

اثرات CFRP بر ظرفیت نهایی و قابلیت استهلاک انرژی تیرهای بتن

مسئله تقویت شده با CFRP پیش تنیده

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 نسبتاً 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 نسبتاً 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 تحت چه میزان فولاد کششی پیش تنیدگی بیشترین تاثیر را در ظرفیت نهایی و قابلیت استهلاک انرژی تیرها دارد. در این مقاله با استفاده از نرم افزار ABAQUS چهار نمونه تیر بتن مسلح با درصدهای فولاد کششی ۰،۴۵٪، ۱،۲۵٪، ۱،۳۶٪ و ۱،۶۱٪ در دو حالت بدون پیش تنیدگی و پیش تنیدگی صفحات CFRP مدل شدند و تحت الگوی بارگذاری چرخه ای قرار گرفتند. در بین این تیرها، تیر با درصد ۱،۲۵٪ بیشترین درصد افزایش ظرفیت نهایی و قابلیت استهلاک انرژی را داشته است.

واژه های کلیدی: تیرهای بتن مسلح، CFRP، 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 خرپاها. 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 مواد 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 توانمندبست 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 ریکواری 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. $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ و $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ 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 مدل‌ها استفاده شده است.

۷. با تشریح مشخصات هندسی اعضای پایه‌ای ایجاد شد (تعریف تیر، میلگردها و ورق‌های FRP)

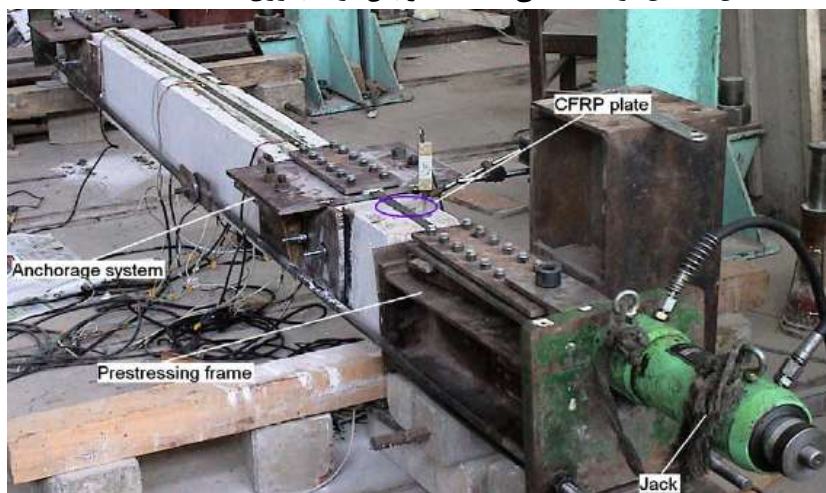
۸. ایجاد کار

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 ورق‌های CFRP را بر مقاومت تیرهای بتن آرمه با درصد فولاد مختلف بررسی کرده‌اند. از میان نمونه‌های مورد آزمایش، مدل PC-1 را برای مدل سازی اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس انتخاب می‌کنیم. در شکل ۱ نمونه‌ی تیر بتن آرمه آزمایش شده توسط Xhu and Zeng را مشاهده می‌کنید [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)

Diameter (mm)	Elastic modulus (GPa) E_s	Yield stress (MPa) f_y	Ultimate stress (MPa) f_u	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 ۳: مشخصات فولاد میلگردگذاری آزمایش شده

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

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

Specimen	Steel reinforcement in compression	Steel reinforcement in tension	CFRP plate width b_f (mm)	Effective prestress
PC-1	2 ϕ 6*	1 ϕ 12+2 ϕ 14 (1.25%) ^b	50	1052.0 (42.1%) ^f
PC-2	2 ϕ 6	1 ϕ 12+2 ϕ 14 (1.25%)	20	1101.9 (44.1%)
PC-3	2 ϕ 6	3 ϕ 12 (1.25%)	20	1265.4 (50.6%)
PC-4	2 ϕ 6	1 ϕ 16+2 ϕ 14 (1.25%)	20	786.5 (31.5%)
PC-5	2 ϕ 6	1 ϕ 16+2 ϕ 14 (1.25%)	20	1087.2 (43.5%)

