

بررسی اثر لایه های AFRP بر شکل پذیری تیرهای بتن مسلح با مقاومت بالا (HSC)

رضا رهگذر^۱ ، منصور قلعه نوی^۲ ، و احسان عدیلی^۳

۱- استادیار دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

۲- استادیار دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان

خلاصه

استفاده از پلیمرهای الیاف مصنوعی (FRP) بعلاوه خواص بسیار مناسب آنها مانند وزن کم، مقاومت زیاد، مقاومت در برابر خوردگی و سادگی اجرا روزبه روز گسترش می یابد. در این تحقیق، تعداد ۱۵ تیر HSC، شامل تیرهای مینا یا تیپ اول که مسلح کننده آنها فولادی است و بدون روکش پلیمری می باشند و تیرهای تیپ دوم که مسلح کننده فولادی دارند اما تعداد لایه های مختلفی از AFRP در کف آنها نصب شده است، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند. تمامی تیرها توسط نرم افزار ANSYS مدل سازی شده اند. همچنین جهت تعیین صحت عملکرد نرم افزار، به نمایندگی از هر تیپ یک نمونه آزمایشگاهی انتخاب و با نمونه مدل سازی شده مقایسه گردیده است. نتایج به صورت جداول و گرافها ترسیم گردیده اند و رفتار تیرهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفته اند. در نهایت مشخص گردید که حضور لایه های AFRP بر شکل پذیری تیر اثر قابل ملاحظه ای دارد. همچنین اثر تعداد میلگرد کششی در هر دو تیپ تیر بر شکل پذیری نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

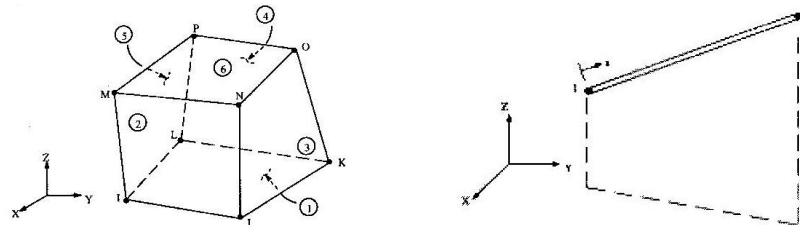
کلیدواژه ها : بتن با مقاومت بالا ، AFRP ، ANSYS ، شکل پذیری

۱. مقدمه

امروزه مبحث مقاوم سازی به یکی از مهمترین مباحث سازه ای تبدیل گشته است. حدوداً ده سال پس از رونق فراوان سازه های بتنی بعد از جنگ جهانی دوم نیاز به مقاوم سازی این سازه ها پدیدار گشت. سازه های بتنی به دلایل مختلفی از جمله عوامل طبیعی مانند زلزله و سیل ، عوامل انسانی مانند جنگ ، تغییر کاربری سازه و همچنین تغییرات آیین نامه ای و عدم تناسب سازه با آیین نامه های جدید نیاز به مقاوم سازی و بازسازی دارند. نخستین راه حل برای مقاوم سازی تیرها و ستونهای بتنی دورپیچ کردن آنها با ورق های فولادی بود این شیوه اگرچه امروزه نیز استفاده میشود اما به علت تحمیل وزن اضافی به سازه و حضور پلیمرهای الیاف مصنوعی در بازار کم رونق گشته است. استفاده از ورقهای FRP از اواخر دهه هشتاد میلادی آغاز گشت ، در دهه نود رونق گرفت و پس از آغاز هزاره سوم میلادی تبدیل به مهمترین مصالح مقاوم سازی گردید. Bonacci و دیگران رفتار تیرهای بتن مسلح مقاوم سازی شده با FRP را مورد بررسی قرار دادند [۱]. Fanning و دیگران نیز بطور دقیقی رفتار تیرهای بتن مسلح مقاوم سازی شده با CFRP را بررسی نمودند. آنها توانستند خیز نهایی این تیرها را بطور دقیقی محاسبه نمایند [۲]. Thomsen و دیگران در سال ۲۰۰۴ مود شکست خمشی تیرهای بتنی مقاوم سازی شده با لایه های FRP را مورد تحلیل قرار دادند. آنها پس از آزمایشات فراوان دریافتند که طول لایه FRP نقش مهمی در مقاومت خمشی آن دارد [۳]. در ایران نیز تحقیقات مناسبی در مورد سازه های مقاوم سازی شده با FRP انجام گردیده است. آقایان موسوی خندان و محمدی تیرهای بتنی تقویت شده با این کامپوزیتها را تحت بار دینامیکی مدل سازی نمودند [۴]. آنها روش مناسبی برای بررسی رفتار گسیختگی و جداسازی لایه های FRP از بتن پیشنهاد نمودند. آقایان حسینی و فدایی معادلات تنش- کرنش بتن محصور شده با FRP را بدست آوردند. [۵]. در این تحقیق تعداد ۱۵ تیر بتنی تقویت شده با تعداد لایه های مختلفی از AFRP و همچنین تعداد مختلفی از میلگردهای کششی توسط نرم افزار ANSYS مدل سازی شده اند و رفتار آنها تحت خمش مورد بررسی قرار گرفته است. نکته قابل توجه اینکه بتن استفاده شده در این تیرها بتن با مقاومت بالا HSC میباشد.

