

Flexural Strengthening of RC Beams with Pre-stressed steel rebar

Sadegh Mansouri¹, Reza Morshed^{2*}, Davood Mostofinejad³

1- MSc, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2 -Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

3 -Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

ABSTRACT

Various methods have been developed for the retrofit and strengthening of RC beams. One of the successful methods is the near-surface mounting (NSM) method. In this method, the reinforcing rebar is inserted and glued into the groove in the concrete cover. This groove is created in the tensile face of the beam. The relative protection of reinforcing materials, which are less exposed to mechanical damage, shock and fire loading is an important advantage of this strengthening method. Pre-stressing can close the cracks caused by the weak flexural strength of the member and reduce its excess deflection. The proposed strengthening method in this research was near surface mounting of pre-stressed rebars to enhance the flexural behavior of RC beams. The test program consisted of testing 5 RC beams of 200×200 ×1700 mm. One was the control sample and was tested without strengthening. Four other beams were first pre-loaded to the cracking stage and, after unloading, were strengthened by near surface mounting of the steel bars. The beams were tested under four-point bending. The applied load and the corresponding displacement in the middle of the beam were measured. In the flexural strengthening of the beams by proposed NSM method, end-anchorage and epoxy adhesive, both provided the proper bond. Tightening the end nuts with the aid of a torque meter, was the selective method to pre-stress the reinforcing bar. The results showed that this method was very effective for the flexural strengthening of RC beams, so the final load capacity of beam samples increased about twice as much as the control sample. The proposed method also led to the closure of the bending cracks and the reduction of the samples' deflection, as well as the increase in energy absorption of the samples.

ARTICLE INFO

Receive Date: 07 May 2021

Revise Date: 19 June 2021

Accept Date: 03 August 2021

Keywords:

Prestressing

Flexural strengthening

NSM

RC beam

Preload

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.285112.2446>

*Corresponding author: Reza Morshed.

Email address: morshed@yazd.ac.ir

تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه با میلگرد فولادی پیش تنیده

صادق منصوری^۱، رضامرشد^{۲*}، داوود مستوفی نژاد^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

امروزه روش‌های گوناگونی برای تعمیر و مقاوم‌سازی تیرهای بتنی گسترش داده شده است که یکی از این روش‌های موفق، روش کاشت نزدیک سطح (NSM^1) می‌باشد. در این روش مصالح تقویت به شکل میلگرد، تسمه یا کابل با چسب مناسب درون شیار ایجاد شده در پوشش بتن در وجه کششی تیر قرار داده می‌شود. از مزیت‌های این روش تقویت، حفاظت نسبی مصالح تقویتی توسط شیار و چسب است که کمتر در معرض آسیب مکانیکی، بارگذاری ضربه و آتش سوزی قرار می‌گیرد؛ همچنین پیش‌تنیدگی مصالح می‌تواند ضمن بستن ترک‌های ایجاد شده در اثر ضعف خمشی عضو، خیز محتمل اضافی آن را هم کاهش دهد و امکان بهره‌برداری مناسب را فراهم سازد. روش مورد ارزیابی در این پژوهش، تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه به روش کاشت میلگرد فولادی پیش‌تنیده است. برنامه آزمایشگاهی شامل ۵ نمونه تیر بتن آرمه به ابعاد $200 \times 200 \times 1700$ میلی‌متر بوده که یک نمونه بدون تقویت به عنوان نمونه شاهد و ۴ نمونه تیر دیگر ابتدا تا حد ترک خوردگی پیش بارگذاری شدند و پس از باربرداری با کاشت نزدیک سطح میلگرد فولادی تقویت شدند. تیرها تحت خمش چهار نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند و مقادیر بار وارده و تغییرمکان متناظر با آن در وسط تیر اندازه‌گیری شد. در تقویت خمشی تیرها به روش کاشت نزدیک سطح از مهار انتهایی و چسب اپوکسی به عنوان عامل اتصال استفاده شد. جهت اعمال بار پیش‌تنیدگی، دو انتهای میلگردهای تقویتی رزوه شده و نیروی پیش‌تنیدگی به صورت پس‌کشیده با سفت نمودن مهره‌های انتهایی به کمک تورک‌متر اعمال و تنظیم گردید. نتایج بدست‌آمده حاکی از نقش بسیار موثر این روش جهت تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه بود و ظرفیت نهایی نمونه‌های تقویت‌شده تا حدود دو برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. همچنین این روش تقویت باعث بسته شدن ترک‌های قبلی و کاهش خیز نمونه‌ها و همچنین افزایش جذب انرژی نمونه‌ها گردید.

کلمات کلیدی: پیش‌تنیدگی، تقویت خمشی، کاشت نزدیک سطح، تیر بتن مسلح، پیش‌بارگذاری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.285112.2446	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.285112.2446	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۵/۱۲	۱۴۰۰/۰۵/۱۲	۱۴۰۰/۰۳/۲۹	۱۴۰۰/۰۲/۱۷
				نویسنده مسئول: رضا مرشد morshed@yazd.ac.ir		پست الکترونیکی:

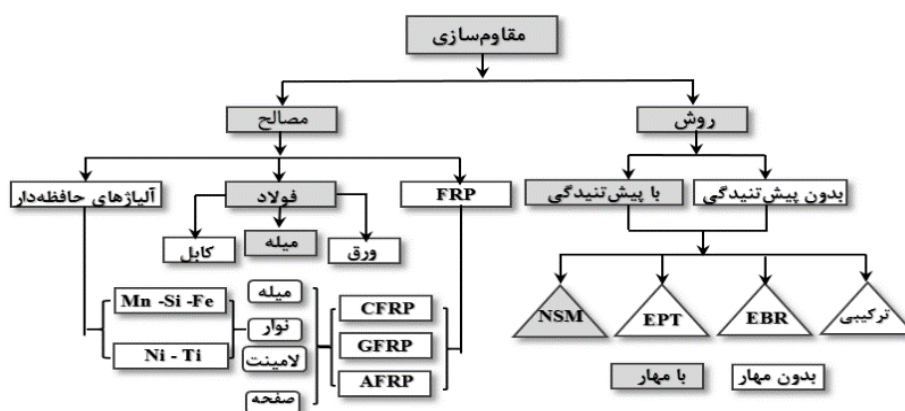
¹ Near Surface Mounted

۱- مقدمه

در سراسر دنیا سازه‌های بتنی زیادی وجود دارند که از لحاظ مهندسی غیر ایمن و غیر قابل استفاده تلقی شده و نیاز به تقویت و مقاوم‌سازی دارند. مقاوم‌سازی در صنعت ساختمان به معنای احیاء یا افزودن ظرفیت باربری و قابلیت بهره‌برداری و افزایش طول عمر مفید سازه می‌باشد. در حقیقت مجموعه عملیات صورت گرفته در راستای توانبخشی سازه‌های جدید و یا موجود به منظور ممانعت از آسیب دیدگی و فروپاشی سازه در اثر بارهای اضافی و یا عوامل مخرب محیطی و غیره، مقاوم‌سازی نامیده می‌شود. به طور کلی اهمیت و ضرورت تقویت سازه‌های بتنی می‌تواند ناشی از خطاهای طراحی، خطاهای اجرایی، افزایش بار سازه، تغییرات آیین‌نامه‌ای، تاثیر شرایط محیطی مخرب، آسیب‌دیدگی سازه ناشی از حوادث، ضربه، آتش‌سوزی، باد و زلزله باشد. از عوامل موثر در تعیین روش مقاوم‌سازی می‌توان به مواردی چون: ارزش سازه، لرزه‌خیزی منطقه، نیروی انسانی موجود، طول مدت اجرا، تکمیل و تقویت بر اساس نظر کارفرما، توجه به زیبا شناسی و معماری سازه، اهمیت تاریخی و سیاسی سازه، سازگاری روش مقاوم‌سازی با سیستم سازه‌ای موجود، کنترل آسیب وارده به اجزای غیر سازه‌ای، ظرفیت باربری پی و مصالح ترمیمی در دسترس اشاره کرد. در این میان تقویت خمشی تیرها از اهمیت و گستردگی فراوانی برخوردار است. از عوامل مؤثر در انتخاب طرح مقاوم‌سازی تیرها، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- میزان دسترسی به تیر در محل دسترسی به کل محیط تیر
- میزان افزایش مقاومت خمشی و برشی مورد نیاز
- دسترسی به انواع مصالح برای مقاوم‌سازی
- وضعیت بارهای وارده
- ملاحظات اقتصادی

خلاصه مصالح مصرفی و روشهای تقویت خمشی تیرها در شکل ۱ ارائه شده است. در پژوهش حاضر از روش کاشت نزدیک سطح استفاده شده است. در روش کاشت نزدیک سطح مصالح تقویتی به شکل میلگرد، تسمه یا کابل درون شیار که از قبل برش داده شده در پوشش بتن قرار داده می‌شود. سپس اتصال مناسب مصالح تقویتی با چسب یا مهار انتهایی به بتن برقرار می‌شود. در این روش مصالح تقویتی کمتر در معرض جداشدگی از بتن است. همچنین مصالح تقویتی به وسیله پوشش بتن محافظت شده، در نتیجه، کمتر در معرض آسیب مکانیکی، بارگذاری ضربه، آتش‌سوزی قرار می‌گیرد [۱]. از فولاد، شامل میلگرد، کابل، فولاد آلیاژی [۲]، کامپوزیت‌های الیافی [۳-۵] و آلیاژهای حافظه‌دار [۶] به عنوان مصالح تقویتی در این روش استفاده می‌شود. در روش کاشت نزدیک سطح، چسب مصالح اصلی برای انتقال تنش بین مصالح تقویتی و تیر بتنی است. خواص اصلی که بر عملکرد چسب تأثیر می‌گذارد، مقاومت کششی و برشی، مدول الاستیسیته و چسبندگی با مصالح تقویتی می‌باشند. به هنگام تقویت سازه‌های بتن مسلح در این روش، باید عواملی چون نوع مصالح تقویتی، بعد شیار و پرکننده شیار در نظر گرفته شود [۷].



شکل ۱: روش‌ها و مصالح تقویت تیرها

پیش‌تنیدگی به منظور بهبود عملکرد خمشی اعضاء بتن مسلح تحت بارهای سرویس به ویژه در پل‌ها و یا تیرهای با دهانه بزرگ و محدودیت تغییر مکان کاربرد دارد. استفاده از پیش‌تنیدگی همراه با کاشت نزدیک به سطح دارای مزایای زیر می‌باشد [۸]:

- بهبود خدمت پذیری.
- کاهش تغییر شکل.
- به تاخیر انداختن شروع ترک خوردگی و کاهش عرض ترک.
- استفاده مؤثرتر از مصالح

رفتار اتصال یا پیوستگی در روش کاشت نزدیک سطح به معنی انتقال تنش بین بتن و مصالح تقویتی به منظور توسعه عمل مرکب از هر دو ماده، در طول فرآیند بارگذاری یک عضو بتنی می‌باشد. عملکرد پیوستگی و اتصال روی ظرفیت باربری نهایی عضو و همچنین برخی از جنبه‌های خدمت‌پذیری، مانند عرض ترک و فاصله ترک، تاثیر می‌گذارد. عملکرد تقویت به روش کاشت نزدیک سطح به طور مستقیم به نوع شکست (مرز اتصال میله و چسب، اتصال چسب و بتن، در داخل بتن، انسجام در چسب و مواد تقویتی) مرتبط است و با پارامترهای اصلی زیر تحت تاثیر قرار دارند [۹]:

- خواص مکانیکی مواد و مصالح تقویتی
- بهسازی سطح شیار
- هندسه سیستم تقویت (میله یا نوار)
- ابعاد و عمق شیار و مصالح تقویتی در شیار.

حاج هاشمی و همکاران [۴] در اتصال تسمه‌های $CFRP^2$ پیش‌تنیده به روش کاشت نزدیک سطح برای تقویت تیرها، شکست به سبب خرد شدن بتن و جدا شدن یا گسیختگی و پارگی FRP^3 را مشاهده کردند. ال-هاچا و جعفر با استفاده از نوارهای $CFRP$ پیش‌تنیده به روش کاشت نزدیک سطح با استفاده از یک سیستم مهار انتهایی مناسب، مود شکست را به خرد شدگی بتن و گسیختگی $CFRP$ تغییر دادند [۵]. نوردین و تالجستن [۱۰] در سال ۲۰۰۶، روی پانزده نمونه تیر بتن مسلح در مقیاس واقعی با طول اتصال‌های مختلف آزمایش انجام دادند. بر اساس نتایج آنها استفاده از میله‌های $CFRP$ پیش‌تنیده باعث افزایش بارهای ترک‌خوردگی، افزایش بارهای تسلیم و نهایی تیرهای تقویت‌شده نسبت به تیر مرجع شد اما شکل‌پذیری کاهش یافت. چوی و همکاران در سال ۲۰۱۰ تاثیر عدم چسباندن کامل مصالح تقویتی را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که عدم استفاده از چسب در ناحیه میانی تقویت می‌تواند شکل‌پذیری را تا حدی بهبود بخشد [۱۱]. مسلم شاهرودی و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۶ رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح تقویت‌شده با نوار آلیاژ حافظه‌دار پیش‌تنیده را بصورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان دهنده امکان استفاده مؤثر از نوار آلیاژ حافظه‌دار آجدار برای تقویت و پیش‌تنیدگی تیر بتنی بود. رحمان مشیر و همکاران تقویت تیرهای بتن مسلح با روش اتصال ترکیبی را مورد بررسی قرار داده و درباره بار شکست، حالت شکست، خیز، کرنش و رفتار ترک خوردگی تحقیق نمودند. آنها نتیجه گرفتند که روش اتصال ترکیبی، کارایی اتصال بین بتن و فولاد در مقاوم‌سازی را بهبود می‌بخشد [۱۲]. امارا و همکاران در سال ۲۰۱۸ در رابطه با تاثیر دما و رطوبت و بارهای ماندگار روی رفتار خزشی چسب مصرفی در کاشت نزدیک به سطح تحقیقات جامعی انجام دادند [۱۳]. بر اساس نتایج این تحقیق افزایش دما و رطوبت باعث تشدید خزش در چسب اپوکسی شده و لغزش بین مصالح تقویت و نمونه بتنی تحت بارهای ماندگار می‌تواند به شکست تقویت منجر گردد. تاثیر افزایش دما بیش از تاثیر افزایش رطوبت بوده است. نتایج تحقیقات پارک و همکاران در سال ۲۰۱۸ نشان داد که تیرهای تقویت‌شده با تسمه‌های پلیمری پیش‌تنیده بخوبی توانستند مقاومت خود را تحت بارگذاری خستگی حفظ نمایند [۱۴].

