



## بررسی رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح با میلگردهای فولادی و FRP تقویت شده با ورق‌های CFRP

علی عبدالهی<sup>۱</sup>، وحید صابری<sup>۲\*</sup>، حمید صابری<sup>۳</sup>، عباسعلی صادقی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده عمران، دانشگاه غیرانتفاعی ایوان کی، سمنان، ایران.

<sup>۲\*</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه غیر انتفاعی ایوان کی، سمنان، ایران (saberi.vahid@gmail.com).

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه غیر انتفاعی ایوان کی، سمنان، ایران.

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۵/۲۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۸/۲۳)

### چکیده

امروزه استفاده از مصالح FRP به‌عنوان میلگردهای مصرفی در سازه‌های بتنی، عرشه‌ی پل‌ها و جاده‌ها به‌منظور جلوگیری از زنگ زدن میلگردهای فولادی رایج می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش، تقویت خمشی تیرهای بتنی با میلگردهای FRP و همچنین بهسازی تیرهای ضعیفی است که با این میلگردها مسلح شدند و با چسباندن ورق‌های CFRP در بخش تحتانی تیر در جهت طول آن تقویت شده است، می‌باشد. به این منظور به بررسی دو پارامتر اصلی شکل‌پذیری و مقاومت خمشی مقاطع مسلح با میلگردهای FRP که در قالب ۱۲ مدل طراحی و در نرم‌افزار ABAQUS تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون قرار گرفته شده‌اند همچنین نمونه‌ی GFRP تحت بار چرخه‌ای نیز قرار داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای تقویت تیرها در صورت استفاده از این میلگردها در صورت نبود میلگرد فولادی بهتر است از میلگرد AFRP استفاده گردد زیرا مقاومت خمشی در حدود ۸ الی ۱۸ درصد بیشتر از مقاطع مسلح با میلگردهای CFRP و GFRP را تأمین می‌کند و اگر بحث شکل‌پذیری مقطع مطرح است بهتر است از میلگرد GFRP استفاده گردد که شکل‌پذیری حدود ۷ الی ۱۵ درصد بیشتر از مقاطع AFRP و CFRP دارد و در صورت تقویت مقطع ضعیف با ورق‌های CFRP تحت بار چرخه‌ای می‌توان به ظرفیت خمشی در حدود ۲/۲۸ برابر بیشتر از تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون دست یافت.

### کلمات کلیدی

میلگرد FRP، ورق CFRP، رفتار خمشی، شکل‌پذیری، مقاومت خمشی، نرم‌افزار ABAQUS.



# Investigation the Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams with Steel and FRP Rebars Strengthened by CFRP Laminates

Ali Abdollahi<sup>1</sup>, Vahid Saberi<sup>2\*</sup>, Hamid Saberi<sup>3</sup>, Abbas Ali Sadeghi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran.

<sup>2\*</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran.  
(saberi.vahid@gmail.com)

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran.

<sup>4</sup> Ph.D. Candidate, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

(Date of received: 19/08/2020, Date of accepted: 13/11/2020)

## ABSTRACT

Nowadays, using FRP materials as reinforcing rebars in concrete structures, bridge decks and roads is common to prevent rusting of steel rebars. The purpose of this study was to strengthen the flexural strength of the concrete beams with FRP rebars and also to improve the weak beams that were reinforced with these rebars and reinforced by attaching the CFRP Laminates in the lower part of the beam along its length. For this purpose, two main parameters of ductility and flexural strength of sections reinforced with FRP rebars, designed in 12 models and subjected to nonlinear static analysis (pushover) in ABAQUS software and then the GFRP sample is also subjected to cyclic loading. The results show that to reinforce the beams if these rebars are used in the absence of steel bars, it is better to use the AFRP rebar because it provides flexural strength of beam sections about 8 to 18% more than the sections reinforced with CFRP and GFRP rebars and if the ductility is considered, It is advisable to use GFRP rebar which has about 7-15% more ductility than AFRP and CFRP sections, and if the weak section is strengthened with CFRP Laminates under cyclic loading, the flexural capacity can be more than 2.28 times to the nonlinear static analysis (pushover).

## Keywords:

FRP Rebar, CFRP Laminate, Flexural Behavior, Ductility, Flexural Strength, ABAQUS Software.



## ۱- مقدمه

با توجه به مقاومسازی تیرهای بتنی پیرامون آیین‌نامه‌های جدید یا نواقص طراحی که موجب ضعف این تیرها در برابر بار زلزله و بار متمرکز گردیده در این پژوهش راه‌حلی برای مقاومسازی تیرهای بتنی با میلگرد و ورق<sup>۱</sup> FRP، تحت بار افزون و چرخه‌ای ارائه می‌شود. FRP به‌عنوان یک مصالح ساختمانی جایگزین، در جنبه‌های مختلف سازه‌ای تبدیل شده است. می‌توان FRP را به‌طور خارجی به‌منظور بهبود ظرفیت خمشی و برشی تیرها، دال‌ها و دیوار برشی ساخته‌شده توسط بتن مسلح به‌طور موثر استفاده کرد. همچنین، می‌توان آن را در داخل به‌عنوان میلگرد تقویتی جایگزین فولاد معمولی در سازه بتن مسلح<sup>۲</sup> RC با توجه به مزایای آن، مانند، مقاومت در برابر خوردگی، نارسایی، نسبت مقاومت به وزن و وزن کم آن استفاده کرد. به‌تازگی، میلگردهای FRP در برخی از کشورها، مانند انگلستان، آلمان، کانادا و سوئیس استفاده شده است، در عرشه‌ی پل‌ها و جاده‌ها با توجه به استفاده فصلی از نمک یخ‌زدایی که باعث می‌شود آرماتورهای زنگ بزند. در عین حال، برخی از سازه‌های بتنی به مصالح نافلز به‌عنوان مصالح تشکیل‌دهنده نیاز دارند (مانند اتاق (MRI) در بیمارستان یا آزمایشگاه‌های تحقیقاتی، و همچنین جاده‌ها و عرشه پل در نزدیکی میدان‌ها عوارض الکترونیکی). در تمام این موارد خاص، میلگردهای FRP جایگزین خوبی برای میلگردهای فولادی معمولی در سازه‌های RC می‌باشد. اگرچه FRP دارای مزایای بسیاری به‌عنوان مصالح ساختمانی پذیرفته شده، ذاتاً شکل‌پذیری کمی دارد [۱].

بنابراین، در این تحقیق تیرهای ضعیف مسلح شده با میلگردهای FRP را با ورق‌های CFRP<sup>۳</sup> تقویت می‌شود، تا اثرات آن را روی بهبود ظرفیت خمشی (تا رسیدن به نمونه مرجع و تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون مانند مطالعات لوو و پام [۱]) بررسی گردد سپس نمونه‌ی GFRP تحت بار چرخه‌ای قرار داده شده تا از نظر شکل‌پذیری و مقاومت خمشی روی مقاطع مرجع، ضعیف، و مقطع بهسازی شده تحت بررسی قرار گیرند. در مطالعات لوو و پام [۱] از بار چرخه‌ای استفاده نشده بود که در این پژوهش اثرات ناشی از این بار در مقطع بهسازی شده نسبت به مقطع مرجع بررسی می‌شود و نتایج با حالت بار افزون مقایسه می‌گردد.

## ۲- سوابق مطالعاتی

بار اولیه فاکتور مهمی است که بر استحکام نهایی تیرهای RC تقویت شده با لمینیت‌های CFRP در سطوح مختلف بار افزون اثر گذار است. بهسازی به صورت خارجی با ورق CFRP، ظرفیت باربری تیر ضعیف را افزایش میدهد در حالیکه این بهسازی، تحت بارگذاری افزون، شکل‌پذیری تیرهای تقویت شده را کاهش خواهد داد [۲]. برای بهسازی برشی تیرهای ضعیف با ورق CFRP افزایش تعداد ورق (ضخامت) و متعاقباً کاهش پهنای نوار CFRP اثر کمی روی ظرفیت باربری نهایی و شکل‌پذیری تیرهای تقویت شده دارد بطوریکه ظرفیت برشی تیرها به‌طور خطی افزایش می‌یابد [۲]. مسائل عدم چسبندگی به‌عنوان یک مانع مهم در مقابل سطح گسترده استفاده از کامپوزیت‌های FRP در تقویت و مسلح‌سازی و بهسازی مقاطع ارایه شده است. تجدید نظر در مسائل عدم چسبندگی در آیین‌نامه‌های طراحی برای استفاده عمومی از تکنیک‌های چسباندن ضروری می‌باشد [۳]. تیرها بهسازی شده با لمینیت CFRP که از طریق اپوکسی چسبانده شده به علت تاثیر پوسته پوسته شدن و گسیخته شدن پیش از رسیدن به ظرفیت نهایی خمش خود تخریب میشوند در حالیکه تیرهایی که با لمینیت‌های CFRP تقویت شده و با اپوکسی چسبانده شده و بعلاوه با پرچ بسته شده، تا زمانی که لمینیت‌ها بیشترین ظرفیت کششی را دارا هستند ادامه می‌یابد و بار متحمل می‌شود [۳]. تفاوت

<sup>1</sup> Fiber Reinforcemet Polymer

<sup>2</sup> Reinforced Concrete

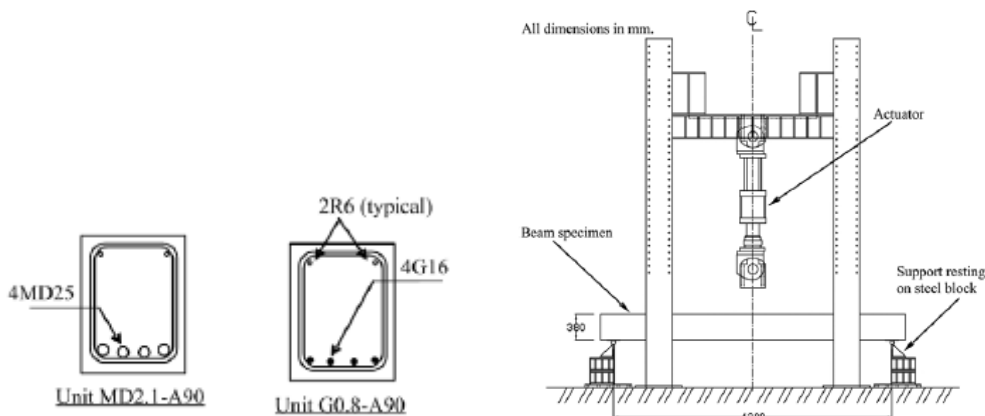
<sup>3</sup> Carbon Fiber Reinforcemet polymer



مشاهده شده در حالت‌های شکست بین معیار طراحی و مشاهدات تجربی تاکید می‌نماید که ضروری است تا مشخصات و مقادیر طراحی خمشی میلگرد FRP به خوبی تعریف شود تا به‌طور واقعی حالت شکست طراحی بدست آید [۴]. استفاده از ورق‌های FRP در تقویت تیرهای بتنی خیز تیرها را کاهش داده و ظرفیت باربری را در تیرها افزایش می‌دهد. ترک‌هایی که ایجاد می‌شوند کم بوده و حتی پخش هستند. بنابراین استفاده از لایه عمودی FRP می‌تواند به کاهش بیشتر خیز و افزایش ظرفیت باربری نهایی کمک نماید. وجود لایه‌های عمودی همچنین از گسیختگی خمشی جلوگیری می‌نماید. ظرفیت باربری نهایی تیرها می‌تواند با استفاده از ترکیب مناسبی از ورق‌های عمودی و افقی همراه با اپوکسی مناسب دوبرابر شود. گسترش و توسعه لایه عمودی در تمام محدوده تیر، ترک‌های قطری را کاهش داده به‌طوری که ورق طولی استفاده‌شده ظرفیت باربری را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [۴].

