

# **Experimental comparison of shear behavior of plain and fiber reinforced concrete beams with continuous rectangular spiral reinforcement**

Morteza Dehghan<sup>1</sup>, Ali Kheyroddin<sup>2</sup>, Mohammad Kazem Sharbatdar<sup>3</sup>

1-Phd, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2-Distinguished Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3-Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

## **Research paper**

### **Abstract**

*In general, shear reinforcement in reinforced concrete beams typically involves the use of stirrups. However, substituting stirrups with continuous rectangular spiral reinforcement can enhance construction efficiency and lower costs. Meanwhile, the adoption of fiber-reinforced concrete in concrete structures is on the rise due to its distinctive properties. To address the tensile and shear vulnerabilities of concrete, reinforcing it with fibers is a viable solution. This study explores the experimental replacement of stirrups with continuous rectangular spiral reinforcements in both traditional concrete and steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams. Three beams were subjected to static loading tests: the first beam, referred to as ST-NC, featured stirrups and normal concrete as a reference; the other two beams incorporated continuous rectangular spiral reinforcements with normal concrete (SP-NC) and steel fiber-reinforced concrete at a 0.75% volume fraction (SP-F0.75). The experimental findings indicate that the beam reinforced with continuous rectangular spiral reinforcements and fiber concrete exhibits improved shear resistance, energy absorption, and ductility compared to the normal concrete beam and the reference beam. The beams with continuous rectangular spiral reinforcements, using normal concrete and steel fiber-reinforced concrete, demonstrated a 23.8 and 46.5% increase in shear capacity, respectively, compared to the reference beam. Additionally, energy absorption in SP-NC and SP-F0.75 beams increased by 69 and 158%, respectively, compared to the reference beam. The ductility of the continuous rectangular spiral reinforcement beam with normal concrete and steel fiber-reinforced concrete is 0.87 and 1.17 times that of the reference beam, respectively. Notably, the results reveal a reduction in the ductility of the SP-NC beam compared to the reference beam, and the addition of 0.75% by volume of fibers to the concrete resolves this ductility weakness in the SP-NC beam. These findings underscore the advantages of employing continuous rectangular spiral reinforcements in beams constructed with steel fiber-reinforced concrete, as proposed in this study.*

**Keywords:** Continuous rectangular spiral reinforcement, Steel fiber reinforced concrete (SFRC), Shear strength, Energy absorption, Ductility

---

\*Corresponding Author: Mohammad Kazem Sharbatdar

Dehghan, M., kheyroddin@semnan.ac.ir, A., Sharbatdar, M. K. Experimental Comparison of Shear Behavior of Plain and Fiber Reinforced Concrete Beams with Continuous Rectangular Spiral Reinforcement. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2022;

7(2):<http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.351288.1285>

2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## مقایسه آزمایشگاهی رفتار برشی تیرهای بتن آرمه معمولی و الیافی با خاموت گذاری مارپیچ پیوسته مستطیلی

مرتضی دهقان<sup>۱</sup>، علی خیرالدین<sup>۲</sup>، محمدکاظم شربتدار<sup>۳\*</sup>

۱- دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲-استاد ممتاز، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳-استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

[msharbatdar@semnan.ac.ir](mailto:msharbatdar@semnan.ac.ir)

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

نویسنده مسئول\*

### چکیده

بطور کلی تقویت برشی تیرهای بتن مسلح، توسط خاموت های بسته منفرد صورت می پذیرد. جایگزین کردن خاموت منفرد با خاموتهای مارپیچ پیوسته مستطیلی می تواند ضمن کاهش هزینه ها، سرعت اجرا را نیز افزایش دهد. از طرفی استفاده از بتن های الیافی در سازه های بتنی به علت دارا بودن خصوصیات منحصر به فرد، رو به گسترش می باشد. یکی از روش های غلبه بر ضعف های کششی و برشی بتن، مسلح کردن بتن به الیاف می باشد. در این مقاله جایگزینی خاموت های بسته منفرد با آرماتورهای مارپیچی پیوسته مستطیلی در تیرهای بتنی و بتن الیافی فولادی (SFRC) به طور آزمایشگاهی با آزمایش سه تیر تحت بارگذاری استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است. تیر اول با خاموت گذاری بسته منفرد و بتن معمولی (ST-NC) به عنوان تیر مرجع و دو تیر دیگر با خاموت گذاری مارپیچ پیوسته مستطیلی با بتن معمولی (SP-NC) و بتن الیافی فولادی به میزان ۰,۷۵ درصد حجمی (SP-F0.75)، می باشند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقاومت برشی، جذب انرژی و شکل پذیری تیر با خاموت گذاری مارپیچ با بتن الیافی نسبت به تیر بتن معمولی مشابه خود و تیر مرجع بهبود یافته است. تیرهای با آرماتورهای مارپیچ مستطیلی پیوسته با بتن معمولی و بتن الیافی به ترتیب ۲۳,۸ و ۴۶,۵ درصد افزایش ظرفیت برشی را نسبت به تیر مرجع نشان دادند. همچنین، در تیرهای SP-NC و SP-F0.75 جذب انرژی به ترتیب ۶۹ و ۱۵۸ درصد نسبت به تیر مرجع افزایش یافته است. شکل پذیری تیر تقویت شده مارپیچی با بتن معمولی و بتن الیافی به ترتیب ۰,۸۷ و ۱,۱۷ برابر تیر کنترلی می باشد. نتایج بیانگر کاهش شکل پذیری تیر SP-NC نسبت به تیر کنترلی می باشد که با افزودن ۰,۷۵ درصد حجمی الیاف به بتن، ضعف شکل پذیری در تیر SP-NC رفع می گردد. این نتایج مزایای استفاده از خاموت گذاری مارپیچی در تیرهای ساخته شده با بتن الیافی پیشنهاد شده در این مقاله را اثبات می کند.

واژه های کلیدی: خاموت مارپیچ پیوسته مستطیلی، بتن الیافی فولادی (SFRC)، مقاومت برشی، جذب انرژی، شکل پذیری

<sup>1</sup>. Steel Fiber Reinforced Concrete

اعضای سازه ای باید به گونه ای طراحی گردند تا مقاومت کافی در برابر بارهای وارده در طول عمر سازه را داشته باشند، به گونه ای که سازه و اعضای آن دچار شکست و آسیب قابل ملاحظه ای نگردند. مقاومت تیرها و ستونهای بتن مسلح در برابر نیروهای برشی، توسط بتن و آرماتورهای برشی تأمین می گردند. از لحاظ تئوری، زمانی که نیروی برشی اعمال شده به عضو سازه ای از مقاومت برشی بتن آن عضو بیشتر شود، آرماتورهای برشی مورد نیاز می باشد. اما به دلایل مختلف، از جمله اجتناب و جلوگیری از شکست ترد اعضا، باید آرماتور برشی حداقل مطابق ضوابط آئین نامه لحاظ گردد. تأمین آرماتورهای برشی در تیرهای بتن مسلح عمدتاً به شکل خاموت های بسته عمودی یا مورب موازی می باشد [۱ و ۲ و ۳]. از طرفی می توان نقاط ضعف در مقاومت کششی و تردی بتن را علاوه بر مسلح کردن آن به آرماتور، از طریق استفاده از الیاف بهبود بخشید. استفاده از بتن مسلح به الیاف، از دهه ی ۶۰ میلادی گسترش یافت [۴]. افزایش شکل پذیری، استهلاک انرژی و تغییر مکانیزم شکست از حالت ترد به حالت شکل پذیر از مهم ترین اثرات استفاده الیاف در بتن می باشد [۵].

در سازه های بتن آرمه خاموت ها با هدف تحمل نیروی برشی در اعضا، افزایش شکل پذیری، کمک به محصور شدگی بتن و کاهش طول کمانشی آرماتورهای طولی مورد استفاده قرار می گیرند. خاموت گذاری رایج در سازه های بتن آرمه با اشکالات اجرایی متعددی از قبیل جزئیات پیچیده، تعداد اشتباه یا گام نامناسب خاموت، قرارگیری آرماتورها به صورت مورب در خارج از محل خود، بسته نشدن کامل خاموت ها، عدم اتصال آنها به آرماتورهای طولی، اجرای نادرست خم ۱۳۵ درجه انتهایی، مواجهه است [۶ و ۷ و ۸ و ۹]. به منظور حل مشکلات مذکور و در راستای افزایش سرعت اجرای عملیات ساخت و کاهش هزینه ها، استفاده از سیستم خاموت گذاری پیوسته مستطیلی و تحقیق و مطالعه بر روی آن توسعه یافته و به عنوان یک تکنولوژی جدید و کارآمد نسبت به روش رایج سنتی در تیرهای بتن مسلح مطرح گردیده است. در سالهای اخیر تعداد محدودی از محققین بر روی استفاده از خاموت گذاری پیوسته مستطیلی در تیرهای بتن مسلح مطالعه انجام داده اند. اولین نتایج استفاده از خاموت گذاری پیوسته مستطیلی در تیرهای بتن مسلح در برش، توسط کاریانس و همکاران گزارش شده است که نتایج نشان داد تیرهای دارای خاموت گذاری پیوسته مستطیلی مقاومت برشی بالاتری نسبت به تیر با خاموت بسته دارند [۱۰]. نتایج آزمایش دیگری از کاریانس و همکاران بر روی تعداد هشت تیر بتن مسلح تحت بارگذاری برشی به روش ۴ نقطه ای خمشی به وضوح نشان می دهد که استفاده از تقویت مارپیچ مستطیلی موجب افزایش ظرفیت باربری گردیده و عملکرد برشی را در تیرهای مورد بررسی بهبود می بخشد. در این مطالعه تیرهای دارای خاموت گذاری پیوسته مستطیلی با گام خاموت ۱۲۰ و ۸۰ میلیمتر به ترتیب ۱۴،۹ و ۱۴،۷ درصد افزایش ظرفیت برشی را نسبت به تیر مشابه با خاموت بسته نشان دادند. علاوه بر این، تیرهای دارای خاموت گذاری پیوسته مستطیلی پیشرفته با گام خاموت ۱۲۰ و ۸۰ میلیمتر به ترتیب ۱۷،۲ و ۲۱،۷ درصد افزایش ظرفیت برشی را نسبت به تیر مشابه با خاموت بسته نشان دادند [۱۱].

