بررسی تجربی رفتار خمشی تیر های بتن آرمه تقویت شده با ورق *CFRP* پیش تنیده

حسام حسنی تبار[1] ، مرتضی حسینعلی بیگی[2] ، پیام شفیق[3]، سعید فلاحیان[4]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه شمال ، آمل ، ایران

2- استادیار دانشکده مهندسی عمران ، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ، ایران

3- عضو هیات علمی دانشگاه شمال ، آمل ، ایران

4- عضو هیات علمی دانشگاه شمال ، آمل ، ایران

خلاصه

مقاوم سازی سازه ها با استفاده از مواد الیاف پلیمری مسلح شده (*FRP*[5])، امروزه به عنوان روشی مرسوم و کار آمد ، در اکثر نقاط جهان پذیرفته شده است. با این وجود 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 . از این رو در این تحقیق به بررسی اثر پیش تنیدگی به عنوان شیوه ای نوین در امر تقویت خمشی تیر های بتن آرمه می پردازیم . بر این اساس تقویت خمشی به وسیله ورق *CFRP*[6] به صورت غیر پیش تنیده و پیش تنیده بر 8 تیر بتن آرمه انجام گرفت . سطوح پیش تنیدگی در دو سطح 20٪ و 35٪ مقاومت نهایی لمینیت *CFRP* تعیین شدند . نتایج حاکی از تاثیر مطلوب پیش تنیدگی بر افزایش باربری و استفاده مطلوب از ورق های *CFRP* بود .

کلمات کلیدی: تقویت خمشی ، تیر بتن آرمه ، ورق *CFRP* ، پیش تنیدگی

1. مقدمه

در سراسر دنیا سازه هایی وجود دارند که برای سکونت یا حمل و نقل مورد استفاده قرار می گیرند . این سازه ها به دلایلی نظیر افزایش بارگذاری ، تغییر در کاربری سازه ،تغییر در آئین نامه های طراحی و ضعف در اجرا و یا خسارات ناشی زلزله و جنگ نیاز به تعمیر و یا بازسازی دارند . با انتخاب گزینه تعمیر، نوبت به انتخاب بین شیوه های متفاوت تقویت سازه با توجه به محاسن و معایب هر روش می رسد . استفاده از مصالح الیاف پلیمری مسلح شده (*FRP*) با توجه به مواردی چون وزن کم ، راحتی در نصب ، دوام ومقاومت کششی بالا ، مقاومت خوب در برابر خوردگی های شیمیایی و دسترسی نامحدود در اندازه و ابعاد به گزینه ای اجتناب ناپذیر در تصمیم گیری مهندسان تبدیل شده است .

استفاده از این مصالح با توجه به گستردگی روز افزون آن در بین گزینه های مختلف از مقاوم سازی ، اهمیت این مصالح و همچنین نیاز به بررسی بیشتر در مورد به کار گیری آن در امر مقاوم سازی را می رساند . در این راستا با توجه به خصوصیات بسیار مطلوب این مصالح ، مطالعه و ارائه روش های نوین به منظور هرچه بهتر کردن نتایج این گونه از تقویت و گسترش عملکرد آن در سازه های مقاوم شده از موارد پیش برنده این تکنیک از مقاوم سازی به شمار می رود . در این میان تکنیک پیش تنیدگی می تواند از گزینه های نوین در امر مقاومسازی به وسیله الیاف *FRP* باشد .

