0	C
Beam2	Proposed	---	---	1.0	1.0	1.11	1.05	C
	Simplified	---	---	1.01	1.0	1.13	1.07	C
	No Crack	---	---	1.03	0.99	1.14	1.05	C
	No T.C.	---	---	1.03	0.99	1.14	1.05	C
	No S.H.	---	---	1.0	1.0	1.11	1.05	C
Beam3	Proposed	---	---	1.0	0.99	1.07	1.0	C
	Simplified	---	---	1.0	0.99	1.07	1.0	C
	No Crack	---	---	0.98	0.97	1.08	1.0	C
	No T.C.	---	---	0.98	0.97	1.08	1.0	C
	No S.H.	---	---	1.0	0.99	1.08	1.0	C
Beam4	Proposed	---	---	1.0	1.03	1.30	1.15	C
	Simplified	---	---	1.0	1.03	1.29	1.15	C
	No Crack	---	---	0.98	1.0	1.31	1.15	C
	No T.C.	---	---	0.98	1.0	1.31	1.15	C
	No S.H.	---	---	1.0	1.03	1.28	1.15	C
Beam5	Proposed	---	---	1.0	1.02	1.19	1.05	C
	Simplified	---	---	1.01	1.03	1.20	1.07	C
	No Crack	---	---	0.99	1.0	1.22	1.05	C
	No T.C.	---	---	0.99	1.0	1.22	1.05	C
	No S.H.	---	---	1.0	1.02	1.19	1.05	C

جدول ب-۵: آزمایش ششم

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
		---	---	---	---	---	---	
P1	Proposed	---	---	1.04	0.98	---	0.97	C
	Simplified	---	---	1.04	0.98	---	0.97	C
	No Crack	---	---	1.06	0.97	---	0.96	C
	No T.C.	---	---	1.06	0.97	---	0.96	C
	No S.H.	---	---	1.04	0.98	---	0.97	C

ادامه جدول ب-۵: آزمایش ششم

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
CF1	Proposed	---	---	1.26	0.96	1.29	0.91	C
	Simplified	---	---	1.23	0.95	1.32	0.91	C
	No Crack	---	---	1.24	0.94	1.33	0.91	C
	No T.C.	---	---	1.24	0.94	1.33	0.91	C
	No S.H.	---	---	1.26	0.96	1.33	0.91	C
GF1	Proposed	---	---	1.10	0.97	1.19	0.91	C
	Simplified	---	---	1.07	0.98	1.17	0.91	C
	No Crack	---	---	1.09	0.97	1.18	0.91	C
	No T.C.	---	---	1.09	0.97	1.18	0.91	C
	No S.H.	---	---	1.10	0.97	1.18	0.91	C
P3	Proposed	---	---	---	---	---	0.91	C
	Simplified	---	---	---	---	---	0.91	C
	No Crack	---	---	---	---	---	0.91	C
	No T.C.	---	---	---	---	---	0.91	C
	No S.H.	---	---	---	---	---	0.91	C
CF3	Proposed	---	---	---	---	---	0.91	C
	Simplified	---	---	---	---	---	0.91	C
	No Crack	---	---	---	---	---	0.91	C
	No T.C.	---	---	---	---	---	0.91	C
	No S.H.	---	---	---	---	---	0.91	C

جدول ب-۶: آزمایش هفتم

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
#10	Proposed	---	---	---	---	---	0.91	C
	Simplified	---	---	---	---	---	0.91	C
	No Crack	---	---	---	---	---	0.91	C
	No T.C.	---	---	---	---	---	0.91	C
	No S.H.	---	---	---	---	---	0.91	C
#8	Proposed	---	---	---	---	---	0.91	C
	Simplified	---	---	---	---	---	0.91	C
	No Crack	---	---	---	---	---	0.91	C
	No T.C.	---	---	---	---	---	0.91	C
	No S.H.	---	---	---	---	---	0.91	C

ادامه جدول ب-۶: آزمایش هفتم

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
		---	---	---	---	---	---	
#6	Proposed	---	---	---	---	---	1.22	C
	Simplified	---	---	---	---	---	1.21	C
	No Crack	---	---	---	---	---	1.23	R
	No T.C.	---	---	---	---	---	1.24	C
	No S.H.	---	---	---	---	---	1.21	C

جدول ب-۷: آزمایش هشتم

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
		---	---	---	---	---	---	
VT1	Proposed	1.01	1.0	1.11	0.99	---	1.25	C
	Simplified	1.01	1.0	1.0	0.94	---	1.23	C
	No Crack	1.01	1.0	1.03	0.97	---	1.25	C
	No T.C.	0.74	0.73	1.03	0.97	---	1.25	C
	No S.H.	1.01	1.0	1.11	0.99	---	1.21	C
VR3	Proposed	1.03	1.01	1.03	1.03	---	1.23	R
	Simplified	1.03	1.01	1.0	1.0	---	1.21	R
	No Crack	1.03	1.01	1.01	1.04	---	1.21	R
	No T.C.	1.06	0.84	1.01	1.04	---	1.23	R
	No S.H.	1.03	1.01	1.03	1.03	---	1.21	R
VR5	Proposed	1.05	1.03	0.87	1.15	---	1.22	C
	Simplified	1.05	1.03	0.94	1.21	---	1.23	C
	No Crack	1.05	1.03	0.93	1.15	---	1.21	C
	No T.C.	0.97	0.79	0.93	1.16	---	1.21	C
	No S.H.	1.05	1.03	0.87	1.15	---	1.21	C
VR7	Proposed	1.07	1.04	0.86	1.12	---	1.21	C
	Simplified	1.07	1.04	0.85	1.12	---	1.23	C
	No Crack	1.07	1.04	0.84	1.03	---	1.21	C
	No T.C.	0.85	0.82	0.84	1.08	---	1.21	C
	No S.H.	1.07	1.04	0.86	1.12	---	1.23	C
VR9	Proposed	1.07	1.04	0.86	1.22	---	1.21	C
	Simplified	1.07	1.04	0.85	1.22	---	1.21	C
	No Crack	1.07	1.04	0.84	1.13	---	1.21	C
	No T.C.	1.05	0.83	0.84	1.16	---	1.21	C
	No S.H.	1.07	1.04	0.86	1.22	---	1.21	C