² Carbon Fiber Reinforced Polymers

³ Fiber Reinforced Polymers

⁴ Fe-Shape Memory Alloys

جستاس سلاپتاس و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۱ تحقیقی در رابطه با تغییر شکل و ترک خوردگی تیرهای بتنی مقاوم سازی شده با CFRP پیش تنیده، تحت بار خارجی فعال و بدون بار خارجی همچنین درصد پیش تنیدگی متغییر انجام دادند آنها انتشار ترک ها را در تیرهای تقویت شده با CFRP در چهار مرحله به شرح ذیل تقسیم بندی کردند :

(۱) از باز شدن ترک تا لنگر تقویت ($M_{cr} < M_a \leq M_0$)

(۲) تقویت / پیش تنیدگی CFRP ($M_a = M_0$)

(۳) از لنگر تقویت تا لنگر متناظر با تنش تسلیم فولاد ($M_0 < M_a \leq M_y$)

(۴) از مقاومت تسلیم تا مقاومت نهایی ($M_y < M_a \leq M_u$)

نتیجه گیری این محققین این بود که در تقویت بدون پیش تنیدگی، اثر تقویت کننده FRP روی کاهش تغییر شکل عضو، تا قبل از تسلیم فولاد ناچیز است.

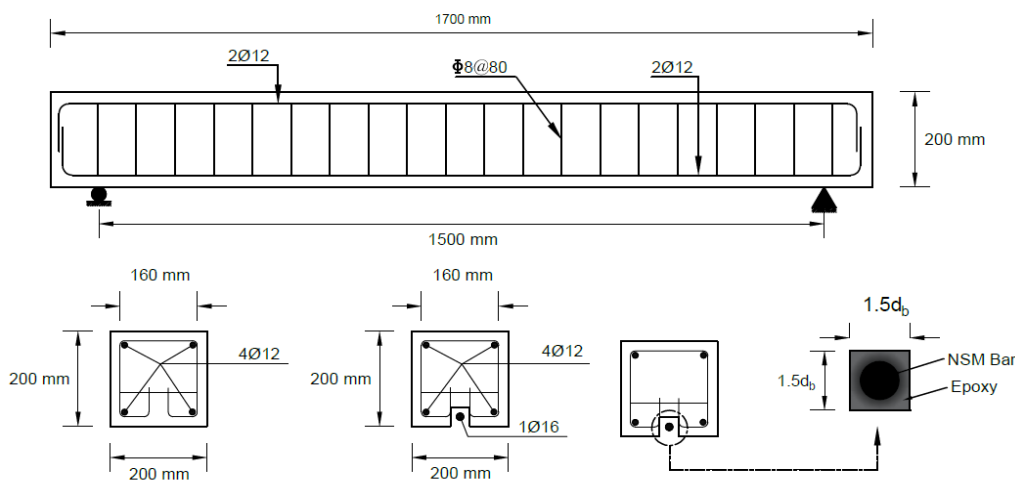
در تحقیق حاضر تأثیر پیش تنیدگی میلگرد فولادی، مهار انتهایی و نحوه چسباندن در روش کاشت نزدیک به سطح میلگرد تقویت مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه ها برای شبیه سازی بهتر شرایط واقعی، قبل از تقویت تا ایجاد ترک های خمشی پیش بارگذاری شدند و تقویت آنها بعد از باربرداری صورت گرفت.

۲- برنامه ریزی آزمایش ها

برنامه آزمایش ها شامل آزمایش ۵ تیر بوده است، یک تیر تقویت نشده به عنوان تیر مرجع و چهار تیر بتنی که پس از پیش بارگذاری و باربرداری، وجه کششی تیر شیار داده شد و با کاشت میلگرد تقویت شدند. پارامتر های مورد ارزیابی، تأثیر وجود یا عدم وجود پیش تنیدگی و تأثیر وجود یا عدم وجود چسب جهت اتصال کاملتر میلگرد کاشته شده به بتن بوده است.

۲-۱- جزئیات نمونه ها

کلیه تیرها دارای مقطع مربعی به ابعاد 200×200 میلی متر و طول 1700 میلی متر بودند که با دهانه موثر 1500 میلی متر مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل ۲ جزئیات آرماتورگذاری و ابعاد طولی و مقطع تیرهای مورد آزمایش را نشان می دهد. خاموت مورد استفاده با ابعاد 160 در 160 میلی متر و فاصله 80 میلی متر برای تمام نمونه ها یکسان بوده است و به گونه ای انتخاب شده است که جهت جلوگیری از شکست برشی کفایت داشته باشد. به دلیل محدودیت ابعاد و ضخامت پوشش نمونه های آزمایشگاهی، برای ایجاد امکان شیار با عمق مناسب در نمونه ها برای کاشت میلگرد، نحوه تعبیه خاموت های برشی به صورت شکل ۲ است.



شکل ۲: جزئیات نمونه ها

۲-۲- مصالح مصرفی

بتن مصرفی از رده C25 و متشکل از سنگدانه‌های آهکی با اندازه حداکثر ۱۲ میلیمتر و عیار ۱۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سیمان نوع ۲ کارخانه سیمان تجارت مهریز با عیار ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و آب شرب شهر یزد با نسبت آب به سیمان ۰/۵ بوده است. آرماتورهای مصرفی با توجه به تأمین امکان پیش‌تنیدگی از رده S500 فولاد یزد انتخاب شدند که دارای مقاومت تسلیم ۵۰۰ مگاپاسکال و مقاومت نهایی ۶۵۰ مگاپاسکال بودند. چسب مورد استفاده در این مطالعه، چسب اپوکسی Sikadur 31 از کارخانه سیکا انتخاب گردید. بر اساس اطلاعات شرکت سازنده، این چسب دارای حداقل مقاومت کششی ۱۵ مگاپاسکال، مقاومت چسبندگی ۱۵ مگاپاسکال با میلگرد فولادی، حداقل مقاومت چسبندگی ۴ مگاپاسکال با بتن خشک و مدول الاستیسیته ۴۳۰۰ مگاپاسکال است.

