



Experimental Investigation of the Seismic Performance of the Joint between a Steel encased in Reinforced Concrete Column and a Reinforced Concrete Beam

Seyedeh Marzieh Qiyami Taklymi, Ali Kheyroddin * , Omid Rezaifar 

Faculty of Structural Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

ABSTRACT: In recent years, the use of steel-reinforced concrete (SRC) columns, including composite connections, in high-rise structures has increased significantly. One of the key issues in connection design is the proper detailing of the interface between the steel section embedded in the concrete column and the reinforced concrete beam. This study experimentally investigates the seismic performance of the connection between a reinforced concrete beam with a transition steel part (TP) and an SRC column, and compares it with other types of connections. Three experimental specimens were constructed: (i) a reinforced concrete beam (RC)–column joint, (ii) an reinforced concrete beam–steel reinforced concrete (SRC) column joint, and (iii) an reinforced concrete beam with a transition part (TP)–SRC column joint. All specimens were subjected to cyclic lateral loading on the beams and axial loading on the columns. The main experimental parameters include the effects of the steel section on load-bearing capacity, ductility, and stiffness, as well as the influence of the transitional part on ductility and stiffness. The results indicate that the incorporation of the TP substantially enhances the performance of the beam–column joint. Specifically, lateral load capacity increased by 1% and 15% in tension, and by 20% and 8% in compression, compared to the reinforced concrete beam–column and reinforced concrete beam–SRC column specimens, respectively. Additionally, ductility improved by 44% and 24%, respectively, compared to the same specimens. The results highlight the effectiveness of the TP in enhancing the load-bearing capacity and ductility of RC beam–SRC column joints.

Review History:

Received: Sep. 28, 2024

Revised: Jan. 05, 2026

Accepted: Mar. 08, 2026

Available Online: Apr. 06, 2026

Keywords:

Composite Connections

Seismic Performance

Transition Part (TP)

SRC Column

Cyclic Load

1- Introduction

This paper investigates Steel Reinforced Concrete (SRC) composite members and their connections. SRC columns, due to the combination of steel sections and concrete encasement, possess high load-bearing capacity, ductility, and resistance to fire and corrosion, making them suitable for tall structures and seismic zones [1-3]. Previous studies have shown that these columns have favorable seismic performance [4-6], and their connections play a crucial role in structural stability [7-15]. This research specifically focuses on the connection between an SRC column and an RC beam using a “Transitional Piece” (TP) [16, 17]. The primary objective is to prevent premature beam failure and limit damage in the connection region. The results indicate that the use of a transitional piece, which connects the beam’s reinforcement to the steel section of the column, significantly improves the load-bearing capacity, ductility, and stiffness of the connection under seismic loading. This approach is proposed as an effective solution for enhancing the safety and seismic performance of structures.

2- Methodology

In this study, three types of beam-column connections were fabricated, investigated, and tested. Each specimen was designed based on the ACI318-19 [18] standard. The RC specimen features a reinforced concrete beam and column. Both the SRCC-RCB and SRCC-RCB-TP-Hooked specimens have a steel column encased in reinforced concrete with a reinforced concrete beam. In the latter specimen, a steel section was utilized in the beam to column connection region (transition part). According to the design based on the ACI318-19 standard, the spacing of the stirrups in the critical region was considered. The longitudinal reinforcement bars for all three specimens are 14Φ , and their transverse reinforcement bars are 10Φ . Furthermore, the percentage of steel used in all three specimens, in accordance with the standard, ranges between 1% and 8%. In the design of the experimental specimens, scaled models were not based on the classic principles of similitude; rather, their dimensions were selected based on the limitations of the experimental equipment and the capacity of the loading system. The specimens were designed such

*Corresponding author’s email: kheyroddin@semnan.ac.ir



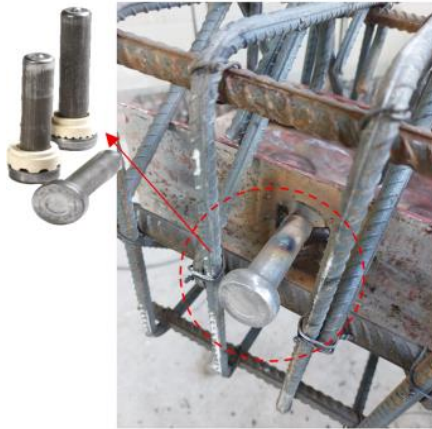


Fig. 1. Details of Shear Studs.

that a strong column-weak beam mechanism governs the behavior, ensuring that damage, failure, and plastic hinging occur within the beam. Consequently, no significant damage or yielding is observed in the joint region (the panel zone) or the column. To facilitate better shear transfer between the steel and concrete, shear studs were employed on the steel sections (Figure 1). The concrete used for fabricating the specimens was cast in place and monolithic. Its mechanical properties, including a compressive strength of 35 MPa, were determined through relevant tests. For all three specimens, a constant axial compressive load of 400 kN, equivalent to 0.8% of the column's axial capacity, was applied. Subsequently, a cyclic lateral load was imposed at a point on the beam's end according to a specific loading protocol. The testing of the specimens followed the ACI374-1-05 [19] protocol, and the specimens were investigated until a 15% reduction in load-bearing capacity was observed.

3- Discussion and Results

The parameters investigated in this study include the cracking behavior, the mode and location of specimen failure, the use of the transition part (TP) and its effect on plastic hinge formation, the lateral load-bearing capacity, the hysteresis (force–displacement) curves, and the secant stiffness. The cracks observed in the specimens occurred at the end of the beam and away from the joint region, with no cracking or damage detected in the joint core or the column. The maximum compressive and tensile load capacities at 1% drift were +43.5 kN and –45.7 kN for specimen RCC-RCB, –50.1 kN and +38.8 kN for SRCC-RCB, and –54.6 kN and +45.3 kN for SRCC-RCB-TP-Hooked, respectively. With increasing lateral displacement, the load-bearing capacity gradually decreased. Figures 2 to 4 show the hysteresis curves of the specimens. The cracking patterns, failure modes, and load-bearing capacities of the three specimens (RCC-RCB, SRCC-RCB, and SRCC-RCB-TP-Hooked) differed from one another. Due to the use of an embedded steel section within the reinforced concrete column in specimens SRCC-

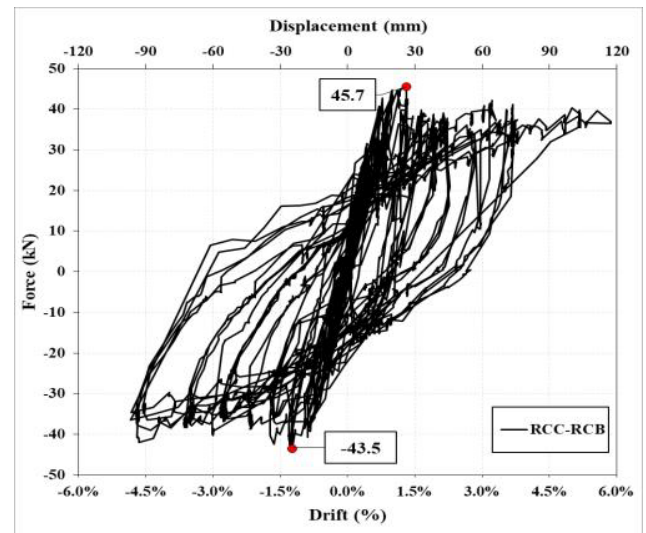


Fig. 2. Hysteresis Curve RCC-RCB Specimen.

RCB and SRCC-RCB-TP-Hooked, the compressive load-bearing capacity of these specimens increased compared with that of the RCC-RCB specimen. Moreover, the crack distribution in SRCC-RCB-TP-Hooked was more uniform and extensive than in the other two specimens. The plastic hinge length in SRCC-RCB-TP-Hooked was also longer than in the other specimens. The lateral ductility of each specimen was calculated as the average of the compressive and tensile lateral ductilities. The ductility values for RCC-RCB, SRCC-RCB, and SRCC-RCB-TP-Hooked were 9, 3, 6, 9, and 12, 3, respectively.

Since the columns in all specimens remained within the elastic range, cracking occurred in the beams, and the stiffness degradation curves were nearly identical. According to the results, the SRCC-RCB specimen showed an increase in stiffness of 13.5% and 37.5% in the tensile and compressive loading directions, respectively, compared with RCC-RCB, due to the use of the embedded steel section in the column. Similarly, the SRCC-RCB-TP-Hooked specimen exhibited increases of 50% and 45% in stiffness under tensile and compressive loading relative to RCC-RCB, and 46% and 12% compared with SRCC-RCB, respectively, indicating the significant influence of embedded steel sections within both the column and part of the reinforced concrete beam.

4- Conclusions

Based on the conditions of each specimen and the investigations conducted in this article, the following conclusions can be drawn:

- The hysteresis curves indicate that the SRCC-RCB-TP-Hooked specimen exhibits superior performance in terms of lateral load-bearing capacity and energy dissipation. The presence of I-shaped sections in the reinforced concrete column and the transition part in the reinforced concrete beam has contributed to the increased energy

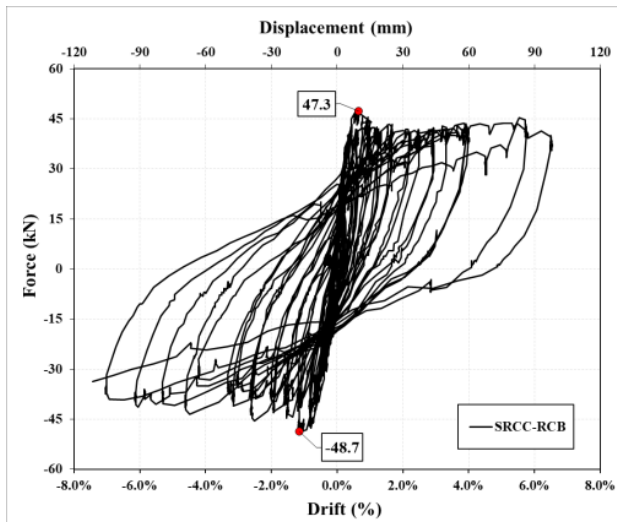


Fig. 3. Hysteresis Curve SRCC-RCB Specimen.

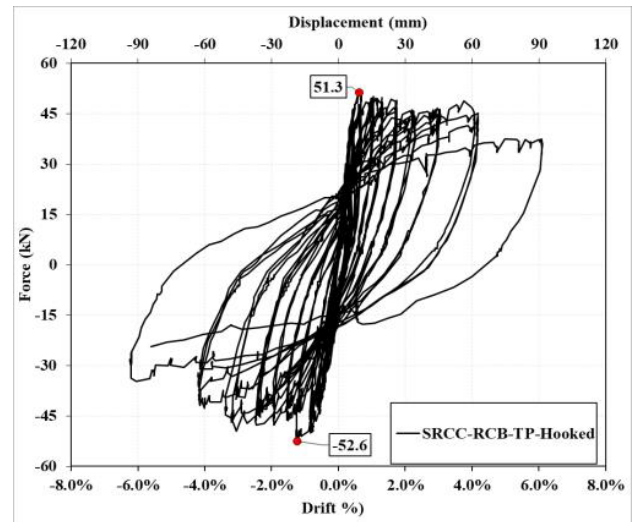


Fig. 4. Hysteresis Curve SRCC-RCB-TP-Hooked Specimen.

absorption in this specimen.

- The results show that the secant stiffness of the SRCC-RCB-TP-Hooked specimen increased by 46.5% and 12.1% in the tension and compression directions, respectively, compared to the SRCC-RCB specimens. Furthermore, compared to the RCC-RCB specimen, the sectional stiffness increased by 51.2% and 45% in the tension and compression directions, respectively.
- The presence of steel sections encased in reinforced concrete column and a transition part of the beam in the SRCC-RCB-TP-Hooked specimen has led to increased energy dissipation. Consequently, the shear force acting on the joint's panel zone has also increased.

References

- [1] Z.-H. Xu, G.-L. Bai, J.-Q. Zhao, B. Liu, Study on seismic performance of SRC leaning beam-column exterior joints in the main workshop of CAP1400 nuclear power plant, *Structures*, 34 (2021) 2721-2734.
- [2] XUE Yicong YU Yunlong, YANG Yong, Theoretical model on shear strength of steel reinforced concrete short columns, *JOURNAL OF BUILDING STRUCTURES*, 41(S1) (2020) 162-170.
- [3] K. Wardhana, F.C. Hadipriono, Study of recent building failures in the United States, *Journal of performance of constructed facilities*, 17(3) (2003) 151-158.
- [4] K. Liu, J. Chen, Y. Cai, C. Liu, Seismic Performance of a Novel Partially Embedded Transfer Connection with Wing Wall in Steel-Concrete Vertical Irregular Structures: Physical Tests and Theoretical Model, *Journal of Structural Engineering*, 151(9) (2025) 04025120.
- [5] J. Wei, J. Xue, Z. Hu, L. Qi, J. Xu, Experimental study on dynamic shear-behavior of H-shaped SRC columns under lateral impact loading, *Journal of Constructional Steel Research*, 213 (2024) 108396.
- [6] X. Zhu, Q. Zhang, D. Zhang, Y. Du, Q. Zhang, Experimental and numerical study on the dynamic response of steel-reinforced concrete composite members under lateral impact, *Thin-Walled Structures*, 169 (2021) 108477.
- [7] X. Lan, Y. Wang, B. Tan, Y. Zhang, An assessment of application of the component-based method to full range behaviour of joints between steel beam to concrete filled steel tube columns under extreme loading conditions, *Engineering Structures*, 309 (2024) 118057.
- [8] E. Tavasoli, O. Rezaifar, a. Kheyroddin, Experimental study of shear retrofit of RC beam-column joints using external post-tensioned bolts (In Persian), *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(3) (2023) 681-700.
- [9] V.-P. Nguyen, Q.-H. Nguyen, M. Couchaux, J. Aribert, M. Hjiat, Hybrid steel beam to exterior RC column joints with encased steel profile, *Engineering Structures*, 306 (2024) 117624.
- [10] C.-H. Li, X.C. Liu, A.-L. Zhang, X. Chen, D. Zhang, Y.-Z. Ren, J. Zhang, Z. Li, Axial compressive strength of concrete encased extended T-shaped steel composite columns with less reinforcement, *Journal of Building Engineering*, 82 (2024) 108207.
- [11] Y. Li, M. Fan, H. Song, C. Wu, Q. An, X. Wang, J. Ren, Restoring force model of a modular steel-concrete composite column, *Case Studies in Construction Materials*, 20 (2024) e03128.
- [12] C. Wu, Z. Liu, J. Men, Z. Li, H. Ding, C. Xiong, X. Wang, Analysis of stress mechanism in a new prefabricated SRC composite column, *Structures*, 59 (2024) 105695.
- [13] M. Pan, D. Wang, H. Bai, T. Yu, Axial compression behavior of FRP-confined steel-reinforced columns with

- a flange-broadened cross-shaped steel, *Thin-Walled Structures*, 189 (2023) 110898.
- [14] M. Moharram, D. Bompa, B. Xu, A. Elghazouli, Behaviour and design of hybrid RC beam-to-steel column connections, *Engineering Structures*, 250 (2022) 113502.
- [15] H. Bai, J. Xu, C. Demartino, X. Zhao, Probabilistic code-based shear capacity model for I-shaped steel reinforced concrete (SRC) beams, *Engineering Structures*, 301 (2024) 117180.
- [16] M. Moharram, D. Bompa, A. Elghazouli, Experimental and numerical assessment of mixed RC beam and steel column systems, *Journal of Constructional Steel Research*, 131 (2017) 51-67.
- [17] P. Pan, X. Lin, A. Lam, H. Chen, L. Ye, Monotonic loading tests of ring-beam connections for steel reinforced concrete columns and RC beams, *Journal of Structural Engineering*, 140(4) (2014) 04013092.
- [18] A.-A.C. Institute), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19), in, ACI, 2019.
- [19] A. 374:1-5, Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary, in: ACI, 2005, pp. 1-05.



بررسی آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای اتصال مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه و تیر بتن‌آرمه

سیده مرضیه قیامی تکلیمی، علی خیرالدین*^{ID}، امید رضایی^{ID} فر

دانشکده مهندسی عمران-سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۱/۱۷

کلمات کلیدی:

اتصال کامپوزیت
عملکرد لرزه‌ای
قطعه انتقالی
ستون فولادی محاط در بتن‌آرمه (SRC)
بارگذاری چرخه‌ای

خلاصه: در سال‌های اخیر استفاده از ستون‌های فولادی-بتن‌آرمه در سازه‌های بلند افزایش یافته است. یکی از مهم‌ترین موضوعات در بحث اتصالات، اتصال مناسب بین مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه و تیر بتن‌آرمه (اتصال کامپوزیت) می‌باشد. در این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای اتصال مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه و قطعه انتقالی محاط در تیر بتن‌آرمه و مقایسه آن با دیگر اتصالات پرداخته شده است. سه نمونه آزمایشگاهی (تیر و ستون بتن‌آرمه، تیر بتن‌آرمه و ستون فولادی محاط در بتن‌آرمه و تیر بتن‌آرمه به همراه قطعه انتقالی و ستون فولادی محاط در بتن‌آرمه) ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌ای و بار محوری، قرار گرفته است. پارامترهای اصلی آزمایش، تاثیر مقطع فولادی در ستون بر ظرفیت باربری، شکل‌پذیری، سختی و اثر استفاده از قطعه انتقالی در ناحیه اتصال تیر به ستون بر شکل‌پذیری و سختی می‌باشند. براساس نتایج آزمایشگاهی، استفاده از قطعه انتقالی در ناحیه اتصال تیر، سبب بهبود عملکرد این اتصال، نسبت به نمونه‌های تیر و ستون بتن‌آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه شده است. استفاده از قطعه انتقالی در ناحیه اتصال تیر، سبب افزایش ظرفیت باربری جانبی نسبت به نمونه‌های تیر و ستون بتن‌آرمه و تیر بتن‌آرمه و ستون فولادی محاط در بتن‌آرمه به ترتیب در جهت کششی ۱٪ و ۱۵٪، در جهت فشاری به ترتیب ۲۰٪ و ۸٪ شده است. نتایج شکل‌پذیری نمونه‌ها، نشان می‌دهد نمونه دارای قطعه انتقالی نسبت به نمونه‌های تیر و ستون بتن‌آرمه و تیر بتن‌آرمه و ستون فولادی محاط در بتن‌آرمه، به ترتیب ۴۴٪ و ۲۴٪ افزایش یافته است.