جدول ب-۸ : آزمایش نهم

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
Beam A	Proposed	1.03	1.10	0.95	0.97	---	0.80	C
	Simplified	1.03	1.10	0.92	0.97	---	0.80	C
	No Crack	1.03	1.10	0.93	0.97	---	0.80	C
	No T.C.	0.70	0.76	0.94	0.97	---	0.80	C
	No S.H.	1.03	1.10	0.95	0.97	---	0.80	C
Beam B	Proposed	1.03	1.09	0.95	1.03	---	0.77	R
	Simplified	1.03	1.09	0.90	1.03	---	0.79	R
	No Crack	1.03	1.09	0.97	1.03	---	0.70	R
	No T.C.	0.93	0.96	0.98	1.03	---	0.79	R
	No S.H.	1.03	1.09	0.95	1.03	---	0.79	R

جدول ب-۹ : آزمایش دهم

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
Control Beam	Proposed	1.0	1.52	---	0.98	1.20	0.97	C
	Simplified	1.0	1.52	---	1.03	1.09	0.94	C
	No Crack	1.0	1.52	---	0.97	1.12	0.94	C
	No T.C.	0.88	0.8	---	0.95	1.12	0.94	C
	No S.H.	1.0	1.52	---	0.95	1.06	0.90	C
Bonded Beam	Proposed	1.07	1.83	---	0.92	---	0.84	R
	Simplified	1.07	1.83	---	0.86	---	0.89	R
	No Crack	1.07	1.83	---	0.91	---	0.83	R
	No T.C.	0.89	0.62	---	0.88	---	0.89	R
	No S.H.	1.07	1.83	---	0.92	---	0.83	R

جدول ب-۱۰ : آزمایش یازدهم

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
N0	Proposed	---	---	0.98	0.97	1.01	0.99	C
	Simplified	---	---	0.93	0.97	1.01	0.98	C
	No Crack	---	---	1.07	0.98	1.01	0.97	C
	No T.C.	---	---	1.09	0.91	1.01	0.98	C
	No S.H.	---	---	0.98	0.97	0.98	0.97	C

ادامه جدول ب-۱۰: آزمایش یازدهم

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
N1	Proposed	---	---	1.0	0.96	1.0	1.02	R
	Simplified	---	---	1.0	1.0	1.0	1.04	R
	No Crack	---	---	1.11	0.99	1.05	1.04	R
	No T.C.	---	---	1.14	0.99	1.05	1.04	R
	No S.H.	---	---	1.0	0.96	0.99	1.0	R
M1	Proposed	---	---	0.91	0.93	---	1.02	R
	Simplified	---	---	0.93	1.04	---	1.04	R
	No Crack	---	---	1.08	0.91	---	1.04	R
	No T.C.	---	---	1.05	0.97	---	1.04	R
	No S.H.	---	---	0.91	0.93	---	1.04	R

جدول ب-۱۱: آزمایش دوازدهم

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
F0	Proposed	1.28	1.19	0.76	0.85	0.98	1.03	C
	Simplified	1.28	1.19	0.75	0.87	0.99	1.03	C
	No Crack	1.28	1.19	0.85	0.89	1.02	1.03	C
	No T.C.	0.80	0.94	0.79	0.89	1.03	0.97	C
	No S.H.	1.28	1.19	0.76	0.85	0.94	1.03	C
F1	Proposed	---	0.93	0.77	0.96	0.97	1.02	R
	Simplified	---	0.98	0.80	0.94	1.06	1.03	R
	No Crack	---	0.98	0.86	0.97	1.08	1.03	R
	No T.C.	---	0.94	0.81	0.88	1.08	1.03	R
	No S.H.	---	0.93	0.77	0.96	0.90	1.07	R
F2	Proposed	0.88	0.97	0.84	0.90	1.59	1.02	C
	Simplified	0.88	0.97	0.79	0.87	1.60	1.02	C
	No Crack	0.88	0.97	0.86	0.88	1.63	1.02	C
	No T.C.	0.72	0.95	0.81	0.82	1.63	1.02	C
	No S.H.	0.88	0.97	0.84	0.90	1.61	1.07	C
F3	Proposed	---	0.97	---	0.92	---	1.04	C
	Simplified	---	0.97	---	0.92	---	1.04	C
	No Crack	---	0.97	---	0.93	---	1.04	C
	No T.C.	---	0.95	---	0.97	---	1.04	C
	No S.H.	---	0.97	---	0.92	---	1.04	C