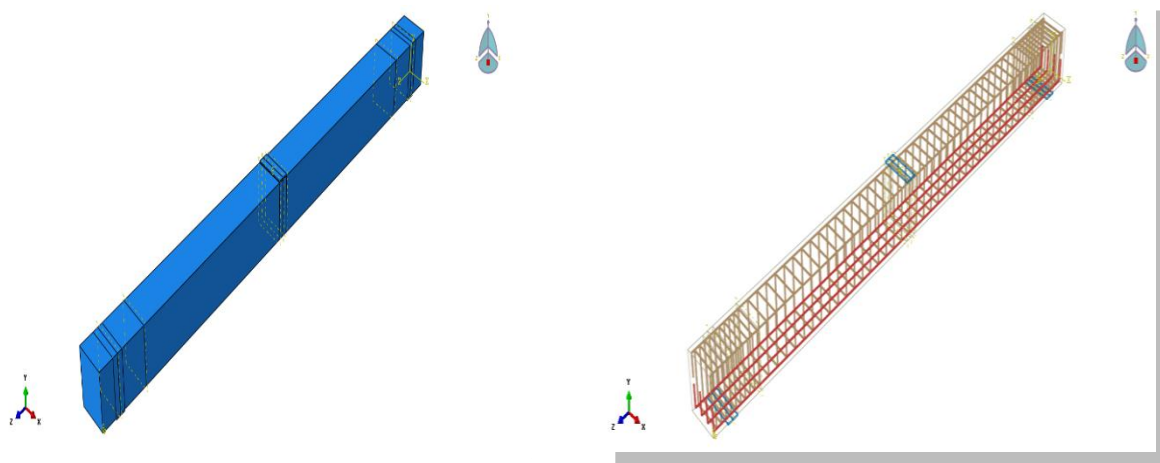
### ۳- صحت سنجی

برنامه ABAQUS یک برنامه قوی شبیه‌ساز مسائل مهندسی است که بر اساس روش المان محدود توانایی حل مسائل مختلف از ساده تا پیچیده غیر خطی را دارد. از این رو صحت سنجی مقاطع مسلح با میلگرد فولادی و FRP با استفاده از پژوهش لوو و پام (۲۰۱۰) انجام گرفت [۱] و جهت صحت سنجی ورق CFRP از مستوفی نژاد و مقدس (۲۰۱۴) [۵] که در این پژوهش مطالعه آزمایشگاهی بر روی تیرهای تقویت شده با ورق CFRP انجام گرفته است، استفاده شد. ابعاد و مشخصات در نظر گرفته شده دقیقاً مشابه با مقادیر مقالات بالا هستند. لازم به ذکر است که در مقالات مورد نظر تنها به ظرفیت فشاری بتن مورد استفاده اشاره شده است. این در حالی است که برای ساخت یک مدل صحیح در نرم‌افزار آباکوس باید پارامترهای زیادی تعریف گردد. این پارامترهای علاوه بر مواردی که به صورت تک هستند در دو مورد برای تعیین مقدار سخت‌شوندگی نیز باید به صورت جدول تعریف گردند تا بتوانند رفتار بتن را در سخت‌شوندگی به صورت صحیح مدل کرد. به‌منظور صحت سنجی نمونه‌های G0.8 و MD2.1 از پژوهش لوو و پام (۲۰۱۰) در نرم‌افزار ABAQUS [۶] همانطور که در شکل شماره (۱) مشاهده می‌شود مدل‌سازی شده و بارگذاری همانند پژوهش آزمایشگاهی انجام شده است. مصالح ورودی در نرم‌افزار بتنی با مقاومت فشاری ۳۶٫۶ مگا پاسکال که برای انجام مدل‌سازی در نرم‌افزار آن را بصورت concrete damage plasticity که بر طبق جداول (۱) تا (۵) در ادامه آورده می‌شود. میلگردهای GFRP و فولادی به ترتیب با مقاومت کششی ۵۹۳ و ۳۳۶ مگا پاسکال و مدول الاستیسیته ۴۰ و ۱۸۱ گیگا پاسکال و خاموت‌ها با مقاومت کششی ۲۵۰ مگا پاسکال در نرم‌افزار وارد شده و به صورت کنترل خیز و تحت تحلیل general static قرار گرفت و نتایج تحلیل در قالب نمودارهایی در شکل (۴) و (۵) نمایش داده می‌شود و نتایج تحلیل در جدول‌های (۶) و (۷) مورد بررسی قرار گرفت [۱]. المان مربوط به آرماتور فولادی به این شکل است که برای خاموتها از المان Truss و برای میلگردهای اصلی از المان Beam استفاده شده است. صحت هر دو المان برای مدل‌سازی میلگردهای فولادی در مقالات مختلف اثبات شده است.



شکل ۱: نمونه ها و نحوه بارگذاری آن در پژوهش آزمایشگاهی [۱].

صحت سنجی مدل عددی در این پژوهش با استفاده از پژوهش لوو و پام (۲۰۱۰) انجام شده است در این پژوهش مطالعه آزمایشگاهی بر روی تیرهای تقویت شده با میلگرد FRP انجام گرفته است. ابعاد و مشخصات در نظر گرفته شده دقیقاً مشابه با مقادیر پژوهش هستند. در این پژوهش به منظور هرچه دقیق تر شدن نتایج، مدل سازی با ابعاد موجود در واقعیت انجام پذیرفت. نمایی کلی از هندسه‌ی مدل ساخته شده در نرم افزار در شکل (۲) نمایش داده شده است. با توجه به شکل نمایش داده شده می توان بیان نمود که طول تیر برابر با ۴/۶ متر، ارتفاع تیر ۳۸ سانتی متر و پهناى سطح مقطع تیر برابر با ۲۸ سانتی متر انتخاب شده است. همچنین ابعاد خاموت‌های مورد استفاده برابر با ۲۴×۳۴ سانتی متر مربع در نظر گرفته شده است. در شکل (۲) نمایی از آرماتورهای قرار گرفته در داخل تیر بتنی نمونه عددی براساس نمونه آزمایشگاهی را به نمایش گذاشته است.



شکل ۲: نمایی از مدل ساخته شده در ABAQUS.



جدول ۱: مشخصات خاصیت پلاستیک بتن [۷].

Normal	Dilation Angle	Eccentricity	Fb0/fc0	K	Viscosity Parameter
	۳۱	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۷	.

جدول ۲: مقادیر تنش کرنش کششی بتن [۷].

Yield Stress	Cracking Strain
۳۶۶۰۰۰۰	.
۳۶۶۰۰	۰/۰۰۱۳

جدول ۳: مقادیر خرابی کششی [۷].

Damage Parameter	Cracking Strain
.	.
۰/۹۹	۰/۰۰۱۱

جدول ۴: مشخصات رفتار فشاری [۷].

Compressive Stress	Strain	Compressive Stress	Strain
۱۸۶۶۶۰۰۰	.	۳۶۲۳۴۰۰۰	۰/۰۰۰۹۹
۲۳۴۲۴۰۰۰	۰/۰۰۰۰۳	۳۵۱۳۶۰۰۰	۰/۰۰۱۲۳
۲۷۴۵۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۹	۳۳۳۰۶۰۰۰	۰/۰۰۱۴۹
۳۰۷۴۴۰۰۰	۰/۰۰۰۱۸	۳۰۷۴۴۰۰۰	۰/۰۰۱۷۸
۳۳۳۰۶۰۰۰	۰/۰۰۰۲۹	۲۷۴۵۰۰۰۰	۰/۰۰۲۰۹
۳۵۱۳۶۰۰۰	۰/۰۰۰۴۳	۲۳۴۲۴۰۰۰	۰/۰۰۲۴۳
۳۶۲۳۴۰۰۰	۰/۰۰۰۵۹	۱۸۶۶۶۰۰۰	۰/۰۰۲۸
۳۶۶۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۷۸	۱۳۱۷۶۰۰۰	۰/۰۰۳۱۹

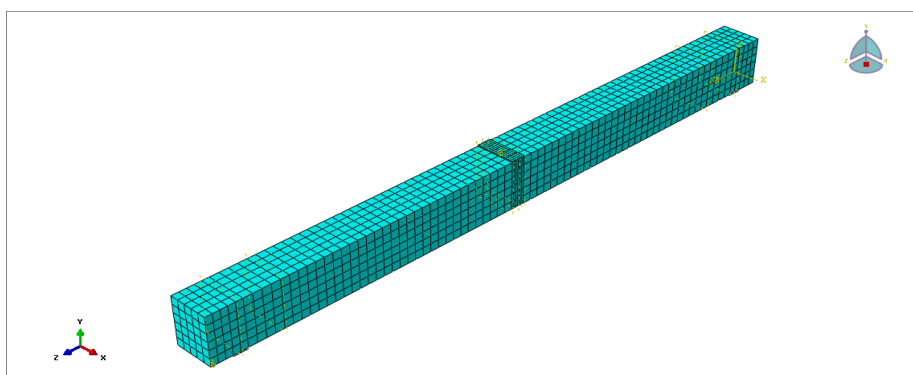
جدول ۵: مشخصات خرابی فشاری [۷].

inelastic strain shifted	COMPRESSIVE DAMAGE	inelastic strain shifted	COMPRESSIVE DAMAGE
.	.	۰/۰۰۰۹۹	۰/۰۱
۰/۰۰۰۰۳	.	۰/۰۰۱۲۳	۰/۰۴
۰/۰۰۰۰۹	.	۰/۰۰۱۴۹	۰/۰۹
۰/۰۰۰۱۸	.	۰/۰۰۱۷۸	۰/۱۶
۰/۰۰۰۲۹	.	۰/۰۰۲۰۹	۰/۲۵
۰/۰۰۰۴۳	.	۰/۰۰۲۴۳	۰/۳۶
۰/۰۰۰۵۹	.	۰/۰۰۲۸۰	۰/۴۹
۰/۰۰۰۷۸	.	۰/۰۰۳۱۹	۰/۶۴



