



## تأثیر آرایش نوارهای FRP، ابعاد تیر و مقدار آرماتور کششی در ظرفیت برشی تیر بتن مسلح

مهرداد حجازی<sup>۱\*</sup>، میترا محمدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران ..  
<sup>۲</sup>کارشناس ارشد سازه، اصفهان، ایران .

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۰ آبان ۱۳۹۶  
بازنگری: ۲۵ فروردین ۱۳۹۷  
پذیرش: ۲۵ فروردین ۱۳۹۷  
ارائه آنلاین: ۲۸ فروردین ۱۳۹۷

### کلمات کلیدی:

تیر بتن مسلح  
نوارهای FRP  
آرماتور کششی  
ظرفیت برشی  
شکل پذیری

**چکیده:** در این مقاله، به بررسی اثر فواصل قرارگیری نوارهای FRP، تعداد لایه و سطح مقطع آن، میزان آرماتور طولی، ابعاد تیر و مقاومت فشاری بتن در ظرفیت برشی تیرهای بتنی با مقطع مستطیلی شکل تحت بار متمرکز متقارن، مقاوم شده با نوارهای FRP به روش اجزاء محدود پرداخته شده است. بدین منظور تحلیل غیر خطی ۱۰۱ نمونه، جهت ارزیابی تأثیر متغیرهای فوق بر ظرفیت باربری و تغییرمکان وسط دهانه تیرهای مختلف با و بدون نوار تقویت انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که به ازای مقاومت فشاری ثابت برای بتن، افزایش عرض نوار تقویتی و افزایش تعداد لایه های آن افزایش ظرفیت باربری نسبت به نمونه های کنترل دسته خود را به همراه دارد. با تغییر در چیدمان نوارهای تقویتی با فواصل نامنظم در طول تیر، افزایش ظرفیت باربری در حدود ۶٪ الی ۳۵٪ حاصل می شود. همچنین افزایش در میزان آرماتور طولی از مقدار  $1\phi$  به  $1.4\phi$ ، افزایش مقاومت فشاری بتن از مقدار  $30\text{MPa}$  به  $50\text{MPa}$ ، و افزایش سطح مقطع تیر از مقدار  $150 \times 300\text{mm}$  به  $150 \times 400\text{mm}$  در نمونه های تقویت نشده سبب افزایش ظرفیت باربری به ترتیب در حدود ۳۱٪، ۲۳٪، ۵۵٪ و کاهش تغییرمکان وسط دهانه می گردد.

### ۱- مقدمه

تیرهای بتن آرمه به عنوان یکی از اعضای سازه از اهمیت ویژه‌ای در عملکرد و ایمنی آن برخوردارند. تقویت عضو فوق‌الذکر با استفاده از نوارهای FRP، یکی از روش‌های مقاوم‌سازی مناسب، جهت بهبود عملکرد آن است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر تعداد لایه، سطح مقطع و فواصل قرارگیری نوارهای FRP، میزان آرماتور طولی، ابعاد تیر و مقاومت فشاری بتنی بر ظرفیت برشی تیرهای بتنی با مقطع مستطیلی شکل تحت بار متمرکز متقارن می‌باشد. تحلیل‌ها با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح و با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS انجام شده است.

### ۲- مرور پیشینه

بهسازی و مرمت سازه‌ها با استفاده از نوارهای FRP برای اولین بار در سال ۱۹۸۷، به منظور تقویت خمشی پل‌های بتن مسلح، توسط مایر<sup>۱</sup> در کشور سوئیس آغاز شد. پس از آن، مطالعات فراوانی در سراسر دنیا برای مقاوم سازی سازه‌ها، از طریق چسباندن کامپوزیت‌های FRP به سطح

خارجی عضو، انجام گردید. افزایش ناگهانی در استفاده از نوارهای FRP، در واقع به بعد از زلزله هیوگوکن<sup>۲</sup> ژاپن در سال ۱۹۹۵ مربوط می‌شود. این روش به قدری سریع رشد نمود که در سال ۱۹۹۷، بیش از ۱۵۰ سازه بتن مسلح در نقاط مختلف جهان با این شیوه تقویت شدند [۱].

خلیفه<sup>۳</sup> و همکاران [۲] در سال ۱۹۹۹، سه نمونه کنترلی و شش نمونه تیر سراسری بتن آرمه دو دهانه به ابعاد  $150 \times 305 \times 4880$  میلی مترمکعب را که با انواع آرایش نوار CFRP از نظر برشی تقویت شده بودند، مورد آزمایش قرار دادند. تمام تیرها به منظور ایجاد خرابی برشی، به میزان زیادی در جهت افزایش مقاومت خمشی آرماتورگذاری شده بودند. متغیرها در این تحقیق عبارت بودند از: میزان فولاد برشی، مقدار CFRP، نحوه محصورشدگی و ترکیبات آرایش لایه‌ها با زوایای گوناگون. آنان نتیجه گرفتند که تقویت خارجی تیر، با استفاده از نوارهای U شکل CFRP، نقش موثری در افزایش ظرفیت برشی تیرهای سراسری تقویت شده داشته است. آنان هم چنین پی بردند که هر اندازه میزان آرماتور برشی داخلی کمتر باشد، کارایی در بالا بردن ظرفیت برشی تیری که به صورت خارجی با کامپوزیت CFRP تقویت شده است، بیش ترمی‌گردد.

2 Hiyogo-ken

3 Khalifa

1 Mayer

نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات: m.hejazi@eng.ui.ac.ir

باروس و دیاس<sup>۱</sup> [۳] در سال ۲۰۰۶، چهار نمونه کنترلی و ۱۲ نمونه تیر بتن مسلح در دو گروه به ابعاد  $1600 \times 300 \times 150$  mm و  $1500 \times 150$  mm × ۱۰۰۰ میلیمترمکعب را که با انواع آرایش نوار CFRP از نظر برشی تقویت شده بودند، مورد آزمایش قرار دادند. متغیرها در این تحقیق عبارت بودند از: مقدار CFRP، نحوه محصور شدگی و ترکیبات آرایش لایه‌ها با زوایای گوناگون. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد که تقویت خارجی تیر، با استفاده از نوارهای U شکل CFRP، نقش موثری در افزایش ظرفیت برشی تیرهای سراسری تقویت شده داشته است.

آزمایش‌های دیگری توسط چاجس<sup>۲</sup> [۴] در سال ۲۰۰۴ انجام گرفت. در این آزمایش‌ها از نوارهای CFRP و GFRP در ضخامت‌های مختلف و با اشکال مختلف جهت تقویت، مورد استفاده قرار گرفت. در کلیه تیرهای تقویت شده، شکل پذیری نسبت به تیر کنترل کمتر بوده است. نکته قابل توجه این است که تیرهای تقویت شده با GFRP شکل پذیری بهتری نسبت به تیرهای تقویت شده با CFRP داشتند ولی تیرهای تقویت شده با CFRP افزایش مقاومت نهایی کمتری نسبت به تیرهای تقویت شده با GFRP دارا بودند.

آیمان [۵] در سال ۲۰۰۷، به بررسی آزمایشگاهی تقویت مقاومت برشی تیر بتن مسلح که با FRP و مواد مرکب تقویت شده است پرداخت. در مجموع نه نمونه تیر در مقیاس کامل از دو کلاس مختلف، ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. دو نوع نوار E-GFRP، CFRP، برای مقاوم سازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تجربی نشان می‌دهد که مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده افزایش قابل توجهی نسبت به نمونه‌های مقاوم نشده دارد.

هو و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۴، به تحلیل عددی با استفاده از برنامه اجزای محدود جهت پیش بینی ظرفیت نهایی تیرهای بتن مسلح که در ناحیه تحتانی و یا جانبی با نوار FRP تقویت شده‌اند، پرداختند. آنان نیز نتیجه گرفتند که FRP، باعث افزایش سختی و مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده می‌گردد.

شین ولی [۷] در سال ۲۰۰۳، تاثیر بارهای موجود را به هنگام تقویت تیرهای بتن مسلح مورد بررسی قرار دادند. آنان دو تیر کنترل بدون تقویت و شش تیر تقویت شده با نوارهای CFRP را تحت بارهای مختلف قرار دادند و هم چنین نتایج آزمایشگاهی خود را با نتایج حاصل از یک مدل تحلیلی که بر اساس روش اجزای محدود برای تقویت خمشی این گونه تیرها ارائه شده بود، مقایسه کردند. نتایج تجربی و تحلیلی نشان داد که در نظر گرفتن بارهای وارده به هنگام تقویت تیرها، تاثیر زیادی بر تغییر مکان تیرها در حالت تسلیم و حالت نهایی داشته است.

