

Investigation of Longitudinal Reinforcement Anchorage of Reinforced Concrete Beam at the Joint with Steel Encased Reinforced Concrete Column

Seyedeh Marzieh Qiyami Taklymi¹, Ali Kheyroddin^{2*}, Omid Rezaifar³

1- PhD Candidate, Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

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

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

ABSTRACT

In this study, three experimental specimens were fabricated and subjected to cyclic loading to investigate the simultaneous effect of the steel encased in the reinforced concrete column and the use of a steel in the joint region (transition part) between the reinforced concrete beam and the steel encased in the reinforced concrete column. Additionally, the longitudinal reinforcement bars of the reinforced concrete beam were anchored using welded connections, introducing a new type of composite joint. The main parameters examined in this study include the effect of the steel encased in the reinforced concrete column, the transition part in the joint region, and the anchorage method of longitudinal beam reinforcements using welded connections on the load-bearing capacity, stiffness, energy dissipation, and ductility of the joint. The load-bearing capacity of the specimen incorporating the steel encased in the column and the transition part, along with welded anchorage of longitudinal beam reinforcements, increased by 35% and 26% compared to the reinforced concrete beam-column specimen and the reinforced concrete beam with a steel encased in the column, respectively. The stiffness of the specimen incorporating the steel encased in the column, the transition part, and the welded anchorage of longitudinal beam reinforcements increased by 60% compared to the specimen with a reinforced concrete beam and a steel encased in the column. The stiffness of the specimen with a steel encased in the column increased by 44% compared to the fully reinforced concrete beam-column specimen. The ductility results show that the specimen with the transition part and the steel encased in the column exhibited a 5% increase in ductility compared to the specimen with only the steel encased in the column. The specimen with the steel encased in the column showed an 8% increase in ductility compared to the fully reinforced concrete beam-column specimen.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 February 2025

Revise Date: 16 April 2025

Accept Date: 25 April 2025

Keywords:

*Steel Encased in the
Reinforced Concrete Column
Reinforced Concrete Beam
Transition Part
Anchorage of Reinforcement
Welded Connections*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.504207.3651

*Corresponding author: Ali Kheyroddin.
Email address: kheyroddin@semnan.ac.ir

بررسی مهار آرماتورهای طولی تیر بتن آرمه در اتصال با مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه

سیده مرضیه قیامی تکلیمی^۱، علی خیرالدین^{۲*}، امید رضایی فر^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استاد ممتاز، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از ستون‌های مرکب در سازه‌های بلند افزایش یافته است. یکی از مهم‌ترین موضوعات در بحث اتصالات کامپوزیت، اتصال مناسب بین مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه و تیر بتن آرمه است. در این پژوهش، سه نمونه آزمایشگاهی جهت بررسی اثر همزمان استفاده از مقطع فولادی در ستون بتن آرمه، مقطع فولادی در ناحیه اتصال (قطعه انتقالی) تیر بتن آرمه به مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه و مهار آرماتورهای طولی تیر بتن آرمه به روش اتصال جوشی و ارائه یک اتصال کامپوزیت جدید طراحی و ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته است. پارامترهای اصلی این آزمایش بررسی اثر استفاده مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه، قطعه انتقالی در ناحیه اتصال و نحوه مهار آرماتورهای طولی تیر به روش اتصال جوشی، بر ظرفیت باربری اتصال، سختی، انرژی تلف شده و شکل‌پذیری اتصال بوده است. نتایج نشان می‌دهد ظرفیت باربری نمونه با مقطع فولادی در ستون بتن آرمه و قطعه انتقالی در ناحیه اتصال تیر و مهار آرماتورهای طولی تیر به روش اتصال جوشی، نسبت به نمونه تیر و ستون بتن آرمه و نمونه تیر بتن آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه، به ترتیب ۲۶٪ و ۳۵٪ افزایش یافته است. سختی نمونه با مقطع فولادی در ستون بتن آرمه و قطعه انتقالی در ناحیه اتصال تیر و همچنین مهار آرماتورهای طولی تیر به روش اتصال جوشی، نسبت به نمونه تیر بتن آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه ۶۰٪ افزایش یافته و نمونه با مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه نسبت به تیر و ستون بتن آرمه ۴۴٪ افزایش یافته است. نتایج شکل‌پذیری نمونه‌ها، نشان می‌دهد نمونه دارای قطعه انتقالی در ناحیه اتصال تیر و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه نسبت به نمونه با مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه ۵٪ و نمونه با مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه نسبت به نمونه با تیر و ستون بتن آرمه ۸٪ افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه، تیر بتن آرمه، قطعه انتقالی، مهار آرماتور، اتصال جوشی.

doi:	شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:			
		دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین
10.22065/jsce.2025.504207.3651		چاپ			
10.22065/jsce.2025.504207.3651		۱۴۰۴/۱۰/۳۰	۱۴۰۴/۰۲/۰۵	۱۴۰۴/۰۲/۰۵	۱۴۰۴/۰۱/۲۷
نویسنده مسئول: علی خیرالدین kheyroddin@semnan.ac.ir					پست الکترونیکی:

۱- مقدمه

ستون‌های مختلط فولادی محاط در بتن آرمه^۱ به طور گسترده‌ای در سیستم‌های مختلف سازه‌ای، مانند پایه‌های پل [۱]، سازه‌های با اهمیت بالا از جمله نیروگاه‌های هسته‌ای [۲،۳]، ساختمان‌های بلند [۴]، به کار گرفته می‌شوند. این ستون‌ها به عنوان اعضای باربر عمودی، تحت تاثیر بارهای ضربه‌ای شدید از سوی کشتی‌ها و وسایل نقلیه در طول عمر خود قرار می‌گیرند، که می‌تواند به خسارات چشمگیر در جان و مال منجر شود [۵]. در این راستا، بارهای ضربه‌ای به عنوان یک عامل بحرانی شناخته می‌شوند که تهدید قابل توجهی برای ایمنی سازه‌ها به شمار می‌آید. از میان بلاای طبیعی یا انسانی، زلزله به دلیل احتمال بروز خسارات گسترده و تلفات جانی، بیش‌ترین نگرانی را در عملکرد اعضای سازه‌ای به وجود می‌آورد [۶]. زمانی که سازه‌های مهندسی تحت تاثیر بارهای دینامیکی شدید، مانند زلزله، ضربه [۷] یا انفجار قرار می‌گیرند، باید تاثیرات انتشار موج‌های تنش، تغییرات نرخ کرنش ماده و اثرات اینرسی را در نظر گرفت. این تغییرات باعث پیچیده‌تر شدن پاسخ سازه‌ای نسبت به بارگذاری استاتیکی می‌شود و تهدید جدی برای ایمنی سازه‌هایی مانند ستون‌های SRC به حساب می‌آید [۸،۹]. استفاده از مقاطع فولادی عملکرد لرزه‌ای ستون را بهبود می‌بخشد و به گزینه‌ای مناسب برای مناطق با خطر لرزه‌خیزی بالا تبدیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد استفاده از مقاطع فولادی در ستون بتن آرمه منجر به بهبود ظرفیت باربری، افزایش شکل‌پذیری، سختی و قابلیت اتلاف انرژی در المان‌ها می‌شود [۱۰،۱۱]. حضور بتن آرمه در اطراف مقطع فولادی، ضمن ایجاد یک لایه محافظ در برابر عوامل خوردگی، موجب افزایش شکل‌پذیری و مقاومت سازه می‌شود [۱۲،۱۳]. علاوه بر این حضور بتن آرمه در اطراف مقطع فولادی با ایجاد تأخیر در افزایش دما در المان‌ها، مقاومت و شکل‌پذیری و در نتیجه عملکرد لرزه‌ای اتصال نیز بهبود می‌یابد [۱۴،۱۵]. اتصال تیر و ستون یکی از عوامل کلیدی در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها و انتقال مؤثر نیرو بین ستون و تیر در قاب‌های سازه‌ای است که نقش مهمی در کنترل پایداری و جلوگیری از خرابی سازه ایفا می‌کند [۱۶]. در این زمینه، تحقیقات متعددی بر روی انواع اتصالات از جمله اتصالات کامپوزیت تیر فولادی و ستون‌های SRC انجام شده است [۱۷،۱۸]. نتایج به دست آمده، نشان داده است که این نوع اتصالات می‌تواند به طور مؤثر آسیب‌های لرزه‌ای را کاهش داده و پایداری سازه‌ها در برابر نیروهای جانبی و لرزه‌ای را افزایش دهد و همچنین عملکرد لرزه‌ای، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سازه‌ها را بهبود بخشد [۱۹،۲۰]. نتایج آزمایشگاهی و عددی به دست آمده توسط رانگ و همکاران [۲۱] نشان می‌دهد که تغییر در مقاومت بتن تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت باربری اتصال ندارد، اما افزایش نسبت نیروی محوری وارد بر ستون می‌تواند باعث کاهش ظرفیت باربری اتصال شود. همچنین، برای بهبود عملکرد اتصال، استفاده از تیرهای حلقه‌ای در ناحیه اتصال پیشنهاد شده است. در زمینه جلوگیری از آسیب و خرابی در ناحیه اتصال تیر و ستون، مطالعات زیادی انجام شده است. یکی از روش‌های پیشنهادی استفاده از قطعه انتقالی (المان برشی) در ناحیه اتصال است. از جمله این مطالعات می‌توان به تحقیقاتی که توسط محرم و همکاران [۲۲] و پن و همکاران [۲۳] انجام شده است، اشاره کرد. محرم و همکاران [۲۲] به بررسی عملکرد تیر بتن آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه با استفاده از المان برشی در ناحیه اتصال پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم عملکرد بهتری نسبت به سیستم‌های جداگانه فولادی و بتن آرمه دارد و در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر بارهای مختلف کارایی بیشتری از خود نشان می‌دهد. همچنین پن و همکاران [۲۳] به بررسی رفتار اتصالات ستون‌های فولادی محاط در بتن آرمه و تیرهای بتن آرمه با استفاده از قطعه انتقالی حلقه‌ای پرداخته‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که اتصالات حلقه‌ای ظرفیت باربری مناسبی در برابر بارهای وارده دارند و عملکرد آنها قابل ارزیابی از طریق میزان جابه‌جایی و ظرفیت باربری ستون‌ها و تیرها است. این مطالعه همچنین شبیه‌سازی عددی برای پیش‌بینی رفتار اتصالات در شرایط مختلف بارگذاری ارائه داده است [۲۳].

در مطالعات انجام شده، مقطع فولادی I شکل محاط در ستون بتن آرمه به‌طور عمودی در جهت بال قرار گرفته و آرماتورهای طولی تیر از بال آن عبور کرده‌اند. همچنین، آرماتورهای طولی تیر در پشت مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه با طول مهار مطابق با استاندارد مهار شده‌اند. قطعه انتقالی محاط در تیر بتن آرمه نیز با استفاده از پیچ به بال مقطع فولادی محاط در ستون متصل گردیده است. این مطالعه به بررسی تأثیر مهار آرماتورهای طولی تیر و استفاده همزمان از قطعه انتقالی در اتصال تیر بتن آرمه به مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه پرداخته است. اتصال مورد بررسی از نوع اتصال میانی می‌باشد. نحوه مهار آرماتورهای طولی تیر در داخل اتصال و ستون، به صورت طول مهار مطابق استاندارد ACI318-2019 [۲۴] در نمونه‌های تیر و ستون بتن آرمه و تیر بتن آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه

¹ Steel Reinforced Concrete-SRC

است. مهار آرماتورهای طولی تیر در یکی از نمونه‌ها با استفاده از روش اتصال جوشی در پشت جان مقطع فولادی، با تأمین طول مهاری مطابق استاندارد، انجام شده است. انتهای قطعه انتقالی در ناحیه اتصال تیر به ستون، به جان مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه جوش شده است. علاوه بر نوع مهار آرماتورهای طولی تیر، نحوه قرارگیری قطعه انتقالی و مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه و عبور آرماتورهای طولی تیر از جان مقطع فولادی محاط در بتن‌آرمه، از جمله پارامترهای قابل مقایسه با مطالعات پیشین است.

هدف اصلی این پژوهش، جلوگیری از شکست زود هنگام تیر بتن‌آرمه و اتصال آن به مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه است. از دیگر اهداف این تحقیق، جلوگیری از ایجاد آسیب و ترک در ناحیه اتصال و کنترل گسترش آسیب یا شکست در ناحیه ستون، و همچنین بررسی اثر همزمان استفاده از قطعه انتقالی بر عملکرد اتصال تیر بتن‌آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه می‌باشد. از جمله پارامترهای مورد بررسی تأثیر مهار آرماتورهای طولی تیر و قطعه انتقالی بر عملکرد لرزه‌ای اتصال، از جمله ظرفیت باربری آن تحت بارگذاری چرخه‌ای جانبی، شکل‌پذیری، سختی و میزان اتلاف انرژی هر یک از نمونه‌ها می‌باشد. در این پژوهش، با تلفیق نحوه مهار آرماتورهای طولی تیر بتن‌آرمه و استفاده از قطعه انتقالی در اتصال به مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه، نوعی اتصال مرکب نوین معرفی شده است که با هدف بهبود عملکرد لرزه‌ای و جلوگیری از آسیب‌دیدگی و شکست زود هنگام در ناحیه اتصال توسعه یافته است. نتایج این مطالعه بیانگر تأثیر مثبت این ترکیب در افزایش ظرفیت باربری، شکل‌پذیری، سختی و انرژی تلف‌شده در مقایسه با نمونه‌های پیشین می‌باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

