

شکست زودرس تیرهای بتنی تقویت شده با صفحات کامپوزیت، معرفی انواع مدل‌ها و مقایسه مدل تئوری ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی

حمید وارسته پور*

عضو هیأت علمی موسسه آموزش عالی علمی - کاربردی صنعت آب و برق

چکیده

اتصال خارجی صفحات کامپوزیت پیشرفته جهت تقویت و افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتن آرمه به صورت گسترده متداول شده است. برای تعیین ظرفیت نهایی این تیرها باید احتمال جداشدن صفحه در محل اتصال بررسی شود. این مقاله شامل دو بخش است. در بخش اول پدیده شکست‌های زودرس و جزئیات جداشدگی صفحه از بتن توضیح داده شده و مدل‌های تئوری مرتبط معرفی می‌شوند. در بخش دوم با استفاده از نتایج تجربی به دست آمده توسط محققین صحت مدل ارائه شده توسط محقق که قادر به پیش‌بینی بارگسیختگی در زمان شکست زودرس می‌باشد بررسی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: شکست تیرها، ظرفیت خمشی، کامپوزیت پیشرفته، جداشدگی، مطالعات و تجربی

* نویسنده مسئول: h.varastehpour@ieht.ac.ir

۱. مقدمه

روش‌های تعیین ظرفیت تیر را بررسی کرده‌اند. در این مقاله روابط و انواع گسیختگی زودرس بررسی و صحت مدل تئوری پیش بینی ظرفیت تیرهای بتنی تقویت شده با ورق‌های کامپوزیت با استفاده از نتایج تست‌های آزمایشگاهی بررسی می‌گردد.

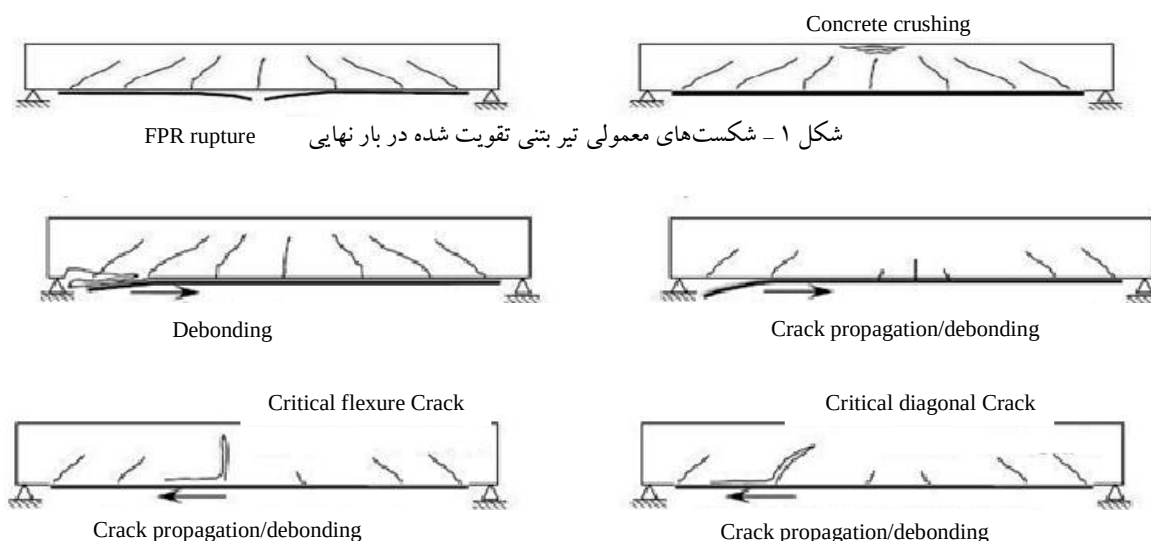
انواع شکست زودرس تیر تقویت شده و نحوه تعیین ظرفیت نهایی

در این روش مقاوم‌سازی احتمال گسیختگی زود هنگام به علت جداشدگی ورق از محل اتصال وجود دارد. دلیل و معیارهای مرتبط و نوع شکست‌های زودرس در این قسمت شرح داده می‌شود. (شکل ۲)

حالت‌های شکست‌های انتهای صفحه، چه به صورت جدا شدن کاور بتن و چه بلند شدن صفحه از روی بتن، در حد وسیعی توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته‌اند و مدل‌سازی‌های متعددی نیز در این مورد انجام گرفته است (شکل ۳). در طول دهه گذشته افراد متعددی در زمینه مدل‌سازی چسبندگی صفحات FRP بر روی تیرهای بتن مسلح فعالیت کرده‌اند. هر چند انتظار می‌رود که خصوصیات مکانیکی مختلف صفحات کامپوزیت، نقش زیادی در چسبندگی داشته باشند اما مدل‌سازی‌های مقاومت چسبندگی در مورد انواع مختلف صفحات به کار رفته قابل استفاده هستند. در حال حاضر از نظر شیوه مدل‌سازی به سه گروه دسته‌بندی می‌شود:

امروزه مواد کامپوزیت به علت استحکام زیاد، مقاومت در برابر خوردگی و وزن مخصوص اندک و کاربردهای متنوع اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند. استفاده از این مواد به علت سهولت تهیه، سرعت نصب، امکان بهینه‌سازی (گزینه نوع مسلح‌سازی و جهت)، چند عملکردی (استحکام، سفتی، ضد خوردگی) می‌تواند در سازه‌ها مورد توجه بسیاری قرار گیرند. تقویت تیرهای بتنی توسط اتصال خارجی ورق کامپوزیت (CFRP) با استفاده از رزین اپوکسی راهی عملی و امکان‌پذیر بوده که به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. لیکن ظرفیت نهایی این تیرها را نمی‌توان با استفاده از روش‌های متداول به علت نوع گسیختگی تعیین کرد. بعضی از محققین در تعیین ظرفیت نهایی این تیرها از متدهای شکست معمولی شامل گسیختگی در ناحیه فشاری و یا شکست صفحه کامپوزیت به علت افزایش تنش‌های کششی استفاده می‌کنند، که گاهی به صورت غیر واقعی افزایش ظرفیت باربری تیر را تا ۱۰۰٪ نسبت به حالت اولیه نشان می‌دهد (شکل ۱).