۱- مقدمه

می‌دهد که در صورت جلوگیری از کمانش آرماتورها، ظرفیت باربری چرخه‌ای و شکل‌پذیری ستون‌های SRC نسبت به سایر انواع ستون‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. Wei و همکاران [۵] و Zhu و همکاران [۶] عملکرد ستون‌های SRC را تحت بارهای ضربه‌ای جانبی مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد افزایش انرژی و سرعت ضربه موجب افزایش ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود و این موضوع می‌تواند رویکرد مؤثری برای بهبود عملکرد ستون‌ها در برابر ضربه باشد. علاوه بر این، کاربرد اعضای SRC در سیستم‌های سازه‌ای مختلف نیز موضوع پژوهش‌های گسترده‌ای بوده است. به‌عنوان نمونه، Zhou و همکاران رفتار تیرهای عمیق SRC را بررسی کرده‌اند [۷]، و در ادامه، عملکرد قاب‌های SRC را نیز مورد مطالعه قرار داده‌اند [۸]. همچنین Xu و همکاران [۹] و Zhang و همکاران [۱۰] رفتار قاب‌های ترکیبی SRC-RC را تحلیل کرده‌اند. نتایج این مطالعات به‌طور کلی نشان می‌دهد که استفاده از مقاطع SRC می‌تواند موجب بهبود سختی جانبی و ظرفیت باربری سیستم شود و

اعضای مرکب فولادی محاط در بتن‌آرمه (Steel-Encased Re-inforced Concrete؛ SRC) شامل مقاطع فولادی سازه‌ای هستند که توسط بتن‌آرمه دربرگرفته شده‌اند. به‌کارگیری پروفیل فولادی در این سیستم‌ها موجب افزایش چشمگیر ظرفیت باربری و شکل‌پذیری می‌شود. علاوه بر این، وجود پوشش بتن‌آرمه، مقاومت مطلوبی در برابر آتش و خوردگی فراهم کرده و سختی جانبی بالاتری نسبت به ستون‌های متعارف ایجاد می‌نماید. به دلیل این ویژگی‌ها، ستون‌های SRC کاربرد گسترده‌ای در انواع سیستم‌های سازه‌ای دارند؛ از جمله در ساختمان‌های بلندمرتبه دارای محدودیت‌های معماری، سازه‌های با اهمیت زیاد نظیر نیروگاه‌های هسته‌ای [۱] و همچنین در پایه پل‌ها و سازه‌های متوسط و سنگین [۲، ۳]. مطالعات متعددی بر رفتار انواع ستون‌های SRC تحت بارگذاری‌های مختلف، از جمله بارگذاری چرخه‌ای، انجام شده است [۴]. نتایج این تحقیقات نشان

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kheyroddin@semnan.ac.ir



مختلط می‌باشد. عمده پژوهش‌ها بر روی اتصالات ستون بتن‌آرمه و تیر فولادی متمرکز شده‌اند. علاوه بر این، Pan و همکاران [۴۷] اتصال تیر بتن‌آرمه به ستون فولادی محاط در بتن‌آرمه (SRC) را با استفاده از یک قطعه انتقالی دایره‌ای در ناحیه اتصال بررسی کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی صحیح چنین اتصالاتی نیازمند توجه ویژه به نسبت مساحت آرماتورهای تیر در ناحیه دایره‌ای، نسبت خاموت‌ها در اعضای مختلف و نحوه قرارگیری گل‌میخ‌ها می‌باشد. همچنین، عملکرد اتصال پیشنهادی به طول مهار آرماتورها در بتن، مکانیسم انتقال برش بین بتن و فولاد و میزان محصورشدگی مقطع وابسته است. بررسی نحوه قرارگیری مقطع فولادی I شکل محاط در ستون بتن‌آرمه در مطالعات انجام شده توسط دیگر نویسندگان نشان می‌دهد، این مقطع در جهت بال به تیر مورد نظر متصل شده و آرماتورهای طولی تیر نیز از بال مقطع فولادی ستون بتن‌آرمه عبور کرده است. همچنین نحوه اتصال قطعه انتقالی مورد بررسی در مطالعات انجام شده توسط دیگر نویسندگان به مقطع ستون فولادی به صورت پیچی با استفاده از پیچ‌های با مقاومت بالا انجام شده است. مطالعات پیشین در زمینه نحوه قرارگیری مقطع فولادی I شکل محاط در ستون بتن‌آرمه نشان می‌دهد که این مقطع عمدتاً در جهت بال به تیر متصل شده و آرماتورهای طولی تیر از بال مقطع فولادی ستون عبور می‌کنند. همچنین، در مطالعات دیگر، اتصال قطعه انتقالی به مقطع ستون فولادی معمولاً به صورت پیچی با استفاده از پیچ‌های با مقاومت بالا انجام شده است. در این مطالعه، عملکرد لرزه‌ای آزمایشگاهی اتصال بین مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه و تیر بتن‌آرمه بررسی شده و اثر استفاده همزمان از قطعه انتقال (پروفیل فولادی-Transition Part) در تیر و ناحیه اتصال تیر به ستون مورد ارزیابی قرار گرفته است. قطعه انتقالی در ناحیه اتصال تیر به ستون به جان مقطع فولادی محاط در ستون جوش شده و آرماتورهای طولی تیر از جان مقطع فولادی عبور کرده و در انتهای ستون مهار می‌شوند. این طراحی امکان مقایسه اثرات قرارگیری مقاطع فولادی محاط در بتن‌آرمه در ستون و ناحیه اتصال با مطالعات پیشین را فراهم می‌کند. تیرهای مورد بررسی به صورت پیوسته و مطابق با الزامات استاندارد ACI318-2019 [۴۸] طراحی شده‌اند و اتصال مورد مطالعه یک اتصال میانی در سازه محسوب می‌شود.

هدف اصلی این مطالعه، جلوگیری از شکست زود هنگام تیر و محدود کردن خرابی در ناحیه چشمه اتصال و همچنین پیشگیری از گسترش ترک در ستون است. همچنین از دیگر اهداف اصلی این مطالعه، مهار آرماتورهای طولی تیر به جان مقطع فولادی ستون فولادی محاط در بتن‌آرمه می‌باشد.

عملکرد لرزه‌ای سازه را ارتقا دهد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از مقاطع فولادی درون ستون‌های بتن‌آرمه موجب افزایش ظرفیت باربری، شکل‌پذیری، سختی جانبی و توان اتلاف انرژی اعضا می‌شود؛ از این رو، این نوع ستون‌ها در مناطق با لرزه‌خیزی بالا عملکرد لرزه‌ای مطلوبی از خود نشان داده و گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای سازه‌ای محسوب می‌گردند. حضور پروفیل فولادی در مقطع ستون، مقاومت آن را در برابر کماتش تحت بارهای فشاری افزایش می‌دهد و پوشش بتن‌آرمه نیز نقش مؤثری در بهبود مقاومت در برابر خوردگی و حفاظت از مقطع فولادی دارد. اتصال تیر و ستون یکی از مهم‌ترین اجزای تأثیرگذار بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها و کنترل مکانیزم خرابی تدریجی آن‌ها محسوب می‌شود [۱۱]، به‌منظور جلوگیری از شکست زود هنگام اتصال و انتقال مناسب نیرو بین تیر و ستون، رعایت معیار «تیر ضعیف - ستون قوی» در طراحی الزامی است. تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه بهبود رفتار لرزه‌ای اتصالات صورت گرفته است؛ از جمله مطالعات مقاوم‌سازی اتصالات بتن‌آرمه [۱۲، ۱۳]، پیش‌بینی شکل‌پذیری با الگوریتم‌های یادگیری ماشین [۱۴]، و بررسی اتصالات کامپوزیت [۱۵-۱۷]، همچنین تحقیقات متعددی بر روی انواع ستون‌های SRC [۱۸، ۱۹]، استفاده از بتن‌های با مقاومت بالا [۲۰، ۲۱]، افزایش محصور شدگی و یا تغییر نسبت آرماتور عرضی [۲۲-۲۴]، بهره‌گیری از اعضای پیش‌ساخته SRC [۲۵، ۲۶]، تغییر نسبت آرماتور طولی [۲۷، ۲۸] و استفاده از مقاطع فولادی جدارنازک به‌عنوان جایگزین آرماتور [۲۹] است.

اتصالات ستون SRC [۳۰] با انواع تیرها از جمله تیر فولادی [۳۱-۳۵]، بتن‌آرمه [۳۶-۳۸] و تیر SRC [۳۹، ۴۰] نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، تأثیر حضور دال بر عملکرد این اتصالات توسط Chu و همکاران [۴۱] و Liao و همکاران [۴۲] بررسی شده است که نتایج بیانگر عملکرد لرزه‌ای مناسب این سیستم‌ها در هر دو حالت همراه با دال و بدون دال می‌باشد. افزایش نسبت نیروی محوری نیز موجب بهبود ظرفیت برشی اتصال می‌شود. از دیگر حوزه‌های پژوهشی، بررسی رفتار اتصالات و ستون‌های SRC در برابر آتش [۴۳، ۴۴] شیوه‌های مختلف مقاوم‌سازی آن‌ها [۴۵] است. یافته‌ها نشان می‌دهد که وجود بتن پیرامون مقطع فولادی باعث تأخیر در افزایش دما شده و در نتیجه عملکرد سازه تحت اثر آتش نسبتاً مطلوب باقی می‌ماند. مطالعات متعددی به بررسی استفاده از قطعه انتقالی (Transitional Piece) به منظور جلوگیری از آسیب در ناحیه اتصال تیر و ستون پرداخته‌اند. از جمله این تحقیقات، مطالعه آزمایشگاهی و عددی Moharram و همکاران [۴۶] بر روی سیستم تیر RC و ستون

خاموت‌های تیر در ناحیه بحرانی ۷۰ میلی‌متر و خارج از ناحیه بحرانی ۱۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای هر سه نمونه بار محوری فشاری ثابت ۴۰۰ کیلونیوتن معادل ۸/۰٪ ظرفیت محوری ستون بوده، اعمال گردیده است.

در طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی، مدل مقیاس شده مبتنی بر اصول کلاسیک similitude طراحی نشده‌اند و ابعاد آن‌ها با توجه به محدودیت‌های تجهیزات آزمایشگاهی و ظرفیت سیستم بارگذاری انتخاب شده است. در مقابل، خواص مصالح، نسبت‌های هندسی، جزئیات اجرایی و شرایط بارگذاری بدون اعمال ضرایب مقیاس و مطابق با مقادیر واقعی در نظر گرفته شده‌اند تا رفتار واقعی و مکانیزم‌های حاکم بر عملکرد اتصال تیر به ستون به درستی ارزیابی شود. طراحی تیر و ستون به طوری انجام شده است که ظرفیت لنگر ستون، حداقل برابر با ۱/۲ ظرفیت لنگر تیر باشد. در طراحی تیرها و ستون‌ها اصل تیر ضعیف- ستون قوی در نظر گرفته شده است، به طوری که آسیب، شکست و مفصل پلاستیک در تیر تشکیل شده و در ناحیه چشمه اتصال و ستون آسیب و یا ترک مشاهده نشود (رابطه ۱). مقطع فولادی به کار رفته در ستون SRC، IPE180 به ارتفاع جان mm ۱۸۰، عرض بال mm ۹۱ و به طول mm ۱۲۰۰ است. همچنین قطعه انتقالی (Transition Part)، از نوع IPE120 به ارتفاع جان mm ۱۲۰، عرض بال mm ۶۴ و به طول mm ۵۰۰ می‌باشد. برای عبور آرماتورهای طولی تیر از مقطع فولادی ستون SRC نمونه‌ها، در جان مقطع سوراخی به ابعاد mm ۲۵ ایجاد شد و تقویت کننده‌ای در جان یا بال آن استفاده نشده است:

$$\sum M_C \geq 1.2 \sum M_B \quad (1)$$

برای مهار آرماتورهای طولی تیر به ستون، براساس استاندارد ACI318-19، طول مهاری ۱۱ برابر قطر میلگرد با زاویه ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است که در هر سه نمونه آرماتورهای دارای خم های ۹۰ درجه در انتهای داخلی ستون به آرماتورهای طولی آن، مهار گردیده است.

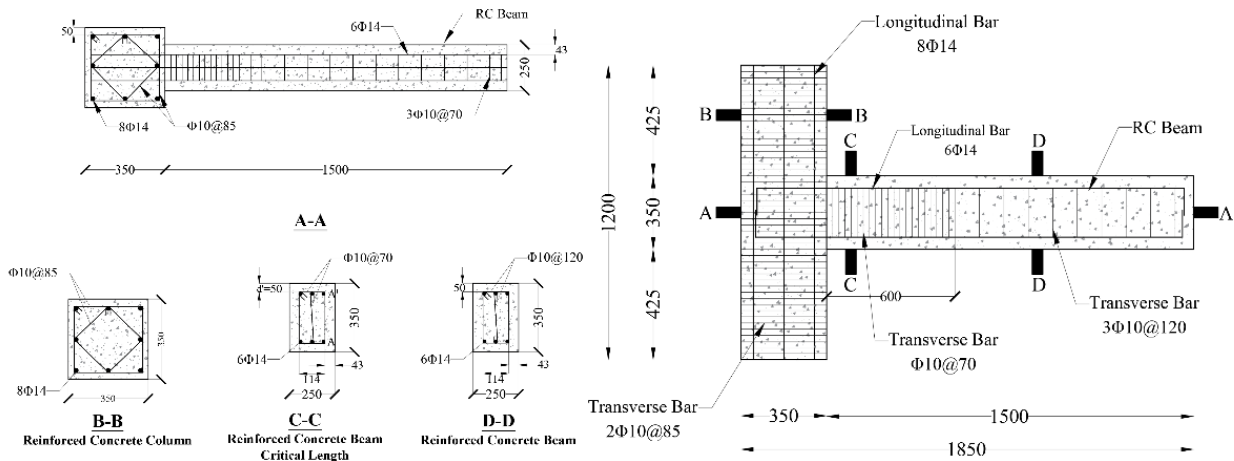
برای ظرفیت برشی طراحی شده هر سه نمونه، برابر مجموع ظرفیت‌های برشی بتن ناحیه اتصال، آرماتورهای طولی و عرضی و در مقطع فولادی ستون و ناحیه اتصال تیر می‌باشد (رابطه ۲). ظرفیت برشی طراحی شده برای نمونه‌های RCC-RCB، SRC-RCB و SRCC-RCB-TP، برای نمونه‌های Hooked در جدول ۲ ارائه شده است.

علاوه بر این، اثر استفاده همزمان از قطعه انتقالی (پروفیل فولادی-TP) در تیر بتن‌آرمه و ستون فولادی محاط در بتن‌آرمه (SRCC-RCB-TP) بررسی شده است. عملکرد این اتصال، با دو اتصال دیگر، یعنی اتصال ستون فولادی محاط در بتن‌آرمه به تیر بتن‌آرمه (SRCC-RCB) و اتصال تیر و ستون بتن‌آرمه (RCC-RCB)، مقایسه شده است. پارامترهای مورد مطالعه شامل تأثیر قطعه انتقالی و نحوه قرارگیری مقطع فولادی محاط در بتن‌آرمه بر ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و سختی نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای جانبی می‌باشد. در نهایت، استفاده از قطعه انتقالی به عنوان یک راهکار مؤثر در بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر-ستون و افزایش ایمنی و مقاومت نمونه‌ها پیشنهاد شده است.

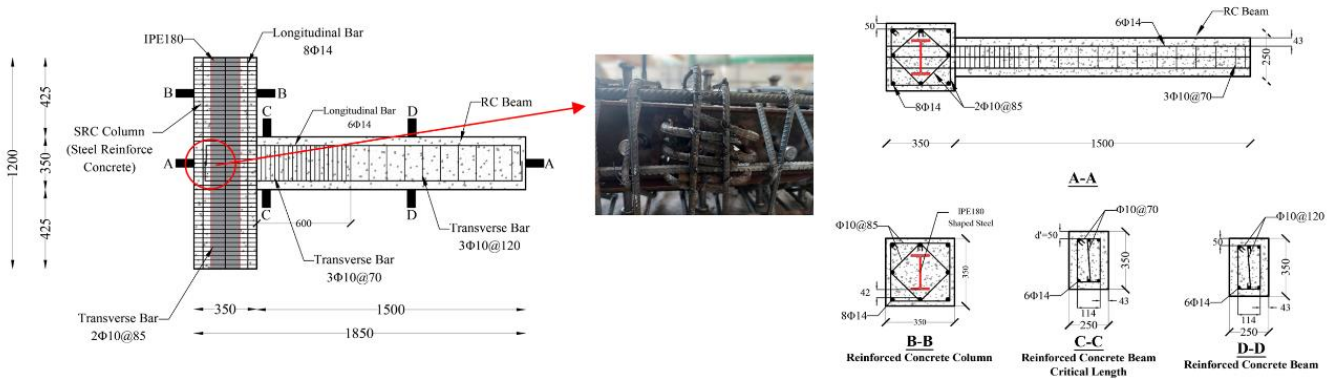
۲- برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه سه نمونه اتصال کناری تیر-ستون ساخته و مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل ۱ ارائه شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی براساس نوع ستون (بتن‌آرمه، فولادی محاط در بتن‌آرمه)، وجود مقطع انتقال دهنده و در هر سه نمونه وجود تیر بتن‌آرمه دسته‌بندی شده و با عناوین RCC-RCB، SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP نام‌گذاری شده است.