۲. مدل سازی با نرم افزار ANSYS

نرم افزار ANSYS یک نرم افزار مناسب جهت تحلیل غیرخطی می باشد. مراحل طراحی به کمک نرم افزار ANSYS شامل سه قسمت پیش پردازنده (Preprocessor)، پردازنده (Solution) و پس پردازنده (Post processor) می باشد. [۶] در این تحقیق از نرم افزار ANSYS ۹ استفاده گردیده است. در نرم افزار ANSYS بیش از ۱۰۰ نوع المان جهت مدلسازی وجود دارد. در این تحقیق جهت مدل سازی بتن از المان Concrete ۶۵ که یک المان سه بعدی هشت گرهی می باشد و سه درجه آزادی در هر گره دارد استفاده شده است. همچنین جهت مدل سازی میلگرد ها از المان ۸ Link که یک المان دو گرهی و با سه درجه آزادی در هر گره می باشد استفاده شده است. لایه های FRP با المان SOLID۴۶ مدلسازی شده اند. [۶]



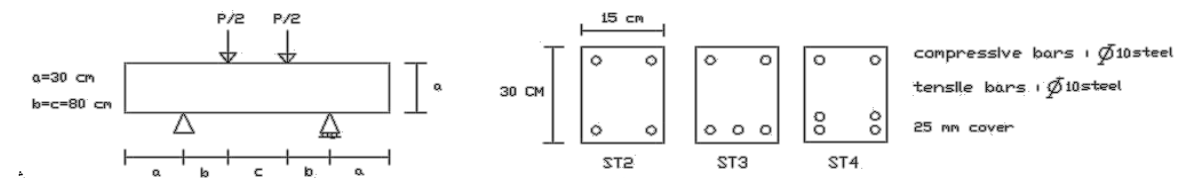
شکل ۱- المان های ۸ link و ۶۵ concrete

۳. نمونه های مدل سازی شده

در این تحقیق تعداد ۱۵ تیر بتن مسلح با مقاومت بالا HSC که با لایه های AFRP تقویت شده اند مدلسازی گردیدند. تیرها در دو تیپ مختلف طبقه بندی شده اند. تیرهای تیپ اول تیرهایی هستند که مینا میباشند و هیچ پوششی از جنس AFRP ندارند. این تیرها با عنوان STi نامگذاری شده اند. دو حرف اول یعنی ST بیانگر مسلح کننده بتن که از جنس فولاد است میباشد و حرف I نشانگر تعداد میلگرد کششی در تیر میباشد. مشخصات دقیقتر این تیرها در جدول ۱ و شکل ۱ دیده میشوند.

