

## بررسی عددی رفتار غیرخطی تیرهای عمیق بتنی دارای بازشوی مستطیلی در جان تقویت شده با نوارهای FRP

سید شهاب امامزاده \*

استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه خوارزمی تهران.

### چکیده

عمق زیاد تیرهای عمیق امکان ایجاد بازشو در جان را فراهم می‌کند. بازشو در تیرهای عمیق برای عبور لوله‌ها و فضاهای تأسیساتی در نظر گرفته می‌شود. وجود بازشوها در جان باعث قطع اعضای بند و بست خرپای معادل و کاهش ظرفیت بارپذیری و سختی تیر می‌شود که می‌تواند حتی باعث گسیختگی گردد. یک راه حل برای این مشکل استفاده از نوارهای تقویتی FRP است. در این تحقیق تأثیر ورق‌های تقویتی FRP بر ظرفیت باربری تیرهای عمیق بتنی دارای بازشوی مستطیل شکل بررسی شده است. برای این منظور ابتدا نمونه‌های آزمایشگاهی مرجع به روش اجزای محدود تحلیل عددی و صحت سنجی شدند. سپس برخی از پارامترهایی که ممکن بود روی پاسخ تیر عمیق تأثیرگذار باشند مانند تعداد، ابعاد و فواصل بازشوها، انتخاب و با ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها، پاسخ تیر عمیق نسبت به تغییرات آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که نمونه با ورق تقویتی BOX شکل ظرفیت باربری کمتری نسبت به ورق تقویتی U شکل داشته است. همچنین نمونه‌هایی با ورق FRP به شکل U نسبت به نمونه بدون ورق ۳۸ درصد و نسبت به ورق BOX شکل ۱۳ درصد ظرفیت باربری بیشتری دارند. با مقایسه نمونه‌های تقویت شده از نظر شکل پذیری و ضریب رفتار مشخص شد که ورق تقویتی U شکل عملکرد بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: تیر عمیق، ضریب رفتار، شکل پذیری، بازشوی جان، نوار FRP.

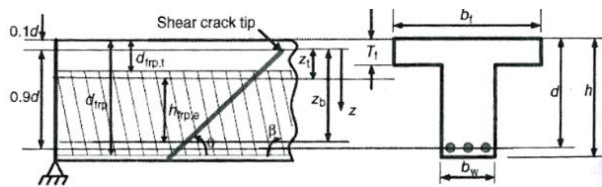
\* نویسنده مسئول: shemamzadeh@khu.ac.ir

## ۱- مقدمه

با وجود تحلیل‌های عددی متعدد روی تیرهای عمیق بازشودار تقویت شده [۱۴، ۱۵]، به دلیل فقدان داده‌های آزمایشگاهی کافی، نمی‌توان انتظار داشت که مدل‌های عددی نتایج دقیقی داشته باشند. با این حال تقویت با استفاده از نوارهای FRP در تیرهای خمشی با استفاده از روش‌های متنوعی انجام شده است [۲۱-۱۶]. در حال حاضر پاسخ تیرهای عمیق بتنی تقویت شده با نوار FRP به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. سیستم‌های FRP بصورت نوارهای چسبیده خارجی، معمولاً برای تقویت برشی تیرهای ضعیف بتنی استفاده می‌شوند [۲۴-۲۲]. نتایج آزمایشگاهی بر روی تیرهای عمیق نشان می‌دهد که با تقویت تیر، بار خرابی افزایش یافته و انتشار ترک‌های مورب محدود می‌شوند. برای نمونه در یک تحقیق آزمایشگاهی [۲۵] بر روی هشت تیر عمیق، مقاومت تیر تقویت شده با نوار FRP چسبیده U شکل، تقریباً دو برابر تیر بدون تقویت بدست آمد. در تحقیق دیگری، لی و لئونگ [۲۶]، پاسخ برشی تیرهای عمیق تقویت شده با نوارهای FRP برای دامنه‌ای از نسبت‌های  $a/d$  (طول به عمق مؤثر) برابر ۱ الی ۳/۵ بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که ظرفیت برشی تیرهای عمیق به شدت تحت تأثیر این نسبت بوده و با افزایش نسبت  $a/d$  عملکرد نوار FRP کاهش می‌یابد. راما و همکاران [۲۷]، بر روی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP با درجات مختلف مقاوم-سازی مطالعه‌ای را انجام دادند. در این مطالعه به بررسی نتایج آزمایشگاهی و مطالعات تحلیلی تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح به روش چسباندن خارجی ورق‌های پرمقاومت و سبک FRP در ناحیه کششی تیر پرداختند. در این آزمایش به بررسی چهار نمونه تیر که سه نمونه آن با مقادیر مختلف تقویت FRP با تغییر در عرض ورق‌ها و یک نمونه تیر مبنای بدون تقویت با FRP به روش بارگذاری ۴ نقطه‌ای در دهانه برش ۹۰ cm مورد بررسی پرداخته شد. در این مطالعه بیشترین افزایش در اولین ترک و لنگرهای نهایی در حدود ۱۵۰ تا ۲۳۰ درصد است. در این تحقیق افزایش سختی تیرهای تقویت شده قابل توجه و در حدود ۱۱۰ درصد نسبت به نمونه مبنای بود. ایسلام و همکاران [۲۸] روی تقویت برشی تیرهای عمیق بتن آرمه با استفاده از نوارهای FRP خارجی مطالعاتی را انجام دادند که در این مطالعه شش تیر عمیق بتنی جهت آزمایش تا مرحله گسیختگی، ساخته و پرداخته شد. یکی از این تیرها با توجه به شرایط اولیه خود و بدون تقویت مورد آزمایش

تیرها یکی از اعضای هستند که بارهای وارده را به ستون‌ها انتقال می‌دهند. شکل هندسی تیرها بستگی به کاربری آنها دارد. برای مثال چنانچه در پارکینگ‌ها بخواهند ایجاد فضای مناسب برای مانور بیشتر ماشین‌ها به وجود آورند بعضی از ستون‌ها حذف می‌شوند و این عمل باعث خواهد شد که ارتفاع تیرها بسیار زیاد شوند به حدی که از حالت تیر معمولی خارج شده و دیگر دارای رفتار یک تیر معمولی نباشند. قوانین و روابطی که به منظور تحلیل تیرهای ساده به کار می‌روند برای تحلیل و طراحی این اعضا مناسب نیستند. اعضای با خصوصیات فوق را تیر تیغه و یا تیر عمیق می‌نامند. در طراحی ساختمان‌های مدرن تعبیه بازشوهای عرضی در تیرها برای عبور لوله‌ها و فضا‌های تاسیساتی رو به افزایش و اجتناب ناپذیر است. تعبیه بازشو نقش موثری در کاهش فضای مرده و ارتفاع غیرمفید سازه داشته و منجر به طراحی فشرده‌تر و اقتصادی‌تر می‌شود. تعبیه بازشو در تیرها، رفتار تیر را پیچیده می‌کند. پر واضح است استفاده از این گونه بازشوها باعث وقوع یک ناپیوستگی در جریان عادی تنش در مقطع تیر می‌گردد و در نتیجه تمرکز تنش و به موازات آن ترک‌های زودرس در اطراف بازشو مشاهده می‌گردد. در یک دهه گذشته با مطرح شدن بحث تقویت اعضا بتن مسلح، توسط نوارهای پلیمری (FRP)، فصل جدیدی از تحقیقات در این زمینه شکل گرفت که بخش قابل توجهی از این مطالعات، بر طراحی برشی اعضا تقویت شده با نوارهای FRP متمرکز شد. براساس تحقیقات به عمل آمده، افزایش تقویت داخلی بوسیله آرماتورهای برشی بیش از یک مقدار مشخص نمی‌تواند باعث افزایش ظرفیت برشی و مقاومت نهایی تیر عمیق بتن مسلح شود. از طرف دیگر تقویت خارجی جان تیر عمیق به منظور افزایش ظرفیت برشی به کمک ورق‌های FRP مورد بحث و بررسی محققان و متخصصان بوده است. عمق زیاد تیرهای عمیق امکان ایجاد بازشوی جان را فراهم می‌کند [۳-۱]. وجود بازشوها در جان باعث قطع ارتباط با اعضای بند و بست خرپای معادل و در نتیجه باعث جلوگیری از انتقال فشار به تکیه‌گاه‌ها و کاهش ظرفیت تحمل بار می‌شود. ناآگاهی از این مساله ممکن است خسارات جبران ناپذیری به همراه داشته باشد [۴-۶]. یک راه حل برای نقص ذکر شده استفاده از نوارهای کامپوزیتی پلیمری است [۱۰-۷]. راه حل دیگر استفاده از کابل‌های پلیمری پیش‌تنیده است [۱۳-۱۱].

حالت حد نهایی، ضخامت  $t_{FRP}$  و  $w_{FRP}$  عرض هر نوار،  $S_{FRP}$  فاصله افقی و مرکز تا مرکز نوارها در جهت محور طولی تیر و  $\beta$  زاویه قرارگیری نوارهای FRP نسبت به محور طولی تیر و  $h_{FRP,e}$  ارتفاع موثر FRP متصل شده در جان است.