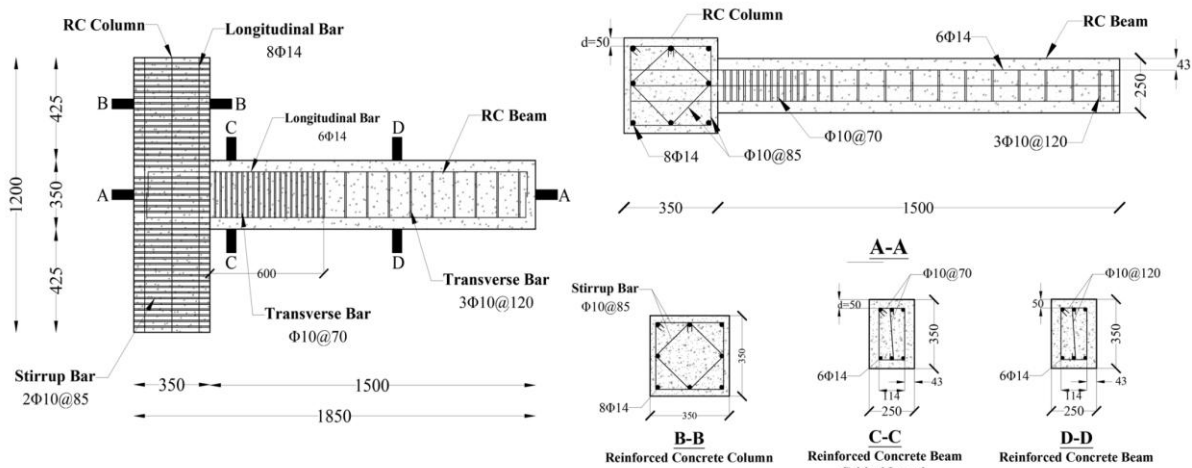
۲-۱ جزئیات نمونه‌ها

در این مطالعه پنج نمونه اتصال میانی تیر-ستون مورد آزمایش، بارگذاری و بررسی قرار گرفته است. جزئیات هندسی هر یک از نمونه‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است. نمونه‌های مورد آزمایش براساس نوع ستون (بتن‌آرمه، مقطع فولادی محاط در بتن‌آرمه)، وجود مقطع انتقال دهنده و نحوه مهار آرماتورهای طولی تیر تقسیم‌بندی شده و عناوین RCC-RCB، SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP- Welded برای نمونه‌ها انتخاب شده است. ستون بتن‌آرمه با RCC، مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه با SRCC، تیر بتن‌آرمه با RCB، مقطع فولادی در تیر بتن‌آرمه (قطعه انتقالی) با TP و مهار آرماتور طولی تیر به روش اتصال جوشی^۱ طول مهاری بیان شده است. در نمونه RCC-RCB آرماتورهای طولی تیر در داخل ستون بتن‌آرمه و در نمونه‌های SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Welded آرماتورهای طولی تیر از جان مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه عبور و در داخل ستون مهار شده است.

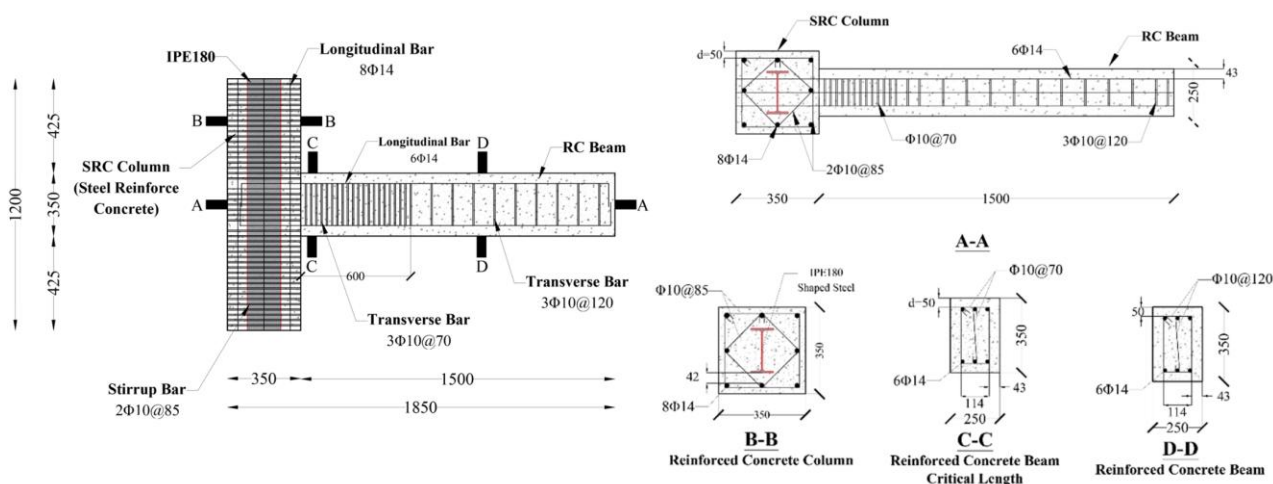
به منظور طراحی نمونه‌ها از استاندارد ACI318-19 [۲۴] استفاده شده که در جدول ۱ جزئیات آن ارائه شده است. با توجه به استاندارد ACI318-19 برای طراحی نمونه‌ها، طول ستون مورد بررسی در ناحیه بحرانی قرار گرفته است. همچنین فاصله خاموت‌ها براساس شرایط ناحیه بحرانی در استاندارد ACI318-19 طراحی شده است. با توجه به استاندارد ACI318-19 فولاد مورد استفاده در هر نمونه، در بازه ۱٪ الی ۰٫۸٪ می‌باشد. قطر خاموت‌های تیر و ستون در همه نمونه‌ها، ۱۰ میلی‌متر و فواصل خاموت‌ها در ناحیه بحرانی تیر ۷۰ میلی‌متر و در خارج از ناحیه بحرانی ۱۲۰ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به آن که تمام طول ستون در نمونه‌ها، در ناحیه بحرانی قرار دارد، در نتیجه فاصله خاموت‌ها در تمامی ستون‌ها ۸۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در تمامی نمونه‌ها یک نیروی محوری فشاری ثابت به مقدار ۴۰۰ کیلونیوتن معادل ۰٫۸٪ ظرفیت محوری ستون و متناسب با ظرفیت جک هیدرولیک آزمایشگاه، به صورت محوری به ستون اعمال شده است.

¹ Reinforced Concrete Column

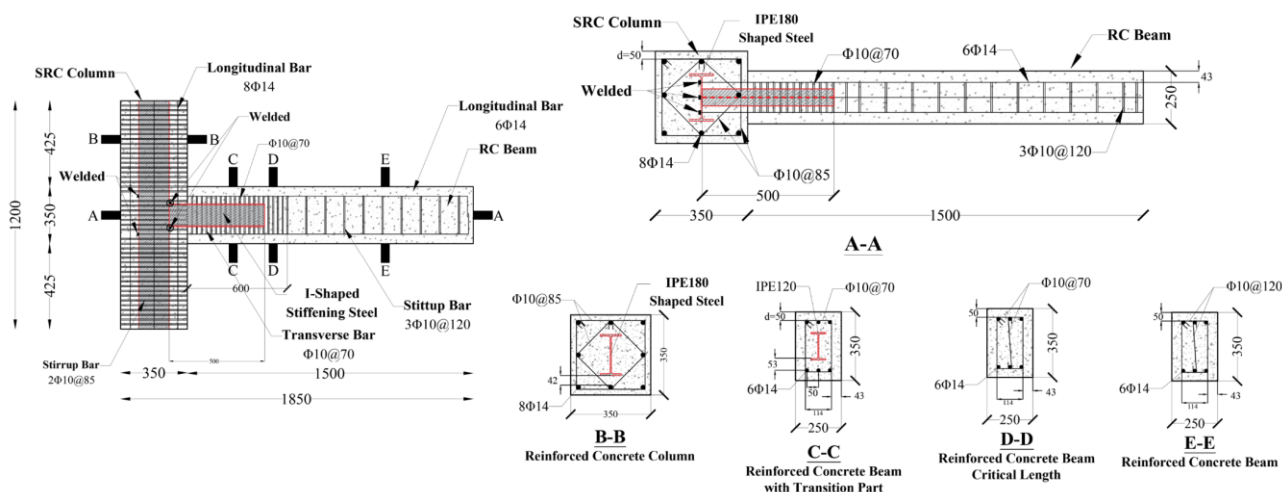
² Welded Anchorage



(الف) نمونه تیر و ستون بتن آرمه (RCC-RCB)



(ب) نمونه تیر بتن آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه (SRCC-RCB)



(ج) نمونه تیر بتن آرمه با قطعه انتقالی، مهار به روش اتصال جوشی و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه (SRCC-RCB-TP-Welded)

شکل ۱: جزئیات هندسی نمونه‌های مورد آزمایش

براساس استاندارد ACI318-19، در طراحی تیر و ستون‌ها باید ظرفیت لنگر ستون، حداقل ۱.۲ برابر ظرفیت لنگر تیر در نظر گرفته شود. همچنین به منظور شکست دیر هنگام اتصال و ستون، در طراحی تیر و ستون نمونه‌ها، اصل تیر ضعیف-ستون قوی برقرار می‌باشد. براساس اصل تیر ضعیف-ستون قوی آسیب و شکست در تیر تشکیل می‌شود و در اتصال و ستون آسیبی وارد نگردد (معادله ۱).