در مطالعه دیگری توسط کاریانس و همکاران بر روی ۱۱ عدد تیر بتن مسلح تحت بارگذاری پیچشی خالص، تأثیر خاموت گذاری مارپیچی مستطیلی نسبت به خاموت ها به صورت خاموت بسته مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفته است که نتایج به وضوح نشان داد که استفاده از آرماتورهای مارپیچی مستطیلی منجر به افزایش ظرفیت پیچشی گردیده و عملکرد تیرهای مورد بررسی پس از نقطه بیشینه نیرو بهبود یافته است. مقاومت پیچشی تیرهای آزمایش شده تحت پیچش خمیلی با خاموت مارپیچی پیوسته در مقایسه با تیرهایی با مقدار مساوی از خاموت های رایج، افزایش اندازه گیری شده برای فواصل آرماتور عرضی ۲۰۰، ۱۵۰ و ۱۰۰ میلی متر به ترتیب ۱۸، ۱۶ و ۱۴ درصد بود. با این حال، تأکید می شود که وقتی مارپیچها به دلیل جهت پیچ خارجی باز می شوند، ظرفیت پیچشی تیرها کاهش می یابد و پوسته شدن قابل توجه بتن در مقایسه با تیرهای دارای مقدار مساوی خاموت های رایج، مشاهده

می‌شود [۱۲]. دکورته و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۱۳ با بهبود و تسهیل روش اجرای خاموت های مارپیچ، ۲۴ نمونه تیر بتنی با خاموت مارپیچ مستطیلی را با روش خمش ۴ نقطه ای تحت برش قرار دادند که نتیجه‌ی این تحقیق نیز افزایش شکل پذیری و مقاومت برشی مقدار قابل توجهی در تیر بتنی با خاموت مارپیچ مستطیلی در مقایسه با تیر بتنی با خاموت گذاری رایج مشاهده گردید [۱۳]. نسیم شترت و همکاران در سال ۲۰۱۶ با آزمایش بر روی ۲۸ عدد تیر بتنی و بررسی رفتار تیرهای برشی با دو نسبت دهانه به عمق ۲٫۵ و ۳٫۰ و سه فاصله (۱۲۵، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلیمتر و پنج زاویه شیب خاموت ۶۲، ۷۰، ۷۵، ۸۰ و ۸۵ درجه به این نتیجه رسید که استفاده از آرماتور برشی مارپیچ مستطیلی ظرفیت برشی و شکل پذیری تیرها را در مقایسه با تیرهای خاموت بسته بهبود می‌بخشد. همچنین نتایج نشان داد که زاویه شیب بهینه برای خاموت مارپیچی ۸۰ درجه می‌باشد [۱۴].

در یکی از تازه ترین تحقیقات صورت گرفته در سال ۲۰۱۸، آزمایش‌هایی بر روی ۲۰ تیر تحت بارگذاری استاتیکی توسط نسیم شترت و همکاران پیرامون تیرهای بتنی دارای خاموت مارپیچ مستطیلی با استفاده از بتن خود متراکم ( $SCC^2$ ) با زوایا و فواصل مختلف صورت پذیرفته است. ظرفیت برشی آزمایشگاهی با مقاومت برشی نظری تعیین شده توسط آیین نامه مقایسه گردیده که نتایج نشان داد استفاده از آرماتورهای مارپیچی پیوسته، ظرفیت برشی تیرهای ساخته شده با بتن خود متراکم را تا ۱۶٫۶۷ درصد نسبت به خاموت های بسته افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که عملکرد بهینه به زوایای شیب بستگی دارد، جایی که بدون توجه به فواصل گام خاموت‌ها، زاویه شیب بهینه زاویه ۸۵ درجه بود [۱۵]. در جدیدترین پژوهش در سال ۲۰۱۹ یک مطالعه تجربی توسط ساها و میساراگاندا، بر روی تیر- ستون های تقویت‌شده با خاموت گذاری پیوسته مستطیلی و بتن خودتراکم ( $SCC$ ) که تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دارند، ارائه گردیده است. در کل سه مجموعه اتصال تیر- ستون برای نسبت‌های مقاومت خمشی مختلف، با تقویت‌کننده‌های مارپیچی مستطیلی و خاموت‌های بسته متداول به عنوان نمونه مرجع، در نظر گرفته شده‌اند. نسبت مقاومت خمشی اتخاذ شده برای سه مجموعه ۱٫۳، ۱٫۵، ۲٫۰ بود. در این کار، نمونه های بتن خود تراکم با سه شیب مختلف زوایای خاموت ۷۵، ۸۰ و ۸۵ درجه برای آرماتور مارپیچ در نظر گرفته شده است. برای درک و تجزیه و تحلیل بهتر، تمام دوازده نمونه به مقیاس یک سوم کوچک شده و مجموعه فرعی تیر ستون تقویت‌شده تحت آزمایش‌های چرخه‌ای قرار گرفته است تا میزان انتشار ترک و ظرفیت مقاومتی آن در طول تحریکات لرزه‌ای با هدف تمرکز مطالعه بر رفتار لرزه ای اتصال از نظر الگوی جابجایی بار، رفتار پسماند، الگوی شکست و اتلاف انرژی بررسی شود. یافته‌های مشاهده شده نشان داد خاموت‌های مارپیچی پیوسته از نظر مقاومت نهایی، کاهش سختی، ضریب شکل‌پذیری و اتلاف انرژی تجمعی بهتر از خاموت‌های معمولی عمل می‌کنند [۱۶].

از طرفی مطالعات نشان داده است که استفاده از الیاف می‌تواند دست کم به عنوان بخشی از آرماتورهای عرضی به کار روند. از این رو برخی از پژوهشگران بر کاربرد صنعتی الیاف تأکید دارند [۱۷]. اخیراً شکل جدیدی از بتن با افزودن انواع الیاف به حجم بتن در راستای جلوگیری از انتشار ترک‌ها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن تولید و معرفی شده است. [۱۸] بهبود مقاومت های کششی، خمشی، خستگی، طاقت، ضربه، ترک خوردگی، جمع شدگی و آتش سوزی از جمله مشخصات بتن الیافی اند که با توجه به نوع و درصد الیاف متفاوت خواهند بود. [۱۹ و ۲۰]. الیاف در نوع های گوناگون از جمله؛ الیاف فولادی، الیاف شیشه ای، انواع مختلف الیاف مصنوعی، الیاف کربنی و غیره وجود دارند که در این بین الیاف فولادی با قلابهای انتهایی و تغییرات انجام شده بر روی شکل آن ها، سبب افزایش چسبندگی بین الیاف و ملات و افزایش تأثیر الیاف می‌شود. مهمترین تأثیر الیاف در بتن، افزایش انرژی شکست و شکل پذیری آن است [۲۱]. کمیته ۵۴۴ انجمن بتن آمریکا *ACI* اولین گزارش خود را در خصوص

<sup>2</sup>. *Self Compacting Concrete*

بتن‌های الیافی در سال ۱۹۷۳ منتشر نموده است که در سال‌های اخیر مورد باز بینی قرار گرفته است [۲۲]. استفاده از الیاف به شیوه امروزی و به منظور تقویت ماتریس‌های شکننده، با اولین تحقیقات توسط محققین کشور شوروی در دهه ۱۹۵۰ و سپس دانشمندان آمریکایی در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی آغاز شده است. کاربرد الیاف بطور فراگیر از اوایل سال ۱۹۶۰ در کشور های صنعتی پیشرفته شروع [۲۳] و در سالیان اخیر شکل الیاف و نحوه ساخت بتن الیافی بهبود و کاربرد آن نیز فزونی یافته است. افزایش مقاومت خمشی و جذب انرژی در بتن الیافی نسبت به بتن معمولی، یکی از مزایای استفاده از الیاف در بتن می باشد [۲۴].