ادامه جدول ب-۱۱: آزمایش دوازدهم

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
F4	Proposed	0.88	0.04	0.86	0.89	0.88	0.9	R
	Simplified	0.88	0.04	0.91	0.84	0.90	0.91	R
	No Crack	0.88	0.04	0.91	0.82	0.93	0.97	R
	No T.C.	0.76	0.25	0.94	0.82	0.83	0.84	R
	No S.H.	0.88	0.04	0.86	0.89	0.84	0.97	R
F5	Proposed	0.88	0.05	0.74	0.97	0.71	0.75	C
	Simplified	0.88	0.05	0.77	0.93	0.72	0.74	C
	No Crack	0.88	0.05	0.76	0.94	0.73	0.74	R
	No T.C.	0.76	0.27	0.79	0.84	0.73	0.72	C
	No S.H.	0.88	0.05	0.74	0.97	0.69	0.7	R
F6	Proposed	1.28	0.42	0.81	0.95	1.22	0.9	C
	Simplified	1.28	0.42	0.75	0.91	1.24	0.94	C
	No Crack	1.28	0.42	0.82	0.92	1.26	0.94	C
	No T.C.	0.72	0.23	0.77	0.85	1.26	0.94	C
	No S.H.	1.28	0.42	0.81	0.95	1.23	0.9	C

جدول ب-۱۲: آزمایش سیزدهم (نمونه های سری A)

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
A-Control	Proposed	1.04	0.07	1.05	0.99	1.0	0.94	C
	Simplified	1.04	0.07	1.14	0.98	0.95	0.94	C
	No Crack	1.04	0.07	1.11	0.92	1.13	0.94	C
	No T.C.	0.87	0.27	1.11	0.95	1.14	0.94	C
	No S.H.	1.04	0.07	0.95	0.99	1.12	0.97	C
A-AT	Proposed	1.04	0.07	0.95	0.91	---	0.9	C
	Simplified	1.04	0.07	0.97	0.96	---	0.9	C
	No Crack	1.04	0.07	0.95	0.95	---	0.9	C
	No T.C.	0.84	0.28	0.98	0.94	---	0.9	C
	No S.H.	1.04	0.07	0.95	0.95	---	0.93	C
A-AK	Proposed	1.03	0.07	1.00	0.9	---	0.93	C
	Simplified	1.03	0.07	1.02	0.99	---	0.93	C
	No Crack	1.03	0.07	1.00	0.95	---	0.93	C
	No T.C.	0.84	0.28	1.02	0.95	---	0.93	C
	No S.H.	1.03	0.07	1.00	0.9	---	0.97	C

ادامه جدول ب-۱۲: آزمایش سیزدهم (نمونه های سری A)

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
A-C1	Proposed	1.04	1.02	1.01	1.03	---	1.27	C
	Simplified	1.04	1.02	1.03	1.02	---	1.27	C
	No Crack	1.04	1.02	1.01	0.95	---	1.27	R
	No T.C.	0.84	0.95	1.04	0.95	---	1.27	C
	No S.H.	1.04	1.02	1.01	1.03	---	1.27	R

جدول ب-۱۳: آزمایش سیزدهم (نمونه های سری B)

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
B-Control	Proposed	0.98	1.02	1.04	1.06	1.27	1.24	C
	Simplified	0.98	1.02	1.11	1.09	1.18	1.24	C
	No Crack	0.98	1.02	1.14	1.02	1.21	1.24	C
	No T.C.	0.46	0.95	1.16	1.05	1.21	1.24	C
	No S.H.	0.98	1.02	1.04	1.06	1.09	1.24	C
B-AT	Proposed	0.92	1.03	1.0	1.02	---	1.25	C
	Simplified	0.92	1.03	0.98	1.04	---	1.25	C
	No Crack	0.92	1.03	0.98	0.97	---	1.25	C
	No T.C.	0.86	0.97	1.02	0.95	---	1.25	C
	No S.H.	0.92	1.03	1.0	1.02	---	1.24	C
B-AK	Proposed	1.06	1.02	1.01	0.99	---	1.25	C
	Simplified	1.06	1.02	1.0	1.01	---	1.25	R
	No Crack	1.06	1.02	1.11	0.96	---	1.25	R
	No T.C.	0.68	0.95	1.03	0.98	---	1.25	R
	No S.H.	1.06	1.02	1.01	0.95	---	1.25	R
B-C1	Proposed	0.92	1.03	1.04	1.05	---	1.25	R
	Simplified	0.92	1.03	1.03	1.07	---	1.25	R
	No Crack	0.92	1.03	1.15	1.03	---	1.25	R
	No T.C.	0.84	0.95	0.97	0.94	---	1.25	R
	No S.H.	0.92	1.03	1.04	1.03	---	1.24	R
B-C2	Proposed	0.92	1.03	---	---	---	1.25	R
	Simplified	0.92	1.03	---	---	---	1.25	R
	No Crack	0.92	1.03	---	---	---	1.25	R
	No T.C.	0.84	0.95	---	---	---	1.25	R
	No S.H.	0.92	1.03	---	---	---	1.25	R