1 Barros and Dias

2 Chajes

بویوکوزترک و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۲، مکانیزم خرابی جدا شدگی نوار در تیرهای تقویت شده با FRP را هم از دید تجربی و هم از نظر تئوری، ارزیابی کردند. تحقیقات آنان نشان داد که با افزایش ظرفیت برشی تیر تقویت شده از طریق اضافه کردن نوارهای L شکل FRP به آن، می‌توان از به وجود آمدن جدا شدگی موضعی در ناحیه ترک‌های خمشی-برشی جلوگیری کرده و رفتار تیر تقویت شده را اصلاح نمود. ریتا و وجیو [۹] در سال ۲۰۰۳، ۳ تیر به ابعاد  $560 \times 305 \times 2$  mm با طول‌های مختلف را که با نوارهای CFRP تقویت برشی شده بودند، مورد مطالعه قرار دادند. تحقیق آنان نشان داد که استفاده از نوارهای CFRP علاوه بر افزایش ظرفیت برشی، خرابی ترد برشی را از بین برده و سبب ازدیاد رفتار شکل پذیر خمشی قبل از وقوع خرابی در تیر می‌شود. گریس و همکاران [۱۰] در سال ۱۹۹۹، برای بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح که با انواع مختلف نوارهای FRP تقویت شده‌اند، ۱۴ تیر بتنی را مورد آزمایش قرار دادند. هر تیر در ابتدا به اندازه مقاومت ترک خوردگی بار گذاری شده و سپس تیرهای ترک خورده با نوارهای FRP تقویت شدند و تا مرحله شکست تحت بار قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بکارگیری نوارهای FRP در تقویت تیرهای بتنی خیز را کم و ظرفیت باربری را زیاد می‌کند. تیرهایی که نوارهای GFRP در زیر و طرفین آنها به کار رفته است رفتاری بهتر در مقایسه با تیرهایی که فقط در زیر تقویت شده‌اند از خود نشان می‌دهند.

شریف و همکاران [۱۱] در سال ۱۹۹۴، تعداد ده تیر بتن مسلح به ابعاد  $1250 \times 150 \times 150$  میلیمترمکعب را که تحت اثر بارگذاری اولیه حدود ۸۵٪ ظرفیت نهایی خود قرار داشته و سپس با نوار CFRP تقویت شده بودند، مورد ارزیابی تجربی قرار دادند. آرایش مختلف و هم چنین مهار انتهایی نوار تقویت، برای اطمینان از بروز رفتار شکل پذیر، برای تمام تیرها در نظر گرفته شد. تحقیقات آنان نشان داد که تنش‌های برشی و عمودی در انتهای نوار با زیاد شدن ضخامت آن افزایش یافته، و منتهی به جدا شدن انتهایی نوار و بتن می‌شود. در این تحقیق مشاهده شد که استفاده از پیچ‌های فولادی، جدا شدگی انتهایی نوارهای با ضخامت بالا را محدود نموده و ظرفیت خمشی تیرهای آسیب دیده را بر خلاف ترد بودن رفتار نوار FRP، بهبود می‌بخشد.

دانگ و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۳ یک پژوهش آزمایشگاهی بر روی تیر بتن مسلح تقویت شده با نوارهای CFRP و GFRP در دو حالت تقویت خمشی و تقویت خمشی-برشی انجام دادند. تحقیقات نشان داد که تقویت خمشی-برشی بسیار موثرتر از فقط تقویت خمشی در افزایش سختی و مقاومت نهایی تیر بتن مسلح می‌باشد.

الساید [۱۳] در سال ۲۰۱۴ اثر تقویت تیرهای بتن مسلح با میلگردهای طولی CFRP بر روی مقاومت برشی را بررسی کرد. در این تحقیق، تیرهای

کار رفته در نمونه‌های تحلیلی ارائه میگردد. جداول ۱ و ۲ مشخصات نمونه‌های تحلیلی را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است در هر سه گروه E، F و D میزان فولاد فشاری به کار رفته ۶۲٪ می‌باشد. تنش تسلیم و تنش نهایی برای آرماتورهای فشاری به ترتیب  $622f_y = \text{MPa}$  و  $702f_u = \text{MPa}$  است. جدول ۳ مشخصات نوار تقویتی را نشان می‌دهد. هر نوار FRP دارای ضخامت  $0.167 \text{ mm}$ ، مقاومت کششی نهایی  $3000f_{tu} = \text{MPa}$  و مدول الاستیسیته  $390000E_f = \text{MPa}$  می‌باشد. علامت‌های اختصاری J، K و L به ترتیب مربوط به عرض‌های نوار ۲۵ mm، ۳۵ mm و ۴۵ mm، علامت‌های M، N و O مربوط به نوارهای دارای ۱ لایه، ۲ لایه و ۳ لایه، و علامت‌های P، Q و R مربوط به تعداد نوارهای U شکل استفاده شده در طول تیر به ترتیب برابر با ۸، ۱۰ و ۱۴ عدد می‌باشد.

چنانچه در شکل ۱-الف مشاهده می‌گردد، تیرهای مورد تحلیل دارای دو تکیه‌گاه ساده می‌باشند که تحت دو عدد بار متمرکز متقارن قرار گرفته‌اند. اندازه بار به تدریج افزایش می‌یابد تا تیر دچار شکست گردد.

### جدول ۱. مشخصات ابعادی تیر و مقاومت فشاری بتن

Tab1 . Dimensional characteristics of beam and compressive strength of concrete

مقاومت فشاری بتن (MPa)	گروه	مشخصات ابعادی تیر (mm)			گروه
		ارتفاع	عرض	طول	
۳۰	G	۱۶۰۰	۱۵۰	۳۰۰	A
۳۷/۶	H	۱۶۰۰	۱۵۰	۴۰۰	B
۵۰	I	۱۶۰۰	۱۵۰	۵۳۰	C

### جدول ۲. مشخصات فولاد

Tab2 . Steel properties

گروه	فولاد کششی	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	مدول یانگ (GPa)
D	$4\phi 10$	۴۶۴	۵۸۱	۲۱۰
E	$12\phi 10$	۵۷۴	۶۷۲	۲۱۰
F	$14\phi 10$	۵۷۴	۶۷۲	۲۱۰

### جدول ۳. جزئیات نوارهای تقویتی

Tab3 . Detail of strengthening strips

گروه	عرض نوار تقویتی (mm)	گروه	تعداد لایه نوار تقویتی	گروه	تعداد نوار تقویتی U شکل
J	۲۵	M	۱	P	۸
K	۳۵	N	۲	Q	۱۰
L	۴۵	O	۴	R	۱۴

بتن مسلح بدون خاموت با میلگردهای طولی CFRP ساخته شده‌ند و تحت آزمایش خمش سه محوری قرار گرفتند. نتایج بدست آمده نشان داد که مقاومت برشی تیرها به اندازه ۳۵٪ افزایش یافت.

باگیو و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۴ از نوارهای FRP با جنس‌های مختلف برای تقویت برشی تیرهای بتنی مسلح استفاده کردند. آنها نشان دادند که مقاومت برشی تیر افزایش می‌یابد و مود خرابی از برشی به خمشی تغییر می‌کند. همچنین در صورت استفاده از بست‌های FRP، جداسازی نوارها به تاخیر می‌افتد.

لی و لیونگ [۱۵] در سال ۲۰۱۵ اثر نسبت طول دهانه به عمق موثر تیرهای بتن مسلح تقویت شده با نوارهای FRP را بررسی کردند. مقایسه نتایج حاصل از بارگذاری بر روی شش تیر دور پیچ شده با نوارهای FRP و شش تیر تقویت نشده، نشان داد که با افزایش نسبت طول دهانه به عمق موثر تیر، مشارکت برشی نوارهای FRP ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. الروسان و عیسی [۱۶] در سال ۲۰۱۶ اثر عمق بر رفتار تیرهای بتن مسلح ضعیف برشی تقویت شده با CFRP را مطالعه کردند. بررسی نشان داد که مقاومت برشی به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و به اندازه عمق تیر وابستگی زیاد دارد.

شنگون و ارسلان [۱۷] در سال ۲۰۱۷ رفتار تیرهای بتن مسلح دارای میلگردهای فولادی و تقویت شده با نوارهای CFRP را بررسی نمودند. تیرها به صورت تقویت نشده ابتدا تا اندازه‌ای تحت بارگذاری قرار گرفتند که دچار مقدار مشخصی آسیب شوند و سپس تقویت شدند. نتایج نشان داد که تقویت با نوارهای CFRP شکل پذیری تیرها را افزایش می‌دهد.

نادریپور و علوی [۱۸] در سال ۲۰۱۷ یک مدل فازی برای پیش‌بینی مشارکت برشی نوارهای FRP در بهبود رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده ارائه دادند. پارامترهای مورد بررسی عبارت بودند از کرنش نهایی، مدول الاستیسیته، طول موثر، ضخامت، عرض، فاصله و زاویه نوارهای FRP و مقاومت فشاری بتن. نتایج حاصل نشان داد که رابطه ارائه شده دارای دقت بسیار خوبی می‌باشد.

بررسی تحقیقات انجام گرفته پیشین نشان می‌دهد که اثر هم‌زمان تعداد لایه، سطح مقطع و فواصل قرارگیری نوارهای FRP، میزان آرماتور طولی، ابعاد تیر و مقاومت فشاری بتنی بر ظرفیت برشی تیرهای بتنی با مقطع مستطیلی شکل تحت بار متمرکز متقارن مورد بررسی قرار نگرفته است که در تحقیق حاضر مورد مطالعه قرار گرفته است.