در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی که توسط تاهنی و همکاران صورت گرفت، مشخص گردید استفاده ۳ درصدی الیاف فولادی موجب افزایش ظرفیت برشی تیر تا ۸۸ درصد گردیده است [۲۵]. در مطالعه ای در سال ۲۰۰۸ توسط گیرینوف و همکاران، میزان افزایش ظرفیت برشی تیرهای حاوی بتن الیافی نسبت به تیر کنترلی به ازای یک درصد الیاف، به میزان ۱۲۸ درصد و افزایش ظرفیت جذب انرژی تا ۶۰۰ درصد عنوان شده است. [۲۶]. در پژوهشی دیگر توسط کریمی و هاشمی در سال ۱۳۹۶ تاثیر الیاف فولادی قلابدار در رفتار برشی تیرهای بتنی حاوی الیاف فولادی فاقد خاموت بررسی شده است. در این مطالعه تعداد ۱۲ تیر در ۳ ارتفاع مختلف (۳۵۰، ۶۷۵ و ۹۱۵ میلی متر) با بتن حاوی صفر، ۰،۵، ۰،۷۵ و ۱ درصد الیاف فولادی با استفاده از روش اجزاء محدود تحلیل شده اند. نتایج حاکی از آن است که الیاف فولادی باعث افزایش قابل توجه مقاومت برشی (تا ۱۳۱،۵ درصد) تیر شده و در عین حال شکست تیرهای الیافی نیز نرم تر بوده است. همچنین مشخص شده است که وجود الیاف در تیرهایی با ارتفاع بیشتر مؤثرتر است، در نتیجه می توان گفت الیاف فولادی اثر اندازه در مقاومت برشی را تخفیف می دهد. [۲۷]. در مطالعه ای دیگر توسط حمزه نژادی و همکاران، اقدام به بررسی رفتار برشی این مصالح در تیرهای عمیق شده است. در این راستا پاسخ تجربی تعداد ۵ تیر شامل تیرهای ساده عمیق مسلح بتن کامپوزیتی الیافی تحت بار متمرکز در وسط دهانه مورد بررسی قرار گرفته است. پس از انجام آزمایشات، ملاحظه گردید که با افزایش درصد الیاف فولادی در تیرهای عمیق، ظرفیت باربری و همچنین شکل پذیری نمونه ها به میزان قابل توجهی افزایش یافت. افزایش درصد الیاف و همچنین اضافه نمودن آرماتورهای برشی، میزان ضریب شکل پذیری برشی را افزایش می دهد. از طرفی ملاحظه گردید، نمونه هایی که دارای آرماتور برشی جان می باشند، نسبت به نمونه مشابه فاقد آرماتور برش جان، دارای ضریب شکل پذیری حدود ۹ درصد بیشتر می باشند [۲۸]. در یک بررسی تحلیلی در سال ۲۰۲۲ توسط بیچیترا و کرانتی در خصوص مکانیسم های مقاوم در برابر برش در تیرهای بتن مسلح با الیاف فولادی، یک مدل ریاضی مبتنی بر مکانیک با در نظر گرفتن اثر تمام مکانیسم های مقاوم برشی برای پیش بینی مقاومت برشی تیر بتن مسلح الیاف فولادی (بدون آرماتور عرضی) پیشنهاد شده است. کارایی مدل پیشنهادی از طریق مجموعه وسیعی از پایگاه های اطلاعاتی تأیید شده است و نشان می دهد که همبستگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی با میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات به دست آمده به ترتیب ۰،۹۴، ۰،۲۲ و ۲۲،۹۹ درصد دارد. همچنین، سهم هر مکانیزم مقاوم در برابر برش توصیه شده است [۲۹].

اخیراً شین و همکاران نتایج آزمایش های تک محوری شش ستون دایره ای بتن مسلح الیافی توانمند ( $UHPRC^3$ ) در مقیاس بزرگ که توسط خاموت گذاری مارپیچ محصور شده اند را ارائه می کند. بتن مورد استفاده در این مطالعه دارای ۱،۵ درصد الیاف هیبریدی فولادی (۱،۰ درصد از الیاف ۱۹،۵ میلی متر و ۰،۵ درصد از الیاف ۱۶،۳ میلی متر) در مخلوط بود و دارای مقاومت فشاری متفاوت از ۱۶۳ تا ۱۸۱ مگاپاسکال بود. اثرات نسبت حجمی آرماتور مارپیچی، مقاومت فشاری بتن و حضور الیاف میکروفولاد هیبریدی بر پاسخ های بار محوری، از جمله تغییر شکل پذیری پس از پیک، بررسی شد. علاوه بر این، سطح شکل پذیری به دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج

<sup>3</sup>. Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete

آزمایش نشان داد که اثر ترکیبی حداقل آرماتور مارپیچی و الیاف فولادی منجر به شکل‌پذیری کافی پس از پیک ستون‌های مورد مطالعه می‌شود. برای بررسی کارایی شکل آرماتور محصور کننده، نتایج آزمایش ستون‌های دایره‌ای حاوی *UHPFRC* که توسط مارپیچ‌ها محصور شده‌اند با ستون‌های *UHPFRC* مربعی با اندازه معادل که توسط خاوت‌های بسته متداول محصور شده‌اند، مقایسه شدند. نتایج آزمون عملکرد برتر مارپیچ‌های دایره‌ای را برای ایجاد رفتار شکل‌پذیری ستون‌های *UHPFRC* نسبت به همان نسبت حجمی خاوت‌های بسته نشان می‌دهد. همچنین یک توصیه طراحی برای خاوت‌های مارپیچی که رفتار شکل‌پذیر ستون‌های *UHPFRC* در مناطق لرزه خیز متوسط را تضمین می‌کند، پیشنهاد شده است [۳۰].

در تعدادی از مقالات که اخیراً منتشر شده است، پیشنهادهایی برای استفاده از خاموت گذاری پیوسته مستطیلی در تیرهای بتن مسلح مطرح گردیده است و روابطی نیز برای تعیین ظرفیت نهایی آن ارائه شده است. از طرفی مطالعات نشان داده است بتن‌های مسلح الیافی دارای رفتاری به مراتب بهتر از بتن‌های معمولی می‌باشند، اما تیرهای ساخته شده با بتن مسلح الیافی دارای خاموت گذاری پیوسته مستطیلی تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است و از آنجائی که تاکنون جهت ساخت تیرهای بتنی با خاموت گذاری پیوسته مستطیلی از بتن الیافی استفاده نشده است، به کارگیری این مصالح نوعی نوآوری محسوب می‌گردد، لذا مطالعات بیشتر بر روی مباحث سازه‌ای و کاربردی این مصالح و رفتار برشی تیرهای بتنی با خاموت گذاری پیوسته مستطیلی ساخته شده با این مصالح حائز اهمیت می‌باشد.

## ۲- روش پژوهش

### ۲-۱- جزییات نمونه‌ها

نمونه‌های ساخته شده آزمایشگاه از نظر ابعاد کاملاً مشابه هم بوده اما از نظر نوع بتن مصرفی و مدل خاموت گذاری با هم متفاوت می‌باشند. این مطالعه شامل سه تیر بتنی می‌باشد که یک تیر دارای خاموت‌های بسته با بتن معمولی و دو تیر نیز دارای خاموت گذاری مارپیچ پیوسته مستطیلی می‌باشند. شکل ۱ دو نوع خاموت گذاری بسته و مارپیچ پیوسته مستطیلی را نشان می‌دهد که در این مطالعه به کار گرفته شده است. در دو تیر دارای خاموت پیوسته، در یک تیر از بتن معمولی و یک تیر از بتن الیافی با حجم الیاف فولادی به میزان ۰,۷۵ درصد حجمی استفاده شده است. به عنوان آرماتورهای طولی خمشی در تمامی نمونه‌ها، دو عدد میلگرد آجدار AIII با قطر ۲۲ میلیمتر در بالا و چهار عدد میلگرد آجدار AIII با قطر ۲۲ میلیمتر در پایین تعبیه شده است. آرماتورهای عرضی مورد استفاده در تیرها دارای حجم یکسان و از نوع آجدار AII و با قطر ۸ میلیمتر می‌باشند. مطابق آنچه در شکل ۲ نشان داده شده است تمامی تیرها دارای مقطع مستطیلی به عرض ۲۰۰ میلیمتر، ارتفاع کل ۳۵۰ میلیمتر، ارتفاع موثر ۳۰۰ میلیمتر می‌باشند. طول هر چهار نمونه برابر ۲۲۰ سانتیمتر و دهانه خالص آنها برابر ۱۹۰ سانتیمتر با بار گذاری سه نقطه‌ای به صورت نامتقارن می‌باشند که اندازه دهانه کوچکتر آن برابر با ۷۵ سانتیمتر بوده و دارای نسبت  $a/d=2.5$  می‌باشند.

نمونه شماره ۱ با نام *ST-NC* به عنوان نمونه کنترلی دارای خاموت گذاری بسته با فاصله گام ۲۰۰ میلیمتر و توسط بتن معمولی ساخته شده است. دو نمونه دیگر دارای تقویت عرضی به صورت خاموت گذاری مارپیچی پیوسته مستطیلی با فاصله گام ۲۱۰ میلیمتر و زاویه ساق‌های عمودی ۷۲,۲۵ درجه و زاویه ساق‌های افقی ۵,۳ درجه می‌باشند که جزییات اجرایی آنها در شکل ۳ نشان داده شده است. نمونه شماره ۲ با نام *SP-NC* توسط بتن معمولی و نمونه شماره ۳ با نام *SP-F0.75* با بتن الیافی فولادی با حجم الیاف ۰,۷۵ درصد حجمی ساخته شده است. جزییات نمونه‌ها در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

فاصله گام و زوایای شیب برای آرماتورهای مارپیچ پیوسته به‌گونه‌ای محاسبه می‌شوند که نسبت‌های خاموت‌های عرضی ( $\rho$ ) برای همه تیرها یکسان و برابر با تیر دارای خاموت گذاری بسته (نمونه کنترلی) باشد. با توضیح مذکور

مشخص می شود چرا فاصله گام خاموت گذاری متداول و مارپیچ نشان داده شده در جدول شماره ۱ دقیقاً یکسان نیست.  $\rho$  را می توان برای خاموت گذاری بسته و مارپیچ پیوسته مستطیلی به ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ تعیین نمود [۱۱]:

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{b_w s} \quad (1)$$

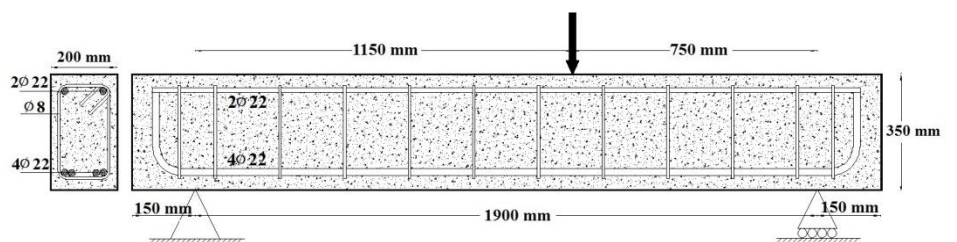
$$\rho_{t\phi} = \frac{A_{st}/2}{b_w s \sin \phi_{front}} + \frac{A_{st}/2}{b_w s \sin \phi_{back}} \quad (2)$$