### ۳-۱- شبکه بندی المان

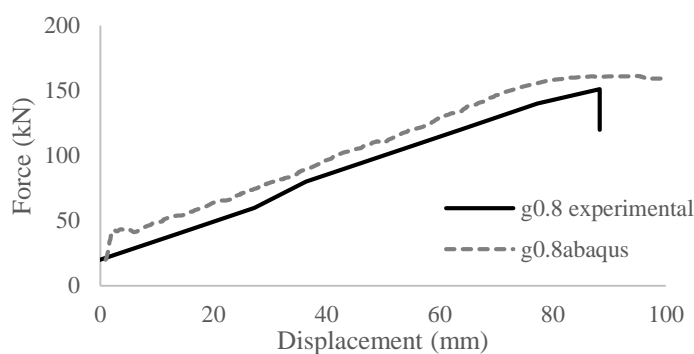
در تحلیل‌های سه بعدی معمولاً زمان لازم برای تحلیل مدل‌های ساخته شده یکی از پارامترهای تأثیر گذار است. در ابتدا برای کمینه کردن زمان لازم برای تحلیل مدل سازی، از بهینه‌ترین حالت برای کم کردن تعداد المان‌ها و نقاط مدل استفاده شد. از آنجایی که المان‌های موجود در این پژوهش به صورت المان تنش ۳ بعدی می‌باشند، المان‌هایی با ساختار منظم برای انجام تحلیل انتخاب می‌گردد. همچنین المان مورد نظر از نوع کاهش یافته بوده . همچنین برای میلگردها المان از نوع تیر و برای الیاف FRP از المان صفحه‌ای استفاده شده است. لازم به ذکر است تغییرات اندازه المان‌ها از ۳ تا ۶ میلیمتر در تمامی مدل‌های صحت سنجی لحاظ گردید که تغییراتی در شکل نمودارها ایجاد نگردید. (به شکل (۳) توجه شود)



شکل ۳: نمایش شبکه بندی برای مدل سازی تیر بتنی به همراه آرماتور GFRP .

### ۳-۲- نتیجه تحلیل مدل برای حالت میلگرد GFRP

در شکل (۴) نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی با هم مقایسه شده است. با توجه به این شکل تطابق بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد. که انحراف نقاط بین نمونه عددی و آزمایشگاهی در حالت گسیختگی و تسلیم در جدول (۶) آورده شده است.



شکل ۴: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی در حالت مسلح سازی با میلگرد [۱].

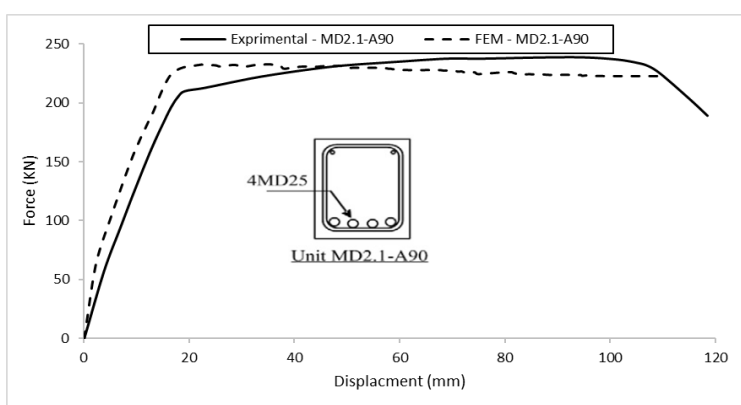


جدول ۶: انحراف نیروهای نقاط گسیختگی و تسلیم بین نمونه عددی و آزمایشگاهی.

نمونه	Fy (KN)	Fu (KN)	انحراف FY نسبت به نمونه آزمایشگاهی %	انحراف Fu نسبت به نمونه آزمایشگاهی %
G0.8 آزمایشگاهی	۱۵۰/۳۲	۱۵۱/۲۴	-	-
G0.8 عددی	۱۵۸/۵۷	۱۶۰/۸۱	۵/۵	۶/۳

۳-۳- نتیجه صحت سنجی مدل برای حالت میلگرد فولادی

نتیجه مقایسه مدل عددی و آزمایشگاهی در شکل (۵) مشاهده می‌شود. باتوجه به شکل (۵) اختلاف بین نتیجه مدل عددی و نتیجه آزمایشگاهی در جدول (۷) ارائه می‌گردد.



شکل ۵: مقایسه نتیجه عددی و آزمایشگاهی برای حالت تیر بتنی مسلح با میلگرد فولادی [۱].

جدول ۷: انحراف نیروهای نقاط گسیختگی و تسلیم بین نمونه عددی و آزمایشگاهی.

نمونه	Fy(KN)	Fu(KN)	انحراف FY %	انحراف Fu %
MD2.1 آزمایشگاهی	۲۱۰/۱۵	۲۲۳/۰۱	-	-
MD2.1 عددی	۲۳۰/۴۳	۲۲۳/۰۱	۹/۷	۰

۳-۴- صحت سنجی نرم افزار برای مدل عددی و مدل آزمایشگاهی CFRP

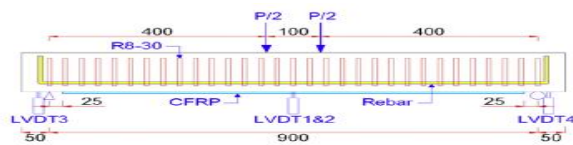
در مورد مدل‌های این بخش، لازم به ذکر است که بسیاری از شرایط مدل عددی برای بخش قبلی در مورد نوع حلگر و المانهای مش یکسان می‌باشد. در شکل (۶) هندسه ورق نشان داده شده است. هندسه مدلسازی مشابه شکل (۷) می‌باشد. خصوصیات مصالح CFRP با توجه به جدول (۸) برای نرم‌افزار معرفی خواهد شد. بارگذاری با توجه به شکل (۶) به صورت خمشی دوجانبه انجام می‌شود. مش بندی مطابق با شکل (۸) خواهد بود. المان‌های مش مطابق شرایط قبلی در نظر گرفته می‌شود. شکل (۹) نشان می‌دهد که تطابق بسیار خوبی بین نتیجه مدل عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. در نتیجه برای حالت تقویت تیر بتنی با مصالح CFRP نرم‌افزار با دقت بسیار خوبی تحلیل را انجام می‌دهد. انحراف نقطه نهایی در جدول (۹) ارائه می‌گردد.



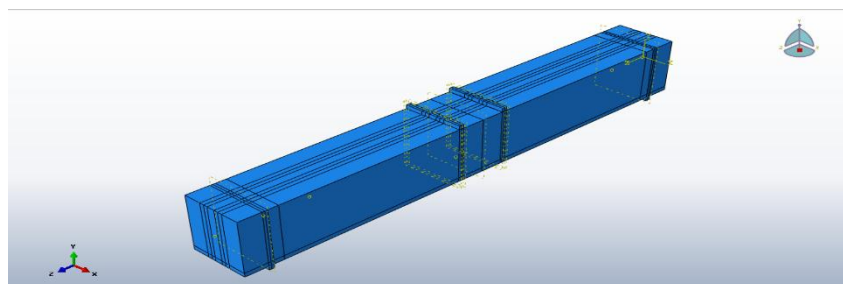


جدول ۸: مشخصات مصالح CFRP [۵].

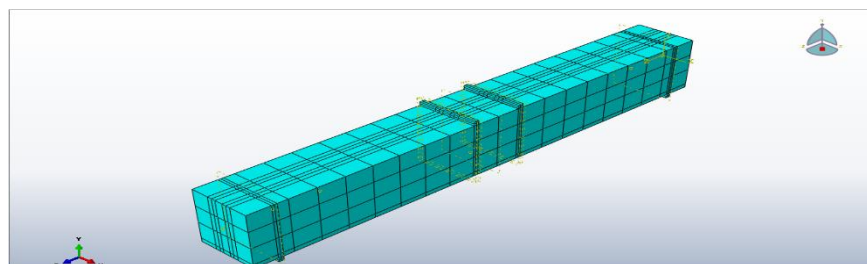
نوع	ضخامت	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش نهایی (%)
ورق CFRP	۰/۱۲	۴۱۰۰	۲۳۱	۱/۷



شکل ۶: هندسه مدل آزمایشگاهی برای حالت ورق CFRP [۵].



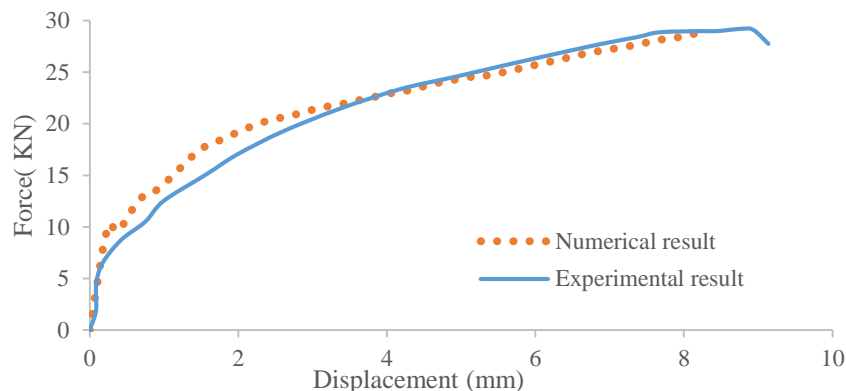
شکل ۷: مدل عددی برای ورق CFRP.



شکل ۸: مش بندی مدل برای مسلح سازی با ورق CFRP.

جدول ۹: انحراف نیروهای نقاط گسیختگی و تسلیم بین نمونه عددی و آزمایشگاهی.

نمونه	FU (KN)	انحراف Fu نسبت به نمونه آزمایشگاهی %
G0.8 آزمایشگاهی	۲۹/۱۹	-
G0.8 عددی	۲۸/۹۱	-۱



شکل ۹: مقایسه نتیجه مدل عددی و آزمایشگاهی.

#### ۴- مدلسازی نمونه‌های مورد مطالعه

با توجه به هدف مطرح شده ابتدا به طراحی نمونه‌های عددی می‌پردازیم تا بتوانیم بعد از تحلیل نمونه‌ها به بحث پیرامون اهداف اصلی شکل‌پذیری و مقاومت خمشی بپردازیم. با توجه به فصل ۸ آیین نامه ACI-440.1R-19 مدل‌های عددی به شرح جدول (۱۰) طراحی شده و در نرم اباکوس مدلسازی می‌گردد [۸].