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

جدول ۱: جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

ردیف	نمونه‌ها	نوع ستون	نوع تیر	نیروی محوری (kN)	مقطع فولادی ستون	مقطع فولادی تیر	آرمتورهای طولی	آرمتورهای عرضی
۱	RCC-RCB	بتن آرمه (RCC)	بتن آرمه	۴۰۰	-	-	Φ۱۴	Φ۱۰
۲	SRCC-RCB	مقطع فولادی محاط در بتن آرمه (SRCC)	بتن آرمه	۴۰۰	IPE180	-	Φ۱۴	Φ۱۰
۳	SRCC-RCB-TP-Welded	مقاطع فولادی محاط در بتن آرمه (SRCC)	بتن آرمه	۴۰۰	IPE180	IPE120	Φ۱۴ (مهار به روش اتصال جوشی)	Φ۱۰

مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه (SRC) از نوع IPE180 با مشخصات هندسی، عرض بال ۹۰ میلی‌متر، ارتفاع جان ۱۸۰ میلی‌متر و به طول ۱۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد. مقطع فولادی به کار رفته برای قطعه انتقالی از نوع IPE120 با مشخصات هندسی عرض بال ۶۴ میلی‌متر، ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر و به طول ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد. سوراخ‌هایی به قطر ۲۵ میلی‌متر در مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه برای عبور آرمتورهای طولی تیر ایجاد شده است. همچنین هیچ قطعه تقویت‌کننده‌ای در جان یا بال برای تقویت مقاطع فولادی به کار رفته، استفاده نشده است.

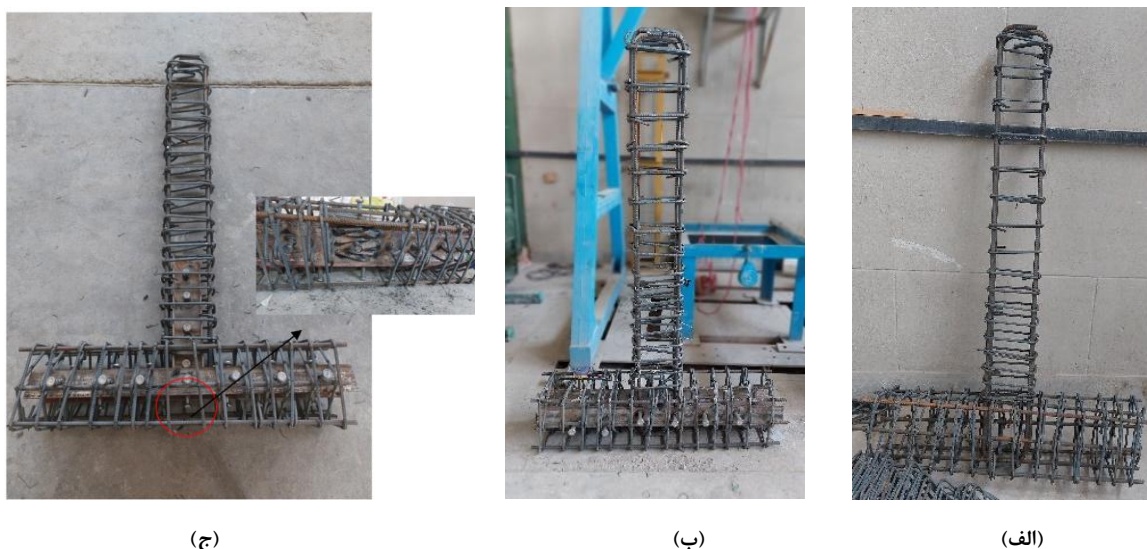
نحوه مهار آرمتورهای طولی تیر براساس استاندارد ACI318-19، به صورت قلاب ۹۰ درجه به طول ۱۱ برابر قطر آرمتور است. در تمامی نمونه‌ها، شامل RCC-RCB، SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Welded، نحوه مهار آرمتور به صورت قلاب بوده که در داخل ستون مهار شده است. در نمونه SRCC-RCB-TP-Welde، پس از تأمین طول مهاری مطابق با استاندارد، قلاب ۹۰ درجه آرمتورها در پشت جان مقطع فولادی ستون بتن آرمه جوش داده شده است. ظرفیت برشی طراحی شده برای تیر و ستون‌ها برابر مجموع ظرفیت برشی بتن، آرمتورهای طولی و عرضی ستون و تیر و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه و مقطع انتقالی در تیر است. روابط ظرفیت برشی تیر و ستون در نمونه‌ها در جدول ۲ نمایش داده شده است.

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

جدول ۲: ظرفیت‌های برشی هر یک از نمونه‌ها

نمونه‌ها	ظرفیت برشی تیر (VjH-kN)			ظرفیت برشی ستون (VjV-kN)		
	V _{Steel}	V _{reinforcement}	V _{Concrete}	V _{Steel}	V _{reinforcement}	V _{Concrete}
RCC-RCB	-	۴۰۳.۷	۷۲	۴۷۵.۲	۱۰۱	۵۳۶.۵
SRCC-RCB	-	۴۰۳.۷	۷۲	۴۷۵.۲	۱۰۱	۵۳۶.۵
SRCC-RCB-TP-Welded	۲۱۱.۱	۴۰۳.۷	۷۲	۶۸۶.۸	۱۰۱	۵۳۶.۵

جزئیات ساخت هر یک از نمونه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. برای انتقال برش بین بتن و فولاد در نمونه‌هایی که دارای مقاطع فولادی محاط در بتن آرمه می‌باشند، از گل‌میخ‌های برشی^۱ استفاده گردیده که در شکل ۳ جزئیات آن ارائه شده است. گل‌میخ‌های برشی به ترتیب به فواصل ۱۵۰ میلی‌متر و ۱۲۵ میلی‌متر در IPE180 ستون و به ترتیب ۱۵۰ میلی‌متر و ۱۲۵ میلی‌متر در IPE120 تیر، بر روی جان و بال مقاطع فولادی نصب گردیده است.