جدول ب-۱۴: آزمایش چهاردهم

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
A-C	Proposed	0.90	1.01	0.98	1.0	0.97	0.99	C
	Simplified	0.90	1.01	1.02	1.01	0.95	0.98	C
	No Crack	0.90	1.01	1.0	0.99	0.97	0.99	C
	No T.C.	0.75	0.98	1.0	0.99	0.97	0.98	C
	No S.H.	0.90	1.0	0.98	1.0	0.96	0.99	C
A-S1	Proposed	0.99	1.01	0.97	0.98	1.32	1.32	C
	Simplified	0.99	1.01	0.97	0.98	1.31	1.33	C
	No Crack	0.99	1.01	1.0	0.98	1.33	1.31	C
	No T.C.	0.99	0.98	1.0	0.98	1.35	1.35	C
	No S.H.	0.99	1.01	0.97	0.98	1.33	1.32	C
B-C	Proposed	0.90	0.98	0.64	0.82	---	0.79	C
	Simplified	0.90	0.98	0.63	0.83	---	0.79	C
	No Crack	0.90	0.98	0.67	0.81	---	0.79	C
	No T.C.	0.80	0.97	0.67	0.81	---	0.79	C
	No S.H.	0.90	0.98	0.64	0.82	---	0.79	C
B-S1	Proposed	1.90	1.08	---	---	1.80	1.80	C
	Simplified	1.90	1.08	---	---	1.79	1.81	C
	No Crack	1.90	1.08	---	---	1.82	1.80	C
	No T.C.	1.70	0.91	---	---	1.82	1.85	C
	No S.H.	1.90	1.08	---	---	1.84	1.85	C
B-SF	Proposed	---	---	---	---	---	1.44	C
	Simplified	---	---	---	---	---	1.44	C
	No Crack	---	---	---	---	---	1.44	C
	No T.C.	---	---	---	---	---	1.44	C
	No S.H.	---	---	---	---	---	1.44	C

جدول ب-۱۵: آزمایش پانزدهم (نمونه های سری A و B)

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
Control A/B	Proposed	0.50	0.77	0.96	0.98	---	0.92	C
	Simplified	0.50	0.77	1.00	0.98	---	0.93	C
	No Crack	0.50	0.77	1.03	0.97	---	0.92	C
	No T.C.	0.42	0.83	0.92	0.96	---	0.92	C
	No S.H.	0.50	0.77	0.96	0.98	---	0.92	C

ادامه جدول ب-۱۵: آزمایش پانزدهم (نمونه های سری A و B)

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
A3	Proposed	0.49	0.15	0.82	1.01	---	0.99	R
	Simplified	0.49	0.15	0.90	1.05	---	0.91	R
	No Crack	0.49	0.15	0.94	0.99	---	0.97	R
	No T.C.	0.35	0.12	0.83	0.96	---	0.97	R
	No S.H.	0.49	0.15	0.82	1.01	---	0.99	R
B1	Proposed	0.55	1.07	0.82	1.03	1.09	1.02	R
	Simplified	0.55	1.07	0.91	1.06	1.07	1.08	R
	No Crack	0.55	1.07	0.95	1.01	1.06	1.02	R
	No T.C.	0.38	0.17	0.96	1.01	1.06	1.08	R
	No S.H.	0.55	1.07	0.82	1.03	1.09	1.02	R
B2	Proposed	0.67	1.05	0.84	0.98	0.89	0.94	R
	Simplified	0.67	1.05	0.94	1.01	0.77	0.94	R
	No Crack	0.67	1.05	0.97	0.95	0.76	1.02	R
	No T.C.	0.48	0.16	0.85	0.93	0.76	0.93	R
	No S.H.	0.67	1.05	0.84	0.98	0.90	0.94	R
B4	Proposed	0.74	1.11	0.84	1.02	0.78	0.93	R
	Simplified	0.74	1.11	0.92	1.07	0.74	0.93	R
	No Crack	0.74	1.11	0.96	1.0	0.80	0.93	R
	No T.C.	0.51	0.18	0.84	0.92	0.80	0.93	R
	No S.H.	0.74	1.11	0.84	1.02	0.85	0.93	R

جدول ب-۱۶: آزمایش پانزدهم (نمونه های سری C و D)

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
Control C/D	Proposed	0.34	1.10	0.86	1.04	0.90	0.97	C
	Simplified	0.34	1.10	0.90	1.06	0.87	0.97	C
	No Crack	0.34	1.10	0.94	1.01	0.90	0.97	C
	No T.C.	0.25	0.16	1.01	1.03	0.91	0.97	C
	No S.H.	0.34	1.10	0.86	1.04	0.93	0.94	C
C3	Proposed	0.49	0.93	0.83	0.98	0.74	0.95	R
	Simplified	0.49	0.93	0.74	1.03	0.77	0.96	R
	No Crack	0.49	0.93	0.76	0.91	0.77	0.95	R
	No T.C.	0.40	0.16	0.81	0.91	0.78	0.95	R
	No S.H.	0.49	0.93	0.83	0.98	0.74	0.95	R

ادامه جدول ب-۱۶: آزمایش پانزدهم (نمونه های سری C و D)

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
D2	Proposed	0.81	0.95	0.83	1.10	---	2.07	R
	Simplified	0.81	0.95	0.90	1.15	---	2.07	R
	No Crack	0.81	0.95	0.93	1.17	---	2.07	R
	No T.C.	0.55	0.95	0.94	1.11	---	2.07	R
	No S.H.	0.81	1.00	0.83	1.10	---	2.07	R