جدول ۱۰: جزئیات نمونه‌های عددی مورد بررسی [۸].

GORUOP	unit	$\rho_{bf}$ OR $\rho_{bs}$ (%)	Af & As (mm <sup>2</sup> )	Balanced / under reinforcement	NUMBER OF REBAR	SIZE OF REBAR
	G0.8-reference	۰/۸۳	۸۰۴/۲۴۸	BALANCE	۴	۱۶
G	G0.6-weak	۰/۶۲	۶۰۳/۱۸۶	$\rho$ min	۳	۱۶
	G0.6-L-rehabilitated	۰/۶۲	۶۰۳/۱۸۶	$\rho$ min strengthen with CFRP laminate	۳	۱۶
	C0.2- reference	۰/۲۴	۲۳۵/۶۲	BALANCE	۳	۱۰
C	C0.15-weak	۰/۱۶	۱۵۷/۰۸	$\rho$ min	۲	۱۰
	C0.15-L-rehabilitated	۰/۱۶	۱۵۷/۰۸	$\rho$ min strengthen with CFRP laminate	۲	۱۰
	A0.5- reference	۰/۴۷	۴۵۲/۳۸۸	BALANCE	۴	۱۲
A	A0.35-weak	۰/۳۵	۳۳۹/۲۹۱	$\rho$ min	۳	۱۲
	A0.35-L-rehabilitated	۰/۳۵	۳۳۹/۲۹۱	$\rho$ min strengthen with CFRP laminate	۳	۱۲
	S2.3- reference	۲/۳	۲۴۶۳	BALANCE	۴	۲۸
S	S1.15-weak	۱/۱۵	۱۲۳/۱۵	$\rho$ min	۳	۲۵
	S1.15-L-rehabilitated	۱/۱۵	۱۲۳/۱۵	$\rho$ min strengthen with CFRP laminate	۳	۲۵



که در جدول (۱۰) اسامی که بر روی نمونه‌ها گذاشته شده بر اساس توضیحات ذیل می‌باشد:

GX نشان دهنده GFRP آرماتورهای طولی در نظر گرفته شده، از سطح مقطع مؤثر (BD) که در آن B پهنا و D عمق مؤثر است. به‌عنوان مثال، G0.8 به معنی میلگرد GFRP به مقدار ۰.۸ درصد مقطع مؤثر است.

CX نشان دهنده CFRP آرماتورهای طولی در نظر گرفته شده است.

AX نشان دهنده AFRP آرماتورهای طولی در نظر گرفته شده است.

SX نشان دهنده STEEL آرماتورهای طولی در نظر گرفته شده است.

در نمونه‌هایی که حرف L مشاهده می‌شود از ورق‌های CFRP برای تقویت خمشی عضو استفاده شده است.

#### ۴-۱- بررسی نمونه‌های طراحی شده

مدل‌ها در ۴ گروه تقسیم شدند و در دو بخش بار افزون و بار چرخه‌ای به بررسی نتایج حاصله پرداخته شده است. به‌طوریکه نمونه‌هایی که آرماتورهای که جنس یکسانی دارند در یک گروه قرار گرفتند. در این مقطع می‌خواهیم بررسی کنیم که جنس الیاف FRP چگونه در مقاومت خمشی و شکل‌پذیری مقاطع تأثیر دارد:

#### ۴-۱-۱- بررسی مقاومت خمشی تحت بار افزون

باتوجه به جدول (۱۲) مقادیر مقاومت خمشی بدست آمده از نرم‌افزار ۱/۲ تا ۱/۸ برابر مقاومت خمشی اسمی بدست آمده طبق روابط آیین نامه ACI-440.1R-19 می‌باشد که حاکی از آنست که روابط آیین نامه در تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های تقویت شده با FRP دارای حاشیه اطمینان مناسبی است. حال به بررسی مقاومت خمشی نمونه‌های مرجع هر گروه (نمونه‌های بالانس) می‌پردازیم مشاهده می‌شود میلگرد فولادی ظرفیت خمشی بالاتری نسبت به میلگردهای اف اربی دارد بطوریکه مقاومت خمشی مقطع فولادی در حالات بالانس نسبت به مقاومت خمشی مقطع FRP مسلح شده در همین حالت حدود ۷۸ الی ۱۱۰ درصد بیشتر می‌باشد حتی نمونه S1.15 که نمونه ضعیف تقویت شده‌ی گروه میلگردهای فولادی است مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه تقویت شده با میلگردهای FRP داراست (حدود ۱۶ الی ۳۶ درصد). با مقایسه مقاومت خمشی در گروه مقطع مسلح با فولاد بهتر است آیین نامه در ضرایب خود تجدید نظر کند تا بطرح اقتصادی‌تری دست پیدا کنیم. در بررسی مقطع مسلح با میلگردهای FRP می‌پردازیم، مقاومت خمشی مقطع مسلح با AFRP در حالت بالانس در مقایسه با مقطع مسلح با GFRP و CFRP در حالت بالانس به ترتیب ۱۸ و ۸ درصد بیشتر می‌باشد این در حالیست که مقاومت کششی نهایی میلگرد AFRP حدوداً نصف میلگرد CFRP می‌باشد و این حاکی از آن است که استفاده از میلگرد AFRP با توجه به مقاومت کششی پایین‌تری که از میلگرد CFRP دارد در بهبود ظرفیت خمشی مقطع کمک شایان به‌ذکری دارد.

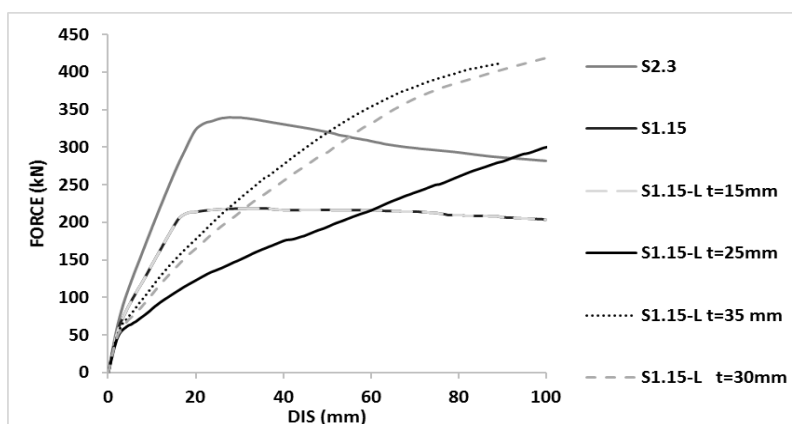
برای رساندن ظرفیت خمشی مقاطع ضعیف به مقطع بالانس با سعی و خطا ضخامت ورق CFRP برای رسیدن به مقاومت نهایی نمونه‌های ضعیف به نمونه مرجع تعیین شده است که به‌عنوان نمونه در شکل (10) نمودار این سعی و خطا در گروه فولادی آورده شده است. حال به بررسی مقاطعی که آنها را با ورق CFRP تقویت کردیم و ضخامت ورق CFRP را تا رسیدن به مقاومت خمشی نمونه مرجع رساندیم و در جدول (۱۱) لیست کردیم می‌پردازیم که ظرفیت خمشی از مقطع بالانس بیشتر شده در حالی که شکل‌پذیری آن تغییر چندانی نکرده که این ظرفیت حدود ۴ الی ۲۲ درصد مقطع تقویت شده است که حاکی بر این است که ورق باعث افزایش ظرفیت خمشی شده. این تغییر مقاومت خمشی با ضخامت ورق CFRP (۴ mm) برای نمونه C0.15-L، ضخامت (۳ mm) برای A0.35-L، برای G0.6-L ضخامت (۴ mm) و برای S1.15-L ضخامت (۳۵ mm) حاصل شده این در



حالیست که در مقطع مسلح با میلگرد AFRP, GFRP ضخامت کمتری مصرف شده تا تیر تقویت گردد در حالی که مقطع مسلح با CFRP ضخامت بیشتری نسبت به آن دو برده با توجه به اینکه با ورقی از جنس خودش تقویت شده. اما در میلگرد فولادی برای اینکه بتوان ظرفیت خمشی تیر را به حد ظرفیت خمشی نمونه بالانس برسانیم باید انقدر ضخامت ورق را زیاد کنیم تا سختی نمونه ضعیف به سختی نمونه بالانس برسد و این عمل باعث کاهش شکل پذیری مقطع می شود.

جدول ۱۱: ضخامت ورق ضخامت ورق جهت رساندن مقاومت خمشی نمونه ضعیف به نمونه مرجع.

نام نمونه ضعیف	ضخامت ورق (mm)
G0.6	۴
C0.15	۴
A0.35	۳
S1.15	۳۵



شکل ۱۰: نمودار نیرو- تغییر مکان سعی خطا جهت تعیین ضخامت ورق CFRP.



جدول ۱۲: ظرفیت خمشی مقاطع [۷].

گروه	نام نمونه	مقاومت خمشی نمونه (Mexp (KN.m))	مقاومت خمشی اسمی (Mn (KN.m))	نسبت مقاومت (Mexp/Mn)
GFRP	G0.8	۱۶۹/۲	۱۴۰/۰۸	۱/۲۱
	G0.6	۱۳۱/۷۹	۱۰۷/۸۸	۱/۲۲
	G0.6-L	۱۹۱/۰۹	۱۶۰/۷۷	۱/۱۹
CFRP	C0.2	۱۸۳/۹۴	۱۵۲/۵۸	۱/۲۱
	C0.15	۱۲۷/۶۷	۱۰۶/۴۸	۱/۲
	C0.15-L	۲۰۴/۴۷	۱۶۹/۰۷	۱/۲۱
AFRP	A0.5	۱۹۹/۱	۱۵۵/۶۱	۱/۲۸
	A0.35	۱۵۳/۴	۱۲۸/۱	۱/۲
	A0.35-L	۲۰۸/۲۴	۱۸۸/۹۹	۱/۱
STEEL	S2.3	۳۵۶/۴۷	۲۱۹/۰۲	۱/۶۳
	S1.15	۲۳۰/۲۷	۱۲۸/۶۴	۱/۷۹
	S1.15-L	۴۳۲/۳۸	۳۱۱/۵۵	۱/۳۹