لیکن آزمایشات متفاوت نشان می‌دهد این تیرها قبل از رسیدن به ظرفیت اسمی ممکن است به علت افزایش تنش‌های برشی در مرز مشترک و یا لغزش صفحه کامپوزیت به گسیختگی زودرس دچار شود. نوع این گسیختگی ناگهانی و باعث کاهش ظرفیت محاسباتی اولیه می‌شود. تعدادی از محققین این نوع گسیختگی و



شکل ۱ - شکست‌های معمولی تیر بتنی تقویت شده در بار نهایی

شکل ۲ - شکست‌های مختلف تیر بتنی تقویت شده در بار نهایی



شکل ۳- شکست‌های زودرس متداول تیر بتنی تقویت شده در بار نهایی

(۱) مدل‌های بر پایه ظرفیت برشی:

(۳) مدل‌سازی بر پایه تنش‌های سطح تماس:

در این مدل می‌توان فرض کرد که نیروی برشی مقاوم در برابر از بین رفتن چسبندگی، متشکل از مقاومت برشی بتن و قسمتی هم ناشی از آرماتورهای برش مقطع است. البته با روش کالیبراسیون، یک ضریب تاثیر برای مقاومت برشی مربوط به آرماتورهای برشی مقطع استفاده می‌شود. این ضریب تاثیر در ارتباط با وجود تنش‌های نرمال در سطح تماس در انتهای صفحه و اندر کنش آن با نیروهای مقاوم برشی است.

مدل‌های متداول جهت پیش‌بینی گسیختگی زودرس به شرح زیر است که جزئیات هر مدل و معرفی متغیرها در هر مرجع بطور کامل ارائه شده است.

(۲) مدل‌های مربوط به برش دندانه‌ای:

این مدل مربوط به حالت شکست به صورت جدا شدن پوشش بتن در تیرهای مقاوم شده با صفحات کامپوزیتی است. در این مدل از مفهوم دندانه بتن بین دو ترک خوردگی مجاور استفاده شده است. فرض بر این است که شکست چسبندگی وقتی رخ می‌دهد که تنش‌های برشی به ایجاد کشش در پای این دندانه منجر شود که از مقاومت کششی بتن تجاوز می‌کند. مقدار تنش در صفحه زیرین در لحظه شکست چسبندگی را می‌توان با تعریف طول موثر برای صفحه برای مهاربندی انتهایی که در طول آن تنش برشی یکنواخت فرض می‌شود به دست آورد. وقتی که تنش در صفحه مشخص باشد، لنگر را که موجب جدایی صفحه می‌شود، می‌توان با آنالیز معمولی مقطع با فرض خمش در مقطع مسلح به دست آورد. حدود پایین و بالای لنگر خمشی را می‌توان با در نظر گرفتن فاصله حداقل و حداکثر بین ترک‌ها محاسبه کرد.

مدل گسیختگی زودرس ارائه شده توسط اوهرلز [۱]:

$$M_{ab} = \frac{E_c I_{tr,c} f_{ct}}{0.901 E_f t_f} \quad (۱)$$

$$V_{db} = V_c = (1.4 - (d / 2000)) b d (r_s f_c)^{1/3} \quad (۲)$$

$$V_{db,end} = \left(\frac{1.17}{\frac{a}{M_{db}} + \frac{1}{V_{db}}} \right) \quad (۳)$$

مدل گسیختگی زودرس ارائه شده توسط جونز [۲]:

$$V_{db,end} = t_{PES} b d \quad (۴)$$

$$t_{PES} = 0.18 \sqrt[3]{\frac{d}{B_{mod}}} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \sqrt[3]{100 r_s f_c} \quad (۵)$$

$$B_{mod} = \sqrt{\frac{(1 - \sqrt{r_s})^2}{r_s}} d a^3 \quad (۶)$$

$$C_{R1} = \left(1 + \left(\frac{K_s}{E_f b_f t_f} \right)^{1/2} \frac{M_o}{V_o} \right) \frac{b_t t_f}{I_{tr,c} b_a} (d_f - x) \quad (22)$$

$$K_s = \frac{G_a b_a}{t_a} \quad (23)$$

$$s_y = C_{R2} t \quad (24)$$

$$s_l = \frac{s_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{s_y}{2} \right)^2 + t^2} \quad (25)$$

معرفی مدل گسیختگی زودرس ارائه شده توسط وارسته پور - هامیلین

الف) شکست زودرس 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. معه‌ذا به هنگام جداشدگی، شکست را می‌توان با رابطه Mohr - Coulomb توصیف کرد که معادله آن به این شرح است:

$$t_{int} + s_n \cdot tg \, j = C \quad (26)$$

که در آن t_{int} نمایانگر تنش برشی فصل مشترک، C نمایانگر چسبندگی، s_n تنش عمودی بر روی خط اتصال و j نمایانگر زاویه اصطکاک داخلی است. دامنه تغییرات C (چسبندگی) و j (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 تکیه‌گاهی ثابت می‌باشد، می‌توان سیستم نیرو (شکل ۴) را با نیروی منفرد و ممان خمشی معادل که در امتداد مرکز ورق اعمال می‌گردد جایگزین کرد:

$$M_{xy} = b_p \cdot (T_a + T_p / 2) \cdot t_{int} \quad (27)$$

مدل گسیختگی زودرس ارائه شده توسط زانگ و رئوف [۳]:

$$l_{min} = \frac{A_e f_{ct}}{0.28 \sqrt{f_c} (\sum O_{rebars} + b_f)} \quad (7)$$

$$s_A = \frac{M_A}{I_A} \left(\frac{l_{cr}}{2} \right) \quad (8)$$

$$t_{min} = \frac{f_{ct} l_{min}}{6 h' b_f} \quad (9)$$

$$s_{min} = 0.154 \frac{L_p h_l b^2 \sqrt{f_c}}{h' b_f t_f (\sum O_{rebars} + b_f)} \quad (10)$$

$$L_{p2} = l_{min} (21 - 0.25 l_{min}), \quad l_{min} \leq 72 \, m \, m \quad (11)$$

$$L_{p2} = 31 l_{min}, \quad l_{min} > 72 \, m \, m \quad (12)$$

مدل گسیختگی زودرس ارائه شده توسط رئوف و حسن [۴]:

$$L_{p2} = l_{min} (11.6 - 0.17 l_{min}), \quad l_{min} \leq 56.5 \, m \, m \quad (13)$$

$$L_{p2} = 2 l_{min}, \quad l_{min} > 56.5 \, m \, m \quad (14)$$

مدل گسیختگی زودرس ارائه شده توسط وارسته پور - هامیلین [۵]:

$$V_{db,end} = \frac{1.6 t_{adm}^{2/3}}{l b^{1/3}} \quad (15)$$

$$b = \frac{1.26 \times 10^5 \cdot a}{h^{0.7} \cdot t_f \cdot E_f} \quad (16)$$

$$\lambda = \frac{t_f E_f}{I_{tr,c} E_c} (d_f - x) \quad (17)$$

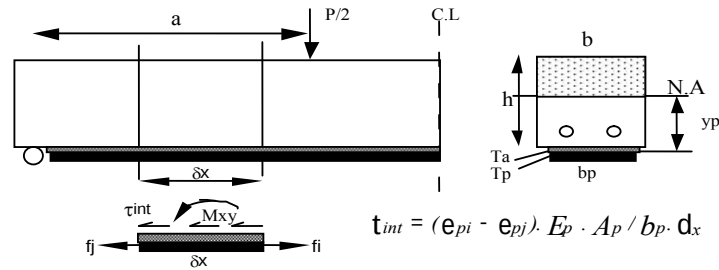
$$\tau_{adm} = \min \left(\frac{f_t s b}{6 b b_f}, \frac{2.7}{1 + C_{R2} \tan 33^\circ C} \right) \quad (18)$$

$$C_{R2} = t_f \left(\frac{K_n}{4 E_f I_f} \right)^{1/4} \quad (19)$$

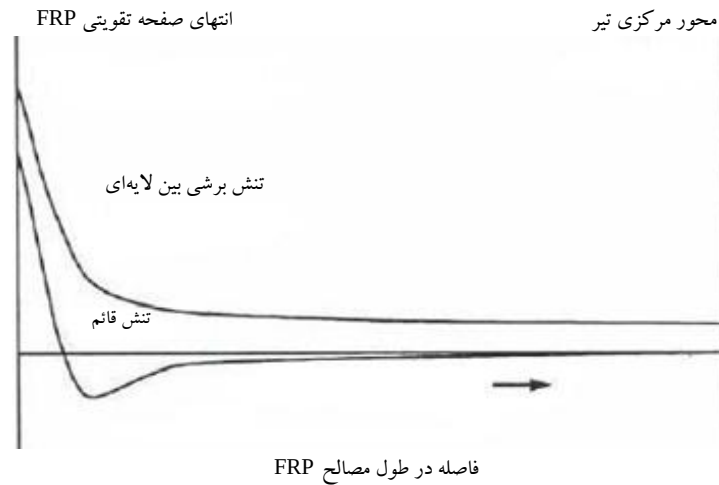
$$K_n = \frac{E_a b_a}{t_a} \quad (20)$$

مدل گسیختگی زودرس ارائه شده توسط تومالان و نانی [۱]:

$$t = C_{R1} \frac{E_f V_o}{E_c} \quad (21)$$



شکل ۴: نحوه توزیع تنش برشی در فصل مشترک



شکل ۵- نحوه توزیع تنش برشی و نرمال در انتهای صفحه

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

$$t_{ave} = 5.4 / (1 + ktg 33) \quad (30)$$

با توجه به پدیده تمرکز تنش در محل انتهای صفحه (شکل ۵) شکست زودرس تیر تقویت شده در این محل ایجاد می‌شود. این شکست که بسیار متداول است به شکست زودرس انتهای صفحه (End plate debonding) معروف است. برای لحاظ کردن اثر تمرکز تنش در رابطه ۳۱ تحقیقات گسترده‌ای توسط شلال و همکاران [۱۰] انجام شده است. نتایج تحقیقات منجر به رابطه ۳۱ شده است که تنش مجاز برشی در سطح مشترک را تعیین می‌کند.

$$K = 1.3 \left(\frac{T_p \cdot E_a}{T_a \cdot E_p} \right)^{0.25} \quad (29)$$

E_a , E_p به ترتیب مدول‌های الاستیک ورق و چسب می‌باشد. جهت تعیین، C از دو آزمایش متفاوت استفاده کردیم [۹]. که میانگین زاویه اصطکاک برابر ۳۳ درجه و چسبندگی ۵/۴ MPa می‌باشد. با جایگزینی مقادیر C و Z به دست آمده در این

$$t_{adm} = 0.5 \times t_{ave} \quad (31)$$

این معادله معیار گسیختگی به دلیل جداشدگی ورق در سطح مشترک در انتهای صفحه را بیان می‌کند و هنگامی که تنش برش

ماکزیمم در سطح مشترک به میزان تنش برشی مجاز می‌رسد گسیختگی پدید می‌آید.