جدول ب-۱۷: آزمایش شانزدهم

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
R2C	Proposed	0.83	1.05	1.03	1.09	1.24	1.35	C
	Simplified	0.83	1.05	1.05	1.04	1.26	1.35	C
	No Crack	0.83	1.05	1.04	1.08	1.29	1.35	C
	No T.C.	0.89	0.94	0.92	1.07	1.29	1.35	C
	No S.H.	0.83	1.05	1.03	1.05	1.19	1.35	C
R2O	Proposed	0.83	1.04	0.74	0.85	0.89	0.95	R
	Simplified	0.83	1.04	0.80	0.95	0.78	0.95	R
	No Crack	0.83	1.04	0.79	0.88	0.78	0.95	R
	No T.C.	0.86	0.95	0.79	0.88	0.78	0.95	R
	No S.H.	0.83	1.04	0.74	0.85	0.91	0.95	R
R3C	Proposed	0.80	1.12	0.95	1.04	1.0	1.1	C
	Simplified	0.80	1.12	0.93	1.06	0.96	1.1	C
	No Crack	0.80	1.12	1.0	1.02	1.07	1.1	C
	No T.C.	0.74	0.95	0.93	1.05	1.07	1.1	C
	No S.H.	0.80	1.12	0.95	1.04	1.10	1.1	C
R3O	Proposed	0.93	1.08	0.98	0.95	0.76	0.85	R
	Simplified	0.93	1.08	1.01	0.97	0.76	0.85	R
	No Crack	0.93	1.08	0.95	0.94	0.77	0.85	R
	No T.C.	0.83	0.95	0.95	0.94	0.77	0.85	R
	No S.H.	0.93	1.08	0.98	0.95	0.76	0.85	R

جدول ب-۱۸: آزمایش هفدهم

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
Control	Proposed	0.97	0.99	0.68	0.96	0.92	0.99	C
	Simplified	0.97	0.95	0.64	1.02	0.95	0.94	C
	No Crack	0.97	0.99	0.63	0.95	0.89	1.00	C
	No T.C.	0.86	0.94	0.66	0.94	0.90	0.97	C
	No S.H.	0.97	0.99	0.68	0.95	0.90	0.96	C
C-1	Proposed	0.97	0.97	0.66	1.0	0.83	0.99	R
	Simplified	0.97	0.97	0.68	0.98	0.88	0.97	R
	No Crack	0.97	0.97	0.66	0.92	0.92	0.99	R
	No T.C.	0.87	0.93	0.69	0.93	0.93	0.93	R
	No S.H.	0.97	0.97	0.66	1.0	0.83	0.94	R
C-2	Proposed	0.96	1.0	0.74	1.21	1.72	1.99	C
	Simplified	0.96	1.0	0.74	1.20	1.74	1.99	C
	No Crack	0.96	1.0	0.72	1.19	1.77	1.99	C
	No T.C.	0.76	0.95	0.74	1.19	1.77	1.99	C
	No S.H.	0.96	1.0	0.74	1.21	1.75	1.99	C

جدول ب-۱۹: آزمایش هجدهم

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
B1	Proposed	1.0	1.09	1.20	1.09	1.70	1.97	C
	Simplified	1.0	1.06	1.25	1.07	1.68	1.97	C
	No Crack	1.0	1.09	1.24	1.08	1.70	1.97	C
	No T.C.	0.87	0.95	1.24	1.09	1.70	1.97	C
	No S.H.	1.0	1.09	1.20	1.09	1.77	1.99	C
B2	Proposed	0.99	1.04	1.0	1.07	---	1.97	C
	Simplified	0.99	1.04	1.03	1.08	---	1.99	C
	No Crack	0.99	1.04	1.10	1.09	---	1.99	C
	No T.C.	0.83	0.99	1.02	1.0	---	1.99	C
	No S.H.	0.99	1.04	1.0	1.04	---	1.99	C

جدول ب-۲۰: آزمایش نوزدهم

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
A2	Proposed	0.94	1.01	1.18	1.01	0.95	1.00	C
	Simplified	0.94	1.01	1.16	1.02	0.93	1.00	C
	No Crack	0.94	1.01	1.27	1.0	0.94	1.00	C
	No T.C.	0.68	0.91	1.28	1.0	0.94	1.00	C
	No S.H.	0.94	1.01	1.18	1.01	0.92	1.00	C
B2	Proposed	0.92	1.06	1.34	1.52	0.89	1.00	C
	Simplified	0.92	1.01	1.38	1.62	0.89	1.00	C
	No Crack	0.92	1.06	1.42	1.53	0.90	1.00	C
	No T.C.	0.78	0.97	1.30	1.49	0.90	1.00	C
	No S.H.	0.92	1.06	1.34	1.52	0.90	1.00	C

جدول ب-۲۱: آزمایش بیستم (نمونه های سری A)