[1] دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه شمال

[2] ریاست دانشکده عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

[5] Fiber Reinforced Polymer

[6] Carbon Fiber Reinforced Polymer

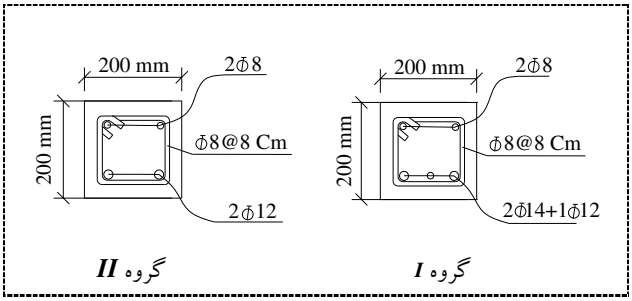
2. معرفی روش تقویت خمشی تیر های بتن آرمه با استفاده از ورق های *FRP* پیش تنیده

ورق های *FRP* عموماً بر سطح کششی تیر های بتنی که می خواهیم مقاوم شوند ، به کار برده می شوند . این روش با عنوان *EBR* طی تحقیقات بیشماری مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است . تحقیقات نشان می دهند که در این روش عموماً به علت جدا شدن ورق پیش از موعد، عملاً استفاده از کل مقاومت *FRP* امکان پذیر نیست *[1]*.از همین رو برای بالا بردن کارایی روش *EBR* سیستم های مهار کننده متفاوتی ارائه شده است *[5]*. اما به منظور استفاده کامل از تمامی خصوصیات *FRP* و همچنین کاهش تعداد و عرض ترک ها و همینطور کنترل میزان خیز تیر و در مواردی از بین بردن اثرات بارهای مرده و زنده ، از سیستم پیش تنیدگی ورق های *FRP* استفاده می شود .

تکنیک پیش تنیدگی ورق های *FRP* به منظور تقویت خمشی تیر ها و شاهتیر های بتن آرمه تاکنون بر چهار اساس بوده اند . روش اول چسباندن ورق های *FRP* بر تیر های انحنا یافته بود . این روش که توسط *Saadatmanesh* و *Ehsani (1991) [8]* مورد استفاده قرار گرفت بر ایجاد نیروی پیش تنیدگی با استفاده از انحنای ناشی از پیش بارگذاری تیر استوار بود . نیروی پیش تنیدگی حاصل از این روش میزان اندکی است . روش دوم کشش خارجی ورق های *FRP* و سپس چسباندن آنها بر سطح کششی تیر است . این روش که عمومی ترین روش اعمال نیروی پیش تنیدگی است توسط *Deuring (1993) [2]* بروی چندین تیر با مقیاس های بزرگ و متوسط انجام گرفت . همچنین در مرکز تحقیقات فدرال سوئیس *(EMPA)* چندین نمونه از تقویت به وسیله پیش تنیدگی خارجی انجام گرفته است *[9,6]*. نیروی پیش تنیدگی اعمالی در این روش عموماً با استفاده از جک های هیدرولیکی انجام می شود . از معایب استفاده از این نوع جک ها ، کاهش نیروی اعمالی در اثر نشت روغن در دراز مدت می باشد . روش سوم ، پیش تنیدگی ورق های *FRP* به صورت متصل به شاه تیر بتن آرمه می باشد . در این روش که توسط محققین معدودی مورد آزمایش قرار گرفته است ، با اتصال مهار هایی در دو سر شاه تیر و اتصال ورق *FRP* به آنها و اعمال نیرو توسط جک های هیدرولیکی به مهار متحرک ، در ورق نیروی پیش تنیدگی اعمال می شود *[10, 4, 3]*.روش چهارم نیز که برای اولین بار توسط *Nanni* و همکارانش *[7]* مورد آزمایش قرار گرفت با ایجاد یک انحنا در ورق، نیروی پیش تنیدگی اندکی در ورق *CFRP* ایجاد می شود . این شیوه با توجه به سطح پیش تنیدگی کم ایجاد شده در ورق ، زیاد مورد اقبال واقع نشده است .