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

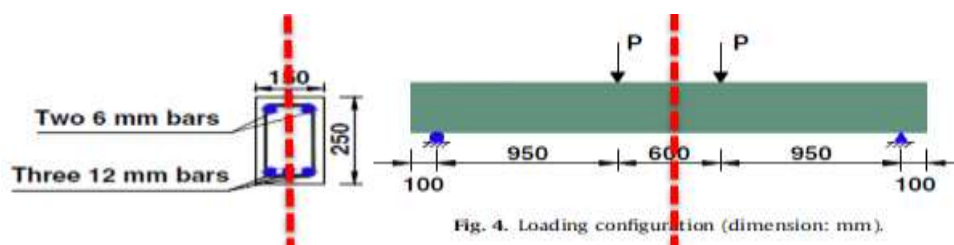
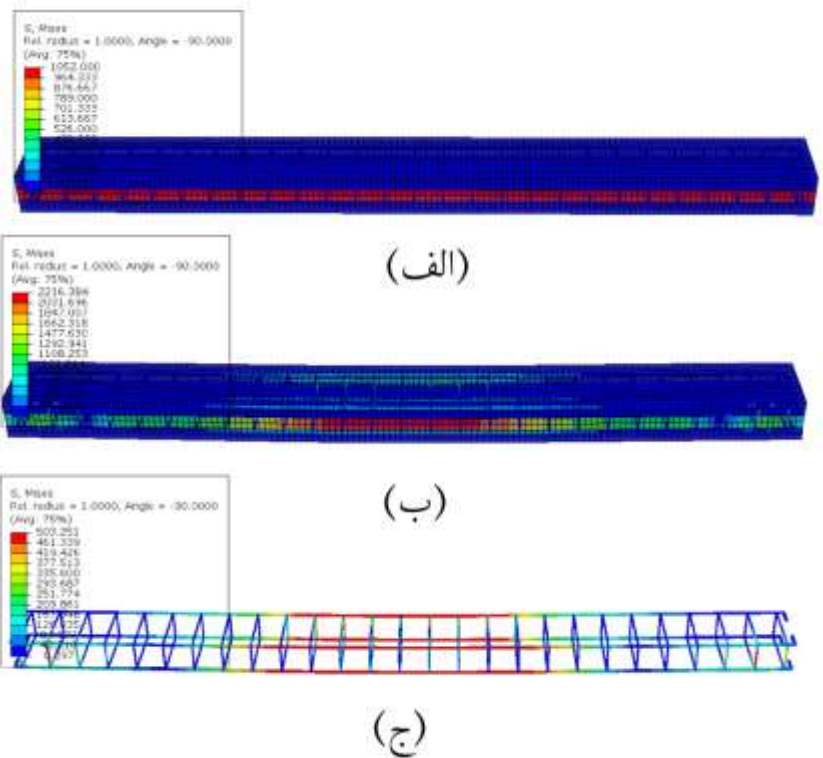


Fig. 4. Loading configuration (dimension: mm).

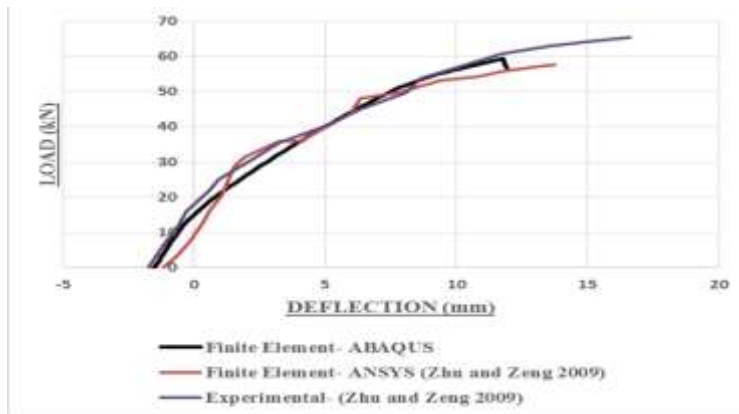
شکل ۲: انتخاب تیر BC-1 برای مدل‌سازی اجزاء محدود

میزان تنش پیش تنیدگی ورق‌های CFRP به میزان 10.52 MPa می‌باشد که برابر 42.1% ظرفیت نهایی ورق‌ها می‌باشد. در مرحله ی اول بارگذاری شکل ۳ ورق CFRP به میزان تنش پیش تنیدگی رسیده است.



شکل ۳: (الف) تنش در مرحله پیش‌تنیدگی (ب و ج) تنش در انتهای بارگذاری

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

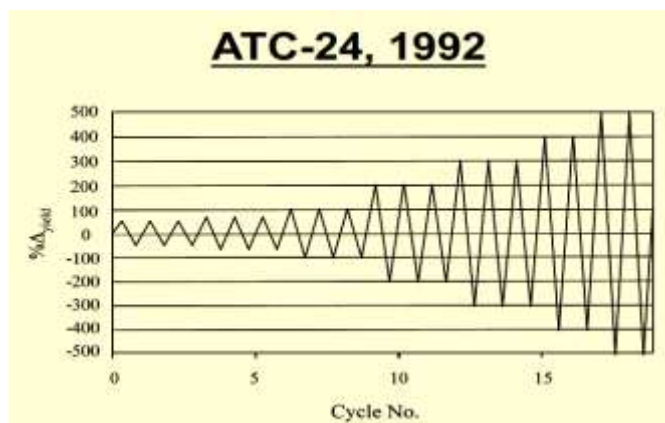


شکل ۴: مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و اجزاء محدود

مدل سازی اجزاء محدود

۴ مدل در دو حالت ساده و پیش‌تنیده 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 پارامترهای درصد فولاد کششی، اثر مساحت CFRP و اثر تنش پیش‌تنیدگی بررسی می‌شود. در جدول ۶ مشخصات مدل ها آورده شده است. چهار تیر با درصدهای فولاد کششی ۰٫۴۵٪، ۰٫۲۵٪، ۰٫۳۶٪ و ۱٫۶۱٪ در دو حالت بدون پیش‌تنیدگی و پیش‌تنیدگی صفحات CFRP الگوی بارگذاری چرخه ای

با کنترل جابجایی $5\Delta y$ مدل شدند. مقدار درصد افزایش مقاومت و قابلیت استهلاک انرژی در چهار درصد میلگرد کششی فوق 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]