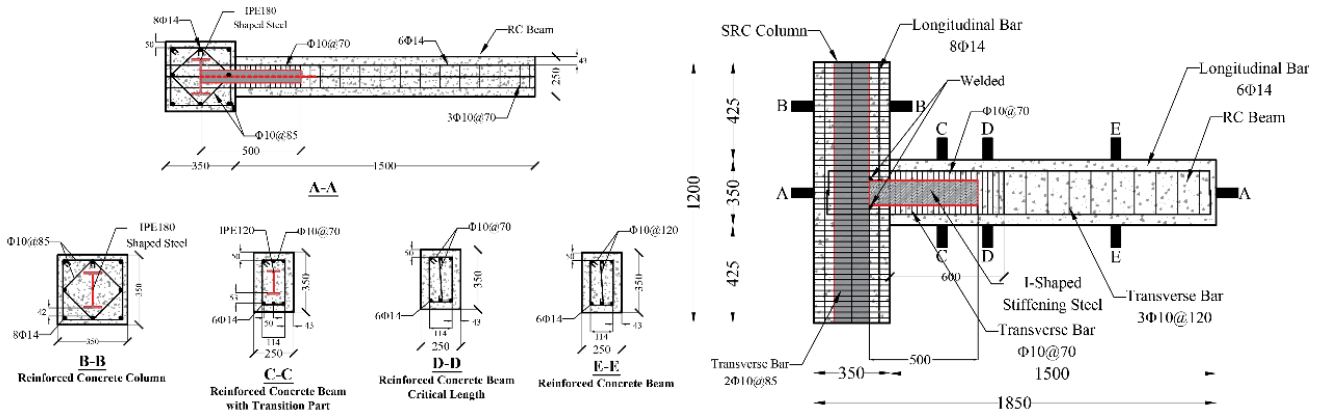
RC (Reinforced Concrete) بیان‌کننده بتن‌آرمه، SRC (Steel Incased Reinforced Concrete) بیانگر مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه و TP-Hooked بیان‌کننده مقطع انتقالی می‌باشد. آرماتورهای طولی تیر بتن‌آرمه، در هر دو نمونه دارای ستون SRC، پس از عبور از جان مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه و در نمونه دارای ستون بتن‌آرمه، در انتهای داخلی ستون مهار شده‌اند. طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی RCC-RCB، SRC-RCB و SRCC-RCB-TP، براساس استاندارد ACI318-19 انجام شده و در جدول ۱ نمایش داده شده است. با توجه به طراحی‌های انجام شده برای تیر و ستون، طول ستون در ناحیه بحرانی قرار دارد. بر همین اساس فاصله خاموت‌ها براساس استاندارد ACI318-19 در ناحیه بحرانی در نظر گرفته شده است. درصد فولاد مصرفی در طراحی تیر و ستون، براساس استاندارد ACI318-19، در بازه ۱٪ الی ۸٪ قرار دارد. خاموت‌های استفاده برای تیر و ستون هر سه نمونه قطر ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. فواصل آن‌ها در ستون ۸۵ میلی‌متر و همچنین در طراحی تیر، بخشی از طول تیر بتن‌آرمه در ناحیه بحرانی و بخشی دیگر در خارج از ناحیه بحرانی قرار گرفته است. فاصله



الف) نمونه RCC-RCB



ب) نمونه SRCC-RCB



ج) نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked

شکل ۱. مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی.

Fig. 1. Geometric Specifications Experimental Specimens. a) Specimen RCC-RCB, b) Specimen SRCC-RCB, c) Specimen SRCC-RCB-TP-Hooked

جدول ۱. مشخصات نمونه‌ها.

Table 1. Details of Experimental Specimens.

نمونه‌ها	نوع ستون	نوع تیر	نیروی محوری (kN)	مقطع فولادی ستون	مقطع فولادی تیر	آرمانورهای طولی	آرمانورهای عرضی
RCC-RCB	بتن‌آرمه (RCC)	بتن‌آرمه	۴۰۰	-	-	Φ14	Φ10
SRCC-RCB	با مقطع فولادی محاط در بتن آرمه (SRCC)	بتن‌آرمه	۴۰۰	IPE180	-	Φ14	Φ10
SRCC-RCB-TP-Hooked	با مقطع فولادی محاط در بتن آرمه (SRCC)	بتن‌آرمه	۴۰۰	IPE180	IPE120	Φ14	Φ10

جدول ۲. ظرفیت‌های برشی هر یک از نمونه‌ها.

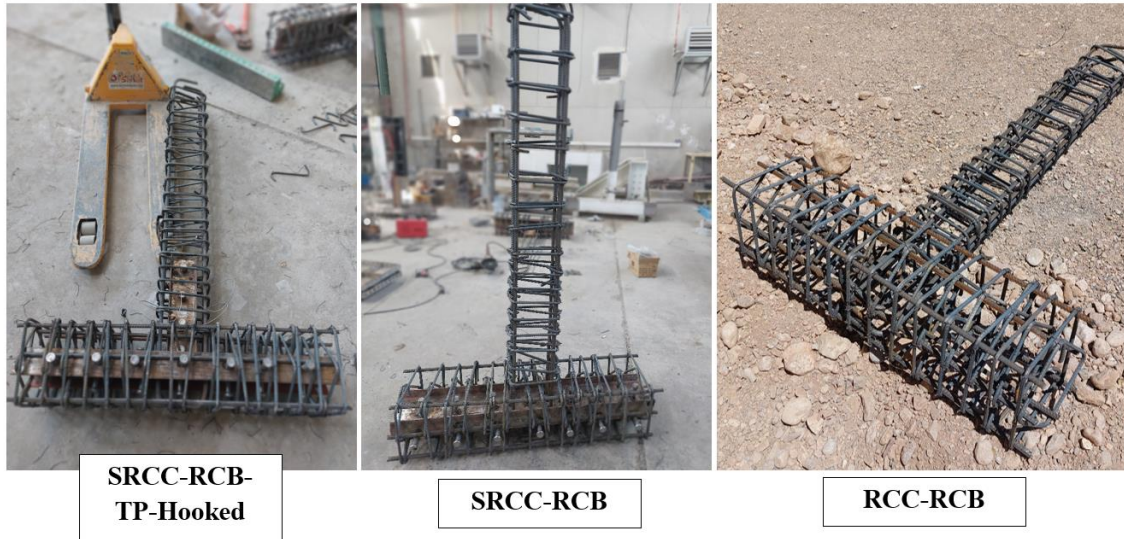
Table 2. Design Shear Capacity Specimens.

نمونه‌ها	ظرفیت برشی ستون (VjV-kN)			ظرفیت برشی تیر (VjH-kN)		
	V _{Steel}	V _{reinforcement}	V _{Concrete}	V _{Steel}	V _{reinforcement}	V _{Concrete}
RCC-RCB	-	۵۳۶/۵	۱۰۱	-	۴۰۳/۷	۷۲
SRCC-RCB	۳۸۲	۵۳۶/۵	۱۰۱	-	۴۰۳/۷	۷۲
SRCC-RCB-TP-Hooked	۳۸۲	۵۳۶/۵	۱۰۱	۲۱۱،۱	۴۰۳/۷	۷۲

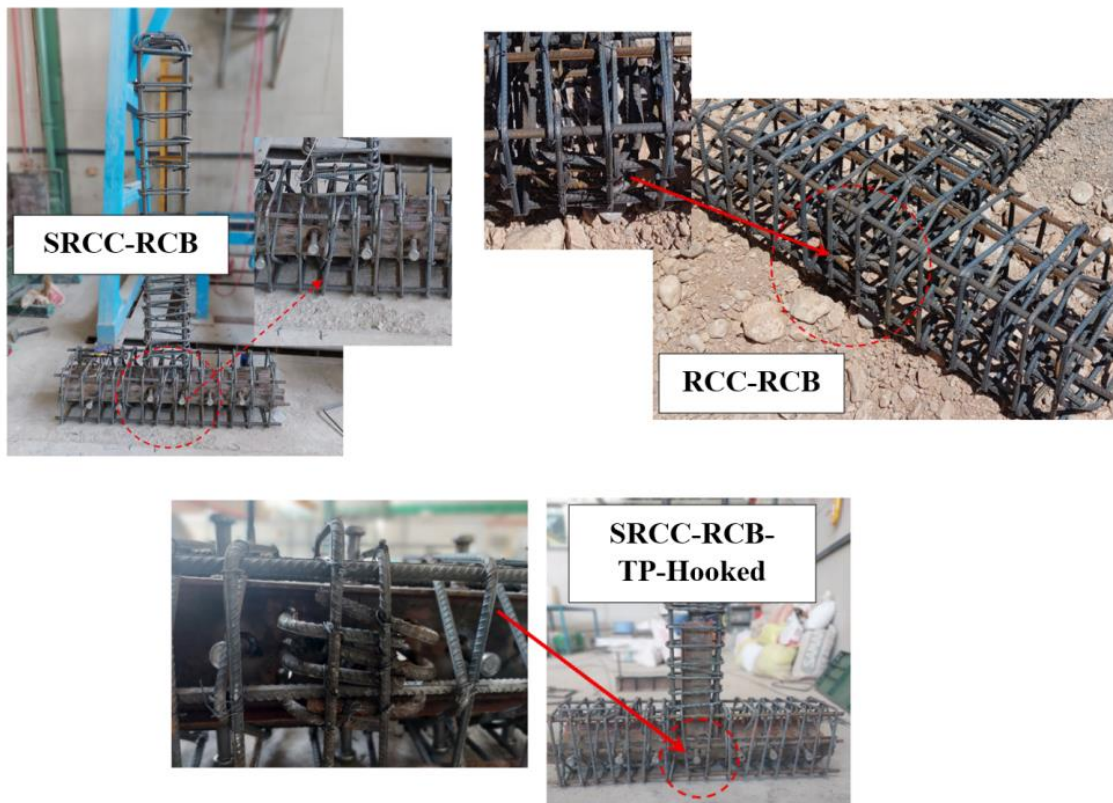
فولادی ستون و ناحیه اتصال تیر نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل ۲ ارائه شده است. مقاطع فولادی IPE120 و IPE180 در بتن‌آرمه محصور شده‌اند و بار محوری به ستون‌های هر سه نمونه اعمال می‌شود. برای ایجاد ارتباط بین بتن و فولاد از گل‌میخ‌های برشی استفاده شده است (شکل ۳). فواصل گل‌میخ‌ها بر اساس استاندارد AISC-360 تعیین شده‌اند. در ستون، گل‌میخ‌ها روی بال و جان مقاطع فولادی به ترتیب با فواصل ۱۲۵ و ۱۵۰ میلی‌متر نصب شده‌اند و در تیر (Transition Part) نیز روی بال و جان مقطع فولادی با همان فواصل نصب شده‌اند تا انتقال نیرو به‌طور مؤثر انجام شود و رفتار اتصال به شکل قابل اطمینان مشاهده گردد.

$$\left. \begin{aligned}
 &= \text{Shear RC Beam} : \\
 &V_{concrete} + V_{reinforcement} \\
 &= \text{Shear RC Column} : \\
 &V_{concrete} + V_{reinforcement} \\
 &= \text{Shear SRC Column} : \\
 &V_{concrete} + V_{reinforcement} + V_{steel\ section} \\
 &= \text{Shear RC Beam with TP (Transional Part)} : \\
 &V_{concrete} + V_{reinforcement} + V_{steel\ section}
 \end{aligned} \right\} \text{ظرفیت برشی طراحی} \quad (2)$$

جزئیات اجرایی آرمانورهای طولی و عرضی تیر و ستون، مقاطع



(الف) جزئیات ساخت نمونه‌ها

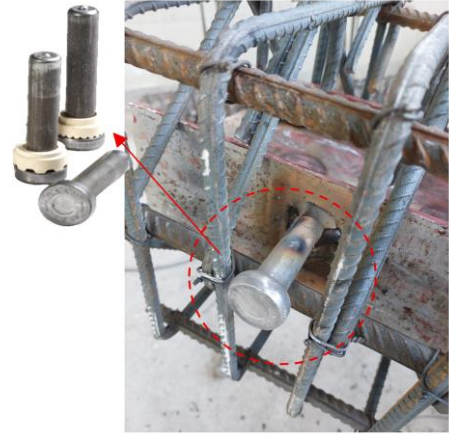


شکل ۲. جزئیات اجرایی آرماتورها و ناحیه اتصال

Fig. 2. Anchorage Longitude Reinforcement and Construction Details and Panel Zone of the Experimental Specimens. a) Details of Counstruction the Experimental Specimens, b) Anchorage Longitude Reinforcement and Details of Panel Zone Joint.

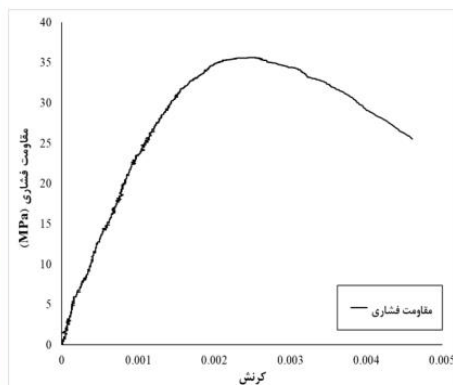
۲-۱- مشخصات مصالح

بتن تیر و ستون به صورت یکپارچه و درجا انجام شده است. بتن آن با سیمان پرتلند تیپ II و با ماسه شکسته با اندازه ۹/۵ mm ساخته شده است. مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۱۰×۲۰ mm از بتن گرفته و عمل‌آوری شده و بعد از ۲۸ روز مورد آزمایش مقاومت فشاری با دستگاه Universal (شکل ۴) و مطابق استاندارد ASTM-C39-8 [۴۹] قرار گرفته است. مقاومت فشاری بتن نمونه‌ها به طور میانگین ۳۵ MPa بوده است. مشخصات مکانیکی آرماتورهای طولی و عرضی که از نوع AIII هستند، شامل تنش تسلیم، تنش نهایی و مدول الاستیسیته، مطابق استانداردهای معتبر ارائه شده و در جدول ۳ درج گردیده است. علاوه بر آن، نمودار تنش-کرنش آرماتورها در شکل ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است که اتصالات تیر به ستون مورد بررسی در این مطالعه،



شکل ۳. جزئیات گل‌میخ‌های برشی.

Fig. 3. Details of Shear Studs.



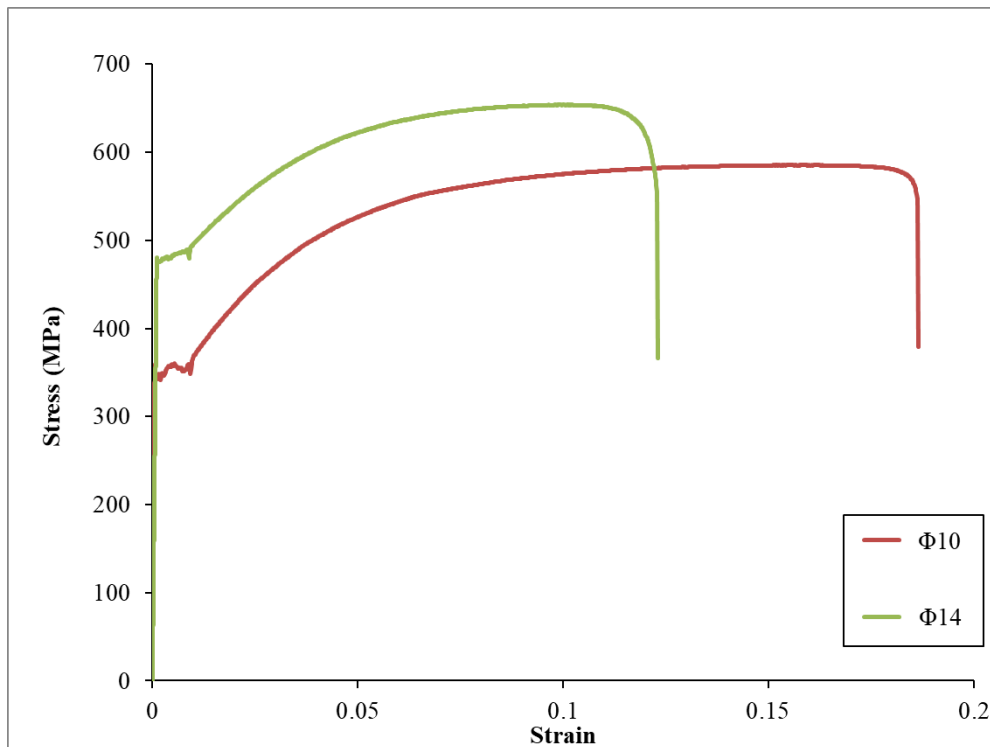
شکل ۴. نمودار تنش-کرنش بتن.

Fig. 4. Stress-Strain Curve Concrete.

جدول ۳. مشخصات مکانیکی آرماتورها.

Table 3. Mechanical Properties Reinforcement.