3. نمونه های آزمایشگاهی و خصوصیات مصالح مصرفی

در این تحقیق از 8 تیر بتنی با ابعاد *mm* 200×200 و طول آزاد *mm* 2000 استفاده شده است . نمونه ها در دو گروه *I* و *II* با توجه به میزان میلگرد کششی آنها تقسیم بندی شدند(شکل 1) . گروه *I* با 2 عدد میلگرد نمره 14 و یک عدد میلگرد نمره 12معادل با $\%45\rho_{\max}$ و گروه *II* با دو عدد میلگرد نمره 12 معادل $\%24\rho_{\max}$ به عنوان میلگرد های کششی مسلح گشتند . در هر دو گروه از دو عدد میلگرد نمره 8 به عنوان میلگرد های فشاری و از همین نمره به فاصله *cm* 8 به عنوان میلگرد های برشی (خاموت) استفاده شد .



شکل 1- جزئیات میلگرد گذاری تیر های گروه *I* و *II*

سعی شد مقاومت فشاری بتن در نمونه های آزمایشگاهی در یک مقدار ثابت و برابر *Mpa* 30 در نمونه های استوانه ای استاندارد 28 روزه باشد . این میزان در همه نمونه ها نزدیک به مقدار مذکور و با حداکثر انحراف 15٪مشاهده شد . تنش جاری شدن فولادهای مورد استفاده نیز برابر *Mpa* 380 تعیین شدند .

مصالح *FRP* مورد استفاده در این تحقیق از نوع لمینت *CFRP* با سطح مقطع *mm* 1×50 بوده و بر اساس تست *ASTM D3039* دارای مشخصات مکانیکی موجود در جدول شماره (1) است . چسب اپوکسی مورد استفاده نیز چسب *Sikadure 30* از نوع نرمال بوده است .

جدول 1- مشخصات مکانیکی *CFRP*

مقاومت نهایی کششی	2520*MPa*

مدول الاستیسیته	230 *GPa*
کرنش نهایی *FRP*	٪ 1/1

ورق فولادی مورد استفاده به منظور تقویت فشاری بتن از نوع فولاد نرمه بوده و کشش نهایی آن برابر *MPa* 220 می باشد .

4. ابزار پیش تنیدگی

به منظور پیش تنیدگی ورق *CFRP* در این آزمایش از سیستم پیش تنیدگی خارجی استفاده شد . بر این اساس با توجه به مشکلات اکثر جک ها هیدرولیکی مبنی بر کاهش نیروی اعمالی در اثر نشت روغن در مدت زمان طولانی در دستگاه ساخته شده از سیستم کشنده مکانیکی مبتنی بر گیربکس و پیچ دوار استفاده شد . به منظور گیرش ورق از دو فک ثابت و متحرک با حداقل فاصله *cm* 240 و حداکثر *cm* 280 استفاده گردید . همینطور به منظور اندازه گیری نیروی کشش یک عدد *Load Sell* *kg* 5000 در دستگاه مورد استفاده قرار گرفت .

شکل 2- دستگاه پیش تندیگی ورق *FRP*

5. نحوه تقویت تیر های بتن آرمه

5-1- تیر های گروه *I*

تیر *B1* به عنوان شاهد و بدون تقویت .

تیر *B12* با تقویت لمینیت *CFRP* به طول *mm* 1600 با یک عدد مهار فولادی در دو سر لمینیت و ورق فولادی به ابعاد *mm* 3×200×800 در ناحیه فشاری بالای بتن به منظور جلوگیری از شکست نامطلوب فشاری بتن .

تیر *B13* با تقویت لمینیت *CFRP* به طول *mm* 1600 با دو عدد مهار فولادی در دو سر لمینیت و ورق فولادی به ابعاد *mm* 3×200×800 در ناحیه فشاری بالای بتن .

تیر *B1P1* با تقویت لیمینت *CFRP* پیش تنیده با سطح پیش تنیدگی ٪ 20 به همراه دو عدد مهار فولادی و ورق فولادی به ابعاد *mm* 3×200×800 در ناحیه فشاری بالای بتن .