۲-۳- نحوه نام‌گذاری نمونه‌ها

نمونه مرجع یا شاهد که بدون تقویت مورد آزمایش قرار گرفت با نام REF و بقیه نمونه‌ها بصورت چهار بخشی نامگذاری شده اند: در بخش اول حرف E نشان‌دهنده این است که نمونه بعد از پیش‌بارگذاری و ترک خوردن و سپس حذف بار اولیه مورد تقویت و آزمایش قرار گرفته است، در بخش دوم NSM مخفف روش کاشت نزدیک سطح است و قطر میلگرد کاشته شده پس از آن آورده شده است. در بخش سوم درصد تنش پیش‌تنیدگی در مقایسه با تنش تسلیم میلگرد پس از حرف P آورده شده است. در بخش چهارم طول نسبی چسباندن میلگرد کاشته شده در شیار آورده شده است. OS به معنی این است که میلگرد تقویتی بدون چسب اپوکسی و تنها با مهار انتهایی به بتن متصل شده است، IS به معنی این است که میلگرد تقویتی با چسب اپوکسی در کل طول و با مهار انتهایی به بتن متصل شده است 2/3 به این معناست که 2/3 شیار چسب شده است و یک سوم میانی فاقد چسب اپوکسی می‌باشد. لازم به ذکر است که این آزمایشات بخشی از یک مجموعه آزمایشات برنامه ریزی شده مفصل‌تر است و به همین جهت تمهید مناسب در نامگذاری نمونه‌ها بعمل آمده است. خلاصه اطلاعات مربوط به نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: نامگذاری نمونه‌ها

نام نمونه	نحوه تقویت
REF	—
E-NSM16-P70-0S	بارگذاری اولیه + پیش‌تنیدگی ۰/۷ fy + NSM16 + بدون چسب اپوکسی
E-NSM16-P70-2/3S	بارگذاری اولیه + پیش‌تنیدگی ۰/۷ fy + NSM16 + یک سوم میانی شیار بدون چسب اپوکسی
E-NSM16-P0-1S	بارگذاری اولیه + بدون پیش‌تنیدگی + NSM16 + چسب اپوکسی کامل
E-NSM16-P70-1S	بارگذاری اولیه + پیش‌تنیدگی ۰/۷ fy + NSM16 + چسب اپوکسی کامل

۲-۴- مراحل آماده سازی و نحوه انجام آزمایشات

مراحل آماده‌سازی، تقویت و آزمایش نمونه‌ها بصورت تصویری در شکل ۳ ارائه شده است. برای راحتی شیار زنی و تقویت وجه کششی تیرها، وجه کششی به سمت بالا قرار گرفته است و بارگذاری بصورت دو نقطه‌ای از پایین به بالا صورت گرفته است. تکیه‌گاه ساده در انتهای تیرها به کمک نبشی‌هایی که با میلگردهای کششی قوی به کف صلب آزمایشگاه متصل هستند، تأمین شده است. ابتدا نمونه بصورت وارانه روی تکیه‌گاه‌ها استقرار یافته و پیش‌بارگذاری از پایین به بالا تا ایجاد ریز ترک‌های بهره‌برداری انجام شد (شکل ۳-۱). سپس ترک‌ها علامت‌گذاری شده و بار برداشته شد (شکل ۳-۲). در مرحله بعدی شیار به ابعاد مناسب به کمک دستگاه روی وجه کششی ایجاد و سپس شیار با شستشو و فشار باد، تمیز و عاری از گرد و غبار گردید (شکل ۳-۳ و ۳-۴). سپس میلگرد دو سر رزوه به کمک صفحات اتکایی انتهایی در محل شیار استقرار یافت و نیروی پیش‌تنیدگی توسط تورک‌متر اعمال گردید (شکل ۳-۵ و ۳-۶). در نمونه‌های متصل با

چسب، چسب اپوکسی به میزان لازم در محل شیار تزریق گردید (شکل ۳-۷). در انتها پس از طی زمان لازم برای استحکام چسب اپوکسی، بارگذاری مجدد نمونه‌ها تا شکست انجام گرفت (شکل ۳-۸). تغییر مکان وسط دهانه در کلیه مراحل فوق اندازه‌گیری و ثبت گردید. در شکل ۴ جزئیات و اجزای سیستم بارگذاری بصورت شماتیک نشان داده شده است.



(۲)



(۱)



(۶)



(۵)



(۴)



(۳)



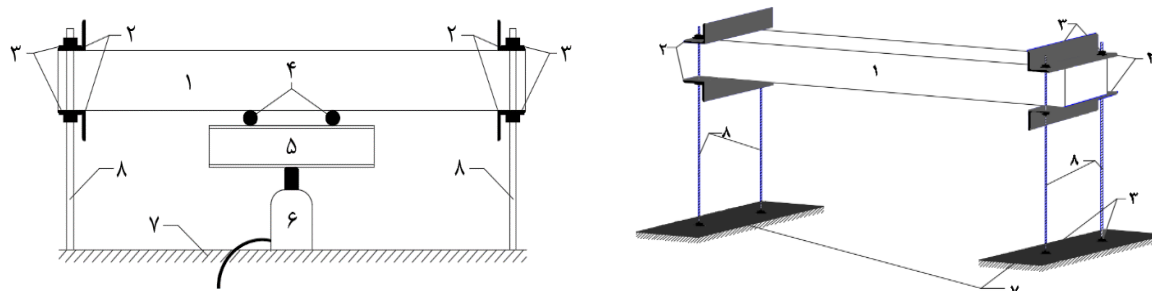
(۸)



(۷)

شکل ۳: مراحل آماده سازی، تقویت و آزمایش تیرها

- (۱) استقرار نمونه تیر و پیش بارگذاری (۲) باربرداری (۳) شیارزنی (۴) شیار آماده شده (۵) استقرار میلگرد تقویت (۶) پیش تنیده کردن میلگرد تقویتی توسط پیچ و مهره و تورک متر (۷) تزریق چسب اپوکسی (۸) بارگذاری مجدد تا لحظه شکست (ترک هایی که با رنگ قرمز مشخص شده اند ترک ها در مرحله بارگذاری اولیه و ترک ها با رنگ آبی مربوط به بارگذاری ثانویه تا لحظه شکست تیر می باشند)

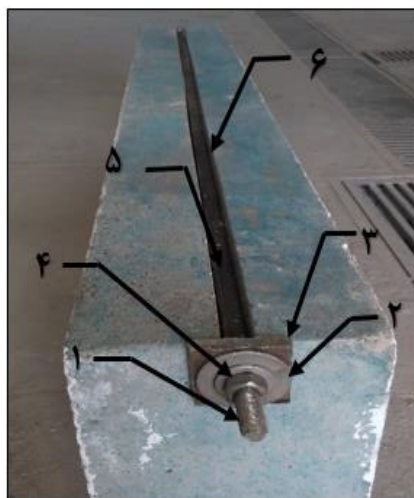


شکل ۴: نمای شماتیک دو بعدی و سه بعدی از سیستم بارگذاری

(۱) نمونه تیر بتن آرمه به ابعاد $1700 \times 200 \times 200$ میلی‌متر (۲) نبشی‌های فولادی نمره ۱۰ به طول ۳۰۰ میلی‌متر (۳) مهره و واشر فولادی (۴) استوانه‌های فولادی با قطر ۴۰ میلی‌متر و طول ۲۵۰ میلی‌متر جهت اعمال بار متمرکز (۵) تیر فولادی برای اعمال بار دو نقطه‌ای (۶) جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰ کیلو نیوتن (۷) کف قوی (۸) بولت‌های رزوه شده فولادی نمره ۲۵ به طول تقریباً ۸۰۰ میلی‌متر.