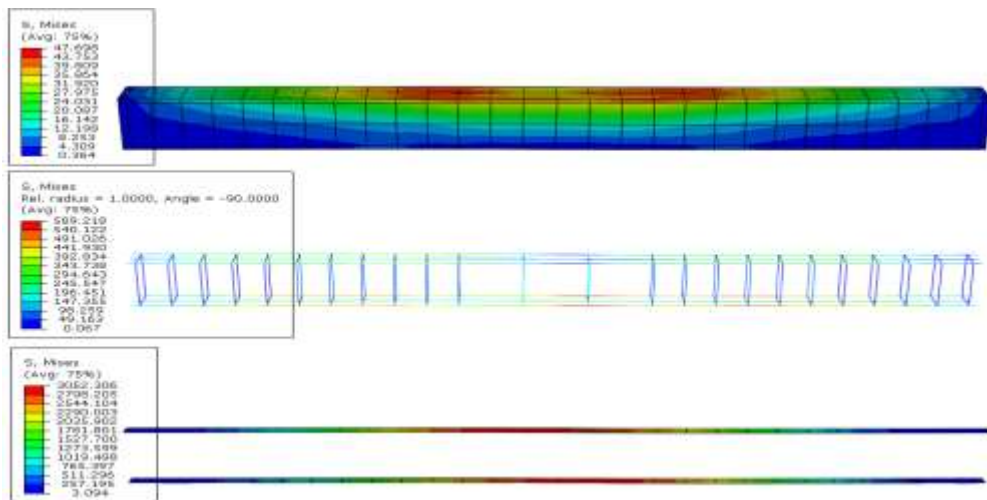
جدول ۶: مشخصات میلگرد گذاری تقویت و پیش تنیدگی CFRP در تیر

نمونه		فولاد کششی		مشخصات CFRP		پیش تنیدگی موثر
ردیف	متغیر	میلگردهای کششی	درصد	ابعاد	درصد	مگاپاسکال
1	اثرات درصد فولاد کششی	$1\phi 12+2\phi 6$	0.45%	50x1.4	0.19%	1052 Mpa
2		$1\phi 12+2\phi 14$	1.25%	50x1.4	0.19%	1052 Mpa
3		$1\phi 16+2\phi 14$	1.36%	50x1.4	0.19%	1052 Mpa
4		$3\phi 16$	1.61%	50x1.4	0.19%	1052 Mpa

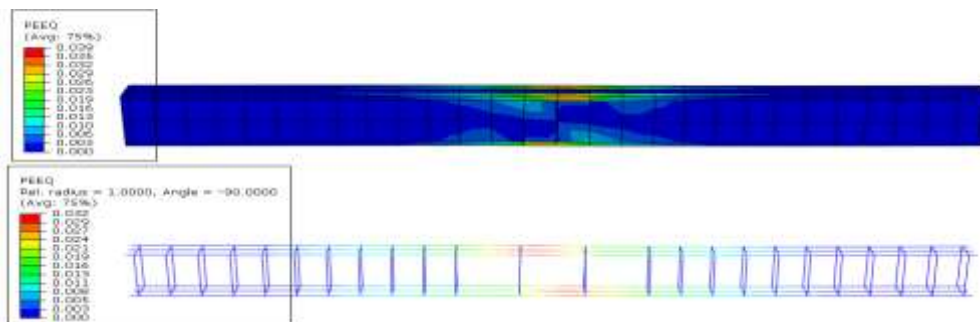
در تشریح نتایج تیر با درصد فولاد کششی ۰,۴۵٪ مقادیر سطوح معیار تنش و کرنش (بترتیب معیار تنش فون مرس و معیار کرنش پلاستیک معادل بتن PEEQ) در اجزاء تیر آورده می شود. در گام بعدی منحنی بار-جابجایی برای این تیر در دو وضعیت پیش تنیدگی با مقدار تنش 1052 MPa و حالت بدون پیش-تنیدگی آورده می شود. در نهایت هم مقدار مساحت سطح درون نمودار برای مقایسه مقدار انرژی استهلاک شده بررسی می شود.

همانطور که در شکل ۴ آورده شده است تیر بتنی، شبکه میلگردگذاری و ورق های CFRP بترتیب حداکثر تنش های 47.70 MPa ، 589.22 MPa و 3052.21 MPa را در انتهای بارگذاری دارند.

در شکل ۵ نیز معیار کرنش پلاستیک معادل، PEEQ، که معیاری از سطح گسیختگی مصالح است برای اجزاء تیر بتنی شماره ۱ در حالت بدون پیش تنیدگی آورده شده است.