5-2- تیر های گروه *II*

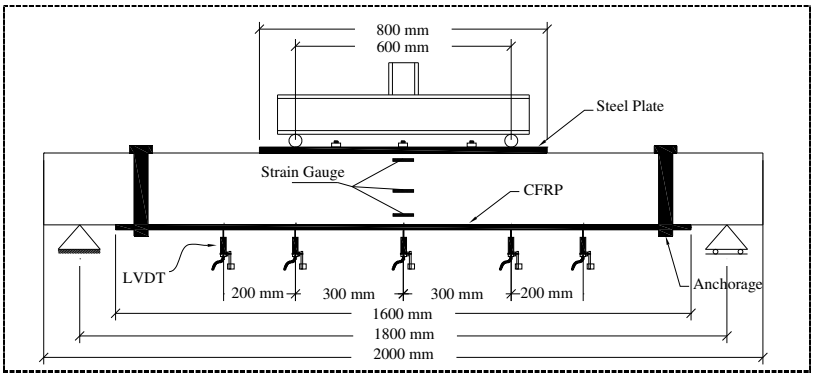
تیر *B2* به عنوان شاهد و بدون تقویت .

تیر *B22* با تقویت لمینیت *CFRP* به طول *mm* 1600 با یک عدد مهار فولادی در دو سر لمینیت .

تیر *B2P1* با تقویت لیمینت *CFRP* پیش تنیده با سطح پیش تنیدگی ٪ 20 به همراه دو عدد مهار فولادی و ورق فولادی به ابعاد *mm* 3×200×800 در ناحیه فشاری بالای بتن .

تیر *B2P2* با تقویت لیمینت *CFRP* پیش تنیده با سطح پیش تنیدگی ٪ 35 به همراه دو عدد مهار فولادی و ورق فولادی به ابعاد *mm* 3×200×800 در ناحیه فشاری بالای بتن .

در شکل (3) نمایی شماتیک از تقویت تیر ها نمایش داده شده است .



شکل 3- نمای شماتیک از تیر تقویت شده گروه *I*

6. مراحل پیش تنیدگی

مراحل پیش تنیدگی در تیر های پیش تنیده را در موارد زیر می توان خلاصه نمود :

1- قرار دادن لمینیت *CFRP* در فک ها دستگاه به کمک چسب اپوکسی .

2- پاک کردن سطح لمینیت از گرد و غبار به وسیله پنبه آغشته به الکل و سپس آغشته نمودن سطح آن به لایه ای از چسپ اپوکسی .

3- ایجاد نیروی کشش در ورق *CFRP* به کمک اهرم مکانیکی تا میزان مشخص . برای مثال در سطح پیش تنیدگی 20٪ مقاومت نهایی ورق ، نیروی اعمالی بر لمینیت معادل $2520\,kg$ و کرنش اعمالی برابر $2200\,\mu\varepsilon$ اندازه گیری شد .

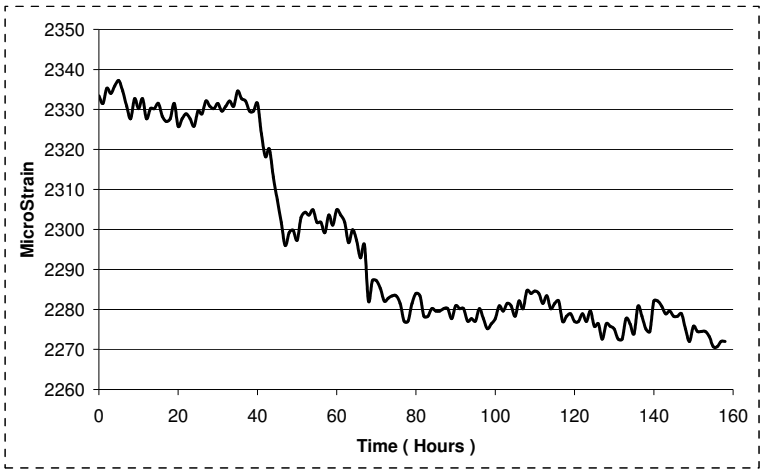
4- مضرس نمودن سطح کششی بتن و سپس قرار دادن تیر بتنی بروی لمینیت پیش تنیده .