رابطه (۳۲) و با استفاده از رابطه $f_t = S_A$ (تنش نهایی بتن در کشش)، تنش برشی مجاز در سطح مشترک به دست می‌آید:

$$t_{adm} = (f_t L_c / 6 d') / (b / bp) \quad (34)$$

این رابطه معیار شکست زودرس ناشی از گسیختگی پوشش بتنی را توضیح می‌دهد و هنگامی که تنش برشی در قسمت سطح مشترک به t_{adm} می‌رسد، گسیختگی ایجاد می‌شود. این مدل ثابت می‌کند که فاصله ترک‌ها (L_c) 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 L_c 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 به‌طور تقریب برابر با میانگین فاصله تنگ‌های عرضی (S) و حداکثر ۱۰۰mm است.

۲. محاسبه تنش برشی در سطح مشترک ورق - بتن:

جهت پیش‌بینی شکست زودرس تیر تقویت شده، محاسبه تنش برشی در سطح مشترک هنگام بارگذاری الزامی است. نگارنده رابطه بین نیروی برشی مقطع و تنش برشی در سطح مشترک را با توجه به اثر رفتار غیرخطی مواد و میزان متغیرهای گوناگون از قبیل مدول الاستیسیته و ضخامت ورق، وضعیت هندسی مقطع، نوع بارگذاری، سطح مقطع فولاد کششی را با استفاده از نتایج نرم‌افزار غیر خطی به‌دست آورده است. در نتیجه این تحقیق، معادله ۳۵ و ضرایب b و l که از متغیرهای مهم و مؤثر بر توزیع تنش برشی در فصل مشترک است معرفی می‌شوند.

ب) شکست به علت گسیختگی لایه بتنی بین ورق FRP و فولاد کششی

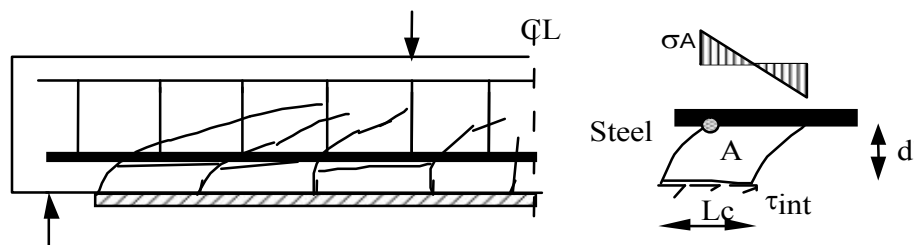
بررسی تیرهای مختلف مقاوم شده با صفحات FRP بیانگر الگوی شکستی است که در هنگام گسیختگی می‌توان توسط شکل ۶ تعریف نمود. در زمان بارگذاری افزایش ترک‌ها در ناحیه کششی تیر در لایه بتن بین ورق و فولاد کششی خواهیم داشت. در اثر افزایش بار قسمتی از بتن که بین دو ترک متوالی قرار دارد همچون یک تیر یک سر در گیر عمل می‌کند. هنگام بارگذاری بتن قرار گرفته شده بین دو ترک متوالی تمایل به خمیدگی تحت تنش‌های برشی در قسمت‌های انتهایی را دارد. هنگامی که 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.

$$S_A = M_A \cdot (L_c / 2) / I_t \quad (32)$$

که در آن L_c فاصله دو ترک متوالی، $I_t = b \cdot L_c^3 / 12$ بیانگر ممان اینرسی مقطع تیر یک سر در گیر و M_A ممان خمشی در نقطه A که برابر است با:

$$M_A = t_{int} \cdot L_c \cdot bp \cdot d' \quad (33)$$

که در آن، t_{int} بیانگر میانگین تنش برشی در فصل مشترک بوده که به‌طور یکنواخت توزیع شود، و L_c 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 و فولاد مسلح می‌باشد. با جایگزینی رابطه (۳۳) در



شکل ۶- نحوه گسترش ترک در لایه بتنی و رفتار آن

به دست آمده از معادله ۳۶ با نتایج تجربی به دست آمده از تست های آزمایشگاهی توسط محققین مختلف ارزیابی می گردد. این تست ها به ۲ سری تقسیم بندی شده اند. که در هر سری نوع شکست زودرس گزارش شده متفاوت است. سری اول شامل ۲۲ تیر مختلف با مشخصات فیزیکی و مکانیکی گوناگون است که توسط محققین در آزمایشگاه توسط ورق های کربن / اپوکسی تقویت و تا مرحله شکست بارگذاری شده اند و شکست تیرها به علت گسیختگی لایه بتنی بین ورق کامپوزیت و فولاد طولی می باشد.

A1 [12], A2[13], A3,A4,A5,A6,A7[14], A8, A9[15], A10,A11,A12[16], A13,A14,A15,A16 [17], A17,A18,A19 [18], A20,A21 [19], A22, [20] و سری دوم شامل ۱۴ تیر مختلف با مشخصات فیزیکی و مکانیکی گوناگون است که توسط محققین در آزمایشگاه توسط ورق های کربن / اپوکسی تقویت و تا مرحله شکست بارگذاری شده اند و شکست تیرها به علت جداشدگی صفحه در انتها و یا شکست در لایه رزین می باشد.

B1, B2, B3,B4 [21], B5 [22], B6, B7, B8, B9, B10 [23], B11,B12,B13,B14[24] تیرها با مقطع مستطیلی تقویت شده به وسیله ورق CFRP (شکل ۷) تا حد گسیختگی، مورد آزمایش قرار گرفته اند و مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است.