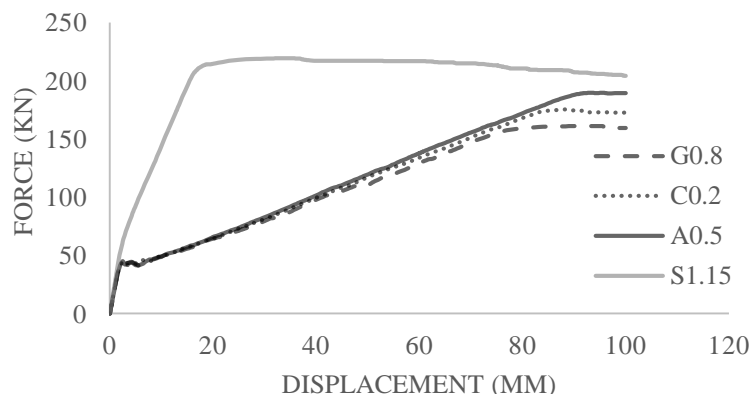
۴-۱-۲- بررسی شکل پذیری تحت بار افزون

۴-۱-۲-۱- مقایسه شکل پذیری نمونه مرجع (مقاطع بالانس) مسلح با میلگرد FRP با مقطع ضعیف فولادی

با توجه به شکل (۱۱) و جدول شماره (۱۳) به بررسی شکل پذیری مقاطع مرجع (بالانس) می پردازیم. هر چند نمونه S1.15 به عنوان تیر ضعیف تقویت شده است به این دلیل استفاده شده است که مقاومت خمشی در حدود مقاومت خمشی نمونه های مرجع تیرهای تقویت شده با میلگردهای FRP دارد. تیر G0.8 در بین تیرهای که با میلگرد FRP تقویت شده شکل پذیری حدود ۷/۱ الی ۱۵/۳ درصد نسبت به تیر A0.5 و C0.2 این در حالی است که مقاومت CFRP و AFRP به ترتیب ۳/۷۵ و ۲/۱۲ مقاومت GFRP می باشد. نمونه فولادی ضعیف تقویت شده دارای شکل پذیری ۲/۷ برابر نمونه G0.8 می باشد این در حالیست که مقاومت خمشی و مقاومت کششی تقریباً یکسانی دارند.

جدول ۱۳: شکل پذیری مقاطع مرجع.

گروه	نام نمونه	تغییر مکان تسلیم (mm)	تغییر مکان نهایی (mm)	پارامتر شکل پذیری (μ)	نسبت تغییر مکان نهایی (Δu / L)
GFRP	G0.8	۶۲/۸۷	۹۴/۸۷	۱/۵۱	۰/۰۲۳
CFRP	C0.2	۶۷/۰۲	۸۸/۰۳	۱/۳۱	۰/۰۲۱
AFRP	A0.5	۶۶/۲	۹۳/۴۸	۱/۴۱	۰/۰۲۲
STEEL	S1.15	۸/۳۲	۱۰۰	۶/۴۱	۰/۰۲۴



شکل ۱۱: نمودار نیرو- تغییر مکان مقاطع مرجع.

در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری و شکل‌پذیری مقطع فولادی ضعیف بیشتر از مقاطع FRP می‌باشد در نتیجه اگر مقطعی جز مقطع فولادی بخواهیم در نظر بگیریم بهتر است از میلگرد GFRP استفاده شود چون در عین مقاومت کششی پایین شکل‌پذیری بهتری نسبت به CFRP و AFRP دارد. طبق جدول (۱۳) با بررسی شکل‌پذیری نهایی نمونه‌های مرجع رنج تغییرات در میلگردهای FRP بسیار نزدیک به هم بوده و شکل‌پذیری نهایی نزدیک به همی دارند.

#### ۲-۴- بررسی مقاومت خمشی و شکل‌پذیری مقاطع ضعیف، بالانس و تقویت شده در هر گروه

در تمامی نمودارها سختی اولیه نمودار تا ۴۰ کیلو نیوتن ناشی از سختی بتن می‌باشد و در ادامه سختی با سختی متریال FRP تأمین می‌گردد بنابراین برای بدست آوردن پارامترهای شکل‌پذیری از قسمت دوم نمودار استفاده می‌کنیم. به صورتی که تغییر مکان تسلیم در  $0.75 P_n$  و تغییر مکان نهایی در  $0.8 P_{exp}$  بدست آمده است. (که  $P_n$  نیروی نهایی اسمی و  $P_{exp}$  نیروی‌های خروجی از نرم‌افزار است) حال باتوجه به مطالب فوق، نمودارها و جداول زیر استخراج گردید که در ذیل به بررسی پارامترهای مد نظر می‌پردازیم:

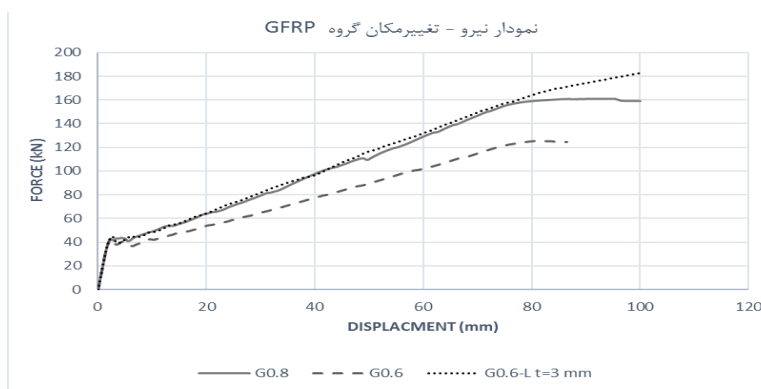
#### ۲-۴-۱- بررسی مقاومت خمشی و شکل‌پذیری گروه GFRP

باتوجه به جدول (۱۴) و شکل (۱۲) مشاهده می‌شود نمونه G0.6 (تیر ضعیف) شکل‌پذیری حدود ۳ درصد از نمونه بالانس کمتر است در حالیکه شکل‌پذیری نهایی تیر G0.8 ۶۴ درصد بالاتر از تیر ضعیف است که بیانگر این موضوع است که مقطع در حالت بالانس تغییر مکان بیشتری را نسبت به مقطع ضعیف تحمل می‌کند و این در حالیست که شکل‌پذیری تقریباً یکسانی دارند. حال تیر G0.6 را با ورق CFRP تقویت نموده این تقویت به گونه‌ای انجام گردید که با یک ورق ۳ میلیمتری مقاومت خمشی نهایی آن را به مقطع بالانس نزدیک کردیم این امر موجب شد تا شکل‌پذیری مقطع حدود ۱۰ درصد از مقطع G0.6 و ۷ درصد از مقطع G0.8 بیشتر شود. که این امر بیانگر این است تقویت تیر GFRP با ورق CFRP امکان‌پذیر است زیرا نه باعث کاهش شکل‌پذیری شده در عین حال باعث افزایش ظرفیت خمشی حدود ۱۳ درصدی گردیده است.



جدول ۱۴: شکل پذیری و مقاومت خمشی مقاطع گروه GFRP.

نام نمونه	مقاومت خمشی نهایی (KN.M)	تغییر مکان تسلیم (mm)	تغییر مکان نهایی (mm)	پارامتر شکل پذیری (μ)	نسبت تغییر مکان نهایی (Δu / L)
G0.8	۱۶۹/۲	۶۲/۸۷	۹۴/۸۷	۱/۵۱	۰/۰۲۳
G0.6	۱۳۱/۷۹	۳۹/۵۴	۵۸/۱۸	۱/۴۷	۰/۰۱۴
G0.6-L t=3mm	۱۹۱/۹	۴۱/۶۴	۶۷/۵۹	۱/۶۲	۰/۰۱۶



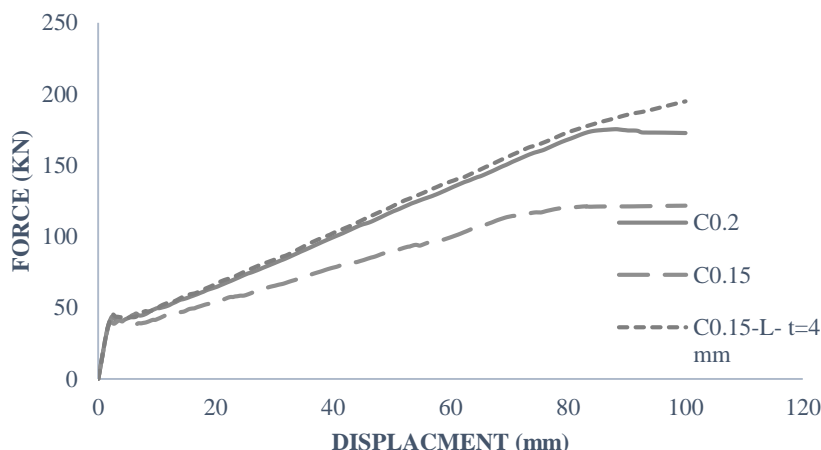
شکل ۱۲: نمودار نیرو - تغییر مکان گروه GFRP.

#### ۲-۲-۴- بررسی مقاومت خمشی و شکل پذیری گروه CFRP

با توجه به جدول (۱۵) و شکل (۱۳) مشاهده می‌شود نمونه بالانس C0.2 شکل پذیری حدود ۱۵ درصد کمتر نسبت نمونه ضعیف C0.15 دارد این در حالی است که شکل پذیری نهایی نمونه C0.15 حدود ۵۰ درصد کمتر از نمونه C0.2 است. در تیرهای گروه CFRP در مقطع بالانس شکل پذیری کمتری دارند و این به دلیل رفتار ترد آرماتور فیبر کربن می‌باشد در تقویت تیر C0.15 تا رسیدن به مقاومت نهایی تیر C0.2 از ورق ۴ میلیمتری CFRP استفاده شد که موجب افزایش ۲۱ درصدی نسبت مقطع بالانس گردیده. پس اگر درصد آرماتور CFRP بیشتر شود در مقطع شکل پذیری را کاهش می‌دهد ولی با نصب ورق شکل پذیری افزایش یافته در عین حال مقاومت خمشی نیز افزایش ۱۱ درصدی دارد. اضافه کردن ورق CFRP با اینکه شکل پذیری مقطع را افزایش داده اما در شکل پذیری نهایی مقطع حدود ۲۴ درصد کاهش دارد.

جدول ۱۵: شکل پذیری و مقاومت خمشی مقاطع گروه CFRP.

نام نمونه	مقاومت خمشی نهایی (KN.M)	تغییر مکان تسلیم (mm)	تغییر مکان نهایی (mm)	پارامتر شکل پذیری (μ)	نسبت تغییر مکان نهایی (Δu / L)
C0.2	۱۸۳/۹۴	۶۷/۰۲	۸۸/۰۳	۱/۳۱	۰/۰۲۱
C0.15	۱۲۷/۶۷	۳۸/۳۷	۵۸/۰۴	۱/۵۱	۰/۰۱۴
C0.15-L t=4mm	۲۰۴/۴۷	۴۳/۷۵	۶۹/۷۵	۱/۵۹	۰/۰۱۷



شکل ۱۳: نمودار نیرو - تغییر مکان گروه CFRP.