5- اضافه نمودن مهار های انتهایی در دو سر تیر .

6- رها کردن کشش دستگاه پس از گیرش چسب در مدت زمان یک هفته .

در نمونه های مورد آزمایش دو سطح پیش تنیدگی *P1* برابر 20 ٪ و *P2* برابر 35٪ مقاومت نهایی لمینیت مورد استفاده قرار گرفت .

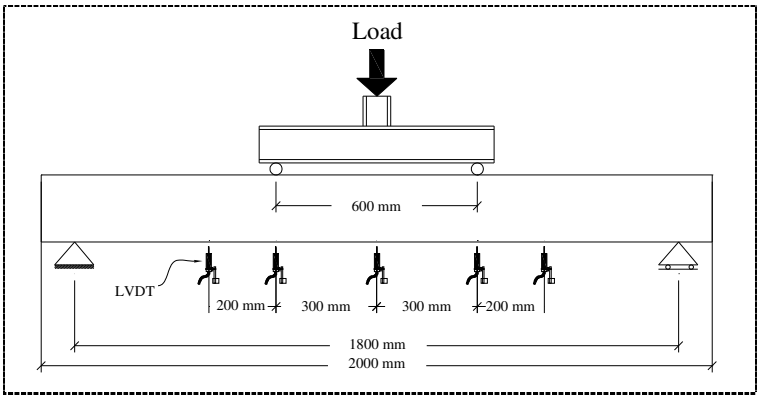
پس از رها کردن نیروی وارده از دستگاه ، به منظور قرائت کاهش میزان نیروی پیش تنیدگی در لمینیت ، قرائت کرنش سنج نصب شده بروی لمینیت به مدت یک هفته و به فاصله زمانی 30 دقیقه در نمونه های پیش تنیده انجام گرفت . کاهش مقدار این نیرو با توجه به نمودار رسم شده (شکل 4) نشانگرحداکثر 2/5٪ کاهش در نیروی پیش تنیدگی سطح *P1* است که مقدار ناچیزی می باشد .



شکل 4- کاهش میزان پیش تنیدگی در لمینیت پیش تنیده

7. سیستم بار گذاری

سیستم بار گذاری(شکل5) مبتنی بر یک قاب صلب و بار گذاری 2 نقطه ای یک سوم دهانه و با فاصله $600\,mm$ بوده است . برای بارگذاری از یک جک 50 تنی و برای اندازه گیری میزان بار وارده از یک *ton Load Sell* 100 استفاده شد.



شکل 5 – *Set- up* بار گذاری

8. نتایج و مشاهدات *[11]*

8–1 –تیر های گروه *I*

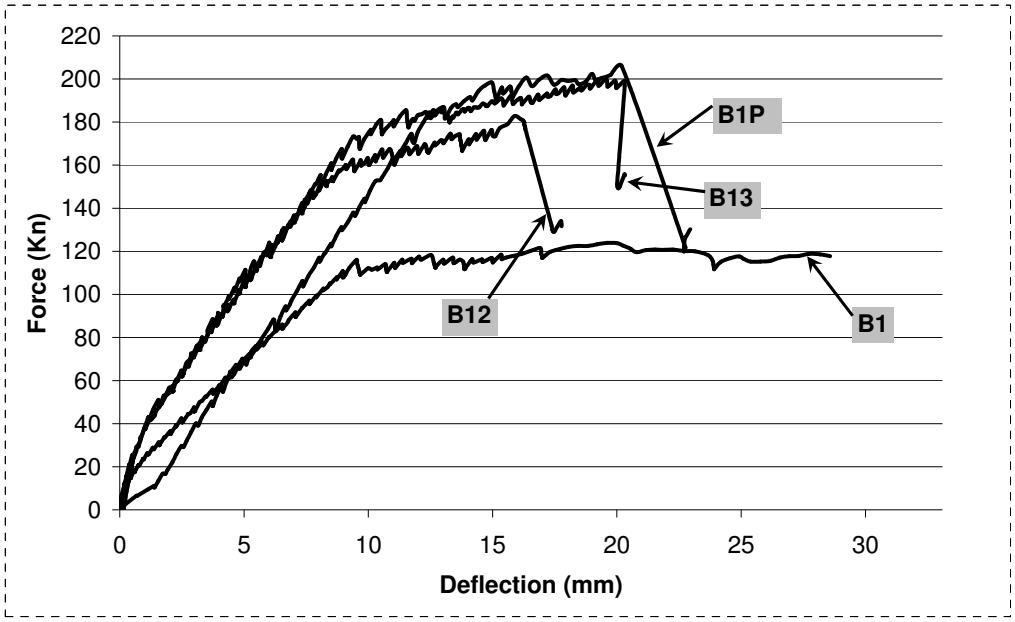
با بارگذاری بر تیر های این گروه نتایج زیر از اولین ترک خمشی و برشی و بار شکست در جدول شماره (2) آمده است .

