

# بررسی اثر تنش پیش تنیدگی بر ظرفیت نهایی و قابلیت استهلاک انرژی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP پیش تنیده تحت بارهای چرخه ای

سارا زنجانی, عطا حجت کاشانی\*

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه عمران سازه, دانشکده فنی و مهندسی واحد تهران جنوب, دانشگاه آزاد اسلامی, تهران, ایران
- ۲- عضو هیات علمی گروه عمران سازه, دانشکده فنی و مهندسی واحد تهران جنوب, دانشگاه آزاد اسلامی, تهران, ایران

## چکیده:

با توجه به هزینه قابل ملاحظه نوسازی مجدد سازه ها, در سال های اخیر مسئله تقویت و ترمیم سازه های ضعیف و خسارت دیده, در سطح وسیعی مطرح شده است. یکی از روش های نسبتا جدید تقویت اجزاء بتنی تقویت شده محصور شدگی مناطق تحت تنش و برش با CFRP است. این روش تقویت به علت وضعیت مواد کامپوزیتی نظیر وزن سبکشان و رفتار الاستیک خطی تا نقطه گسستگی و مقاومت کششی خیلی بالا و مدول الاستیسیته بالا, مقاومت در برابر خوردگی, مقاومت بالا نسبت به خستگی و... خیلی مرسوم گردیده اند. در هنگام مقاوم سازی یک سازه با استفاده از مصالح FRP به صورت غیر پیش تنیده, اغلب استفاده کامل از ظرفیت مصالح FRP امکان پذیر نیست. این مسئله در کنار قیمت نسبتا بالای این مواد, گاه تعادل مناسبی را از لحاظ درصد تقویت و هزینه مصرفی ایجاد نمی کند. لذا پیش تنیده کردن الیاف CFRP نقش بسزایی در استفاده مطلوب از این مصالح داشته است. حال پرسش دیگری مطرح میگردد که پیش تنیدگی تا چه درصدی باعث افزایش ظرفیت نهایی و سختی تیرهای بتن مسلح می گردد. در این مقاله با استفاده از نرم افزار ABAQUS پنج نمونه تیر بتن مسلح با تنش اولیه پیش تنیدگی ۲۵۰, ۷۵۰, ۱۰۵۲, ۱۲۵۰, و ۱۷۵۰ MPa تحت الگوی بارگذاری چرخه ای قرار گرفتند. در بین این تیرها, تیر با درصد پیش تنیدگی ۱۰۵۲% 42.1 MPa, تنش گسیختگی بیشترین درصد افزایش را در مقاومت نهایی و قابلیت استهلاک انرژی تیر داشته است.

واژه های کلیدی: تیرهای بتن مسلح, CFRP, درصد پیش تنیدگی, ظرفیت نهایی, قابلیت استهلاک