در جدول ۱ b عرض (mm) و h عمق مقطع (mm). L طول تیر (mm) a طول دهانه برشی (mm) s فاصله تنگ های عرضی (mm) ϕ قطر (mm) و N تعداد آرماتورهای طولی و d عمق مؤثر (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 به ترتیب تنش نهایی کششی (MPa) و مدول الاستیسیته (GPa) ورق کامپوزیت و F_t تنش کششی بتن (MPa) است. با استفاده از اطلاعات تیرهای بتنی تقویت شده پارامترهای لازم برای محاسبه بار نهایی گسیختگی به علت جداشدگی ورق و بار گسیختگی (رابطه ۳۶) و بار نهایی آزمایشگاهی در جدول ۳ آمده است.

$$t_{int} = \frac{1}{2} \cdot b^{0.5} \cdot (I \cdot V)^{1.5} \quad (35)$$

که در آن:

$$b = \frac{1.26 \cdot 10^5 \cdot a}{(h)^{0.7} \cdot T_p \cdot E_p} \quad h = E_p / E_b$$

$$I = (y_p \cdot T_p \cdot h) / I_t$$

در معادله ۳۵ که رابطه تنش برشی در سطح مشترک ورق/بتن را با نیروی برشی (V) در مقطع نشان می دهد E_p, E_b مدول الاستیسیته بتن و ورق کامپوزیت، I_t ممان اینرسی مقطع ترک خورده، y_p فاصله تار خنثی تا کف تیر، h عمق تیر و a طول دهانه برشی است.

برای محاسبه بار نهایی گسیختگی زود رس ناشی از جداشدگی ورق کامپوزیت، می توان با داشتن تنش مجاز برشی در سطح مشترک و رابطه بین بارگذاری اعمال شده و نیروی برشی به حل معادله مزبور بپردازیم. به عنوان مثال در شرایطی که یک تیر تحت خمش خالص قرار گیرد $V = (P/2)$ خواهیم داشت:

$$P_{sep} = \frac{3.2 t_{adm}^{2/3}}{I \cdot b^{1/3}} \quad (36)$$

در این معادله، تنش برشی مجاز (t_{adm})، کمترین مقدار محاسبه شده از معادله (۳۱) و (۳۴) می باشد.

۳. محدودیت های کاربرد معادله ۳۶ [۱۱]:

با بررسی نتایج به دست آمده از معادله ۳۶ می توان عنوان کرد که سه عامل مهم در صحت استفاده از این معادله مؤثر است این سه عامل p_s (نسبت فولاد کشی) p_{com} (نسبت ورق کامپوزیت) و E_p مدول الاستیسیته ورق کامپوزیت می باشد.

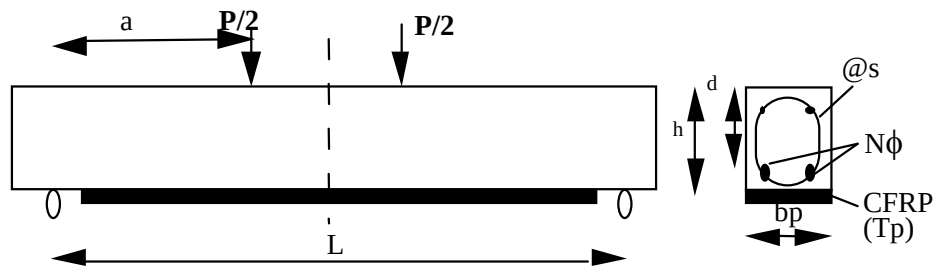
$$E_p > 100 \text{ GPa}, \quad p_{com} > 0.5 \quad \text{و} \quad p_s < 1.5$$

$$p_s = A_s / b \cdot h \quad p_{com} = b_p \cdot T_p / b \cdot h \quad (37)$$

در نتیجه در تیرهای تقویت شده زمانی می توان از معادله ۳۶ برای تعیین نوع شکست و ظرفیت نهایی استفاده کرد که ۳ شرط فوق هم زمان برقرار باشد.

۴. استفاده از نتایج تست های آزمایشگاهی برای بررسی صحت مدل:

مدل پیشنهادی حاضر از طریق مقایسه ظرفیت نهایی تئوری



شکل ۷- تیر بتنی تقویت شده

جدول ۱- مشخصات تیرهای بتنی تقویت شده سری اول

	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	A 8	A 9	A 10	A 11	A 12	A 13	A 14
B	۱۵۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۳۰	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵
H	۳۰۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۳۰	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵
L	۲۴۳۸	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۲۲۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰
A	۹۱۴	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۸۴۴	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
S	۱۰۲	۵۰	۵۱	۵۱	۵۱	۵۱	۵۱	۵۱	۱۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۱	۷۱
ϕ	۱۲.۷	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۱۰	۸	۸	۸	۸	۶۸
N	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲	۳
D	۲۵۱	۸۴	۸۴	۸۴	۸۴	۸۴	۸۴	۸۴	۲۰۶	۱۹۳	۱۹۳	۱۹۳	۱۹۳	۱۹۳
	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22						
B	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۲۰						
H	۲۲۵	۲۲۵	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۰۰	۱۵۰						
L	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۲۳۵۰	۲۳۵۰	۲۳۵۰	۲۸۰۰	۲۸۰۰	۱۳۳۰						
A	۵۰۰	۵۰۰	۷۸۳	۷۸۳	۷۸۳	۹۳۳	۹۳۳	۴۴۰						
S	۷۱	۷۱	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۴۰	۱۴۰	۵۰						
ϕ	۸	۱۰/۸	۱۰	۱۰	۱۰	۱۴	۱۴	۱۰						
N	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۳						
D	۱۹۳	۱۹۳	۲۱۴	۲۱۴	۲۱۴	۲۵۷	۲۵۷	۱۲۰						

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و خواص مکانیکی تیرهای بتنی تقویت شده سری اول