جدول 2- نتایج بارگذاری تیر های گروه *I*

نمونه	نوع تقویت	اولین ترک خمشی *(Ton)*	درصد افزایش نسبت به شاهد	بار شکست *(Ton)*	درصد افزایش نسبت به شاهد	نحوه شکست
B1	شاهد (بدون تقویت)	3	-	12.3	-	جاری شدن میلگرد کششی + خورد شدن بتن فشاری
B12	لمینیت غیر پیشتنیده *CFRP* + ورق فولادی + یک عدد مهار انتهایی	5.5	٪83	18.2	٪48	رها شدن لمینیت از نقاط انتهایی
B13	لمینیت غیر پیش تنیده *CFRP* +ورق فولادی+ دو عدد مهار انتهایی	5.3	٪76	20	٪62	رها شدن لمینیت از نقاط انتهایی
B1P1	لمینیت پیش تنیده با سطح ٪20 + ورق فولادی + دو عدد مهار انتهایی	5.6	٪86	20.6	٪67	رها شدن لمینیت از نقاط انتهایی

با بررسی نتایج نمونه های گروه *I* آنچه برداشت می شود تاخیر در اولین ترک خمشی در نمونه های تقویت شده و همچنین تاخیر در این مورد از تیر غیر پیش تنیده به تیر پیش تنیده است .

بار شکست نیز در اولین تیر تقویت شده مبین افزایش ٪48 تقویت نسبت به تیر شاهد بود . این میزان تقویت با افزایش تعداد مهار ها و تاخیر در رها شدن لمینیت از نقاط انتهایی به میزان ٪62 افزایش یافت . همچنین در تیر تقویت شده با لمینیت پیش تنیده میزان افزایش بار شکست نسبت به تیر شاهد به ٪ 67 رسید .



شکل 6- نمودار بار – تغییر مکان تیر های گروه *I*

آنچه از نمودار فوق حاصل می شود افزایش مشهود در سختی تیر های تقویت شده نسبت به تیر شاهد است . این افزایش سختی در تیر پیش تنیده نیز نسبت به تیر های غیر پیش تنیده رو به افزایش نهاده است . با نگرش موردی به نمودار هر کدام از تیر ها یک تغییر شیب یا یک تغییر سختی در تیر های تقویت شده مشاهده می شود . این تغییر سختی را می توان مربوط به جاری شدن میلگرد های کششی دانست . تغییر مکان ها نیز در تیر های تقویت شده با توجه به باربری بیشتر این تیر ها افزایش یافته است .

8-2- تیر های گروه *II*

با بارگذاری بر تیر های این گروه نتایج زیر از اولین ترک خمشی و برشی و بار شکست در جدول شماره (3) آمده است .