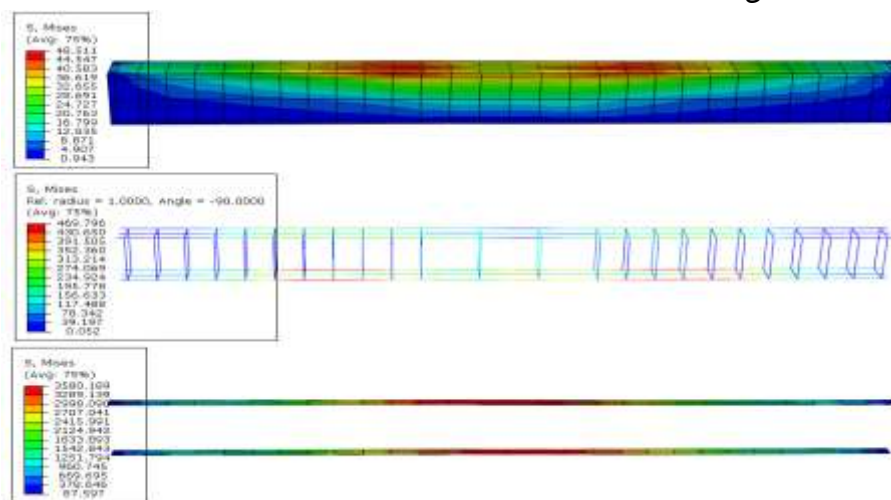


شکل ۴: توزیع تنش فون-میزس در انتهای بارگذاری در اجزای تیر شماره ۱ در حالت بدون پیش تنیدگی

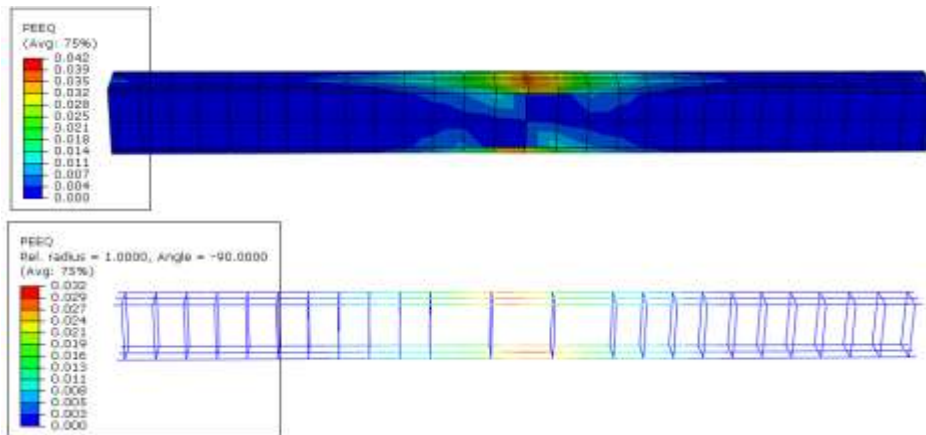


شکل ۵: توزیع معیار کرنش پلاستیک معادل در انتهای بارگذاری در اجزای تیر شماره ۱ بدون پیش تنیدگی

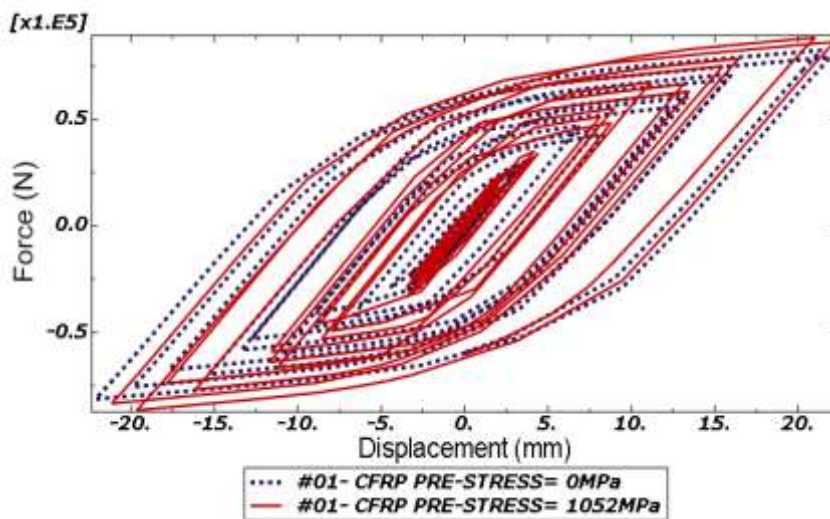
در شکل های ۶ و ۷ توزیع معیار تنش فون میزس و کرنش پلاستیک معادل برای اجزاء تیر شماره ۱ در حالت پیش تنیده (تنش موثر برابر 1052 MPa) نشان داده شده است.



شکل ۶: توزیع تنش فون-میزس در انتهای بارگذاری در اجزای تیر شماره ۱ در حالت پیش تنیده (تنش موثر برابر 1052 MPa)



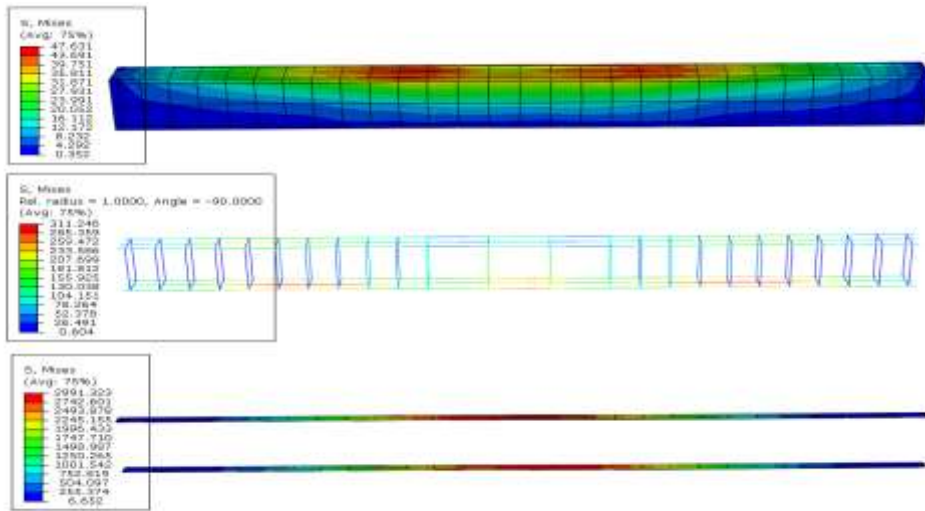
شکل ۷: توزیع معیار کرنش پلاستیک معادل در انتهای بارگذاری در اجزای تیر شماره ۱ در حالت پیش تنیده (تنش موثر برابر 1052 MPa)