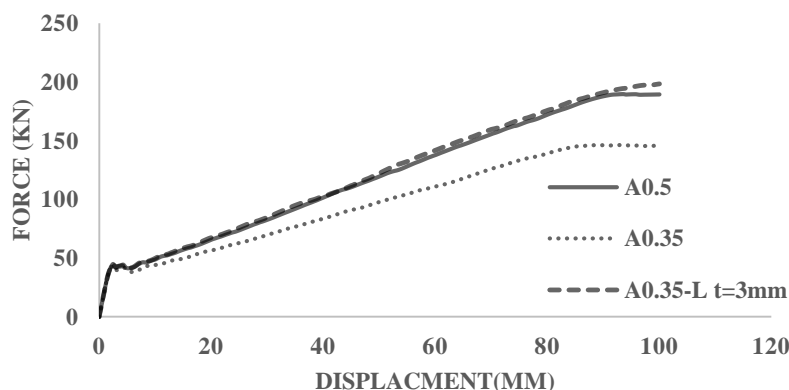
#### ۲-۴-۳- بررسی مقاومت خمشی و شکل پذیری گروه CFRP

باتوجه به جدول جدول (۱۶) و شکل (۱۴) بین نمونه بالانس A0.5 و نمونه ضعیف A0.35 شکل پذیری یکسان می باشد یعنی آرماتور AFRP چه در حالت بالانس چه در حالت ضعیف شده شکل پذیری یکسانی دارند. ولی در شکل پذیری نهایی دو نمونه متفاوت رفتار کرده به طوری که شکل پذیری نهایی نمونه A0.5 حدود ۴۷ درصد بیشتر از نمونه ضعیف می باشد. در حالیکه مقاومت خمشی نهایی این نمونه ۳۰ درصد از نمونه ضعیف بیشتر است. حال نمونه ضعیف را با ورق ۳ میلیمتری CFRP تقویت می کنیم تا به مقاومت نهایی حدود ۴/۵ درصدی مقاومت نمونه بالانس برسد در این حالت شکل پذیری مقطع تقویت شده ۱۰ درصد از حالت بالانس و ضعیف افزایش پیدا کرده و مقاومت نهایی آن ۱۳ درصد از نمونه ضعیف بیشتر و ۳۰ درصد از نمونه بالانس کمتر است. بنابراین نتیجه می گیریم میلگرد AFRP در حالت بالانس و ضعیف در پارامتر شکل پذیری تأثیری نداشته و تنها مقاومت خمشی و نسبت تغییر مکان نهایی را افزایش می دهد.

جدول ۱۶: شکل پذیری و مقاومت خمشی مقاطع گروه CFRP.

نام نمونه	مقاومت خمشی نهایی (KN.M)	تغییر مکان تسلیم (mm)	تغییر مکان نهایی (mm)	پارامتر شکل پذیری ( $\mu$ )	نسبت تغییر مکان نهایی ( $\Delta u / L$ )
A0.5	۱۹۹/۱	۶۶/۲	۹۳/۴۸	۱/۴۱	۰/۰۲۲
A0.35	۱۵۳/۴	۴۵/۷	۶۴/۵	۱/۴۱	۰/۰۱۵
A0.35-L- t=3mm	۲۰۸/۲۴	۴۴/۸۶	۶۹/۳۳	۱/۵۵	۰/۰۱۷





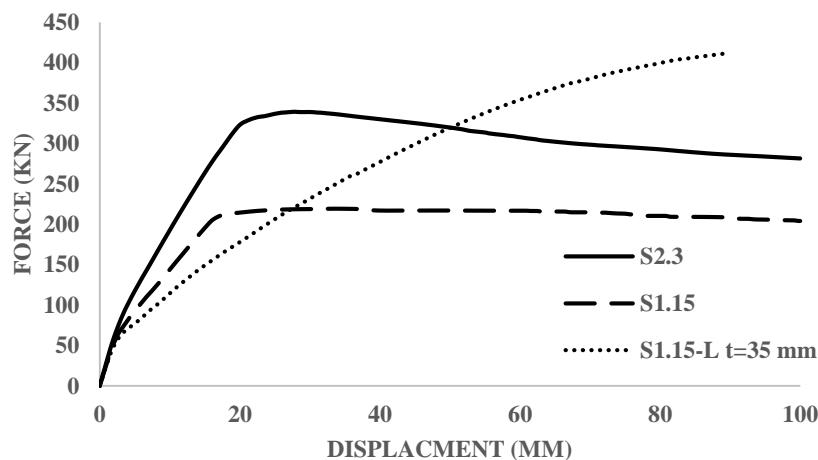
شکل ۱۴: نمودار نیرو - تغییر مکان مکان گروه AFRP .

#### ۴-۲-۴- بررسی مقاومت خمشی و شکل پذیری گروه STEEL

باتوجه به جدول (۱۷) و شکل (۱۵) نمونه بالانس S2.3 شکل پذیری کمتری نسبت به نمونه ضعیف فولادی دارد این امر به دلیل استفاده بیش از اندازه میلگرد فولادی باعث تردی مقطع شده و در نتیجه شکل پذیری ۸۸ درصد کمتر از نمونه بالانس می باشد در مقایسه بعدی پارامتر شکل پذیری کاهش یافته بدلیل این می باشد تا جبران ۵۴ درصدی مقاومت خمشی تا رسیدن به مقاومت خمشی ۳۵۶ کیلو نیوتنی جبران گردد این موضوع در حالیکه تغییر مکان نهایی اعضا بالانس و ضعیف برابر بوده. حال نمونه ضعیف را با ورقی به ضخامت ۳۵ میلیمتر تقویت کردیم تا مقاومت و سختی اولیه نمونه تقویتی به مقاومت و سختی نمونه بالانس برسد که موجب گردید ضخامت ورق CFRP ۱۰ در نمونه تقویت شده فولادی برابر حالت میلگردهای FRP گردد. با نصب ورق CFRP نسبت تغییر مکان نهایی تقریباً ۱۴ درصد حالات بالانس کاهش می یابد و پارامتر شکل پذیری آن نسبت به مقطع ضعیف ۴/۲۵ برابر کاهش و نسبت به مقطع بالانس ۲/۲۷ برابر درصد افزایش این در حالیکه مقاومت خمشی ۲۱ درصد مقطع بالانس و ۸۷ درصد مقطع ضعیف می باشد. در نتیجه در مقطع فولادی نباید بیش از حد آرماتور فولادی مصرف کرد باعث کاهش شکل پذیری می شود و تقویت میلگرد فولادی با ورق CFRP علاوه بر غیر اقتصادی بودن باعث کاهش شکل پذیری شده درعین حال حد نهایی بار و تغییر مکان را بالا برده و موجب افزایش مقاومت خمشی می گردد.

جدول ۱۷: شکل پذیری و مقاومت خمشی مقاطع گروه STEEL.

نام نمونه	مقاومت خمشی نهایی (KN.M)	تغییر مکان تسلیم (mm)	تغییر مکان نهایی (mm)	پارامتر شکل پذیری (μ)	نسبت تغییر مکان نهایی (Δu / L)
S2.3	۳۵۶/۴۷	۱۵/۵۹	۱۰۰	۶/۴۱	۰/۰۲۴
S1.15	۲۳۰/۲۷	۸/۳۲	۱۰۰	۱۲/۰۲	۰/۰۲۴
S1.15-L t=35mm	۴۳۲/۳۸	۳۱/۷۱	۸۹/۶۷	۲/۸۳	۰/۰۲۱



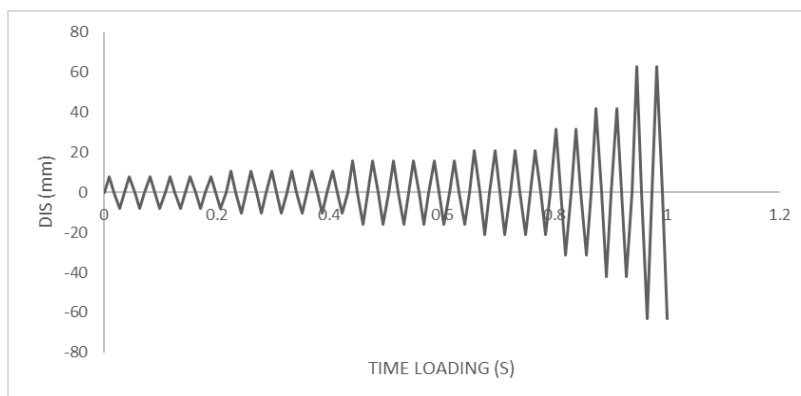
شکل ۱۵: نمودار نیرو - تغییر مکان مکان گروه STEEL.

## ۳-۴- بررسی گروه GFRP تحت بار متناوب

در بخش قبلی تیرها در وسط دهانه به صورت افزون تحت بار متمرکز قرار گرفته شد و نمودار نیرو - خیز تیرها را رسم شده است. حال تیرهای مسلح شده با میلگرد GFRP طبق جدول (۱۸) و شکل (۱۶) تحت بار متناوب SAC قرار داده شد تا عملکرد تیرها تحت بار متناوب نیز بررسی گردد [۹].

جدول ۱۸: جزئیات بار تناوبی اعمالی به نمونه‌ها طبق استاندارد [۸].

