

نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

ارزیابی عددی رفتار شکست تیرهای شکافدار بتنی مقاوم شده با ورق CFRP

منیره سنگی^۱، جواد وائقی امیری^{۲*}، غلامرضا عبدالله زاده^۳، مهدی دهستانی^۴

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

چکیده

از آنجا که پارامترهای مؤثر بر نحوه تقویت تیرهای ترک خورده و رفتار شکست آن‌ها پس از مقاوم سازی از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد، این تحقیق به بررسی عددی رفتار شکست تیرهای بتنی ترک خورده که با ورق CFRP مقاوم شده اند، اختصاص یافته است. تیرهای مورد بررسی دارای ترک اولیه در وسط دهانه می‌باشند و با یک لایه CFRP در زیر تیر تقویت شده‌اند. با استفاده از روش اجزای محدود و تحلیل استاتیکی غیر خطی، ظرفیت باربری نمونه‌ها، جداسدگی ورق، رشد و بازشدگی دهانه ترک مورد ارزیابی قرار گرفته است. ابتدا جهت ارزیابی صحت مدل‌سازی، نتایج حاصل با داده‌های بدست آمده از کار آزمایشگاهی موجود، مقایسه و پس از اطمینان از درستی مدل‌سازی، اثر تغییر پارامترهای مختلف از جمله ضخامت ورق، مشخصات مکانیکی بتن، طول ترک اولیه و مقاومت چسب، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که نمودارهای بار-بازشدگی دهانه ترک دارای دو نقطه حداکثر بار می‌باشند که نقطه حداکثر اول و دوم با افزایش مقاومت بتن، مقاومت چسب و ضخامت ورق، بیشتر شده و در اثر افزایش طول ترک اولیه، نقطه حداکثر اول کاهش می‌یابد در حالی که نقطه حداکثر دوم تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند.

کلمات کلیدی: تیر بتنی شکافدار، CFRP، جداسدگی ورق، بازشدگی دهانه ترک، روش اجزای محدود غیر خطی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.102020.1357	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2018.102020.1357	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۵/۰۱	۱۳۹۷/۰۱/۱۸	۱۳۹۶/۰۸/۰۲
			*نویسنده مسئول: جواد وائقی امیری		
			پست الکترونیکی: vaseghi@nit.ac.ir		

Numerical analysis of Fracture behavior of CFRP Sheet–Strengthened notched Concrete Beams

M. Sangi¹, J. Vaseghi Amiri^{2*}, G. Abdollahzadeh³, M. Dehestani³

1- PhD Student, Structural Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Noushivani University of Technology, Babol, Iran

2- Professor, Structural Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Noushivani University of Technology, Babol, Iran

3- Associate Professor, Structural Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Noushivani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

It is too important to know the influence of effective parameters on the fractural behavior and strengthening of cracked concrete beams, so the present study is dedicated to numerical analysis of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheet-strengthened notched concrete beams. The bearing capacity, CFRP debonding and crack mouth opening displacement (CMOD) of notched beams were evaluated with nonlinear finite element method. Numerical results have been compared with experimental results of other researches. After validation the numerical modeling of CFRP plated notched beams, parametric studies reveal quantitatively the effects of various factors such as; thickness of CFRP sheet, compressive strength of concrete, initial crack length and interfacial bond strength on the CMOD curve of mentioned beam, which is found to be characterized by two peak loads. The first and second peak loads increase with the increase in concrete strength, the thickness of CFRP sheet and the interfacial bond strength. It is also found that increasing the initial crack length decreases the first peak load but no exerts on the second peak load.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 October 2017

Revise Date: 07 April 2018

Accept Date: 23 July 2018

Keywords:

Notched Concrete Beam, CFRP, Debonding, CMOD, Nonlinear Finite Element Analysis.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.102020.1357

*Corresponding author: Vaseghi Amiri, Javad

Email address: vaseghi@nit.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه تقویت سازه‌های بتنی به کمک FRP به عنوان روشی جدید در زمینه مقاوم‌سازی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از FRP برای مقاوم‌سازی نسبت به روش‌های سنتی دارای مزایایی از جمله افزایش مقاومت و سختی، سبکی وزن، مقاومت مناسب در برابر خوردگی، ضخامت کم، حمل و نصب آسان می‌باشد. پس از نصب ورق به تیر بتنی، پاسخ سازه از جمله شکل‌پذیری، مقاومت و پارامترهای شکست در مقایسه با رفتار سازه تقویت نشده، متفاوت است. بنابراین آزمایش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی و عددی برای پیش‌بینی رفتار سازه‌ها پس از مقاوم‌سازی ضروری به نظر می‌رسد.

وجود ترک در سازه‌ها اجتناب‌ناپذیر است، بنابراین بدون در نظر گرفتن اثر آن ممکن است ایمنی سازه به خطر افتد. از طرفی رشد ترک در اثر بارگذاری تکراری که عموماً به سازه‌ها اعمال می‌گردد، موضوعی است که بدون در نظر گرفتن آن در طراحی، امکان کاهش قابل توجه عمر مفید سازه وجود دارد. در سالهای اخیر تعدادی از محققین با به کار بردن مکانیک شکست و تعیین انرژی بدست آمده به بررسی ماهیت مکانیزم جاداشدگی بین ورق FRP و بتن پرداختند [۱-۴]. تالچستن [۵]، معادله خطی ارائه کرد که به محاسبه ظرفیت باربری بتن مسلح با ورق FRP تحت بار محوری کششی پرداخته و بر اساس آن، بار حداکثر و بار نهایی تابعی از انرژی شکست (GF)، مدول الاستیسیته و ضخامت ورق FRP می‌باشد.

یاشیزا و همکاران [۶]، با انجام آزمایش برش یکطرفه بر روی نمونه‌های بتنی مقاوم شده با ورق FRP موفق به تعیین انرژی شکست و رابطه تنش-خیز شدند. وو و یین [۸]، به مطالعه رفتار ترک خوردگی و شکست ناشی از جاداشدگی تیرهای بتن آرمه مقاوم شده با ورق FRP پرداختند. آنها با انجام تحلیل به روش اجزای محدود و با بررسی انواع مختلف گسترش جاداشدگی در طول اندرکنش بتن و ورق FRP و توزیع ترک در بتن دریافتند که خواص چسب و بتن بیشترین تأثیر را بر روی انواع توسعه جاداشدگی و توزیع ترک دارد. همچنین مقاومت پیوستگی، انرژی شکست لایه چسب، مقاومت کششی و انرژی شکست بتن را به طور کامل بررسی کرده و اثر این پارامترها را بر رفتار ترک خوردگی بتن، ظرفیت باربری سازه و انواع جاداشدگی مطالعه نمودند. جهت به تعویق انداختن جاداشدگی ورق از سطح بتن راهکارهای متفاوتی به صورت تجربی و شبیه‌سازی، ارائه و بررسی شده‌اند. شهبازپناهی و همکاران [۹]، با ارائه روش عددی، مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتن آرمه با استفاده از ورق‌های FRP را مورد بررسی قرار دادند. آنها مطالعات خود را بر روی تعیین طول ناحیه شکست FRP، نرخ رهایی انرژی و مسیر گسترش ترک متمرکز نمودند. نتایج نشان می‌دهد حالت شکست در مدل موجود و تیر کنترل (بدون تقویت CFRP) مورد آزمایش به دلیل ترک‌های قطری برشی می‌باشد. همچنین مد شکست نمونه تقویت شده در آزمایشگاه، گسیختگی برشی بتن و جاداشدگی ورق بوده در حالی که شکست نمونه مدل شده متناظر، به دلیل گسیختگی ورق CFRP در دهانه برش می‌باشد.