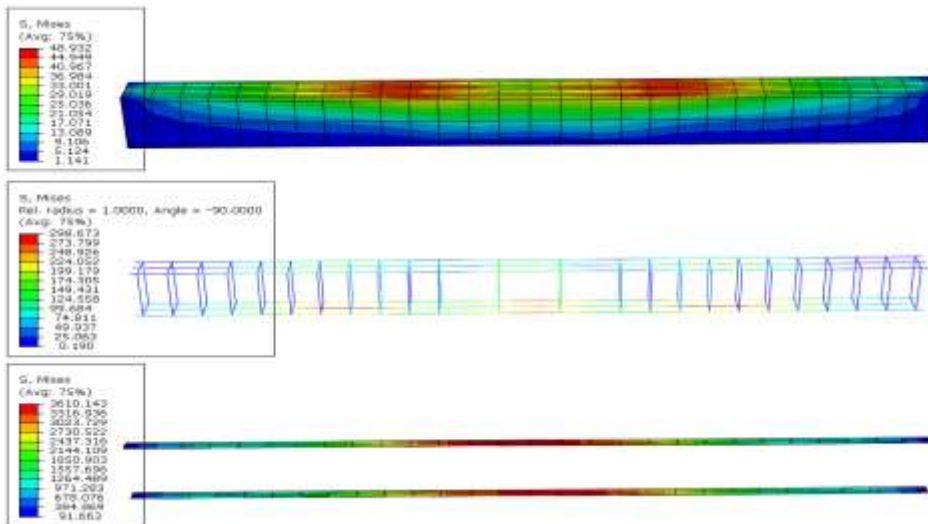
شکل ۸: منحنی بار-جابجایی تیر شماره ۱ با درصد فولاد کششی 0.45% در دو حالت بدون پیش تنیدگی و حالت پیش تنیده

در خصوص نمودار شکل ۸ نکات زیر قابل ذکر است:

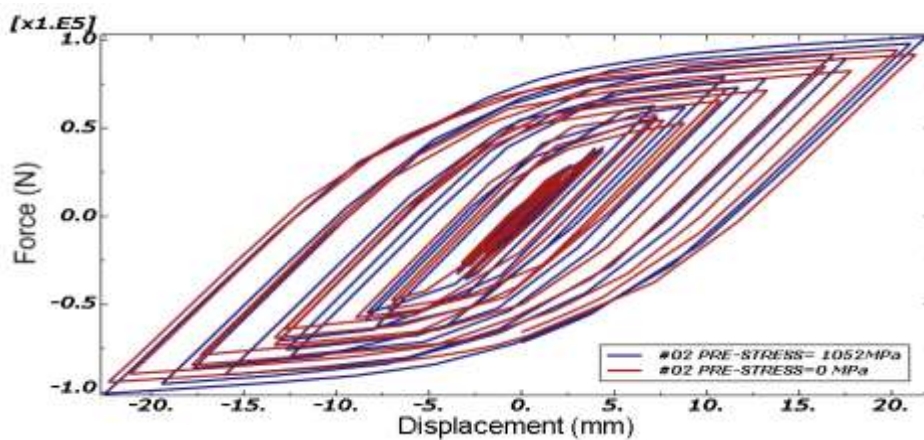
- مقدار حداکثر بار تیر شماره ۱ با درصد فولاد کششی 0.45% در دو حالت بدون پیش تنیدگی و حالت پیش تنیده به ترتیب برابر $77,78 \text{ KN}$ و $86,36 \text{ KN}$ است که پیش تنیدگی موجب افزایش 11% درصدی ظرفیت نهایی شده است.
- مساحت درون هر دو نمودار که معادل انرژی مستهلک شده در حین بارگذاری چرخه ای می باشد برای هر دو حالت به ترتیب برابر $1,59 \text{ E}+07 \text{ N.mm}$ و $1,57 \text{ E}+07 \text{ N.mm}$ است که موجب افزایش $3,1\%$ درصدی این معیار شده است.
- در گام بعدی مقادیر نتایج تیر پیش تنیده با درصد فولاد کششی $1,25\%$ تشریح می شود. این تیر نیز با مشخصات هندسی، میلگردگذاری و تقویت CFRP ثابت در دو حالت بدون پیش تنیده و حالت پیش تنیده تحت بارگذاری چرخه ای با تغییر مکان هدف قرار می گیرد.
- در شکل ۹ سطوح و توزیع معیار تنش فون مزس در تیر با درصد فولاد کششی $1,25\%$ آورده شده است.