Samples	Models	Crack Beginning		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\frac{\Delta_{cr,model}}{\Delta_{cr,Exp.}}$	$\frac{P_{cr,model}}{P_{cr,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{y,model}}{\Delta_{y,Exp.}}$	$\frac{P_{y,model}}{P_{y,Exp.}}$	$\frac{\Delta_{max,model}}{\Delta_{max,Exp.}}$	$\frac{P_{max,model}}{P_{max,Exp.}}$	
A1	Proposed	0.68	1.09	1.0	1.0	---	1.00	C
	Simplified	0.68	1.09	0.98	1.09	---	1.00	C
	No Crack	0.68	1.09	0.96	0.92	---	1.00	C
	No T.C.	0.65	0.94	0.96	0.93	---	1.00	C
	No S.H.	0.68	1.09	1.0	1.0	---	1.00	C
A4	Proposed	0.97	1.09	---	---	---	1.00	C
	Simplified	0.97	1.09	---	---	---	1.00	C
	No Crack	0.97	1.09	---	---	---	1.00	C
	No T.C.	0.77	0.91	---	---	---	1.00	C
	No S.H.	0.97	1.09	---	---	---	1.00	C
A5	Proposed	1.0	1.0	---	---	---	1.00	C
	Simplified	1.0	1.0	---	---	---	1.00	C
	No Crack	1.0	1.0	---	---	---	1.00	C
	No T.C.	0.95	0.96	---	---	---	1.00	C
	No S.H.	1.0	1.0	---	---	---	1.00	C

جدول ب-۲۲: آزمایش بیستم (نمونه های سری B)

Samples	Models	Crack Begining		Steel Yielding		Ultimate		Failure Mode
		$\Delta_{cr,model}$	$P_{cr,model}$	$\Delta_{y,model}$	$P_{y,model}$	$\Delta_{max,model}$	$P_{max,model}$	
		$\Delta_{cr,Exp.}$	$P_{cr,Exp.}$	$\Delta_{y,Exp.}$	$P_{y,Exp.}$	$\Delta_{max,Exp.}$	$P_{max,Exp.}$	
B1	Proposed	1.0	1.04	0.80	0.95	---	1.05	C
	Simplified	1.0	1.04	0.99	1.04	---	1.05	C
	No Crack	1.0	1.04	1.18	0.90	---	1.05	C
	No T.C.	0.90	0.13	1.34	0.87	---	1.05	C
	No S.H.	1.0	1.04	0.80	0.95	---	1.05	C
B2	Proposed	0.87	0.97	0.99	1.0	1.1	1.0	R
	Simplified	0.87	0.97	1.03	1.02	1.08	1.01	R
	No Crack	0.87	0.97	1.18	0.95	1.08	0.95	R
	No T.C.	0.80	0.16	1.18	0.89	1.10	0.94	R
	No S.H.	0.87	0.97	0.99	1.0	1.12	1.0	R
B3	Proposed	0.85	1.0	1.0	1.01	1.41	1.01	R
	Simplified	0.85	1.0	1.01	1.02	1.56	1.03	R
	No Crack	0.85	1.0	1.18	1.01	1.53	1.07	R
	No T.C.	1.0	0.29	1.09	0.99	1.53	1.07	R
	No S.H.	0.85	1.0	1.0	1.01	1.32	1.07	R

پیوست - ج : متن اصلی برنامه مدل پیشنهادی تحت نرم افزار

## MATLAB 6.5.1

\*\*\*\*\* Main Function \*\*\*\*\*

```
function data = crack_fib2 (filename,PED,PCCS) ;
load (filename);

          ***** Calculate Concrete Parameters *****

Eco = 21500 ;
fcmo = 10 ;
fcm = fc + 8 ;
Eci = Eco*[fcm/fcmo]^(1/3) ;
epscl = 0.0022 ;
Ecl = fcm / 0.0022 ;
fctkom = 1.40 ;
fcko = 10 ;
fctm = fctkom * (fc/fcko)^(2/3) ;
epsctl = 0.9*fctm / Eci ;

if dmax <= 8
    GFo = 0.025 ;
    alfaf = 8 ;
elseif dmax <= 16
    GFo = 0.030 ;
    alfaf = 7 ;
elseif dmax <= 32 ;
    GFo = 0.058 ;
    alfaf = 5 ;
end
GF = GFo * (fcm/fcmo)^0.7 ;
wc = alfaf*GF/fctm ;
w1 = 2*GF/fctm - 0.15*wc ;

          ***** Calculate FRP Plate Area *****

Af = t * nf * bf ;
```

```

***** Assume Same of Constant Equal to Zero *****

L = 0 ;
Frk = 0 ;
Frf = 0 ;
kkkk = 0 ;

***** Assume First Amount for Neutral Axes Depth *****

c = 0.3 * d ;

*** Start to Calculation of Moment of Section For each Strain of Extreme Compressive Fiber ***
      (First Loop)

for epsc = 0:0.0001:0.0035

    L = L + 1 ;
    Mo1 = 0 ;
    Mo2 = 20;
    number = 0 ;
    Br = 1 ;
    numb = 0 ;
    BBt = 0 ;

    ***** Converge the Moment of Section and Crack Width *****
      (Second Loop)

    while (abs(Mo1-Mo2) > 0.001*Br) & (BBt == 0)
        FT = 0 ;
        p1 = 0 ;
        p2 = 0 ;
        n = 0 ;
        numb = numb + 1 ;
        if numb > 100
            numb = 0 ;
            Br = 10 * Br ;
        end
        BT = 1 ;
        numbt = 0 ;

        ***** Converge the Neutral Axes Depth with Balance of Forces *****
      (Third Loop)

        while abs (FCCS - FT) > BT
            numbt = numbt + 1 ;
            if numbt > 100
                numbt = 0 ;
                BT = 10 * BT;
                if BT > 10000
                    BBt = 1 ;
                    break
                end
            end
            end
            sum1 = 0 ;
            sum2 = 0 ;
            sum3 = 0 ;
            sum4 = 0 ;
            sum5 = 0 ;