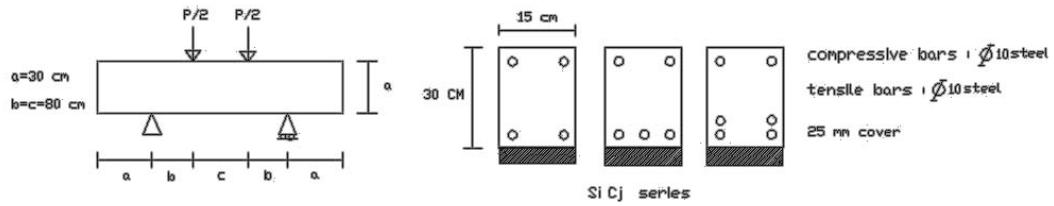
جدول ۱ - مشخصات تیرهای تیپ اول

نام تیر	مشخصات میلگردهای فولادی		مشخصات بتن		
	تنش تسلیم	مدول الاستیسیته	مقاومت فشاری ۲۸ روزه f'_c	مدول الاستیسیته	مقاومت کششی
ST۲	۵۳۳	$۲,۱ \times ۱۰^۵$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵
ST۳	۵۳۳	$۲,۱ \times ۱۰^۵$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵
ST۴	۵۳۳	$۲,۱ \times ۱۰^۵$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵



شکل ۲- تیرهای تیپ اول

تیرهای تیپ دوم تیرهایی هستند که پوششهایی از جنس AFRP در کف آنها نصب شده است. این تیرها با نام $S_i C_j$ نامگذاری شده اند. حرف اول یعنی S نشان دهنده میلگردهای فولادی است و عدد پس از آن بیانگر تعداد میلگردهای فولادی در ناحیه کششی میباشد. حرف دوم یعنی C بیان کننده حضور کاوری از جنس AFRP میباشد و عدد پس از آن نشاندهنده تعداد لایه های پوشش دهنده است. جدول ۲ و شکل ۳ مشخصات دقیقتری از این تیرها را بیان مینماید.