شکل ۲: جزئیات ساخت: (الف) نمونه RCC-RCB، (ب) SRCC-RCB، (ج) SRCC-RCB-TP-Welded

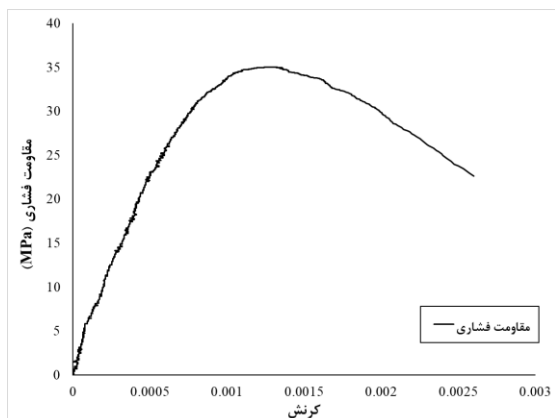


شکل ۳: جزئیات گل‌میخ‌های برشی

۲-۲ مصالح مورد استفاده

سیمان مورد استفاده برای بتن‌ریزی از نوع سیمان پرتلند تیپ II که با درشت‌دانه ماسه و شن ترکیب شده است. بتن‌ریزی هر یک از نمونه‌ها به صورت یکپارچه ریخته شده است. از هر نمونه در مرحله بتن‌ریزی، نمونه‌های استوانه‌ای 20×10 میلی‌متر گرفته و بعد از عمل‌آوری و پس از گذشت ۲۸ روز مورد آزمایش مقاومت فشاری با دستگاه Universal (شکل ۴)، براساس استاندارد ASTM-C39 [۲۵] قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد مقاومت فشاری متوسط نمونه‌های استوانه‌ای مورد آزمایش 35 MPa می‌باشد.

¹ Shear Stud



(ج)



(ب)

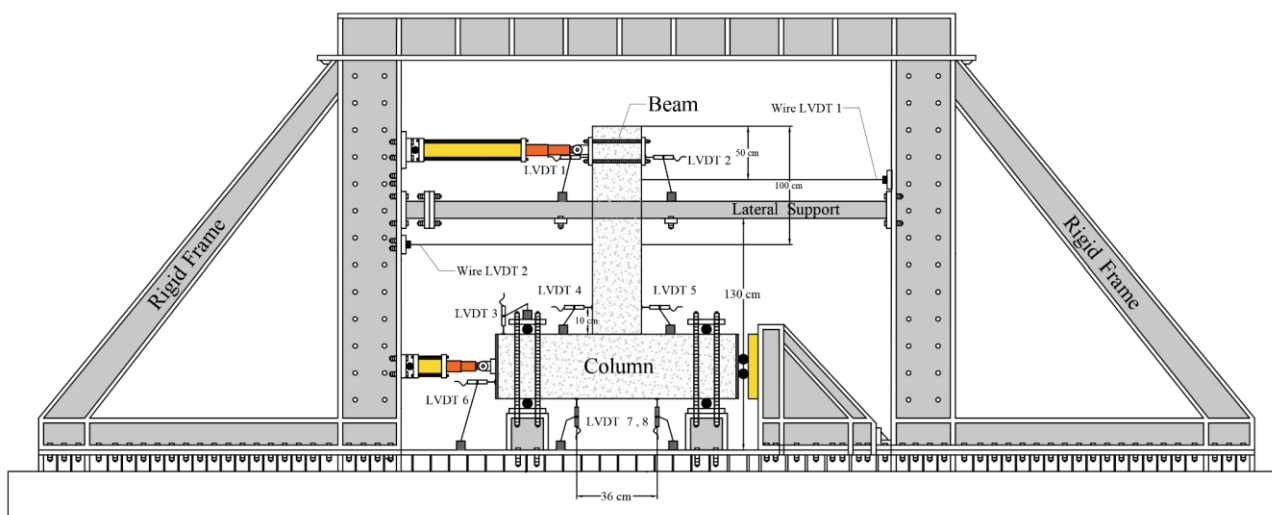


(الف)

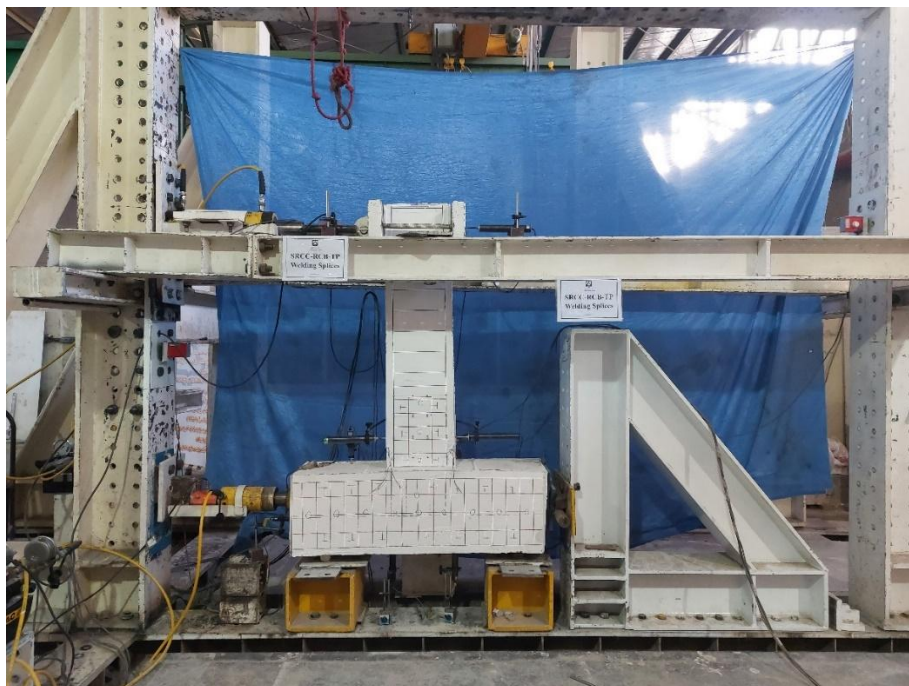
شکل ۴: آزمایش مقاومت فشاری بتن نمونه‌ها: (الف) آماده‌سازی نمونه استوانه‌ای برای آزمایش، (ب) نمونه آزمایش شده، (ج) نمودار مقاومت فشاری

۳-۲ جزئیات برنامه آزمایش

جزئیات بارگذاری و ستاپ آزمایش در شکل ۵ ارائه شده است. نیروی محوری فشاری به مقدار ثابت ۴۰۰ کیلونیوتن به مقطع ستون نمونه‌ها وارد شده است. بارگذاری جانبی رفت و برگشتی براساس پروتکل بارگذاری ACI 374 [۲۶] بر روی انتهای تیر در نقطه‌ای با فاصله ۱۲۵ میلی‌متر اعمال شده است. نمونه‌ها به صورت مفصلی و با استفاده از ورق‌های فولادی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر و با پیچ‌های قوی، به کف قوی آزمایش متصل شده است. به منظور جلوگیری از حرکت خارج از صفحه از تیرهای فولادی قوی به ارتفاع ۱۷۵۰ میلی‌متر در دو سمت نمونه، استفاده شده است.



(الف) طراحی جزئیات برپایی آزمایش



(ب) جزئیات برپایی آزمایش نمونه‌ها

شکل ۵: جزئیات بارگذاری نمونه‌ها

به منظور بررسی کرنش آرماتورهای طولی تیر در ناحیه چشمه اتصال و ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک، بر روی آرماتورهای طولی تیر چهار کرنش‌سنج^۱ به فاصله ۵۰ میلی‌متر از یکدیگر و ۵۰ میلی‌متر از لبه اتصال تیر به ستون نصب گردیده است. طبق مشخصات کرنش‌سنج‌ها، مقاومت هر یک در حدود 0.3 ± 120 اهم می‌باشد. طی مراحل جابه‌جایی، قالب‌بندی، بتن‌ریزی، پس از بتن‌ریزی، بعد از عمل‌آوری و در هنگام تست نیز، مقاومت آن‌ها توسط اهم‌سنج بررسی شده و در تمامی مراحل مقاومتی در حدود ۱۲۰ اهم داشته‌اند (شکل ۶).