شکل ۹: توزیع تنش فون مزس در انتهای بارگذاری در اجزای تیر شماره ۲ در حالت بدون پیش تنیدگی



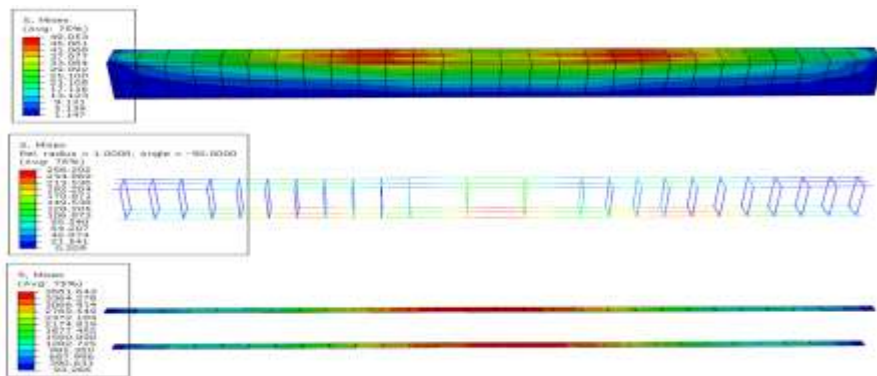
شکل ۱۰: توزیع تنش فون-مزس در انتهای بارگذاری در اجزای تیر شماره ۲ در حالت پیش تنیدگی



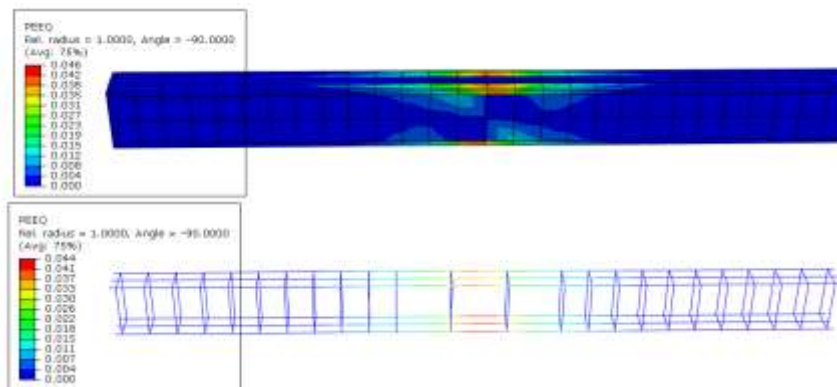
شکل ۱۱: منحنی بار-جابجایی تیر شماره ۲ با درصد فولاد کششی ۱,۲۵٪ در دو حالت بدون پیش تنیدگی و حالت پیش تنیده

در خصوص نمودارهای شکل ۱۱ موارد زیر قابل ذکر است:

- مساحت درون هر دو نمودار که معادل انرژی مستهلک شده در حین بارگذاری چرخه ای می باشد برای هر دو حالت بترتیب برابر $1,84 \text{ E}+07 \text{ N.mm}$ و $1,93 \text{ E}+07 \text{ N.mm}$ است که موجب افزایش $4,89\%$ درصدی این معیار شده است.
- مقدار پاسخ ماکزیمم این تیر در حالت پیش تنیدگی برابر $101,99 \text{ KN}$ ، 21.89 mm است که پیش تنیدگی ورق های CFRP ظرفیت حداکثر این تیر را $10,46\%$ افزایش داده است.
- مقدار پاسخ ماکزیمم (بار بر حسب کیلونیوتن - جابجایی بر حسب میلیمتر) این تیر در حالت بدون پیش تنیدگی برابر $92,19 \text{ KN}$ ، 20.86 mm است.
- در گام بعدی تیر شماره ۳ با درصد فولاد کششی $1,36\%$ بررسی می شود. میلگردهای طولی این تیر همانطور که در جدول ۶ نیز آورده شده است بصورت $f16+2f14$ است.
- در شکل های ۱۲ و ۱۳ توزیع معیار تنش فون میزس و معیار کرنش پلاستیک معادل در تیر با درصد میلگرد کششی $1,36\%$ آورده شده است.

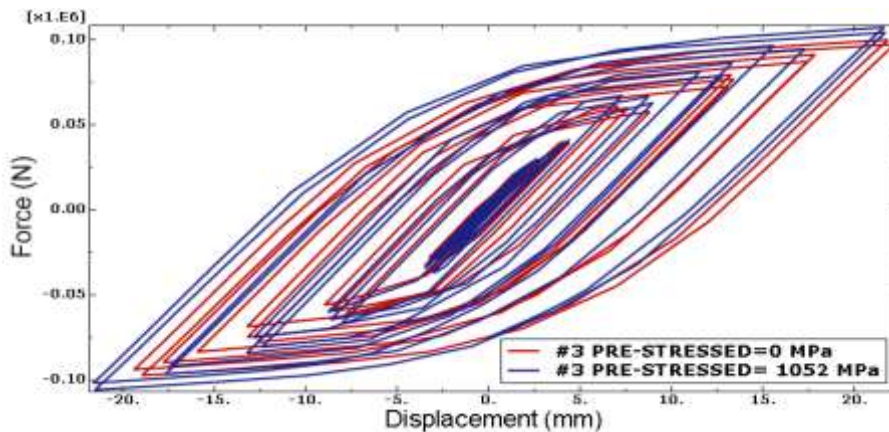


شکل ۱۲: توزیع تنش فون میزس در انتهای بارگذاری در اجزای تیر شماره ۳ با درصد فولاد کششی $1,36\%$ در حالت پیش تنیدگی با تنش موثر 1052 MPa