### ۳- معرفی نمونه‌های عددی

در این قسمت جزئیات تمام نمونه‌های پیشنهادی از نظر ابعاد، فولاد گذاری، میزان نوار تقویت، و نیز چگونگی آرایش نوارهای FRP نشان داده می‌شود. همچنین مشخصات بتن، فولاد و نوارهای به

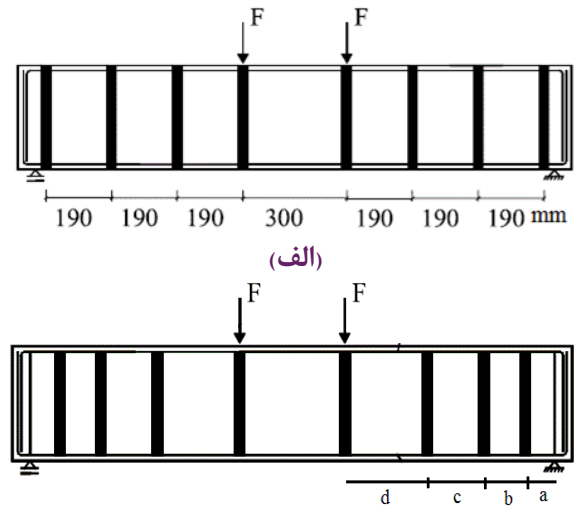
o	۸۰	۱۹۰	۳۱۰	۷۰
p	۱۸۰	۱۹۰	۱۵۰	۱۳۰
q	۷۱	۱۹۳	۱۹۳	۱۹۳
r	۱۰۰	۱۸۳	۱۸۳	۱۸۴
s	۹۰	۱۸۶/۵	۱۸۶/۵	۱۸۷
t	۱۲۰	۱۷۶/۵	۱۷۶/۵	۱۷۷
u	۱۱۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰

**جدول ۵. فواصل نوارهای تقویتی U شکل گروه T**  
**Tab5. Distances of U-shape strengthening strips of group T**

نام نمونه	فواصل نوارهای تقویتی (mm)			
	a	b	c	d
E	۱۳۱	۱۷۳	۱۷۳	۱۷۳
f	۱۴۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰
g	۱۵۰	۱۶۶/۵	۱۶۶/۵	۱۶۷
h	۱۶۰	۱۶۳	۱۶۳	۱۶۴
i	۱۷۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰
j	۱۸۰	۱۵۶/۵	۱۵۶/۵	۱۵۷
k	۱۹۰	۱۵۳	۱۵۳	۱۵۴
l	۲۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
m	۲۱۰	۱۴۶/۵	۱۴۶/۵	۱۴۷
n	۲۲۰	۱۴۳	۱۴۳	۱۴۴
o	۲۳۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰
p	۲۴۰	۱۳۶/۵	۱۳۶/۵	۱۳۷
q	۲۵۰	۱۳۳	۱۳۳	۱۳۴
r	۲۶۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰
s	۲۷۰	۱۲۶/۵	۱۲۶/۵	۱۲۷
t	۲۸۰	۱۲۳	۱۲۳	۱۲۴
u	۲۹۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
v	۳۰۰	۱۱۶/۵	۱۱۶/۵	۱۱۷

#### ۴- بررسی صحت مدل‌سازی

به منظور بررسی نتایج مدل سازی‌های عددی و مقایسه آن‌ها با نتایج واقعی لازم بود تا مدل سازی بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی که



**شکل ۱. الف) مدل انتخابی برای نمونه‌های مورد آزمایش، ب) پارامترهای مربوط به فواصل نوارهای تقویتی U شکل**  
**Fig 1. a) Selected model for tested specimens, b) parameters for the distance between U-shape strengthening strips**

فواصل نوارهای U شکل متغیر در نظر گرفته شده و با علامت‌های اختصاری a, b, c, d مطابق جداول ۴ و ۵ و شکل ۱ ب نشان داده شده است. برای سهولت در نام گذاری، نمونه‌ها در دو گروه S و T مطابق جداول ۴ و ۵ قرار گرفته‌اند. میزان فولاد و مقاومت فشاری بتن مربوط به نمونه‌های این گروه به ترتیب مقدار D (جدول ۲) و H (جدول ۱) در نظر گرفته شده است.

**جدول ۴. فواصل نوارهای تقویتی U شکل گروه S**  
**Tab4. Distances of U-shape strengthening strips of group S**

شماره نمونه	فواصل نوارهای تقویتی (mm)			
	a	b	c	d
e	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰
f	۸۰	۱۰۰	۲۸۰	۱۹۰
g	۷۱	۱۸۰	۱۹۴	۲۰۵
h	۱۲۰	۱۹۰	۱۵۰	۱۹۰
i	۱۳۰	۱۹۰	۱۴۰	۱۹۰
j	۸۰	۱۹۰	۲۶۰	۱۲۰
k	۱۲۶	۱۵۰	۱۷۵	۱۹۹
l	۱۴۰	۱۹۰	۱۵۰	۱۹۰
m	۱۵۰	۱۵۰	۱۶۰	۱۹۰
n	۱۲۶/۵	۱۶۰	۱۷۵	۱۸۸/۵

## جدول ۶. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و المان محدود نمونه‌ها

Tab 6. Load capacity increase in strengthened beams for strengthening strips types M, N and O

اجزای محدود	آزمایش [۳]	
۱۲۳/۱۴	۱۲۲/۰۶	بارنهایی (kN)
۳/۵	۳/۷۵	تغییرمکان وسط دهانه (kN)

### ۵- نتایج حاصل از تحلیل تیرهای تقویت شده، با در نظر گرفتن عوامل مقاومت فشاری بتن و میزان آرما تور طولی، و تعداد نوارهای U شکل در طول تیر، عرض نوار تقویتی، تعداد لایه‌های نوار تقویتی و فواصل نوارهای U شکل

در این بخش بررسی تحلیلی تیرهای تقویت شده گروه‌های A، B و C با مقادیر و آرایش‌های گوناگون نوار CFRP، با در نظر گرفتن مقادیر مختلف تنش تسلیم فولاد طولی و مقاومت فشاری بتن، انجام خواهد شد. برای این منظور، همان طور که گفته شد، تیرهای تقویت شده در نرم افزار ABAQUS مدل سازی و تحلیل غیر خطی خواهند شد. برای مدل سازی بتن از المان شش وجهی و هشت گرهی Solid C3D8I استفاده شده است. برای میلگردهای طولی و عرضی از المان خرابایی T3D2 که یک المان سه بعدی دو گرهی با تغییر شکل‌های خطی است استفاده، و برای مدل-سازی نوار FRP از المان چهار گرهی Shell S4R استفاده گردیده است. گره‌های سطح بتن با فاید Tie به گره‌های نوار FRP متصل شده‌اند. برای تعریف اندرکنش مناسب بتن و میلگرد از قابلیت Embedded استفاده شده است تا درجات آزادی میلگرد مستقل از درجات آزادی بتن اطراف نباشد. از معیار تسلیم فون میزز [۱۹] برای مصالح فولادی استفاده شده است و نمودار تنش-کرنش مصالح فولادی به صورت سه خطی در نظر گرفته شده است (شکل ۳-الف) [۲۰]. برای رفتار پلاستیک بتن از مدل آسیب خمیری بتن [۲۱] در فشار و کشش استفاده شده است (شکل‌های ۳-ب و ج). برای نوارهای FRP از معیار شکست تسای-وو [۲۲] استفاده گردیده است. رفتار نوارها تا لحظه شکست به صورت خطی تغییر می‌کند. در این راستا، تاثیر پارامترهای مختلف بر ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه در تیرهای تقویت شده، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

نتایج آن‌ها منتشر شده انجام شود. برای نیل به این هدف نمونه‌ی بتنی که توسط باروس و دیاس [۳] آزمایش شده است در نظر گرفته شد. ابعاد این مقطع  $1600 \times 300 \times 150$  میلی‌متر مکعب می‌باشد. خصوصیات مکانیکی FRP عبارتند از:

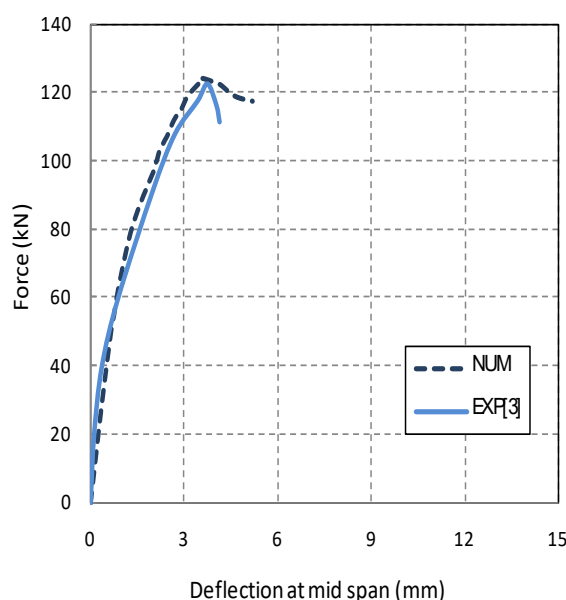
ضخامت هر لایه:  $167 \text{ mm}$

مدول الاستیسیته:  $39000 \text{ MPa}$

مقاومت کششی:  $300 \text{ MPa}$

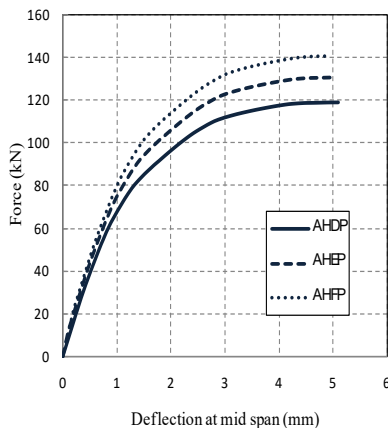
کرنش پارگی:  $0.008$

در شکل ۳ نمودارهای بار - تغییر مکان وسط دهانه برای تیر مدل سازی شده و نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است. شکل ۳ و جدول ۶ نشان می‌دهند که مدل ارائه شده انطباق خوبی با آزمایش‌ها دارد و می‌تواند برای مطالعات پارامتری دیگر به کار رود. در شکل ۲، اختلافی در شکل نمودارها در قله آنها دیده می‌شود. این اختلاف را می‌توان این گونه توضیح داد که در نمونه آزمایشگاهی پس از رسیدن بار به مقدار نهایی خود و شکسته شدن تیر بتنی، ممکن است که ابزار اندازه گیری تغییر مکان به دلیل ضربه حاصل از شکست دچار جابجایی غیر عادی شده باشد و به همین دلیل نوک قله در نتایج آزمایشگاهی تیزتر از نمودار صحت سنجی است. با استفاده از مدل فوق در بخش‌های بعدی اثر سطح مقطع بتن، میزان فولاد کششی و تعداد لایه‌های FRP بر رفتار تیرهای بتنی بررسی می‌شود.

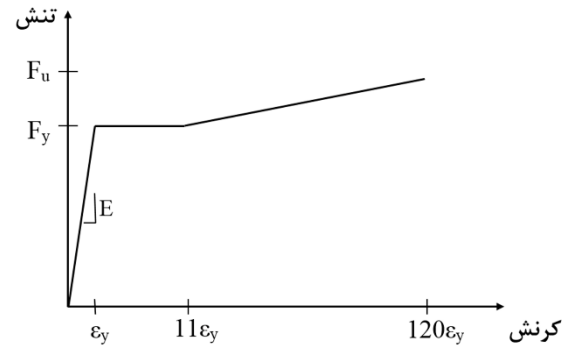


شکل ۲. مقایسه نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه بدست آمده از ABAQUS با نمودار بدست آمده از آزمایش Fig2. Comparison of load-midspan displacement curves obtained from ABAQUS and from test

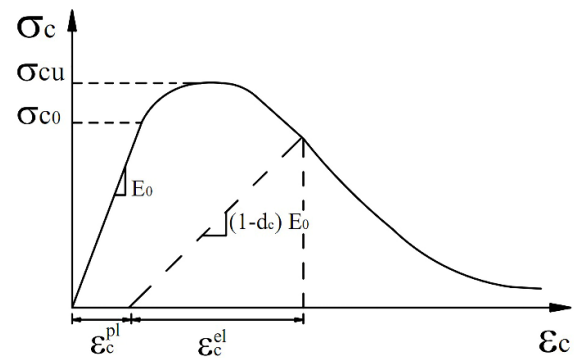
شده، نمودار بار-تغییرمکان وسط دهانه تیرهای تقویت شده گروه A، به ازای فولاد نوع E، D و F در شکل ۴-الف و به ازای نوار تقویتی نوع P، Q و R در شکل ۴-ب نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۴-الف ملاحظه می شود، بیش ترین ظرفیت باربری در تیر تقویت شده AHFP با میزان بار نهایی ۱۴۰/۶۶ kN و سپس در تیرهای AHDP و AHEP به ترتیب با مقادیر ۱۳۰/۸۳ kN و ۱۱۸/۸۳ kN بوجود آمده است. همچنین روند نسبتاً مشابهی برای تیرهای گروه B و C مشاهده می شود. بیش ترین ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده گروه B و C مربوط به تیرهای BHFP و CHFP و به ترتیب با مقادیر ۲۰۷/۷۸ و ۲۸۹/۲ kN می باشد. بنابراین در تیرهایی که از فولاد نوع F، به ازای مقاومت فشاری ثابت نوع H برای بتن استفاده شده است، ظرفیت باربری نهایی بزرگتری در مقایسه با تیرهای نوع E و D مشاهده می شود و مود خرابی از برشی به سمت خمشی تغییر می کند. بالعکس همان طوری که در شکل ۴ ج برای تیر AGFP دیده می شود با افزایش میزان آرماتور کششی تغییرمکان وسط دهانه کاهش می یابد و مود خرابی از نوع برشی است که به دلیل تمرکز تنش در محدوده تکیه گاه ایجاد می شود. حداکثر تنش های کششی ایجاد شده در بتن، آرماتور طولی و نوارهای FRP برای این تیر به ترتیب ۴ MPa، ۴۸۶ MPa و ۳۰۰۰ MPa می باشد که مقایسه این اعداد با مقاومت های کششی آنها نشان می دهد که تنش کششی در آرماتور فولادی در حدود ۸۵٪ مقاومت کششی است در حالی که تنش های کششی ایجاد شده در بتن و در نوارهای FRP نزدیک به مقاومت کششی آنها می باشد. در مورد این تیر پارگی دومین نوار FRP از سمت تکیه گاه و انهدام بتن تقریباً به صورت همزمان اتفاق می افتد. البته در سایر تیرها بسته به موقعیت، فاصله و ابعاد نوارهای FRP ممکن است شکست ابتدا در بتن و یا در نوارهای FRP رخ دهد. به دلیل این که در مدل سازی در نرم افزار، المان های نوار FRP به المان های بتن بسته شده اند امکان نشان دادن و بررسی جداشدگی نوار از بتن در مدل های ساخته شده وجود ندارد.



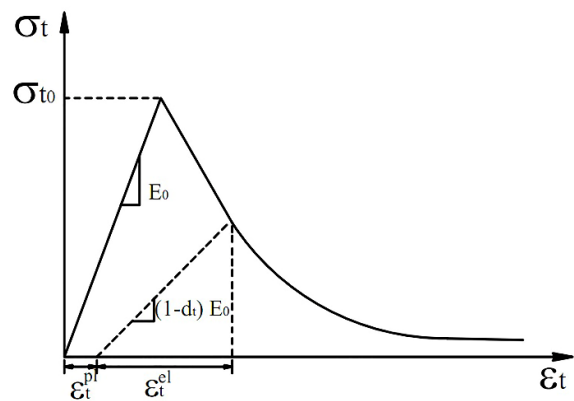
(الف)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳. نمودار تنش-کرنش مصالح

الف) فولاد [۲۰]، ب) فشار برای مدل آسیب خمیری بتن

ج) کشش برای مدل آسیب خمیری بتن [۲۱]

Fig 3. Stress-stress diagram of materials: a) steel [20],

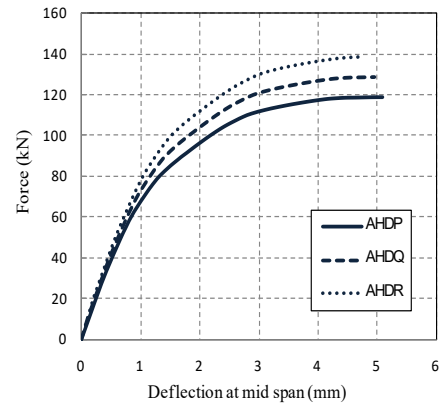
b) compression for concrete plastic damaged model

[21], c) tension for concrete plastic damaged model

۵-۱- بررسی تاثیر میزان آرماتور کششی و تعداد نوارهای U شکل در طول تیر بر ظرفیت باربری و تغییرمکان وسط دهانه تیرهای تقویت شده

به منظور بررسی تاثیر میزان آرماتور کششی و تعداد نوارهای U شکل در طول تیر بر ظرفیت باربری و تغییرمکان وسط تیرهای تقویت

خلاصه نتایج مقادیر بار و تغییرمکان نهایی نمونه‌های تحلیلی تقویت شده هر سه گروه A، B و C با در نظر گرفتن عوامل میزان فولاد طولی، نوع D، E و F و تعداد نوارهای U شکل در طول تیر، نوع P، Q و R در جدول ۷ ملاحظه می‌شود. با رجوع به این جدول، می‌توان مشاهده نمود که تیرهای تقویت شده با نوار CFRP نوع R در مقایسه با نوار نوع Q و P به ازای مقدار یکسان برای تنش تسلیم فولاد طولی و مقاومت فشاری بتن، در تیرهای AHDR، BHDR و CHDR به ترتیب به میزان ۷٪ تا ۱۴٪، ۹٪ تا ۱۳٪ و ۶٪ تا ۱۱٪ برابر افزایش را نسبت به تیرهای نظیر خود در دسته AHDQ، AHDP و CHDP، BHDQ، BHDP، CHDQ، داشته است.