مدول الاستیسیته (GPa)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	طول نمونه (mm)	قطر آرماتور (mm)
۱۶۶	۵۴۷	۳۵۹/۲	۲۴۰	Φ10
۲۱۵/۸۷	۵۶۱/۸	۴۸۰	۲۸۰	Φ14



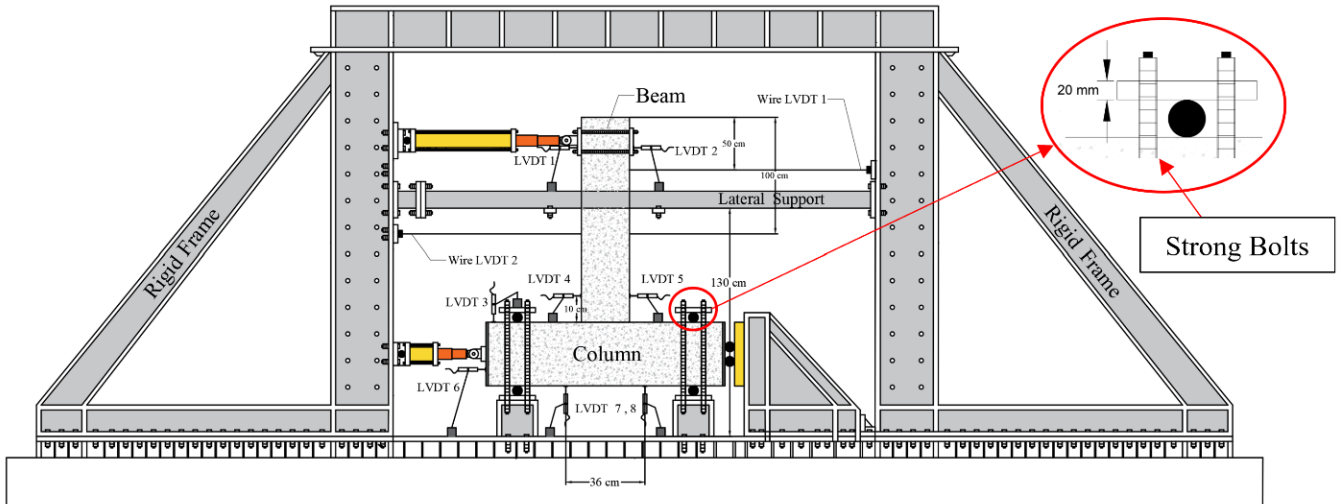
شکل ۵. نمودار تنش- کرنش آرماتور.

Fig. 5. Stress-Strain Curve .

۲-۲- جزئیات بارگذاری

نحوه بارگذاری و جزئیات ستاپ آزمایش در شکل ۶ نمایش داده شده است. بار محوری فشاری ۴۰۰ کیلونیوتن به روی ستون نمونه‌ها اعمال شده است. بارگذاری جانبی رفت و برگشتی تحت پروتکل بارگذاری بر روی نقطه‌ای به فاصله ۱۲۵ mm از لبه انتهایی تیر اعمال شده است. تکیه‌گاه ستون به کف قوی آزمایشگاه، به صورت مفصلی می‌باشد و همچنین با استفاده از ورق‌های فولادی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر و پیچ‌های قوی، به

به صورت درجا و یکپارچه اجرا شده‌اند. از این‌رو، برخلاف اتصالات متداول فولادی، ناحیه‌ای با مرز مشخص و قابل تفکیک به عنوان چشمه اتصال برشی به صورت مستقل وجود ندارد. در این نوع اتصال، مقاومت برشی و انتقال نیرو در ناحیه اتصال از طریق مشارکت همزمان بتن، نحوه قرارگیری آرماتورها و مقطع فولادی محاط در بتن آرمه تأمین می‌شود. بر این اساس، ارزیابی رفتار برشی ناحیه اتصال در این مطالعه به صورت کلی و مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی انجام شده است.



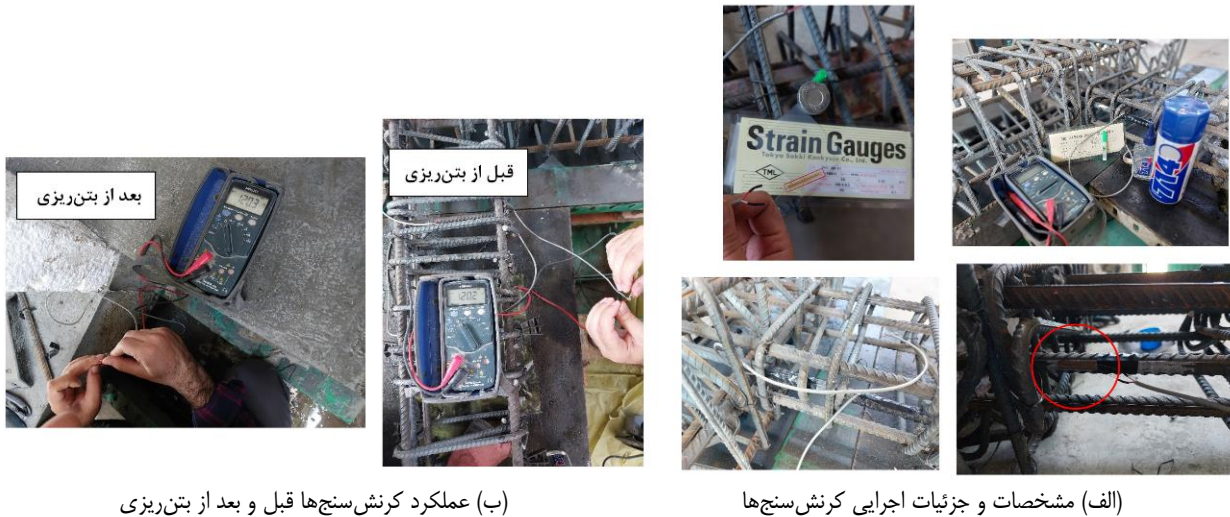
(الف) طراحی جزئیات ستاپ آزمایشگاه



(ب) جزئیات ستاپ آزمایشگاه

شکل ۶. نحوه بارگذاری و جزئیات ستاپ آزمایش.

Fig. 6. Details Test Setup. (a) Design Details Test Setup, b) Details of Test Setup.



(ب) عملکرد کرنش سنجها قبل و بعد از بتن ریزی

(الف) مشخصات و جزئیات اجرایی کرنش سنجها

شکل ۷. جزئیات کرنش سنجها.

Fig. 7. Details and Performance Strain Gauge. (a) Details of Strain Gauge and Placement, (b) Evaluation of Strain Gauge Performance Before and After Installation.

فشاری ثابت ۴۰۰ کیلونیوتن قرار گرفته‌اند. پروتکل بارگذاری وارد بر تیر، براساس استاندارد ACI374-1-05 [۵۰] می‌باشد. روند بارگذاری تا زمانی که یکی از دو شرط، ظرفیت باربری جانبی نمونه به میزان ۱۵٪ کاهش یافته و یا آرماتورهای طولی گسیخته شوند (هر کدام زودتر رخ دهد) ادامه می‌یابد. الگوی بارگذاری چرخه‌ای و نحوه اعمال و محل اعمال بار بر روی نمونه در شکل ۸ ارائه شده است.

۳- نتایج آزمایشگاهی

نحوه ترک خوردگی، نحوه و محل شکست نمونه، استفاده از قطعه انتقالی (TP) و تاثیر آن بر تشکیل مفصل پلاستیک، ظرفیت باربری جانبی، نمودار هیستریزس (نیرو-جابجایی)، سختی سکانتی، میزان انرژی جذب شده هر یک از نمونه‌ها با توجه به شرایط آن‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای، و بررسی تسلیم‌شدگی آرماتورهای طولی تیر با توجه به نتایج کرنش سنجها از جمله پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه می‌باشد.

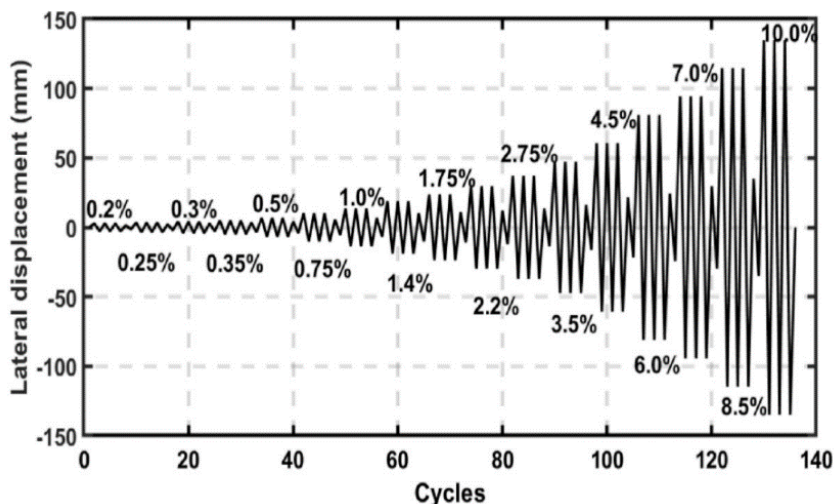
۳-۱- نحوه و الگوی ترک خوردگی نمونه‌ها

الگوی ترک خوردگی و پخش ترک و شکست نهایی نمونه RCC-RCB تحت فشار و کشش در شکل ۹ و ۱۰ ارائه شده است. عمده ترک‌های ایجاد شده در نمونه RCC-RCB در انتهای تیر و نزدیک به ناحیه اتصال

پایه‌های متصل به کف قوی آزمایش مهار شده است. برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه نمونه، از دو تیر قوی فولادی در دو طرف نمونه به ارتفاع ۱۷۵۰ mm از اتصال تیر به ستون که متصل به قاب صلب آزمایشگاه بوده، استفاده گردیده است.

برای اندازه‌گیری کرنش آرماتورهای طولی تیر، بر روی هر نمونه ۴ کرنش سنج در مقطع تیر به فاصله ۵۰ میلی‌متری از یکدیگر بر روی آرماتور طولی میانی تیر قرار گرفته است. همچنین اولین کرنش سنج به فاصله ۵۰ میلی‌متری از لبه چشمه اتصال می‌باشد. با توجه به مشخصات کرنش سنج‌ها مقاومت آن ۱۲۰ اهم می‌باشد که مقاومت هر یک در مراحل مختلف ساخت و نصب و هنگام انجام آزمایش با استفاده از اهم سنج، بررسی شده است (شکل ۷). برای اندازه‌گیری و بررسی جابه‌جایی و دوران هر یک از نمونه‌ها در نقاط مختلف آن، از LVTD استفاده شده که در شکل ۶-الف جزئیات قرارگیری هر یک نشان داده شده است. برای اعمال بار چرخه‌ای به انتهای تیر هر یک از نمونه‌ها، از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلونیوتن و برای اندازه‌گیری بار اعمالی از یک بارسنج (LoadCell) با ظرفیت ۵۰۰ کیلونیوتن استفاده شده است. برای اعمال نیروی محوری به هر یک از ستون‌ها از جک هیدرولیکی و بارسنج، هر یک با ظرفیت ۵۰۰ کیلونیوتن استفاده گردیده است.

ستون‌ها در طول بارگذاری چرخه‌ای وارد بر تیر، تحت بار محوری



شکل ۸. پروتکل بارگذاری [۵۰].

Fig. 8. Loading Protocol.

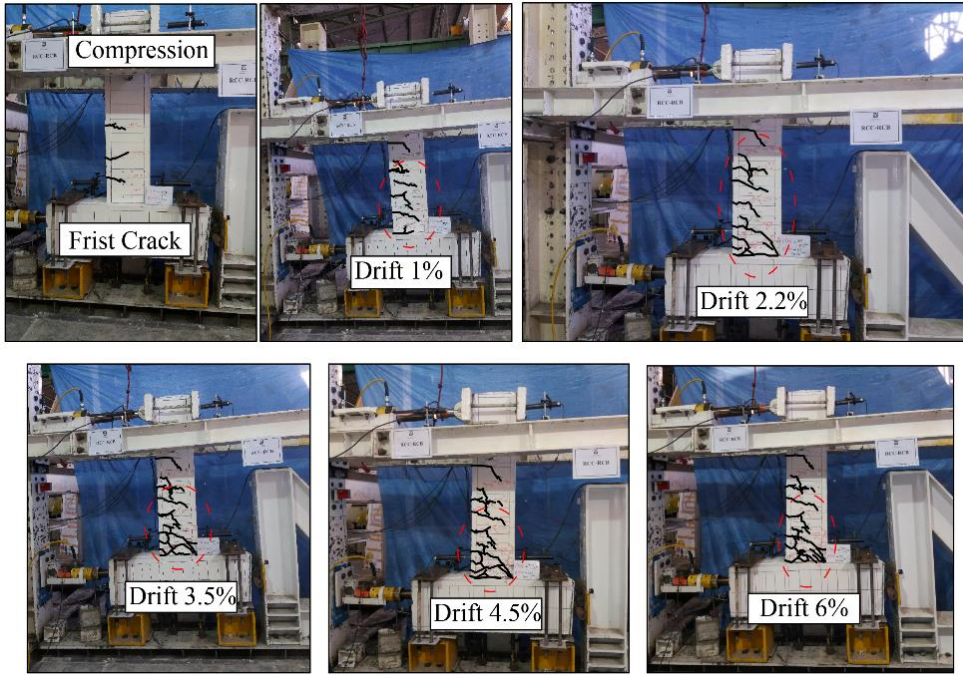
مقارنی می‌باشد.

حداکثر ظرفیت باربری فشاری و کششی نمونه RCC-RCB در جابه‌جایی ۱٪ به ترتیب برابر با $43/5 \text{ kN} +$ و $45/7 \text{ kN} -$ می‌باشد که با افزایش جابه‌جایی جانبی به تدریج ظرفیت باربری کاهش یافته است. در جابه‌جایی جانبی ۴/۵٪ عمق ترک‌های پوشش بتن در ناحیه اتصال و مفصل پلاستیک زیاد شده و کماتورهاهای طولی تیر نیز افزایش یافته است. آرماتورهای برشی تیر در جابه‌جایی ۶٪ و آرماتورهای طولی آن در جابه‌جایی ۷٪ گسیخته شده است. روند بارگذاری تا مرحله‌ای که ظرفیت باربری در فشار و کشش به میزان ۸۵٪، حداکثر ظرفیت باربری رسیده باشد، ادامه داشته است. در انتهای بارگذاری، در ناحیه چشمه اتصال و ستون هیچ ترک و یا خرابی مشاهده نشده است.

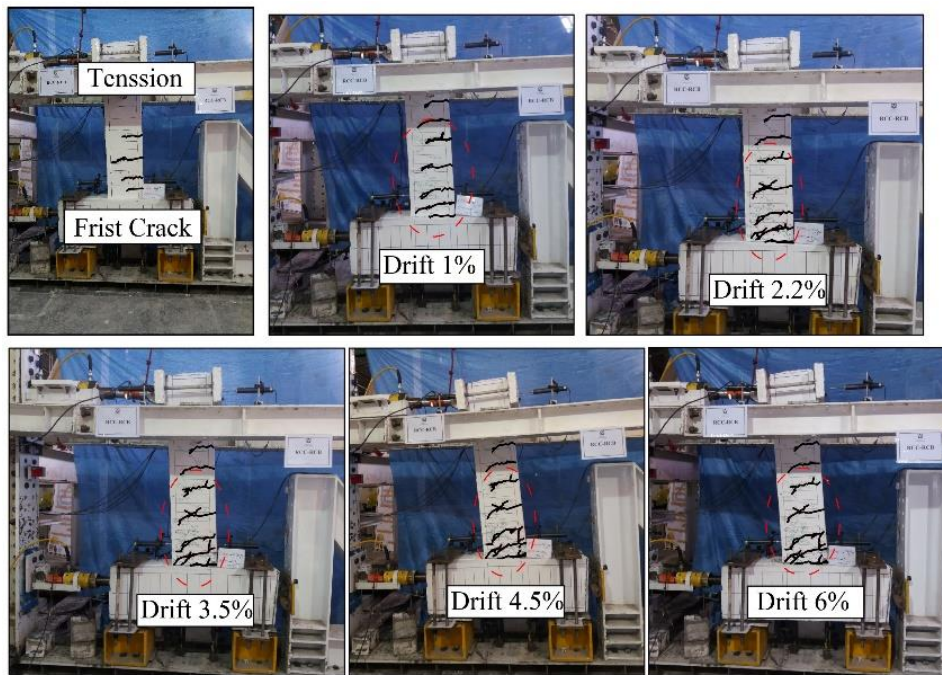
انتشار ترک و فرآیند شکست نهایی نمونه SRCC-RCB تحت فشار و کشش در شکل ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. عمده ترک‌های ایجاد شده در نمونه SRCC-RCB در انتهای تیر و دور از ناحیه اتصال در فاصله ۱۵۰ میلی‌متری از محل اتصال محدود می‌شود و در چشمه اتصال و ستون ترک و یا خرابی ایجاد نشده است، که نشان دهنده اصل ستون قوی-تیر ضعیف می‌باشد. ترک‌های سطحی اولیه در جابه‌جایی ۰/۲ و تحت بارهای کششی و فشاری به ترتیب $13 \text{ kN} +$ و $16/5 \text{ kN} -$ ایجاد شده است. در جابه‌جایی ۱٪ ترک‌ها در ناحیه اتصال تیر به ستون ایجاد و با افزایش روند بارگذاری جانبی، عمق ترک‌ها افزایش یافته است. همچنین با افزایش جابه‌جایی و بارگذاری

محدود به فاصله ۱۰۰ میلی‌متری از بر اتصال می‌باشد و در چشمه اتصال و ستون ترک و یا خرابی ایجاد نشده است، که نشان دهنده اصل ستون قوی-تیر ضعیف می‌باشد. ترک‌های خمشی اولیه ایجاد شده در تیر در جابه‌جایی ۰/۲٪ در نیمه انتهایی تیر (۱/۲ انتهایی تیر) نزدیک به ناحیه اتصال و به ترتیب تحت بارهای کششی و فشاری $20/9 \text{ kN} +$ و $13 \text{ kN} -$ ایجاد شده است. سپس با ادامه روند بارگذاری، ترک‌ها گسترش یافته و عمق آن‌ها افزایش یافته است. در ابتدا پوشش اولیه بتن ترک خورده و سپس با افزایش بارگذاری چرخه‌ای، آرماتورهای طولی تیر در جابه‌جایی، ۲/۲٪ تسلیم شدند. همچنین با گسترش ترک‌ها و افزایش عمق ترک و افزایش بارگذاری آرماتورهای طولی تیر در جابه‌جایی ۴/۵٪ نیز گسیخته شده است. با توجه به نتایج و طراحی اولیه نمونه براساس اصل ستون قوی-تیر ضعیف ناحیه چشمه اتصال و ستون بدون ترک خوردگی و آسیب باقی ماند.

