

بررسی و ارزیابی صحت مدل شکست تیرهای بتن مسلح تقویت شده با صفحات کامپوزیت کربن / اپوکسی

حمید وارسته پور

استادیار موسسه آموزش عالی صنعت آب و برق

H.Varastehpour@ieht.ac.ir

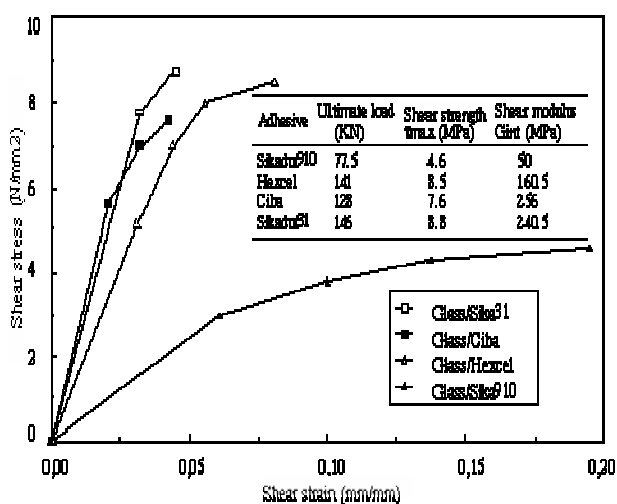
چکیده

از کاربردهای مهم صفحات کامپوزیت پیشرفته در مهندسی عمران، تقویت تیرهای بتن آرمه به روش اتصال صفحات کامپوزیت کربن / اپوکسی (CFRP) به سطح خارجی تیر است. برای تعیین ظرفیت باربری نهایی این تیرها باید اطلاعات لازم در رابطه با رفتار مکانیکی و نوع شکست داشته باشیم. انواع شکست محتمل تیرهای بتنی شامل شکست کششی صفحه کامپوزیت، له شدگی بتن در قسمت فشاری و یا جداسدن صفحه در محل اتصال (Debonding) می باشد. در این مقاله مکانیزم شکست های زودرس و جزئیات جداسدگی صفحه از بتن توضیح داده می شود. ضمناً با استفاده از نتایج تجربی بدست آمده توسط محققین صحت مدل و معادله غیر خطی ارائه شده در این مقاله که قادر به پیش بینی بار گسیختگی در زمان شکست زود رس می باشد بررسی میگردد.

واژه های کلیدی: شکست تیرها، رفتار غیرخطی، کامپوزیت پیشرفته، جداسدگی، مطالعات پارامتری و تجربی

۱- مقدمه

مکانیکی سطح مشترک تیر - ورق لازم می‌باشد. جهت تعیین رابطه میان بار اعمال شده و لغزش ورق در سطح مشترک، آزمایش برش مستقیم انجام شده است. برای هر نوع ترکیب سطح مشترک (ورق، چسب) نتیجه آزمایش نشان می‌دهد که رابطه کرنش - تنش برشی در سطوح مشترک، بیانگر یک رفتار دوخطی است که مشخصاً این رفتار بستگی زیادی به خصوصیات سطح مورد نظر دارد (شکل ۱).



شکل ۱: تغییرات تنش - کرنش در آزمایش برشی مستقیم برای مواد گوناگون [2]

روش تعیین مکانیسم لغزش براساس این واقعیت است که میزان کرنش ورق در هر افزایش کرنش در لایه فوقانی نسبت به لایه مجاور کاهش نسبی می‌یابد. این کاهش متناسب با لغزش (جابجایی نسبی ورق) می‌باشد. قاعده اساسی در این روش محاسبه تنش برشی در فصل مشترک و سپس محاسبه لغزش کلی با استفاده از روابط تجربی کرنش - تنش می‌باشد. با در نظر گرفتن قانون رفتاری فصل مشترک بتن/ورق و اصلاح کرنش ورق در هر تکرار نرم افزار تهیه شده پدیده لغزش را اعمال می‌کند [4].

۲- تعیین ظرفیت نهایی و مدهای مختلف شکست

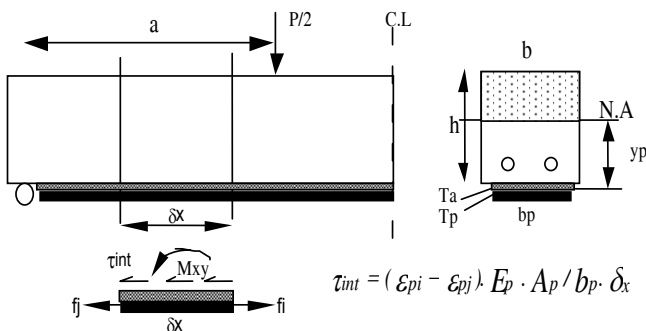
برای یک تیر تقویت شده به وسیله ورق FRP مدهای مختلف گسیختگی وجود دارد. در ابتدا باید از مدهای شکست معمولی نام برد: - گسیختگی ورق FRP بعلا افزایش تنش کششی - خرد شدن بتن در ناحیه فشاری. اما در این روش مقاوم سازی احتمال گسیختگی زود هنگام بعلا جداشدگی ورق از محل اتصال وجود