انرژی, بارگذاری چرخه ای

## ۱- مقدمه

سیستم های FRP به صورت پوشش های بیرونی و به منظور افزایش مقاومت و بهسازی سازه های بتنی موجود از اواسط دهه ۱۹۸۰ تا کنون در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می گیرد. تعداد پروژه هایی که در ارتباط با سیستم های FRP در سطح جهان مورد استفاده قرار گرفته بطور چشمگیری افزایش یافته است. بطوری که طی ۱۰ سال گذشته از تعداد اندک به چندین هزار پروژه در حال حاضر رسیده است. از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه تکنولوژی اتصال صفحات FRP، میتوان به مطالعاتیکه برای اولین بار در سوئیس توسط مؤسسه تحقیقاتی EMPA انجام شد، اشاره کرد. این تحقیقات در سال ۱۹۸۴ با آزمایش بر روی تیرهای بتن مسلح مقاوم شده با صفحات CFRP انجام شد. از مهمترین محاسن صفحات FRP نسبت بالای مقاومت به وزن آنها و مقاومت بالای آنها نسبت به خردگی است. [۱] خصوصیت اول منجر به سهولت در کاربرد در محل و کاهش هزینه دستمزد می باشد. دومین خصوصیت منجر به دوام اجرا می شود. اعضای سازه های تقویت شده با سیستم های FRP به صورت پوشش های بیرونی عبارتند از: تیرها، ستون ها، دیوارها، اتصالات، دودکش ها، طاق های گنبدی شکل، تونل ها، سیلوها، لوله ها و خریاها. پوشش های FRP به عنوان جایگزینی بجای روش های دیگر، مانند استفاده از صفحات فولادی، غلاف های دور ستون های بتنی یا فلزی بوجود آمده اند. روکش های پلیمری FRP به منظور بهسازی سازه های بتنی اولین بار در دهه ۱۹۸۰ در اروپا و ژاپن توسعه یافت. امروزه سیستم های FRP به عنوان جایگزین صفحات فولادی مورد استفاده قرار گرفته است. صفحات FRP حداقل دو برابر اما تا ده برابر قوی تر از صفحات فولادی هستند در حالیکه تنها ۲۰ درصد وزن صفحات فولادی را دارند [۲]. کامپوزیت های FRP در زمینه های دیگر نظیر صنایع فضاوردی نیز سالیان زیادی کاربرد داشته اند و خصوصیات فوق العاده آنها نیز کاملاً شناخته شده است. محدودیت استفاده از این چنین موادی در کاربری های مهندسی عمران تنها بخاطر هزینه بالای آن است. برای کاربرد کامپوزیت های FRP در مقاوم سازی سازه ها هر چند که این مواد هزینه بالایی دارند که بخش کوچکی از آن توسط کاهش هزینه بکارگیری و کاهش زمان قطع سرویس تامین می شود، اما اغلب موثرترین راه حل را فراهم می آورند [۳]. همچنین مواد کامپوزیتی FRP موادی بسیار مقاوم در مقابل محیط های خورنده، همچون محیط های نمکی و قلیایی هستند. به همین دلیل امروزه کامپوزیت های FRP، موضوع تحقیقات وسیعی به عنوان جانشین میلگردهای فولادی و کابل های پیش تنیدگی شده اند. اتصال ورقه های فولادی به قسمت کششی اعضای بتنی توسط رزین های اپوکسی به منظور افزایش مقاومت خمشی این اعضا به عنوان روش مطرح و با دوام مرسوم می باشد. این روش برای مقاوم سازی تعداد زیادی از پل ها و ساختمان ها در جهان مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجائیکه صفحات فولادی دچار خوردگی می شوند و فرسودگی آنها باعث تخریب اتصال صفحه فولادی با بتن می شود و از طرف دیگر نصب آنها مشکل و با ماشین آلات نسبتاً سنگین انجام میگیرد، محققان بدنبال جایگزینی مواد FRP بجای فولاد شدند [۴].

## ۲- تقویت تیرها

بسته به میزان آسیب دیدگی تیرها، چندین راهکار را می توان برای مرمت و تقویت آنها برگزید. از جمله این راهکارها می توان به تزریق رزین، چسباندن ورقهای فولادی و یا الیاف پلیمری مرکب (FRP)، برداشتن و جایگزینی دوباره بتن و استفاده از ژاکت های بتنی اشاره کرد. [۲]

## ۳- تحلیل اجزاء محدود

نرم افزار Abaqus یک مجموعه از برنامه های مدل سازی و تحلیل بسیار توانمند می باشد که مبتنی بر روش اجزاء محدود، قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده ترین مدلسازی غیر خطی را دارا می باشد.

### ۳-۱- خرابی پلاستیک بتن

این روش مدل سازی خرابی، ابزار توانمندیست که قادر است رفتار غیرخطی بتن و مواد شبه ترد را برای المان های سازه ای (خرپایی، تیر، صفحه ای و حجمی) را مدل کند. برای بتن ساده و بتن آرمه کاربرد دارد. طرح این روش بگونه ای است که برای بارگذاری های یکنواخت، چرخه ای و یا حتی بارگذاری های دینامیکی کاربرد دارد. قادر است تا ریکآوری سختی را تحت بارگذاری های چرخه ای اعمال کند.

در این روش مدل سازی فرض می شود که خرابی بتن به دو صورت ترک در کشش و خردشدگی در فشار صورت می گیرد. رشد تسلیم (و یا خرابی) با استفاده از دو پارامتر سخت شوندگی کنترل می شود.  $\bar{\epsilon}_t^{pl}$  و  $\bar{\epsilon}_c^{pl}$  کرنش های پلاستیک معادل کشش و فشار، مکانیزم خرابی بتن را بترتیب در کشش و فشار کنترل می کنند.