در جابه‌جایی ۱٪ ترک‌ها در ناحیه اتصال تیر به ستون ایجاد و با افزایش روند بارگذاری جانبی، عمق ترک‌ها افزایش یافته است. همچنین با افزایش جابه‌جایی و بارگذاری جانبی ترک‌های خمشی در تیر گسترش یافته و در گوشه‌های ناحیه اتصال تیر به ستون هم در فشار و هم در کشش خرابی عمده ایجاد شده است. در جابه‌جایی ۲/۲٪ آرماتورهای طولی تیر تسلیم شده و در جابه‌جایی‌های ۲/۷۵٪ و ۳/۵٪ کماتش در آرماتورها مشاهده شد. نتایج نمودار هیستریزس نمونه RCC-RCB در شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۱، نمودار هیستریزس نمونه RCC-RCB نمودار تقریباً



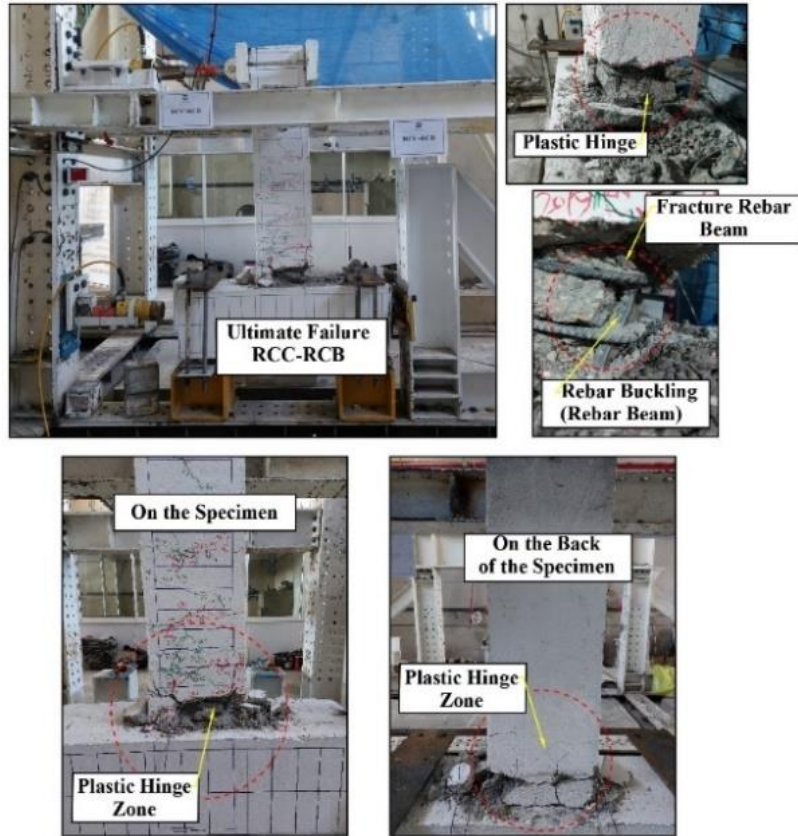
(الف) الگوی ترک خوردگی نمونه RCC-RCB تحت فشار



(ب) الگوی ترک خوردگی نمونه RCC-RCB تحت کشش

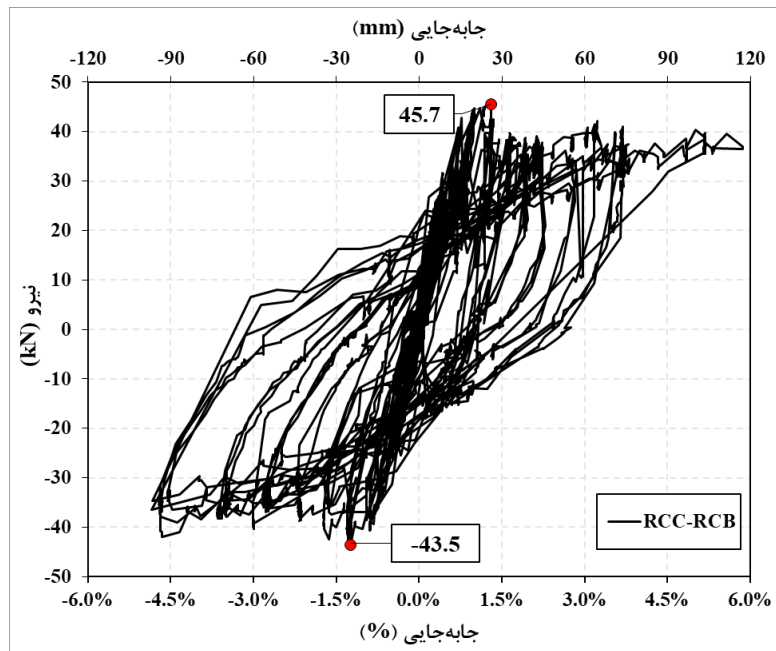
شکل ۹. روند گسترش ترک خوردگی نمونه RCC-RCB.

Fig. 9. Crack Pattern Specimen RCC-RCB. (a) Crack Pattern in Compression RCC-RCB Specimen, (b) Crack Pattern in Tensile RCC-RCB Specimen



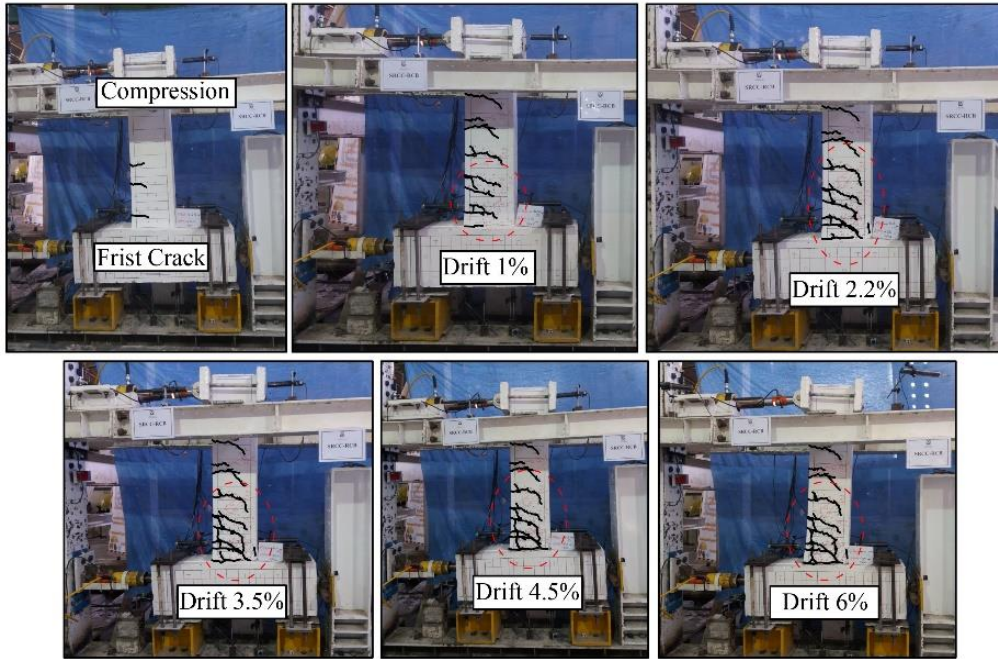
شکل ۱۰. شکست نهایی نمونه RCC-RCB.

Fig. 10. Ultimate Failure RCC-RCB Specimen.

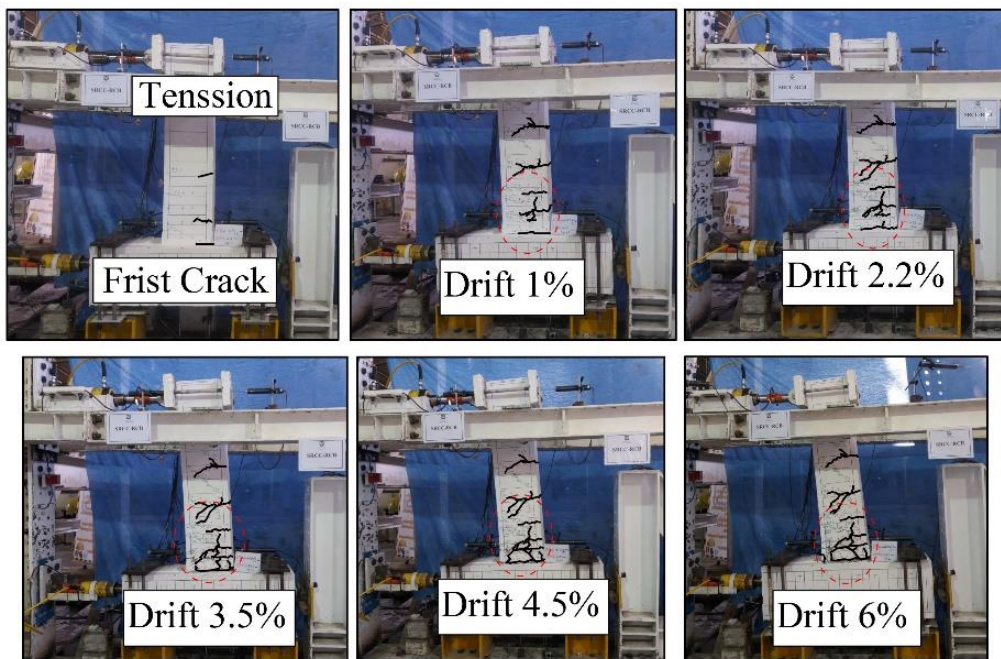


شکل ۱۱. هیستریزیس نمونه RCC-RCB.

Fig. 11. Hysteresis Curve RCC-RCB Specimen.



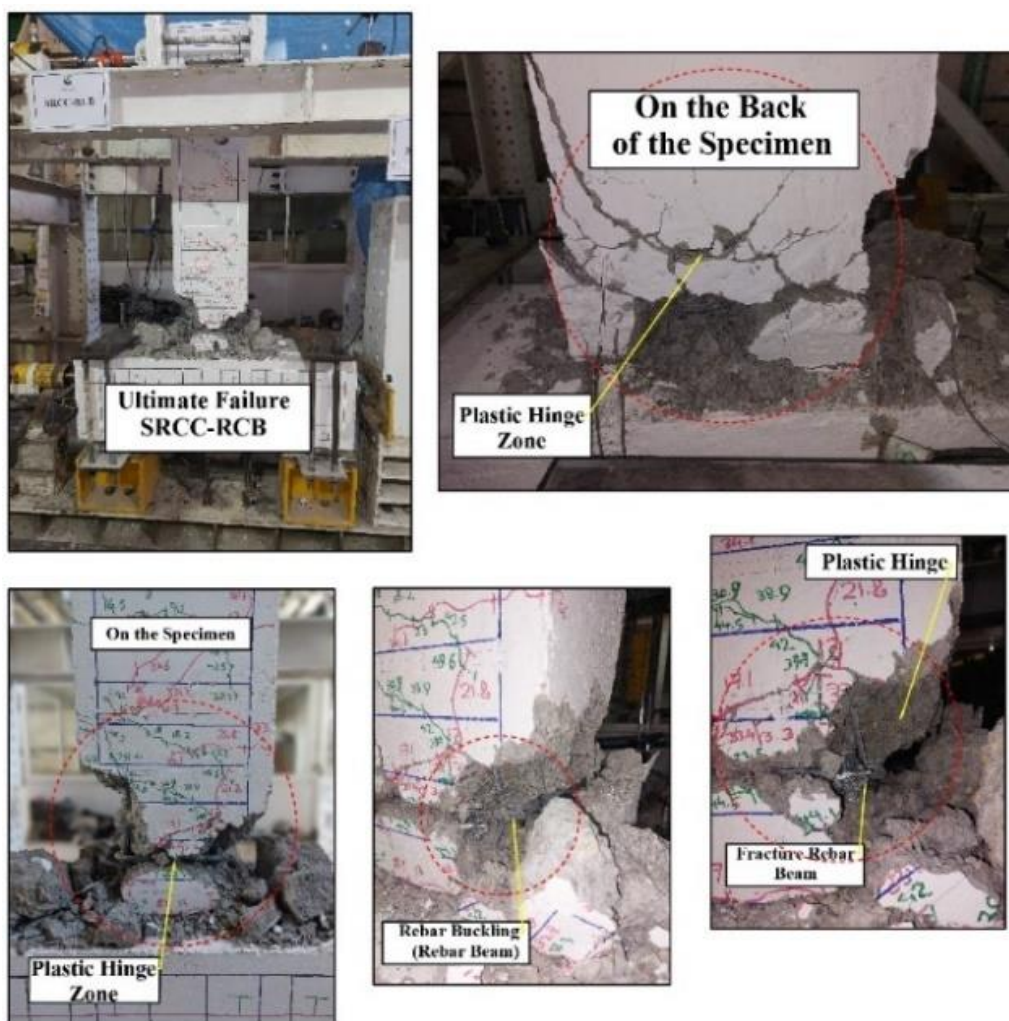
(الف) الگوی ترک خوردگی نمونه SRCC-RCB تحت فشار



(ب) الگوی ترک خوردگی نمونه SRCC-RCB تحت کشش

شکل ۱۲. روند گسترش ترک خوردگی نمونه SRCC-RCB.

Fig. 12. Crack Pattern Specimen. (a) Crack Pattern in Compression SRCC-RCB Specimen, (b) Crack Pattern in Tensile SRCC-RCB Specimen.



شکل ۱۳. شکست نهایی نمونه SRCC-RCB.

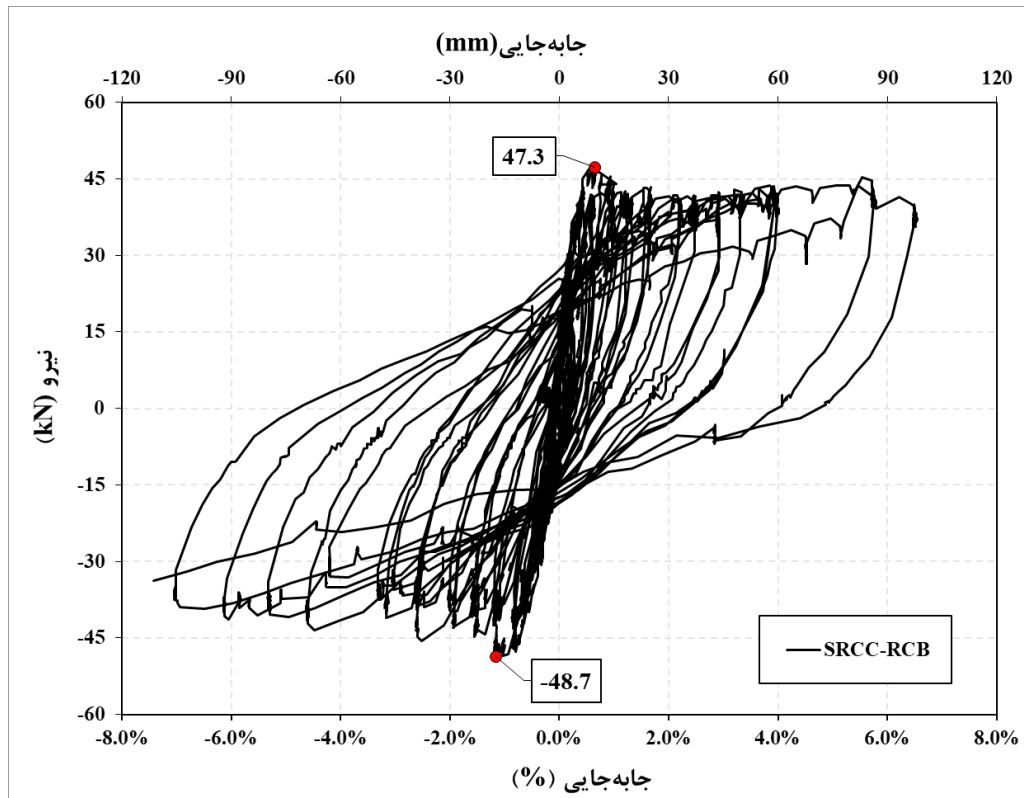
Fig. 13. Ultimate Failure SRCC-RCB Specimen.

آرماتورهای برشی تیر در جابه‌جایی ۶٪ و آرماتورهای طولی آن در جابه‌جایی ۷٪ گسیخته شده است. روند بارگذاری تا مرحله‌ای که ظرفیت باربری در فشار و کشش به میزان ۸۵٪، حداکثر ظرفیت باربری رسیده باشد، ادامه داشته است. در انتهای بارگذاری، در ناحیه چشمه اتصال و ستون هیچ ترک و یا خرابی مشاهده نشده است.

الگوی ترک‌خوردگی و شکست نهایی نمونه SRCC-RCB-TP- Hooked در شکل ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است. نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked شامل تیر و ستون بتن‌آرمه می‌باشد. ترک‌های سطحی اولیه تحت بارهای کششی و فشاری به ترتیب $15/5 \text{ kN} +$ و $18 \text{ kN} -$ و در جابه‌جایی ۲/۰ ایجاد شده و سپس با ادامه روند بارگذاری ترک‌ها گسترش یافته و عمق آن‌ها افزایش یافته است. در ابتدا پوشش اولیه بتن ترک خورده

جانبی ترک‌های خمشی در تیر گسترش یافته و در گوشه‌های ناحیه اتصال تیر به ستون هم در فشار و هم در کشش خرابی عمده ایجاد شده است. در جابه‌جایی ۲/۲٪ آرماتورهای طولی تیر تسلیم شده و در جابه‌جایی‌های ۲/۷۵٪ و ۳/۵٪ کماتش در آرماتورها مشاهده شد. نتایج نمودار هیستریزس نمونه SRCC-RCB در شکل ۱۴ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۴، نمودار هیستریزس نمونه SRCC-RCB نمودار تقریباً مقارنی می‌باشد.

حداکثر ظرفیت باربری فشاری و کششی نمونه SRCC-RCB در جابه‌جایی ۱٪ به ترتیب برابر با $50/1 \text{ kN} -$ و $38/8 \text{ kN} +$ می‌باشد که با افزایش جابه‌جایی جانبی به تدریج ظرفیت باربری کاهش یافته است. در جابه‌جایی جانبی ۴/۵٪ عمق ترک‌های پوشش بتن در ناحیه اتصال و مفصل پلاستیک زیاد شده و کماتش آرماتورهای طولی تیر نیز افزایش یافته است.