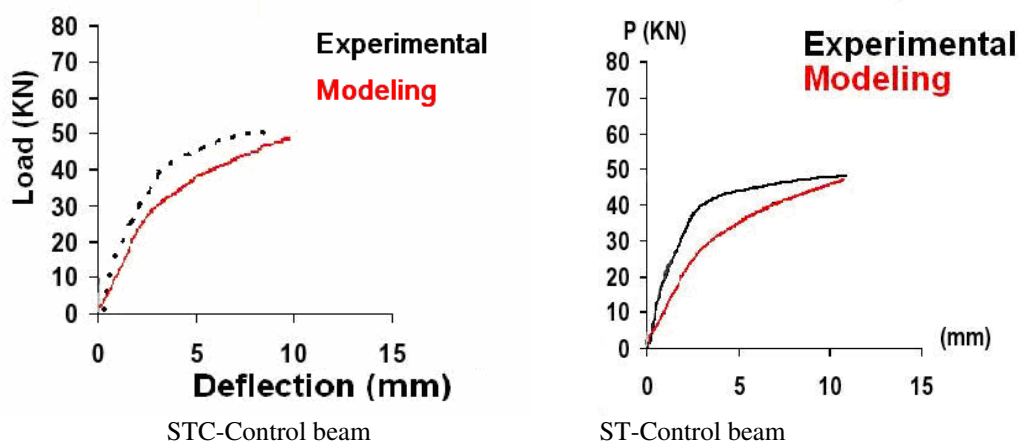
شکل ۳- تیرهای تیپ دوم

جدول ۲- مشخصات تیرهای تیپ دوم

نام تیر	مشخصات روکش AFRP			مشخصات میلگردهای فولادی		مشخصات بتن		
	تعداد لایه	مدول الاستیسیته	مقاومت کششی	تنش تسلیم	مدول الاستیسیته	مقاومت فشاری ۲۸ روزه f'_c	مدول الاستیسیته	مقاومت کششی
S ₂ C ₁	۱	12×10^4	۲۹۰۰	۵۳۳	$2,1 \times 10^5$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵
S ₃ C ₁	۱	12×10^4	۲۹۰۰	۵۳۳	$2,1 \times 10^5$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵
S ₄ C ₁	۱	12×10^4	۲۹۰۰	۵۳۳	$2,1 \times 10^5$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵
S ₂ C ₂	۲	12×10^4	۲۹۰۰	۵۳۳	$2,1 \times 10^5$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵
S ₃ C ₂	۲	12×10^4	۲۹۰۰	۵۳۳	$2,1 \times 10^5$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵
S ₄ C ₂	۲	12×10^4	۲۹۰۰	۵۳۳	$2,1 \times 10^5$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵
S ₂ C ₃	۳	12×10^4	۲۹۰۰	۵۳۳	$2,1 \times 10^5$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵
S ₃ C ₃	۳	12×10^4	۲۹۰۰	۵۳۳	$2,1 \times 10^5$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵
S ₄ C ₃	۳	12×10^4	۲۹۰۰	۵۳۳	$2,1 \times 10^5$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵
S ₂ C ₄	۴	12×10^4	۲۹۰۰	۵۳۳	$2,1 \times 10^5$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵
S ₃ C ₄	۴	12×10^4	۲۹۰۰	۵۳۳	$2,1 \times 10^5$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵
S ₄ C ₄	۴	12×10^4	۲۹۰۰	۵۳۳	$2,1 \times 10^5$	۸۴,۵	۴۵۹۶۲	۵,۰۵

۴. کالیبراسیون نرم افزار

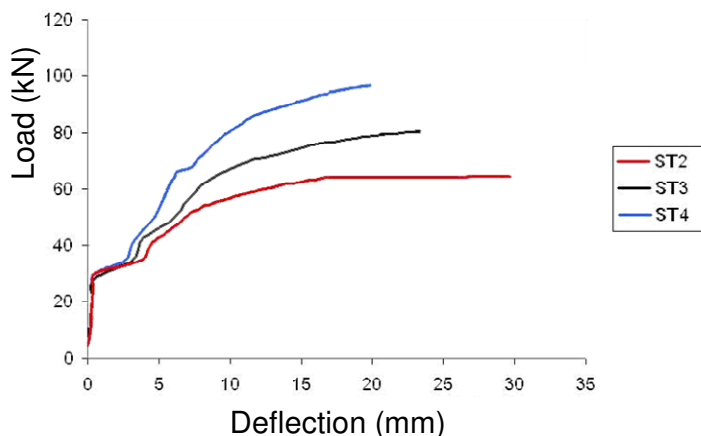
پیش از اینکه ۱۵ تیر اصلی مورد مطالعه مدل گردند، جهت تعیین صحت عملکرد نرم افزار، نتایج تحلیل نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی دو تیر تحت خمش مقایسه می گردد. یک تیر بدون پوشش و تیر دیگر با پوشش AFRP که بترتیب نماینده تیپهای اول و دوم هستند.. تیر اول با نام ST-Control beam تیری است که با فولاد مسلح شده است و نتایج آزمایشگاهی آن توسط آقایان صدر ممتازی، رنجبر و پیراقوم [۷] (تحت عنوان کنترل) ارائه شده است. شکل ۴ مقایسه نتایج مدل سازی با ANSYS و نتیجه آزمایشگاهی را نشان می دهد. تیر دوم با نام STC-Control beam تیری است که با AFRP مقاوم سازی شده و نتایج آزمایشگاهی آن توسط آقایان صدر ممتازی و دیگران [۷] (تحت عنوان G1) ارائه شده است. شکل ۴ مقایسه نتایج مدل سازی با ANSYS و نتیجه آزمایشگاهی را نشان می دهد.