### ۳-۲- جزئیات انجام شبیه سازی عددی [۵]، [۶]

مدل سازی از مراحل، پیش پردازش، پردازش، پس از پردازش، نتایج قابل قبول و راه حل پایدار و ترسیم نتایج خروجی تشکیل یافته است.

مدل سازی عددی با آباکوس / استاندارد به رویه ی زیر دنبال شده است:

- ۱- با تشریح مشخصات هندسی اعضای پایه ای ایجاد شد (تعریف تیر، میلگردها و ورق های (FRP))
- ۲- ایجاد مشخصات مواد برای لایه های مختلف (مشخصات الاستیک و پلاستیک)
- ۳- مونتاژ کردن اجزاء و اختصاص مواد به آنها
- ۴- در مدل هایی که تماس بین اجزاء باید تعریف شود، تعریف زوج سطوح و مشخصات مکانیکی برای آنها. اتصالات و اندرکنش های مدل بصورت زیر می باشد:
- ✓ اتصال و اندرکنش بین میلگردها و بتن از طریق تکنیک جاسازی المان انجام گرفته است.
- ✓ در خصوص سطوح تماس نیز تنها خاصیت عمود بر صفحه HardContact و خواص مماسی از روش Penalty اعمال شده است.

۵- مش بندی مناسب مدل و اختصاص المان های سازه ای مناسب به اجزاء. برای مقاطع تیر از نوع المان C3D8R (المان ۳ بعدی پیوسته با ۸ نقطه ی انتگرال گیری) و برای میلگرد گذاری از المان محوری B31 (تیری) و برای ورق های پلیمری S8R (المان صفحه ای با ۸ نقطه ی انتگرال گیری) استفاده شد.

جدول ۱: نوع و تعداد المان های اجزا

اجزا مدل		نوع المان	تعداد المان
Concrete		C3D8R	۲۱۲۸
Steel	Main Bar	B31	۵۳
	Stirrup		۱۲

FRP	S8R	۱۱۲
-----	-----	-----

- ۶- تعریف مراحل آنالیز  
از روش Static General برای تحلیل مدل ها استفاده شده است.
- ۷- با تشریح مشخصات هندسی اعضای پایه ای ایجاد شد (تعریف تیر، میلگردها و ورق های FRP)
- ۸- ایجاد کار
- ۹- آنالیز

#### ۴- صحت سنجی

به منظور صحت سنجی مدل سازی اجزاء محدود از آزمایشات (Xhu and Zeng) (2009) استفاده شده است. در این سری آزمایشات محققین اثرات ورق های CFRP را بر مقاومت تیرهای بتن آرمه با درصد فولاد مختلف بررسی کرده اند. از میان نمونه های مورد آزمایش، مدل PC-1 را برای مدل سازی اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس انتخاب می کنیم. در شکل ۱ نمونه ی تیر بتن آرمه آزمایش شده توسط Xhu and Zeng را مشاهده می کنید [۷].



شکل ۱: مدل آزمایشگاهی PC-1 تیر بتن آرمه با ورق CFRP [۷]

در خصوص مشخصات هندسی و مکانیکی CFRP، بصورت زیر در نرم افزار آباکوس معرفی شده است.

جدول ۲: خواص هندسی و مکانیکی CFRP

Material	Elastic Modulus $E_s$	Ultimate Strength $f_u$	Thickness
FRP	150(Gpa)	2500(MPa)	1.4(mm)

جدول ۳: مشخصات فولاد میلگردگذاری آزمایش شده

Diameter (mm)	Elastic modulus $E_s$ (GPa)	Yield stress $f_y$ (MPa)	Ultimate stress $f_u$ (MPa)	Elongation (%)
6	245	500	641	23
8	201	298	466	22
12	145	340	518	20
14	140	270	450	22
16	143	300	443	23

جدول ۴: مشخصات مکانیکی بتن نمونه PC-1 آزمایش شده

Speciment	Elastic modulus $E_c$ (GPa)	Cubic compressive Strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
concreat	32.5	52.3	3.6