تقویت سازه‌های بتنی به صورت درجا جهت افزایش ظرفیت نهایی و سختی توسط اتصال خارجی ورق کامپوزیت (CFRP) با استفاده از رزین اپوکسی به نظر راهی عملی و امکان پذیر می‌باشد. مواد کامپوزیت به علت استحکام و سختی زیاد، مقاومت در برابر خوردگی و وزن مخصوص اندک، در کاهش وزن و افزایش عملکرد سازه‌ای دارای اهمیت زیادی می‌باشند. همچنین استفاده از این مواد به علت سهولت تهیه، سرعت نصب، امکان بهینه‌سازی (گزینه نوع مسلح سازی و جهت)، چند عملکردی (استحکام، سفتی، ضد خوردگی) می‌تواند در سازه‌ها مورد توجه بسیاری قرار گیرند. این موارد، پارامترهای اصلی جهت انتخاب مواد کامپوزیت در تقویت سازه‌ها می‌باشد. برای تعیین ظرفیت نهایی تیر بتنی تقویت شده روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده است:

الف) روش تحلیلی تقریبی تیر بتنی تقویت شده با ورق کامپوزیت (FRP) تحت بارگذاری به روش کلاسیک با استفاده از تئوری قدیمی تیر بتنی قابل تحقق است [1]. علاوه بر فرضیه‌های متداول، دو فرضیه زیر نیز در نظر گرفته شده است. چسبندگی ورق (FRP) به سطح بتن کامل است (این بدان معناست که هیچگونه لغزش نسبی بین ورق و بتن وجود ندارد) و مقاومت کششی بتن اندک است. با توجه به ویژگی مکانیکی مواد، رفتار مکانیکی ورق (FRP) به صورت الاستیک تا نقطه گسیختگی می‌باشد، رفتار فولاد نیز به طور کامل الاستو - پلاستیک و رفتار بتن با آئینامه ACI تعریف می‌گردد.

ب) در روش ارائه شده توسط محققین [2] برای پیش بینی ظرفیت نهایی تیر بتنی تقویت شده با ورقهای (FRP) روش غیر خطی غیر مستقیم مبتنی بر تکرار می‌باشد. که بر مبنای آن یک نرم افزار محاسباتی تهیه شده است. این مدل نظری که براساس سازگاری تغییر شکلهای و توازن نیروها در مقطع است، برای شبیه سازی رفتار غیر خطی مواد مناسب می‌باشد. رفتار غیرخطی مواد شامل ترک خوردگی بتن در اثر کشش که مرتبط با سختی کششی می‌باشد، شکل پذیری بتن در منطقه فشاری و شکل پذیری فولاد مسلح در منطقه کششی و فشاری می‌باشد. برای تعیین مدل رفتاری بتن در فشار از رابطه بین تنش و کرنش حاصل از مدل خطی الاستیک با فرضیه آسیب پذیری ایزوتروپی استفاده شده است [3].

ج) روش تحلیلی با در نظر گرفتن لغزش یا جابجایی نسبی ورق که این پدیده سختی تیر و همچنین ظرفیت نهایی را کاهش می‌دهد. در نتیجه در این نوع از مقاوم سازی باید افت ناشی از لغزش صفحه را لحاظ کنیم. برای این منظور تعیین ویژگیهای



شکل ۳: نحوه محاسبه تنش برشی در فصل مشترک [2]

که در معادله فوق، M_{xy} لنگر خمشی جداشدگی، T_a ضخامت چسب، و T_p ضخامت ورق FRP می‌باشد. تنش عمودی در انتهای ورق را که به دلیل لنگر خمشی جداشدگی ایجاد می‌شود به روش زیر می‌توان محاسبه نمود:

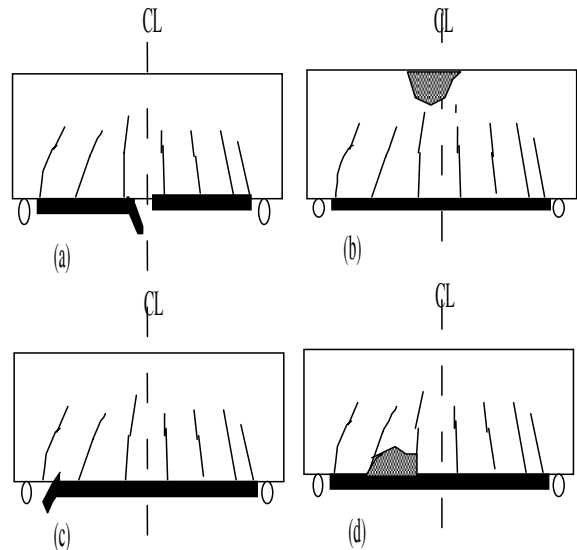
$$\sigma_n = K \cdot \tau_{int} \quad (3)$$

در این معادله، K پارامتری است که ارتباط بین تنش برشی و تنش نرمال در انتهای ورق را تعیین می‌کند که به ویژگیهای مکانیکی و فیزیکی ورق و چسب بستگی دارد [5] که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$K = 1.3 \left(\frac{T_p \cdot E_a}{T_a \cdot E_p} \right)^{0.25} \quad (4)$$