۳- نحوه اعمال پیش‌تنیدگی

پیش‌تنیدگی مورد نظر در میلگرد تقویتی به کمک پیچ و مهره و مهارهای انتهایی ایجاد شده است (شکل ۵). گشتاور پیچشی مورد نظر برای ایجاد نیروی پیش‌تنیدگی لازم با توجه به مشخصات رزوه‌ها و جنس مصالح، محاسبه و با کمک تورک‌متر اعمال شده است. در این آزمایش‌ها، تنش پیش‌تنیدگی به میزان ۷۰ درصد تنش تسلیم آرماتور اعمال گردید. علت انتخاب این میزان پیش‌تنیدگی، اطمینان از عدم تسلیم میلگردها بوده است. البته پارامتر درصد پیش‌تنیدگی می‌تواند مورد تحقیق کاملتری قرار گیرد. در روند آزمایشات، میلگرد تقویت جهت حفظ نیروی پیش‌تنیدگی، با استفاده از مهار مکانیکی انتهایی مهار گردیده است.



شکل ۵: سیستم مهار مکانیکی اعمال پیش‌تنیدگی

۱- رزوه دندانه متریک به طول ۱۰ سانتی‌متر؛ ۲- واشر فلزی؛ ۳- صفحه‌ی فلزی به ابعاد 60×60 میلی‌متر و ضخامت ۱۲ میلی‌متر؛ ۴- مهره فولادی شش گوش؛ ۵- میلگرد فولادی تقویتی نمره ۱۶ با رزوه در دو انتها؛ ۶- شیار در سطح بتن به عرض ۲۵ میلی‌متر و عمق ۴۰ میلی‌متر در طول نمونه

گشتاور پیچشی لازم برای ایجاد پیش‌تنیدگی مورد نظر در بولت را می‌توان با دقت خوبی از رابطه ۱ محاسبه کرد [۱۶]:

$$M_A \approx F_M (0.16P + 0.58\mu_G \times d_2 + \mu_k \times r_m) \quad (1)$$

که در آن M_A برحسب N-m گشتاور لازم برای سفت کردن، F_M برحسب kN نیروی پیش تنش در مونتاژ، P گام رزوه برحسب میلی متر μ_G ضریب اصطکاک رزوه (طبق جدول ۲)، d_2 قطر جناح رزوه (طبق جدول ۳) برحسب میلی متر، μ_k ضریب اصطکاک سطح نشیمنگاه سر یا مهره (طبق جدول) r_m شعاع متوسط نشیمنگاه برحسب میلی متر (طبق جدول ۲) می باشد.

جدول ۲: ابعاد و سطح مقطع در رزوه های متریک - ISO بر حسب DIN13 - ضرایب اصطکاک μ_G و μ_k طبق VDI2230 [۱۶].

علامت	d mm	p mm	μ_G	μ_k	d_2 mm	r_m mm
M16	۱۶	۲	۰/۱۵	۰/۱۵	۱۴/۷	۷/۸

$$A_s = 201 \text{ mm}^2$$

$$F_{v,\%} = 0.7 f_y A_s = 0.7 \times 500 \times 201 = 70350 \text{ KN} = 70/350 \text{ N}$$

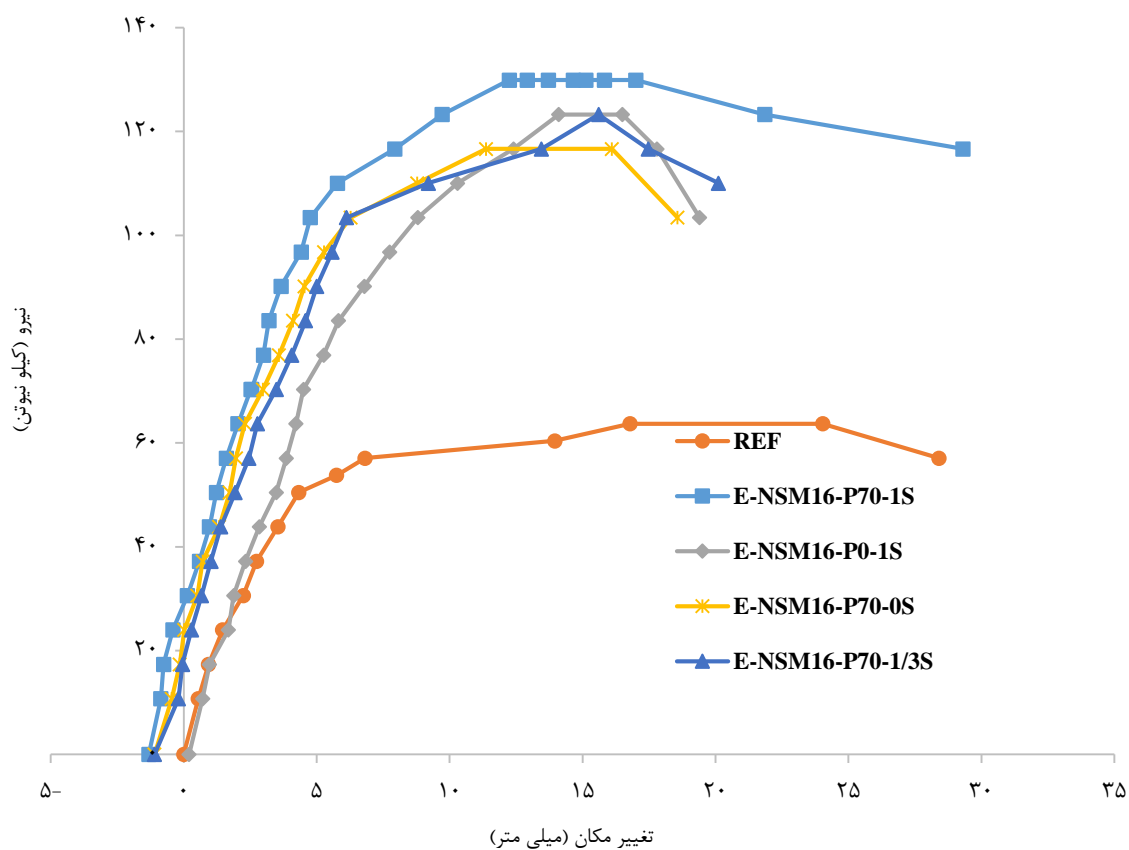
$$M_{v,\%} \approx 70350 \left[(0.16 \times 2) + (0.58 \times 0.15 \times 14/70) + (0.15 \times r_m) \right] = 195 \text{ N-m}$$