شکل ۱- پارامترهای طرح مقاوم سازی برشی

با کاهش مقاومت و بروز ترک و خرابی در تیر عمیق بتن مسلح، به دلیل وجود بازشوها، استفاده از روشی مناسب جهت ترمیم و مقاوم سازی تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو ضروری است. در این میان استفاده از روشی که بهترین عملکرد را در مواردی همچون افزایش ظرفیت خمشی و برشی تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو، مقرون به صرفه بودن، سرعت اجرا، دوام و سایر پارامترهای موثر را داشته باشد، در میان سایر روش های مقاوم سازی بسیار حائز اهمیت است. برای بهسازی و تقویت تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو، ورق های FRP به دلیل مقاومت بالا، انعطاف پذیری خوب در شرایط اجرایی مختلف و عدم ایجاد تغییر فیزیکی زیاد در شکل و ابعاد عضو، گزینه ی مناسبی جهت استفاده در ترمیم و تقویت تیرهای بتن مسلح دارای بازشو به شمار می رود. بر خلاف تیرهای بدون بازشو، روابط تحلیلی صریحی برای تعیین اثر بازشو وجود ندارد و اثر بازشو بر اساس روابط آزمایشگاهی و یا عددی مطرح می گردد. در ادامه اثر بازشو با مدل اجزای محدود ارائه شده است.

### ۳- معیار خرابی بتن

رفتار غیرخطی بتن را می توان با آزمایش تک محوری و کنترل تغییر مکان تا مرحله خرابی بدست آورد. لی [۲۹]، رفتار غیرخطی بتن را تا مرحله خرابی مورد مطالعه قرار داده و با تعریف شاخص خرابی در کشش و فشار، معیار آسیب پذیری بتن را جهت کاربرد در تحلیل های عددی ارائه نمود. در شکل (۲-الف) رفتار تنش- کرنش بتن تا مرحله خرابی در فشار و کشش نشان داده شده است. در فشار، بتن در یک تنش اولیه به تسلیم می رسد، تا قبل از این تنش، رفتار بتن، ارتجاعی خطی با شیب  $E_0$  است. پس از این مرحله مقاومت بتن به صورت غیرخطی تا مقدار  $\sigma_{cu}$  افزایش می یابد. پس

قرار گرفته شد تا به عنوان مرجع به کار گرفته شود. مابقی نمونه ها بعد از مقاوم سازی با پیچیدن ورق های FRP بصورت نواری و رشته ای مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش ها نشان داده اند که استفاده از نوارهای FRP موجب کاهش رشد ترک های قطری بحرانی می شود و همچنین باعث بالا رفتن ظرفیت تحمل بار تیر می گردد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان می دهد که استفاده از باندهای FRP در جهت عمود بر ترک های قطری بهتر از استفاده آن در جهت قائم است. تحقیقات اشاره شده نشان می دهد که مطالعات عددی اندکی بر روی رفتار غیرخطی تیرهای عمیق دارای بازشو تقویت شده انجام شده است و اکثر نتایج حاصل از بررسی های آزمایشگاهی بوده است. لذا در این تحقیق به بررسی عددی رفتار تیرهای عمیق بتنی دارای بازشوی مستطیلی با تقویت توسط نوارهای FRP پرداخته شده و طرح مناسب تقویتی ارائه می گردد.

### ۲- مقاومت برشی تیرهای بتنی تقویت شده با FRP

در آیین نامه های طراحی مانند ISI کانادا و ACI معمولاً فرض می شود که مقاومت برشی مجموع سه مولفه بتن، خاموت و نوارهای FRP است. در نتیجه، مقاومت برشی اسمی  $V_n$  یک تیر تقویت شده با FRP طبق رابطه ۱ بدست می آید [۲۳].

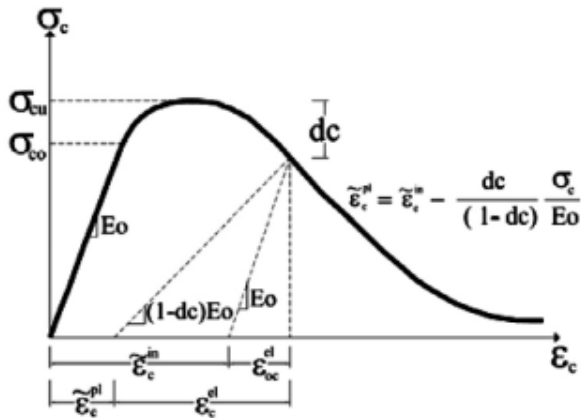
$$V_n = V_c + V_s + V_{FRP} \quad (1)$$

در این رابطه،  $V_c$  سهم بتن،  $V_s$  سهم خاموت ها و میلگردهای مورب و  $V_{FRP}$  سهم نوار FRP است. مقادیر  $V_c$  و  $V_s$  طبق بندهای آیین نامه ای محاسبه می شوند. سهم FRP توسط مدل خرابی، مشابه تعیین سهم خاموت فولادی مشخص می شود. دو پارامتر در تعیین سهم FRP مهم هستند، یکی زاویه ترک برشی که معمولاً برای طراحی ۴۵ درجه فرض می شود و دیگری تنش متوسط (یا تنش موثر) در نوارهای FRP قطع شده توسط ترک برشی بحرانی. مدل های متفاوت اساساً در تعریف این تنش موثر، اختلاف دارند. طبق شکل ۱، یک طرح تقویت کلی با نوارهای FRP متصل شده در دو طرف تیر در نظر گرفته شده است. یک ترک برشی بحرانی فرض شده که نسبت به محور طولی تیر زاویه دارد. سهم FRP در مقاومت برشی تیر RC توسط معادله ۲ ارائه می شود [۲۳].

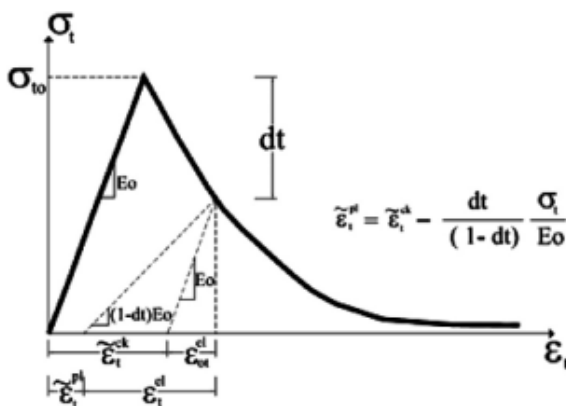
$$V_{FRP} = 2f_{FRP,e}t_{FRP}w_{FRP} \frac{h_{FRP,e}(\sin \beta + \cos \beta)}{S_{FRP}} \quad (2)$$

که  $f_{FRP,e}$  تنش متوسط FRP قطع شده توسط ترک برشی در

صورت دونقطه‌ای و چهارنقطه‌ای در نظر گرفته شده‌اند. طول تیرها ۶ m، ارتفاع ۲ m، عرض ۰/۵ m و ابعاد بازشوها ۱/۲×۰/۶ است. در این نمونه‌ها از بتن با مقاومت فشاری ۲۳/۵MPa استفاده شد. تیرها با المان‌های سه بعدی توپر و آرماتورها با المان‌های خرابایی در نرم‌افزار آباکوس گسسته‌سازی شدند. ابعاد المان‌ها طوری انتخاب شد که نتایج مستقل از نتایج باشد. در جدول ۲ مشخصات فولاد و بتن ارائه شده است.

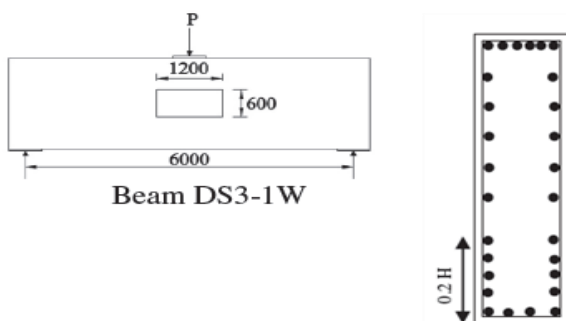


الف) رفتار فشار بتن



ب) رفتار کششی بتن

شکل ۲- نمودار تنش- کرنش بتن در فشار و کشش تک‌محوره [۲۹]



شکل ۳- مشخصات هندسی تیر بتنی با بازشو (mm) [۳۰]

از این مرحله کرنش فشاری کل  $\varepsilon_c$  را می‌توان با رسم یک خط به شیب  $E_0$  به دو قسمت الاستیک اولیه  $\varepsilon_{0c}^{el}$  و غیر ارتجاعی  $\varepsilon_c^{in}$  به فرم زیر تبدیل نمود [۲۹]:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{0c}^{el} + \varepsilon_c^{in} \quad (۳)$$

$$\varepsilon_{0c}^{el} = \frac{\sigma_0}{E_0} \quad (۴)$$

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el} \quad (۵)$$

در واقع کرنش غیرارتجاعی با فرض عدم خرابایی محاسبه شده است. لذا این کرنش باید تصحیح شده و به کرنش پلاستیک تبدیل شود. در این حالت با رسم خطی به شیب  $(1-d_c)E_0$ ، کرنش پلاستیک از رابطه (۶) به دست می‌آید [۲۹].