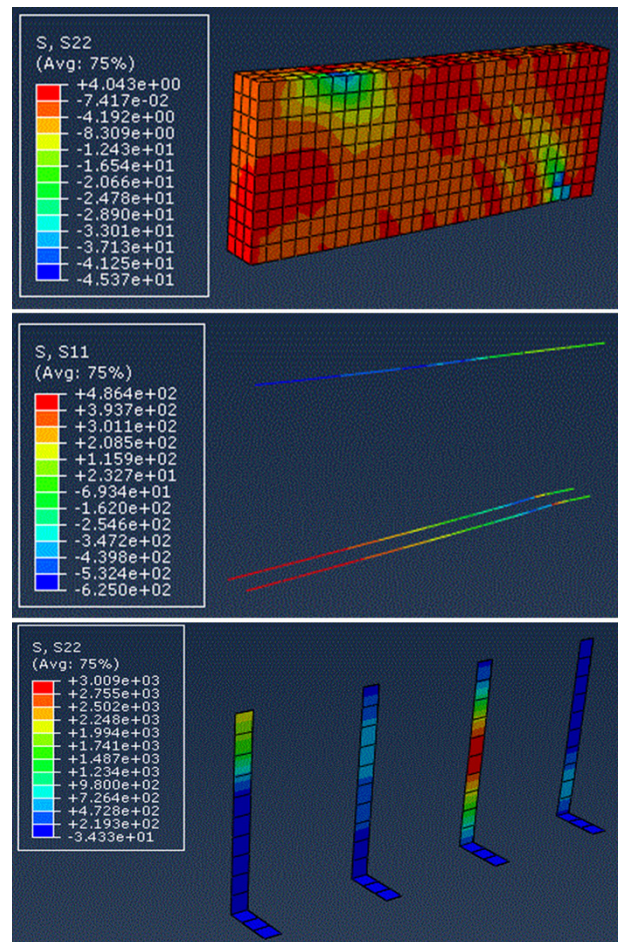
(ب)

۵-۲- بررسی تاثیر عرض نوار تقویتی و مقاومت فشاری بتن بر ظرفیت باربری و شکل پذیری تیرهای تقویت شده به منظور ارزیابی تاثیر عرض نوار تقویتی و مقاومت فشاری بتن، بر ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده، نمودار بار-تغییرمکان وسط دهانه به دست آمده از تحلیل غیر خطی ABAQUS در تیرهای تقویت شده گروه A در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۵-الف ملاحظه می‌شود، بیشترین ظرفیت باربری در تیر تقویت شده ADGL با میزان ۱۱۱/۵۴ kN و سپس در تیرهای ADGJ و ADGK به ترتیب با مقادیر ۱۰۷/۳۶ kN و ۱۰۲/۱۱ kN به وجود آمده است. استفاده از نوار تقویتی نوع L به ازای مقاومت فشاری ثابت نوع G برای بتن سبب افزایش ظرفیت باربری در حدود ۳٪ الی ۹٪ به ترتیب در مقایسه با تیرهای نوع J و K شده است. همچنین مقاومت فشاری ثابت نوع H برای بتن سبب افزایش ظرفیت باربری در حدود ۴٪ الی ۱۰٪ و مقاومت فشاری ثابت نوع I برای بتن سبب افزایش ظرفیت باربری در حدود ۶٪ الی ۱۱٪ به ترتیب در مقایسه با تیرهای نوع J و K شده است. مود خرابی در مدل‌های مذکور از نوع برشی است.

جدول ۷. مقادیر بار نهایی - تغییرمکان وسط دهانه در نمونه‌های تحلیلی تقویت شده به ازای فولاد نوع E، D و F و نوار تقویتی نوع Q، P و R

Tab7. Ultimate load -midspan displacement values for analysed stiffened specimens for steel types D, E and F and strengthening strips types P, Q and R

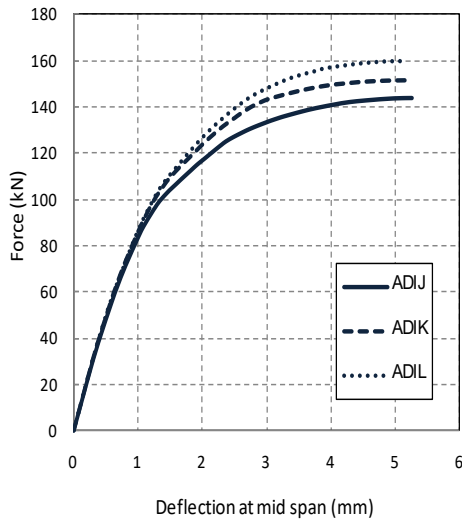
تیر	ظرفیت باربری نهایی (kN)	تغییرمکان وسط دهانه (mm)
AHDP	۱۱۸/۸۳	۵/۱
AHEP	۱۳۰/۸۳	۵/۰۵
AHFP	۱۴۰/۶۶	۴/۹



(ج)

شکل ۴. نمودار بار-تغییرمکان در تیرهای تقویت شده: الف) به ازای فولاد متفاوت، ب) به ازای تعداد نوارهای متفاوت در طول تیر، ج) کانتور تنش در بتن، آرمانتور فولادی و نوار FRP در نصف طول تیر AHFP

Fig 3. Load-displacement diagram in strengthened beams: a) for different steel, b) for different number of strips along the beam, c) stress contour in concrete, steel rebar and FRP strip at half-length of beam AHFP



(ج)

شکل ۵. نمودار بار- تغییرمکان در تیرهای تقویت شده گروه A به ازای مقاومت فشاری نوع: الف) G، ب) H، ج) I

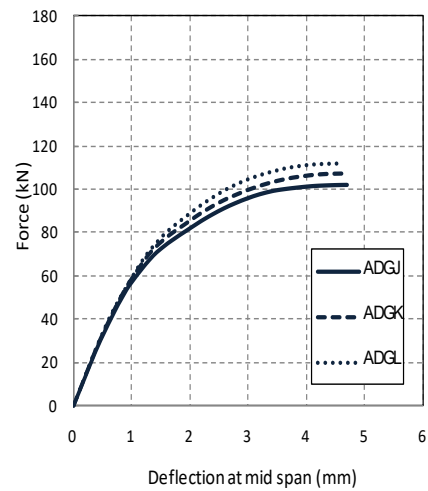
Fig 5. Load-displacement diagram in strengthened beams group A for compressive strength type: a) G, b) H, c) I

خلاصه نتایج مقادیر بار و تغییرمکان نهایی نمونه‌های تحلیلی تقویت شده هر سه گروه B، A، C با در نظر گرفتن عوامل مقاومت فشاری بتن، نوع G، H، I، و مقدار عرض نوار تقویتی، نوع J، K، L در جدول ۸ نشان داده شده است.

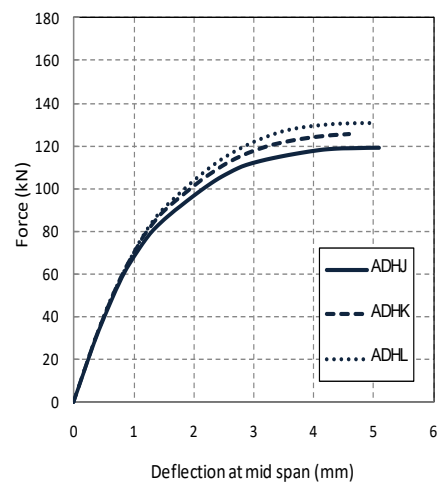
در رابطه با نمونه‌های گروه B همان گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود، نمونه‌های با نوار تقویتی نوع L به ازای مقاومت فشاری ثابت برای بتن، در تیرهای دسته BDG، ۵٪ تا ۸٪، در تیرهای دسته BDH، ۶٪ تا ۹٪ و در تیرهای دسته BDI، ۵٪ تا ۹٪، ظرفیت باربری نهایی بزرگ تری را نسبت به تیرهای با نوار تقویتی نوع K و J نظیر دسته خود نشان می‌دهند.

بالعکس تغییرمکان وسط دهانه در نمونه‌های فوق کاهش می‌یابد. همچنین در رابطه با نمونه‌های گروه C همان گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود، نمونه‌های با نوار تقویتی نوع L به ازای مقاومت فشاری ثابت برای بتن، در تیرهای دسته CDG، ۳٪ تا ۷٪، در تیرهای دسته CDH، ۳٪ تا ۷٪ و در تیرهای دسته CDI، ۳٪ تا ۷٪، ظرفیت باربری نهایی بزرگ تری را نسبت به تیرهای با نوار تقویتی نوع K و J نظیر دسته خود نشان می‌دهند، ولی مود خرابی به صورت برشی باقی می‌ماند.