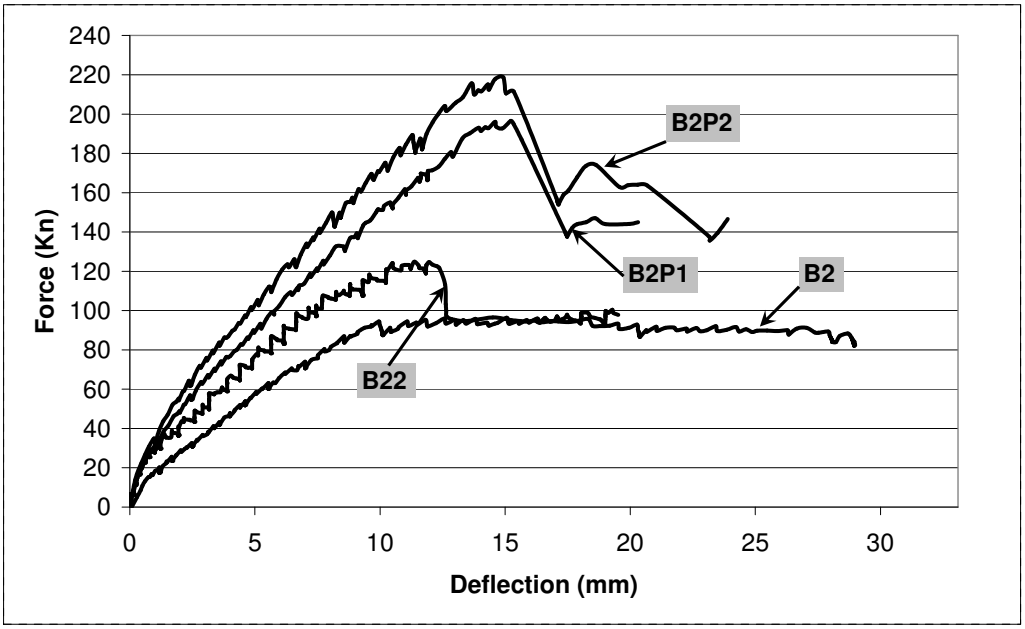
جدول 3- نتایج بارگذاری تیر های گروه *II*

نمونه	نوع تقویت	اولین ترک خمشی *(Ton)*	درصد افزایش نسبت به شاهد	بار شکست *(Ton)*	درصد افزایش نسبت به شاهد	نحوه شکست
B2	شاهد (بدون تقویت)	3.3	-	9.7	-	جاری شدن میلگرد کششی
B22	لمینیت غیر پیشتنیده *CFRP* + یک عدد مهار انتهایی	4.6	٪40	12.76	٪31.5	خورد شدن بتن فشاری
B2P 1	لمینیت پیش تنیده با سطح ٪20 + ورق فولادی+ دو عدد مهار انتهایی	5	٪51	19.6	٪102	رها شدن لمینیت از نقاط انتهایی
B2P 2	لمینیت پیش تنیده با سطح ٪35 + ورق فولادی + دو عدد مهار انتهایی	5.6	٪70	21.9	٪126	گسیختگی لمینیت *CFRP*

با بررسی نتایج نمونه های گروه *II* آنچه برداشت می شود تاخیر در اولین ترک خمشی در نمونه های تقویت شده و همچنین تاخیر در این مورد با افزایش سطح پیش تنیدگی است .

بار شکست نیز در اولین تیر تقویت شده مبین افزایش ٪31.5 تقویت نسبت به تیر شاهد بود . با توجه به نوع شکست که خورد شدگی بتن فشاری است ، عدم استفاده مفید از ورق *CFRP* را می رساند . این نوع شکست نیاز به تقویت به وسیله ورق فولادی در ناحیه فشاری بتن را الزامی دانست . در

تیر *B2P1* با پیش تنیدگی 20٪ تقویت به میزان 102٪ و در تیر *B2P2* با پیش تنیدگی 35٪ این میزان تقویت به 126٪ رسید . نحوه شکست این تیر نیز نشان از استفاده کامل از تمامی مقاومت لمینیت *CFRP* است .