E_a , E_p به ترتیب مدول‌های الاستیک ورق و چسب می‌باشد. جهت تعیین ϕ از دو آزمایش متفاوت استفاده کردیم. ابتدا برای تعیین پارامتر چسبندگی C ، از روش تجربی تشریح شده در شکل ۱ استفاده نمودیم. در این نمونه‌ها تنها توزیع تنش برشی وجود دارد. مجموعه مونتاژ شده در معرض آزمایش بارگذاری فشاری مستقیم قرار گرفت. متغیرهای این آزمایش، انواع FRP و انواع رزین می‌باشد. شکل ۱ نمایانگر تغییرات تنش برشی در نمونه‌های متفاوت است. از نتایج آزمایش مقدار میانگین C برابر 5.4 Mpa تعیین می‌گردد. در قسمت دوم برای تعیین زاویه اصطکاک، تیرهای کوچک متفاوت و تقویت شده با FRP مورد استفاده قرار می‌گیرد [6]. تمامی نمونه‌ها تا حد شکست، بارگذاری شدند و در حین آزمایش، کرنش‌های ورق FRP به وسیله کرنش سنج اندازه‌گیری گردید. انواع FRP و انواع رزین، پارامترهای متغیر برای تیرهای کوچک بودند. با استفاده از نتایج نمونه‌های متفاوت که به دلیل debonding دچار شکست شدند، تنش برشی نهایی در قسمت سطح مشترک برابر با 4.2 Mpa

دارد. این جدا شدگی زود هنگام به دو علت می‌تواند باشد، دلیل و معیارهای مرتبط با این دو نوع شکست زودرس در این قسمت شرح داده می‌شود. (شکل ۲)



شکل ۲: شکست‌های مختلف تیر بتنی تقویت شده در بار نهایی [2]

الف) شکست به علت جداشدگی ورق از سطح مشترک

ممکن است سطح مشترک در جهتی موازی با سطح اتصال در اثر ترکیب تنش‌های عمودی و برشی ترک بردارد. معهذاً به هنگام جداشدگی، شکست را می‌توان با رابطه Mohr – Coulomb توصیف کرد که معادله آن به شرح داده شده است:

$$\tau_{int} + \sigma_n \cdot \tan \phi = C \quad (1)$$

که در آن τ_{int} نمایانگر تنش برشی فصل مشترک، C نمایانگر چسبندگی، σ_n تنش عمودی بر روی خط اتصال و ϕ نمایانگر زاویه اصطکاک داخلی است. دامنه تغییرات C (چسبندگی) و ϕ (زاویه اصطکاک) مربوط به خصوصیات سطح اتصال و خواص ماده چسبنده و بتن می‌باشد. برای حالت ساده که در آن توزیع تنش‌های برشی در ناحیه تکیه گاهی ثابت می‌باشد، می‌توان سیستم نیرو (شکل ۳) را با نیروی منفرد و ممان خمشی معادل که در امتداد مرکز ورق اعمال می‌گردد جایگزین کرد:

$$M_{xy} = b_p \cdot (T_a + T_p / 2) \cdot \tau_{int} \quad (2)$$

بود. با استفاده از معادله ۳ (رابطه بین تنش نرمال و برشی) و معادله ۱ (Mohr - coulomb) میانگین زاویه اصطکاک برابر ۳۳ درجه می‌باشد. با جایگزینی مقادیر ϕ و C به دست آمده در این تحقیق میزان تنش برشی مجاز در فصل مشترک به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_{adm} = 5.4 / (1 + ktg33) \quad (5)$$

که در آن، τ_{int} بیانگر میانگین تنش برشی در فصل مشترک بوده که به طور یکنواخت توزیع شود، و Lc ارتفاع مقطع در تیر یک سر در گیر که برابر با فاصله بین دو ترک متوالی در تیر می‌باشد، و همچنین bp عرض صفحه و d' ضخامت لایه بتنی بین ورق FRP و فولاد مسلح می‌باشد. جانشین سازی معادله (۷) در معادله (۶) و با استفاده از رابطه معادله $\sigma_A = f_t$ (تنش نهایی بتن در کشش)، تنش برشی مجاز در سطح مشترک به دست می‌آید:

$$\tau_{adm} = (f_t Lc / 6d') / (b / bp) \quad (8)$$

این معادله شکست زودرس ناشی از گسیختگی پوشش بتنی را توضیح می‌دهد و هنگامی که تنش برشی در قسمت سطح مشترک به τ_{adm} می‌رسد، گسیختگی ایجاد می‌شود. این مدل ثابت می‌کند که فاصله ترک‌ها (Lc) در تعیین بار نهایی مؤثر است. باید قبول کرد با توجه به توزیع تصادفی ترک‌ها در لایه بتنی که به عوامل متعددی وابسته است تعیین Lc بسیار مشکل است. نتایج تجربی و تست‌های آزمایشگاهی و مشاهده نحوه توزیع و گسترش ترک‌ها بیانگر این است که در زمان بارگذاری نحوه ایجاد و گسترش ترک‌ها در لایه بتنی بین آرماتورهای کششی و ورق بطور تقریب Lc (میانگین فاصله ترک‌ها) برابر با میانگین فاصله تنگنهای عرضی (S) و حد اکثر ۱۰۰mm در ناحیه برشی است.