۴/۹۶	۱۲۸/۷۷	AHDQ
۴/۷۳	۱۳۸/۵۹	AHDR
۳/۵۸	۱۷۵/۱	BHDP
۳/۴۵	۱۹۴/۳۸	BHEP
۳/۲۹	۲۰۷/۷۸	BHFP
۳/۴	۱۸۴/۴۲	BHDQ
۳/۲۸	۲۰۲/۱۵۶	BHDR
۳/۲۴	۲۳۶/۳	CHDP
۳/۱	۲۶۰/۱	CHEP
۲/۹۸	۲۸۹/۲	CHFP
۲/۹۲	۲۴۷/۵۵	CHDQ
۲/۶۹	۲۶۵/۳۲	CHDR



(الف)



(ب)

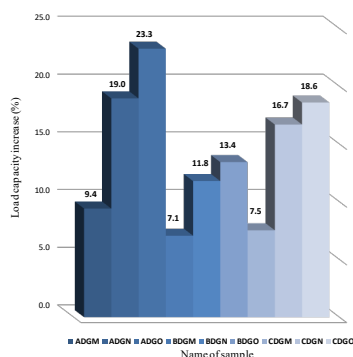


### ۵-۳- بررسی تاثیر تعداد لایه‌های نوار تقویتی بر ظرفیت باربری و تغییرمکان وسط دهانه تیرهای تقویت شده

خلاصه‌ای از مقادیر بار و تغییرمکان نهایی برای نمونه‌های تحلیلی تقویت شده هر سه گروه A، B و C با در نظر گرفتن پارامتر تعداد لایه‌های تقویتی، نوع O و M، N در جدول ۹ ارائه شده است. با رجوع به این جدول، می‌توان مشاهده نمود که تیرهای تقویت شده با نوار CFRP نوع O در مقایسه با نوار نوع M و N به ازای مقدار یکسان برای تنش تسلیم فولاد طولی و مقاومت فشاری بتن، در تیرهای ADGO، BDGO، CDGO و به ترتیب به میزان ۶٪، ۱۸٪، ۲٪ تا ۷٪ و ۲٪ تا ۱۳٪ برابر افزایش رانسبت به تیرهای نظیر خود در دسته ADGN، ADGM، BDGN، BDGM، CDGN، CDGM همچنین میزان تغییرمکان وسط دهانه در این نمونه‌ها افزایش یافته است. با توجه به شکل ۶ و جدول ۹ با افزایش تعداد لایه‌ها میزان افزایش باربری کاهش می‌یابد.

### جدول ۹. خلاصه مقادیر بار نهایی - تغییرمکان وسط دهانه در نمونه‌های تحلیلی تقویت شده به ازای نوار تقویتی نوع M، N و O Tab9. Summary of ultimate load - midspan displacement values for analysed stiffened specimens for strengthening strips types M, N and O

تیر	ظرفیت باربری نهایی (kN)	تغییرمکان وسط دهانه (mm)
ADGM	۹۱/۳۶	۳/۸۳
ADGN	۱۰۲/۱۱	۴/۶۹
ADGO	۱۰۷/۸۴	۴/۸
BDGM	۱۴۱/۵۷	۳/۳
BDGN	۱۴۹/۱۶	۳/۴۹
BDGO	۱۵۲	۳/۵۶
CDGM	۱۸۵/۸۶	۲/۸
CDGN	۲۰۶/۳	۳/۲
CDGO	۲۱۱/۱۲	۳/۳



شکل ۶. میزان افزایش باربری تیرهای تقویت شده به ازای نوار تقویتی نوع M، N و O

Fig 6. Load capacity increase in strengthened beams for strengthening strips types M, N and O

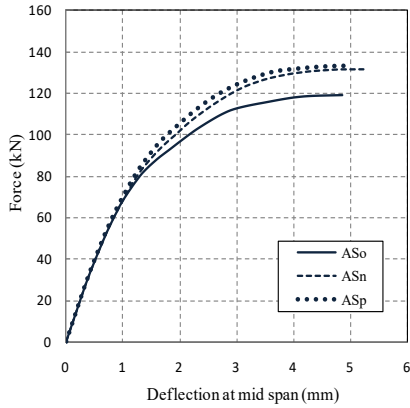
### جدول ۸. خلاصه مقادیر بار نهایی - تغییرمکان وسط دهانه در نمونه‌های تحلیلی تقویت شده به ازای مقاومت فشاری بتن، نوع G، H و I و نوار تقویتی نوع J، K و L Tab8. Summary of ultimate load - midspan displacement values for analysed stiffened specimens for concrete compressive strength types G, H and I and strengthening strips types J, K and L

تیر	ظرفیت باربری (نهایی) (kN)	تغییرمکان وسط دهانه (mm)
ADGJ	۱۰۲/۱۱	۴/۶۹
ADGK	۱۰۷/۳۶	۴/۷۳
ADGL	۱۱۱/۵۴	۴/۵۶
ADHJ	۱۱۸/۸۳	۵/۱
ADHK	۱۲۵/۷۲	۴/۶
ADHL	۱۳۱	۴/۹۳
ADIJ	۱۴۳/۷۳	۵/۲۶
ADIK	۱۵۱/۳۲	۵/۱۶
ADIL	۱۵۹/۷۷	۵/۱۳
BDGJ	۱۴۹/۱۶	۳/۴۸
BDGK	۱۵۳/۱۷	۳/۵۶
BDGL	۱۶۱/۰۹	۳/۴
BDHJ	۱۷۵/۱	۳/۵۸
BDHK	۱۸۰/۱۲	۳/۶۴
BDHL	۱۹۰/۹۲	۳/۶۵
BDIJ	۲۱۳/۰۸	۳/۶۴
BDIK	۲۲۱	۳/۵۵
BDIL	۲۳۳/۳۵	۳/۴۳
CDGJ	۲۰۰/۳	۳/۲
CDGK	۲۰۶/۶	۳/۲
CDGL	۲۱۳/۸	۳/۰۶
CDHJ	۲۳۶/۳	۳/۲۴
CDHK	۲۴۴/۲	۳/۲۸
CDHL	۲۵۱/۹۷	۳/۰۸
CDIJ	۲۹۰/۱۳	۳/۷
CDIK	۳۰۲/۲۷	۳/۵۷
CDIL	۳۱۱/۰۹	۳/۲۴

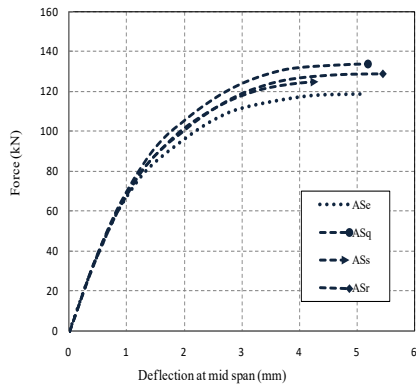
#### ۴-۵- بررسی تاثیر فواصل نوارهای U شکل بر ظرفیت باربری و شکل پذیری تیرهای تقویت شده

در این بخش، تاثیر فواصل نوارهای U شکل بر ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. برای این منظور نمودارهای بار-تغییر مکان وسط دهانه به دست آمده از تحلیل غیرخطی ABAQUS در تیرهای مختلف تقویت شده، در شکل ۷ نشان داده شده است.

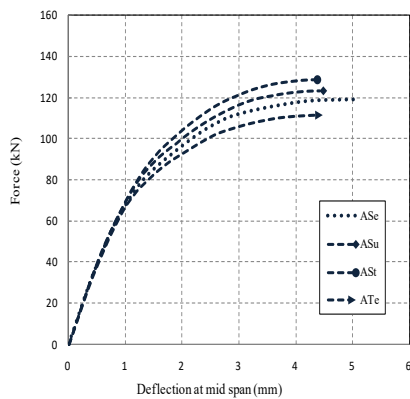
شکل ۷-الف، ب و ج نمودارهای بار-تغییر مکان وسط دهانه تیرهای تقویت شده، شامل تیرهای ASm، ASn، ASo، ASp، ASf، ASg، ASh، ASi، ASj، ASk، ASI را نشان می‌دهد. چیدمان نوارهای تقویتی در طول تیرهای مزبور با فواصل نامنظم می‌باشد. همان طور که در شکل ۷-الف ملاحظه می‌شود، بیشترین ظرفیت باربری در تیر تقویت شده ASg با میزان  $134/9 \text{ kN}$  و سپس در تیرهای ASf، ASh و ASi به ترتیب با مقادیر  $130/4 \text{ kN}$ ،  $130/04 \text{ kN}$  و  $111/57 \text{ kN}$  به وجود آمده است. همچنین در شکل ۷-ب و ج، بیشترین ظرفیت باربری در تیر تقویت شده ASp و ASk به ترتیب با میزان  $133/17 \text{ kN}$  و  $133/18 \text{ kN}$  بدست آمده است.