شکل ۱۴. هیستریزیس نمونه SRCC-RCB.

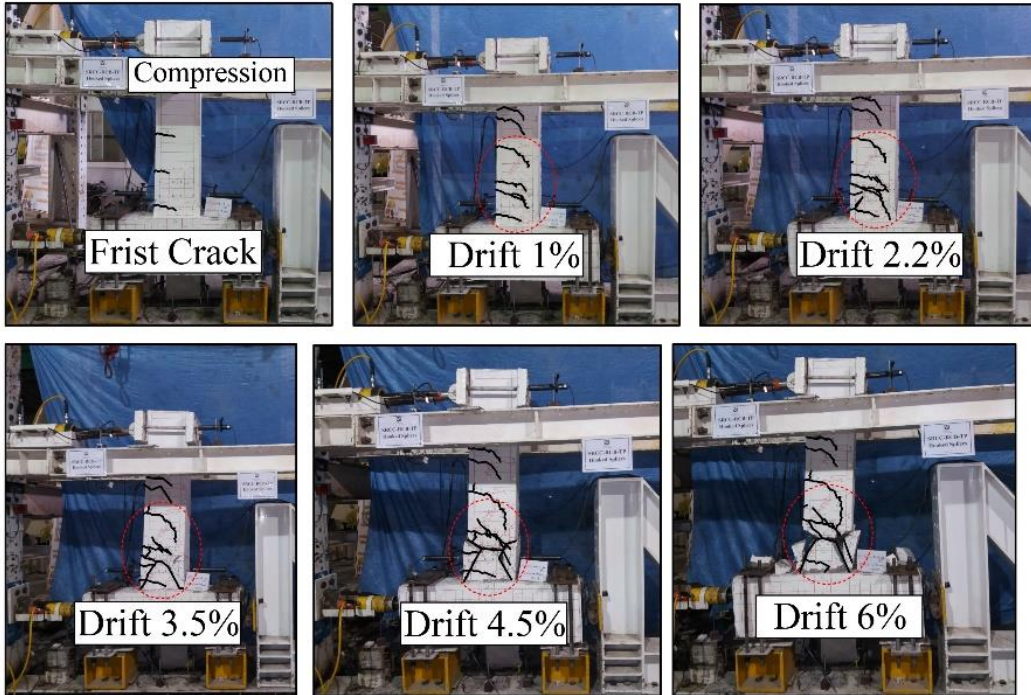
Fig. 14. Hysteresis Curve SRCC-RCB Specimen.

Hooked در جابه‌جایی ۱٪ به ترتیب برابر با ۵۴/۶ kN و ۴۵/۳ kN می‌باشد که با افزایش جابه‌جایی جانبی به تدریج ظرفیت باربری کاهش یافته است. در جابه‌جایی جانبی ۴/۵٪ عمق ترک‌های پوشش بتن در ناحیه اتصال و مفصل پلاستیک زیاد شده و کماتورهای طولی تیر نیز افزایش یافته است. آرماتورهای برشی تیر در جابه‌جایی ۶٪ و آرماتورهای طولی آن در جابه‌جایی ۷٪ گسیخته شده است. روند بارگذاری تا مرحله ای که ظرفیت باربری در فشار و کشش به میزان ۸۵٪، حداکثر ظرفیت باربری رسیده باشد، ادامه داشته است. در انتهای بارگذاری، در ناحیه چشمه اتصال و ستون هیچ ترک و یا خرابی مشاهده نشده است.

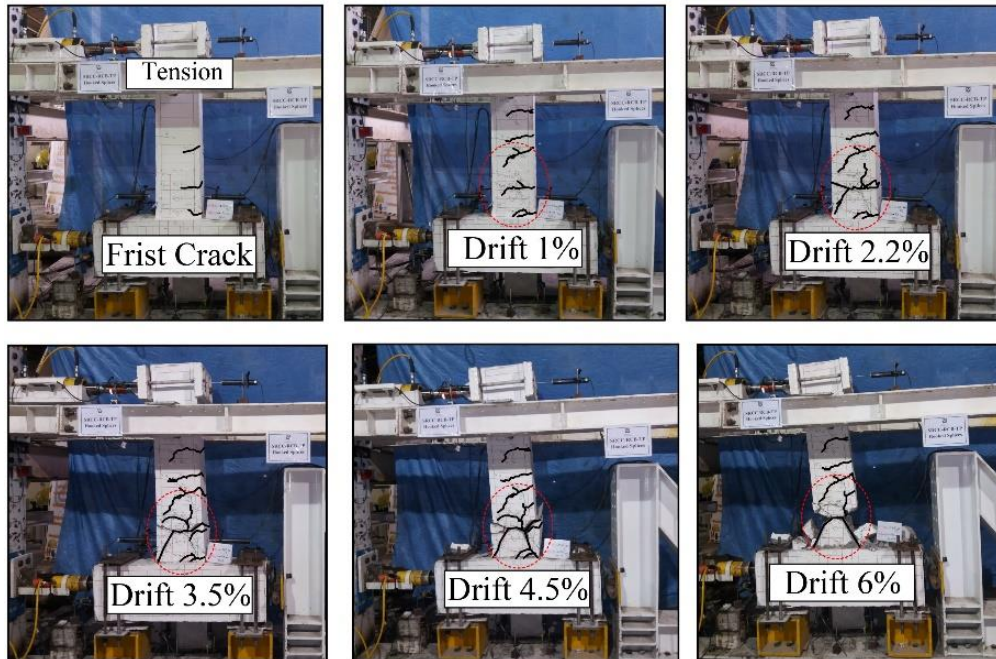
نتایج نشان می‌دهد مفصل پلاستیک و خرابی های ایجاد شده، براساس اصل ستون قوی-تیر ضعیف، در تیر تشکیل شده است. الگوهای ترک‌خوردگی، خرابی ها و ظرفیت باربری در هر سه نمونه SRCC-RCB، SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Hooked با یک دیگر متفاوت می‌باشد. به دلیل استفاده از مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه در دو نمونه SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Hooked، ظرفیت باربری

و سپس با افزایش بارگذاری چرخه‌ای، آرماتورهای طولی تیر در جابه‌جایی، ۲/۲٪ تسلیم شد. همچنین با گسترش ترک‌ها و افزایش عمق ترک و افزایش بارگذاری آرماتورهای طولی تیر در جابه‌جایی ۴/۵٪ نیز گسیخته شده است. با توجه به نتایج و طراحی اولیه نمونه براساس اصل ستون قوی-تیر ضعیف ناحیه چشمه اتصال و ستون بدون ترک‌خوردگی و آسیب باقی ماند. در جابه‌جایی ۱٪ ترک‌ها در ناحیه اتصال تیر به ستون ایجاد و با افزایش روند بارگذاری جانبی، عمق ترک‌ها افزایش یافته است. همچنین با افزایش جابه‌جایی و بارگذاری جانبی ترک‌های خمشی در تیر گسترش یافته و در گوشه‌های ناحیه اتصال تیر به ستون هم در فشار و هم در کشش خرابی عمده ایجاد شده است. در جابه‌جایی ۲/۲٪ آرماتورهای طولی تیر تسلیم شده و در جابه‌جایی‌های ۲/۷۵٪ و ۳/۵٪ کماتش در آرماتورها مشاهده شد. نتایج نمودار هیستریزیس نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked در شکل ۱۷ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۷، نمودار هیستریزیس نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked نمودار تقریباً مقارنی می‌باشد.

حداکثر ظرفیت باربری فشاری و کششی نمونه SRCC-RCB-TP-



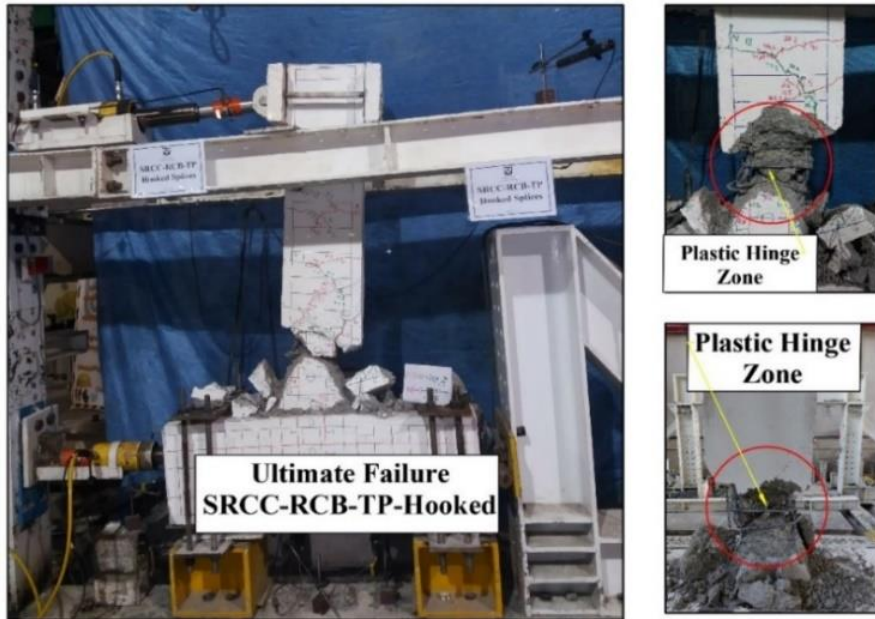
(الف) الگوی ترک خوردگی نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked تحت فشار



(ب) الگوی ترک خوردگی نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked تحت کشش

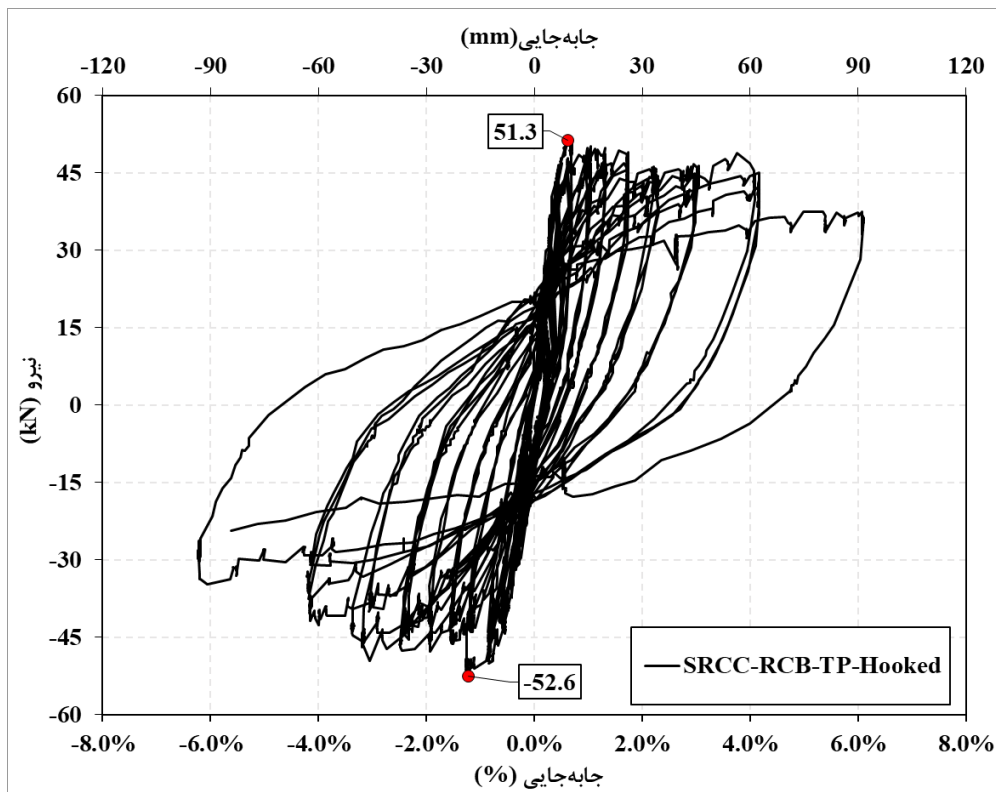
شکل ۱۵. روند گسترش ترک خوردگی نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked.

Fig. 15. Crack Pattern Specimen. (a) Crack Pattern in Compression SRCC-RCB-TP-Hooked Specimen, (b) Crack Pattern in Tensile SRCC-RCB-TP-Hooked Specimen.



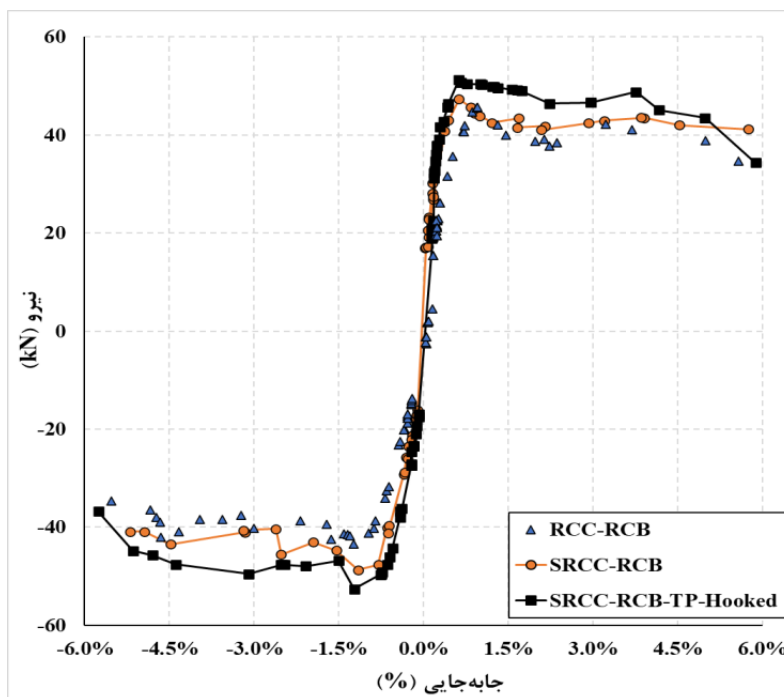
شکل ۱۶. شکست نهایی نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked.

Fig. 16. Ultimate Failure SRCC-RCB-TP-Hooked Specimen.



شکل ۱۷. هیستریزس نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked.

Fig. 17. Hysteresis Curve SRCC-RCB-TP-Hooked Specimen.



شکل ۱۸. نمودار پوش‌آور (BackBone) نمونه‌ها.

Fig. 18. Backbone (Push-Over) Curve of Specimens.

نمونه و انرژی جذب شده را محاسبه نمود.

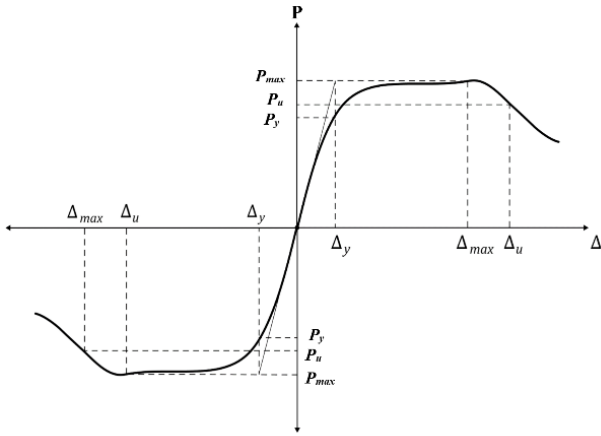
نمودار هیستریزس هر کدام از نمونه‌ها مشابه یکدیگر می‌باشد اما، به دلیل نحوه ترک‌خوردگی و گسترش ترک در سطح تیر در ناحیه کشش و فشار، نامتقارن شده و با یکدیگر تفاوت دارند. با توجه به ظرفیت باربری فشاری و کششی نمونه RCC-RCB مشاهده می‌شود که نمودار هیستریزس آن تقریباً متقارن می‌باشد. نتایج نمونه SRCC-RCB نشان می‌دهد که ظرفیت باربری در ناحیه فشاری ۲۳٪ بیشتر از ناحیه کششی بوده در نتیجه باعث عدم تقارن نمودار هیستریزس شده است که جذب انرژی در ناحیه فشاری بیشتر از ناحیه کششی می‌باشد. در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked ظرفیت باربری در ناحیه فشاری ۱۷٪ بیشتر از ناحیه کششی می‌باشد که باعث ایجاد عدم تقارن کمی در نمودار هیستریزس شده است. همچنین سبب افزایش جذب انرژی در ناحیه فشاری می‌شود.

با توجه به منحنی‌های پوش‌آور، مشاهده می‌شود که نمونه RCC-RCB در ناحیه کششی، نمونه SRCC-RCB در ناحیه فشاری و نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked در هر دو جهت عملکرد خوبی داشته است. با توجه به الگوهای ترک‌خوردگی و شکست نمونه‌ها، نمودارهای هیستریزس و پوش‌آور و ظرفیت باربری جانبی آن‌ها مشاهده می‌شود که خرابی در نمونه

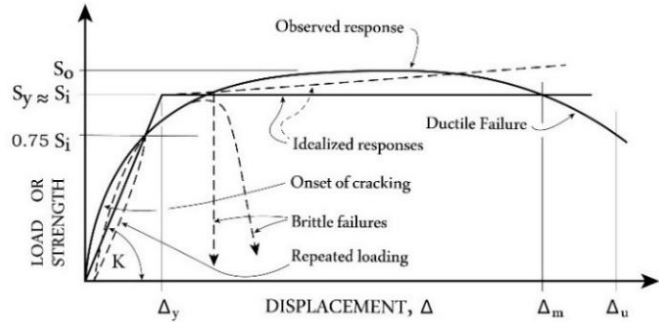
فشاری در این نمونه‌ها نسبت به نمونه RCC-RCB افزایش یافته است. همچنین پخش ترک‌خوردگی در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked بهتر و بیشتر از دو نمونه دیگر می‌باشد. طول مفصل پلاستیک در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked نسبت به دو نمونه دیگر افزایش یافته است. عمده ترک‌های خمشی ایجاد شده در نمونه SRCC-RCB-TP بعد از طول TP (۵۰۰ میلی‌متر) و در نمونه SRCC-RCB نیز در طول تیر پخش شده است و محدود به ۱/۲ پایین تیر نمی‌باشد. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه RCC-RCB عمده ترک‌ها در نزدیکی ناحیه اتصال تیر به ستون می‌باشد.