جدول ۵: مشخصات پیش تنیدگی تیر BC-1 آزمایش شده توسط ژو و زنگ ۲۰۰۹

Specimen	Steel reinforcement in compression	Steel reinforcement in tension	CFRP plate width $b_f$ (mm)	Effective prestress
PC-1	2 $\phi$ 6 <sup>a</sup>	1 $\phi$ 12+2 $\phi$ 14 (1.25%) <sup>b</sup>	50	1052.0 (42.1%) <sup>c</sup>
PC-2	2 $\phi$ 6	1 $\phi$ 12+2 $\phi$ 14 (1.25%)	20	1101.9 (44.1%)
PC-3	2 $\phi$ 6	3 $\phi$ 12 (1.25%)	20	1265.4 (50.6%)
PC-4	2 $\phi$ 6	1 $\phi$ 16+2 $\phi$ 14 (1.25%)	20	786.5 (31.5%)
PC-5	2 $\phi$ 6	1 $\phi$ 16+2 $\phi$ 14 (1.25%)	20	1087.2 (43.5%)

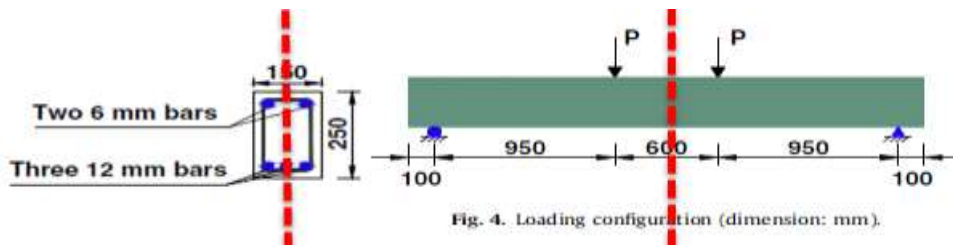
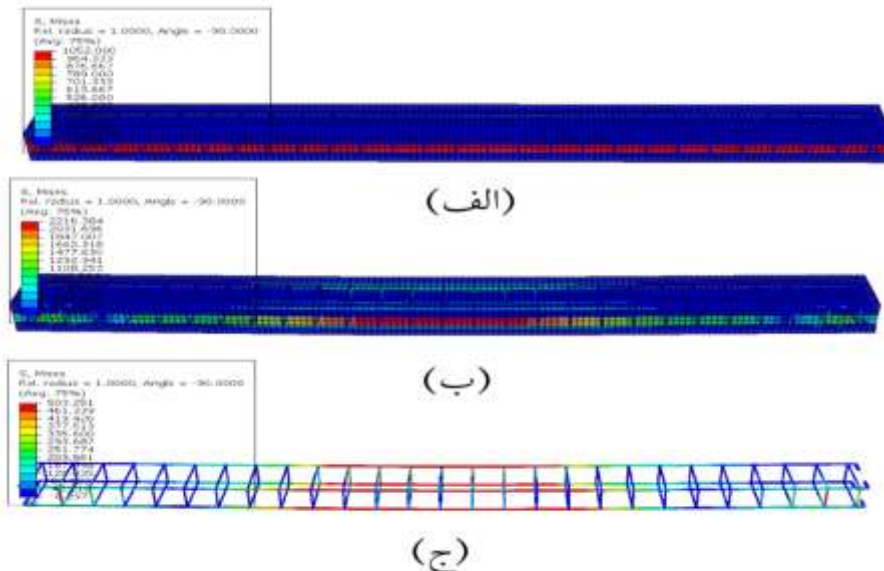


Fig. 4. Loading configuration (dimension: mm).