جدول ۱: مشخصات نمونه ها

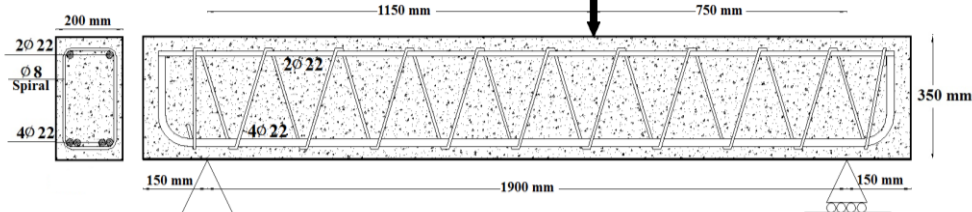
نام نمونه	نوع خاموت گذاری	نوع بتن	$\rho_w$ (%)	$\rho_t = \rho_{t\phi}$ (%)	$\phi_{front}$ (درجه)	$\phi_{back}$ (درجه)	زاویه ساق افقی $\alpha$ (درجه)	گام خاموت S (میلیمتر)
ST-NC	بسته (گسسته)	نرمال	۲,۵۳	۰,۲۵۱۳	۹۰	۰	۰	۲۰۰
SP-NC	مارپیچی پیوسته	نرمال	۲,۵۳	۰,۲۵۱۳	۷۲,۲۵	۱۰۷,۷۵	۵,۳۰	۲۱۰
SP-F0.75	مارپیچی پیوسته الیافی ۰,۷۵٪		۲,۵۳	۰,۲۵۱۳	۷۲,۲۵	۱۰۷,۷۵	۵,۳۰	۲۱۰



شکل ۱: خاموت گذاری بسته متداول و خاموت گذاری مارپیچ پیوسته نمونه های آزمایشگاهی

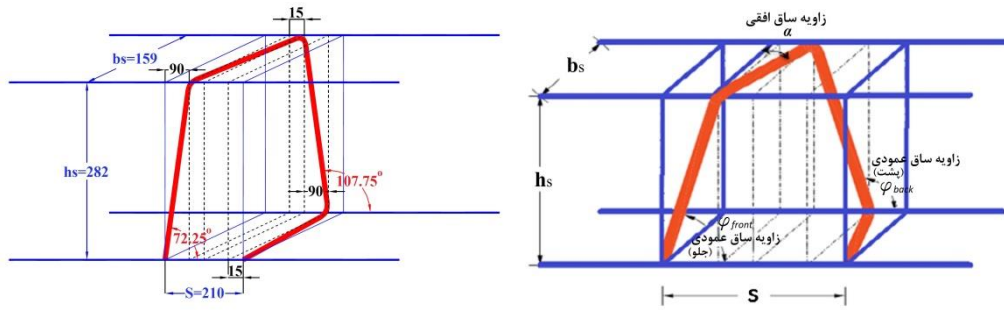


الف: خاموت بسته متداول



ب: خاموت مارپیچ پیوسته

شکل ۲: جزئیات خاموت گذاری نمونه ها

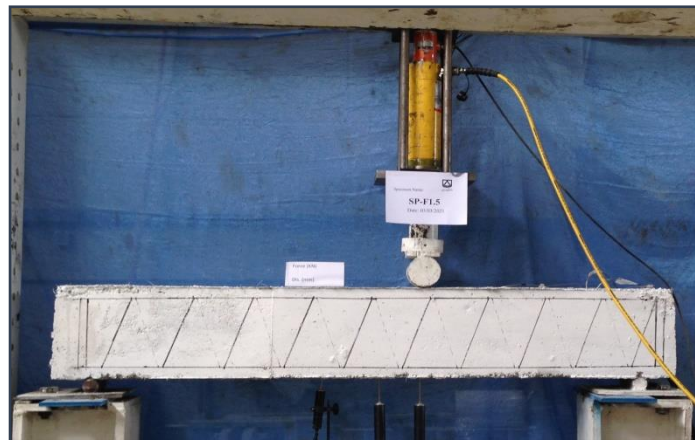


شکل ۳: جزئیات زوایای خاموت مارپیچی

که در آن  $A_{st}$  مساحت دو ساق خاموت بسته یا مارپیچ به میلیمتر مربع،  $S$  فاصله گام خاموتها بر حسب میلیمتر،  $\phi_{front}$  و  $\phi_{back}$  زاویه بین ساق جانبی جلویی و پشتی خاموت و محور تیر و  $\alpha$  زاویه ساق بالایی بر حسب درجه می باشد که جزئیات زوایای خاموت مارپیچی مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است.

## ۲-۲- سیستم برپایی آزمایش

انجام آزمایشها و اعمال بار به صورت خمشی سه نقطه‌ای (نامتقارن) و استاتیکی انجام گردید. در سیستم آزمایش از یک جک هیدرولیکی با نیروی کنترل شده استفاده شده است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است تیرها به صورت ساده بر روی دو تکیه گاه غلتکی در دو انتها با طول دهانه خالص  $190$  سانتیمتر جای گذاری گردیده اند. فاصله بین دو بار نقطه ای در دهانه کوچکتر برابر  $750$  میلیمتر و نسبت  $a/d=2.5$  در نظر گرفته شده است. بار اعمال شده به طور مداوم، سرعت بسیار آهسته و تقریباً با افزایش  $5$  کیلونیوتن در هر مرحله به وسیله یک جک هیدرولیکی افزایش می‌یابد. تغییر مکانهای عمودی تیرها توسط  $LVDT$  که در محل اعمال بار و در زیر تیرهای آزمایش شده قرار داده شده، ثبت گردیدند. اندازه‌گیری‌های بار و تغییر مکانها به طور مداوم و در طول آزمایش تا زمان شکست تیرها ثبت شد. انتشار ترک از ابتدای اعمال بار تا شکست تیرها کنترل و مسیر و رشد آنها بر روی نمونه ها ترسیم گردید. همه نمونه‌ها به گونه ای طراحی شده اند که قبل از اینکه آرماتورهای طولی کششی تسلیم شوند در برش دچار شکست شده و ترک‌های مورب در دهانه برشی تیرها ایجاد شوند. بر اساس مقدار آرماتور طولی ارائه شده، ابعاد مقطع، مقاومت فشاری بتن و مقاومت تسلیم فولاد تیرها، ظرفیت تسلیم خمشی محاسبه شده به گونه ای می باشد که ظرفیت برشی نهایی نمونه های آزمایش شده کمتر از مقاومت خمشی آن ها در تسلیم باشد.



شکل ۴: نمونه آماده تست در دستگاه آزمایش

## ۳-۲- خصوصیات مصالح

میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای بتن معمولی ۳۸,۵ مگاپاسکال و برای بتن ییافی با حجم ییاف ۰,۷۵ درصد برابر ۵۶,۵ مگاپاسکال اندازه گیری گردید. مطابق آزمایش کشش مستقیم انجام شده برای میلگردهای مورد استفاده در نمونه ها، تنش تسلیم برای آرماتورهای طولی ۴۹۹ مگاپاسکال و برای خاموت ها ۳۹۷ مگاپاسکال می باشد. یکی از تأثیرگذارترین ییاف ها جهت تقویت چسب سیمانی، ییاف فولادی می باشد. ییاف فولادی باعث افزایش مقاومت خمشی و مقاومت برشی و همچنین مقاومت کششی می شود. وجود ییاف در بتن باعث کاهش عرض ترک ها در یک ناحیه و پخش ترک های با عرض کم در نواحی مختلف می باشد. در هنگام اضافه کردن ییاف به بتن برخی ملاحظات برای پخش یکنواخت ییاف و جلوگیری از جداسدگی یا پدیده گلوله شدن و ایجاد یک مخلوط کارا جهت ریختن، تراکم و پرداخت بتن باید مدنظر قرار گیرد. ییاف مورد استفاده در این آزمایش ساخت شرکت صنایع مفتولی زنجان بوده که در داخل ایران تهیه و تولید می شود. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود این ییاف ها از نوع قلابدار و دارای روکش مسی است. دلیل استفاده از روکش مسی در این ییاف، محافظت ییاف فولادی در مقابل زنگ زدگی می باشد. نسبت طول به قطر ییاف مذکور ۶۲,۵ بوده که مشخصات فنی ییاف مصرفی در نمونه های آزمایشگاهی در جدول شماره ۲ آورده شده است.