شکل ۴- مقایسه نتایج مدل سازی با ANSYS و نتیجه آزمایشگاهی

۵. مقایسه رفتار تیرها

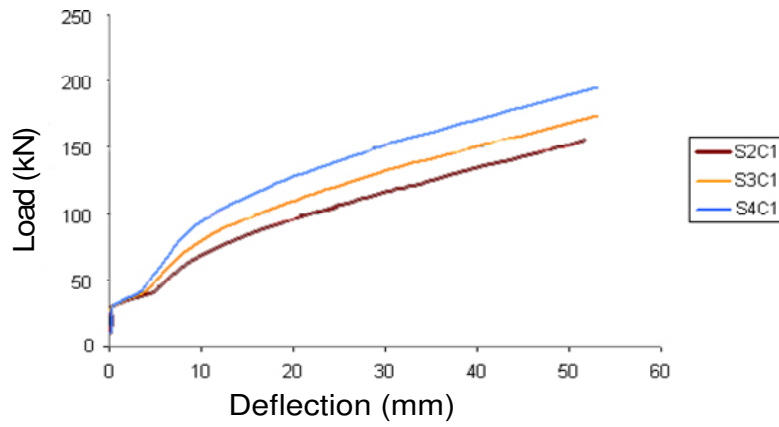
رفتار تیرهای تیپ اول که بدون پوششی از جنس AFRP هستند در شکل ۵ مقایسه گردیده اند. همانطور که پیش بینی می شد هرچه تعداد میلگرد ناحیه کششی بیشتر شود نیروی گسیختگی نهایی تیر و شکل پذیری آن بیشتر میگردد.



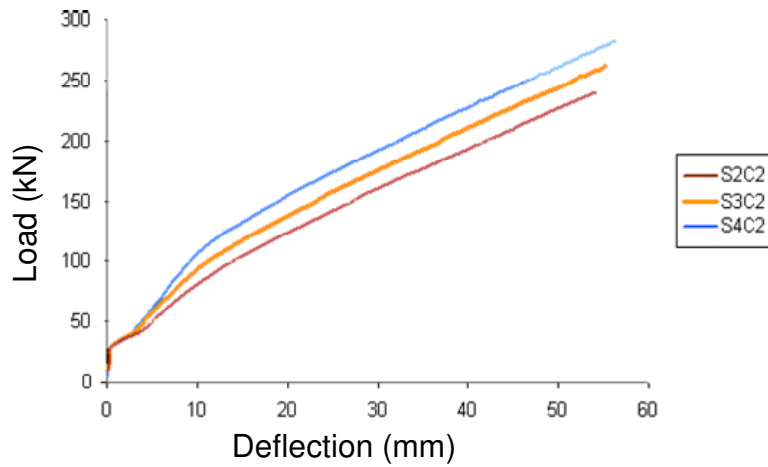
شکل ۵- تیرهای تیپ اول



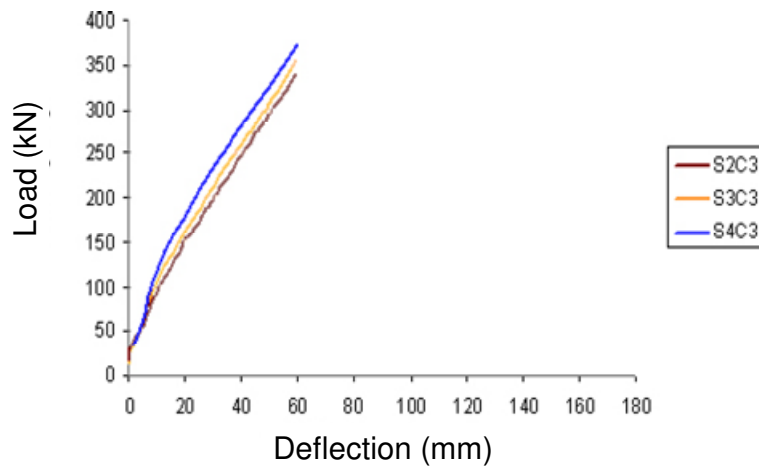
اکنون میتوان رفتار تیرهای تیپ دوم را با یکدیگر مقایسه نمود. شکلهای ۶، ۷، ۸ و ۹ رفتار تیرهای تیپ دوم را به ترتیب با یک، دو، سه و چهار لایه AFRP در کف نشان میدهند.