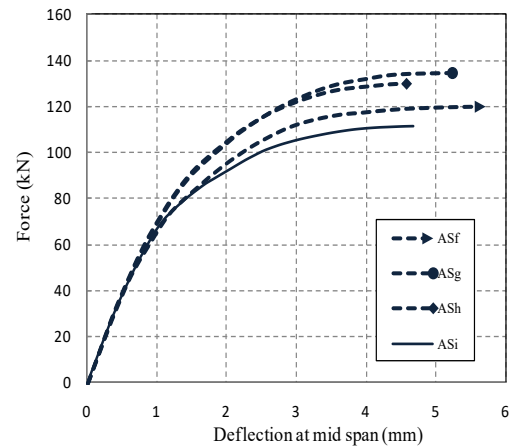
(ج)



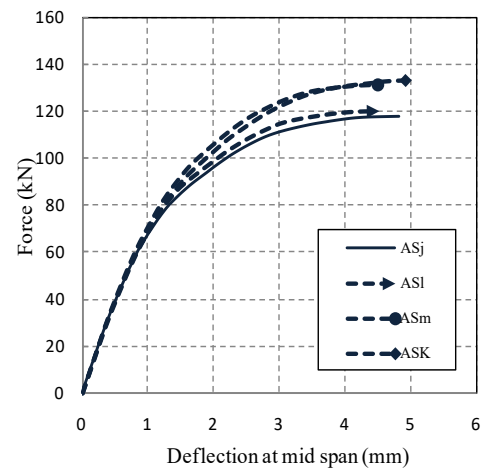
(د)



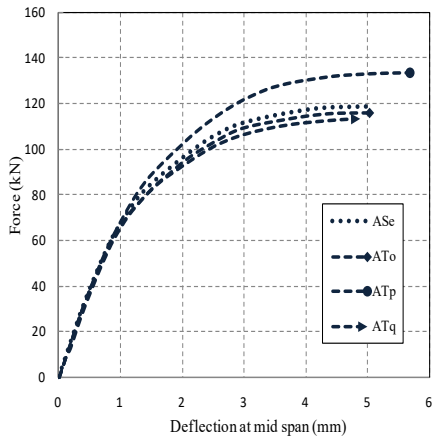
(ه)



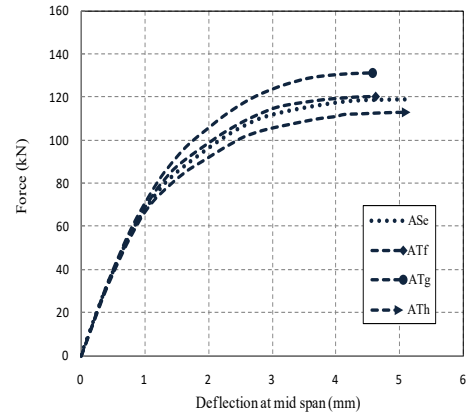
(الف)



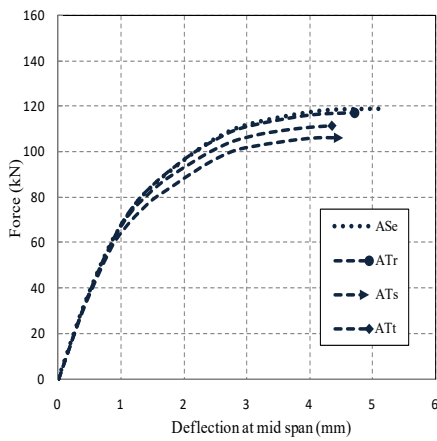
(ب)



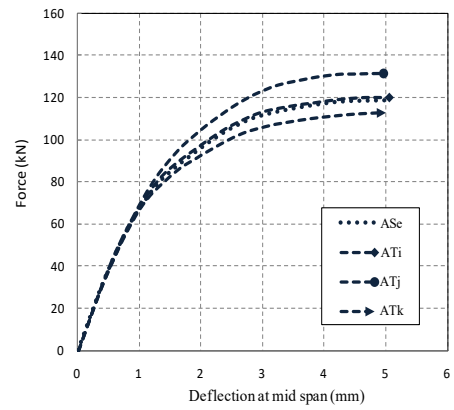
(ط)



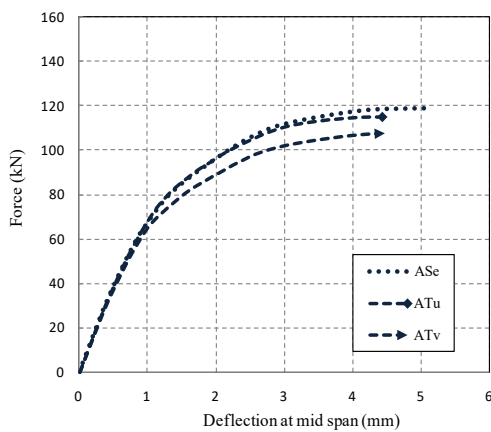
(و)



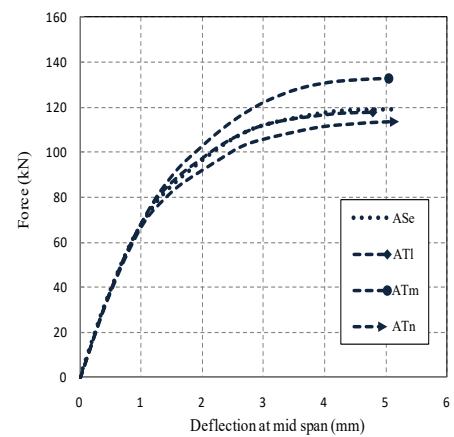
(ی)



(ز)



(ک)



(ح)

شکل ۷. نمودار بار- تغییرمکان در تیرهای تقویت شده با فواصل متغیر نوار تقویتی  
 Fig 7. Load-displacement diagram in strengthened beams with different strengthening strip distances

شکل ۷-دالی شکل ۷-ک نشان می دهد که با تغییر در فاصله اولین نوار تقویتی از تکیهگاه میزان ظرفیت باربری تغییر می کند. قرار گرفتن نوارهای تقویتی بر روی ترک های ایجاد شده مانع از گسترش ترک ها شده و ظرفیت باربری بیشتری حاصل می شود. در این حالت، مود خرابی از برشی به خمشی تغییر می یابد. در تیر ASE که فاصله اولین نوار تقویتی از تکیه گاه ۸۰cm می باشد و مابقی نوارها با فواصل منظم در طول تیر قرار گرفته اند، ظرفیت باربری ۱۱۸/۸۳kN حاصل شده است با تغییر در فاصله اولین نوار تقویتی از ۸۰mm به ۷۱mm که تیر ASq حاصل می شود، میزان ظرفیت باربری ۱۳۳/۸۷kN نتیجه شده است. همچنین میزان تغییر مکان وسط دهانه در حدود ۴/۳۴mm الی ۵/۶۷mm می باشد که تغییر در فواصل

نوارهای تقویتی تاثیر ناچیزی در تغییر مکان وسط دهانه دارد. خلاصه نتایج مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه های تحلیلی تقویت شده گروه A با در نظر گرفتن پارامتر تغییر در فواصل نوارهای تقویتی در جدول ۱۰ آورده شده است. در این قسمت جزئیات چگونگی تاثیر این پارامتر بر میزان افزایش ظرفیت باربری نهایی، بررسی می شود. بیشترین ظرفیت باربری مربوط به تیر ASg با مقدار ۱۳۴/۹ kN می باشد. چیدمان نوارهای تقویتی در این نمونه سبب افزایش حدود ۳۵٪ نسبت به تیر کنترل دسته خود شده است. کمترین ظرفیت باربری مربوط به تیر ATs با مقدار ۱۰۶/۱۴kN می باشد که سبب افزایش حدود ۶٪ نسبت به تیر کنترل دسته خود شده است.

### جدول ۱۰. مقادیر بار نهایی - تغییر مکان وسط دهانه در نمونه های تحلیلی تقویت شده با فواصل متغیر نوار تقویتی

Tab10. Ultimate load-midspan displacement values for analysed stiffened specimens with different strip distances

تیر	ظرفیت باربری نهایی (kN)	تغییر مکان وسط دهانه (mm)	تیر	ظرفیت باربری نهایی (kN)	تغییر مکان وسط دهانه (mm)	تیر	ظرفیت باربری نهایی (kN)	تغییر مکان وسط دهانه (mm)
ASe	۱۱۸/۸۳	۵/۱	ASq	۱۳۳/۸۷	۵/۱۸	ATI	۱۱۷/۹۷	۴/۷۸
ASf	۱۲۰/۴	۵/۷	ASr	۱۲۹/۱	۵/۴۴	ATm	۱۳۳/۲۷	۵/۰۲
ASg	۱۳۴/۹	۵/۲۴	ASs	۱۲۵/۰۳	۴/۳۲	ATn	۱۱۳/۷۵	۵/۱۹
ASh	۱۳۰/۰۴	۴/۵۶	ASt	۱۲۸/۷۷	۴/۳۷	ATo	۱۱۶/۲۲	۵/۰۱
ASi	۱۱۱/۵۷	۴/۶۷	ASu	۱۲۳/۲۳	۴/۴۷	ATp	۱۳۳/۶۱	۵/۶۷
ASj	۱۱۷/۹۳	۴/۸۲	ATe	۱۱۱/۸۲	۴/۴۸	ATq	۱۱۳/۳۲	۴/۸۷
ASk	۱۳۳/۱۸	۴/۹	ATf	۱۲۰/۴۱	۴/۶۲	ATr	۱۱۷/۲۹	۴/۷
ASl	۱۲۰/۱۷	۴/۵	ATg	۱۳۱/۴۷	۴/۵۷	ATs	۱۰۶/۱۴	۴/۵
ASm	۱۳۱/۳۱	۴/۵	ATh	۱۱۳/۳۳	۵/۱۶	ATt	۱۱۱/۵۱	۴/۳۴
ASn	۱۳۱/۷	۵/۲۲	ATi	۱۲۰/۴۴	۵/۰۴	ATu	۱۱۵/۲۸	۴/۴۲
ASo	۱۱۸/۸۱	۴/۸۵	ATj	۱۳۱/۸۳	۴/۹۶	ATv	۱۰۷/۸۵	۴/۴۵
ASp	۱۳۳/۱۷	۴/۹۸	ATk	۱۱۲/۹۳	۴/۹۸			

در مقایسه با تیرهای نوع Q و P (به ترتیب شامل ۱۰ و ۸ نوار U شکل در طول تیر) ایجاد شده است.