با توجه به اینکه ورق‌های FRP می‌توانند توسعه ترک را به تأخیر بیاورند و عرض دهانه ترک را در بتن کاهش دهند، بسیاری از تحقیقات [۱۰-۱۲]، به طور تحلیلی روابطی برای پیش‌بینی ظرفیت باربری تیرهای بتن آرمه ترک خورده ارائه دادند. در این راستا وو و دیویدز [۱۳]، با در نظر گرفتن عدم لغزش بین بتن و ورق FRP دریافتند که رشد ترک هنگامی که طول آن تا یک مقدار مشخص افزایش می‌یابد، متوقف می‌شود. عده‌ای از محققین با انجام آزمایش‌های مربوط به پوسته شدن، مقاومت نمونه‌های بتنی مقاوم شده با ورق FRP را در برابر ورقه شدن بررسی نمودند. آنها اثر انواع مختلف ورق FRP و چسب، نحوه آماده‌سازی سطح بتن و مقاومت بتن را بر روی پوسته شدن نمونه‌ها در نظر گرفته و با تعیین انرژی شکست به روش تحلیلی دریافتند که باید انرژی شکست سطح تماس بتن و ورق FRP و سختی ورق‌ها در ورقه شدن نمونه‌ها در نظر گرفته شود [۱۴].

تنش‌های زیاد ممکن است باعث شوند تا ترک نزدیک سطح تماس بتن و FRP شکل گرفته و در صورتی که انرژی لازم برای گسترش آنها فراهم شود این ترک‌ها پیش می‌روند. اخیراً مدل‌های مکانیک شکست غیر خطی ارائه گردیده [۱۵-۱۷]، که نتایج حاصل از آزمایش برش یکطرفه جهت تعیین پارامترهای شکست، مورد استفاده قرار گرفتند. در هر حال به دلیل تفاوت بین حالت شکست تیرهای مسلح و نمونه‌های آزمایش برش یکطرفه این روش‌ها نمی‌تواند جهت تعیین پارامترهای شکست دقیق باشد.

کتر [۱۸]، جهت بررسی مکانیزم انتقال تنش بین تیرهای بتن آرمه و ورق‌های CFRP و GFRP، ۳۶ تیر با مقطع بتن یکپارچه و با رویه بتن ضعیف که نشان دهنده سطح خراب شده بتن می‌باشد ساخته و گسترش کرنش‌ها در بتن و لایه‌های FRP را ثبت و تحلیل کرده است. نتایج نشان می‌دهد که حضور یک لایه بتن ضعیف در سطح، تأثیر چندانی در ظرفیت باربری نداشته و نوع FRP بیشترین تأثیر را در ظرفیت باربری دارد و به طور کلی می‌توان گفت که افزایش مقاومت هسته بتن نمونه‌ها با لایه بتن رویه ضعیف، باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود.

تحقیقات بسیاری بر روی رفتار اعضای بتنی مقاوم شده با FRP انجام شده ولی آنچه حائز اهمیت است میزان و نحوه مناسب تقویت اعضا پس از ترک خوردگی، با ورق FRP می‌باشد. در این زمینه وو و همکاران [۱۹]، به بررسی شکست تیر بتنی تقویت شده با ورق FRP با استفاده از روش تحلیلی پرداخته و نتایج را با آنچه از انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای تیرهای تقویت شده بدست آمده، مقایسه نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در مراحل اولیه بارگذاری رابطه P-CMOD خطی ولی پس از ایجاد اولین ترک غیر خطی می‌باشد. در واقع پس از اینکه میزان بار به اولین مقدار حداکثر خود می‌رسد، کاهش می‌یابد و دهانه ترک باز می‌شود. در ادامه بارگذاری، به دلیل عملکرد توام بتن و ورق FRP مقدار بار افزایش می‌یابد تا به دومین نقطه حداکثر خود می‌رسد. آنها نوسانات مشاهده شده در منحنی‌های بار-بازشدگی دهانه ترک را به شرایط متفاوت چسبندگی، بین ورق FRP و بتن در نقاط مختلف نسبت می‌دهند.

آچینتا و بورگن [۲۰]، از مفاهیم مکانیک شکست بر اساس تعادل انرژی کل، جهت تعیین باری که تحت آن ورق FRP از تیر بتنی جدا می‌شود استفاده کردند. آنها دریافته‌اند که تنها پارامتر مهم و مؤثر، انرژی شکست سطح تماس بتن و ورق FRP بوده و توسعه جداشدگی در ناحیه بتن بین ورق و میلگردهای فولادی کششی رخ داده و همچنین حضور میلگردهای فولادی از توسعه ناحیه شکست جلوگیری می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که خروج از محوریت نیروی ورق FRP نسبت به دهانه ترک، باعث ایجاد تنش‌های کششی در دهانه ترک شده و بهمین دلیل ترک شروع به پیشرفت می‌کند.

محمدی و همکاران [۲۱]، جهت بررسی پارامترهای مؤثر بر ناحیه اندرکنش بتن و ورق CFRP تست برش یکطرفه انجام داده و نیز به کمک تحلیل عددی اثر شرایط مرزی بر مقاومت ناحیه اندرکنش را بررسی نمودند. آن‌ها در تحقیقی دیگر [۲۲]، با ترکیب روش ترک چسبیده و مدل بتن صدمه دیده، با استفاده از روش اجزای محدود پیشرفته به شبیه سازی رفتار تیر بتنی مقاوم شده با FRP پرداختند. آنها جهت صحت سنجی نتایج حاصل از مدلسازی، به طور آزمایشگاهی نیز رفتار این تیرها را بررسی کردند. با مطالعه نحوه گسترش تنش در محل ترک‌های اصلی، جداشدگی ورق از سطح بتن را در نمونه‌هایی با موقعیت ترک متغیر نسبت به وسط دهانه بررسی کردند و دریافته‌اند که جداشدگی ورق از نوک ترک‌های قطری و در نزدیکی ترک‌های اصلی خمشی برشی در جایی که نسبت لنگر-برش زیاد است، آغاز می‌شود.