شکل ۱۳: توزیع معیار کرنش پلاستیک معادل در انتهای بارگذاری در اجزای تیر شماره ۳ با درصد فولاد کششی $1,36\%$ در حالت پیش تنیدگی با تنش موثر 1052 MPa

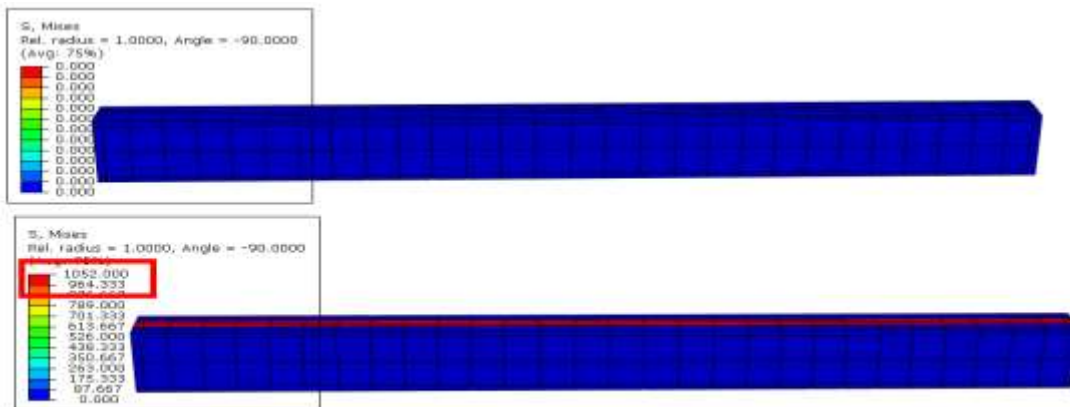
در این تیر معیار کرنش پلاستیک معادل بتن در سطح بیرونی برابر $4,6\%$ است که این مقدار بالاتر از حد گسیختگی در بتن است که نشان دهنده ی تشکیل ترک در این سطح است. در شبکه میلگردگذاری نیز این معیار برابر $4,4\%$ است که کمتر از محدوده 15% تا 20% حد گسیختگی فولاد ساختمانی است. در شکل ۴-۱۶ منحنی بار-جابجایی چرخه ای مربوط به تیر شماره ۳ با درصد فولاد کششی $1,36\%$ نشان داده شده است.



شکل ۱۴: منحنی بار-جابجایی تیر شماره ۳ با درصد فولاد کششی ۱,۳۶٪ در دو حالت بدون پیش تنیدگی و حالت پیش تنیده

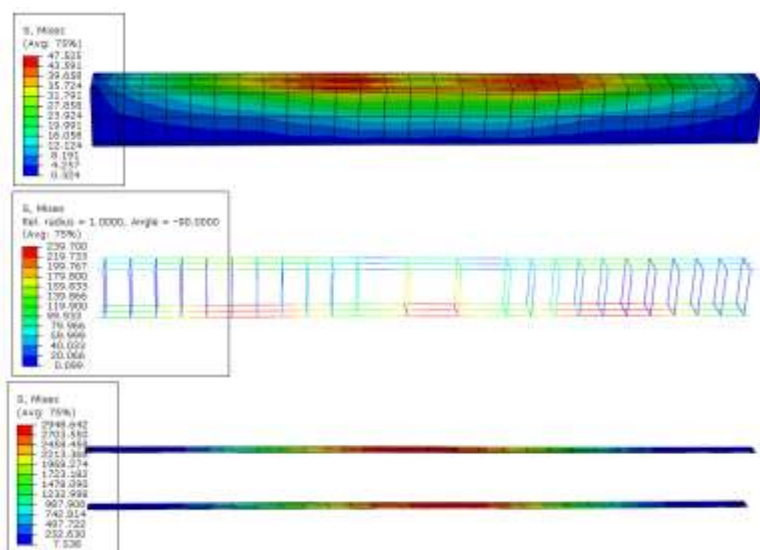
در خصوص نمودار شکل ۱۴ موارد زیر قابل ذکر است:

- مقادیر ظرفیت این تیر در دو حالت پیش تنیده و بدون پیش تنیده برابر $KN104,88$ و $KN97,13$ است که پیش تنیدگی با تنش موثر $MPa1052$ ورق های CFRP موجب افزایش ۷,۸۰٪ درصدی ظرفیت نهایی شده است.
 - از طرفی قابلیت استهلاک انرژی در اثر پیش تنیدگی ورق های CFRP از $E+07N.mm2,06$ به $E+07N.mm2,12$ رسیده است که این معیار را ۲,۹۲٪ افزایش داده است.
- در خصوص تیر با درصد فولاد کششی ۱,۶۱٪ نیز شکل ۱۵ لحظه ی شروع بارگذاری چرخه ای با دو حالت تقویت با ورق CFRP بدون پیش تنیدگی و حالت دوم تقویت با ورق های CFRP با پیش تنیدگی را نشان می دهد.