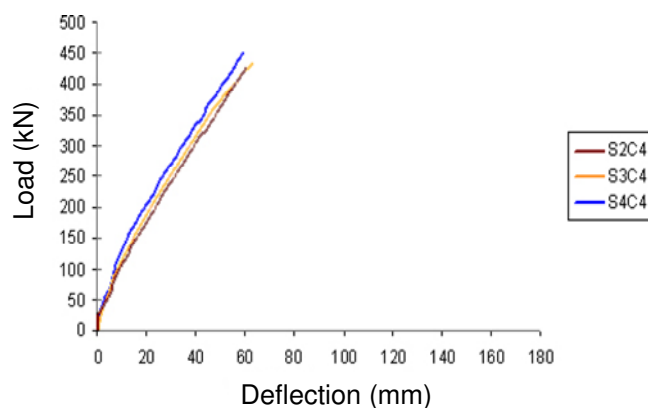
شکل ۶- تیرهای تیپ دوم با یک لایه AFRP



شکل ۷- تیرهای تیپ دوم با دو لایه AFRP

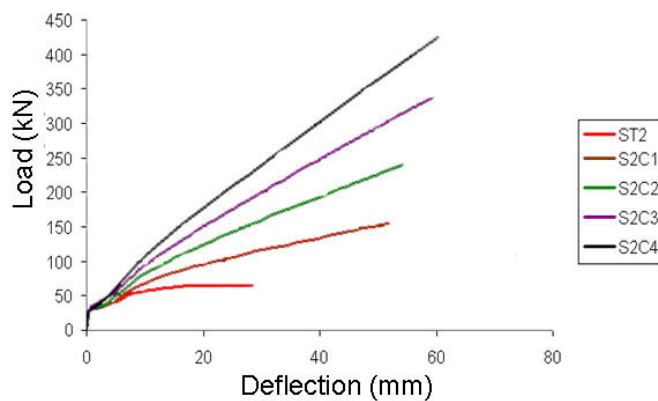


شکل ۸- تیرهای تیپ دوم با سه لایه AFRP

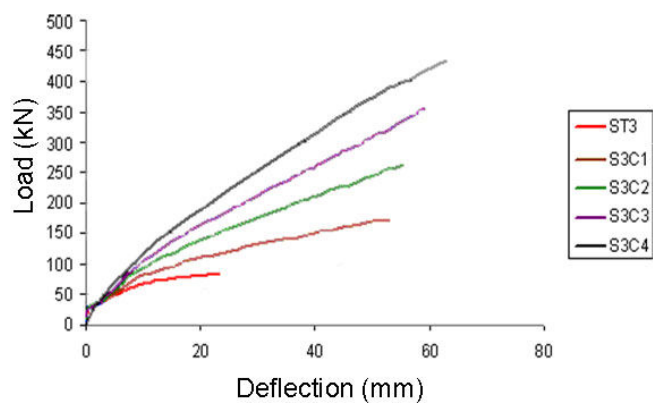


شکل ۹- تیرهای تیپ دوم با چهار لایه AFRP

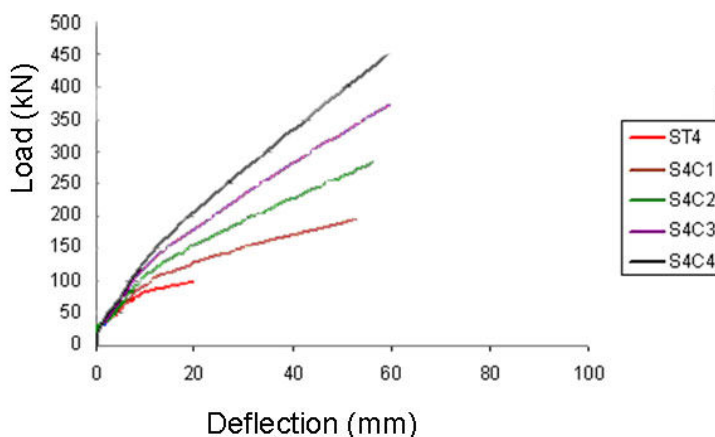
اکنون تیرهایی که در ناحیه کششی تعداد میلگرد یکسان دارند با تعداد لایه های مختلف AFRP با یکدیگر مقایسه میگردند. شکل های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ بترتیب رفتار تیرهایی را نشان میدهند که دو، سه و چهار میلگرد در ناحیه کششی دارند.



شکل ۱۰- تیرهای با دو میلگرد کششی



شکل ۱۱- تیرهای با سه میلگرد کششی



شکل ۱۲- تیرهای با چهار میلگرد کششی

جدول ۳- وضعیت دقیق تری از رفتار تیرها