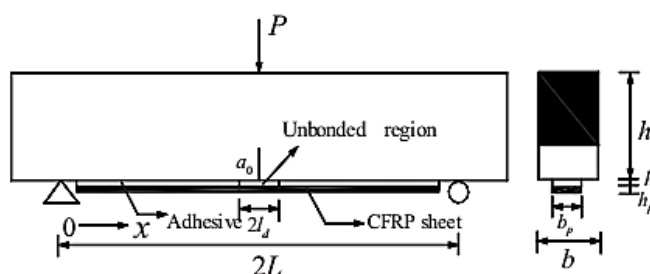
همانطور که پیشتر بیان شد، اکثر مطالعات به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی پیرامون تیرهای مسلح به ورق FRP صورت پذیرفته است. با استفاده از روش اجزای محدود می‌توان بررسی کاملتری در خصوص رفتار سازه‌هایی که پس از ترک خوردگی مقاوم شده‌اند پرداخت. به دلیل هزینه‌های بالا تحقیقات آزمایشگاهی، استفاده از روش اجزای محدود جهت برآورد دقیق تر رفتار این سازه‌ها مناسب می‌باشد. هدف اصلی تحقیق حاضر مدلسازی عددی تیرهای بتنی با ترک اولیه مقاوم شده با ورق CFRP با استفاده از روش اجزای محدود می‌باشد. در این تحقیق به جزئیات بیشتری در خصوص مدلسازی نمونه‌ها از جمله نحوه مدل نمودن چسب که در بررسی‌های پیشین به ندرت مورد توجه بوده، پرداخته شده است. همچنین با مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی و نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط سایر محققین و اطمینان از صحت مدلسازی، پارامترهای مؤثر بر رفتار شکست این تیرها پس از مقاوم سازی، به کمک روش عددی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۲- مدل سازی عددی

به منظور تحلیل عددی تیرهای بتنی با ترک اولیه که توسط ورق CFRP تقویت شده اند، با استفاده از روش اجزای محدود و نرم افزار آباکوس (ABAQUS)، مدلی از نمونه آزمایشگاهی که توسط وو و همکاران [۱۹]، اجرا و تحت بار استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفته است تهیه شده و پس از مقایسه نتایج مدل عددی این تحقیق و نتایج آزمایشگاهی مذکور و اطمینان از درستی مدل عددی، نتایج حاصل برای سایر حالت تحلیل عددی ارائه می گردد.

• نمونه آزمایشگاهی تیر مقاوم شده با CFRP با ترک اولیه

وو و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۱۹]، رفتار تیرهای بتنی با ترک اولیه که توسط یک لایه ورق CFRP در زیر تیر، تقویت شده اند را به صورت تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. شکل ۱ مشخصات تیر با ترک اولیه تحت خمش سه نقطه ای را نشان می دهد. که در آن عرض تیر، (h) ارتفاع تیر، $(2L)$ طول دهانه، (a_0) طول ترک اولیه، (h_a) ضخامت چسب، (h_p) ضخامت ورق CFRP، (b_p) عرض ورق، (P) بار اعمال شده، $(2L_d)$ طول ناحیه ای از ورق که جهت جلوگیری از ترک قطری در حین بارگذاری، به بتن متصل نشده، می باشند.



شکل ۱: تیر بتنی با ترک اولیه و ورق CFRP [۱۹].

تیرها در سه گروه با ارتفاع متفاوت ساخته شدند. جهت شکست خمشی نمونه ها، نسبت طول دهانه به ارتفاع تیر ۴ انتخاب شده، عرض و نسبت طول ترک اولیه به ارتفاع نمونه ها (a_0/h) ثابت و به ترتیب برابر با ۰،۳ و ۱۵۰ mm می باشد. در حالی که ارتفاع متغیر بوده و سه ارتفاع ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی متر انتخاب شده است. بر اساس نتایج آزمایش ها مشخصات مکانیکی بتن مورد استفاده مطابق جدول ۱ و خصوصیات ورق CFRP نیز بر اساس جدول ۲ می باشد.

جدول ۱: خواص مکانیکی بتن مورد استفاده [۱۹].

ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)	مدول گسیختگی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
۰،۲۴۸	۲۹،۴۵	۳،۲۳	۵۰،۲۸

تنظیمات مورد نیاز برای اندازه گیری ظرفیت باربری و میزان بازشدگی دهانه ترک نمونه ها تحت آزمایش خمش سه نقطه ای در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات هندسی و مکانیکی ورق CFRP [۱۹].

کرنش نهایی	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضخامت (mm)	نوع ورق
۰،۰۰۱۷	۳۹۱۶	۲۴۰	۰،۱۶۷	CFRP



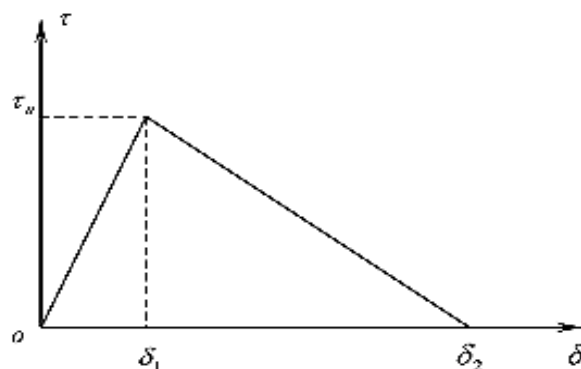
شکل ۲: تنظیمات آزمایشگاهی برای بارگذاری و ثبت اطلاعات نمونه‌ها [۱۹].

• مدل‌سازی عددی تیر شکافدار مقاوم شده با CFRP

جهت بررسی رفتار شکست تیرها و رشد ترک اولیه در نمونه‌ها به روش اجزای محدود، از نرم افزار آباکوس نسخه ۶،۱۴ استفاده شده است. در مدل‌سازی تیر بتنی از المان solid و shell به صورت سه بعدی استفاده گردید و برای مدل‌سازی ترک با توجه به خواص مصالح، روش XFEM انتخاب شده است. معیار بازشدگی ترک، تنش حداکثر می‌باشد به طوری که با تجاوز تنش حداکثر از مقاومت کششی بتن، ترک گسترش می‌یابد. شبیه‌سازی ورق و چسب نیز به ترتیب با استفاده از المانهای shell و cohesive انجام گردید. به طوری که برای چسب نیز لایه‌ای با ضخامت ۰،۱ میلی‌متر تعریف گردید و خواص چسب به آن اختصاص داده شد. مشخصات ورق CFRP در نرم افزار مطابق جدول ۲ اعمال شد و همچنین جهت اعمال مشخصات چسب، از رابطه بین تنش برشی (τ) و لغزش (δ) با توجه به مدل تابع دو خطی ارائه شده توسط لو و همکاران [۲۳] استفاده گردیده است:

$$\tau(x) = \begin{cases} \tau_u \delta(x) / \delta_1 & 0 \leq \delta(x) \leq \delta_1 \\ \tau_u [\delta_2 - \delta(x)] / (\delta_2 - \delta_1) & \delta_1 \leq \delta(x) \leq \delta_2 \\ 0 & \delta(x) \geq \delta_2 \end{cases} \quad (1)$$

که در آن τ_u ، مقاومت برشی حداکثر (مقاومت پیوستگی)، δ_1 ، لغزش مربوط به τ_u و δ_2 ، لغزش نهایی در زمانی که تنش برشی صفر است، می‌باشند (شکل ۳).



شکل ۳: مدل دو خطی تنش-لغزش چسب [۲۳].