۳- توزیع تنش های برشی در سطح مشترک ورق - بتن

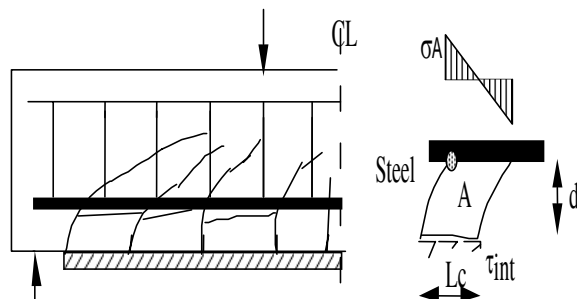
بدیهی است برای پیش‌بینی شکست زودرس تیر تقویت شده باید توزیع تنش‌های برشی در سطح مشترک در هنگام بارگذاری را محاسبه کرد. در این قسمت برای تعیین حداکثر تنش‌های برشی در سطح مشترک ورق / بتن به ارائه معادله جدیدی براساس مطالعات پارامتریک می‌پردازیم. براساس تعادل سیستم نیروهای داخلی، سازگاری کرنش در مقطع عرضی و رفتار الاستیک خطی

این معادله معیار گسیختگی به دلیل جداسدگی ورق در سطح مشترک را بیان می‌کند و هنگامی که تنش برش ماکزیمم در سطح مشترک به میزان تنش برشی مجاز می‌رسد گسیختگی پدید می‌آید.

ب) گسیختگی لایه بتنی بین ورق FRP و فولاد کششی (Rip Off)

بررسی تیرهای مختلف مقاوم شده با صفحات FRP بیانگر الگوی شکستی است که در هنگام گسیختگی می‌توان توسط شکل ۴ تعریف نمود. افزایش ترک‌ها را در ناحیه کششی تیر در لایه بتنی بین ورق FRP و فولاد کششی در زمان بارگذاری خواهیم داشت و در اثر افزایش ترک‌ها قسمتی از بتن که بین دو ترک متوالی قرار دارد همچون یک تیر یک سر در گیر عمل می‌کند [7].

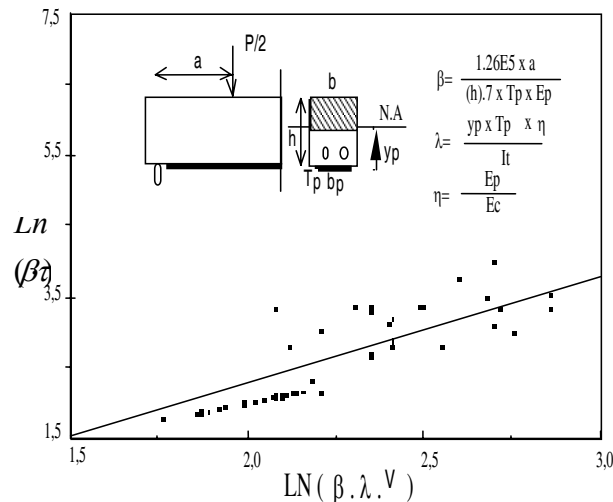
به هنگام بارگذاری بتن قرار گرفته شده بین دو ترک متوالی تمایل به خمیدگی تحت تنش‌های برشی در قسمتهای انتهایی را دارند. هنگامیکه تنش کششی بتن در قسمتی که با فولاد در تماس است (نقطه A) بیشتر از تنش کششی مجاز بتن (f_t) باشد، گسیختگی رخ می‌دهد. در این حالت معیار گسیختگی را می‌توان توسط مشخصات دندانه‌های جداگانه بین دو ترک متوالی و ضخامت پوشش بتنی محاسبه کرد.



شکل ۴ : نحوه گسترش ترک در لایه بتنی و رفتار آن [7]

$$\sigma_A = M_A \cdot (Lc / 2) / It \quad (6)$$

$$\tau_{int} = \frac{1}{2} \cdot \beta^{0.5} \cdot (\lambda \cdot V)^{1.5} \quad (11)$$



شکل ۵: استفاده از روش رگرسیون برای تعیین ارتباط بار و تنش [9]

مطالعات تئوری تیر تقویت شده با ورق FRP، نشان می‌دهد که ویژگیهای مکانیکی (سختی، مقاومت) به شدت بستگی به اثرات متقابل سطح مشترک بتن/ورق دارد. برای تعیین ظرفیت و سختی تیر، لازم است اثرات لغزش که به رفتار سطح مشترک و ویژگیهای مکانیکی آن وابسته است را محاسبه نمود. مدل نظری غیر خطی ارائه شده در این تحقیق به نظر روش مناسبی برای پیش‌بینی بار نهایی و نحوه گسیختگی تیر می‌باشد. ظرفیت نهایی تیر تقویت شده می‌تواند با استفاده از تئوری شکست زودرس تعیین گردد این شکست زودرس بعلمت جداشدگی ورق کامپوزیت از سطح مشترک می‌باشد. مطالعات شکست زودرس در این تحقیق نشان می‌دهد که این گسیختگی در سطح مشترک به دلیل ترکیب تنشهای نرمال و برشی در سطح مشترک، و یا گسیختگی لایه بتنی بین فولاد کششی و ورق FRP می‌باشد. معادله ۱۱ به ما اجازه می‌دهد توزیع تنش برشی را در قسمت سطح مشترک تعیین کنیم. برای محاسبه بار نهایی گسیختگی ناشی از جداشدگی، می‌توان با داشتن تنش مجاز برشی در سطح مشترک و رابطه بین بارگذاری اعمال شده و نیروی برشی به حل معادله مزبور پردازیم. به عنوان مثال در شرایطی که یک تیر تحت خمش خالص قرار گیرد. ($V = P/2$) خواهیم داشت:

$$P_{sep} = \frac{3.2 \pi a d m^{2/3}}{\lambda \cdot \beta^{1/3}} \quad (12)$$

مواد، میانگین تنش برش در فصل مشترک به روش زیر بدست می‌آید [8]:

$$\tau_{int} = \lambda \cdot V \quad (9)$$

که در آن V نمایانگر نیروی برش و λ سختی مقطع مورد نظر را نشان می‌دهد که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\lambda = (y_p \cdot T_p \cdot \eta) / I_t \quad \eta = E_p / E_c \quad (10)$$