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{1-d_c} \frac{\sigma_0}{E_0} \quad (۶)$$

در این رابطه  $d_c$  شاخص خرابایی بتن در فشار است. اگر کرنش غیرارتجاعی صفر باشد شاخص خرابایی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود، در غیر این صورت شاخص خرابایی از نمودار آزمایشگاهی کرنش-شاخص خرابایی بدست می‌آید. مشابه مطابق شکل (۲-ب) برای شبیه‌سازی ترک-خوردگی بتن در کشش نیز شاخص خرابایی کشش  $d_t$  تعریف شده که رفتار غیرخطی بتن را نشان می‌دهد. ترک‌های ایجاد شده معمولاً در جهت عمود بر جهت تنش‌های کشش حداکثر رشد نموده و یک ناحیه ترک اندود را ایجاد می‌نمایند. در مدل ترک اندود، ناحیه ترک خورده به صورت یک سری ترک‌های موازی پخش شده در نظر گرفته شده و اثر ترک با کاهش سختی در جهت عمود بر ترک به صفر یا یک مقدار مشخصی، در تحلیل لحاظ می‌گردد. مطابق شکل پس از ایجاد ترک اولیه، مقاومتی برای بتن در نظر گرفته شده است. این مقاومت تا مقدار معینی از بازشدگی ترک ادامه داشته و به آن خاصیت سخت شوندگی کششی گفته می‌شود.

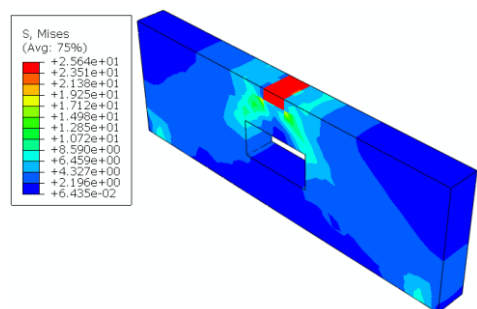
#### ۴- حل عددی تیر آزمایشگاهی

در ابتدا به منظور اطمینان از صحت نتایج تحلیل عددی، از مطالعات آزمایشگاهی محمد و همکاران [۳۰] که به بررسی عملکرد تیرهای عمیق دارای بازشو در جان پرداخته‌اند، استفاده می‌شود. مشخصات هندسی نمونه‌های مورد نظر در شکل ۳ و مدل اجزای محدود آن در شکل ۴ نشان داده شده است. تیرهای مورد نظر در سه گروه بدون بازشو، یک بازشو و دو بازشو بوده و از نظر بارگذاری نیز به

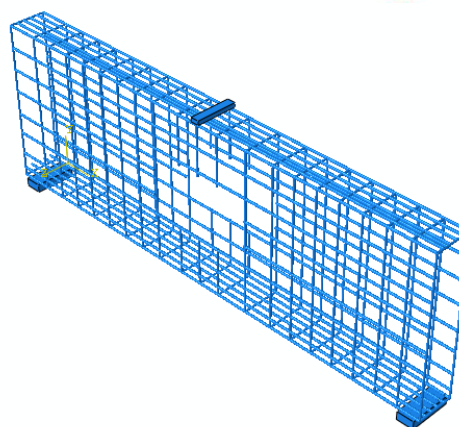
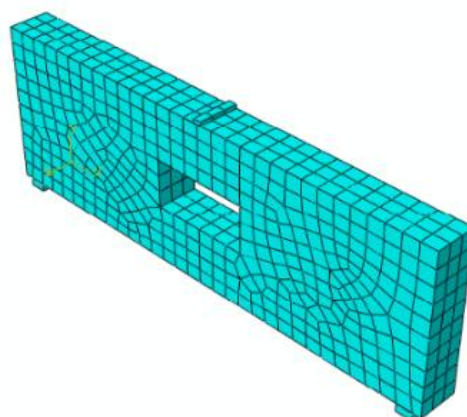
جدول ۲- مشخصات بتن مصرفی در تیر عمیق [۳۰]

رفتار فشاری	
Yield Stress (MPa)	Inelastic Strain
6	0
13.26	9.034E-05
16.73	0.00023
18.80	0.00043
19.78	0.00069
20	0.00094
18.76	0.00185
16.62	0.00280
14.59	0.00374
12.89	0.00467
11.49	0.00550
10.33	0.00650
9.38	0.00739
8.58	0.00828
7.90	0.00917
7.32	0.01005
6.81	0.01092
6.38	0.01180
5.99	0.01267
5.65	0.01353
5.34	0.01440
5.07	0.01527
4.82	0.01613
4.60	0.01699
4.39	0.01786
4.21	0.01872
4.03	0.0195
3.88	0.02044
3.73	0.02130
3.60	0.02216
3.47	0.02301
3.35	0.02387
3.24	0.02473
3.14	0.02559
3.05	0.02644
2.96	0.027
2.87	0.02816
2.79	0.02901
2.72	0.02987

رفتار کششی	
Yield Stress (MPa)	Cracking Strain
2	0
1.57	5.37E-05
1.05	9.99E-05
0.71	0.00024054
0.47	0.00037843



شکل ۵- توزیع تنش فون مایسز تحت اثر بار متمرکز وسط دهانه (kN/mm<sup>2</sup>)



شکل ۴- مدل اجزای محدود تیربتنی و آرماتوربندی آن

جدول ۱- مشخصات آرماتورهای مصرفی طولی و عرضی [۳۰]

E(GPa)	F <sub>y</sub> (MPa)	F <sub>u</sub> (MPa)
۲۳۰	۳۹۲	۴۹۰

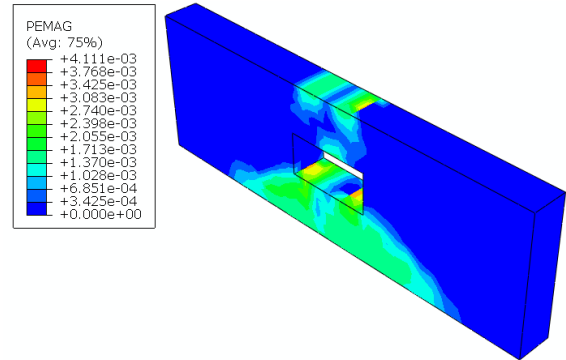
بعد از اختصاص مشخصات فولاد و بتن به هر یک از اجزای تیر، شرایط مرزی از قبیل نوع تکیه‌گاه و شرایط بارگذاری معرفی می‌گردد. با توجه به اینکه بارگذاری به صورت یک جهت اعمال خواهد شد نیاز به تعریف تاریخچه بارگذاری سیکلی نیست. در شکل ۵ تا ۷ توزیع تنش فون مایسز و کرنش پلاستیک در بتن و توزیع تنش در آرماتورهای طولی و عرضی به تفکیک نشان داده شده است. در شکل ۸ توزیع شاخص خرابی در نمونه عددی با نتایج محمد و همکاران [۳۰] مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود خرابی‌های کششی ایجاد شده در هر دو نمونه پایین و بالای باز شو ایجاد شده است. با استخراج نتایج نمونه عددی همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است، منحنی نیرو-جابجایی حاصل از محمد و همکاران [۳۰] و تحلیل عددی هم پوشانی قابل قبولی دارند و این نشان می‌دهد که نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی پیدا کردند.

### ۵- بررسی نمونه‌های تقویت نشده

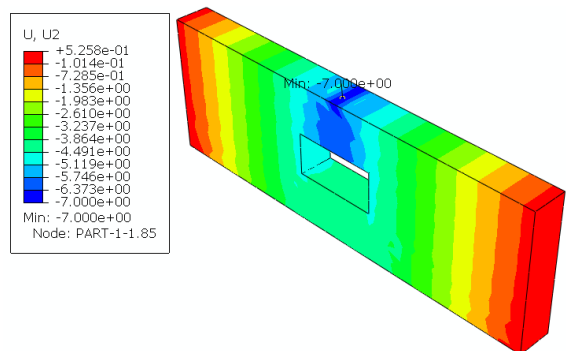
در شبیه‌سازی عددی حاضر، با تغییر شرایط تکیه‌گاهی، شکل‌هندسی نوارهای FRP، نوع بارگذاری، موقعیت و تعداد بازشوها، در مجموع نُه تیر بتنی در سه گروه طبق شکل ۱۰ ساخته شد. گروه اول تیرهای سه تکیه‌گاهی با دو بار متمرکز، گروه دوم تیرهای دو تکیه‌گاهی با دو بار متمرکز و گروه سوم تیرهای دو تکیه‌گاهی با یک بار متمرکز است. کلیه نمونه‌ها تحت بارگذاری متمرکز قرار گرفته و نتایج منحنی‌های نیرو-جابجایی وسط تیر با نتایج مدل اجزای محدود محمد و همکاران [۳۰] مقایسه شد. بارگذاری همانند تحلیل پوش آور که در آن سازه در یک جهت هل داده می‌شود به صورت یک‌گانه و یک‌جهته (بدون رفت و برگشت) به سازه اعمال می‌شود. سپس براساس معیار خرابی کششی (طبق تعریف بخش ۳)، ضعیف‌ترین نمونه جهت تقویت با نوار FRP به صورت U شکل یا کاملاً پیرامونی BOX شکل انتخاب می‌گردد.