طبق مدل لو و بررسی‌های تجربی [۲۳]، پارامترهای اندرکنش به صورت زیر قابل محاسبه هستند:

$$\tau_u = 1.5 \beta_w f_t \quad (2)$$

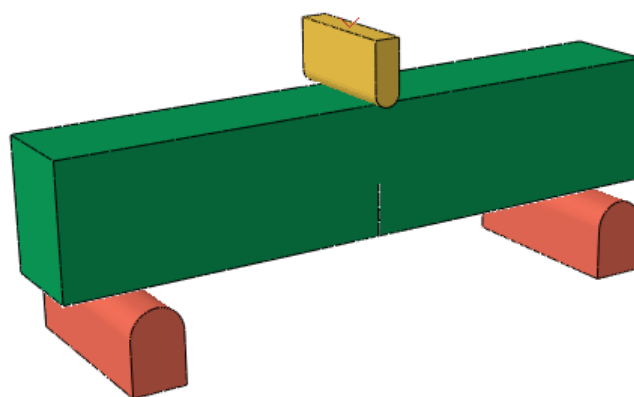
$$\delta_1 = 0.0195\beta_w f_t \quad (3)$$

$$\delta_2 = 0.616\beta_w^2 \sqrt{f_t / \tau_u} \quad (4)$$

که در آن β_w به صورت زیر تعریف می‌شود:

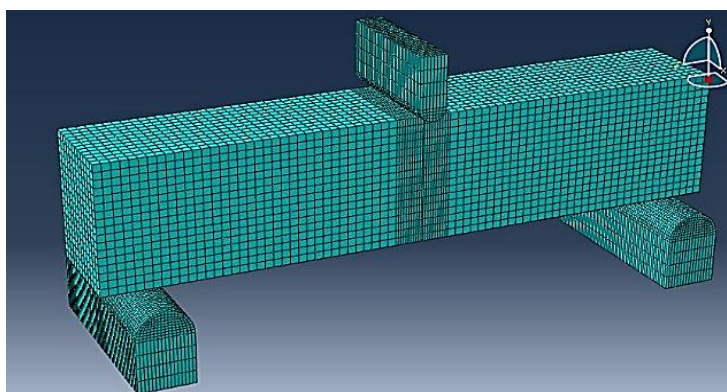
$$\beta_w = \sqrt{\frac{2.25 - b_f / b}{1.25 + b_f / b}} \quad (5)$$

با توجه به اندازه عرض تیر ($b=150\text{mm}$) و عرض ورق ($b_f=50\text{mm}$)، تنش برشی $\tau_u=5.94\text{MPa}$ ، $\delta_1=0.0077\text{mm}$ و $\delta_2=0.238\text{mm}$ بدست می‌آید. مدل اجزای محدود جهت آنالیز در آباکوس مطابق شکل ۴ می‌باشد.



شکل ۴: مدل تیر با ترک اولیه و ورق CFRP

برای مش‌بندی مناسب، نتایج حاصل از تحلیل نمونه‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار و نمونه‌های متناظر آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده و با مشاهده همگرایی پاسخ‌ها بر اساس آنالیز حساسیت، اندازه و چگالی المان‌ها انتخاب گردید. همچنین مطابق شکل ۵، سائز مش به دلیل حساسیت المان‌ها نسبت به رشد ترک در اطراف آن ریزتر و در نواحی غیرحساس درشت‌تر می‌باشد.

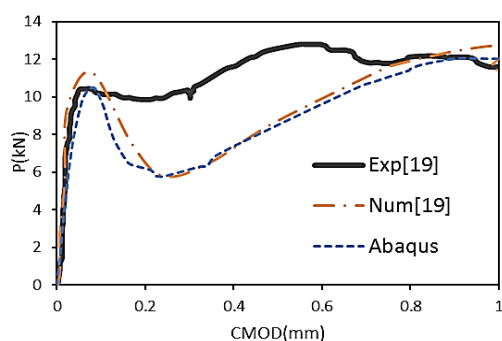


شکل ۵: مش‌بندی مدل اجزای محدود

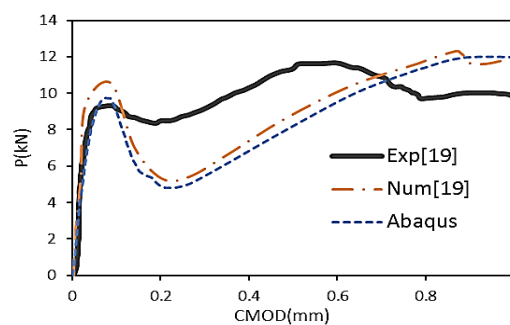
۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی

تیرهای مورد بررسی از سه بخش بتن، چسب و ورق CFRP تشکیل شده‌اند. از آنجا که مقاومت هر بخش در نحوه‌ی شکست و میزان توسعه ترک تأثیرگذار است، می‌توان چهار مرحله را در بارگذاری تا شکست نهایی در نظر گرفت. در ابتدا لغزش بین بتن و ورق ناچیز است و با اعمال نیرو، ورق در وسط دهانه کشیده شده و ترک توسعه می‌یابد. در این مرحله جداسازی روی نداده و همزمان با پیشرفت ترک، بار به نقطه حداکثر اولیه (P_{1max}) می‌رسد. در مرحله بعد در حالی که ریز ترک‌ها توسعه و عرض ترک نیز افزایش می‌یابد، ظرفیت باربری کم می‌شود. سپس در مرحله سوم با باز شدن دهانه ترک، تنش‌های کششی در ورق CFRP افزوده شده و در این زمان اثر ورق بر روی ظرفیت باربری اثر گذاشته و موجب رسیدن بار به نقطه حداکثر دوم (P_{2max}) می‌گردد. در نهایت تمرکز تنش‌های برشی در مجاورت وسط دهانه همراه با توسعه ترک قائم، ریز ترک‌های افقی نیز در سطح مشترک بتن و ورق افزایش یافته، منجر به جداسدن ورق از بتن و سرانجام، شکست کامل نمونه می‌گردد.

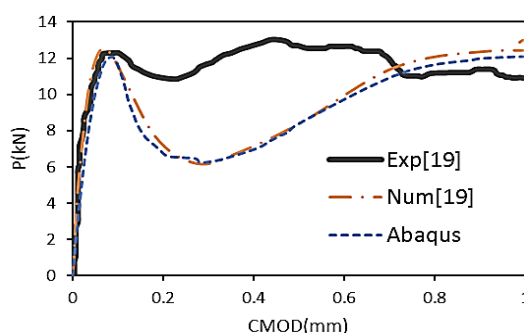
وو و همکاران [۱۹]، به طور عددی نیز این روند را بررسی کرده و نمودارهای بار-بازشدگی دهانه ترک را بدست آوردند. در شکل ۶- الف، ب و ج نمودار P-CMOD حاصل از نتایج آزمایشگاهی و عددی [۱۹]، به ترتیب برای تیرهایی با ارتفاع ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر با نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار آباکوس مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، روند تغییرات در نمودارهای بدست آمده بر اساس روش‌های عددی و آزمایشگاهی مشابه است. به طوری که در ابتدا بار نسبت به بازشدگی دهانه ترک خطی تغییر کرده و پس از توسعه ترک، رفتار غیرخطی شده، بعد از رسیدن به نقطه P_{1max} ، ظرفیت باربری کاهش یافته و دوباره به دلیل حضور ورق CFRP ظرفیت بالا می‌رود تا به نقطه P_{2max} می‌رسد.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۶: مقایسه نمودارهای P-CMOD مرجع [۱۹] و آباکوس: الف) $h=200\text{ mm}$ ب) $h=250\text{ mm}$ ج) $h=300\text{ mm}$

ج) $h=300\text{ mm}$

هر چند میزان کاهش بار در آزمایشگاه کمتر از مقدار متناظر حاصل از مدلسازی می‌باشد ولی آنچه بیشتر حائز اهمیت است افزایش ظرفیت به دلیل حضور ورق است زیرا در جابه جایی بین نقاط حداکثر اولیه و ثانویه انتقال تنش بین بتن و ورق صورت می‌گیرد.