شکل 9- نمودار بار – تغییر مکان تیر های گروه *II*

آنچه از نمودار فوق مشهود است ، عدم افزایش باربری تیر *B22* به علت شکست فشاری این تیر است ، همچنین سختی تیر های تقویت شده با افزایش پیش تنیدگی افزایش یافته است ، به طوریکه تغییر مکان تیر *B2P2* با 35٪ پیش تنیدگی از تیر *B2P1* با 20 ٪ پیش تنیدگی در لحظه شکست اندکی کمتر است .

9. خلاصه و نتیجه گیری

همانطور که مشهود است استفاده از پیش تنیدگی ورق های *CFRP* در تیر های بتن آرمه سبب افزایش باربری و افزایش سختی در این اعضا می شود . همینطور پیش تنیدگی در سطوح بالاتر نیز منجر به استفاده کامل ازتمام خصوصیات کششی ورق *CFRP* شده که این مسئله در نحوه گسیختگی ورق در نمونه *B2P2* کاملاً روشن است . به همین نسبت پیش تنیدگی وقوع اولین ترک خمشی را با تاخیر انداخته و نیز منجر به کاهش عرض ترک های نهایی در لحظه شکست می شود . استفاده از ورق فولادی نیز در تقویت فشاری تیر های بتن آرمه تقویت شده بسیار مطلوب جلوه کرده ، به طوریکه در تمامی نمونه های تقویت شده با ورق فولادی ، بتن ناحیه فوقانی و میانی تیر به گسیختگی فشاری نرسیده و مود خرابی تیر در این نمونه ها رها شدگی ورق *FRP* و یا گسیختگی کششی آن می باشد .

10. مراجع

[1] ACI Committee 440 , 2002 ,"Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", ACI Technical Report.

[2] Deuring, M. 1993. Post Strengthening of Concrete structures with Pre-tensioned Advance Composites. EMPA Research Report No. 224, Dubendorf, Switzerland

[3] El-Hacha, R., Wight, R.G., and Green, M.F., 2004. Prestressed Carbon Fibre Reinforced Polymer Sheets for Strengthening Concrete Beams at Room and Low Temperatures. Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 8(1), pp3-13.

[4] Izumo, K.M., Saeki, N., Asamizu, T., and Shimura, K., 1997. Strengthening Reinforced Concrete Beams by Using Prestressed Fibre Sheets. Proceeding of the 3,d International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Sapporo, Japan, Vol. 1, pp 379-386.

[5] Khalifa, A., Alkhrdaji, T., Nanni, A. and Landsburg, S., 1999, "Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement", Concrete International, , Vol. 21, No. 10, pp. 49-54.

[6] Meier, V., Deuring, M., Meier, H., and Schwegler, G. 1992. Strengthening of Structures with CFRP Laminates. I" International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures. Sherbrooke, pp 243-251.

[7] Nanni, A., Yu, P., Silva , P.F. , 2006. Flexural Performance of RC Beams Strengthened With Prestressed CFRP Sheet , Center for Infrastructure and Engineering Studies , University of Missouri-Rolla

[8] Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R., 1991. RC Beams Strengthened with GFRP Plates. II: Analysis and Parametric Study. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 117, No. 11, pp 3434-3455.

[9] Triantafillou, T.C., Deskovic, N., and Deuring, M., 1992. Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Fibre Reinforced Plastic sheets. ACI Structural Journal, Vol. 89, No.3, pp 235-244.

[10] Wight, RG., Green, M.F., and Erki, M.A., 2001. Prestressed FRP Sheets for Poststrengthening Reinforced Concrete Beams. Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 5(4), pp 214-220.

[11] حسنی تبار ، حسام . ، بررسی تجربی رفتار خمشی تیر های بتن آرمه تقویت شده با ورق *CFRP* پیش تنیده ، پایان نامه کارشناسی ارشد ، 1386 ، دانشگاه شمال .