(د)



(ج)



(ب)



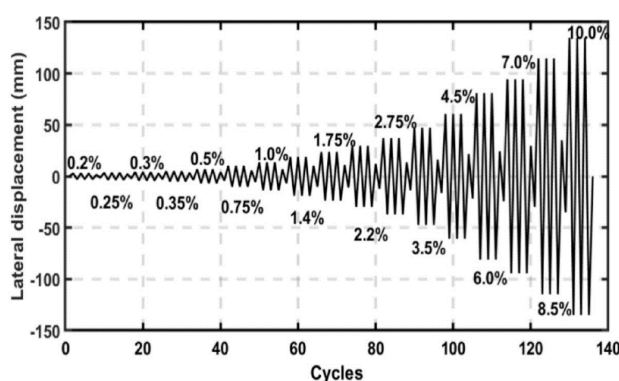
(الف)

شکل ۶: جزئیات نصب کرنش‌سنج‌ها: (الف) کرنش‌سنج، (ب) محل نصب کرنش‌سنج بر روی آرماتور، (ج) مقاومت کرنش‌سنج قبل از بتن‌ریزی، (د) مقاومت کرنش‌سنج بعد از بتن‌ریزی

به منظور بررسی و اندازه‌گیری جابه‌جایی نقاط و ناحیه‌های مختلف هر یک از نمونه‌ها، از جابه‌جایی‌سنج (LVDT) استفاده گردیده که جزئیات قرارگیری LVDTها در شکل ۵ ارائه شده است. از چهار LVDT به منظور بررسی جابه‌جایی تیر تحت بارگذاری استفاده شده و دو LVDT در ناحیه اتصال قرار گرفته تا در صورت جابه‌جایی در ناحیه اتصال، ثبت کند. همچنین دو LVDT برای ثبت بلندشدگی احتمالی،

^۱ Strain Gauge

دو LVDT به منظور ثبت خروج از صفحه‌ای احتمالی، دو LVDT برای ثبت جابه‌جایی و تغییر شکل در ناحیه چشمه اتصال قرار گرفته است. بار محوری (نیروی فشاری) ثابت در طول بارگذاری به ستون به مقدار ۴۰۰ کیلو نیوتن اعمال گردیده و بارگذاری جانبی بر روی انتهای تیر، به فاصله ۱۲۵ میلی‌متر از لبه انتهایی آن، اعمال شده است. بارگذاری جانبی براساس پروتکل بارگذاری استاندارد ACI374-1-05 [۲۶] می‌باشد. بارگذاری جانبی تا زمانی که یا ظرفیت باربری جانبی نمونه ۱۵٪ کاهش یابد و یا آرماتورهای طولی تیر گسیخته شوند، ادامه می‌یابد. مشخصات جک هیدرولیک مورد استفاده برای اعمال بارگذاری جانبی چرخه‌ای، به ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن که برای اندازه‌گیری بار از یک LoadCell (بارسنج) به ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن استفاده گردیده است. همچنین جک هیدرولیکی مورد استفاده برای بار محوری ثابت و LoadCell آن، هر یک به ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد. پروتکل بارگذاری در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷: پروتکل بارگذاری [۲۶]

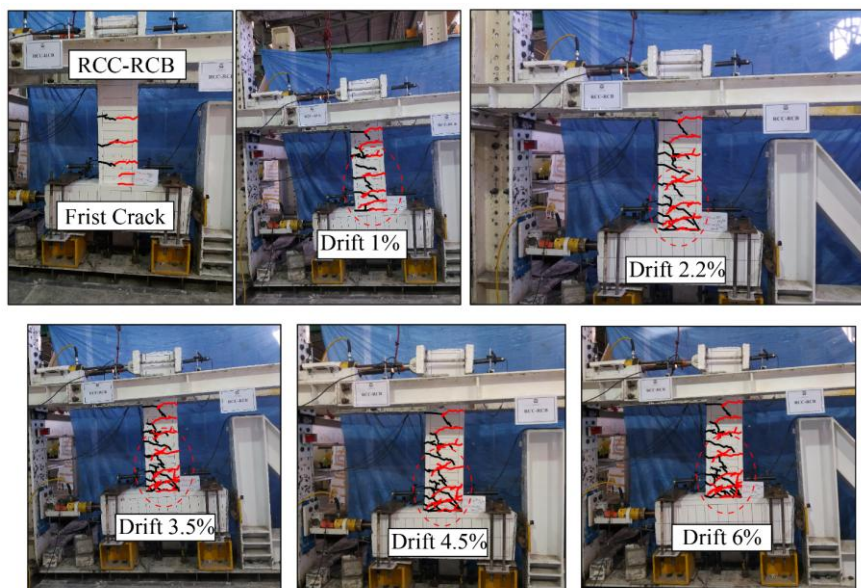
۳- نتایج آزمایش

در این بخش نتایج حاصل از بارگذاری نمونه‌ها ارائه می‌گردد. از جمله پارامترهای ترک خوردگی، محل تشکیل مفصل پلاستیک و شکست نمونه، تاثیر استفاده از قطعه انتقالی بر عملکرد، نمودار هیستریزس، نمودار پوش، مقایسه سختی، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی در هر نمونه، مورد بررسی قرار گرفته است.