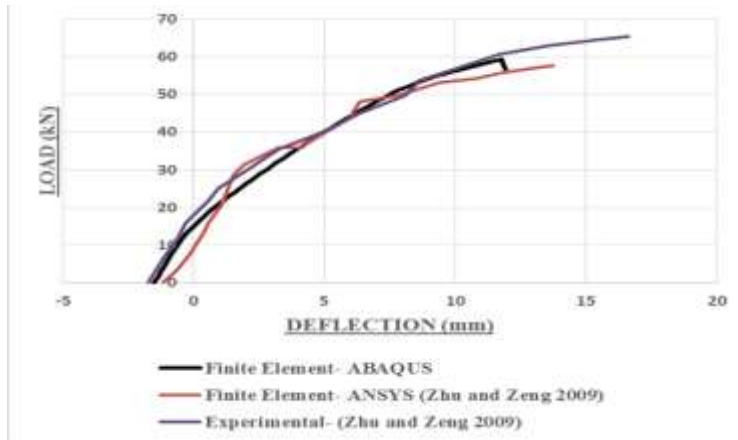
شکل ۲: انتخاب تیر BC-1 برای مدل سازی اجزاء محدود

میزان تنش پیش تنیدگی ورق های CFRP به میزان  $1052 \text{ MPa}$  می باشد که برابر  $42.1\%$  ظرفیت نهایی ورق ها می باشد. در مرحله ی اول بارگذاری شکل ۳ ورق CFRP به میزان تنش پیش تنیدگی رسیده است



شکل ۳: (الف) تنش در مرحله پیش-تنیدگی (ب و ج) تنش در انتهای بارگذاری

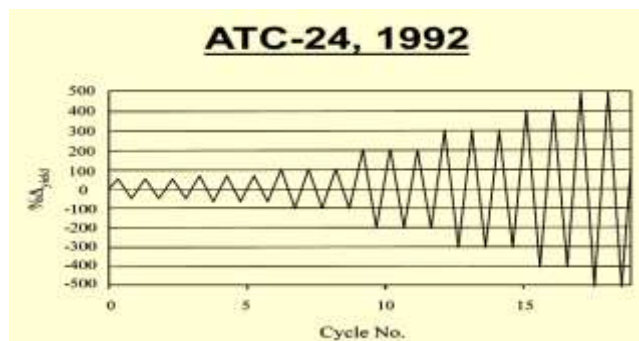
شکل ۴ منحنی بار-جابجایی تیر BC-1 را مقایسه با مقادیر اجزاء محدود نشان می دهد که تقریب بالای نرم افزار آباکوس در پیش بینی این منحنی مشخص است.



شکل ۴: مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و اجزاء محدود

### ۵- مدل سازی اجزاء محدود

۴ مدل در دو حالت ساده و پیش تنیده تحت بارگذاری چرخه ای طبق الگوی آیین نامه ATC-24-1992 قرار گرفتند. ظرفیت نهایی، سختی و قابلیت استهلاک انرژی این نمونه ها تحت اثر پارامتر تنش پیش تنیدگی بررسی می شود. در جدول ۶ مشخصات مدل ها آورده شده است. چهار تیر با درصدهای فولاد کششی ۱٫۲۵٪، با تنش پیش تنیدگی ( ۱۰۵۲ و ۲۵۰، ۷۵۰، ۱۲۵۰ و ۱۷۵۰ MPa در دو حالت بدون پیش تنیدگی و پیش تنیدگی صفحات CFRP الگوی بارگذاری چرخه ای با کنترل جابجایی  $\Delta 5y$  مدل شدند. مقدار درصد افزایش مقاومت و قابلیت استهلاک انرژی در چهار نمونه تیر بررسی می شود. در جدول ۶ مشخصات میلگردگذاری و تقویت CFRP نمونه های مورد بررسی این بخش را مشاهده می کنید.



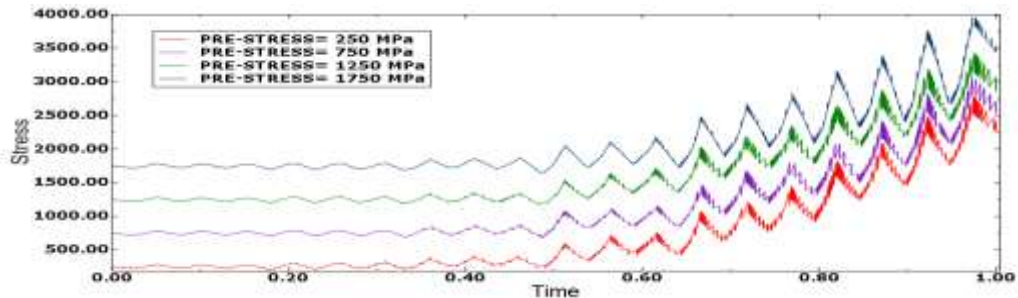
شکل ۵: الگوی بارگذاری چرخه ای بر اساس استاندارد ATC-24 [۸]