نام	میلگرد کششی	روکش AFRP	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن (f'_c) (MPa)	تغییر شکل بیشینه (mm)	شکل پذیری ($\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y}$)	نیروی گسیختگی (KN)	اثر افزایش میلگرد بر نیروی گسیختگی (درصد)
ST۲	STEEL	-	۸۴,۵	۲۹,۶۹	۷,۸۱	۶۴,۶	-
ST۳	STEEL	-	۸۴,۵	۲۶,۳۵	۸,۷۸	۸۰,۵	۲۴
ST۴	STEEL	-	۸۴,۵	۱۹,۸۸	۷,۹۵	۹۶,۵	۲۰
S۲C۱	STEEL	۱	۸۴,۵	۵۱,۷۳	۱۰,۳۴	۱۵۵	-
S۳C۱	STEEL	۱	۸۴,۵	۵۳,۰۳	۱۳,۲۵	۱۷۴	۱۲
S۴C۱	STEEL	۱	۸۴,۵	۵۳,۰۹	۱۷,۶۹	۱۹۵	۱۲
S۲C۲	STEEL	۲	۸۴,۵	۵۴,۱۷	۱۲,۰۳	۲۴۰	-
S۳C۲	STEEL	۲	۸۴,۵	۵۵,۲۹	۱۸,۴۳	۲۶۱,۸	۹
S۴C۲	STEEL	۲	۸۴,۵	۵۶,۲۸	۲۳,۳۱	۲۸۲,۲	۷
S۲C۳	STEEL	۳	۸۴,۵	۵۹,۴۰	۱۴,۸۵	۳۳۸,۲	-
S۳C۳	STEEL	۳	۸۴,۵	۵۹,۲۱	۱۹,۷۳	۳۵۵,۷۷	۵
S۴C۳	STEEL	۳	۸۴,۵	۵۹,۷۰	۲۳,۸۸	۳۷۳,۵۲	۵
S۲C۴	STEEL	۴	۸۴,۵	۶۰,۲۷	۱۷,۲۲	۴۲۵	-
S۳C۴	STEEL	۴	۸۴,۵	۶۲,۹۷	۲۵,۱۸	۴۳۴,۱	۲
S۴C۴	STEEL	۴	۸۴,۵	۵۹,۱۸	۲۹,۵۹	۴۵۰	۳