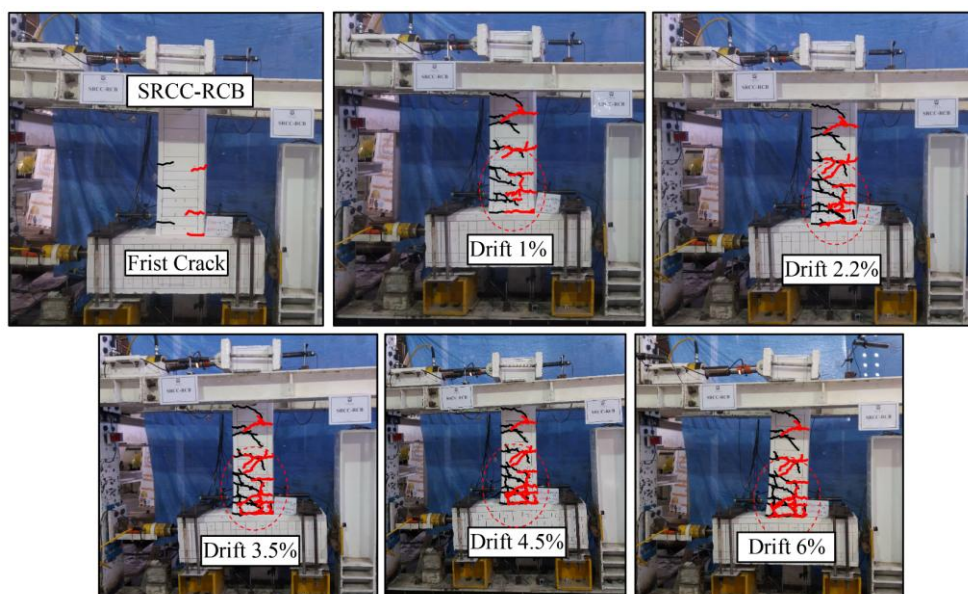
۳-۱- ترک خوردگی و نحوه شکست

در شکل ۸، نحوه ترک خوردگی و گسترش ترک‌ها و در شکل ۹ شکست نمونه‌ها نشان داده شده است. در نمونه با تیر و ستون بتن آرمه (RCC-RCB)، ترک‌ها در فاصله ۱۰۰ میلی‌متری از ناحیه اتصال تیر به ستون شکل گرفته‌اند، در حالی که در ناحیه چشمه اتصال و ستون RC، ترک یا خرابی قابل توجهی مشاهده نشده است. این امر نشان‌دهنده عملکرد مطابق با اصل تیر ضعیف-ستون قوی و تیر ضعیف-اتصال قوی در این نمونه است. اولین ترک‌های خمشی در جابه‌جایی^۱ ۰.۲٪ و در بارهای ۲۰.۹ kN و ۱۳ kN، به ترتیب در کشش و فشار بر روی تیر ظاهر شده‌اند. در ابتدا ترک خوردگی در پوشش بتن آغاز شده و با افزایش جابه‌جایی به ۱٪، عمق و تعداد ترک‌های خمشی در تیر افزایش یافته و خرابی در گوشه‌های اتصال تیر به ستون مشهود شده است (شکل ۸-الف). با ادامه بارگذاری، ترک‌ها گسترش یافته و آرماتورهای طولی تیر در جابه‌جایی ۲.۲٪ تسلیم شده و در جابه‌جایی ۴.۵٪ گسیختگی شده است. همچنین، کماتش آرماتورهای طولی تیر در جابه‌جایی ۲.۷۵٪ رخ داده است (شکل ۹-الف).

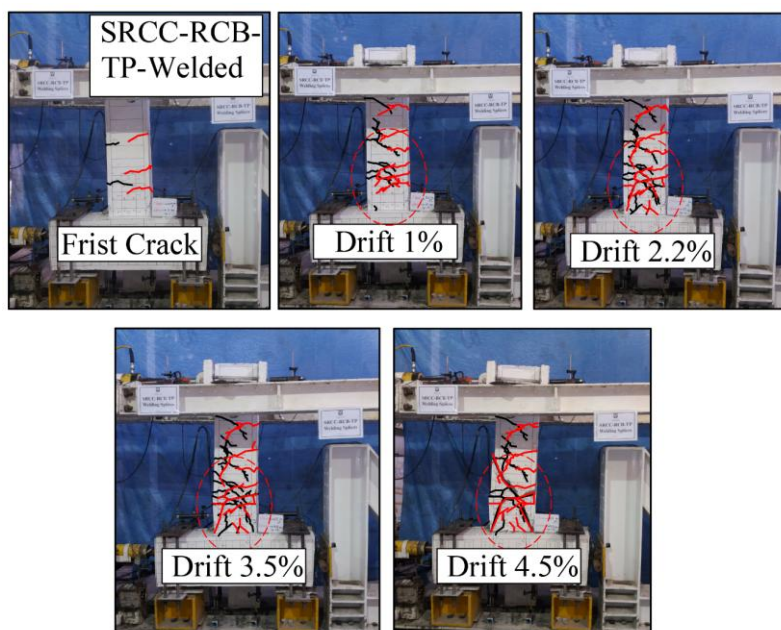
¹ Drift



(الف) نمونه تیر بتن آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه (RCC-RCB)



(ب) نمونه تیر بتن آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه (SRCC-RCB)

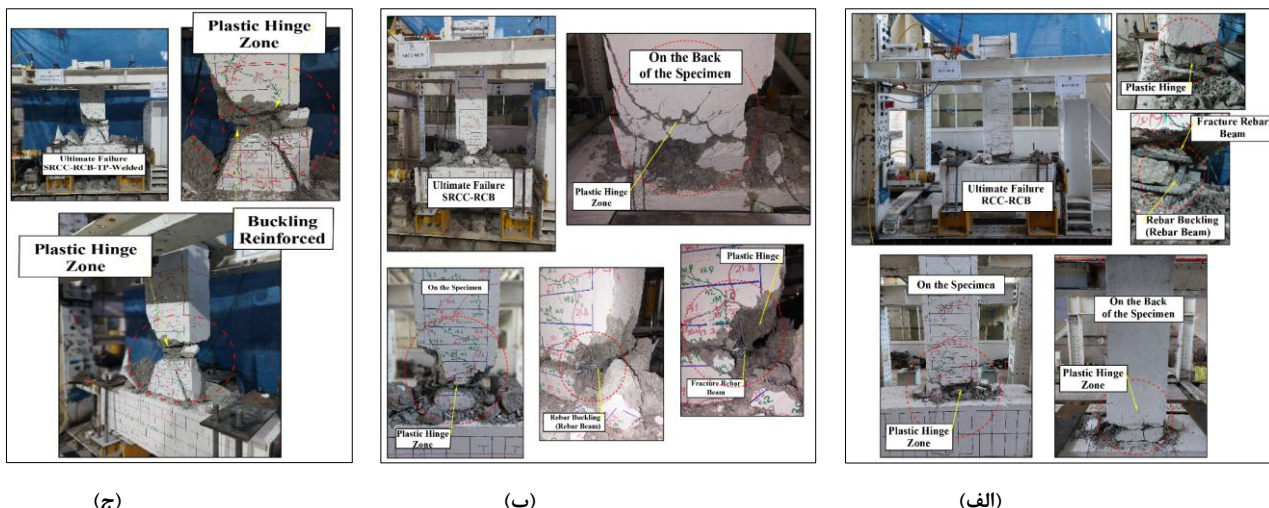


(ج) نمونه تیر بتن آرمه با قطعه انتقالی، مهار آرماتور با اتصال جوشی و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه (SRCC-RCB-TP-Welded)

شکل ۸: الگوی ترک خوردگی هر یک از نمونه‌های آزمایشگاهی

در نمونه با تیر بتن آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه (SRCC-RCB)، ترک‌ها در فاصله ۱۵۰ میلی‌متری از ناحیه اتصال تیر به ستون شکل گرفته و در ناحیه چشمه اتصال و ستون SRC هیچگونه خرابی یا ترک مشاهده نمی‌کنند. در جابه‌جایی ۰.۲٪ در بارهای ۱۳ و ۱۶.۵ kN به ترتیب در کشش و فشار بر روی تیر بتن آرمه با دریافت معادل ۱٪ عمق و تعداد ترک‌های خمشی در تیر افزایش یافته و خرابی در گوشه‌های اتصال تیر در ادامه مشاهده شد روند بارگذاری، ترک‌ها توسعه یافته و آرماتورهای طولی تیر در جابه‌جایی معادل ۲.۲٪ تسلیم شده است (شکل ۸-ب). سپس در جابه‌جایی‌های ۲.۷۵٪ و ۳.۵٪ کمانش آرماتورهای تیر مشاهده شد (شکل ۹-ب) و در جابه‌جایی معادل ۶٪ آرماتورهای برشی و در ۷٪ آرماتورهای طولی تیر گسیخته شده است.