معادله فوق T_p ضخامت ورق، η سهم مدول و I_t ممان اینرسی مقطع بتنی ترک خورده می‌باشد. با استفاده از نرم‌افزار غیر خطی ارائه شده توسط محقق، محاسبه تنش برشی در سطح مشترک در هر مرحله از بارگذاری برای دو مقطع در فاصله Δx (شکل ۳) صورت می‌گیرد. نتایج محاسبه بیانگر نوعی ارتباط هماهنگ بین دو روش تا زمان تسلیم شدن فولاد است (معادله ۹ و نرم‌افزار غیر خطی). پس از این نقطه تفاوت بین دو مقدار به طور چشم‌گیری زیاد می‌شود. که دلیل آن بسیار واضح است. زیرا زمانی که فولاد به نقطه تسلیم می‌رسد، ورق FRP، باید تمامی بار کششی را در مقطع تحمل کند. بنابراین، تنش برشی در سطح مشترک افزایش می‌یابد، و به همین دلیل شیب منحنی به شدت تغییر پیدا می‌کند. در حالی که در معادله ۹ که بدون در نظر گرفتن شکل پذیری فولاد ارائه شده است، شیب منحنی ثابت می‌باشد. برای شبیه‌سازی رفتار غیر خطی مواد در توزیع تنش برشی و تعیین تنش برشی ماکزیمم در فصل مشترک، ضرورت معرفی یک معادله جدید از نتایج محاسبات غیر خطی وجود دارد. با توجه به این موضوع، اثر پارامترهای گوناگون از قبیل سختی و ضخامت ورق، وضعیت هندسی مقطع، روش بارگذاری و غیره را در توزیع تنش برشی بررسی شده است [9]. در نتیجه این تحقیق، ضریب β را که از متغیرهای مهم موثر بر توزیع تنش برشی در فصل مشترک معرفی می‌گردد. شکل ۵ میانگین تغییرات حداکثر مقدار تنش برش نرمالایز شده در مثالهای متفاوت می‌باشد که به وسیله نرم‌افزار غیر خطی ارائه شده در این تحقیق تعیین شده است که پیرو تابعی از $\beta \cdot \lambda \cdot V$ در مقیاس لگاریتمی می‌باشد با استفاده از آنالیز رگرسیون بهترین خط مناسب جهت تعیین رابطه بین نیروی برشی و تنش برشی که در نتیجه آن معادله ۱۱ معرفی می‌گردد. این معادله غیر خطی رابطه تنش برشی در سطح مشترک ورق/بتن را با نیروی برشی در مقطع نشان می‌دهد.

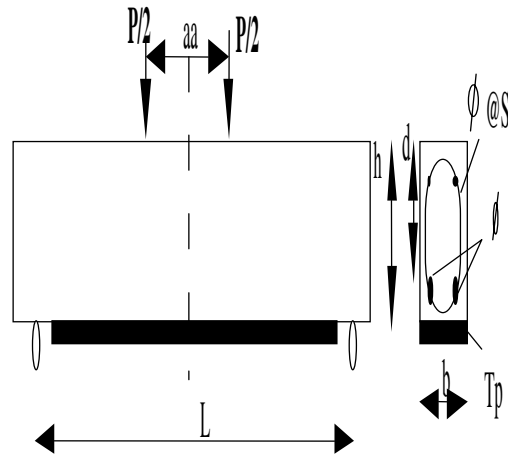
در این معادله، تنش برشی مجاز، کمترین مقدار محاسبه شده در معادله (۵) و (۸) می باشد. در مورد تیرهای مسلح شده با ورقه های CFRP، این بار نهایی جداشدگی (P_{sep}) همان ظرفیت نهایی تیر می باشد [10].

۴- ارزیابی صحت مدل پیشنهادی

در جدول ۳: y_p فاصله تار خنثی مقطع ترک خورده تا پائین تیر (mm) و I_t ممان اینرسی مقطع ترک خورده ($E7 * mm^4$) و τ_{adm} تنش مجاز برشی (MPa) و β, λ, η پارامترهای مقطع میباشند.