منحنی شاخص خرابی کششی وجه پایینی تیرهای گروه یک در شکل ۱۱، گروه دو در شکل ۱۲ و گروه سه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در هر سه گروه، در نمونه‌های بدون بازشو مقادیر شاخص خرابی کششی کمتر است و با ایجاد بازشو ترک‌خوردگی‌هایی در قسمت کششی تیر بخصوص نزدیکی‌های تکیه‌گاه‌ها وجود می‌آید. در نمونه‌های گروه ۱ با ایجاد تکیه‌گاه در میانه تیر مقادیر شاخص خرابی کششی تحت تأثیر قرار گرفته و به صورت تقریباً غیریکنواختی توزیع شده‌اند. این در حالی است که در بقیه نمونه‌ها تقریباً مقادیر حداکثر شاخص خرابی کششی در ابتدا و انتهای تیر در فاصله‌ای برابر ارتفاع تیر ایجاد شده‌اند. بنابراین برای بهسازی، نمونه‌ای با دو بازشو که شاخص خرابی کششی آن بیشتر از بقیه نمونه‌ها است انتخاب می‌گردد.

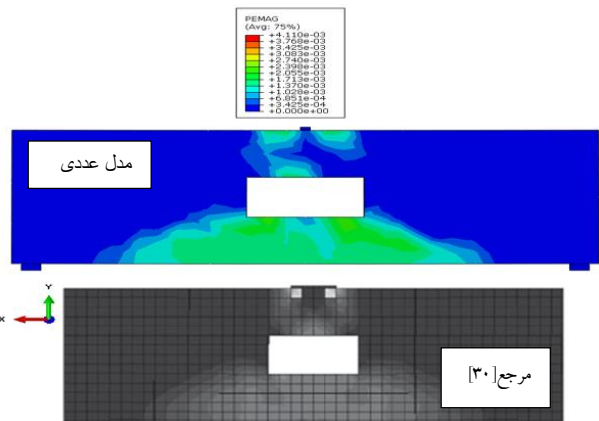
منحنی شاخص خرابی کششی وجه پایینی تیرهای گروه یک در شکل ۱۱، گروه دو در شکل ۱۲ و گروه سه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در هر سه گروه، در نمونه‌های بدون بازشو مقادیر شاخص خرابی کششی کمتر است و با ایجاد بازشو ترک‌خوردگی‌هایی در قسمت کششی تیر بخصوص نزدیکی‌های تکیه‌گاه‌ها وجود می‌آید. در نمونه‌های گروه ۱ با ایجاد تکیه‌گاه در میانه تیر مقادیر شاخص خرابی کششی تحت تأثیر قرار گرفته و به صورت تقریباً غیریکنواختی توزیع شده‌اند. این در حالی است



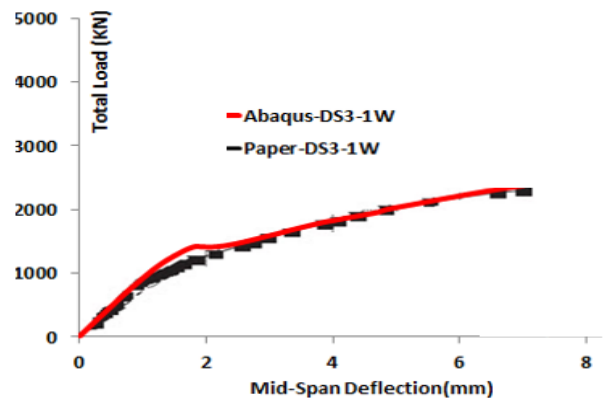
شکل ۶- توزیع کرنش پلاستیک تحت اثر بار متمرکز وسط دهانه



شکل ۷- توزیع جابجایی تحت اثر بار متمرکز وسط دهانه (mm)

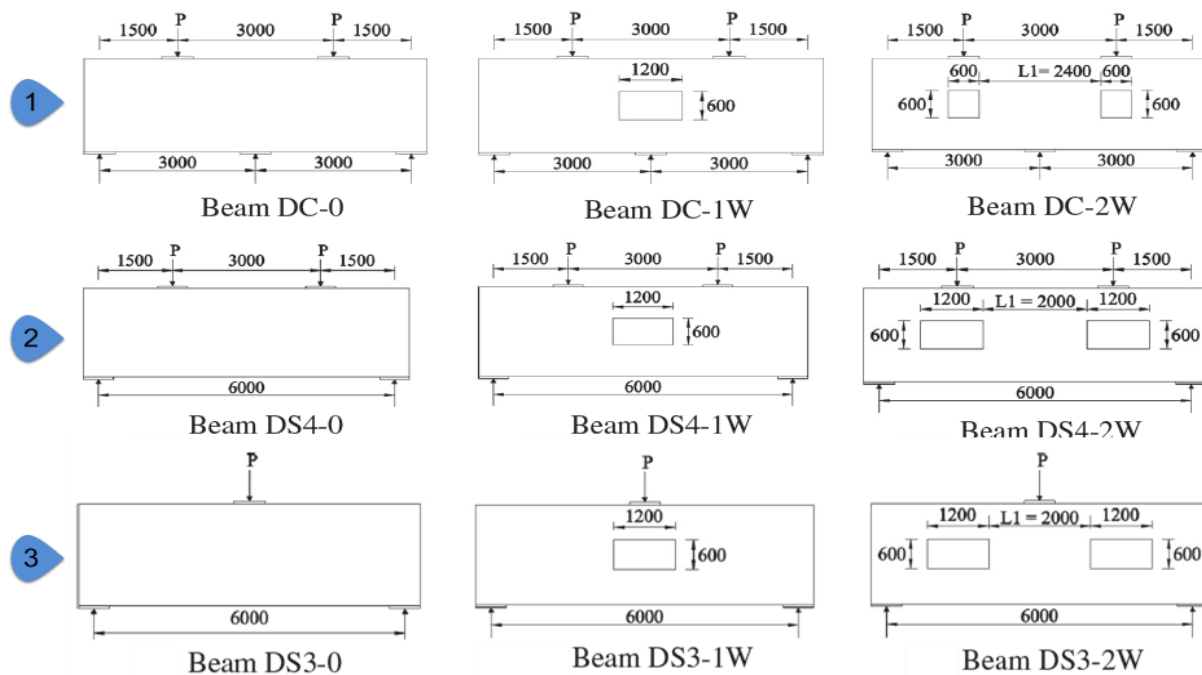


شکل ۸- مقایسه خرابی نمونه عددی با مرجع [۳۰]

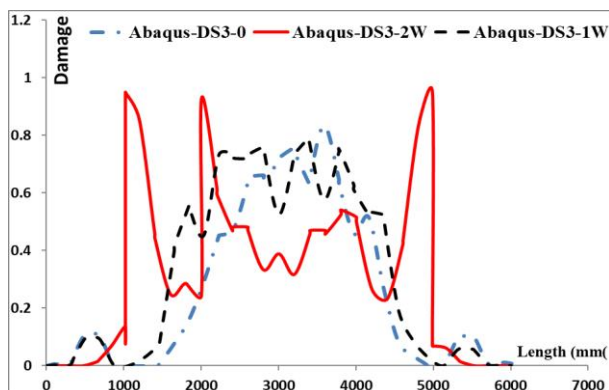


شکل ۹- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نمونه عددی با مرجع [۳۰]

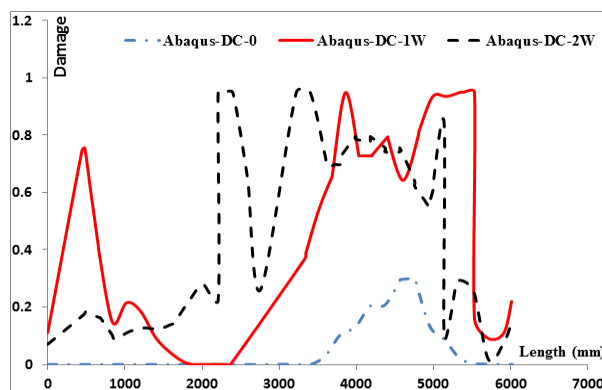
که در بقیه نمونه‌ها تقریباً مقادیر حداکثر شاخص خرابی کششی در ابتدا و انتهای تیر در فاصله‌ای برابر ارتفاع تیر ایجاد شده‌اند. بنابراین بیشتر از بقیه نمونه‌ها است انتخاب می‌گردد.



شکل ۱۰- مشخصات هندسی تیرهای عمیق تحت اثر بار متمرکز یک و دو نقطه‌ای

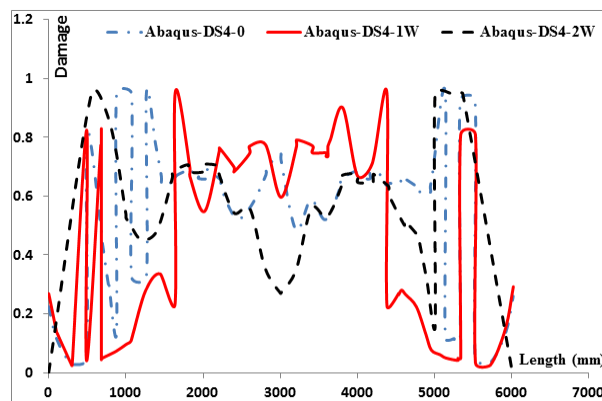


شکل ۱۳- منحنی شاخص خرابی در طول تیرهای گروه ۳



شکل ۱۱- منحنی شاخص خرابی در طول تیرهای گروه ۱

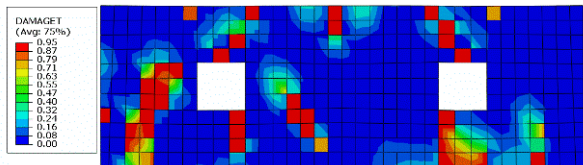
**۶- بررسی نمونه‌های تقویت شده با نوار FRP**  
 مطالعات محمد و همکاران [۳۰] بر روی تیرهای عمیق بازشودار بدون تقویت بود که در تحقیق حاضر با طراحی دو شکل از نوار FRP مطالعات مرجع [۳۰] توسعه یافت. مشخصات تیرهای تقویت شده طبق جدول ۳ و شکل ۱۴ نشان داده شده است.  
 چیدمان نوارهای FRP مطابق شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به صورت BOX و U در نظر گرفته شد. طبق شکل‌های ۱۷ و ۱۸ تنش‌های توزیع شده به صورت غیریکنواخت بوده و تقریباً با زاویه ۴۵ درجه توزیع شده‌اند.