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
Tp	۱/۲۷	۱/۲	۰/۵	۰/۷	۱	۰/۷	۱	۰/۸۲	۱/۲۸	۰/۳۳۴	۰/۵۰۱	۰/۶۶۸	۰/۳۳۴	۰/۳۳۴
Bp	۱۵۰	۲۰۰	۶۳/۲	۶۳/۲	۶۳/۳	۶۳/۳	۶۳/۹	۲۰۰	۱۵۰	۱۲۱۹	۳۰۰	۱۲۷	۱۵۰	۱۵۰
σ_{up}	۱۴۸۹	۹۸۷	۱۲۷۳	۱۲۷۳	۱۲۷۳	۱۲۷۳	۱۲۷۳	۱۴۱۴	۱۲۸۴	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۳۵۰۰
Ep	۱۱۷	۱۱۸	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۵	۲۴۰	۲۴۰	۲۴۰	۲۴۰	۲۴۰
Ft	۳/۵	۳/۵	۴/۲	۴/۲	۴/۲	۴/۲	۴/۲	۴/۲	۳/۵	۳/۲	۳/۶	۳/۶	۳/۶	۳/۶
	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22						
Tp	۰/۳۳۴	۰/۳۳۴	۰/۴۴	۰/۷۷	۱/۱	۱/۲	۲/۴	۱/۲						
Bp	۱۵۰	۲۰۰	۶۳/۲	۶۳/۲	۶۳/۳	۶۳/۳	۶۳/۹	۲۰۰						
σ_{up}	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۳۴۰۰	۳۴۰۰	۳۴۰۰	۲۴۰۰	۲۴۰۰	۳۱۴۰						
Ep	۲۴۰	۲۴۰	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۸۱						
Ft	۳/۶	۳/۶	۳/۱	۳/۱	۳/۱	۳/۴	۳/۴	۲/۷						

در جدول ۳ yp فاصله تار خشی مقطع ترک خورده تا پائین تیر (KN) و Pexp نتایج واقعی از تست‌های آزمایشگاه (KN) و Icr ممان اینرسی مقطع ترک خورده ($E7 \cdot mm^4$) و می‌باشند.

τ_{adm} تنش مجاز برشی (MPa) و Psep ظرفیت تنوری نهائی

جدول ۳- پارامترهای مقطع تیرهای سری اول و نتایج بار گسیختگی و آزمایشگاهی

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
Yp	۲۲۱/۴۶	۶۷/۹۳	۷۳/۳	۷۳/۳	۷۳/۳	۷۳/۳	۷۳/۳	۶۹/۸	۱۶۰/۱	۱۷۳/۴	۱۷۱/۲	۱۶۹	۱۷۹/۸	۱۷۶
Icr	۱۲/۹۵	۰/۴۲	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۳۶	۵/۹۹	۳/۰۳	۳/۳۳	۳/۶۳	۲/۳۸	۲/۷۶
τ_{adm}	۱/۲۲	۱/۹۴	۲/۰۵	۲/۰۱	۱/۹۷	۲/۰۱	۱/۹۶	۱/۹۹	۱/۹۴	۱/۸۷	۲	۱/۶۱	۲/۲۷	۲
Psep	۱۵۲	۳۳/۷	۴۸	۳۸	۲۹/۵	۳۶/۵	۲۸/۳	۳۵/۴	۱۳۰	۱۲۹	۱۰۷	۹۶/۵	۹۷/۸	۱۱۵/۴
Pexp	۱۴۴	۴۱	۳۹	۳۶/۵	۳۲	۳۴	۳۵/۶	۳۴	۱۰۱	۱۲۱	۱۲۰	۱۲۵	۹۶/۶	۱۰۵
	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22						
Yp	۱۷۳/۴	۱۶۷/۸	۱۸۵	۱۷۹	۱۷۳/۵	۲۱۸	۲۱۰/۴	۹۳/۲۳						
Icr	۳/۰۳	۳/۶۷	۵/۱۶	۶/۲۷	۷/۳۲	۱۱/۹	۱۴/۸	۲/۱۸						
τ_{adm}	۲/۰۲	۲/۰۲	۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۹۸	۱/۸۸	۱/۳۵						
Psep	۱۲۸/۸	۱۶۱	۱۲۴/۴	۱۰۷/۷	۱۰۲/۲	۱۶۰	۱۵۷	۵۱						
Pexp	۱۱۸	۱۴۰	۱۰۱	۱۲۴	۱۲۹	۱۳۹	۱۵۷/۵	۵۷						

جدول ۴- مشخصات تیرهای بتنی تقویت شده سری دوم

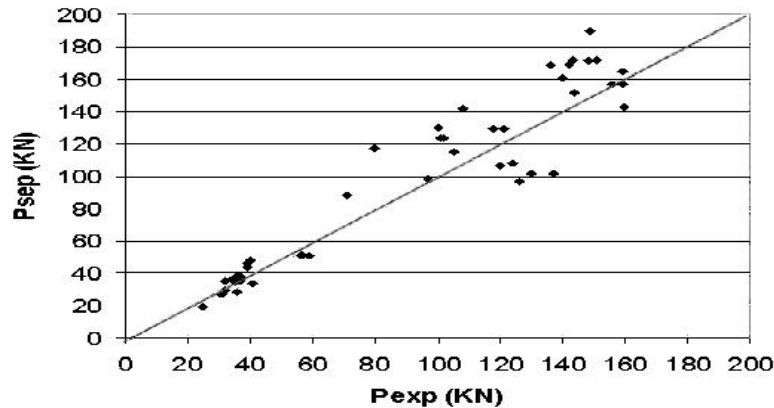
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
B	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۵	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
H	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
L	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۹۵۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۳۶۰۰	۳۶۰۰	۳۶۰۰	۳۶۰۰
A	۳۴۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۶۵۰	۹۱۴	۹۱۴	۹۱۴	۹۱۴	۹۱۴	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰
S	۵۱	۵۱	۵۱	۵۱	۶۰	۱۰۲	۱۰۲	۱۰۲	۱۰۲	۱۰۲	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵
ϕ	۶	۶	۶	۶	۱۳	۹/۵	۹/۵	۱۲/۷	۱۲/۷	۱۵/۹	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
N	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
D	۸۴	۸۴	۸۴	۸۴	۱۳۱	۱۵۲	۱۵۲	۱۵۲	۱۵۲	۱۵۲	۲۵۲	۲۵۲	۲۵۲	۲۵۲