در جدول ۴ نتایج بار نهایی تجربی و تئوری در لحظه شکست تیر ارائه شده است. در این جدول P_{sep} بار گسیختگی نهایی (KN) (معادله ۱۲) و P_{exp} بار نهایی در تست آزمایشگاهی (KN) و نهایتاً P_{the} بار تئوری نهایی (KN) بدست آمده از نرم افزار غیر خطی است. در شکل ۷، ظرفیت نهایی تیرها (P_{exp}) با مقادیر نظری مورد مقایسه قرار گرفته است. نوع شکست گزارش شده در کلیه تیرها توسط محققین شکست زودرس ناشی از جداشدگی ورق کامپوزیت از سطح مشترک می باشد. این جداشدگی عمدتاً ناشی از گسیختگی لایه بتنی بین ورق کامپوزیت و آرماتورهای طولی است که در نتیجه آن تیر قبل از رسیدن به بار تئوری نهایی دچار گسیختگی شده و P_{exp} در تمام تیرها کمتر از P_{the} می باشد. این اختلاف کاملاً مرتبط با خصوصیات مکانیکی مواد و مقدار ورق CFRP استفاده شده برای مقاوم سازی می باشد. برای محاسبه بار نهایی ناشی از جداشدگی ورق (P_{sep}) مقدار تنش برشی مجاز در سطح مشترک در بیشتر حالات از معادله ۸ به دست می آید که بیانگر حاکم بودن این نوع گسیختگی در تیرهای تقویت شده می باشد. با استفاده از معادله ۱۲ مقدار این بار گسیختگی محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است. مقایسه مقادیر بار تجربی (P_{exp}) و بار تئوری (P_{the}) و بار گسیختگی (P_{sep}) نشان دهنده پیش بینی مناسب بار گسیختگی توسط معادله ۱۲ (شکل ۷) می باشد. مدل ارائه شده شکست و معادله بار گسیختگی می تواند نتایج مناسبی برای طراحان تیرهای بتنی تقویت شده با ورقهای CFRP و پیش بینی عملکرد تیر و انواع شکست محتمل در بار نهایی را ارائه دهد.

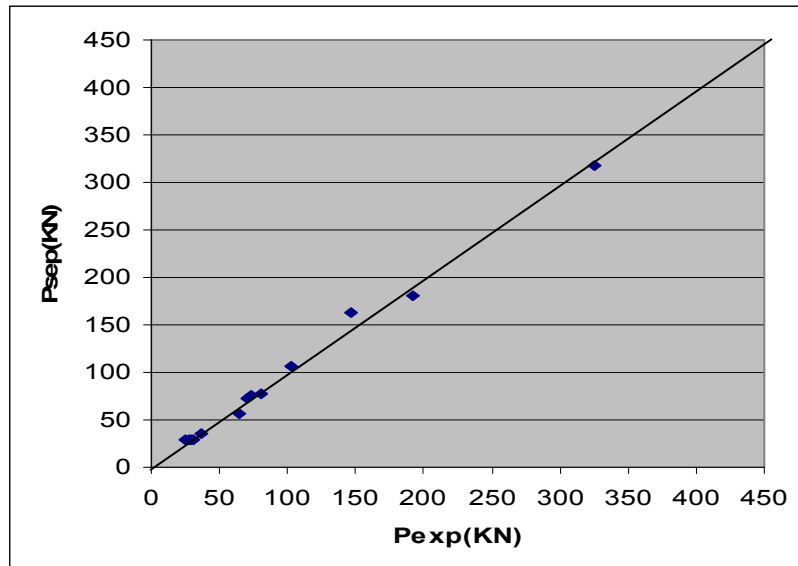
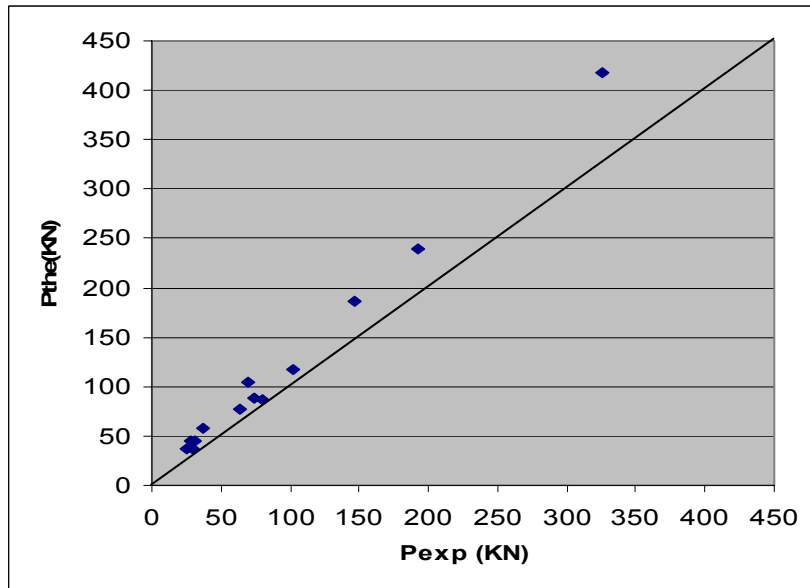
اعتبار مدل پیشنهادی حاضر (معادله ۱۲) از طریق مقایسه ظرفیت نهایی تئوری بدست آمده از نرم افزار غیر خطی با نتایج تجربی بدست آمده از تست های آزمایشگاهی توسط محققین مختلف ارزیابی می گردد. چهارده تیر مختلف با مشخصات فیزیکی و مکانیکی گوناگون توسط محققین در آزمایشگاه توسط ورقهای کربن/اپوکسی تقویت و تا مرحله شکست بار گذاری شده اند. B1 [11], B2[12], B3,B4,B5,B6,B7[13], B8[14], B9[15], B10 [16], B11 [17], B12 [18], B13,B14[19] این تیرها با مقطع مستطیلی تقویت شده به وسیله ورق CFRP (شکل ۶) تا حد گسیختگی، مورد آزمایش قرار گرفته اند و مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است.