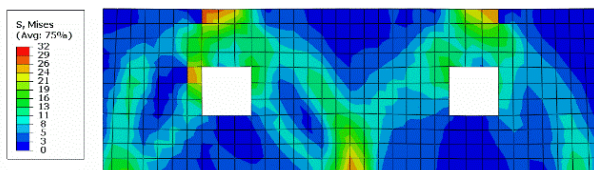
شکل ۱۲- منحنی شاخص خرابی در طول تیرهای گروه ۲

جدول ۳- مشخصات نوار FRP [۳۱]

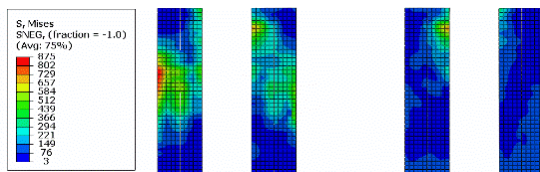
مدول برشی (GPa)	درصد کشیدگی کششی	مقاومت کششی (MPa)	ضریب پواسون اصلی	مدول ارتجاعی (GPa)	ضخامت نوار (mm)
$G_{xy}=۲,۹۰$			$\nu_{xy}=۲,۹۰$	$E_x=۷۴,۷$	
$G_{xy}=۲,۹۰$	۱,۲۵	۹۳۳	$\nu_{xy}=۲,۹۰$	$E_y=۴,۸۵$	۰/۳۸۱
$G_{xy}=۱,۸۶$			$\nu_{xy}=۱,۸۶$	$E_z=۴,۸۵$	



الف) شاخص خرابی کششی بتن

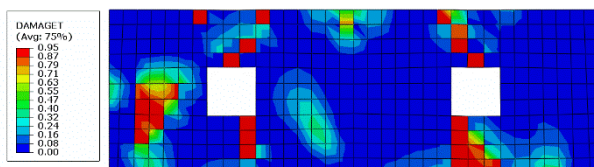


ب) تنش فون میسر در بتن

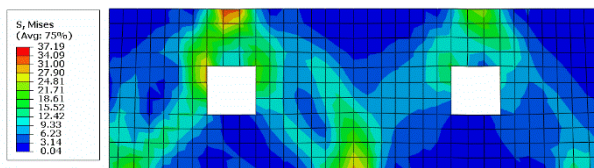


ج) تنش فون میسر در شاخه‌های قائم نوار BOX شکل

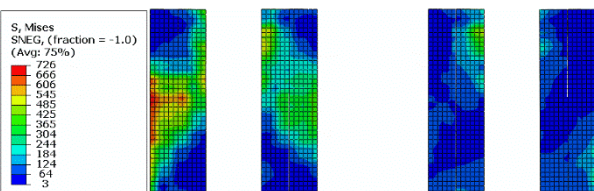
شکل ۱۷- شاخص خرابی و تنش فون مایسز تیر بتنی DC-2W



الف) شاخص خرابی کششی بتن

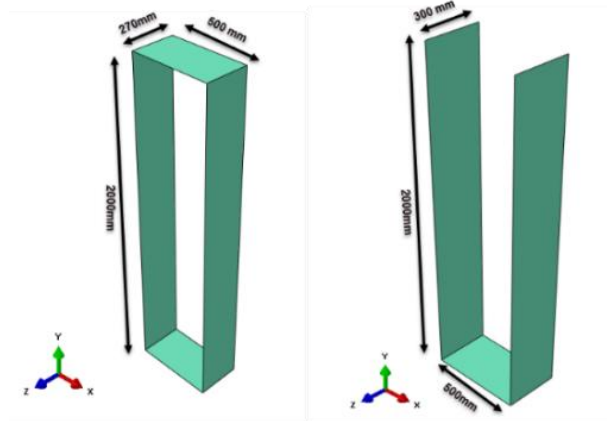


ب) تنش فون میسر در بتن

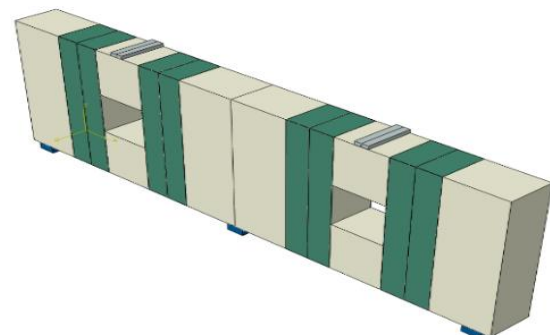


ج) تنش فون میسر در شاخه‌های قائم نوار U شکل

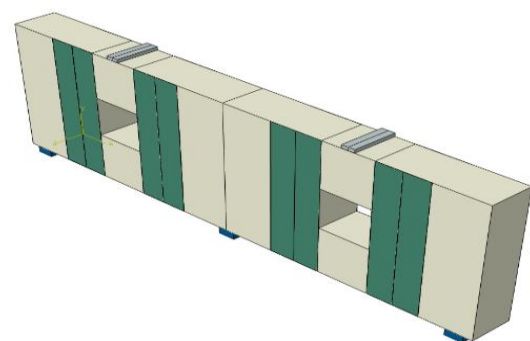
شکل ۱۸- شاخص خرابی و تنش فون مایسز تیر بتنی DC-2W



شکل ۱۴- مشخصات هندسی نوارهای FRP



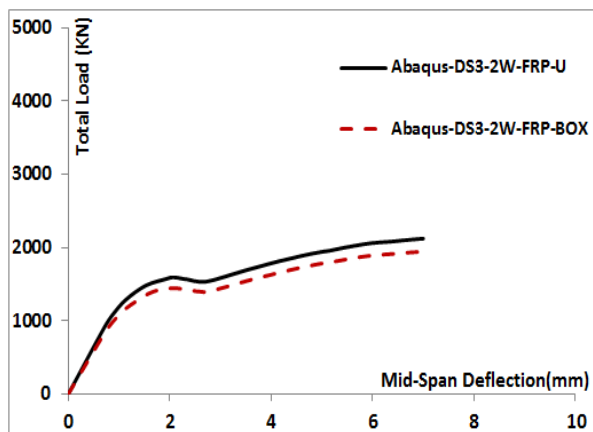
شکل ۱۵- نوار FRP به صورت BOX در نمونه DC-2W



شکل ۱۶- نوار FRP به صورت U در نمونه DC-2W

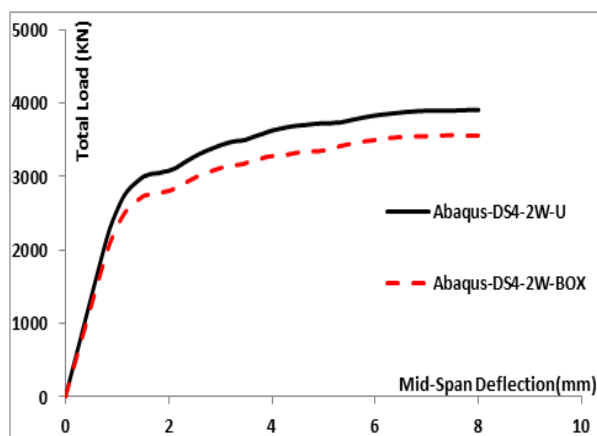
با بررسی بیشتر دید شد که در نوارهای FRP در هر دو حالت U و BOX تنش‌های ایجاد شده در نوارهای کناری بیشتر از سایر نوارها است.





شکل ۲۰- مقایسه منحنی نیرو-جابجایی نمونه DS3-2W با نوار U و BOX

در شکل ۲۱ نمودار نیرو-جابجایی نمونه DS4-2W با نوار FRP به شکل U و BOX نشان داده شده است. مشاهده می شود هر دو نمونه تقریباً تا جابجایی ۱/۷ mm عملکرد خطی یکسانی دارند. پس از آن نیز جابجایی هر دو نمونه در ناحیه غیرخطی به صورت صعودی ادامه یافته و در نمونه‌ها هیچ گونه افت مقاومت و یا زوال سختی مشاهده نمی شود. در نهایت نمونه با نوار BOX مقدار نیروی شکست کمتری نسبت به نوار U شکل کسب می کند. مقاومت نهایی نمونه با نوار U شکل ۳۹۰۹ kN بوده که نسبت به نمونه با نوار BOX شکل در حدود ۹ درصد بیشتر است.