۳-۲- نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها

نمودار نیرو-جابجایی هر سه نمونه در شکل‌های ۱۱، ۱۴ و ۱۷ ارائه شده است. نمودار پوش‌آور نمونه‌های آزمایشگاهی RCC-RCB، SRCC-RCB و RCB با یکدیگر مقایسه شده و در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. با توجه به منحنی هیستریزس نمونه‌ها می‌توان حداکثر ظرفیت باربری جانبی، ظرفیت تسلیم و ظرفیت نهایی را تعیین کرد. با استفاده از هر یک از این پارامترها می‌توان شکل‌پذیری، سختی



(ب) نمودار پوش آور



(الف) منحنی نیرو-جاب‌جایی عضو بتن‌آرمه [۵۲]

شکل ۱۹. نمودار پوش آور

Fig. 19. Backbone Curve (Push-Over). (a) Load-Displacement Relationship for a Reinforced Concrete Element, (b) Backbone Curve.

که در آن، Δ_u برابر با بیشترین جابه‌جایی و Δ_y نشان‌دهنده جابه‌جایی نقطه تسلیم می‌باشد.

شکل‌پذیری جانبی نمونه برابر با میانگین شکل‌پذیری جانبی در جهت فشاری و کششی می‌باشد. مقادیر مربوط به جابه‌جایی شکل‌پذیری نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. شکل‌پذیری RCC-RCB، SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP به ترتیب ۶/۹، ۹/۳ و ۱۲/۳ می‌باشد.

سختی سکانتی برای هر چرخه با استفاده از رابطه ۴ [۵۳] محاسبه می‌شود و نمودار سختی سکانتی در مقابل جابه‌جایی جانبی هر یک از نمونه‌ها در شکل ۲۰ نمایش داده شده است.

RCC-RCB در ناحیه کششی آن بیشتر، در نمونه SRCC-RCB عمده ترک‌ها و آسیب‌ها در ناحیه فشاری ایجاد شده و در نمونه SRCC-RCB TP با توجه به پخش گسترده ترک‌ها در سطح تیر نمونه و به دور از ناحیه اتصال مشاهده می‌شود که در هر دو جهت فشار و کشش عملکرد مناسبی داشته است. همچنین با توجه به شیب اولیه نمودار پوش آور نمونه‌ها (شکل ۱۸) سختی اولیه نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked بیشتر از نمونه SRCC-RCB و بیشتر از نمونه RCC-RCB می‌باشد که نشان می‌دهد در صورت استفاده از یک مقطع فولادی در ناحیه اتصال و محصور در تیر بتن‌آرمه به همراه ستون SRC، سختی اولیه افزایش یافته و جذب انرژی بالاتری دارد.

۳-۳-۳ شکل‌پذیری و کاهش و سختی

شکل‌پذیری جانبی به عنوان نسبت حداکثر جاب‌جایی به جابه‌جایی در نقطه تسلیم نمونه تعریف می‌شود (رابطه ۳). با توجه به تعریف شکل‌پذیری جانبی، حداکثر جابه‌جایی برای نمونه‌ها به عنوان جابه‌جایی مربوط به نیروی ۸۵ درصد نیروی تسلیم در نظر گرفته می‌شود که از شیب ناحیه خطی (الاستیک) منحنی ستون فقرات به دست می‌آید. در شکل ۱۹ نشان داده شده است [۵۱].

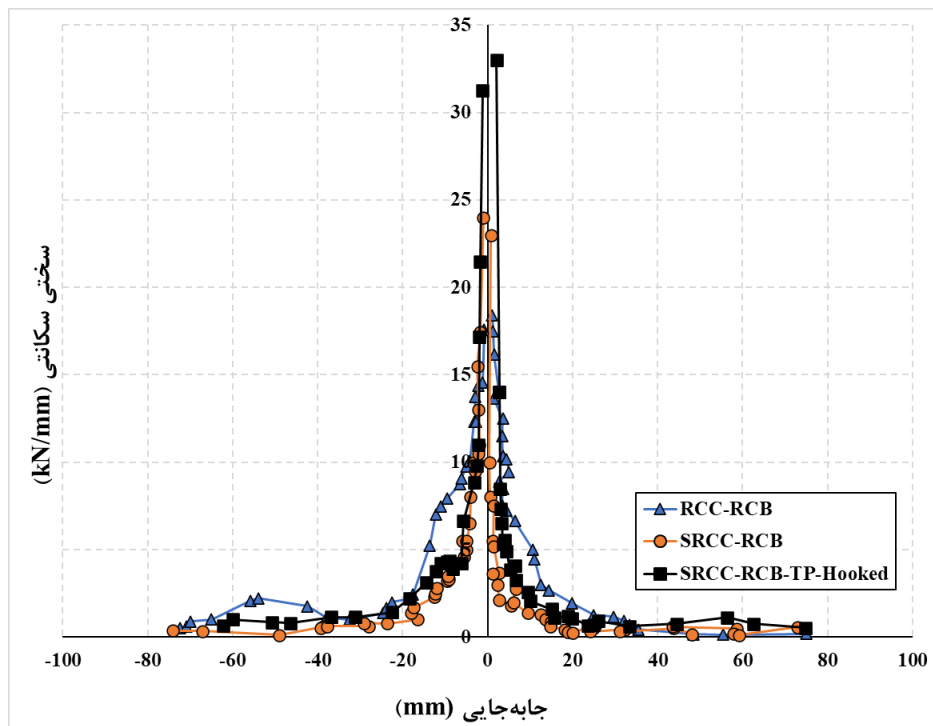
$$\mu = \frac{\Delta_y}{\Delta_u} \quad (3)$$

در این معادله، $+F_i$ و $-F_i$ به ترتیب بیشترین نیروی کششی و فشاری جانبی در هر چرخه و $+\Delta_i$ و $-\Delta_i$ به ترتیب نشان‌دهنده جابه‌جایی کششی و فشاری متناظر با بیشترین نیروی جانبی در هر چرخه می‌باشند. سختی سکانتی با استفاده از تحلیل پوش آور و به ترتیب در هر دو جهت کششی و فشاری به دست می‌آید. با مقایسه کاهش سختی نمونه‌ها

جدول ۴. شکل پذیری نمونه‌ها.

Table 4. Ductility Specimens.

μ_{avg}	$\mu(-)$	Δ_u (فشار - mm)	Δ_y (فشار - mm)	$\mu(+)$	Δ_u (کشش - mm)	Δ_y (کشش - mm)	نمونه‌ها
۶/۹	۵/۱۸	-۷۲/۶	-۱۴	۸/۶۳	۸۸	۱۰/۲	RCC-RCB
۹/۳	۱۱/۲۱	-۹۰/۸	-۸/۱	۷/۳۶	۴۳/۸	۵/۹۵	SRCC-RCB
۱۲/۳	۱۰/۱۶	-۵۰/۸	-۵	۱۴/۴	۶۵	۴/۵	SRCC-RCB-TP-Hooked



شکل ۲۰. سختی سکانتی

Fig. 20. Secant Stiffness.

که نشان می‌دهد شیب اولیه نمونه SRCC-RCB بیشتر بوده و سختی اولیه بالاتری دارد. دلیل این افزایش سختی را می‌توان تفاوت نوع ستون‌ها در هر دو نمونه نسبت داد. نمونه SRCC-RCB، با ستون فولادی محاط در بتن آرمه، به دلیل افزایش ظرفیت باربری و جذب انرژی، سختی اولیه بالاتری دارد. همچنین نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked شیب اولیه مشابهی با نمونه SRCC-RCB دارد اما از نظر مقدار، نسبت به نمونه

می‌توان مشاهده کرد که با توجه به توسعه و گسترش تدریجی ترک‌ها در نمونه‌ها، کاهش سختی نیز به تدریج رخ می‌دهد.

همچنین، با توجه به آن که ستون در تمامی نمونه‌ها در محدوده الاستیک قرار دارد، ترک خوردگی در تیر رخ داده و منحنی کاهش سختی در همه نمونه‌ها تقریباً یکسان می‌باشد. نمونه RCC-RCB شیب کمتری در هر دو جهت کشش و فشار در مقایسه با نمونه SRCC-RCB دارد،

سطح زیر منحنی هیستریزیس بزرگتر باشد، انرژی تلف شده بیشتر است که نشان می‌دهد المان مورد نظر انرژی بیشتری جذب کرده در نتیجه شکل پذیری بیشتری دارد. همچنین انرژی تلف شده معادله مستقیمی با عملکرد لرزه‌ای المان دارد. انرژی تلف شده تجمعی از محاسبه سطح زیر هر چرخه منحنی هیستریزیس محاسبه می‌شود. در شکل ۲۱ انرژی تلف شده در هر چرخه را نشان می‌دهد که از رابطه ۵ محاسبه می‌گردد و منحنی شکل ۲۱-ب انرژی تلف شده تجمعی سه چرخه در مقابل جابه‌جایی جانبی می‌باشد.

$$E_{Dissipation} = \frac{S_{DCA} + S_{AFD}}{S_{OCB} + S_{OFE}} \quad (5)$$

که در این معادله؛ S_{AFD} و S_{DCA} سطح محصور AFD و DCA و S_{OCB} و S_{OFE} سطح محصور OCB و OFE می‌باشد. با افزایش روند بارگذاری در منحنی هیستریزیس مشاهده می‌شود که مقاومت و سختی در نمونه کاهش می‌یابد که منجر به کاهش شیب منحنی هیستریزیس می‌شود. هر چه سطح زیر نمودار هیستریزیس کمتر باشد و سختی و مقاومت نمونه تحت بارگذاری به یکباره کاهش یابد، پدیده جمع‌شدگی (Pinching) رخ می‌دهد. برای جلوگیری از پدیده جمع‌شدگی (Pinching) که یکی از عوامل موثر بر شکل‌پذیری نمونه بتن‌آرمه می‌باشد، طراحی و محاسبه صحیح المان‌های بتن‌آرمه می‌باشد که می‌توان علاوه بر داشتن سختی، مقاومت و شکل‌پذیری، ظرفیت اتلاف انرژی نمونه را افزایش داد. پدیده جمع‌شدگی (Pinching) هنگامی رخ می‌دهد که سطح زیر نمودار هیستریزیس در چرخه‌های بالاتر و سختی نمونه به یکباره کاهش می‌یابد. عوامل موثر بر Pinching نیروهای برشی زیاد، لغزش آرماتورهای طولی و یا نرم‌شدگی اتصالات می‌باشد. برای محاسبه Pinching که به آن ضریب میرایی معادل گفته می‌شود، از نتایج منحنی انرژی تلف شده تجمعی استفاده می‌گردد، با توجه به رابطه ۶ استفاده می‌شود.

$$Equivalent Damping Coefficient = \frac{E_D}{2\pi} \quad (6)$$

در این رابطه E_D برابر با سطح زیر منحنی هر یک از چرخه‌های نمودار هیستریزیس است. در شکل ۲۲ نتایج میرایی معادل نمونه‌های شبیه‌سازی شده در آزمایش نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، نمونه SRCC-

SRCC-RCB افزایش یافته است. به دلیل وجود یک مقطع فولادی در ناحیه اتصال تیر به ستون، ظرفیت باربری و جذب انرژی نمونه افزایش یافته و در نتیجه بیشترین مقدار سختی سکانتی در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked به دست آمده است.

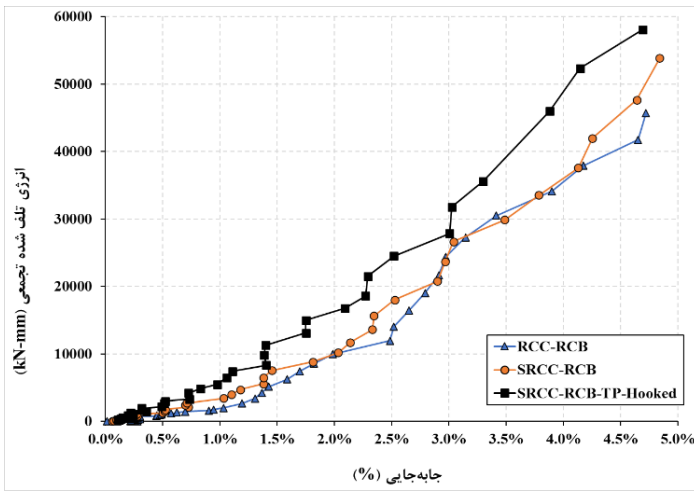
با افزایش بارگذاری و کاهش مقاومت جانبی نمونه‌ها، می‌توان مشاهده کرد که سختی سه نمونه کاهش می‌یابد. با توجه به نمودارهای پوش‌آور نمونه‌ها و مقایسه آنها با یکدیگر، مشاهده می‌شود که شیب اولیه نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked از دو نمونه دیگر بیشتر است. این افزایش سختی در مقایسه با نمونه‌های SRCC-RCB و RCC-RCB به دلیل وجود مقطع فولادی در ناحیه اتصال و تیر بتن‌آرمه است.

با توجه به نمودار پوش‌آور نمونه‌ها و مقایسه آنها با یکدیگر، مشاهده می‌شود که شیب اولیه نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked بیشتر از دو نمونه دیگر است که دلیل این افزایش سختی نسبت به نمونه SRCC-RCB و نمونه RCC-RCB وجود مقطع فولادی در ناحیه اتصال و در تیر بتن‌آرمه است. المان ستون نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked همانند نمونه SRCC-RCB دارای مقطع فولادی محاط در بتن‌آرمه می‌باشد. نتایج نمودارهای هیستریزیس و انرژی جذب شده نمونه‌ها، نشان می‌دهد وجود مقطع فولادی محاط در بتن‌آرمه ستون و بخشی از تیر، سبب افزایش جذب انرژی در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked نسبت به دو نمونه دیگر شده است. همچنین در این نمونه با افزایش روند بارگذاری و کاهش مقاومت جانبی آن، روند کاهش سختی نسبت به دو نمونه دیگر با شیب کمتری، کاهش یافته است.

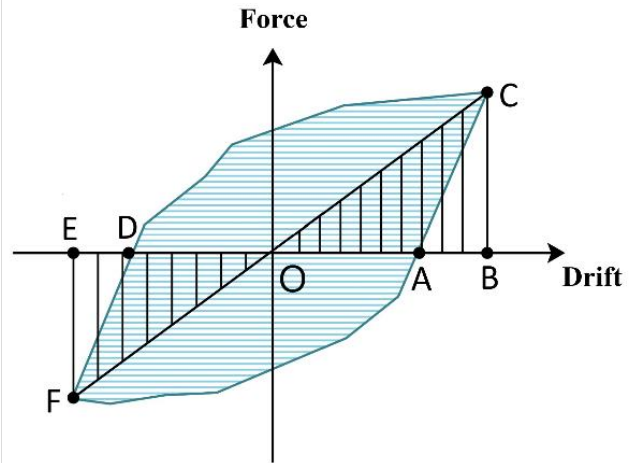
براساس منحنی سختی سکانتی مشاهده می‌شود نمونه RCC-RCB در جهت بارگذاری کششی سختی بیشتری دارد و نمونه SRCC-RCB در هر دو جهت بارگذاری کششی و فشاری نسبت به نمونه RCC-RCB سختی ۱۳/۵٪ و ۳۷/۵٪ افزایش یافته است که به دلیل استفاده از مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه می‌باشد. همچنین نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked نیز سختی در هر دو جهت بارگذاری کششی و فشاری نسبت به نمونه RCC-RCB به ترتیب ۵۰٪ و ۴۵٪ و نسبت به نمونه SRCC-RCB در هر دو جهت به ترتیب ۴۶٪ و ۱۲٪ افزایش یافته که نشان دهنده تاثیر به سزای مقاطع فولادی محاط در ستون و بخشی از تیر بتن‌آرمه می‌باشد.

۳-۴- انرژی تلف شده و میرایی معادل

انرژی تلف شده بیانگر سطح زیر منحنی هیستریزیس می‌باشد. هر چه



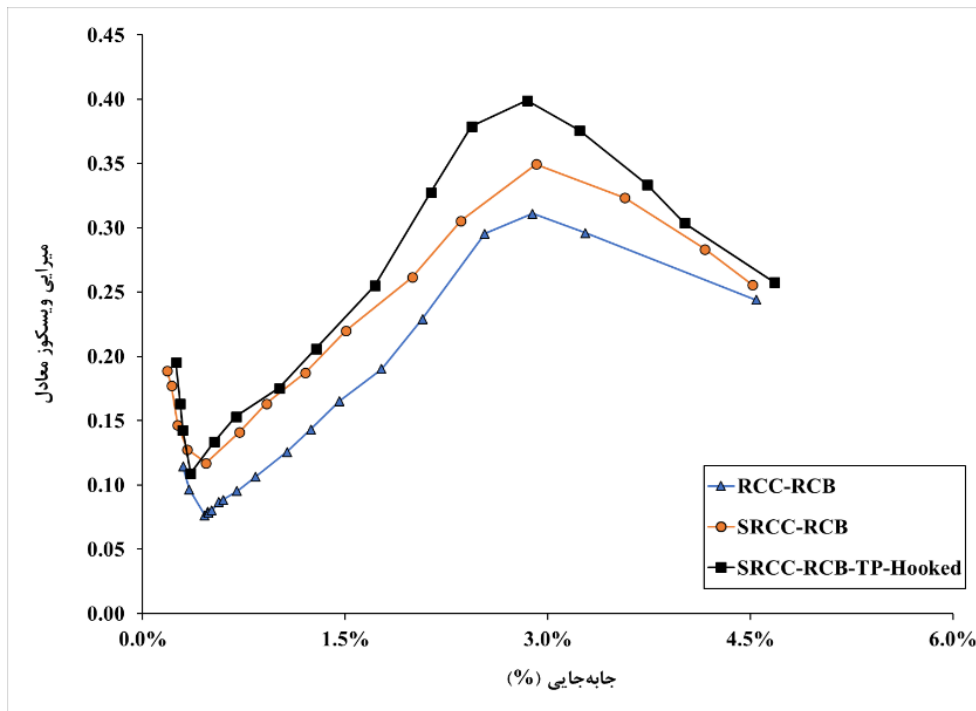
(ب) انرژی تلف شده تجمعی نمونه‌ها



(الف) سطح محصور هر چرخه از نمودار هیستریزیس

شکل ۲۱. انرژی تلف شده نمونه‌ها.