۴- ارائه نتایج

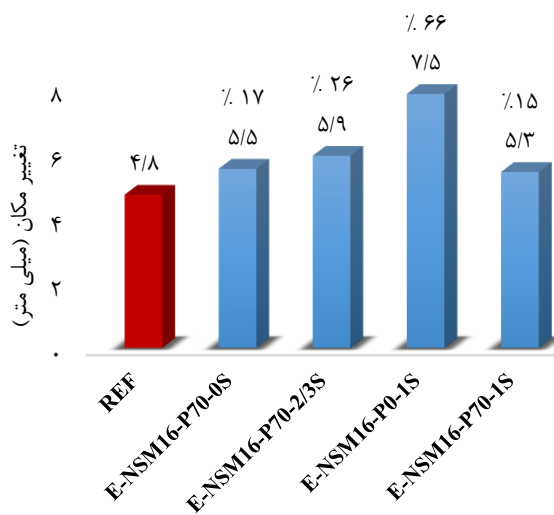
در این بخش نتایج بدست آمده از آزمایشات از نظر رابطه بار-تغییرمکان، ظرفیت باربری، نحوه شکست، ضریب شکل پذیری و جذب انرژی مورد مقایسه قرار گرفته اند.

۴-۱- رابطه بار-تغییرمکان

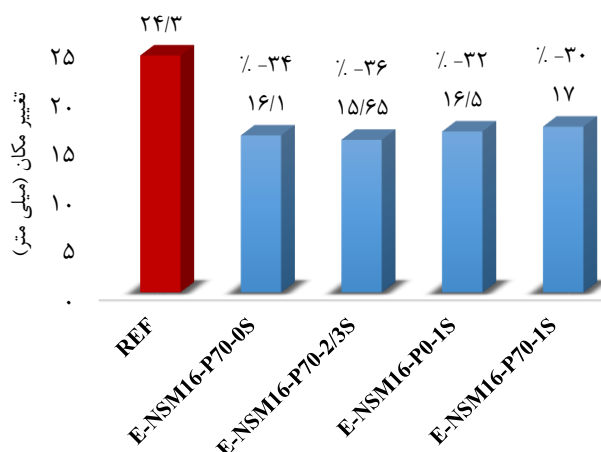
در شکل ۶ رفتار نمونه ها از نظر رابطه بار-تغییرمکان وسط دهانه مورد مقایسه قرار گرفته اند. در شروع بارگذاری تغییر مکان سه نمونه تیر که تحت اثر پیش تنیدگی قرار گرفته بودند، در حدود ۲ میلیمتر منفی بوده است. خیز منفی در هنگام اعمال پیش تنیدگی ایجاد می شود و از راه های مناسب برای بهبود قابلیت بهره برداری در اعضای خمشی است که قبل از مقاوم سازی در اثر ضعف خمشی دچار تغییر شکل های دائمی شده اند. سطح مقطع آرماتورهای اصلی کششی ۲۲۴ میلیمتر مربع بوده است که در عمق موثر (d) برابر با ۱۶۰ میلیمتر قرار داشتند. سطح آرماتور تقویتی ۲۰۰ میلیمتر مربع بوده است که در عمق موثر ۱۷۰ میلیمتر کاشته شده است و انتظار می رفت ظرفیت باربری را قدری کمتر از ۲ برابر افزایش دهد که این انتظار نیز به تحقق پیوست. تغییرمکان شکست بجز در نمونه پیش تنیده ای که از ترکیب مهار انتهایی و چسباندن کامل میلگرد استفاده شده بود، بعد از تقویت کاهش یافت. در شکل های ۷ و ۸ مقایسه تغییرمکان وسط دهانه تیر در لحظه بار تسلیم و بار نهایی نمونه ها ارائه شده است.



شکل ۶: رابطه بار-تغییر مکان نمونه‌های تیر



شکل ۷: تغییر مکان وسط دهانه تیر در لحظه بار تسلیم



شکل ۸: تغییر مکان وسط دهانه تیر در لحظه بار نهایی

۲-۴- ظرفیت باربری

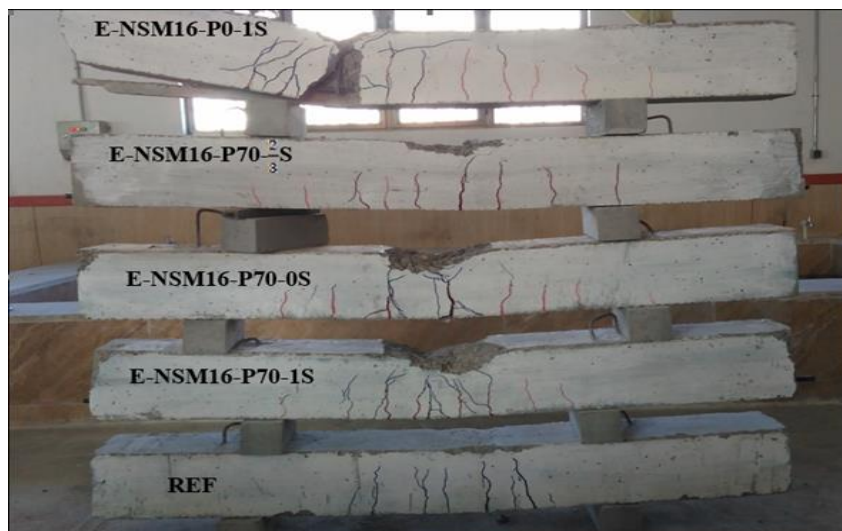
حداکثر ظرفیت باربری نمونه‌ها در جدول ۳ مورد مقایسه قرار گرفته است. همانگونه که مشاهده می‌شود ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده به میزان ۸۴ تا ۱۰۴ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. کمترین افزایش مقاومت مربوط به نمونه بدون چسب و بیشترین افزایش مربوط به نمونه‌ای است که علاوه بر پیش‌تنیدگی و مهار انتهایی، در کل طول دهانه با چسب به بتن متصل بوده است. بنابر این بنظر می‌رسد مقاومت کششی چسب اپوکسی، به ویژه توأم با پیش‌تنیدگی، روی اضافه مقاومت خمشی ناشی از تقویت تاثیرگذار بوده است.