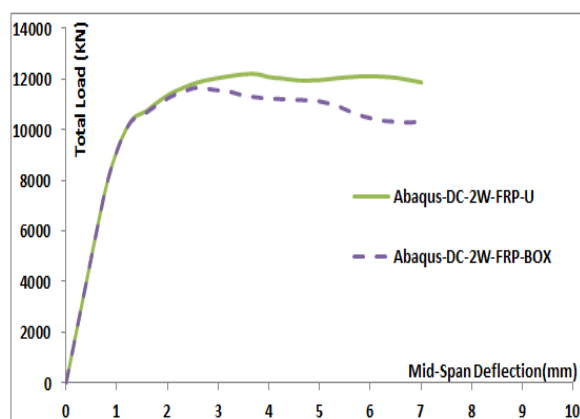
شکل ۲۱- نمودار نیرو-جابجایی نمونه DS4-2W با نوار U و BOX

#### ۷- مقایسه نمونه‌های تقویت شده و تقویت نشده

در شکل‌های ۲۲ تا ۲۴ به مقایسه تیرهای با و بدون نوار FRP پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می شود در اغلب

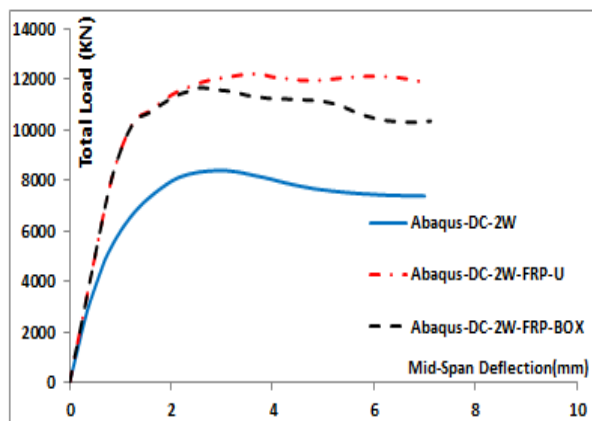
از نظر خسارت کششی نیز ترک خوردگی‌های ایجاد پراکنده‌گی داشته و با توجه به مقاومت کششی بالای نوارهای FRP، تقریباً می توان گفت که در آرماتورهای طولی و عرضی تنش‌های ایجاد شده از تنش تسلیم فراتر نرفته است. از نظر عددی نیز تنش‌های ایجاد شده در تیر بتنی در صورت استفاده از نوار FRP در حالت U شکل بیشتر از BOX است.

در شکل ۱۹، نمودار نیرو-جابجایی تیر DC-2W تقویت شده با دو نوار U و BOX شکل مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود هر دو نمونه تقریباً تا جابجایی ۲/۲ mm عملکرد یکسانی داشته‌اند. با ایجاد ترک‌های برشی و خمشی جابجایی هر دو نمونه با شیب نزولی ادامه یافته است. در انتهای نمودار، نمونه با نوار BOX شکل دارای شیب نزولی بیشتری بوده و مقدار ظرفیت باربری کمتری نسبت به نوار U شکل داشته است. از نظر عددی می توان گفت که بار نهایی نمونه با نوار U شکل ۱۲۲۰۹ kN بوده که نسبت به نمونه با نوار BOX در حدود ۴/۵ درصد ظرفیت باربری بیشتری دارد.



شکل ۱۹- مقایسه منحنی نیرو-جابجایی نمونه DC-2W با نوار U و BOX

در شکل ۲۰ نمودار نیرو-جابجایی نمونه DS3-2W با نوارهای تقویتی به شکل U و BOX مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود هر دو نمونه تقریباً تا جابجایی ۱/۵ mm عملکرد یکسان خطی داشته‌اند. همچنین جابجایی هر دو نمونه در ناحیه غیرخطی به صورت صعودی ادامه یافته و در نمونه‌ها هیچ گونه افت مقاومت و یا زوال سختی مشاهده نمی شود. در نهایت نمونه با نوار BOX مقدار ظرفیت باربری کمتری نسبت به نوار U شکل داشته است. از نظر عددی می توان گفت که نمونه با نوار U با نیروی ۲۱۱۳ kN نسبت به نمونه با نوار BOX در حدود ۸ درصد ظرفیت باربری بیشتری داشته است.



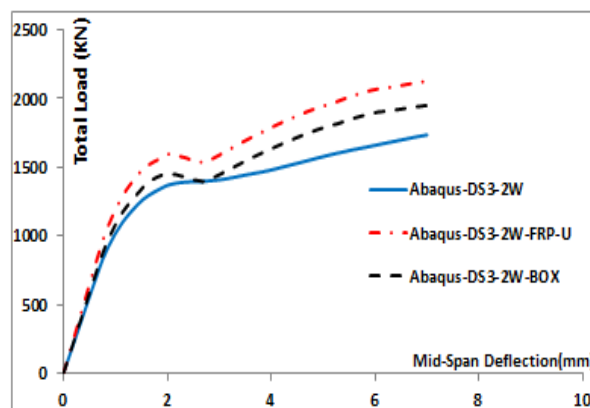
شکل ۲۴- مقایسه منحنی نیرو- جابجایی نمونه DC-2W با نوار FRP و BOX

در ادامه به بررسی عملکرد نمونه‌های گروه DC-2W پرداخته می‌شود. همانطور که در این گروه مشاهده می‌شود اختلاف بین نیروی شکست نمونه تقویت شده و بدون تقویت کاملاً مشهود است. در این گروه نمونه‌های تقویت شده دارای سختی الاستیک تقریباً برابری بوده‌اند. این در حالی است که در نمونه بدون تقویت به دلیل ایجاد ترک‌های برشی، در همان ابتدای منحنی مقدار شیب الاستیک با کاهش روبه‌رو شده، که در ادامه با زوال و افت مقاومت همراه بوده است. از نظر عددی می‌توان گفت که نمونه با نوار FRP به شکل U نسبت به نمونه بدون نوار و با نوار BOX شکل به ترتیب ۳۷/۹۱ درصد و ۱۳ درصد ظرفیت باربری بیشتری دارد. در این گروه به دلیل وجود تکیه‌گاه میانی مقادیر ظرفیت باربری افزایش و ترک‌های برشی به حداقل مقدار خود می‌رسد.

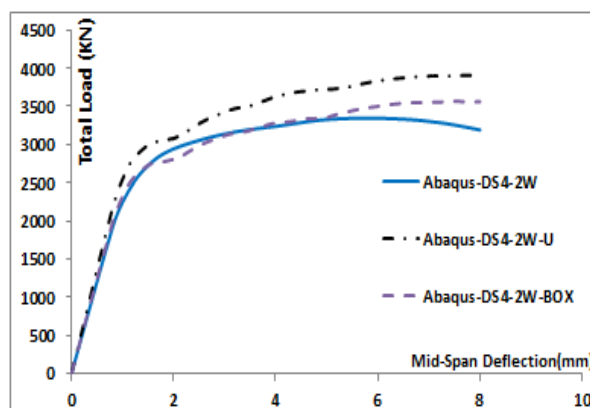
#### ۸- ظرفیت تغییر شکل و شکل پذیری

ظرفیت تغییر شکل و شکل پذیری ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند، اما گاهی گیج کننده به نظر می‌رسند. مثلاً یک سازه با ظرفیت تحمل تغییر شکل‌های بزرگ، ممکن است شکل پذیری و نسبت شکل پذیری کوچکی داشته باشد و یک سازه با ظرفیت تغییر شکل کم، شکل پذیری کوچک اما نسبت شکل پذیری بزرگ داشته باشد. روابط مختلفی برای محاسبه ارائه شده‌اند که در این پژوهش از روش یانگ استفاده شده است. در این روش منحنی دو خطی با ادامه دادن محدوده الاستیک و به دست آوردن برش پایه تسلیم و سپس وصل کردن آن به برش پایه حداکثر به نحوی که انرژی کرنشی ذخیره شده تغییری نمایم حاصل می‌شود. در این حالت سطح زیر نمودار پوش آور معادل

نمونه‌های گروه DS3-2W قبل از وارد شدن به ناحیه غیرخطی، تغییر شکل تقریباً به صورت خطی با اعمال بار افزایش می‌یابد. اغلب نمونه‌ها بعد از تسلیم، تغییر شکل غیرخطی یکنواختی دارند. از نظر عددی نیز مقاومت نهایی شکست نمونه تقویت شده با نوار U شکل نسبت به نمونه تقویت نشده ۱۸ درصد و نسبت به نمونه تقویت شده با نوار BOX شکل ۷/۸۵ درصد بیشتر است.



شکل ۲۲- مقایسه منحنی نیرو- جابجایی نمونه DS3-2W با نوار FRP و BOX

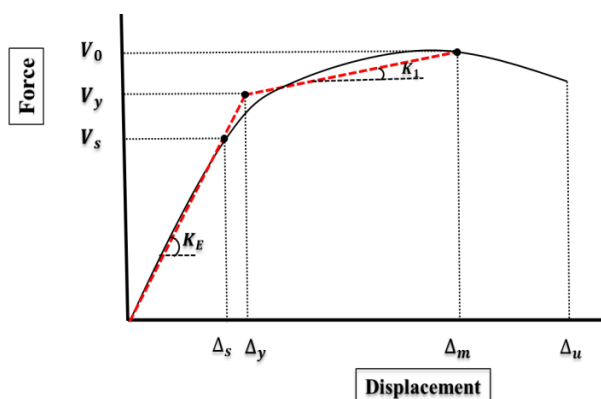


شکل ۲۳- مقایسه منحنی نیرو- جابجایی نمونه DS4-2W با نوار FRP و BOX

در اغلب نمونه‌های گروه DS4-2W قبل از وارد شدن به ناحیه غیرخطی، تغییر شکل تقریباً به صورت خطی با اعمال بار افزایش یافته است. همچنین بر خلاف نمونه‌های تقویت شده با نوار FRP که بعد از تسلیم تغییر شکل غیرخطی دارند، نمونه تقویت نشده در انتهای بارگذاری دارای افت مقاومت و زوال سختی است. از نظر عددی نیز نمونه با نوار FRP به شکل U نسبت به نمونه تقویت نشده ۱۷/۷۸ درصد و نسبت به نمونه تقویت شده با نوار BOX شکل ۸/۹۳ درصد نیروی شکست بالاتری دارد.