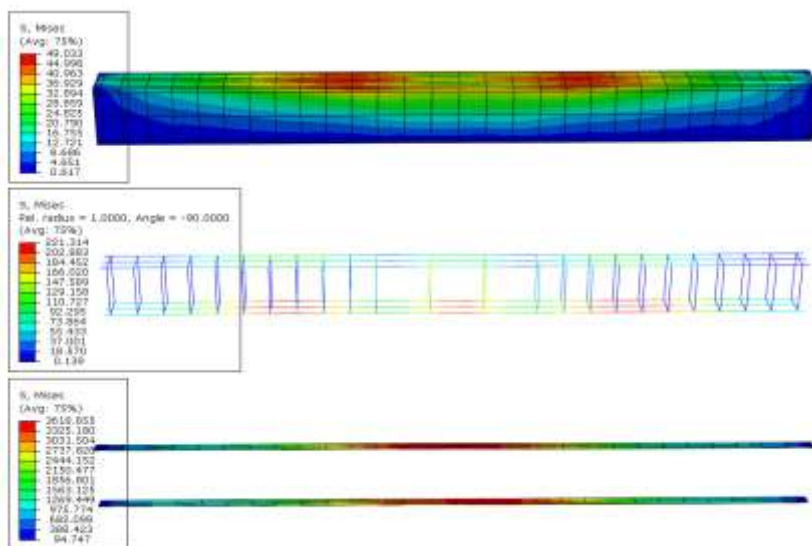


شکل ۱۵: شرایط پیش تنیدگی ورق های CFRP در ابتدای بارگذاری چرخه ای

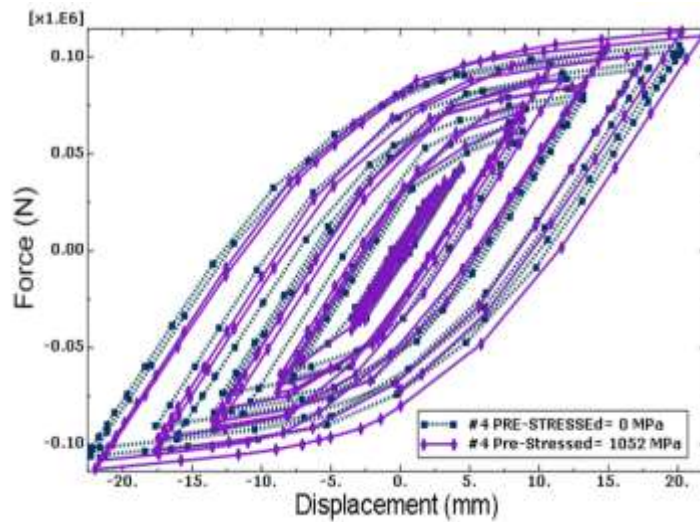
بعد از اعمال بار چرخه ای توزیع معیار تنش در این تیر در دو حالت پیش تنیده و بدون پیش تنیدگی بصورت شکل های ۱۶ و ۱۷ می باشد.



شکل ۱۶: توزیع تنش در اجزاء تیر با درصد فولاد کششی ۱٫۶۱٪
تقویت شده با ورق CFRP بدون پیش تنیدگی



شکل ۱۷: توزیع تنش در اجزاء تیر با درصد فولاد کششی ۱٫۶۱٪
تقویت شده با ورق CFRP پیش تنیده با تنش ۱۰۵۲ MPa



شکل ۱۸: منحنی بار-جابجایی تیر شماره ۴ با درصد فولاد کششی ۱.۶۱٪ در دو حالت بدون پیش تنیدگی و حالت پیش تنیده ۱۰۵۲ MPa

در خصوص نمودارهای شکل ۱۸ موارد زیر قابل ذکر است:

- در خصوص مساحت درون منحنی بار جابجایی نیز از مقدار $E+07N.mm^2,17$ به مقدار $E+07N.mm^2,23$ رسیده است که افزایش ۲.۷۶٪ درصدی را داشته است.
- حداکثر پاسخ این تیر در حالت بدون پیش تنیدگی در جابجایی $mm^20,29$ به مقدار $KN103,23$ است.
- در حالت پیش تنیده مقدار ظرفیت حداکثر این تیر در جابجایی $mm^21,79$ به مقدار $KN110,93$ رسیده است که افزایش ۷.۴۶٪ را تحت اثر پیش تنیدگی را داشته است.

۷- نتیجه گیری

اثرات درصد فولاد کششی در پیش تنیدگی تیرهای بتن آرمه بر روی دو معیار ظرفیت نهایی و قابلیت استهلاک انرژی بررسی شد. بدین منظور چهار تیر با درصد فولاد کششی ۰.۴۵٪، ۱.۲۵٪، ۱.۳۶٪ و ۱.۶۱٪ مدل سازی شدند که نتایج مقایسه دو پارامتر مذکور را در نمودارهای شکل ۱۹ مشاهده می کنید، در بین این تیرها، تیر با درصد ۱.۲۵٪ بیشترین درصد افزایش ظرفیت نهایی و قابلیت استهلاک انرژی را داشته است. در این مقاله برای پارامتر درصد فولاد کششی ۱.۲۵٪ درصد پیشنهاد می شود.



شکل ۱۹: اثرات درصد فولاد کششی بر ظرفیت نهایی و قابلیت استهلاک انرژی

مراجع

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