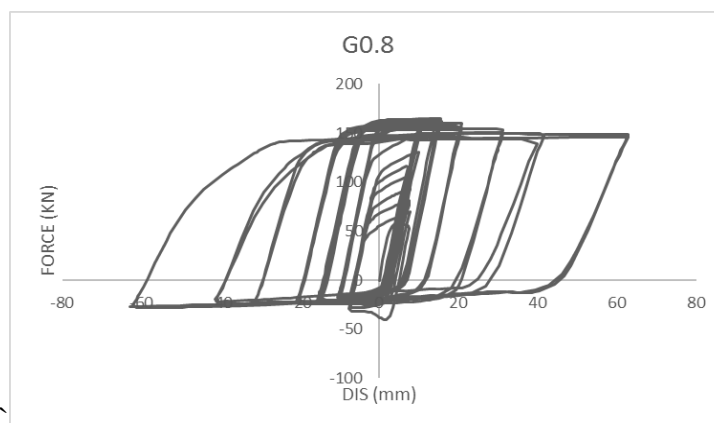
گام بارگذاری	زاویه دوران $\theta$ (rad)	تعداد سیکل‌ها	تغییر مکان اعمالی به وسط تیر (cm)
۱	۰/۰۰۳۷۵	۶	۷/۸۷۵
۲	۰/۰۰۵	۶	۱۰/۵
۳	۰/۰۰۷۵	۶	۱۵/۷۵
۴	۱/۰۱	۴	۲۱
۵	۰/۰۱۵	۲	۳۱/۵
۶	۰/۰۲	۲	۴۲
۷	۰/۰۳	۲	۶۳



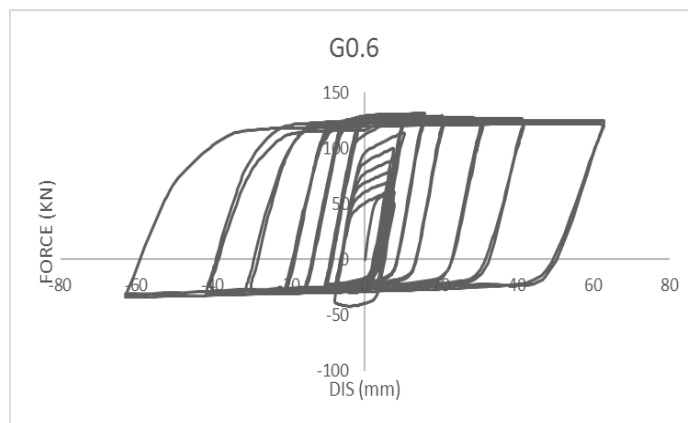
شکل ۱۶: بار تناوبی استاندارد SAC و نحوه اعمال آن به نمونه‌ها [۸].

#### ۳-۴-۱- بررسی نتایج بعد از اعمال بار چرخه‌ای طبق استاندارد SAC

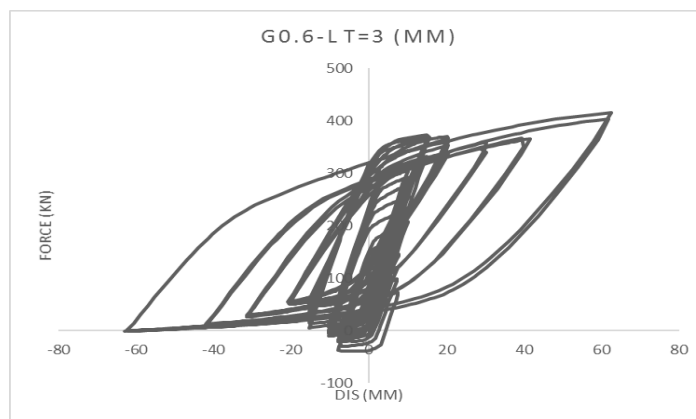
بار چرخه‌ای طبق استاندارد SAC در نرم‌افزار اباکوس به صورت Tabular به نمونه‌ها وارد شده و نتایج در قالب نمودارهای هیستریزیس و نمودار انرژی مستهلک شده در طی سیکل بارگذاری و جداولی شامل سختی اولیه، شکل‌پذیری که با استفاده از نرم‌افزار MATLAB از نمودار پوش آور حاصل از نمودار هیستریزیس به صورت دو خطی ارائه می‌گردد. در ذیل جهت بررسی آورده شده است:



شکل ۱۷: نمودار هیستریزیس تیر G0.8 (مقطع بالانس).



شکل ۱۸: نمودار هیستریزیس تیر G0.6 (مقطع ضعیف).



شکل ۱۹: نمودار هیستریزیس تیر (مقطع ضعیف تقویت شده با دو ورق CFRP) G0.6-l t=3 (mm).

در نمودارهای هیستریزیس بالا مشاهده شده است که تحت بار گذاری ذکر شده در بالا، نمونه‌های مورد نظر در تغییر مکان‌های یکسان اعمالی رفتارهای متمایزی نسبت به یکدیگر دارند. نمونه بالانس در تغییر مکانی ۱۴ میلی متری ظرفیت باربری حدود ۱۶۵ کیلونیوتون دارد که بیشترین ظرفیت باربری نمونه بالانس محسوب می‌شود. نمونه ضعیف در نقطه‌ای که ظرفیت باربری آن به ماکسیمم رسید (حدود ۱۳۲ کیلو نیوتن) تغییر مکان حدوداً ۱۴ میلیمتری داشته و نمونه‌ی تقویت شده با ورق ۳ میلیمتری CFRP در تغییر مکان حدود ۱۴ میلیمتری ظرفیت باربری حدوداً ۳۵۴ کیلونیوتنی از توضیحات و نمودار بالا می‌توان دریافت که در یک تغییر مکان یکسان ظرفیت نمونه تقویت شده با ورق حدود ۲ برابر نمونه بالانس می‌تواند باشد که این امر خود بیانگر این است که تقویت مقطع مسلح شده با میلگرد GFRP به وسیله ورق CFRP ظرفیت باربری و همچنین سختی مقطع را نیز بالا برده زیرا در تغییر مکان‌های یکسان مقطع تقویت شده از تمامی مقاطع بیشتر می‌باشد. حال برای بررسی دقیق‌تر این موضوع تمامی نقاط ماکسیمم نمودار هیستریزیس تمامی نمونه‌ها را در هر چرخه به هم متصل شد و در نرم‌افزار MATLAB به نمودار به صورت دو خطی ترسیم شده و جدول زیر از آن استخراج شده است:

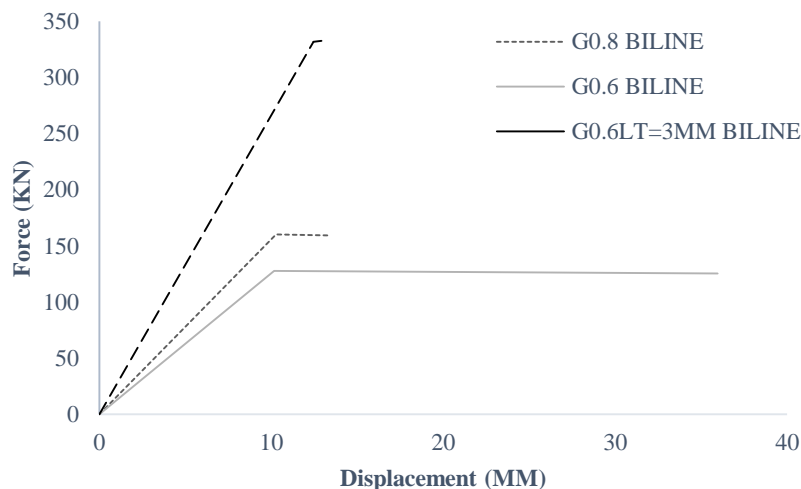
جدول ۱۹: نتایج حاصل از دو خطی کردن نمودارهای هیستریزیس.

نام نمونه	DELTA Y (mm)	FY (KN)	DELTA U (mm)	FU (KN)	K1	K2
G0.8	۱۰/۲۸	۱۶۰/۲۷	۱۳/۲۸	۱۵۹/۴۹	۱۵/۵۹	-۰/۰۲۶
G0.6	۱۰/۱۷	۱۲۷/۸۸	۳۵/۹۵	۱۲۵/۵۶	۱۲/۵۷	-۰/۰۹
G0.6 L (T=3mm)	۱۲/۴۵	۳۳۱/۹	۱۲/۹۲	۳۳۲/۶۸	۲۶/۶۵	۱/۶۷

در جدول (۱۹) DELTA Y و DELTA U به ترتیب تغییر مکان نقطه تسلیم و تغییر مکان نهایی، FY و FU به ظرفیت باربری نقطه تسلیم و نهایی، K1 و K2 به ترتیب سختی اولیه و سختی نهایی نمونه‌های گروه GFRP که تحت بار چرخه‌ای قرار گرفته‌اند می‌باشند. با توجه به این جدول نمونه ضعیف G0.6 در تغییر مکان یکسان حدود ۱۰ میلیمتری مشابه نمونه بالانس به تسلیم می‌رسد. این در حالیست که ظرفیت باربری نمونه ضعیف ۲۵ درصد نمونه بالانس در نقطه تسلیم می‌باشد. حال نمونه ضعیف را با ورق CFRP تقویت نموده و به نمونه G0.6 L (T=3 mm) می‌رسیم این نمونه با تغییر مکان حدود ۲۲ درصدی بیشتر از نمونه بالانس و نمونه ضعیف، در نقطه تسلیم به ظرفیت باربری حدود ۲ برابر نسبت به ظرفیت نمونه بالانس می‌رسد. سختی اولیه نمونه‌های بالانس ۲۴ درصد نمونه ضعیف می‌باشد که با تقویت نمونه ضعیف با ورق CFRP سختی اولیه نمونه تقویت شده به ۷۱

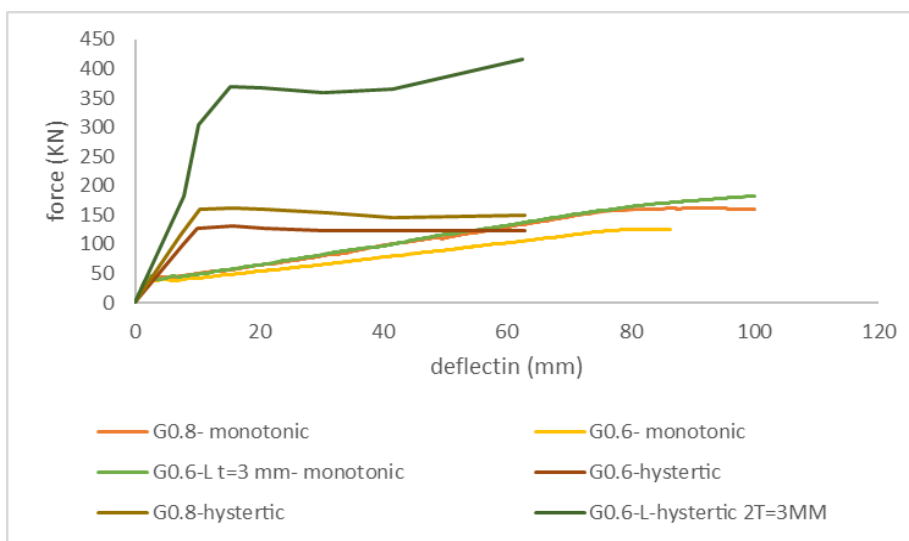


درصد سختی اولیه نمونه بالانس می‌رسد. باتوجه به شکل (۲۰) و جدول (۱۹) اضافه کردن میلگرد GFRP در ناحیه دوم نمودار موجب شده که تغییر مکان نهایی مقطع بالانس و مقطع تقویت شده با ورق به شدت کاهش یابد طوری که تغییر مکان نهایی نمونه تقویت شده با ورق با تغییر مکان تسلیم تقریباً برابر شده است که این امر حاکی بر ترد شدن مقطع توسط ورق CFRP است.



شکل ۲۰: نمودار دو خطی گروه GFRP.