بدون آن دوخطی‌سازی شده که نشان می‌دهد نمونه‌های بدون تقویت با فاصله زیادی نسبت به نمونه‌های تقویت شده، شکل‌پذیری کمتری دارند لذا در ادامه صرفاً به مقایسه دو نوع تقویت با نوار U و BOX پرداخته می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین نسبت شکل‌پذیری مربوط به نمونه DS4 با نوار U شکل و کمترین مقدار مربوط به نمونه DC با نوار BOX شکل است که از نظر عددی در حدود ۱۶ درصد نسبت شکل‌پذیری و ۱۸ درصد ضریب رفتار بیشتری دارد. با بررسی بیشتر مشاهده می‌شود که اغلب نمونه‌ها به غیر از نمونه DC در صورت استفاده از نوار FRP به هر دو شکل U و BOX دارای نسبت شکل‌پذیری و ضریب رفتار تقریباً برابری بوده و تنها در نمونه DC این اختلاف به حدود ۲ درصد می‌رسد. همچنین به‌طور متوسط نمونه‌های تقویت شده با ورق U شکل به‌طور متوسط ۹ درصد سختی بیشتری دارند. در کلیه موارد شکل‌پذیری و ضریب رفتار نمونه‌های بدون تقویت کمتر از نمونه‌های تقویت شده است.

سطح زیر نمودار منحنی دوخطی فرض می‌شود.

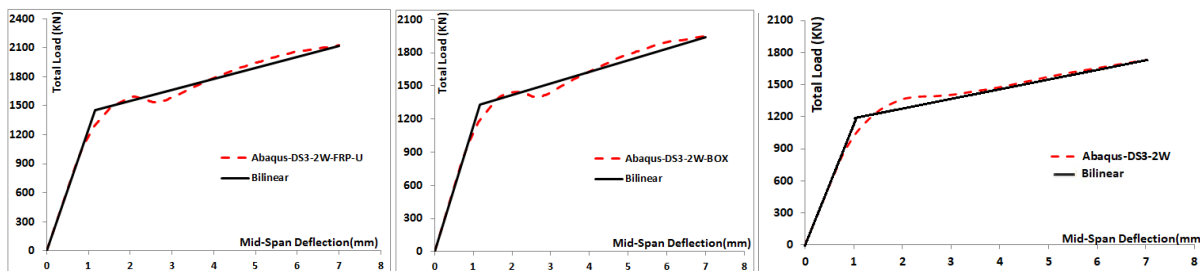


شکل ۲۵- دوخطی‌سازی نمودار برش پایه-تغییر مکان به روش یانگ

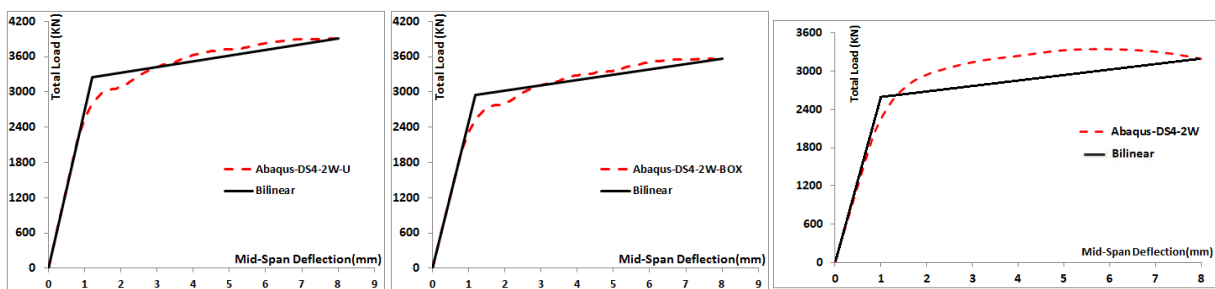
نسبت شکل‌پذیری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{\max} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}, \quad \mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \quad (7)$$

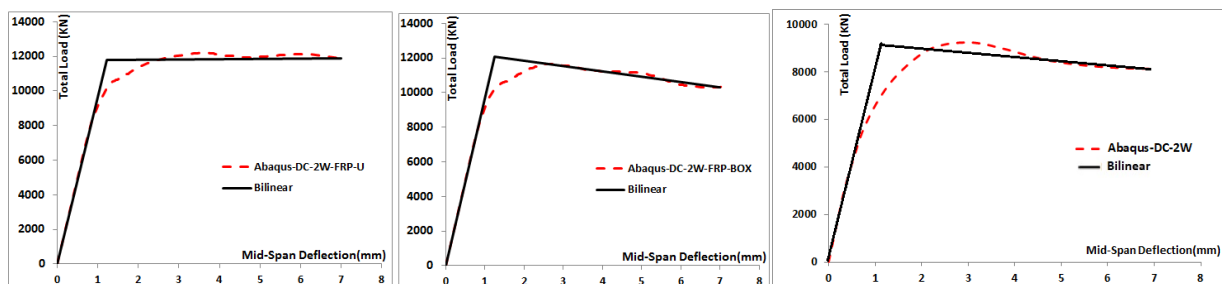
در شکل‌های ۲۶ تا ۲۸ نمودار نمونه‌های تقویت‌شده با نوار FRP و



شکل ۲۶- دوخطی‌سازی نمودار نیرو-جابجایی نمونه DS3-2W با ورق U و BOX و بدون تقویت



شکل ۲۷- دوخطی‌سازی نمودار نیرو-جابجایی نمونه DS4-2W با ورق U و BOX و بدون تقویت



شکل ۲۸- دوخطی‌سازی نمودار نیرو-جابجایی نمونه DC-2W با نوار U و BOX و بدون تقویت

جدول ۴- پارامترهای استخراج شده برای نمونه‌های عددی

نمونه	$\mu$	R	K	نیروی حداکثر (kN)	نیروی انتهای منحنی (kN)
DS3-2W	5.83	4.86	1078	1723	1732
DS3-2W-FRP-U	5.99	4.99	1245	1930	1930
DS3-2W-FRP-BOX	5.94	4.91	1129	1947	1947
DS4-2W	6.44	5.37	2343	3302	3112
DS4-2W-FRP-U	6.67	5.53	2695	3554	3554
DS4-2W-FRP-BOX	6.63	5.51	2455	3567	3567
DC-2W	5.43	4.25	9534	9219	8114
DC-2W-FRP-U	5.73	4.6	9662	12209	11874
DC-2W-FRP-BOX	5.6	4.48	9652	11663	10340

در جدول ۴ پارامترهای مربوط به شکل پذیری هر یک از نمونه‌ها نشان داده شده است. به طور کلی نمونه‌های تقویت شده با نوار U شکل نسبت شکل پذیری و ضریب رفتار بیشتری دارند. - تنش‌های ایجاد شده در نوارهای کناری بیشتر از سایر ورق‌ها است. - نمونه با نوار BOX شکل نیروی شکست کمتری نسبت به نمونه با نوار U شکل دارد.

- در تیرهای دو تکیه گاهی با یک بار متمرکز، نیروی شکست نمونه با نوار FRP به شکل U نسبت به نمونه بدون نوار و با نوار BOX به ترتیب ۱۸ درصد و ۷/۸۵ درصد بیشتری می‌رسد.

- در تیرهای دو تکیه گاهی با دو بار متمرکز نیز نمونه با نوار FRP به شکل U نسبت به نمونه بدون نوار و با نوار BOX به ترتیب ۱۷/۷۸ درصد و ۸/۹۳ درصد دارای نیروی شکست بیشتری است. - در تیرهای سه تکیه گاهی با دو بار متمرکز، می‌توان گفت که نمونه با نوار FRP به شکل U نسبت به نمونه بدون نوار و با نوار BOX به ترتیب ۳۷/۹۱ درصد و ۱۳ درصد دارای نیروی شکست بیشتری است. در این گروه از تیرها، به دلیل وجود تکیه گاه میانی نیروی شکست افزایش و ترک‌های برشی به حداقل مقدار خود رسیده است.

- به‌طور کلی نمونه‌های دارای ورق U نسبت شکل پذیری بیشتری دارند. و این شکل پذیری باعث افزایش نیروی شکست نسبت به نوارهای BOX شده است. به نظر می‌رسد نوارهای BOX شکل اثر محصورکنندگی بیشتری داشته و شکل پذیری تیر را کاهش داده و در نتیجه نیروی شکست کمتری در هر سه گروه نسبت به نوارهای U شکل بدست می‌آید.