جدول ۶: مشخصات میلگرد گذاری تقویت و پیش تنیدگی CFRP در تیر

نمونه		فولاد کششی		مشخصات CFRP		پیش تنیدگی موثر
ردیف	متغیر	میلگردهای کششی	درصد	ابعاد	درصد	مگاپاسکال
1	اثرات در صد پیش تنیدگی	1φ12+2φ14	1.25%	50x1.4	1.9%	250Mpa
2		1φ12+2φ14	1.25%	50x1.4	1.9%	750 Mpa
3		1φ12+2φ14	1.25%	50x1.4	1.9%	1250 Mpa

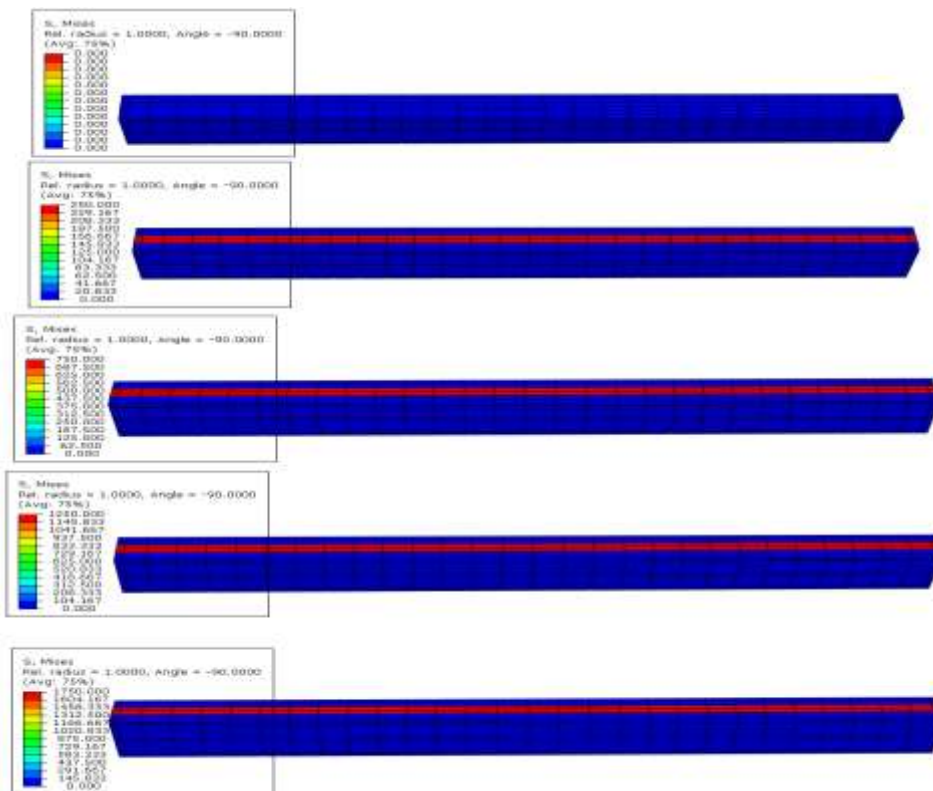
4		1φ12+2φ14	1.25%	50x1.4	1.9%	1750 Mpa
---	--	-----------	-------	--------	------	----------

در نمودار شکل ۶ تغییرات تنش در ۵ نمونه تیر مورد بررسی در این بخش را در حین بارگذاری چرخه ای نشان داده است.