Fig. 21. Energy Dissipation. (a) Calculation of the Area under the Hysteresis Curve, (b) Cumulative Energy Dissipation.



شکل ۲۲. میرایی معادل نمونه‌ها

Fig. 22. Equivalent Damping Coefficient.

که عملکرد پس از تسلیم و جذب انرژی اتصال کامپوزیت را بهبود می‌بخشد.

- نتایج نشان می‌دهد که نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به نمونه‌های RCC-RCB و SRCC-RCB از خود نشان می‌دهد، به گونه‌ای که میانگین شکل‌پذیری این نمونه نسبت به RCC-RCB و SRCC-RCB به ترتیب ۴۴٪ و ۲۴٪ افزایش یافته است. استفاده از مقطع فولادی I شکل محاط در ستون بتن‌آرمه و همچنین مقطع فولادی I شکل به طول ۵۰۰ میلی‌متر در تیر بتن‌آرمه باعث افزایش ظرفیت باربری، جذب انرژی و در نتیجه بهبود شکل‌پذیری و سختی نمونه شده است.

- مهم‌ترین عامل مؤثر در افزایش سختی، به‌ویژه سختی سکانتی با توجه به فرمول مربوطه، مقدار نیروی وارده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از قطعه انتقالی (TP) در تیر بتن‌آرمه همراه با ستون SRC، به دلیل افزایش ظرفیت باربری و جذب انرژی تحت بارگذاری چرخه‌ای، سبب افزایش سختی سکانتی نمونه نسبت به حالتی می‌شود که تنها ستون SRC موجود است یا نمونه‌ای که شامل تیر و ستون بتن‌آرمه است. به‌طور مشخص، سختی سکانتی نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked نسبت به نمونه‌های SRCC-RCB در جهت کشش و فشار به ترتیب ۴۶/۵٪ و ۱۲/۱٪ و نسبت به نمونه RCC-RCB در جهت کشش و فشار به ترتیب ۵۱/۲٪ و ۴۵٪ افزایش یافته است.

- در نمونه RCC-RCB، عمده ترک‌ها در ناحیه نزدیک به محل اتصال تمرکز یافته و در طول تیر گسترش نیافته‌اند. در حالی که در نمونه SRCC-RCB، ترک‌ها و آسیب‌ها تا فاصله تقریباً ۱۰۰ میلی‌متر از ناحیه اتصال گسترش یافته‌اند و در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked، ترک‌ها تا فاصله حدود ۲۰۰ میلی‌متر و پس از ناحیه قرارگیری قطعه انتقالی (TP) در تیر بتن‌آرمه ایجاد شده‌اند. همچنین، در نمونه‌های SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Hooked، گسترش ترک‌ها و آسیب‌ها در طول تیر و دور از ناحیه اتصال تیر به ستون رخ داده است، که منجر به افزایش طول مفصل پلاستیک در این نمونه‌ها نسبت به نمونه RCC-RCB شده است.

- وجود مقاطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه و بخشی از تیر در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked باعث افزایش جذب انرژی شده و در نتیجه، نیروی برشی وارد بر ناحیه چشمه اتصال نیز افزایش یافته است.

RCB-TP-Hooked مقدار ضریب میرایی معادل بیشتری نسبت به دو نمونه SRCC-RCB و RCC-RCB دارد. همچنین ضریب میرایی معادل نمونه SRCC-RCB از نمونه RCC-RCB بیشتر می‌باشد. با توجه به نتایج می‌توان گفت در صورت استفاده از یک مقطع فولادی در ستون بتن‌آرمه (SRCC) انرژی جذب شده (تلف شده) افزایش می‌یابد و سبب افزایش سطح زیر منحنی هیستریزس می‌شود. همچنین در صورت استفاده از یک مقطع فولادی در ناحیه اتصال تیر به ستون و اتصال آن به مقطع فولادی نیز می‌تواند انرژی جذب شده را افزایش دهد و در نتیجه در هر دو حالت ضریب میرایی معادل افزایش یابد.

۴- نتیجه گیری

این مقاله به بررسی تاثیر استفاده از مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه و تاثیر استفاده همزمان از قطعه فولادی محاط در تیر بتن‌آرمه تحت بارگذاری چرخه‌ای، پرداخته است. سه نمونه آزمایشگاهی RCC-RCB، SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP نمونه مورد بررسی می‌باشد که نمونه اول تیر و ستون هر دو بتن‌آرمه، نمونه دوم ستون با مقطع فولادی محاط در بتن‌آرمه و تیر بتن‌آرمه و نمونه سوم، ستون با مقطع فولادی محاط در بتن‌آرمه و ستون دارای قطعه فولادی در بتن‌آرمه می‌باشد که در هر سه نمونه آرماتورهای طولی تیر در داخل ستون ادامه یافته و داخل ستون مهار شده اند. با توجه به شرایط هر یک از نمونه‌ها و بررسی های انجام شده در این مقاله، می‌توان نتایج زیر را به دست آورد:

- نمودارهای هیستریزس نشان می‌دهند که نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های RCC-RCB و SRCC-RCB از نظر ظرفیت باربری جانبی و جذب انرژی دارد. به‌طور مشخص، ظرفیت باربری جانبی نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked در جهت کششی به ترتیب ۱٪ و ۱۵٪ و در جهت فشاری ۲۰٪ و ۸٪ نسبت به نمونه‌های RCC-RCB و SRCC-RCB افزایش یافته است. حضور مقاطع I شکل در ستون بتن‌آرمه و قطعه انتقالی در تیر بتن‌آرمه باعث افزایش جذب انرژی در این نمونه شده است. در نمونه RCC-RCB ظرفیت باربری در هر دو جهت کششی و فشاری تقریباً یکسان است، اما در نمونه‌های SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Hooked نمودار هیستریزس در جهت فشاری ظرفیت بالاتری نشان می‌دهد. این رفتار ناشی از افزایش سختی و محصورشدگی تأمین‌شده توسط پروفیل فولادی و قطعه انتقالی است

- RC hybrid frame structure, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(5) (2019) 04019050.
- [11] X. Lan, Y. Wang, B. Tan, Y. Zhang, An assessment of application of the component-based method to full range behaviour of joints between steel beam to concrete filled steel tube columns under extreme loading conditions, *Engineering Structures*, 309 (2024) 118057.
- [12] E. Tavasoli, O. Rezaifar, A. Kheyroddin, Seismic performance of RC joints retrofitted by external diagonal bolts, *Journal of Building Engineering*, 46 (2022) 103691.
- [13] e. Tavasoli, O. Rezaifar, a. Kheyroddin, Experimental study of shear retrofit of RC beam-column joints using external post-tensioned bolts (In Persian), *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(3) (2023) 681-700.
- [14] H. Dabiri, K. Rahimzadeh, A. Kheyroddin, A comparison of machine learning-and regression-based models for predicting ductility ratio of RC beam-column joints, in: *Structures*, Elsevier, 2022, pp. 69-81.
- [15] Y. Zhang, D. Li, Development and testing of precast concrete-filled square steel tube column-to-RC beam connections under cyclic loading, *Construction and Building Materials*, 280 (2021) 122540.
- [16] V.-P. Nguyen, Q.-H. Nguyen, M. Couchaux, J. Aribert, M. Hjjaj, Hybrid steel beam to exterior RC column joints with encased steel profile, *Engineering Structures*, 306 (2024) 117624.
- [17] P. Javadi, M. Askari, S. Vahedi, A. GhafourianHesami, A. Tizchang, Retrofit of RC buildings using vertical shear links and hybrid connections, in: *Structures*, Elsevier, 2023, pp. 1788-1807.
- [18] B.-L. Lai, R.-L. Bao, M.-Y. Zhang, Y.-H. Wang, J.R. Liew, Evaluation on the static and seismic performance of steel reinforced concrete composite columns with high strength materials, *Journal of Building Engineering*, 79 (2023) 107886.
- [19] J. Zhou, Z. Chen, W. Zheng, H. Liao, Seismic behavior of steel reinforced concrete column with welded studs subjected to combined action of compression-bending-shear-torsion, *Engineering Structures*, 252 (2022) 113727.
- [1] Z.-H. Xu, G.-L. Bai, J.-Q. Zhao, B. Liu, Study on seismic performance of SRC leaning beam-column exterior joints in the main workshop of CAP1400 nuclear power plant, *Structures*, 34 (2021) 2721-2734.
- [2] XUE Yicong YU Yunlong, YANG Yong, Theoretical model on shear strength of steel reinforced concrete short columns, *JOURNAL OF BUILDING STRUCTURES*, 41(S1) (2020) 162-170.
- [3] K. Wardhana, F.C. Hadipriono, Study of recent building failures in the United States, *Journal of performance of constructed facilities*, 17(3) (2003) 151-158.
- [4] K. Liu, J. Chen, Y. Cai, C. Liu, Seismic Performance of a Novel Partially Embedded Transfer Connection with Wing Wall in Steel-Concrete Vertical Irregular Structures: Physical Tests and Theoretical Model, *Journal of Structural Engineering*, 151(9) (2025) 04025120.
- [5] J. Wei, J. Xue, Z. Hu, L. Qi, J. Xu, Experimental study on dynamic shear-behavior of H-shaped SRC columns under lateral impact loading, *Journal of Constructional Steel Research*, 213 (2024) 108396.
- [6] X. Zhu, Q. Zhang, D. Zhang, Y. Du, Q. Zhang, Experimental and numerical study on the dynamic response of steel-reinforced concrete composite members under lateral impact, *Thin-Walled Structures*, 169 (2021) 108477.
- [7] L. Zhou, S. Yi-sheng, Experimental study on seismic behavior of SRC deep beam-to-CFST column frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 155 (2019) 157-175.
- [8] C. Zhou, J. Xue, Z. Hu, Z. Liu, Coupled translational-torsional response for SRC frame with special-shaped columns under earthquake, *Journal of Building Engineering*, 31 (2020) 101440.
- [9] C. Xu, X. Liu, X. Zha, S. Peng, Experimental research on seismic damage of a full-web SRC frame structure, *Journal of Building Engineering*, 27 (2020) 100959.
- [10] H. Zhang, P. Cao, K. Wu, L. Ren, C. Xu, Two-step seismic calculating method and seismic features of SRC-

- [30] Y. Li, M. Fan, H. Song, C. Wu, Q. An, X. Wang, J. Ren, Restoring force model of a modular steel-concrete composite column, *Case Studies in Construction Materials*, 20 (2024) e03128.
- [31] P. Derakhshesh, S.R. Mirghaderi, G. Nouri, M. Farzam, Behavior of new hybrid connection between steel beam and concrete-encased composite column, *Journal of Constructional Steel Research*, 210 (2023) 108043.
- [32] I.-S. Yang, D. Lee, H. Ju, S.-J. Lee, J.-Y. Oh, Steel-concrete composite beam-column connections utilizing prefabricated permanent steel form, *Journal of Building Engineering*, 46 (2022) 103836.
- [33] X. Wang, Y. Liu, F. Yang, Y. Lu, X. Li, Effect of concrete cover on the bond-slip behavior between steel section and concrete in SRC structures, *Construction and Building Materials*, 229 (2019) 116855.
- [34] Y. Wei, B. Wang, B. Han, J. Wu, G. Huo, Hysteretic model and numerical simulation method of T-shaped SRC column-steel beam joints, *Journal of Constructional Steel Research*, 219 (2024) 108754.
- [35] M. Pan, D. Wang, H. Bai, T. Yu, Axial compression behavior of FRP-confined steel-reinforced columns with a flange-broadened cross-shaped steel, *Thin-Walled Structures*, 189 (2023) 110898.
- [36] F. Yu, Y. Fang, C. Feng, S. Tan, Y. Wang, Shear capacity of PVC-CFRP confined concrete column-RC beam interior joint strengthened with core steel tube, *Thin-Walled Structures*, 193 (2023) 111213.
- [37] X. Mu, Y. Yang, J. Liu, K. Shen, Y.F. Chen, Seismic performance of full-scale prefabricated semi-rigid bolted connection between RC column and composite beam, *Journal of Constructional Steel Research*, 212 (2024) 108176.
- [38] M. Moharram, D. Bompa, B. Xu, A. Elghazouli, Behaviour and design of hybrid RC beam-to-steel column connections, *Engineering Structures*, 250 (2022) 113502.
- [39] H. Bai, J. Xu, C. Demartino, X. Zhao, Probabilistic code-based shear capacity model for I-shaped steel reinforced concrete (SRC) beams, *Engineering Structures*, 301 (2024) 116855.
- [20] C. Wu, Z. Liu, J. Men, Z. Li, H. Ding, C. Xiong, X. Wang, Analysis of stress mechanism in a new prefabricated SRC composite column, *Structures*, 59 (2024) 105695.
- [21] J. Zhang, X. Zhao, X. Rong, Y. Li, Experimental study of high-strength steel fiber concrete exterior beam-column joints with high-strength steel reinforcements, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(5) (2023) 2785-2815.
- [22] H. Dabiri, A. Kheyroddin, An experimental comparison of RC beam-column joints incorporating different splice methods in the beam, *Structures*, 34 (2021) 1603-1613.
- [23] G. Cheng, X. Zhou, J. Liu, Y.F. Chen, Seismic behavior of circular tubed steel-reinforced concrete column to steel beam connections, *Thin-Walled Structures*, 138 (2019) 485-495.
- [24] J. Zhang, J. Jia, Experimental study on seismic behavior of composite frame consisting of SRC beams and SRUHSC columns subjected to cyclic loading, *Construction and Building Materials*, 125 (2016) 1055-1065.
- [25] B. Rong, M. Xu, J. Sun, R. Zhang, Y. Sun, W. Zhang, H. Wu, Experimental and numerical research on seismic behavior and shear capacity of SRC column-RC beam composite joints, *Journal of Building Engineering*, 50 (2022) 104181.
- [26] X. Liu, Y. Yang, Y. Yu, N. Hao, Shear performance of prestressed partially-precast steel reinforced concrete beam: Experiments and analyses, *Structures*, 62 (2024) 106329.
- [27] B. Rong, J. Sun, M. Xu, R. Zhang, Y. Sun, W. Zhang, W. Zhang, Experimental and numerical research on seismic performance of S-RC-SRC composite frame, *Journal of Building Engineering*, 43 (2021) 103119.
- [28] C.-H. Li, X.C. Liu, A.-L. Zhang, X. Chen, D. Zhang, Y.-Z. Ren, J. Zhang, Z. Li, Axial compressive strength of concrete encased extended T-shaped steel composite columns with less reinforcement, *Journal of Building Engineering*, 82 (2024) 108207.
- [29] N.E. Shanmugam, B. Lakshmi, State of the art report on steel-concrete composite columns, *Journal of constructional steel research*, 57(10) (2001) 1041-1080.

- and numerical assessment of mixed RC beam and steel column systems, *Journal of Constructional Steel Research*, 131 (2017) 51-67.
- [47] P. Pan, X. Lin, A. Lam, H. Chen, L. Ye, Monotonic loading tests of ring-beam connections for steel reinforced concrete columns and RC beams, *Journal of Structural Engineering*, 140(4) (2014) 04013092.
- [48] A.-A.C. Institute), *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*, in, ACI, 2019.
- [49] A. C39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, in, ASTM international, 2015.
- [50] A. 374:1-5, Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary, in: ACI, 2005, pp. 1-05.
- [51] R. Park, Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing, *Bulletin of the new Zealand society for earthquake engineering*, 22(3) (1989) 155-166.
- [52] T. Paulay, *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*, John Willey & Sons, (1992).
- [53] J. Zhang, Z. Pei, X. Rong, Experimental seismic study of an innovative precast steel-concrete composite beam-column joint, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 161 (2022) 107420.
- (2024) 117180.
- [40] C.-C. Chen, B. Suswanto, Y.-J. Lin, Behavior and strength of steel reinforced concrete beam-column joints with single-side force inputs, *Journal of Constructional Steel Research*, 65(8-9) (2009) 1569-1581.
- [41] L. Chu, Y. Tian, D. Li, Y. He, H. Feng, Shear behavior of steel reinforced concrete column-steel beam joints with or without reinforced concrete slab, *Journal of Building Engineering*, 35 (2021) 102063.
- [42] F.-Y. Liao, L.-H. Han, Z. Tao, Behaviour of composite joints with concrete encased CFST columns under cyclic loading: Experiments, *Engineering Structures*, 59 (2014) 745-764.
- [43] C. Wu, J. Liu, W. Shi, Seismic performance of composite joints between prefabricated steel-reinforced concrete columns and steel beams: experimental study, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18 (2020) 3817-3841.
- [44] W. Guangyong, Z. Dongming, Experimental research on the post-fire seismic performance of steel reinforced concrete columns, *Procedia engineering*, 210 (2017) 456-463.
- [45] C. Xu, S. Peng, C. Wang, Z. Ma, Influence of the degree of damage and confinement materials on the seismic behavior of RC beam-SRC column composite joints, *Composite structures*, 231 (2020) 111002.
- [46] M. Moharram, D. Bompa, A. Elghazouli, Experimental

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. M. Qiyami Taklymi, A. Kheyroddin, O. Rezaifar, *Experimental Investigation of the Seismic Performance of the Joint between a Steel encased in Reinforced Concrete Column and a Reinforced Concrete Beam*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(12) (2026) 2119-2150.

DOI: [10.22060/ceej.2026.23556.8181](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.23556.8181)