```



\*\*\*\*\* Calculate of Concrete Compressive Force \*\*\*\*\*

```
for i=10:-1:1
    epsci = (i-0.5)*epsc / 10 ;
    f(i) = fcm*[(Eci*epsci)/(Ec1*epscl) - (epsci/epscl)^2] / [1 +
        (Eci/Ec1 - 2)*epsci/epscl] ;
    fcc = fcc + f(i) ;
    sum1 = sum1 + f(i)*(i-0.5)*c/10 ;
end
if (f(10)/fcm < 0.5 & f(10)<f(9))
    con = 1 ;
    break
end
if fcc ~= 0
    Zc = sum1/fcc ;
end
FCC = fcc*c*b/10 ;
```

\*\*\*\*\* Calculat of Concrete Tension Force \*\*\*\*\*

```
if number >= 1
    if Mk < Mcr
        Zeta = 0;
    else
        Zeta = 1-(Mcr/Mk)^2;
    end

    Aceff = min([2.5*b*(h-d) , b*(h-c)/3]) ;
    Roeq = (As + Af*Ef/Es)/(b*d) ;
    Roceff = Aceff/(b*d) ;
    eps2 = epsc*(d-c)/c ;
    Nrkr = eps2*(Es*As + Ef*Af) ;

    w = 1.89*Zeta*Roceff*Nrkr/(Es*Roeq*(us + 0.694*bf)) ;
else
    w = 2*(h-d)*(h-c)*epsc/c ;
end
k = 0 ;
for i=1:10
    epsct = epsc*(i-0.5)*(h-c)/(10*c) ;
    if epsct > 0.00015
        wct = (i-k-0.5)*w/(10-k) ;
    end
    if epsct <= epsct1
        Fct(i) = Eci*epsct*(h-c)*b/10 ;
        FCT1 = FCT1 + Fct(i) ;
        sum2 = Fct(i)*(i-0.5)*(h-c)/10 + sum2 ;
        k = k + 1;
    elseif epsct <= 0.00015
        Fct(i) = [fctm - 0.1*fctm*(0.00015-epsct)/(0.00015-
            0.9*fctm/Eci)]*(h-c)*b/10 ;
        FCT2 = FCT2 + Fct(i) ;
        sum3 = Fct(i)*(i-0.5)*(h-c)/10 + sum3 ;
        k = k + 1;
    elseif wct <= w1
        Fct(i) = fctm*[1 - 0.85*wct/w1]*(h-c)*b/10 ;
        FCTC1 = FCTC1 + Fct(i) ;
        sum4 = Fct(i)*(i-0.5)*(h-c)/10 + sum4 ;
    elseif wct <= wc
        Fct(i) = [0.15*fctm*(wc - wct)/(wc-w1)]*(h-c)*b/10 ;
        FCTC2 = FCTC2 + Fct(i) ;
        sum5 = Fct(i)*(i-0.5)*(h-c)/10 + sum5 ;
    else
```

```

        Fct(i) = 0 ;
    end
end
if FCT1 ~= 0
    Zt1 = sum2/FCT1 ;
end
if FCT2 ~= 0
    Zt2 = sum3/FCT2 ;
end
if FCTC1 ~= 0
    Zt3 = sum4/FCTC1 ;
end
if FCTC2 ~= 0
    Zt4 = sum5/FCTC2 ;
end

FCT = FCT1 + FCT2 + FCTC1 + FCTC2 ;

***** Calculate of Compressive Steel Force *****

epssc = epsc*(c-dc)/c ;
fsc = Esc * epssc ;
if fsc > fyc
    fsc = fyc ;
end
Fsc = fsc * Asc ;
Zsc = c-dc ;

***** Calculate of Total Compressive Force *****

FCCS = Fsc + FCC ;

***** Calculate of Tension Steel Force *****

epss = epsc*(d-c)/c ;
fs = Es * epss ;
if fs > fy
    fs = fy + (epss-fy/Es)*Es2;
    Frs = 1 ;
end
Fs = fs * As ;
Zs = d-c ;

***** Calculate of FRP Force *****

if (Af * ffu * Ef > 0)
    Frf = 0 ;
    Frk = 0 ;
    epsf = epsc*(h-c)/c ;
    ff = Ef * epsf ;
    if ff > ffu
        ff = 0 ;
        Frf = 1 ;
        Frk = 1 ;
    end
    Ff = ff * Af ;
    Zf = h-c ;
else
    Ff = 0 ;
    Zf = 0 ;
end

***** Calculate of Total Tension Force *****

FT = Fs + Ff + FCT ;