شکل ۶: تغییرات تنش در ورق‌های CFRP در تیرهای شماره ۱ تا ۴

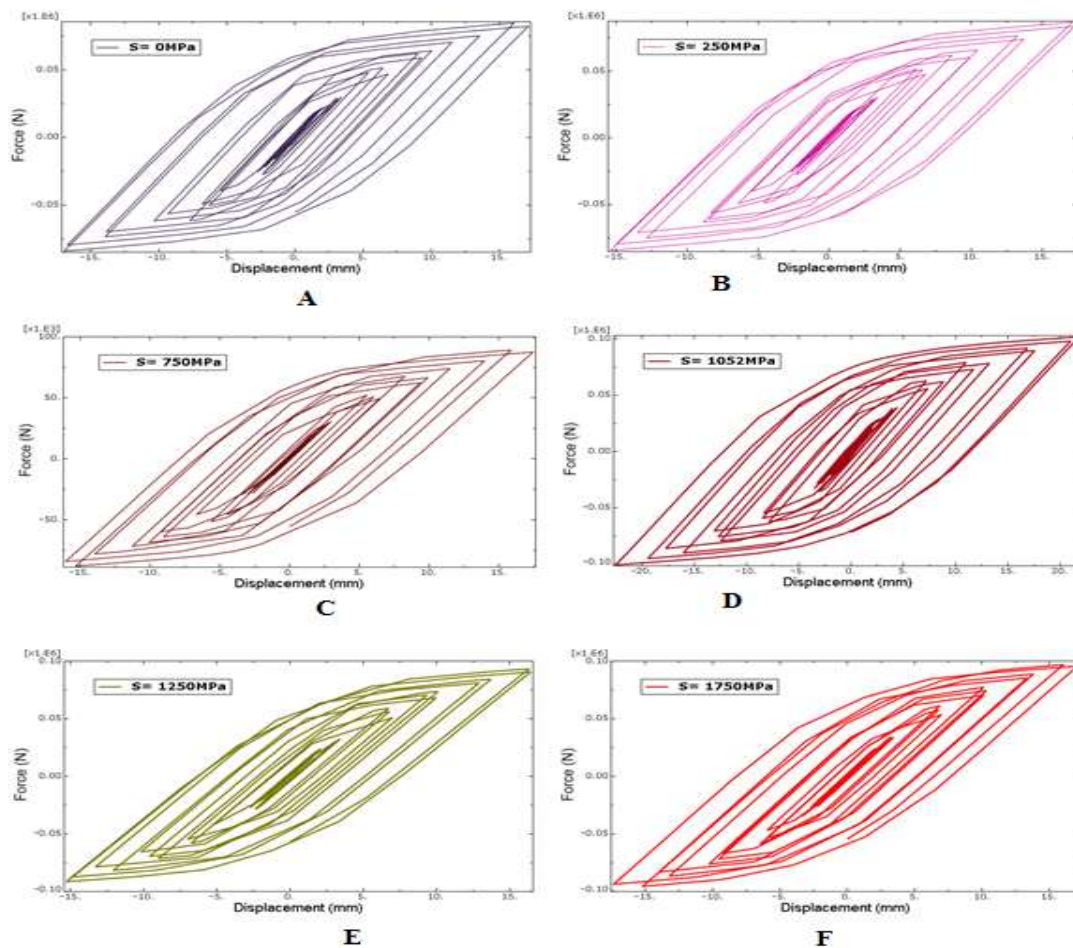
در شکل ۷ سطوح تنش پیش تنیدگی ورق های CFRP را در تیرهای شماره ۱ تا ۴ و نمونه صحت سنجی شده قبل از بارگذاری چرخه ای مشاهده می کنید.



شکل ۷: مقادیر تنش های پیش تنیدگی ۱۷۵۰-۰MPa قبل از شروع بارگذاری چرخه ای

در گام بعدی تیرها تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفته و منحنی بار-جابجایی آنها استخراج می شود.

در خصوص نمودارهای شکل ۴-۳۰ موارد زیر قابل ذکر است:  
 افزایش تنش پیش تنیدگی با مقادیر بترتیب صفر، ۲۵۰، ۷۵۰، ۱۰۵۲، ۱۲۵۰ و ۱۷۵۰ مگاپاسکال در تیر بتنی با درصد فولاد کششی ۱،۲۵٪ و مساحت CFRP 1.90% ظرفیت (بار) نهایی این تیر را به مقادیر ۸۱،۱۳ KN، 83.99KN، 87.91KN، 101.99KN و 91.45KN رسیدگی است.  
 مساحت درون نمودار این ۶ نمونه که معادل با انرژی مستهلاک شده آنها در حین بارگذاری است بترتیب برابر  $1.84E+07$  N.mm،  $1.86E+07$  N.mm،  $1.92E+07$  N.mm،  $2.03E+07$  N.mm،  $1.91E+07$  N.mm،  $2.96E+07$  N.mm است.  
 مشاهده شد که تیر با درصد تنش پیش تنیدگی ۴۲،۱٪ تنش گسیختگی ۱۰۵۲ MPa بیشترین درصد افزایش را در مقاومت نهایی و قابلیت استهلاک انرژی تیر داشته است.