۲- استفاده از فولاد با میزان  $\phi$  ۱۴ و تنش تسلیم ۵۷۴ MPa، به افزایش ۸٪ تا ۳۰٪ در ظرفیت باربری و کاهش میزان تغییر مکان وسط

### ۶- نتیجه گیری

مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می باشد.

۱- در تیرهای تقویت شده که از نوار تقویتی نوع R (شامل ۱۴ نوار U شکل در طول تیر)، استفاده شده است، ظرفیت باربری نهایی بزرگ تری

(FRPRCS4), Baltimore, MD, 1999, pp. 995-1008.

[3] J.A. Barros, S.J. Dias, Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams, *Cement and Concrete Composites*, 28(3) (2006) 276-292.

[4] M. Chajes, T. Thomson, B. Tarantino, Reinforcement of concrete structures using externally bonded composite materials, in: *RILEM PROCEEDINGS, CHAPMAN & HALL*, 1995, pp. 501-501.

[5] A.S. Mosallam, S. Banerjee, Shear enhancement of reinforced concrete beams strengthened with FRP composite laminates, *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6) (2007) 781-793.

[6] H.-T. Hu, F.-M. Lin, Y.-Y. Jan, Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics, *Composite Structures*, 63(3-4) (2004) 271-281.

[7] Y.-S. Shin, C. Lee, Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates at different levels of sustaining load, *Structural Journal*, 100(2) (2003) 231-239.

[8] O. Buyukozturk, O. Gunes, E. Karaca, Characterization and modeling of debonding in RC beams strengthened with FRP composites, in: *15th ASCE Engineering Mechanics Conference*, Columbia University, New York, 2002, pp. 1-8.

[9] R.S. Wong, F.J. Vecchio, Towards modeling of reinforced concrete members with externally bonded fiber-reinforced polymer composites, *ACI Structural Journal*, 100(1) (2003) 47-55.

[10] N.F. Grace, G. Sayed, A. Soliman, K. Saleh, Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminates, *ACI Structural Journal-American Concrete Institute*, 96(5) (1999) 865-874.

[11] A. Sharif, G. Al-Sulaimani, I. Basunbul, M. Baluch, B. Ghaleb, Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates, *Structural Journal*, 91(2) (1994) 160-168.

[12] J. Dong, Q. Wang, Z. Guan, Structural behaviour of RC beams with external flexural and flexural-shear strengthening by FRP sheets, *Composites Part B: Engineering*, 44(1) (2013) 604-612.

[13] A.K. El-Sayed, Effect of longitudinal CFRP strengthening on the shear resistance of reinforced concrete beams, *Composites Part B: Engineering*, 58 (2014) 422-429.

[14] D. Baggio, K. Soudki, M. Noel, Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems, *Construction and Building Materials*, 66 (2014) 634-644.

[15] W. Li, C.K. Leung, Shear span-depth ratio effect on behavior of RC beam shear strengthened with full-wrapping FRP strip, *Journal of Composites for Construction*, 20(3) (2015) 04015067.

[16] R.Z. Al-Rousan, M.A. Issa, The effect of beam depth on the

دهانه تیرهای تقویت نشده منتهی خواهد شد.

۳- به کاربردن بتن با مقاومت فشاری بزرگتر  $50 \text{ MPa}$ ، در مقایسه با تیرهای با بتن با مقاومت فشاری  $37/6 \text{ MPa}$ ، و  $30 \text{ MPa}$  سبب رشد ظرفیت باربری در تیرهای تقویت نشده گروه A، B و C به ترتیب به میزان  $22\%$  تا  $48\%$ ،  $23\%$  تا  $45\%$  و  $24\%$  تا  $48\%$  و منجر به کاهش میزان تغییرمکان وسط دهانه می‌شود.

۴- میزان افزایش ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده دارای نوار تقویتی نوع L (عرض نوار تقویتی  $45 \text{ mm}$ ) در مقایسه با نوار تقویتی نوع K و J (عرض نوار تقویتی به ترتیب  $35 \text{ mm}$  و  $25 \text{ mm}$ )، به ازای مقاومت فشاری ثابت نوع H برای بتن و تنش تسلیم ثابت نوع D برای فولاد طولی برابر  $4\%$  الی  $10\%$  در تیرهای گروه A،  $6\%$  الی  $9\%$  در گروه B و  $3\%$  الی  $7\%$  در گروه C می‌باشد.

۵- به کاربردن نوار تقویتی نوع O (شامل ۴ لایه نوار تقویتی) در مقایسه با نوار نوع N و M (به ترتیب شامل ۲ و ۱ لایه نوار تقویتی) به ازای مقدار یکسان برای تنش تسلیم فولاد طولی و مقاومت فشاری بتن، سبب افزایش ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده گروه A، B و C به ترتیب به میزان  $5\%$  تا  $18\%$ ،  $2\%$  تا  $7\%$  و  $2\%$  تا  $13\%$  میشود. با افزایش تعداد لایهها میزان تغییرمکان وسط دهانه افزایش می‌یابد.

۶- با تغییر در فواصل نوارهای تقویتی در طول تیر میزان ظرفیت باربری در حدود  $6\%$  الی  $35\%$  تغییر می‌کند.

۷- ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده گروه A، B و C با توجه به استفاده از فولاد با تنش تسلیم ثابت D به ازای استفاده از بتن با مقاومت فشاری بزرگتر، افزایش می‌یابد.

۸- با در نظر گرفتن پارامترهای عرض نوار تقویتی، تعداد نوار، طول تیر، تعداد لایهها و فواصل نوارها به ازای مقاومت فشاری ثابت برای بتن و تنش تسلیم ثابت برای فولاد نشان داده شد که بیشترین ظرفیت باربری مربوط به نمونه‌هایی است که در آن تعداد نوار تقویتی در طول تیر افزایش پیدا کرده است و کمترین ظرفیت باربری مربوط به نمونه‌هایی است که در آن تعداد لایه‌های نوار تقویتی افزایش پیدا کرده است.

## مراجع

[1] H.A. Raghu, J.J. Myers, A. Nanni, Shear performance of RC beams strengthened in situ with composites, Report, University of Missouri, Rolla, (2001).

[2] A. Khalifa, G. Tumialan, A. Nanni, A. Belarbi, Shear strengthening of continuous RC beams using externally bonded CFRP sheets, in: *American Concrete Institute, Proc., 4th International Symposium on FRP for Reinforcement of Concrete Structures*

- [19] W.-F. Chen, D.-J. Han, Plasticity for structural engineers, J. Ross Publishing, 2007.
- [20] E.A. Sumner, Unified design of extended end-plate moment connections subject to cyclic loading, Virginia Tech, 2003.
- [21] T. Jankowiak, T. Lodygowski, Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model, Foundations of civil and environmental engineering, 6(1) (2005) 53-69.
- [22] W. Van Paeppegem, J. Degrieck, Calculation of damage-dependent directional failure indices from the Tsai–Wu static failure criterion, Composites science and technology, 63(2) (2003) 305-310.
- shear behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with carbon fiber–reinforced polymer composites, Advances in Structural Engineering, 19(11) (2016) 1769-1779.
- [17] K. ŞENGÜN, G. ARSLAN, INFLUENCE OF CFRP ON THE STRENGTH OF RETROFITTED RC BEAMS WITHOUT STIRRUPS, Sigma, 35(1) (2017) 77-85.
- [18] H. Naderpour, S. Alavi, A proposed model to estimate shear contribution of FRP in strengthened RC beams in terms of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, Composite Structures, 170 (2017) 215-227.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Hejazi , M. Mohammadi ,Effect of FRP Strips Configuration, Beam Dimensions and Amount of Tensile Rebars on Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams , *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(3)(2019)465-478.

DOI : 10.22060/ceej.2018.13619.5455