```

```

n = n + 1 ;
if round(n/2) == n/2
    C(2) = c ;
else
    C(1) = c ;
end
if FCCS > FT
    if p2 == 0
        c = c - d/50 ;
    else
        c = c - abs((C(1) - C(2))/2) ;
    end
    p1 = 1 ;
end
if FCCS < FT
    if p1 == 0
        c = c + d/50 ;
    else
        c = c + abs((C(1) - C(2))/2) ;
    end
    p2 = 1 ;
end
end
end

***** End of Third Loop *****

if con == 1
    break
end

***** Calculate of Total Moment *****

M(L) = FCC*Zc + FCT1*Zt1 + FCT2*Zt2 + FCTC1*Zt3 + FCTC2*Zt4 + Fs*Zs +
      Fsc*Zsc + Ff*Zf ;

***** Calculate of Curvature *****

wp(L) = epsc/c ;

number = number + 1 ;
if round(number/2) == number/2
    Mo2 = M(L) ;
else
    Mo1 = M(L) ;
end
if number == 1
    Mk = Mo1 ;
else
    Mk = (Mo1 + Mo2)/2 ;
end
end

***** End of Second Loop *****

if con == 1
    break
end

***** Control of VPP Tolerance on VPP Substrate *****

if Ff == 0 & epsc > 0 & Af > 0
    Af = 0 ;
    bf = 0 ;

```

```

        break
    end

    F(L) = 2*M(L) / (L2+L1) ;
    if F(L) > PED & PED <= PCCS & control_beam == 0
        Frk = 2
        break
    elseif F(L) > PCCS & PED > PCCS & control_beam == 0
        Frk = 3
        break
    else
        PPP(L) = F(L);
    end

    ***** Calculate of Mid-Span Deflection *****

    deltam = 0 ;
    for nmu = 1 : 50
        Me(nmu) = (0.02*nmu-0.001)*M(L) ;
        Mde = Me(nmu) ;
        if L > 1
            wpk(nmu) = interp1(M,wp,Mde) ;
        else
            wpk(nmu) = (0.02*nmu-0.001)*wp(L) ;
        end
        if round(L/5) == L/5 & round(nmu/5) == nmu/5
            end
            deltam = deltam + wpk(nmu) * (0.02*nmu-0.001) * (L1+L2)^2/50 ;
        end
        delta(L) = (wp(L)*L3*(L1+L2+L3/2) + deltam) ;

        ***** Calculate of Steel Yielding Parameter *****

        if fs > fy & dfs == 0
            My = M(L) ;
            Fy = F(L) ;
            wpy = wp(L) ;
            dfs = 1 ;
        end
        if dfs == 1 & dfl == 0
            deltay = delta(L) ;
            dfl = 1 ;
        end

        ***** Calculate of Concrete Cracking Parameter *****

        epsct = epsc*(h-c)/c ;
        if epsct > 0.00015 & dfk == 0
            Mcr = M(L) ;
            Fcr = F(L) ;
            wpcr = wp(L) ;
            dfk = 1 ;
        end

        if dfk == 1 & dfn == 0
            deltacr = delta(L) ;
            dfn = 1;
        end
    end
end

***** End of First Loop *****

```

\*\*\*\*\* Calculate of Ultimate Parameter \*\*\*\*\*

```
if dfk == 1
    data(1) = Fcr/10^3 ;
    data(2) = deltacr ;
    data(3) = data(1)/Pcre ;
end
if dfs == 1
    data(4) = Fy/10^3 ;
    data(5) = deltay ;
    data(6) = data(4)/Pye ;
end
data(7) = max(F)/10^3 ;
data(8) = max(delta) ;
data(9) = data(7)/Pmaxe ;
```

\*\*\*\*\* Plot Force-Deflection Diagram \*\*\*\*\*

```
hold on
grid on

hl_Bagheri = plot (delta,F/1000) ;
set (hl_Bagheri,'linewidth',2,'color',[1 0 0],'Marker','s'
    , 'Markerfacecolor','auto','Markersize',5);
```

\*\*\*\*\* **END** \*\*\*\*\*

## **ABSTRACT**

Composite materials made of fibers in a polymeric resin, also known as fiber-reinforced polymers (FRP), have emerged as an alternative to traditional materials and techniques (such as steel plates and concrete jackets) for retrofitting of concrete structures. FRP materials as thin laminates or fabrics, have high strength to weight and stiffness to weight ratios and are chemically quite inert, offering significant potential for lightweight, cost effective and durable retrofit.

To improve the flexural behaviour of RC beams, FRP laminates can be bonded to the tension face of the beams to carry the tensile stresses caused by bending. The aim of this study is develop a model for the prediction of the complete behaviour of RC beams, retrofitted by FRP in flexure. In this model, the effects of concrete, steel and FRP are considered according to their strain and real stress-strain diagrams. The contribution of concrete in tension (before and after cracking) is also taken into account. To predict immature failures such as debonding of FRP and concrete cover separation, the relevant models are studied and the most reliable ones are selected and added to the model.

The model is able to predict the complete load-deflection response of RC beams, retrofitted by FRP, from the beginning of loading to the failure, under various configuration of loading. Comparing the results of the model with those of at least twenty experimental investigations indicates that the model can predict the failure type, failure load and also the load-deflection response of control and retrofitted beams, with good precision.

**Keywords:** Retrofitting, Fiber Reinforced Polymer (FRP), RC Beams, Debonding, Failure ,Crack.



Shahrood University of Technology  
Department of Civil Engineering

**Analysis of Failure of R.C. Beams Retrofitted by Fiber  
Reinforced Polymer (FRP) Considering the Behavior of  
Concrete After Cracking**

**A thesis submitted in partial fulfillment of  
The requirements for the degree of  
Master of Science  
(Structural Engineering)**

This thesis was presented

By :

**Abbas Bagheri**

Supervisor :

**Dr. Farshid J. Alaei**

July 2005