شکل ۵: ییاف فولادی قلابدار با روکش مسی

جدول ۲: مشخصات فنی ییاف فولادی مصرفی

نوع ییاف	طول mm	قطر mm	$\frac{L}{D}$
فولادی قلابدار	۵۰	۰,۸	۶۲,۵

## ۳- تجزیه و تحلیل نتایج

### ۳-۱- رفتار و ظرفیت برشی تیرها

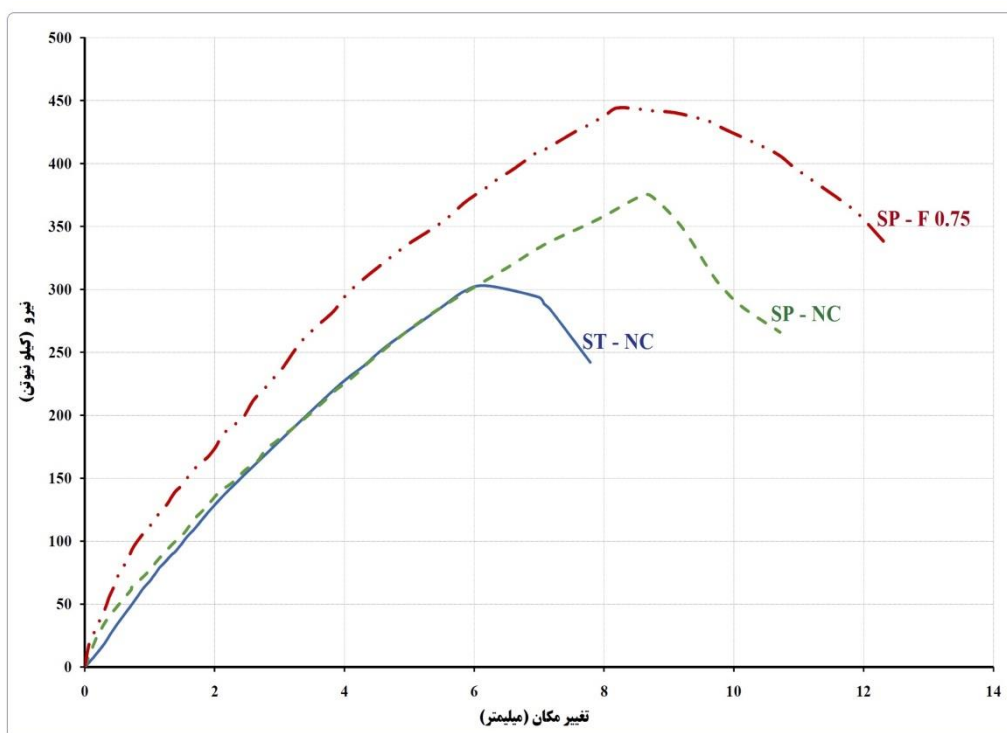
تمام تیرهای آزمایش شده، شکست برشی را همانطور که از طریق ایجاد ترک های مورب در دهانه برشی پیش بینی شده بود نشان دادند. تمام نمونه ها قبل از رسیدن به تنش تسلیم آرماتور کششی طولی به شکست برشی رسیدند. مقادیر اندازه گیری شده بیشینه بار اعمال شده ( $P_{max}$ )، مقاومت برشی نهایی مربوطه ( $V_u = 0.6P_{max}$ ) و تنش برشی متوسط ( $v_u = V_u/b_wd$ ) همراه با تغییر شکل مربوطه در بیشینه بار ( $\delta_{max}$ )، شکل پذیری و جذب انرژی تمامی تیرهای آزمایش شده در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین رفتار بار-تغییر مکان تمام تیرهای آزمایش شده در محل اعمال بار، مطابق شکل ۶ ارائه گردیده است.

نتایج آزمایش نشان می دهد که تأثیر آرماتور مارپیچ مستطیلی بر ظرفیت برشی تیرها قابل توجه است. نمونه های تقویت شده مارپیچی مقادیر مقاومت برشی بالاتری نسبت به نمونه مربوطه با خاموت های بسته معمولی نشان دادند. علاوه بر این، نمونه خاموت گذاری شده مارپیچی مستطیلی با بتن ییافی به طور قابل توجهی ظرفیت برشی

بالاتری را ارائه دادند و نسبت به نمونه‌های ساخته شده با خاموت‌های بسته و خاموت‌گذاری ماریچ با بتن معمولی، عملکرد کلی بهتری را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۶ بیانگر این موضوع می‌باشد که این تیر رفتار پس از اوج را در مقایسه با سایر تیرها با مقدار آرماتور برشی برابر (خاموت بسته یا آرماتور ماریچی با بتن معمولی) نشان می‌دهد. این افزایش عمدتاً به این دلیل می‌باشد که در تیر حاوی الیاف، پیوند به وجود آمده بین الیاف فولادی و بتن موجب می‌گردد تا تیر دارای تمایل مطلوبتری نسبت به برش تحمیلی داشته باشد و ترک‌های برشی بالقوه این نمونه مزیت مهمی برای مکانیسم‌های مقاومت برشی توسعه یافته تیر فراهم می‌کند. می‌توان تاکید کرد که استفاده از الیاف در بتن به عنوان یک مزیت، بر تنها کاستی خاموت‌گذاری ماریچ پیوسته نسبت به خاموت بسته اثر گذاشته و بر آن غلبه می‌کند. این کاستی بدین صورت می‌باشد که تنها یک ساق از ماریچ مستطیلی دارای تمایل مطلوب نسبت به برش اعمالی است و ساق دیگر، به نسبت، اثر کمتری در مقابله با برش تحمیلی ایفا می‌کند.

جدول ۳: نتایج آزمایش نمونه‌ها

نام نمونه	نوع خاموت	نوع بتن	S (mm)	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	$V_{u,exp.}$ (kN)	$\delta_{80\%}$	سطح زیر نمودار (kN.mm)	$V_{n,ACI}$ (kN)	$\frac{V_{u,exp.}}{V_{n,ACI}}$	$\frac{V_{u,exp.}}{V_{u,exp.ST-NC}}$
ST-NC	بسته	نرمال	۲۰۰	۳۰۳	۶,۱۹	۱۸۳,۳۹	۱,۲۶	۱۵۳۴	۱۳۲	۱,۳۹	۱
SP-NC	ماریچی	نرمال	۲۱۰	۳۷۵	۸,۶۰	۲۲۶,۹۷	۱,۱۵	۲۵۹۸	۱۲۶,۴۳	۱,۸۰	۱,۲۴
SP-F0.75	ماریچی	الیافی ۰,۷۵٪	۲۱۰	۴۴۴	۸,۱۹	۲۶۸,۷۴	۱,۴۷	۳۹۶۱	۱۸۵,۰۹	۱,۴۵	۱,۴۶



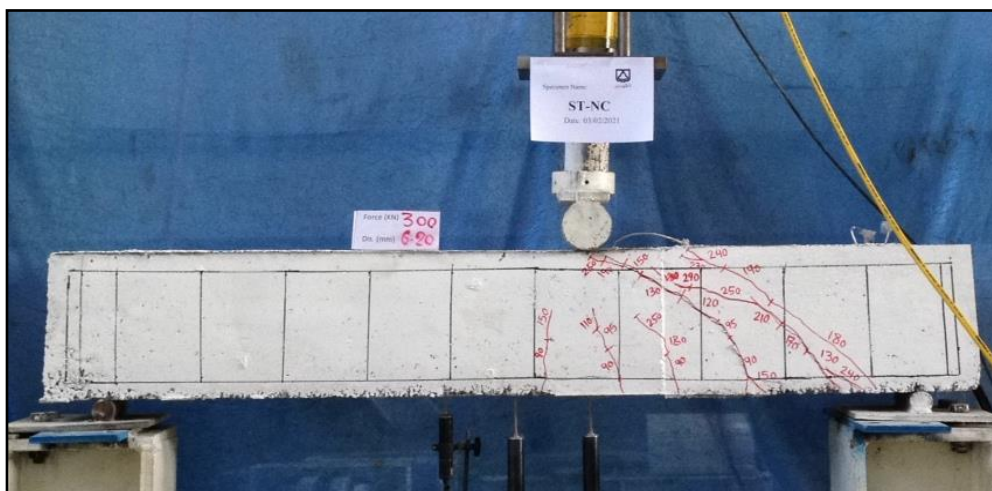
شکل ۶: نمودار بار - تغییر مکان (زیر بار) در نمونه‌ها

استفاده از الیاف فولادی با توزیع تصادفی و گسسته در بتن، مقاومت بهتری را در برابر رشد اولیه ترک ارائه می‌کند. اثر پل زدن الیاف فولادی در ترک به دلیل برهم کنش ماتریس الیاف، سرعت رشد ترک را کاهش می‌دهد و پیوسته

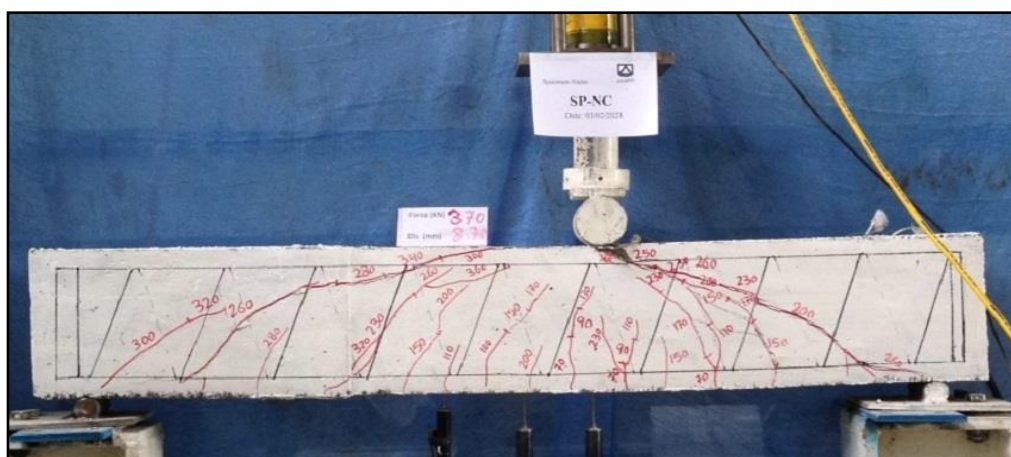
شدن بتن را محدود می‌کند [۳۱]. لذا با کاهش بازشدگی و کاسته شدن از گسترش ترک‌ها، ممان اینرسی موثر و بالتبع سختی و شیب منحنی بار - تغییر مکان در نمونه  $SP-F0.75$  نسبت به نمونه  $SP-NC$  افزایش می‌یابد که با افزایش شیب نمودار، سرعت در تغییر مکان تیر  $SP-F0.75$  نسبت به تیر  $SP-NC$  بر اثر بار وارده کمتر می‌گردد.