جدول ۳: مقایسه ظرفیت باربری نمونه‌ها

نام نمونه	حداکثر ظرفیت باربری (kN)	درصد افزایش
REF	۶۴/۷	-
E-NSM16-P70-0S	۱۱۶/۷	۸۴
E-NSM16-P70-2/3S	۱۲۳/۳	۹۴
E-NSM16-P0-1S	۱۲۳/۴	۹۴
E-NSM16-P70-1S	۱۲۹/۹	۱۰۴

۳-۴- نحوه شکست

در شکل ۹ نمونه‌های مورد آزمایش پس از شکست مشاهده می‌شوند. همانگونه که مشاهده می‌شود شکست نمونه‌ها بصورت خمشی بوده است. تنها در نمونه تقویت شده بدون پیش‌تنیدگی ترک‌های برشی گسترش یافته و شکست به سمت برشی متمایل شده است. این یکی از مشکلات مرسوم در تقویت خمشی تیرها است. با انجام تقویت خمشی و افزایش ظرفیت باربری و برش در مقطع تیر، امکان شکست برشی افزایش می‌یابد و این امر در بسیاری از موارد نیاز به تقویت برشی را که معمولاً پرهزینه‌تر و مشکل‌تر است، ناگزیر می‌نماید. یکی از امتیازات بزرگ پیش‌تنیدگی افزایش مقاومت برشی بتن است و بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده نیز در نمونه‌های تقویت شده توأم با پیش‌تنیدگی، مد شکست خمشی تغییر نکرده است. در نمونه‌های پیش‌تنیده محدوده طولی گسترش ترک‌های خمشی و فاصله ترک‌های خمشی نسبت به نمونه شاهد قدری افزایش یافته است (شکل ۹). بیشترین فاصله ترک‌ها مربوط به نمونه بدون چسب است.



شکل ۹: نحوه شکست تیرهای مورد آزمایش

۴-۴- ضریب شکل پذیری

در جدول ۴ ضریب شکل پذیری نمونه‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. برای محاسبه ضرایب شکل پذیری رابطه بار-تغییر مکان وسط نمونه‌ها (شکل ۶) به صورت دوخطی معادل تبدیل شده و از نسبت جابجایی نهایی شکست به جابجایی تسلیم در حالت دوخطی، ضریب شکل پذیری محاسبه گردید. همانگونه که انتظار می‌رفت تقویت خمشی و افزایش سطح آرماتورهای کششی باعث کاهش ضریب شکل پذیری نسبت به نمونه شاهد گردید. البته در نمونه پیش‌تنیده با چسبندگی کامل، افت شکل پذیری نسبت به نمونه تقویت نشده محسوس نیست و در این نمونه شکل پذیری مناسبی بدست آمده است. بیشترین کاهش ضریب شکل پذیری مربوط به نمونه تقویت شده بدون پیش‌تنیدگی است و نمونه‌های پیش‌تنیده شرایط بهتری داشته‌اند. دلیل این مسئله را با توجه به نمودارهای بار-تغییر مکان نمونه‌ها، می‌توان مرتبط با سختی خمشی کمتر نمونه غیر پیش‌تنیده و در نتیجه بیشتر بودن تغییر مکان تسلیم در نمودار دوخطی معادل دانست.

جدول ۴: مقایسه ضرایب شکل پذیری نمونه‌ها

نام نمونه	تغییر مکان تسلیم (mm)	تغییر مکان نهایی (mm)	ضریب شکل پذیری
REF	۴/۸	۲۸/۷	۶
E-NSM16-P70-0S	۵/۵	۱۸/۶	۳/۴
E-NSM16-P70-2/3S	۵/۹	۲۰/۱	۳/۴
E-NSM16-P0-1S	۷/۵	۱۹/۴	۲/۶
E-NSM16-P70-1S	۵/۳	۲۹/۳	۵/۵

۴-۵- قابلیت جذب انرژی

قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها بصورت انرژی جذب شده تا لحظه شکست تعریف شده و بر اساس سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ها قابل محاسبه است. در جدول ۵ انرژی جذب شده نمونه‌های مورد آزمایش مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود جذب انرژی در تمام نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. کمترین افزایش با ۱۲ درصد متعلق به نمونه تقویت شده بدون پیش‌تنیدگی و بیشترین آن با ۱۱۲ درصد متعلق به نمونه پیش‌تنیده با مهار و چسب کامل بوده است. افزایش قابل توجه جذب انرژی نمونه‌ها از نکات قابل توجه روش پیشنهادی مقاوم‌سازی می‌باشد.

جدول (۵): مقایسه جذب انرژی نمونه‌ها

نام نمونه	جذب انرژی (N-m)	درصد افزایش
REF	۱۵۸۲	-
E-NSM16-P70-0S	۱۸۳۲	۱۶
E-NSM16-P70-2/3S	۱۹۹۳	۲۶
E-NSM16-P0-1S	۱۷۶۴	۱۲
E-NSM16-P70-1S	۳۳۵۶	۱۱۲

۵- خلاصه و نتیجه گیری

مطالعه آزمایشگاهی ارائه شده بخشی از مطالعات برنامه‌ریزی شده جهت ارزیابی روشهای موثر تقویت خمشی تیرها در دانشگاه یزد است. تحقیق حاضر روی ۵ نمونه تیر بتنی در آزمایشگاه بتن و سازه دانشگاه یزد انجام پذیرفت و هدف از آن ارزیابی تأثیر پیش‌تنیدگی روی کاهش خیز و تقویت خمشی تیرهای ترک خورده با ضعف مقاومت خمشی به روش کاشت نزدیک به سطح میلگرد فولادی، بود. بر اساس آزمایشات انجام شده نتایج زیر حاصل گردید.

۱- کاشت نزدیک به سطح میلگرد فولادی با مهار انتهایی در همه حالات توانست مقاومت خمشی و ظرفیت باربری را در حد انتظار و بالاتر از آن افزایش دهد. حداقل افزایش مقاومت مربوط به نمونه پیش‌تنیده بدون چسب و فقط با مهار انتهایی با ۸۴ درصد افزایش و حداکثر آن مربوط به نمونه پیش‌تنیده با چسب کامل و مهار انتهایی با ۱۰۴ درصد افزایش بود.

۲- استفاده از پیش‌تنیدگی باعث ایجاد خیز منفی اولیه، افزایش سختی خمشی، کاهش تغییر مکان تسلیم و در برخی موارد کاهش خیز نهایی گردید.

۳- در تیر تقویت شده بدون پیش‌تنیدگی نحوه شکست نمونه به سمت ایجاد ترک‌های برشی و شکست برشی متمایل گردید ولی با اعمال پیش‌تنیدگی بطور کامل از ایجاد ترک‌های برشی و امکان وقوع شکست برشی جلوگیری گردید. تأثیر قابل توجه پیش‌تنیدگی روی افزایش مقاومت برشی مقاطع بتنی، می‌تواند نیاز محتمل به تقویت برشی پرهزینه همراه با تقویت خمشی را از بین ببرد.