## ۹- نتیجه گیری

در این تحقیق ظرفیت برشی تیرهای عمیق بتنی دارای بازشوی مستطیلی با تقویت توسط نوارهای دورپیچ FRP با دو طرح U شکل و BOX شکل پرداخته شده و طرح مناسب تقویتی ارائه می‌گردد. تیرهای تقویت شده به روش اجزای محدود و با نرم‌افزار آباکوس مدل شده و ظرفیت شکل پذیری آنها به روش دوخطی سازی یانگ مورد بررسی قرار گرفت. براساس تحلیل‌های عددی تیرهای عمیق دارای بازشوی تقویت شده با نوارهای FRP، موارد زیر به‌عنوان نتایج این تحقیق ذکر می‌شود:

- در اغلب تیرهای عمیق، ترک‌های برشی در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها ایجاد می‌شود. حداکثر تنش ایجاد شده و اغلب آرماتورهای لایه پایینی و قسمتی از آرماتورهای لایه بالایی در محل اعمال نیرو از حد تسلیم فراتر رفته است.

- در نمونه‌های بدون بازشو مقادیر شاخص خرابی کششی کمتر از نمونه‌های با بازشو بدست آمد. دلیل این نتیجه آن است که با ایجاد بازشو ترک خوردگی‌هایی در قسمت کششی تیر به‌خصوص در مجاورت تکیه‌گاه‌ها ایجاد می‌شود.

- حداکثر شاخص خرابی کششی در ابتدا و انتهای تیر در فاصله‌ای برابر ارتفاع تیر ایجاد می‌شود.

- Papadopoulos, N., (2018). "Investigation of a new strengthening technique for RC deep beams using carbon FRP ropes as transverse reinforcements," *Fibers*, 6 (3), 52.
- [14] Hanoon, A.N. (2017). "Strut-and-tie model for externally bonded CFRP strengthened reinforced concrete deep beams based on particle swarm optimization algorithm:CFRP debonding and rupture," *Construction and Building Materials*, 147, 428-447.
- [15] Hawileh, R.A., El-Maaddawy T.A. and Naser, M.Z., (2012). "Nonlinear finite element modelling of concrete deep beams with openings strengthened with externally-bonded composites," *Materials & Design*, 42 378-387.
- [16] Bilotta, A., Ceroni, F., Nigro, E. and Pecce, M. (2015). "Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence," *Composite Structures*, 124 163-175.
- [17] Sas, G., Dăescu C., Popescu C. and Nagy-György T. (2014). "Numerical optimization of strengthening disturbed regions of dapped-end beams using NSM and EBR CFRP," *Composites Part B: Engineering*, 67, 381- 390.
- [18] Islam M.R., Mansur M.A. and Maalej, M. (2005). "Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems, *Cement and Concrete*" *Composites*, Volume 27, Issue 3, 413-420.
- [19] Dias, S., Barros J. and Janwaen, W. (2018). "Behavior of RC beams flexurally strengthened with NSM CFRP laminates," *Composite Structures*, 201, 363-376.
- [20] Hajihashemi, A., Mostofinejad, D. and Azhari, M. (2011). "Investigation of RC beams strengthened with prestressed NSM CFRP laminates," *Journal of Composites for Construction*, 15 (6), 887-89.
- [21] Sharaky, I.A., Baena, M., Barris, C., Sallam, H.E.M. and Torres, L. (2018). "Effect of axial stiffness of NSM FRP reinforcement and concrete cover confinement on flexural behaviour of strengthened RC beams: Experimental and numerical study," *Engineering Structures*, 173, 987-1001.
- [22] Sabau C., Popescu C., Sas G., Schmidt J.W., Blanksvärd, T. and Täljsten, B. (2018). "Strengthening of RC beams using bottom and side NSM reinforcement," *Composites Part B: Engineering*, 149, 82-91.
- [23] Chen J.F. and Teng J.G. (2003), Shear capacity of FRP strengthened RC beams: FRP debonding. *Construction and Building Materials*, 17(1), 27-41.
- [1] Campione, G. and Minafò, G. (2012). "Behaviour of concrete deep beams with openings and low shear span-to-depth ratio," *Engineering Structures*. 41, 294-306.
- [2] Ha, S.T., (2002). "Design of Concrete Deep Beams with Openings and Carbon Fiber Laminate Repair." Master's Theses and Graduate Research, San Jose State University.
- [3] Hu, O. and Tan, K. (2007). "Large reinforced-concrete deep beams with web openings: test and strut-and-tie results," *Magazine of Concrete Research* 59, (6), 423-434.
- [4] Hussain, Q. and Pimanmas, A. (2015). "Shear strengthening of RC deep beams with openings using Sprayed Glass Fiber Reinforced Polymer Composites(SGFRP):Part 1.Experimental study," *KSCE Journal of Civil Engineering*.19(7), 2121-2133.
- [5] Senthil, K., Gupta A. and Singh, S. (2018), "Computation of stress-deformation of deep beam with openings using finite element method", *Advances in Concrete Construction*. 6(3), 245-268.
- [6] Tseng, C.C., Hwang S.J. and Lu W.Y. (2017). "Shear strength prediction of reinforced concrete deep beams with web openings", *ACI Structural Journal*. 114 (6), 1569- 1579.
- [7] Maaddawy, T.E. and Sherif, S. (2009). "FRP composites for shear strengthening of reinforced concrete deep beams with openings", *Composite Structures*. 89(1), 60-69.
- [8] Maaddawy, T.E. and El-Ariss, B. (2012). "Behavior of concrete beams with short shear span and web opening strengthened in shear with CFRP composites," *Journal of Composites for Construction*, 16 (1) 47-59.
- [9] Kumar H., (2012). "Experimental and numerical studies on behaviour of FRP strengthened deep beams with openings" MSc Thesis, National Institute of Technology, Rourkela.
- [10] Lu, W.Y., Yu, H.W., Chen, C.L., Liu, S.L. and Chen, T.C. (2015). "High-strength concrete deep beams with web openings strengthened by carbon fiber reinforced plastics." *Computers and Concrete* 15(1):21-35.
- [11] Burningham, C.A., Pantelides C.P. and Reaveley, L.D., (2015). "Repair of reinforced concrete deep beams using post-tensioned CFRP rods," *Composite Structures*, 125, 256- 265.
- [12] Ng, S.T.K. and Soudki K. (2010). "Shear behavior of externally prestressed beams with carbon fiber-reinforced polymer tendons," *ACI Structural Journal*, 107(4).443-450.
- [13] Chalioris C., Kosmidou P.M. and

- [24] Zhang, Z., Hsu C.T. and Moren, J. (2004). "Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using carbon fiber reinforced polymer laminates," *Journal of Composites for Construction*, 8 (5), 403–414.
- [25] Adhikary, B.B. and Mutsuyoshi, H. (2004). "Behavior of concrete beams strengthened in shear with carbon-fiber sheets," *Journal of Composites for Construction*, 8 (3), 258–264.
- [26] Li W. and Leung C.K. (2015). "Shear span–depth ratio effect on behavior of RC beam shear strengthened with full-wrapping FRP strip," *Journal of Composites for Construction*, 20 (3), 04015067.
- [27] Ramana, V.P.V., Kant T., Morton S.E., Dutta P.K., Mukherjee A. and Desai, Y.M. (2000). "Behavior of FRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening." *Composites: Part B*, 31, 461- 470.
- [28] Islam, M., Mansur M., and Maalej, M. (2005). "Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems," *Cement and Concrete Composites*, 27 (3), 413–420.
- [29] Lee, J. and Fenves, G.L. (1998). "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures," *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), PP. 892–900.
- [30] Mohamed, A.R., Shoukry M.S. and Saeed, J.M. (2014). "Prediction of the behavior of reinforced concrete deep beams with web openings using the finite element method", *Alexandria Engineering Journal*. 53 (2), 329-339.
- [31] CHEN J. F. and TENG J. G. Shear capacity of FRP strengthened RC beams: FRP debonding. *Construction and Building Materials*, 2003, 17, No. 1, 27–41.

## **Numerical study of nonlinear behavior of deep concrete beams with rectangular opening in the web reinforced with FRP strips**

Seyed Shahab Emamzadeh \*

Assistant Professor, Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

### **Abstract**

The great depth of the deep beams allows the opening in the web. Openings in deep beams are intended for the passage of pipes and installation ducts. The presence of openings in the web cuts the members of the tie and strut in the equivalent truss and reduces the load-bearing capacity and ductility of the beam, which can even cause rupture. One solution to this problem is to use FRP reinforcing strips. In this research, the effect of FRP reinforcement sheets on the bearing capacity of deep concrete beams with rectangular opening has been investigated. For this purpose, reference laboratory samples were modeled and validated by finite element method with Abaqus software, then a number of parameters that may affect the response of the deep beam, such as the number, dimensions and distances of openings, were selected and kept constant. Other parameters, the response of the beam to its changes were examined. The results showed that the samples with BOX shaped reinforcement sheet had less bearing capacity than U-shaped reinforcing sheet. Also, samples with U-shaped FRP sheet have 38% more load capacity than sample without sheet and 13% more than BOX sheet. By comparing the reinforced specimens in terms of ductility and coefficient of behavior, it was found that the U-shaped reinforcing sheet has better performance.

**Keywords:** Deep beam, Behavior factor, Ductility, Web opening, FRP strip.

---

\* Corresponding Author: shemamzadeh@khu.ac.ir