با توجه به نتایج اختلاف بین P_{1max} و P_{2max} بدست آمده از بررسی آزمایشگاهی، عددی و نتایج حاصل از مدلسازی در این تحقیق، کمتر از ده درصد می‌باشد. نوسانات موجود در نمودار حاصل از بررسی آزمایشگاهی را نیز می‌توان به عدم یکنواختی شرایط چسباندن ورق به سطح بتن در طول دهانه تیر، نسبت داد. گسیختگی نمونه‌های مورد آزمایش، به دلیل جدا شدن ورق از سطح بتن و توسعه ترک اتفاق افتاده است [۱۹]. بدین ترتیب که جداشدگی ورق از مجاورت ترک اولیه آغاز شده و با پیشرفت ترک، به سمت تکیه‌گاه پیش می‌رود. در شکل ۷- الف و ب، نحوه شکست نمونه آزمایشگاهی نشان داده شده است.



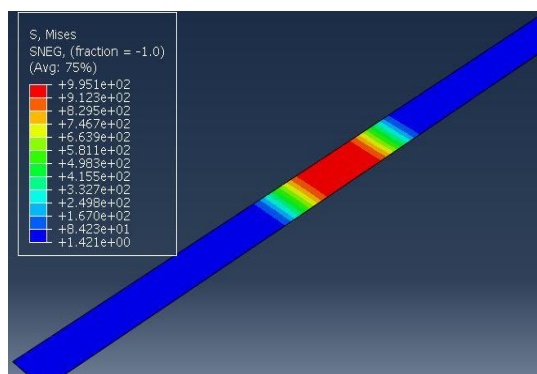
(الف)



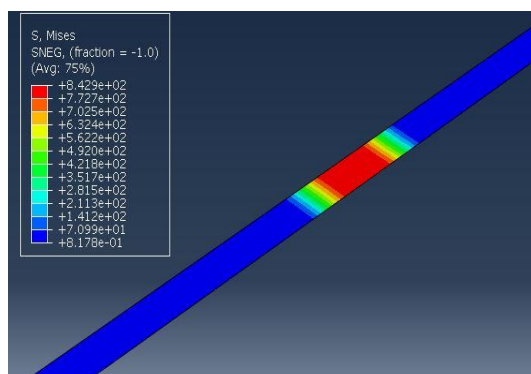
(ب)

شکل ۷: نحوه شکست نمونه آزمایشگاهی (الف) شکست تیر، (ب) جداشدگی ورق CFRP از سطح بتن [۱۹].

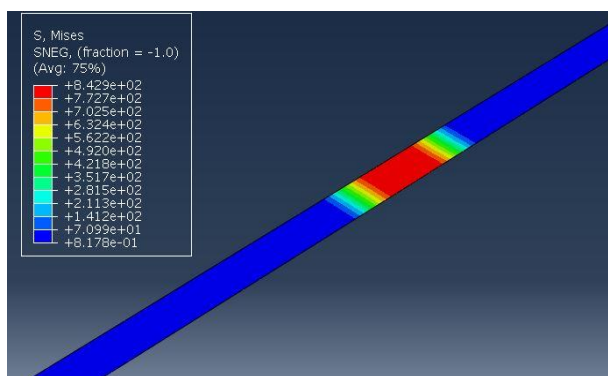
با توجه به شکل ۷، می‌توان انتظار داشت که تنش‌های حداکثر در ورق در نزدیکی ترک رخ دهد. در نمونه عددی نیز مشاهده می‌شود که تنش‌های حداکثر برشی در ورق CFRP، در نزدیکی وسط دهانه اتفاق افتاده که باعث شروع جداشدگی ورق از این ناحیه گردیده و با فاصله از محل ترک اولیه مقدار تنش‌ها کاهش می‌یابد. در شکل ۸ تنش‌های برشی ورق CFRP حاصل از مدلسازی، برای سه نمونه با ارتفاع‌های مختلف نمایش داده شده است.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۸: تنش برشی ورق CFRP: الف) $h=200\text{ mm}$ ، ب) $h=250\text{ mm}$ ، ج) $h=300\text{ mm}$

ملاحظه می‌شود که حداکثر تنش در همه نمونه‌ها در وسط ورق و به طور میانگین برابر با 840 MPa می‌باشد. با توجه به بررسی‌های انجام شده، تطابق نسبتاً خوبی بین مدل‌های عددی و آزمایشگاهی از جنبه‌های مختلف وجود دارد. لذا می‌توان به نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی به کمک اجزا محدود در خصوص مدلسازی بتن، چسب و ورق CFRP اطمینان نمود.

۴- مطالعات پارامتری

پس از اطمینان از صحت‌سنجی مدلسازی عددی به روش اجزا محدود، تحلیل‌های پارامتری برای تیر شکافدار مقاوم شده با ورق CFRP مورد بررسی، با تغییر خواص مکانیکی بتن، ضخامت ورق CFRP، نسبت طول ترک اولیه به ارتفاع تیر و مقاومت چسب صورت پذیرفته است. در کلیه تحلیل‌ها، نوع المان‌ها و نحوه مدلسازی به همان شیوه می‌باشد که در بخش صحت‌سنجی مد نظر قرار گرفته است.

• اثر تغییر خواص مکانیکی بتن

جهت بررسی اثر تغییر مقاومت فشاری بتن بر رفتار شکست تیرهای مقاوم شده با CFRP، مشخصات هندسی و مکانیکی ورق مطابق جدول ۲، انتخاب گردیده است. با تغییر مقاومت فشاری بتن سایر خواص مکانیکی نیز تغییر خواهد کرد. طبق آیین‌نامه CEB-FIP [۲۴]، می‌توان مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و انرژی شکست را برای بتن با مقاومت مشخصه کمتر از 50 MPa ، بر اساس روابط زیر بدست آورد:

$$f_t = 0.3(f_{ck})^{2/3} \quad (۶)$$

$$E_c = 21.5 \times 10^3 \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} \quad (۷)$$

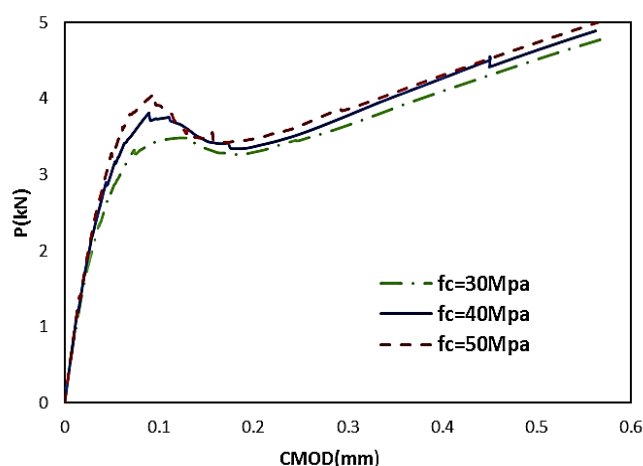
$$G_f = 73(f_{ck} + 8)^{0.18} \quad (۸)$$

در آن f_t مقاومت کششی، E_c مدول الاستیسیته، G_f انرژی شکست و f_{ck} مقاومت مشخصه بتن می‌باشند. خصوصیات مکانیکی بتن جهت تحلیل عددی با آباکوس، مطابق جدول ۳ لحاظ گردیده است.