جدول ۵- مشخصات فیزیکی و خواص مکانیکی تیرهای بتنی تقویت شده سری دوم

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
TP	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۱	۱/۲	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۲/۴
Bp	۹۰	۹۰	۶۵	۴۵	۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۰۰	۱۵۰
σ_{up}	۱۲۷۳	۱۲۷۳	۱۲۷۳	۱۲۷۳	۲۴۰۰	۲۲۰۶	۲۲۰۶	۲۲۰۶	۲۲۰۶	۲۲۰۶	۲۴۰۰	۲۴۰۰	۱۴۰۰	۱۸۰۰
Ep	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۵۰	۱۳۸	۱۳۸	۱۳۸	۱۳۸	۱۳۸	۱۵۵	۲۱۰	۳۰۰	۹۵
Ft	۴/۲	۴/۲	۴/۲	۴/۲	۳/۲	۳/۹	۳/۹	۳/۹	۳/۹	۳/۹	۳/۸	۴	۴	۳/۸

جدول ۶- پارامترهای مقطع تیرهای سری اول و نتایج بار گسیختگی و آزمایشگاهی

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
yp	۷۳	۷۳	۷۳	۷۳	۱۱۵	۱۶۱	۱۵۴	۱۵۴	۱۴۸	۱۴۲	۲۱۶	۲۱۳	۲۰۶	۲۲۰
Icr	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۶۳	۲/۴	۳/۵	۳/۱۷	۴/۲۷	۵	۱۷/۲	۱۸/۸	۲۲	۱۵/۴
τ_{adm}	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۱	۱/۹۶	۱/۹۸	۱/۵	۱/۵	۱/۵۶	۱/۶۳	۱/۶۲	۱/۸۸	۱/۹۲	۱/۹۵	۱/۵۸
Psep	۴۶	۴۴	۳۴/۵	۲۶/۸	۱۸/۵	۹۷/۵	۸۸	۱۳۸/۲	۱۱۷	۱۴۲	۱۷۱/۵	۱۶۵/۵	۱۴۳	۱۹۰
Pexp	۳۹	۳۹	۳۵	۳۱	۲۵	۸۰/۵	۷۱/۵	۹۸	۸۱	۱۰۹	۱۵۱	۱۵۹	۱۶۰	۱۴۹



شکل ۸- مقایسه نتایج تئوری و تجربی

در جدول ۴، b عرض (mm) و h عمق مقطع (mm)، L طول تیر (mm)، a طول دهانه برشی (mm)، s فاصله تنگ‌های عرضی، ϕ قطر (mm) و N تعداد آرماتورهای طولی و d عمق موثر (mm) می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

در جداول ۳ و ۶ نتایج بار نهائی تجربی و تئوری در لحظه شکست تیر ارائه شده است. در این جداول P_{sep} بار گسیختگی نهائی (معادله ۳۶) و P_{exp} بار نهائی در تست آزمایشگاهی است. این نتایج به‌طور خلاصه در شکل ۸ ارائه شده و ظرفیت تجربی نهایی تیرها (P_{exp}) با مقادیر تئوری (P_{sep}) مورد مقایسه قرار گرفته است. این مقایسه نشان دهنده پیش‌بینی مناسب بار گسیختگی توسط معادله ۳۶ می‌باشد. در نتیجه استفاده از مدل ارائه شده و معادله بار گسیختگی می‌تواند کمک مناسبی برای طراحان تیرهای بتنی تقویت شده با ورق‌های CFRP باشد تا علاوه بر پیش‌بینی ظرفیت تیر احتمال وقوع شکست زودرس در بار نهائی را تعیین کنند.

کلیه تیرها با ورق‌های کامپوزیت کربن تقویت شده و مشخصات ورق و بتن در جدول ۵ آمده است.

در جدول ۵ T_p ضخامت (mm) و b_p عرض (mm) ورق کامپوزیت. σ_{up} و E_p به ترتیب تنش نهائی کششی (MPa) و مدول الاستیسیته (GPa) ورق کامپوزیت و F_t تنش کششی بتن (MPa) است.

با استفاده از اطلاعات تیرهای بتنی تقویت شده پارامترهای لازم برای محاسبه بار نهائی گسیختگی به علت جداشدگی ورق و بار گسیختگی (رابطه ۳۶) و بار نهائی آزمایشگاهی در جدول ۶ آمده است.

در جدول ۶ y_p فاصله تار خنثی مقطع ترک خورده تا پائین تیر (mm) و I_{cr} ممان اینرسی مقطع ترک خورده ($E7 * 4 \text{ mm}^4$) و

with CFRP in the Case of Premature Failures” Journal of Concrete Research, No.3 , 2010 , Rasht , Iran.

[12]. PA. Ritchie, DA. Thomas, LW. Lu, GM. Connely “External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics,” ACI Struct J 1991;88(4):490–500.

[13]. RJ. Quantrill, LC. Hollaway, AM. Thorne “Experimental and Analytical Investigation of FRP Strengthened Beam Response” Part I. Mag Concrete Res 1996;48(177):331–42.