### ۳-۲- انتشار ترک

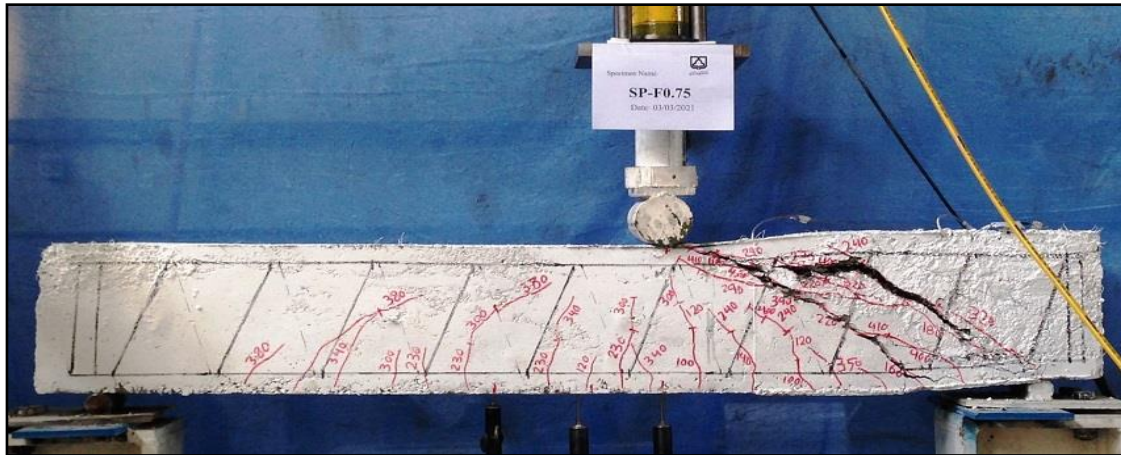
مطابق شکل‌های ۷ الی ۹ الگوی انتشار ترک برای همه تیرهای آزمایش شده در طول آزمایش و هنگام شکست ترسیم شده است. اولین ترک‌های خمشی در تمام تیرها در ناحیه حداکثر گشتاور خمشی در زیر بار ایجاد شد سپس ترک‌ها شروع به گسترش و شیب کردند. پس از آن ترک‌ها در ناحیه حداکثر برشی نزدیک تکیه‌گاه در دهانه کوچکتر شروع به پیشرفت کردند. همانطور که مشاهده می‌شود می‌توان دریافت که تمامی تیرها دچار ترک خوردگی مورب و شکست برشی خالص شده‌اند. به‌طور کلی، بر اساس الگوی انتشار ترک برای دو تیر با خاموت گذاری بسته و مارپیچی که با بتن معمولی ساخته شده‌اند، مشاهده می‌شود که تیرهای دارای خاموت مارپیچی در مقایسه با تیرهای دارای خاموت بسته، زاویه ترک خوردگی کمتری را نشان می‌دهند.



شکل ۷: الگوی ترک خوردگی تیر  $ST-NC$



شکل ۸: الگوی ترک خوردگی تیر  $SP-NC$



شکل ۹: الگوی ترک خوردگی تیر SP-F 0.75

همچنین با بررسی ترک های تیر *SP-NC* (تیر با خاموت مارپیچ ساخته شده با بتن معمولی)، مشاهده می گردد گسترش و انتشار ترک به صورت مورب در تیر مذکور در هر دو دهانه چپ و راست تیر تشکیل و نهایتاً شکست برشی صورت پذیرفته است (شکل ۸). این اثر ترک در دو سمت تیر ناشی از این موضوع می باشد که تنها یک ساق از خاموت مارپیچ مستطیلی دارای تمایل مطلوب نسبت به برش اعمالی است و ساق دیگر به نسبت، اثر کمتری در مقابله با برش تحمیلی ایفا می کند.

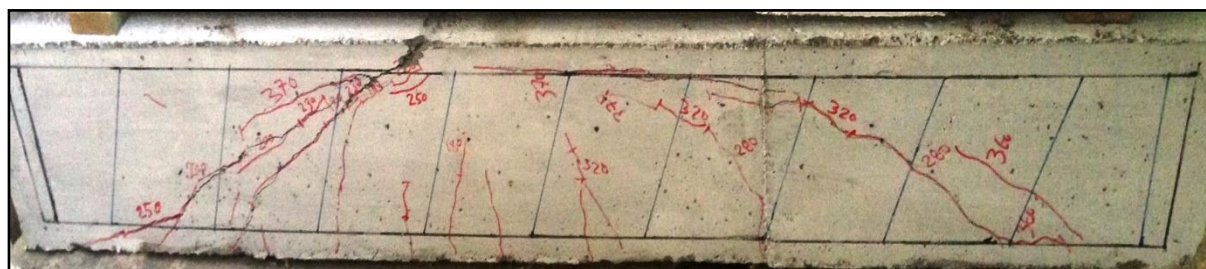
بر این اساس، نتایج آزمایش ثابت می کند که خاموت مارپیچ با مقطع مستطیلی، به دلیل بهبود محصور شدگی اضافی که در این نوع خاموت گذاری ایجاد می کند، جایگزین مؤثری برای خاموتهای بسته سنتی بوده و وجود الیاف ضمن افزایش محصور شدگی مضاعف موجب بهبود رفتار بتن در برش و کشش نیز می گردد. همچنین با بررسی و مقایسه الگوی انتشار ترک و زوایای شکست در دو تیری که دارای خاموت گذاری مارپیچ می باشند می توان نتیجه گرفت که افزودن الیاف به بتن باعث کمک به ساق مخالف خاموت مارپیچ شده و زاویه ترک افزایش می یابد.

الگوی ترک های وجه پشتی نمونه ها (شکل های ۱۰، ۱۱ و ۱۲) نشان می دهد که وضعیت ترک های در دو وجه هر نمونه، مخصوصاً در نمونه های *SP-NC* و *SP-F0.75* (با توجه به نامتقارن بودن آرماتورهای مارپیچ در دو وجه تیر) مشابه هم می باشند. همچنین بررسی الگوی ترک ها در نمونه مرجع (تیر *ST-NC*) با نمونه های *SP-NC* و *SP-F0.75* که دارای خاموت گذاری مارپیچی می باشد، نشان می دهد که شکست برشی و انتشار ترک در تیر مرجع در دهانه چپ تیر در محدوده برش حداکثر رخ داده شده است (شکل ۷).

در تیر *SP-NC* گسترش و انتشار ترک برشی در دو دهانه چپ و راست تشکیل گردیده که ناشی از تمایل مطلوب تنها یک ساق از خاموت مارپیچ مستطیلی نسبت به برش اعمالی است و ساق دیگر به نسبت، اثر کمتری در مقابله با برش تحمیلی ایفا می کند ولیکن پیوستگی و محصورکنندگی خاموتها اثر آن را تعدیل می نماید. همچنین با اضافه کردن الیاف به تیر *SP-F0.75*، گسترش و انتشار ترکها کاهش یافته و ترک های مورب برشی در دهانه سمت چپ تشکیل نشده است (شکل ۹). مراتب نشان دهنده اثر مطلوب افزودن الیاف به بتن می باشد که ضمن بهبود خواص برشی بتن، باعث کمک به ساق مخالف خاموت مارپیچ شده و موجب کاهش گسترش و بازشدگی ترک ها گردیده است.



شکل ۱۰: الگوی ترک خوردگی پشت تیر ST-NC



شکل ۱۱: الگوی ترک خوردگی پشت تیر SP-NC



شکل ۱۲: الگوی ترک خوردگی پشت تیر SP-0.75

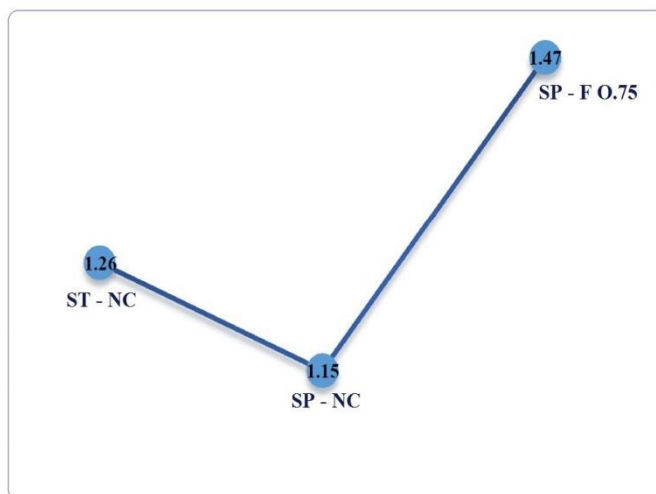
### ۳-۳- شکل پذیری و جذب انرژی

ارزیابی نتایج تجربی از نظر شکل‌پذیری برای تغییر مکان متناظر با نقطه اعمال بار، به منظور بررسی کارایی تقویت‌کننده مارپیچی مستطیلی اعمال شده در قسمت پس از بیشینه پاسخ تیرها نیز محاسبه شده است. اگرچه تیرهای برشی بحرانی رفتار شکننده ای از خود نشان می‌دهند، ولیکن در این مطالعه از ضریب شکل‌پذیری تغییر شکل  $\mu_{\delta 80}$  برای بررسی رفتار پس از بیشینه پاسخ تیرهای تقویت شده مارپیچی استفاده شده است. این عامل با رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$\mu_{\delta 80} = \frac{\delta_{u80}}{\delta_{max}} \quad (۳)$$