جدول ۳: خواص مکانیکی بتن در تحلیل عددی.

مدول الاستیسیته (GPa)	مدول گسیختگی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
۳۲,۵۵	۲,۹	۳۰
۳۶,۲۷	۳,۵۱	۴۰
۳۸,۶۳	۴,۱	۵۰

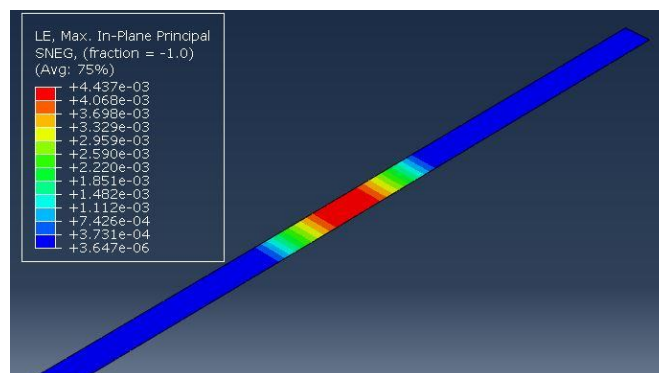
نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک برای سه حالت بتن با مقاومت ۳۰، ۴۰ و ۵۰ مگاپاسکال در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹: نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک برای تیرهایی با مقاومت ۳۰، ۴۰ و ۵۰ مگاپاسکال.

با توجه به شکل فوق ملاحظه می‌شود که با افزایش مقاومت بتن، نقاط حداکثر اولیه و ثانویه افزایش می‌یابند. نرخ افزایش برای نقطه حداکثر اولیه نمونه با مقاومت ۵۰ MPa در مقایسه با نمونه با مقاومت ۳۰ MPa برابر با ۱۱ درصد و برای نقطه حداکثر دوم نمونه‌های مذکور برابر با ۳,۱ درصد می‌باشد. این افزایش با توجه به اینکه تنش پیوستگی در ناحیه صدمه دیده اطراف ترک (FPZ) و نیز مقاومت برشی در سطح تماس بتن و ورق طبق رابطه (۱)، به طور مستقیم متناسب با مقاومت کششی بتن می‌باشند، قابل توجیه است.

از آنجا که حداکثر تنش برشی در ورق CFRP در اطراف ترک اتفاق می‌افتد، مطابق شکل ۱۰، کرنش‌المان‌ها نیز در این ناحیه بیشتر بوده و به تدریج با دور شدن از محل ترک کاهش یابند.



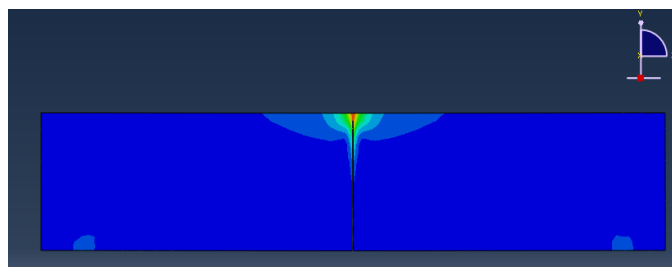
شکل ۱۰: توزیع کرنش در ورق CFRP.

مقادیر حداکثر ظرفیت باربری برای مقاومت‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که افزایش مقاومت فشاری بتن باعث افزایش مقاومت کششی آن و کاهش کرنش‌های به وجود آمده در ورق CFRP می‌گردد. زیرا با افزایش مقاومت کششی بتن نرخ رشد ترک کاهش یافته به این معنی که در یک زمان مشخص، تنش و کرنش ورق برای نمونه با مقاومت بالاتر، کمتر از نمونه متناظر با مقاومت پایین‌تر می‌شود.

جدول ۴: ظرفیت باربری حداکثر نمونه‌ها با مقاومت‌های مختلف.

مقاومت فشاری (MPa)	P_{1max} (kN)	P_{2max} (kN)
۳۰	۳,۴۴	۴,۸۱
۴۰	۳,۷۳	۴,۸۹
۵۰	۳,۹۲	۴,۹۹

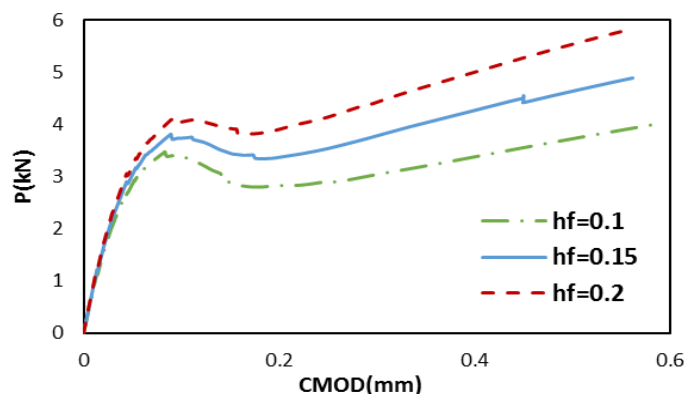
نحوه توزیع تنش تیر در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که حداکثر تنش در اطراف ترک و در زیر بار اتفاق می‌افتد. با توجه به تمرکز تنش در این محل و معیار شکست، این رفتار قابل توجیه است. زیرا با انتخاب المان‌های غنی شده برای تیر، هرگاه تنش المانی به تنش کششی حداکثر برسد، دچار پارگی شده، در نتیجه ترک رشد می‌کند. با پیشرفت ترک تا بالای تیر، این رفتار ادامه خواهد داشت.



شکل ۱۱: توزیع تنش در تیر بتنی.

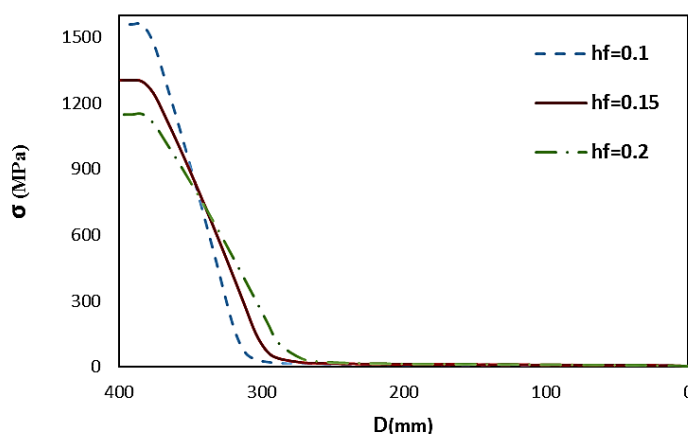
• اثر تغییر ضخامت ورق CFRP

از آنجایی که هندسه ورق CFRP می‌تواند یکی از عوامل تأثیر گذار بر رفتار شکست تیرهای بتنی باشد، در این بخش تأثیر تغییر ضخامت ورق مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه خصوصیات هندسی تیر ثابت بوده، مقاومت مشخصه بتن ۴۰ مگاپاسکال، طول ترک ۱۰۰ mm و با ثابت ماندن سایر پارامترها ضخامت ورق ۰,۱، ۰,۱۵ و ۰,۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک مطابق شکل ۱۲ می‌باشد.