[14]. HN. Garden, LC. Hollaway, AM. Thorne, “A Preliminary Evaluation of Carbon Fibre Reinforced Polymer Plates for Strengthening Reinforced Concrete Members.” Proc Inst Civil Engrs Struct Build; 123 (May): 127–42. 1997

[15]. HN. Garden, RJ. Quantrill, LC. Hollaway, AM. Thorne, GAR. Parke, “An Experimental Study of the Anchorage Length of Carbon Fibre Composite Plates Used to Strengthen Reinforced Concrete Beams.” Construct Build Mater; 12:203–19, 1998.

[16]. O. Ahmed, D. van Gemert, “Effect of Longitudinal Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates on Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams.” In: CW. Dolan, SH. Rizkalla, A. Nanni, Editors. Proceedings of the Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, Maryland, USA, 933–43, 1999.

[17]. O. Ahmed, D. Van Gemert, “Behaviour of RC Beams Strengthened in Bending by CFRP Laminates.” In: MC. Forde, Editor. Proceedings of the Eighth International Conference on Advanced Composites for Concrete Repair, London, UK, 1999.

[18]. AJ. Beber, AC. Filho, JL. Campagnolo. “Flexural Strengthening of R/C Beams with CFRP Heets.” In: MC. Forde, Editor. Proceedings of the Eighth International Conference on Advanced Composites for Concrete Repair, London, UK, 1999.

[19]. E. David, C. Djelal, E. Ragneau, FB. Bodin “Use of FRP to Strengthen and Repair RC Eams: Experimental Study and Numerical Simulations.” In: MC. Forde, Editor. Proceedings of the Eighth International Conference on Advanced Composites for Concrete Repair, London, K, 1999.

[20]. DM. Nguyen, TK. Chan, HK. Cheong. Brittle Failure and bond Development Length of FRP–Concrete Beams. J Composites Construct, ASCE;5(1):12-7, 2001.

[1]. D. Oehlers, “RC Beams with Plates Glued to Their Soffits” Journal of Structural Engineering Vol. 118, No. 8,1992

[2]. W. Jansze, “Strengthening of RC Members in Bending by Externally Bonded Plates” PhD Thesis. Delft University of Technology, 1997.

[3]. S. Zhang, M. Raoof, L.A Wood., “Prediction of Peeling Failure of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Steel Plates” Journal of Structures and Buildings, UK., Vol .110 , No 3, P257,1995.

[4]. M. Raoof, M.A. Hassan “Peeling Failure of RC Beams with Fiber Reinforced Plastic or Steel Plates Glued to Their Soffits” Journal of Structures and Buildings, UK, Vo .140 , No 3, 2000.

[5]. H. Varastehpour, P. Hamelin “Analysis and Study of Failure Mechanism of RC Beam Strengthened with FRP Plate” Deuxieme Conference Internationale Sur les Materiaux Composites Pour Ponts et Charpentes, Montreal, Canada, 11 August 1996.

[6]. H. Varastehpour, P. Hamelin “Strengthening of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics” Journal of Materials and Structures, London, UK, Vol. 30, No197, 1997.

[7]. G. Tumialan A. Belarbi, A. Nanni, “RC Beams Strengthened with CFRP Composites: Failure Due to Concrete Cover Delamination,” Report CIES-99/01. University of Missouri, 1999

[8]. Roberts T. “Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams,” the Structural Engineering Journal, VOL. 67, No .12, P .229-233, 1989.

[9]. H. Varastehpour, P. Hamelin “Experimental Study of RC Beams Strengthened With CFRP Plate” Deuxieme Conference Internationale sur les Materiaux Composites Pour Ponts et Charpentes, Montreal, Canada., 11 August 1996

[10]. O. Chaallal, M. Nollet, and D. Perraton, “Strengthening of Reinforced Concrete Beams With Externally Bonded Fibre-Reinforced-Plastic Plates: Design Guidelines for Shear and Flexure,” Canadian Journal of Civil Engineering, 692-704, 1998.

[11]. Varastehpour H. “Limitation of Equation for Prediction the Capacity of RC Beams Strengthened

with Externally Bonded Composite Laminates.” ACI Struct; 96(2): 212–20, J 1999.

[24]. B. Ta'ljsten “Concrete Beams Strengthened for Bending Using CFRP-Sheets.” In: C. Forde, Editor. Proceedings of the Eighth International Conference on Advanced Composites for Concrete Repair, London, UK, 1999.

[21]. HN. Garden, LC. Hollaway, AM. Thorne A Preliminary Evaluation of Carbon Fibre Reinforced Polymer Plates for Strengthening Reinforced Concrete Members. Proc Inst Civil Engrs Struct Build; 123 (May): 127–42, 1997.

[22]. L. Juvandes, JA. Figueiras, AT. Marques “Performance of Concrete Beams Strengthened with CFRP Laminates.” Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI), Arizona, USA. 1998.

[23]. CA. Ross, DM. Jerome, JW. Tedesco, ML. Hughes, “Strengthening of Reinforced Concrete Beams

Premature failures in the concrete beams strengthening with FRP plates, introduce various models and compared the theoretical and experimental result

H. Varastehpour *

Faculty Member, Institute for Energy and Hydro Technology

(Received: 2010/12/15, Accepted: 2011/4/29)

Abstract

External bonding of composite plates for strengthening and increase the flexural capacity of reinforced concrete beams has been widely popular. To determine the ultimate capacity should be realize the debonding phenomenon in the interface. This paper includes two parts. The first explained the phenomenon of premature failures, detailed of plate separation and introduce the theoretical models. In the second part, the experimental results obtained by researcher's compare with the model provided by author to determine the accuracy of predict premature failure load.

Keywords: failure of beams, flexural capacity, advanced composites, debonding, experimental results.

* Corresponding author: hamid_v_p@yahoo.com