شکل ۶: تیر بتنی تقویت شده

در جدول ۱: b عرض (mm)، h عمق مقطع (mm)، L طول تیر (mm)، aa فاصله ۲ بار متمرکز از هم (mm)، s فاصله تنگ های عرضی (mm)، ϕ قطر (mm)، N تعداد و d عمق موثر آرماتورهای طولی (mm) می باشد. کلیه تیرها با ورق های کامپوزیت کربن تقویت شده و مشخصات ورق و بتن در جدول ۲ آمده است.

در جدول ۲: T_p ضخامت (mm) و b_p عرض (mm) ورق کامپوزیت، σ_{up} و E_p برترتیب تنش نهایی کششی (MPa) و مدول الاستیسیته (GPa) ورق کامپوزیت و F'_c تنش فشاری ۲۸ روزه بتن (MPa) است.



شکل ۷: مقایسه ظرفیت نهائی با مقادیر تئوریک

جدول ۱: مشخصات تیر های بتنی تقویت شده

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
b	۱۵۰	۲۰۰	۷۶	۷۶	۷۶	۷۶	۷۶	۲۵۰	۱۵۰	۱۲۱۹	۳۰۰	۱۲۷	۲۰۰	۲۰۰
h	۲۵۰	۱۵۰	۱۲۷	۱۲۷	۱۲۷	۱۲۷	۱۲۷	۱۵۰	۳۰۰	۳۰۵	۵۷۴	۱۷۸	۱۵۰	۱۵۰
L	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۱۲۲۰	۱۲۲۰	۱۲۲۰	۱۲۲۰	۱۲۲۰	۲۰۰۰	۲۴۰۰	۴۴۲۰	۵۰۰۰	۱۶۸۰	۲۱۰۰	۲۱۰۰
aa	۶۰۰	۶۸۰	۳۰۵	۳۰۵	۳۰۵	۳۰۵	۳۰۵	۶۸۰	۶۰۰	۱۱۶۸	۱۵۰۰	۸۰	۶۰۰	۶۰۰
s	۸۰	۲۰۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۲۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۵۰	۱۰۰	۷۵	۷۵
ϕ	۱۴	۸	۴.۶	۴.۶	۴.۶	۴.۶	۴.۶	۸	۱۲.۷	۱۳	۴۳.۷	۹.۵	۱۶	۱۰
N	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
d	۲۱۵	۱۲۵	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۲۰	۲۴۶	۲۷۰	۵۲۰	۱۳۱	۱۲۰	۱۲۰

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و خواص مکانیکی تیرهای بتنی تقویت ش

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
TP	۲,۵	۱,۲۹	,۶۵	,۶۵	,۹	,۹	۱,۹	,۷۵	۱,۲۵	,۱۷	,۸۵	۱	۱,۱۵	۱,۱۵
bp	۱۵۰	۲۰۰	۶۳,۲	۶۳,۲	۶۳,۳	۶۳,۳	۶۳,۹	۲۰۰	۱۵۰	۱۲۱۹	۳۰۰	۱۲۷	۱۵۰	۱۵۰
σ_{up}	۱۳۸۰	۱۴۰۰	۱۴۵۰	۱۴۵۰	۱۴۵۰	۱۴۵۰	۱۴۵۰	۱۴۸۲	۱۴۹۰	۲۷۵۸	۲۷۵۸	۳۰۳۱	۱۵۳۲	۱۵۳۲
Ep	۱۱۷	۱۰۵	۱۸۶	۱۸۶	۱۸۶	۱۸۶	۱۸۶	۱۱۵,۳۴	۱۱۷,۹۰۵	۱۴۱	۱۴۸	۲۰۴,۷۲	۱۲۷	۱۲۷
F'c	۴۳,۵	۳۰	۴۴,۷	۴۴,۷	۴۴,۷	۴۴,۷	۴۴,۷	۳۰	۴۲	۴۱,۴	۳۶,۹	۳۴,۵	۵۴	۵۴

جدول ۳: پارامترهای مقطع

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
yp	۱۶۸,۸	۱۱۰,۳۲	۹۴,۶	۹۴,۶	۹۱,۷۶	۹۱,۷۶	۸۲,۷	۱۱۸	۲۲۳	۲۳۸	۳۶۳	۱۲۴	۹۸,۵	۱۰۹
It	۱۱۰,۵	۲۰,۱	۰,۴۳۸	۰,۴۳۸	۰,۵۲۳	۰,۵۲۳	۰,۸۲۶	۰,۱۶	۱۱	۶۹	۳۰۰	۲,۶	۳	۲
τ_{adm}	۲	۱۰,۹	۲,۵۷	۲,۵۷	۲,۵۷	۲,۵۷	۲,۵۵	۲,۴	۱,۴	۱,۸۷	۲	۱,۶۱	۲,۲۷	۲
η	۳,۷	۳,۵	۵,۸۸	۵,۸۸	۵,۸۸	۵,۸۸	۵,۸۸	۳,۸۴	۳,۹۳	۴,۷	۴,۹۳	۶,۸۲	۴,۲۳	۴,۲۳
λ	۱,۵۳	۲,۴	۸,۲۶	۸,۲۶	۹,۳	۹,۳	۱۱,۲	۲,۱۱	۱,۰۱	۰,۰۲۷	۰,۰۵	۳,۷۷	۱,۶۲	۲,۶
β	۶,۳۲	۱۸,۴	۱۶,۱	۱۶,۱	۱۱,۶	۱۱,۶	۵,۵	۲۸,۸	۱۴,۲	۱۷,۰	۲۰,۵	۱۳,۱	۱۹,۴	۱۹,۴