شکل ۱۲: نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک برای ضخامت متغییر ورق CFRP.

نقاط حداکثر اولیه و ثانویه بار در نمودار، با افزایش ضخامت ورق، بیشتر می‌شوند. زیرا ورق با ضخامت بیشتر، نیروی کششی بزرگتری را تحمل می‌کند و با افزایش ضخامت از ۰,۱ به ۰,۲، نقطه حداکثر اولیه ۳۳ درصد و ثانویه ۱۷ درصد افزایش خواهند داشت. بنابراین می‌توان گفت بار حداکثر دوم نسبت به ضخامت ورق حساس تر می‌باشد. تغییرات تنش در طول ورق با تغییر ضخامت آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به تقارن، تنش‌ها برای نصف طول ورق CFRP، نسبت به فاصله از محل ترک ترسیم شده است.

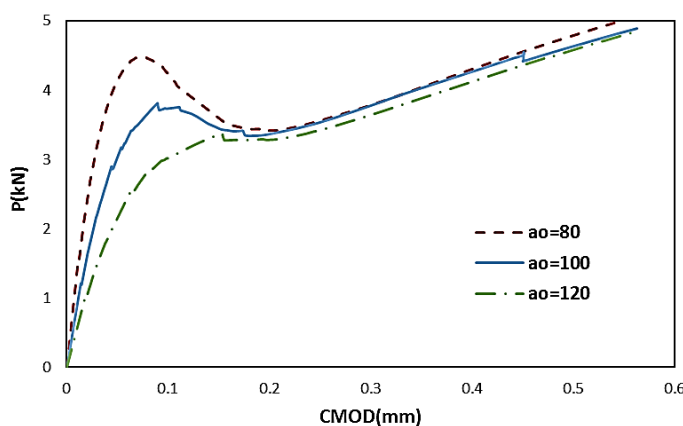


شکل ۱۳: تغییرات تنش در طول ورق CFRP برای ضخامت‌های متفاوت.

با توجه به شکل فوق مشاهده می‌شود که در طولی از ورق که چسب، تنش بتن را به ورق انتقال می‌دهد و عملکرد آن‌ها به صورت یکپارچه است، با افزایش ضخامت ورق از سرعت رشد ترک کاسته شده و تنش در CFRP افزایش می‌یابد. در حالی که در مجاورت ترک، به دلیل عدم اندرکنش CFRP و بتن، رفتار ورق خطی بوده و با افزایش سطح مقطع ورق تنش آن کاهش یافته است.

• اثر تغییر طول ترک اولیه

به منظور بررسی میزان تأثیر طول ترک اولیه بر چگونگی شکست تیر و همچنین ظرفیت باربری آن، برای سه طول ترک ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ میلی‌متر سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شد. مقاومت مشخصه بتن ۴۰ مگاپاسکال و مشخصات ورق نیز مطابق جدول ۲ می‌باشد. تغییرات ظرفیت باربری نمونه‌ها نسبت به بازشدگی دهانه ترک در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. از شکل ۱۴ می‌توان ملاحظه نمود که با افزایش طول ترک، بار حداکثر اولیه کاهش و بار حداکثر ثانویه تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. دلیل این رفتار می‌تواند کاهش ظرفیت باربری تیر با توجه به افزایش طول ترک باشد. زیرا نقطه اول حداکثر در نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک، مربوط به شکست بتن در اثر توسعه ترک و نقطه حداکثر دوم به دلیل نیروی کششی CFRP می‌باشد.



شکل ۱۴: نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک برای طول ترک اولیه متغیر.

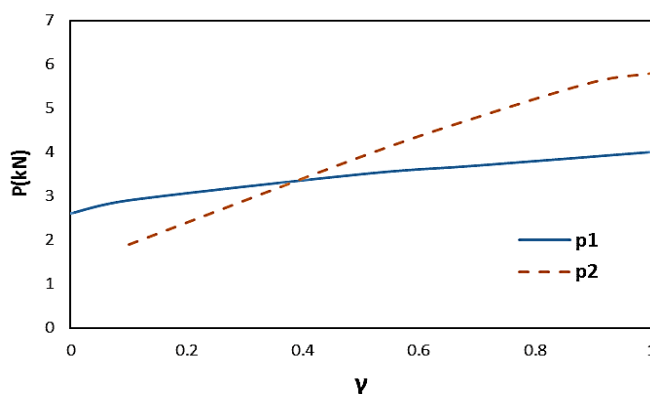
بر اساس جدول ۵ مشاهده می‌شود که کاهش ظرفیت باربری تیر با تغییر طول ترک از ۸۰ به ۱۲۰ میلی‌متر، حدود ۳۱ درصد است.

جدول ۵- ظرفیت باربری حداکثر نمونه‌ها با طول ترک متفاوت

ضخامت ورق FRP (mm)	P_{1max} (kN)	P_{2max} (kN)
۸۰	۴,۴۷	۵
۱۰۰	۳,۷۳	۴,۷۵
۱۲۰	۳,۲۱	۴,۷۱

• اثر مقاومت چسب

نهایتاً در این مطالعه جهت بررسی میزان تأثیر مقاومت چسب بر روی بارهای حداکثر اولیه و ثانویه در نمودارهای P-CMOD، مشخصات ورق CFRP در شبیه سازی عددی مطابق جدول ۲، مقاومت مشخصه بتن ۴۰ مگاپاسکال و طول ترک اولیه ۱۰۰ mm انتخاب گردید. پس از تعیین مقاومت چسب با استفاده از رابطه (۲)، آن را با ضریب γ کاهش داده و مطابق شکل ۱۵ بارهای حداکثر نسبت به تغییرات γ رسم گردید. ضریب کاهش γ جهت نمایش میزان اثرگذاری عوامل مخرب زیست محیطی و شرایط ساخت بر روی اتصال بین ورق CFRP و بتن در طول عمر سرویس دهی یک سازه در نظر گرفته شده است. به طوریکه $\gamma=0$ و $\gamma=1$ ، به ترتیب نشان دهنده عدم پیوستگی و اتصال کامل بتن و ورق می‌باشند.



شکل ۱۵: اثر مقاومت چسب بر روی بار حداکثر اولیه و ثانویه

همانگونه که ملاحظه می‌شود بارهای حداکثر هر دو با افزایش مقاومت چسب افزایش می‌یابند ولی میزان این افزایش برای بار حداکثر ثانویه قابل توجه است. بنابراین مقاومت چسب بیشتر بر عملکرد ورق اثر خواهد گذاشت. بر اساس نتایج، میزان افزایش بار حداکثر اولیه و ثانویه به ترتیب ۵۳ و ۶۷ درصد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در $\gamma=0,39$ مقدار بارها مشابه بوده و برای $\gamma \leq 0,1$ به دلیل ضعیف بودن چسب، ورق وارد عمل نشده و در نمودار P_2 حذف شده است.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار تیرهای بتنی با ترک اولیه مقاوم شده با ورق CFRP با تغییر پارامترهای تأثیرگذار به روش اجزا محدود، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل سازی عددی رفتار تیرهای ترک خورده مقاوم شده با ورق به روش اجزای محدود از دقت مناسبی برخوردار است.