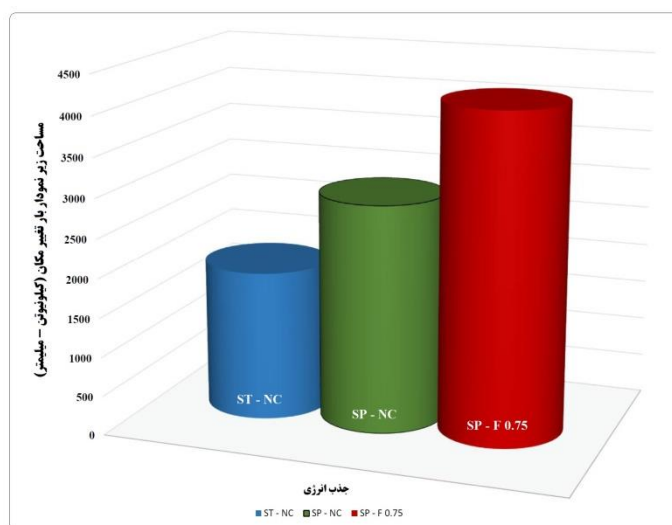
که در آن  $\mu_{u80}$  تغییر شکل پس از اوج در نقطه ای است که مقاومت باقیمانده برابر با ۸۰٪ مقاومت بیشینه مشاهده شده است و  $\delta_{max}$  تغییر شکل در مقاومت برشی نهایی (اوج) مشاهده شده است. مقادیر ضریب شکل‌پذیری تغییر شکل ( $\mu_{\delta 80}$ ) تیرهای آزمایش شده در جدول ۳ ارائه شده است. هدف از استفاده از این شاخص فقط بررسی کمی است که آیا آرماتور مارپیچی می‌تواند برخی از ویژگی‌های خمشی تیرهای برشی را ارائه دهد یا خیر. اگرچه همه نمونه‌های آزمایش شده تیرهای بحرانی برشی هستند و هیچ شکل‌پذیری انتظار نمی‌رود، ولیکن شکل‌پذیری بدست آمده از آزمایش صورت گرفته همانگونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، برای تیر تقویت‌شده به‌صورت مارپیچی با بتن معمولی (SP-NC) نسبت به تیر کنترلی کاهش و در تیر با بتن یابی (SP-F0.75) افزایش یافته است.

علت کاهش شکل پذیری محاسبه شده در تیر  $SP-NC$  نسبت به تیر کنترلی، گسترش و انتشار ترک به صورت مورب در هر دو دهانه چپ و راست تیر مذکور می باشد که ناشی از تمایل و رفتار متفاوت دو ساق از خاموت مارپیچ مستطیلی (جلو و پشت) نسبت به برش اعمالی است. لذا وجود محصور شدگی به دلیل پیوستگی خاموتها باعث افزایش بیشینه بار و تغییر مکان آن نسبت به تیر کنترلی گردیده (افزایش در مخرج کسر رابطه ۳)، ولیکن ترکهای به وجود آمده در دو سمت تیر  $SP-NC$  و گسترش آنها باعث می گردد شیب کاهش مقاومت پس از بیشینه بار نسبت به تیر کنترلی کمی بیشتر گردد، که به این ترتیب شکل پذیری تیر  $SP-NC$  نسبت به تیر  $ST-NC$  کاهش یافته است. لذا با افزودن الیاف به تیر  $SP-F0.75$  و با کاهش شیب افت مقاومت پس از بیشینه بار نسبت به تیر کنترلی و تیر  $SP-NC$  شکل پذیری نیز افزایش می یابد.



شکل ۱۳: شکل پذیری نمونه های آزمایش شده

در این پژوهش سطح زیر منحنی بار - تغییر مکان کلیه نمونه ها به عنوان پارامتر جذب انرژی محاسبه شده است. میزان انرژی جذب شده در نمونه ها نشان دهنده تاثیر مثبت تغییر نوع خاموت گذاری از حالت بسته متداول به حالت مارپیچی پیوسته می باشد. همچنین افزودن الیاف فولادی به بتن در افزایش میزان انرژی جذب شده نمونه ها موثر می باشد. مقدار انرژی جذب شده برای هر سه نمونه محاسبه و مقادیر آن در جدول ۳ و شکل ۱۴ ارائه گردیده است.



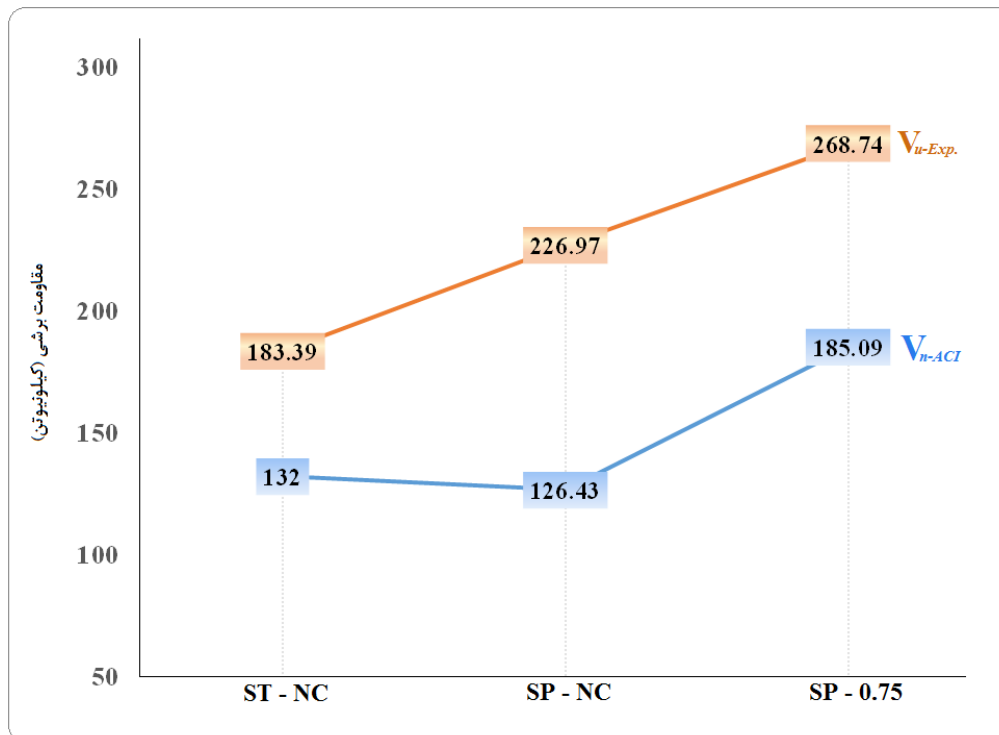
شکل ۱۴: نمودار جذب انرژی نمونه ها

### ۳-۴ پیش بینی های تحلیلی

برآورد ظرفیت برشی تیرهای آزمایش شده نیز به منظور مقایسه و بحث بیشتر در مورد داده های آزمایش در این مطالعه گنجانده شده است. پیش بینی مقاومت برشی نهایی تیرهای آزمایش شده با استفاده از روابط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آیین نامه بتن آمریکا (ACI 318-19) [۷] به شرح رابطه ۴ ارائه شده است.

$$V_n = V_c + V_s \quad (۴)$$

مقاومت برشی برای بتن نرمال ( $V_c$ ) وفق بند  $b-۲۲,۵,۵,۱$  و برای بتن الیافی فولادی مطابق پیشنهاد ارائه شده در تفسیر بند  $۹,۶,۳,۱$  آیین نامه بتن آمریکا (ACI 318-19) با رابطه  $0.29\sqrt{f'_c}b_wd$  محاسبه و ملاک عمل قرار گرفته است. مقاومت برشی ناشی از خاموتها ( $V_s$ ) نیز طبق بخش  $۲۲,۵,۸$  آیین نامه مذکور محاسبه شده است [۱]. در جدول ۳ ظرفیت برشی بر اساس مفاد مبحث نهم مقررات ملی و آیین نامه بتن آمریکا محاسبه و با مقادیر داده های تجربی  $V_{u,exp}$ ، تیرهای آزمایش شده مقایسه شده است. از این مقایسه ها بدیهی است که مقررات طراحی مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آیین نامه بتن آمریکا در پیش بینی مقاومت برشی نهایی تیرها در یک حاشیه معقول محافظه کار هستند. این مشاهده ممکن است کم و بیش مورد انتظار و شاید مطلوب باشد، زیرا استانداردهای طراحی با درجه ای از محافظه کاری برای پوشش دادن همه موارد ممکن در چارچوب آنها تدوین گردیده اند. با این وجود، از این مقایسه ها می توان به راحتی نتیجه گرفت که پیش بینی های طراحی در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آیین نامه بتن آمریکا که برای استفاده از خاموت های بسته اعمال می شوند، می توانند برای تیرهای با خاموت گذاری مارپیچی پیوسته و با نتایج محافظه کارانه نیز اعمال شوند (شکل ۱۵).



شکل ۱۵: مقاومت برشی بر اساس ACI 318-19 و نتایج آزمایشگاهی

#### ۴- نتیجه گیری

- نتایج آزمایشات صورت گرفته نشان می‌دهد که استفاده از آرماتورهای مارپیچ مستطیلی، باعث افزایش ظرفیت باربری و بهبود عملکرد برشی در تیرهای مورد بررسی شده است و نتایج بدست آمده همسو با پژوهش‌های صورت گرفته قبلی می‌باشد.