جدول ۴: مقایسه نتایج تجربی و مقادیر تنوری

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
Psep	۱۸۰	۷۵,۵	۲۸,۸۳	۲۸,۸۳	۲۸,۵	۲۸,۵	۳۵,۴	۷۸	۱۶۳	۳۱۷	۳۷۵	۵۷	۱۰,۷	۷۳
Pexp	۱۹۲	۷۴	۲۹,۵۶	۲۵,۶	۲۷,۹	۳۰,۵	۳۷,۳۳	۸۰	۱۴۶	۳۲۶	۴۸۰	۶۴	۱۰,۲	۷۰
Pthe	۲۳۹	۸۸,۷	۳۶,۵	۳۶,۵	۴۵	۴۵	۵۷,۶	۸۶	۱۸۷	۴۱۸	۶۱۹	۷۶,۵	۱۱۷	۱۰,۵

مراجع:

5.Roberts T." Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plated RC beams " , The structural engineering journal, 1989 , VO . 67, No .12, P .229-233
 6.Varastehpour H., Hamelin P. "Structural behavior of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded FRP plate",Second international symposium on non – metallic (FRP) Reinforcement of concrete structures, 1995, Ghent, Belgium, P.559- 567
 7.ZHANG S.,RAOOF M.,WOOD L.A. "Prediction of peeling failure of reinforced concrete beams with externally bonded steel plates " Journal of structures and buildings,Vo .110 , No 3, P257,1995. UK
 8.Jones R., Swamy R., Charif A."Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plate",The

1.An W., Ehsani M., Sadatmanesh H." RC beams strengthened with FRP plates ., II : Analysis and parametric study " ,Journal of structural engineering ,1991, Vol.117 , No . 11, P.3434, 3455
 2.Varastehpour H., Hamelin P." Analysis and study of Failure Mechanism of RC Beam Strengthened with FRP Plate" Deuxieme Conference Internationale sur les Materiaux Composites pour Ponts et Charpentes,11August 1996 , Montreal , Canada
 3.Aitali M., Pinglot M., Lorrian M." Modelisation du comportement en flexion statique des sections rectangulaires en beton arme "Journal of materials and structures ,1995 N° 26, P.207 – 213
 4.Varastehpour H.,Hamelin P."Optimizationz of Strengthening Concrete Structures by Carbon Fiber Reinforced Plastic" 3th International Conference on Composites in construction (CCC 2005), 11 – 15 July 2005, Lyon, France

- sherbrouke, Canada, 1992
15. Ritchie P. Thomas D. "External Reinforcement of concrete beams using FRP" ACI structural journal, p 490, July 1991
16. Shahawy M , Beitelman T. "Repair of damaged pretension solid slab using CFRP laminates" Second international symposium on non – metallic (FRP) Reinforcement of concrete structures, P492, 1995 , Ghent , Belgium
17. Hefferman P. Erki M. "Equivalent capacity a design concept for FRP strengthened reinforced concrete beams "Second international symposium on non – metallic (FRP) Reinforcement of concrete structures, P517, 1995, Ghent, Belgium
18. Malver L. , Warren G. "Large scale tests on navy reinforced concrete pier decks strengthened with CFRP sheets" "Deuxieme Confe'rence Internat - ionale sur les Materiaux Composites pour Ponts et Charpentes , 11 August 1996 ,Montreal ,Canada
19. Hutchinson A., Rahimi H. "Flexural strengthening of concrete beams with externally bonded FRP reinforcement," "Deuxieme Confe'rence Internatio - nale sur les Materiaux Composites pour Ponts et Charpentes, 11 August 1996, Montreal , Canada
- structural engineering journal ,1988, Vo 66 (5), P.85-94
9. Varastehpour H., Hamelin P. "Strengthening of concrete beams using fiber reinforced plastics" Journal of materials and structures, Vo. 30, No197, 1997, London, UK
10. Varastehpour H., Hamelin P. "Debonding failure mechanism in RC beams strengthened by CFRP" 1st International Conference on FRP in structures (APFIS2007), 12 – 14 December 2007, hong kong, Chine
11. Varastehpour H., Hamelin P. "Experimental Study of RC Beams Strengthened With CFRP Plate" Deuxieme Conference Internationale sur les Materiaux Composites pour Ponts et Charpentes, 11 August 1996, Montreal, Canada
12. Freyssinet "renforcement structural avec TFC" Rapport technique, june 2001
13. Triantifillou T, Plevris N. "Strengthening of RC beams with epoxy – bonded fiber – composite materials" Journal of Material and structures, Vo. 25, P 201, 1992, UK
14. Meier U. "Strengthening of structures with CFRP Laminate" 1st international conference in advanced composite materials in bridges and structures, p 243,