- گسیختگی نمونه‌ها با جدا شدن ورق CFRP از محل ترک، و توسعه آن به سمت انتهای ورق همزمان با پیشرفت ترک اتفاق می‌افتد.
- با توجه به رابطه بین مقاومت مشخصه بتن و سایر خواص مکانیکی آن، با افزایش مقاومت فشاری و به دنبال آن مقاومت کششی، ظرفیت باربری نمونه‌ها افزایش می‌یابد.
- با افزایش ضخامت ورق، ظرفیت باربری و تنش کششی ورق CFRP در ناحیه متصل به بتن افزایش و در اطراف ترک میزان تنش‌ها کاهش می‌یابند.
- تغییر طول ترک اولیه تأثیر بسزایی بر روی بار حداکثر اولیه داشته و با افزایش طول ترک به طور قابل توجهی از ظرفیت باربری کاسته می‌شود.
- اثر مقاومت چسب با در نظر گرفتن ضریب کاهنده γ بررسی گردید. با افزایش مقاومت چسب بارهای حداکثر اولیه و ثانویه افزایش می‌یابند و با کاهش آن از حد مشخصی عملکرد ورق CFRP حذف می‌شود.
- به طور کلی با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که طول ترک اولیه و مقاومت چسب، به ترتیب فاکتورهای مؤثر بر روی بار حداکثر اولیه و ثانویه در نمودارهای بار-بازشدگی دهانه ترک می‌باشند.

مراجع

- [1] Wu, Z.S., and Yoshizawa, H. (1999). "Analytical/Experimental Study on Composite Behavior in Strengthening Structures with Bonded Carbon Fiber Sheets". *Reinf Plast Compos*, Vol. 18(2), pp. 1131–55.
- [2] Yuan, H., and Wu, Z.S. (2000). "Energy Release Rates for Interfacial Crack in Laminated structures". *Struct Mech Earthquake Eng, JSCE*, Vol. 17(1), pp. 19–31.
- [3] Wu, Z.S., Yuan, H., and Niu, H.D. (2002). "Stress Transfer and Fracture Propagation in different Kinds of Adhesive Joints". *Eng Mech, ASCE*, Vol. 128(5), pp. 562–73.
- [4] Achintha, M., and Burgoyne, C. (2013). "Fracture Energy of the Concrete-FRP Interface in Strengthened Beams". *Eng Fracture Mech*, Vol. 110, pp. 38–51.
- [5] Taljsten, B. (1996). "Strengthening of Concrete Prisms using the Plate-Debonding Technique". *Int J Fract*, Vol. 81, pp. 253–66.
- [6] Yoshizawa, H., Wu, Z.S., Yuan, H., and Kanakubo, T. (2000). "Study on FRP-Concrete Interface Bond Performance". *Mater Concrete Struct Pavements, JSCE*, Vol. 49(662), pp. 105–19.
- [7] Wu, Z.S., Yuan, H., Yoshizawa, H., and Kanakubo, T. (2001). "Experimental/Analytical Study on Interfacial Fracture Energy and Fracture Propagation along FRP-Concrete Interface". *ACI International Special Publication*, Vol. 201, pp. 133–52.
- [8] Wu, Z., and Yin, J. (2003). "Fracture Behavior of FRP-Strengthened Concrete Structures", *Fracture Mechanics*, Vol. 70, pp. 1339–1355.
- [9] Shahbazpanahi, S., Abdullah, A., Kamgar, A., and Farzadnia, N. (2015). "Fracture Mechanic Modeling of Fiber Reinforced Polymer Shear-Strengthened Reinforced Concrete Beam". *Composites: Part B*, Vol. 68, pp. 113–120.
- [10] Baky, H., Ebead, U., and Neale, K. (2007). "Flexural and Interfacial Behavior of FRP-Strengthened Reinforced Concrete Beams". *J. Compos. Constr.*, Vol. 11(6), pp. 629–639.
- [11] Wang, J., and Zhang, C. (2008). "Nonlinear Fracture Mechanics of Flexural-Shear Crack Induced Debonding of FRP Strengthened Concrete Beams". *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 45, pp. 2916–2936.
- [12] Zheng, J. J., Dai, J. G., and Fan, X. L. (2016). "Fracture Analysis of FRP-Plated Notched Concrete Beams Subjected to Three-Point Bending". *Eng Mech, ASCE*, Vol. 142(3).

- [13] Wu, Z. J., and Davies, J. M. (2003). "Mechanical Analysis of a Cracked Beam Reinforced with an External FRP Plate". *Compos Struct*, Vol. 62(2), pp. 139–143.
- [14] Wu, Z., Yuan, H., Kojima, Y., and Ahmed, E. (2005). "Experimental and Analytical Studies on Peeling and Spalling Resistance of Unidirectional FRP Sheets Bonded to Concrete". *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 1088–1097.
- [15] Wang, J., and Zhang C. (2008). "Nonlinear Fracture Mechanics of Flexural-Shear Crack Induced Debonding of FRP Strengthened Concrete Beams". *Int J Solids Struct*, Vol. 45(2), pp. 2916–36.
- [16] Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P., and Jiang, J. (2007). "Intermediate Crack Debonding in FRP-Strengthened RC Beams: FE Analysis and Strength Model". *Compos. Constr.*, Vol. 112, pp. 161–174.
- [17] Mohammadi, T., Wan, B., and Dai, J. G. (2011). "Modeling of CFRP Concrete Interface Subjected to Coupled Pull-Out and Push off actions". *ACI Spec. Publ.*, Vol. 275(19), pp. 1–18.
- [18] Katz, A. (2007). "Stress Transfer between FRP Laminates and Concrete through Deteriorated Concrete Surfaces". *Compos Constr*, Vol. 11(4), pp. 410–418.
- [19] Wu, Z., Yang, S., Hu, X., Zheng, J., Fan, X., and Shan, J. (2010). "Analytical Solution for Fracture Analysis of CFRP Sheet-Strengthened Cracked Concrete Beams". *Eng. Mech.*, Vol. 136(10), pp. 1202–1219.
- [20] Achintha, M., and Burgoyne, C. (2013). "Fracture Energy of the Concrete-FRP Interface in Strengthened Beams". *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 110, pp. 38–51.
- [21] Mohammadi, T., & Wan, B. (2015). "Sensitivity Analysis of Stress State and Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer/Concrete Interface to Boundary Conditions in Single Shear Pull-Out Test". *Advances in Mechanical Engineering*, 7(5), 1687814015585419.
- [22] Mohammadi, T., Wan, B., Harries, K. A., and Sweriduk, M. E. (2017). "Bond Behavior of FRP-Concrete in Presence of Intermediate Crack Debonding Failure". *Journal of Composites For Construction*, Vol. 21(5).
- [23] Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P., and Jiang, J. (2005). "Bond-Slip Models for FRP Sheets/Plates Bonded to Concrete". *Eng. Struct.*, Vol. 276, pp. 920-937.
- [24] CEB-FIP, (Fédération Internationale de la Précontrainte). (1993). CEB-FIP model cod 1990, Thomas Telford, Lausanne, Switzerland.