در ادامه بر طبق جدول (۲۰) و شکل (۲۱) به بررسی مقاومت نهایی نمونه‌ها در دو حالت بار گذاری افزون و چرخه‌ای پرداخته می‌شود:



شکل ۲۱: بررسی مقاومت نهایی نمونه‌ها در دو حالت بار گذاری افزون و چرخه‌ای.



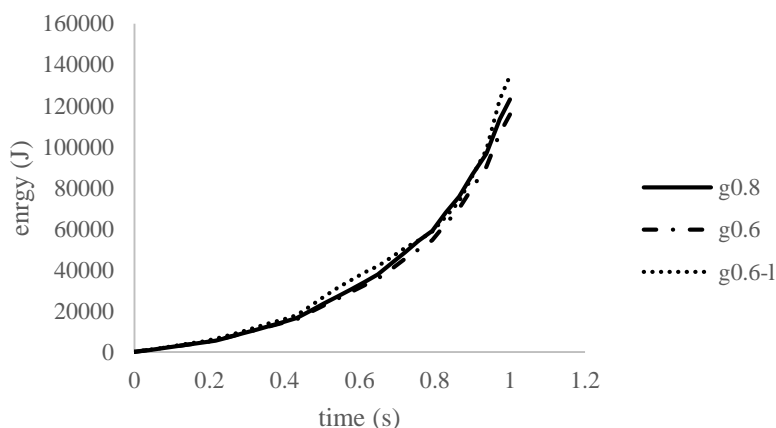
جدول ۲۰: بررسی مقاومت نهایی نمونه‌ها در دو حالت بار گذاری بار افزون و چرخه‌ای.

نمونه	FU (KN)- MONOTONIC	FU (KN)- HYSTERTIC	FU-H/FU-M
G0.8	۱۶۱/۱۴	۱۶۲/۲۱	۱/۰۱
G0.6	۱۲۵/۵۱	۱۳۱/۲۳	۱/۰۵
G0.6-L t=3mm	۱۸۲/۷۷	۴۱۵/۸۱	۲/۲۸

در نمونه‌های G0.6 و G0.8 که با ورق CFRP تقویت نشده‌اند مشاهده می‌گردد بار چرخه‌ای وارده باعث افزایش مقاومت نهایی گردیده است اما در حدود ۰/۶ تا ۴/۵ درصد ولی در نمونه بهسازی شده با ورق مشاهده تغییر چشم گیری شده‌ایم که مقاومت نهایی را به ۲ برابر حالت‌های بدون ورق همچون نمونه بالانس می‌رساند این امر حاکی بر این است که مقطع بهسازی شده عملکرد بهتری در حالت بار چرخه‌ای نسبت به همتای مرجع خود (نمونه بالانس G0.8) دارد. نمونه بهسازی شده در حالت بار چرخه‌ای عملکرد بهتری از لحاظ مقاومت نهایی دارد.

#### ۴-۴- بررسی انرژی مستهلک شده نمونه‌های گروه GFRP

با توجه به شکل (۲۲) در کل زمان تحلیل به بررسی انرژی مستهلک شده توسط نمونه می‌پردازیم. در این نمودار در چرخه‌های ابتدایی انرژی مستهلک شده تمامی نمونه‌ها یکسان است زیرا در زمان‌های ابتدایی بتن در حال ترک خوردن می‌باشد و آرماتورهای GFRP تاثیری در رفتار مقطع ندارند در زمانهای و چرخه‌های میانی آرماتورهای GFRP وارد عمل می‌شوند که این امر موجب می‌گردد نمونه بالانس با افزایش ۱۵ درصدی انرژی روبه رو شود. نمونه‌ای که با ورق CFRP تقویت شد در بازه زمانی میانی با افزایش ۷ درصدی انرژی روبه رو می‌شود و در بازه زمانی نهایی با نمونه بالانس برابری می‌کند این امر حاکی بر این است که نمونه تقویت شده رفتاری تقریباً مشابه با نمونه بالانس دارد و بهسازی لرزه‌ای به درستی انجام پذیرفته است.



شکل ۲۲: نمودار انرژی مستهلک شده نمونه‌های گروه GFRP.



## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

با توجه به تحلیل و بررسی‌های صورت گرفته در بخش ۴ نتایج حاصله بشرح ذیل ارائه می‌گردد:

- ۱- در مقایسه نمونه‌های مرجع هرگروه پیرامون مقاومت خمشی مقطع مسلح با میلگرد فولادی رفتار خمشی بهتری نسبت به مقاطع مسلح با میلگردهای الیاف FRP دارد بطوریکه نمونه میلگرد فولادی مقاومت خمشی بین ۱۶ الی ۳۶ درصد بیشتر از نمونه‌های مرجع میلگردهای الیاف FRP دارد.
- ۲- مقادیر مقاومت خمشی بدست آمده از نرم‌افزار ۱/۲ تا ۱/۸ برابر مقاومت خمشی اسمی بدست آمده طبق روابط آیین نامه ACI-440.1R-19 می‌باشد که حاکی از آنست که روابط آیین نامه در تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های تقویت شده با FRP دارای حاشیه اطمینان مناسبی است.
- ۳- اگر مقاومت خمشی مقطع برای ما حائز اهمیت باشد بهتر است از میلگرد با الیاف AFRP استفاده شود زیرا با مقاومت کششی نهایی حدود نصف مقاومت کششی نهایی CFRP مقاومت خمشی بیشتری دارد.
- ۴- برای تقویت مقطع مسلح با میلگرد الیاف CFRP با ورق CFRP بدلیل تردی مقطع حاصل از کاهش شکل‌پذیری باید ضخامت بیشتری از ورق استفاده شود تا مقاومت خمشی به مقاومت خمشی مقطع مرجع برسد.
- ۵- در تقویت مقطع ضعیف با میلگرد فولادی برای رساندن به مقطع مرجع باید ضخامت زیادی از ورق CFRP استفاده شود تا مقاومت خمشی نهایی مقطع بهسازی شده به مقطع مرجع برسد.
- ۶- اگر پارامتر شکل‌پذیری در مقاطع مرجع حائز اهمیت باشد میلگرد با الیاف GFRP شکل‌پذیری در حدود ۷ الی ۱۵ درصد بیشتر از مقاطع مرجع CFRP, AFRP دارد این در حالیست که مقاومت کششی نهایی این دو الیاف به ترتیب ۲ و ۴ برابر میلگرد GFRP می‌باشد.
- ۷- نمونه مرجع با میلگرد فولادی شکل‌پذیری حدود ۳ برابر نمونه مرجع با میلگرد AFRP دارد در حالی که مقاومت کششی نهایی کمتری (حدود نصف میلگرد AFRP) دارد.
- ۸- در گروه GFRP پارامتر شکل‌پذیری بین هر سه مقطع ضعیف و بالانس و بهسازی شده یکسان است ولی شکل‌پذیری نهایی مقطع بهسازی شده کاهش یافته یعنی مقطع تردتر شده است.
- ۹- در گروه AFRP شکل‌پذیری مقطع مرجع و ضعیف برابر بوده و با تقویت شکل‌پذیری افزایش یافته ولی تغییر مکان نهایی نمونه مرجع ۴۷ درصد نمونه ضعیف و ۱۳ درصد نمونه بهسازی شده است و همچنین مقاومت نهایی ۳۰ درصد کاهش یافته است.
- ۱۰- در گروه مقاطع فولادی با افزایش درصد آرماتور موجود مقطع شکننده‌تر شده و شکل‌پذیری کاهش پیدا می‌کند نمونه ضعیف شکل‌پذیری ۱/۲۶ برابر نمونه مرجع را داراست و تقویت نمونه ضعیف با ورق موجب کاهش شکل‌پذیری می‌شود.
- ۱۱- با مقایسه عامل تغییر مکان نهایی نمونه ضعیف و نمونه مرجع با میلگرد فولادی این عامل برابر بوده و نمونه تقویت شده با ورق به نصف شکل‌پذیری این دو مقطع می‌باشد.
- ۱۲- تحت بار چرخه‌ای در یک تغییر مکان یکسان (در حدود ۱۴ mm) در وسط دهانه تیر بهسازی شده با ورق CFRP ظرفیت باری حدود دو برابر ظرفیت باری تیر مرجع دارد و همچنین عملکرد تیر تحت بار چرخه‌ای بهتر از بار افزون می‌باشد.
- ۱۳- با بهسازی با ورق CFRP سختی تیر ضعیف که ۲۴ درصد کمتر از نمونه مرجع است با این بهسازی به ۷۱ درصد سختی نمونه مرجع می‌رسد.



۱۴- ظرفیت بابری نهایی در نمونه ضعیف و مرجع GFRP در بار چرخه‌ای نسبت به حالت افزون یکسان بوده ولی نمونه تقویت شده ظرفیت بابری حدود ۲ برابر بار افزون دارد. انرژی مستهلک شده در حالت بهسازی در بازه میانی تحلیل به ۱۵ درصد انرژی نمونه مرجع می‌رسد که این امر بیانگر جوابگو بودن بهسازی انجام گرفته می‌باشد.

#### ۶- مراجع

- [1]-Lau, D., and Pam, H. J., 2010, **Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams**, Engineering Structures, 32, 12, 3857-3865.
- [2]- Wenwei, W., and Guo, L., 2006, **Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load**, International Journal of Solids and Structures, 43, 6, 1372-1387.
- [3]- Morsy, A., and Mahmoud, E. T., 2013, **Bonding techniques for flexural strengthening of RC beams using CFRP laminates**, Ain Shams Engineering journal, 4, 3, 369-374.
- [4]- Vasquez Rayo, D. L., 2008, **Plate-End Debonding of longitudinal Near-Surface Mounted Fiber Reinforced Polymer Strips on Reinforced Concrete Flexural Members**, M.S. thesis, North Carolina State University
- [5]- Mostofinejad, D., and Moghaddas, A., 2014, **Bond efficiency of EBR and EBROG methods in different flexural failure mechanisms of FRP strengthened RC beams**, Construction and Building Materials, 54, 605-614.
- [6]- Abaqus, Abaqus/standard. Version 6.11, ABAQUS, Inc., Pawtucket, R.I, 2012.
- [۷]- شهبازی، ر.، یکرنگ نیا، م.، ۱۳۹۵، راهنمای کاربردی ABAQUS به همراه مسائل مهندسی عمران سازه و ژئوتکنیک، تهران: علم عمران.
- [8]-ACI Committee, 2006, **Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars**, 440.1 R.
- [9]- FEMA-350, 2000, **recommended seismic design criteria for new steel moment frame buildings**, Report no.FEMA-350, 2000, Federal Emergency Management Agency: California Universities for Research in Earthquake Engineering; 2000.