۶. بحث و تحلیل نتایج

- ۱- هرچه تعداد میلگردهای کششی در تیر های تیپ اول (بدون پوشش AFRP) افزایش یابد از تغییر شکل بیشینه قابل تحمل تیر کاسته میشود. همچنین نیروی گسیختگی تیر افزایش قابل ملاحظه ای پیدا میکند اما شکل پذیری تیر تغییر محسوسی نخواهد داشت. همچنین با افزایش تعداد میلگرد کششی تیر های تیپ اول اثر افزایش میلگرد بر نیروی گسیختگی کاهش می یابد
- ۲- در تمامی تیر های تیپ دوم (با پوشش AFRP) با افزایش تعداد میلگرد کششی نیروی گسیختگی تیر افزایش می یابد اما این اثر با افزایش تعداد لایه های AFRP کمرنگ تر میگردد. دلیل این امر آنست که در نزدیکی بار نهایی اثر مقاومت لایه های AFRP بیشتر است و اثر مقاومت میلگردها کمتر می شود.
- ۳- در تمامی تیر های تیپ دوم با افزایش تعداد لایه های AFRP شکل پذیری تیر افزایش می یابد. البته افزایش تعداد میلگرد کششی نیز موجب افزایش شکل پذیری می گردد.
- ۴- در تمامی تیر های تیپ دوم هرچه تعداد لایه های AFRP بیشتر گردد تغییر شکل بیشینه تیر در واقع خیز قابل تحمل آن بیشتر می گردد. اما افزایش تعداد میلگردهای کششی اثری در این پارامتر ندارد.
- ۵- درصد اثر افزایش میلگرد کششی در تمامی تیر های تیپ دوم که تعداد لایه AFRP یکسانی دارند تقریباً ثابت است. این درصد با افزایش تعداد لایه AFRP کاهش می یابد.

تقدیر و تشکر

نگارندگان بدینوسبب از زحمات جناب آقای مهندس مهر مشهدی و جناب آقای دکتر ساعدی کمال تقدیر و تشکر را دارند.

منابع و مراجع

- ۱- Bonacci, J.F., and Maalej, M. (۲۰۰۱). "Behavioral trends of RC beams strengthened with externally bonded FRP." J. Compos. Constr., ۵(۲), ۱۰۲-۱۱۳.
- ۲- Fanning, P. and Kelly, O. (۲۰۰۱). "Ultimate response of RC beams strengthened with CFRP plates". J. Compos. Constr., ۵(۲), ۱۲۲-۱۲۷.
- ۳- Thomsen, H. Spacone, E. Limkatanyu, s. and Camata, G. (۲۰۰۴). "Failure Mode Analyses of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymers" Journal of Composites for construction @ ASCE / March / April ۲۰۰۴.
- ۴- موسوی خندان، امیر اردلان و محمدی، سهیل. "مدلسازی تیرهای بتنی تقویت شده به وسیله ورقهای FRP کامپوزیت تحت اثر بارگذاری دینامیکی". اولین همایش کاربرد کامپوزیت های FRP در بهسازی و ساخت سازه ها، ۱۵ اردیبهشت ۱۳۸۳.
- ۵- حسینی، عبدالله و فدایی، سعید. "بررسی معادلات تنش- کرنش بتن محصور شده توسط FRP". اولین همایش کاربرد کامپوزیت های FRP در بهسازی و ساخت سازه ها، ۱۵ اردیبهشت ۱۳۸۳.
- ۶- جمشیدی، نیما. و جوانبخت، بهاره "آموزش طراحی اجزا و مقاومت مصالح به کمک نرم افزار ANSYS" انتشارات سیمین دخت، ۱۳۸۴.
- ۷- صدر ممتازی، علی. رنجبر، ملک محمد و مهدوی پیراقوم، قربان "بررسی رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح شده با الیاف CFRP و GFRP" سومین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۳۸۶.
- ۸- گرجی نژاد، سعید. و زارعی نژاد، محمد "تحلیل به روش اجزاء محدود همراه با خودآموز کامل نرم افزار ANSYS" انتشارات ارس رایانه.