شکل ۸: نمودارهای بار-جابجایی تیرهای بتن-آرمه تقویت شده با CFRP و درصد فولاد کششی ۱،۲۵٪

- |                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| (A) بدون پیش-تنیدگی         | (B) تنش پیش-تنیدگی ۲۵۰ MPa  |
| (C) تنش پیش-تنیدگی ۷۵۰ MPa  | (D) تنش پیش-تنیدگی ۱۰۵۲ MPa |
| (E) تنش پیش-تنیدگی ۱۲۵۰ MPa | (F) تنش پیش-تنیدگی ۱۷۵۰ MPa |

نتیجه گیری



اثرات درصد تنش پیش تنیدگی تیرهای بتن آرمه بر روی دو معیار ظرفیت نهایی و قابلیت استهلاک انرژی بررسی شد. بدین منظور پنج تیر با تنش اولیه پیش-تنیدگی  $1052 \text{ MPa}$  و  $250$ ،  $750$ ،  $1250$  و  $1750 \text{ MPa}$  مدل سازی شدند که نتایج مقایسه دو پارامتر مذکور را در جدول شکل ۹ مشاهده می کنید، در بین این تیرها، تیر با درصد پیش تنیدگی  $42.1\%$  تنش گسیختگی ( $1052 \text{ MPa}$ ) بیشترین درصد افزایش ظرفیت نهایی و قابلیت استهلاک انرژی را داشته است. در این مقاله تنش پیش تنیدگی  $42.1\%$  تنش گسیختگی برابر  $1052 \text{ MPa}$  پیشنهاد می شود.

شکل ۹: اثرات درصد فولاد کششی بر ظرفیت نهایی و قابلیت استهلاک انرژی

درصد پیش تنیدگی	ظرفیت بار نهایی	انرژی مستهلک شده
۰	۸۱,۱۳	$1.84 \text{E}+07 \text{ N.mm}$
۲۵۰	۸۳,۹۹	$1.86 \text{E}+07 \text{ N.mm}$
۷۵۰	۸۷,۹۱	$1.92 \text{E}+07 \text{ N.mm}$
۱۰۵۲	۱۰۱,۹۹	$2.03 \text{E}+07 \text{ N.mm}$
۱۲۵۰	۹۱,۴۵	$1.91 \text{E}+07 \text{ N.mm}$
۱۷۵۰	۹۵,۶۱	$2.96 \text{E}+07 \text{ N.mm}$

## مراجع

- [1] Hojatkashani, A. kabir, M.Z. . Experimental investigation of CFRP strengthened RC beams under monotonic and fatigue loadings 'the international conference experimental solid mechanics and dynamic.iran,2012.
- [2] Hojatkashani, A. kabir, M.Z. .structural engineering Experimental examination of CFRP strengthened RC beams under high cycle fatigue loading". international journal of civil engineering, 2012.
- [3] Xue, W & Tan, Y & Z Lei. Flexural response predictions of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates. Composite structures. Elsevier, 2010.
- [4] Applied Technology Concl
- [۵] هاشمی، ح. مستوفی نژاد، ع. مقاوم سازی سازه های بتن آرمه با مصالح پیش تنیده FRP به روش نصب در نزدیک سطح NSM، همایش تکنولوژی های نوین ساختمان، ۱۳۹۳.
- [۶] رهایی، ع. زمردیان، آ. ترمیم و تقویت سازه های بتن مسلح با الیاف پلیمری مرکب FRP. انتشارات دانش نگار. دانشگاه تفرش. ۱۳۸۴.
- [۷] نشریه ۳۴۵، راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمان های بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP، ۱۳۸۵.
- [۸] ع، حجت کاشانی، بررسی رفتار خستگی در ناحیه حدواصل اتصال تیر بتن مسلح به ورقه تقویتی CFRP. پایان نامه دکتری، ۱۳۹۱.