- تیرهای با آرماتورهای مارپیچ مستطیلی پیوسته با بتن معمولی و بتن الیافی به ترتیب ۲۳,۸ و ۴۶,۵ درصد ظرفیت برشی را نسبت به تیر با خاموت بسته سنتی نشان دادند. علاوه بر این، تیر با خاموت گذاری مارپیچ دارای بتن الیافی نسبت به تیر مشابه با بتن معمولی ۱۸,۴ درصد، افزایش ظرفیت برشی و افزایش عملکرد را نشان داد. همچنین تیر تقویت شده مارپیچی با بتن الیافی ( $SP-F0.75$ )، محدوده پس از بیشینه نیرو را با روند نزولی نرم‌تر در مقایسه با دو تیر دیگر نشان می‌دهند. از این رو می‌توان دریافت که که به دلیل وجود توأم آرماتورهای مارپیچ و بتن الیافی، بهبود رفتار برشی و محصورشدگی اضافی در تیر ایجاد گردیده که ضمن افزایش مقاومت فشاری بتن، ظرفیت بتن برای انتقال برشی را نیز افزایش داده است.

- مقاومت برشی تیرهای آزمایش شده نسبت به مقادیر محاسبه شده از روابط آیین نامه ای برای تیرهای  $ST-NC$  و  $SP-NC$  و  $SP-F0.75$  به ترتیب به میزان ۳۹ و ۸۰ و ۴۵ درصد افزایش را نشان می‌دهد.

- جذب انرژی در تیرهای با آرماتورهای مارپیچ مستطیلی پیوسته با بتن معمولی و بتن الیافی نسبت به تیر با خاموت بسته سنتی به ترتیب ۶۹ و ۱۵۸ درصد بیشتر می‌باشد.

- شکل پذیری بدست آمده از آزمایش صورت گرفته برای تیر تقویت شده به صورت مارپیچی با بتن معمولی ( $SP-NC$ ) و بتن الیافی ( $SP-F0.75$ ) به ترتیب ۰,۸۷ و ۱,۱۷ برابر تیر کنترلی ( $ST-NC$ ) می‌باشد. نتایج بیانگر کاهش شکل پذیری تیر  $SP-NC$  نسبت به تیر کنترلی  $ST-NC$  می‌باشد. با افزودن ۰,۷۵ درصد حجمی الیاف به بتن، نه تنها ضعف شکل پذیری در تیر  $SP-NC$  رفع می‌گردد بلکه شکل پذیری آن نسبت به تیر کنترلی نیز افزایش می‌یابد.

- مشاهده انتشار ترک‌ها نشان می‌دهد که می‌توان الگوی ترک و مکانیسم شکست را برای همه تیرها یکسان در نظر گرفت. این نتایج مزایای استفاده از خاموت گذاری مارپیچی در تیرهای ساخته شده با بتن الیافی پیشنهاد شده در این مطالعه را اثبات می‌کند.

- مطالعات زیادی برای بررسی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با تیرهای بتن الیافی  $SFRC$  انجام شده است و نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر همسو و مشابه نتایج پژوهش‌های پیشین مبنی بر افزایش مقاومت برشی، جذب انرژی، افزایش شکل پذیری و کاهش در گسترش ترک‌ها می‌باشد.

#### ۵- تشکر و قدردانی

از جناب آقای دکتر مالکی مدیر عامل محترم شرکت صنایع فولادی زنجان به دلیل تأمین الیاف فولادی پژوهش حاضر و آقای مهندس بخشایی مسئول محترم آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان، تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### ۶- منابع و مأخذ

- [1] ACI Committee 318. *Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-19) and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318RM-19)*, American Concrete Institute (ACI); (2019).
- [2] Nilson, N., Winter, G., (1986), *Design of Concrete Structures*, McGraw-Hill, New York.
- [3] Park, R., Paulay, T., (1975), *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons.
- [4] Sidney, M., Young, J.F. and Darwin, D., (2003), *Concrete*, Prentice Hall.

[۵] خیرالدین، علی، دهقان، مرتضی، شربتدار، محمدکاظم، (۱۳۹۷)، بهبود سازه‌ای تیر رابط دیوارهای برشی همبند با جایگزینی بتن الیافی توانمند (HPFRCC) با بتن معمولی، مجله علمی پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۳: ۴۸۴-۴۷۱

[6] Fascia F., Chiara D.M., Piasanti, G., Iovino, R., (2010), Continuous stirrup with vertical arms and variable pitch for reinforced concrete structures. Schnell S.p.A.

[7] Riva, P., (2009), Cyclic response of column-to-foundation joints with continuous stirrups SPIREX. Schnell technical report.

[8] Sung Eom, T., Min Kang. S., Gun Park. H., Woo Choi. T., Min Jin. J., (2014), Cyclic loading test for reinforced concrete columns with continuous rectangular and polygonal hoops. *Journal of Engineering Structures, Elsevier*; 67: 39-49.

[9] Kakaletsis J, Karayannis G, Panagopoulos K., (2013), Effectiveness of rectangular spiral shear reinforcement on infilled R/C frames under cyclic loading. *Journal of Earthquake Engineering, Taylor & Francis*; 15: 1178-1193.

[10] Karayannis CG, Chalioris CE, Mavroeidis PD., (2005), Shear capacity of RC rectangular beams with continuous spiral transversal reinforcement. *WIT Trans Modell Simul*; 4: 379-86.

[11] Karayannis, C., Chalioris, C., (2013), Shear tests of reinforced concrete beams with continuous rectangular spiral reinforcement, *Constr. Build. Mater.* 46: 86-97.

[12] Chalioris, C., Karayannis, C., (2013), Experimental investigation of RC beams with rectangular spiral reinforcement in torsion, *Eng. Struct.* 56: 286-297.

[13] Corte, W., Boel, V., (2013), Effectiveness of spirally shaped stirrups in reinforced concrete beams, *Eng. Struct.* 5: 667-675.

[14] Shatarat, N., Katkhuda, H., Abdel-Jaber, M., Alqam, M., (2016), Experimental investigation of reinforced concrete beams with spiral reinforcement in shear, *Constr. Build. Mater.* 125: 585-594.

[15] Shatarat, N., Mahmoud, H.M., Katkhuda, H., (2018), Shear capacity investigation of self compacting concrete beams with rectangular spiral reinforcement, *Constr. Build. Mater.* 189: 640-648.

[16] Saha, P., Meesaraganda, L.V.P., (2019), Experimental investigation of reinforced SCC beam-column joint with rectangular spiral reinforcement under cyclic loading, *Constr. Build. Mater.* 201: 171-185.

[17] Cuenca, E., (2015), *On Shear Behavior of Structural Elements Made of Steel Fiber Reinforced Concrete*, Springer.

[18] Lin, Wei-ling, (1992), *Toughness Behavior Of fiber Reinforcement Concrete*, *Proceeding of the Fourth RILEM International Symposium Sheffield, UK*.

[۱۹] علی عسگری، محمد، شربتدار، محمدکاظم، (۱۳۹۶)، بررسی آزمایشگاهی ظرفیت خمشی و فشاری پانل های بتن مسلح به الیاف شیشه، فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات بتن، ۲: ۳۱-۱۵.

[۲۰] شربتدار، محمدکاظم، قاسمی نقیب دهی، ماهان، دهقان، مرتضی، (۱۳۹۰)، بررسی رفتار صفحات بتن آرمه دولایه تحت بارگذاری ضربه ای، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

[21] Hemmati, A., Kheyroddin, A. and Sharbatdar, M.K., (2015), Increasing the flexural capacity of RC beams using partially HPFRCC layers, *Computers and Concrete*, 4: 545-568.

[22] ACI544.1R-96, *State of The Art Report on The Fiber Reinforced Concrete*.

[23] American Concrete Institute (ACI) 544.1R-96, (1998), *State of The Art Report on The Fiber Reinforced Concrete". Manual of concrete practice, ACI-544. 2R-89 Michigan, USA*.

[24] Ghasemi Naghibdehi, M., Sharbatdar, M.K., Dehghan, M., (2012), *Experimental Investigation of Flexural Behavior of One-Way Two-Layer Steel and Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Slab*, 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

[25] Tahenni, T., Chemrouk, M. and Lecompte, T., (2016), Effect of steel bers on the shear behavior of high strength concrete beams", *Construction and Building Materials*, 105: 14-28.

[26] Greenough, T. and Nehdi, M.L., (2008), Shear behavior of berreinforced self-consolidating concrete slender beams, *ACI Materials Journal*, 105(5): 468-477.

[۲۷] کریمی مهرآبادی، محمد، هاشمی، حمید، (۱۳۹۶)، بررسی رفتار تیرهای بتنی حاوی الیاف فولادی فاقد خاموت، مجله علمی پژوهشی عمران شریف، ۳/۲ : ۸۵-۹۴.

[۲۸] حمزه نژادی، ابوذر، شربتدار، محمدکاظم، خیرالدین، علی، (۱۳۹۸)، بررسی آزمایشگاهی رفتار برشی تیرهای عمیق با جایگزینی بتن مسلح کامپوزیتی الیافی بجای بتن معمولی، فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات بتن، ۳ : ۲۹-۴۳.

[29] Bichitra, S. N., Kranti, J., (2022), Shear resistant mechanisms in steel fiber reinforced concrete beams: An analytical investigation, *Structures*, 39: 607-619.

[30] Shin, H.-O. , Min, K.-H. , Mitchell, D., (2018), Uniaxial behavior of circular ultra-high-performance fiber-reinforced concrete columns confined by spiral reinforcement, *Construction and Building Materials*, 168: 379-393.

[31] Tamjeed, A., Chidambaram, R.S., (2022), Shear strength of steel fiber reinforced concrete beam– A review, *Materials Today: Proceedings*, 64: 1087-1093.