۴- مقاومت کششی چسب اپوکسی در ناحیه خمش حداکثر توانست تأثیر تقویت خمشی در حالت پیش‌تنیده را از حد انتظار بالاتر ببرد. پیش‌تنیدگی مانع از ترک خوردن چسب اپوکسی تا لحظه حداکثر مقاومت گردید و در نتیجه مقاومت خمشی بیشتری حاصل گردید. تأثیر چسب اپوکسی در حالت غیر پیش‌تنیده کمتر بود.

۵- تقویت فولاد ناحیه کششی با کاهش ضریب شکل‌پذیری خمشی همراه بود (تا ۵۹ درصد برای نمونه تقویت شده غیر پیش‌تنیده). این کاهش در مورد نمونه‌های پیش‌تنیده کمتر بوده و در مورد نمونه پیش‌تنیده با مهار انتهایی و چسب کامل تنها ۱۰ درصد کاهش ضریب شکل‌پذیری مشاهده گردید.

۶- ظرفیت جذب انرژی در تمامی تیرهای تقویت شده، بهبود یافت. حداقل افزایش جذب انرژی برای نمونه غیر پیش‌تنیده ۱۲ درصد و حداکثر افزایش جذب انرژی برای نمونه پیش‌تنیده با چسب کامل ۱۱۲ درصد مشاهده گردید. تأثیر قابل توجه پیش‌تنیدگی روی افزایش جذب انرژی از نتایج مهم این تحقیق بشمار می‌رود.

۷- در مجموع روش کاشت نزدیک سطح همراه با پیش‌تنیدگی می‌تواند راه حل مناسبی برای تقویت خمشی و کاهش خیز و ترک‌خوردگی در تیرهای خمشی که در اثر ضعف فولاد کششی دچار ترک‌خوردگی و تغییر شکل بیش از حد شده اند، باشد. البته این روش در مواردی قابل استفاده است که پوشش بتنی کافی روی خاموت‌ها رعایت شده باشد.

جدول ۶: خلاصه نتایج آزمایش نمونه‌ها

نام نمونه	M_u (kN-m)	P_u (kN)	درصد افزایش P_u نسبت به REF ↑	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	Δ_{cu} (mm)	درصد کاهش Δ_u نسبت به REF ↓	$\mu_{\Delta u}$	جذب انرژی	نحوه گسیختگی
REF	۱۹/۴	۶۳/۷	۳	۴/۸	۲۸/۷	۲۴/۳	—	۶/۰۴	۱۵۸۲	خمشی
E-NSM16-P70-0S	۳۴/۹۹	۱۱۶/۶۶	۵	۵/۵	۱۸/۶	۱۶/۱	-۳۴	۲/۳۸	۱۸۳۲	خمشی
E-NSM16-P70-2/3S	۳۶/۹۸	۱۲۳/۲۸	۱۱	۵/۹	۲۰/۱	۱۵/۶۵	-۳۶	۳/۴۱	۱۹۹۳	خمشی
E-NSM16-P0-1S	۳۶/۹۸	۱۲۳/۲۸	۱۱	۷/۵	۱۹/۴	۱۶/۵	-۳۲	۲/۴۹	۱۷۶۴	خمشی
E-NSM16-P70-1S	۳۸/۹۷	۱۲۹/۹	۱۷	۵/۳	۲۹/۳	۱۷	-۳۰	۵/۴۳	۳۳۵۶	خمشی

μ_{Δ}	شاخص شکل پذیری
P_u	ظرفیت باربری نهایی آزمایشگاهی
P_y	باربری تسلیم آزمایشگاهی
M_u	ظرفیت خمشی نهایی آزمایشگاهی
Δ_{cu}	تغییر مکان شکست
Δu	تغییر مکان نهایی
Δy	تغییر مکان تسلیم
P_n	ظرفیت باربری نهایی

مراجع

- [1] L. De Lorenzis and J. Teng. (2007). *Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures*. Composites Part B: Engineering, vol. 38, pp. 119-143.
- [2] M. Aslam, P. Shafiqh, M. Z. Jumaat, and S. N. R. Shah. (2016). *Strengthening of RC beams using pre-stressed fiber-reinforced polymers – A review*. Construction and Building Materials, pp. 235–256.
- [3] T. Hassan and S. Rizkalla. (2002). *Bond mechanisms of near surface mounted FRP bars and strips for flexural strengthening of concrete structures*. in Proceedings of the first international conference on structural health monitoring of innovative civil engineering structures, Winnipeg, Canada.
- [4] A. Hajihashemi, D. Mostofinejad, and M. Azhari. (2011). *Investigation of RC beams strengthened with prestressed NSM CFRP laminates*. Journal of Composites for Construction, vol. 15, pp. 887-895.
- [5] R. El-Hacha, and M. Gafar. (2011). *Flexural strengthening of reinforced concrete beams using prestressed, near-surface mounted CFRP bars*, PCI Journal, vol. 56, pp. 134-151.
- [6] M. Shahverdi, C. Czaderski, and M. Motavalli. (2016). *Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams*. Construction and Building Materials vol. 112, pp. 28–38.
- [7] J. Sena-Cruz, J. Barros, V. Bianco, A. Bilotta, D. Bournas, F. Ceroni, et al. (2016). *Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures*. Springer, 2016
- [8] R. El-Hacha and K. Soudki. (2013). *Prestressed near-surface mounted fibre reinforced polymer reinforcement for concrete structures—a review I*, Canadian Journal of Civil Engineering. vol. 40, pp. 1127-1139.
- [9] J. Sena-Cruz, J. Barros, V. Bianco, A. Bilotta, D. Bournas, F. Ceroni, et al. (2016). *Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures*. Springer.
- [10] H. Nordin and B. Täljsten. (2006). *Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP*. Journal of Composites for Construction, vol. 10, pp. 60-68.
- [11] H. T. Choi, J. S. West, and K. A. Soudki. (2010). *Effect of partial unbonding on prestressed near-surface-mounted CFRP-strengthened concrete T-beams*. Journal of Composites for Construction, vol. 15, pp. 93-102.
- [12] M. M. Rahman, M. Z. Jumaat, M. A. Rahman, and I. M. I. Qeshta. (2015). *Innovative hybrid bonding method for strengthening reinforced concrete beam in flexure*. Construction and Building Materials, vol. 79, pp. 370–378.
- [13] Emara, M., Torres, L., Baena, M., Barris, C., and Cahis, X. (2018). *Bond response of NSM CFRP strips in concrete under sustained loading and different temperature and humidity conditions*, Composite Structures, vol. 192C, pp. 1-7.
- [14] H. B. Park, J. Park, J. Kang and W. Jung. (2019). *Fatigue Behavior of Concrete Beam with Prestressed Near-Surface Mounted CFRP Reinforcement*. Materials, Vol.12 No. 51.
- [15] Slaitas, J., and Valivonis, J. (2021). *Concrete cracking and deflection analysis of RC beams strengthened with prestressed FRP reinforcements under external load action*. Composite Structures, 255, 113036.
- [16] K.-H. Decker and K. Kabus. (2000). *Maschinenelemente. Funktion, Gestaltung und Berechnung; 15. Auflage*. ed: Carl Hanser Verlag.