نمونه تیر بتن آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه (SRCC-RCB) به همراه قطعه انتقالی (TP) و مهار آرماتورهای طولی تیر به روش قلاب ۹۰ درجه (SRCC-RCB-TP-Welded) و پس از تامین طول مهاری در پشت جان مقطع فولادی ستون بتن آرمه جوش شده است. در این نمونه عمده ترک‌ها در فاصله ۲۰۰ میلی‌متری از ناحیه اتصال تیر به ستون ایجاد شده و در ناحیه چشمه اتصال و ستون SRC خرابی و ترکی مشاهده نشده است. اولین ترک‌های خمشی در جابه‌جایی ۰.۲٪ در بارهای ۲۳ kN و ۱۸.۹ kN به ترتیب در کشش و فشار مشاهده شده است. در جابه‌جایی، ۱٪ عمق و تعداد ترک‌های خمشی در تیر نمونه SRCC-RCB-TP-Welded افزایش یافته است (شکل ۸-ج). آرماتورهای طولی تیر در جابه‌جایی، ۲.۲٪ تسلیم شده و در جابه‌جایی، ۳.۵٪ آرماتورهای تیر کمانش کرده است. همچنین با توجه به شرایط ادامه روند بارگذاری تا زمانی که آرماتور گسیخته شود و یا ظرفیت باربری به ۸۵٪ ظرفیت باربری نهایی برسد، بارگذاری تا جابه‌جایی ۴.۵٪ ادامه داشته است (شکل ۹-ج).



(ج)

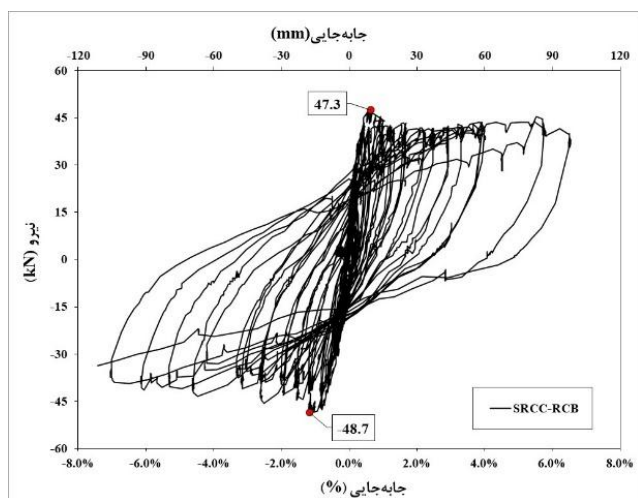
(ب)

(الف)

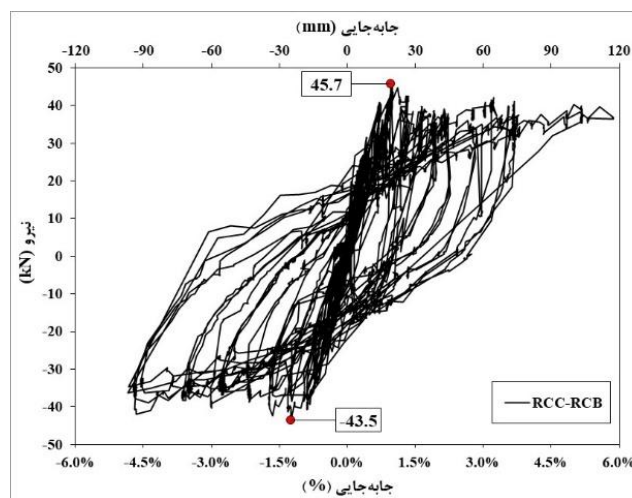
شکل ۹: شکست هر یک از نمونه‌های آزمایشگاهی؛ (الف) نمونه تیر بتن آرمه و ستون بتن آرمه (RCC-RCB)، (ب) نمونه تیر بتن آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه (SRCC-RCB)، (ج) نمونه تیر بتن آرمه با قطعه انتقالی، مهار آرماتور با اتصال جوشی و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه (SRCC-RCB-Welded)

۳-۲- نمودار هیستریزس نمونه‌های مورد آزمایش

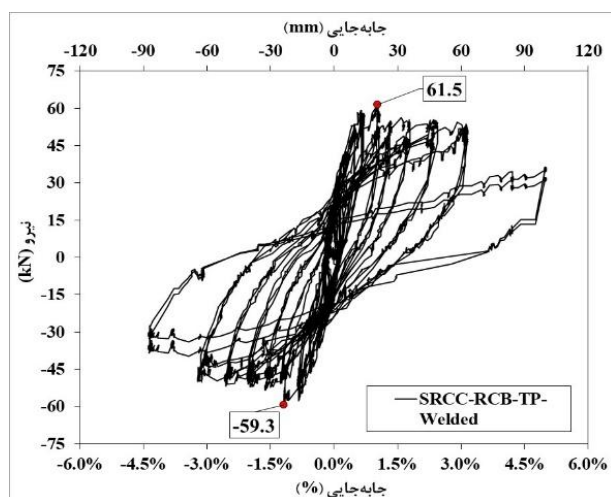
یکی از مهم‌ترین موارد برای بررسی عملکرد لرزه‌ای نمودار هیستریزس نمونه می‌باشد. در شکل ۱۰ نمودار هیستریزس هر یک از نمونه به همراه نمودار پوش آن‌ها، ارائه شده است. بر روی نمودار هیستریزس، نقاط با بیشترین نیرو مشخص شده است. با توجه به نمودار هیستریزس نمونه‌ها، مشاهده می‌شود که عملکرد تمامی نمونه‌ها خمشی می‌باشد و عملکرد برشی، ترک و یا شکست ناگهانی در ناحیه چشمه اتصال یا ستون مشاهده نشده است. با توجه به نمودار هیستریزس نمونه RCC-RCB کمترین ظرفیت باربری نسبت به دیگر نمونه‌ها مشاهده شده است. همچنین استفاده از قطعه انتقالی در ناحیه تیر سبب افزایش ظرفیت باربری، جذب انرژی (اتلاف انرژی)، سختی و شکل پذیری شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد استفاده از اتصال جوشی برای آرماتورهای طولی تیر، می‌تواند سبب بهبود عملکرد و افزایش ظرفیت باربری اتصال شود. در شکل ۱۱ نمودارهای پوش نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه و ارائه شده است.



(ب) نمونه تیر بتن آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه (SRCC-RCB)

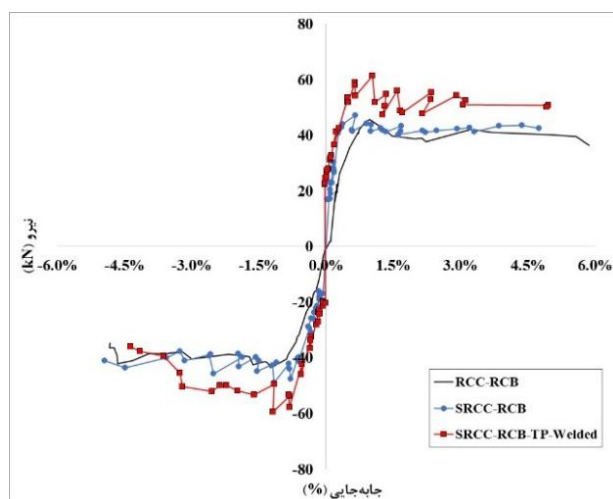


(الف) نمونه تیر و ستون بتن آرمه (RCC-RCB)



(ج) نمونه تیر بتن آرمه با مقطع انتقالی، مهار آرماتور به روش اتصال جوشی و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه (SRCC-RCB-TP-Welded)

شکل ۱۰: نمودار هیستریزیس نمونه‌های مورد آزمایش



شکل ۱۱: نمودار پوش نمونه‌های مورد آزمایش

با استفاده از نتایج به دست آمده از نمودار هیستریزیس و پوش نمونه‌های مورد آزمایش، می‌توان حداکثر ظرفیت باربری نمونه را مشخص نمود. در جدول ۳ نتایج به دست آمده ارائه شده است.

جدول ۳: ظرفیت باربری نمونه‌ها

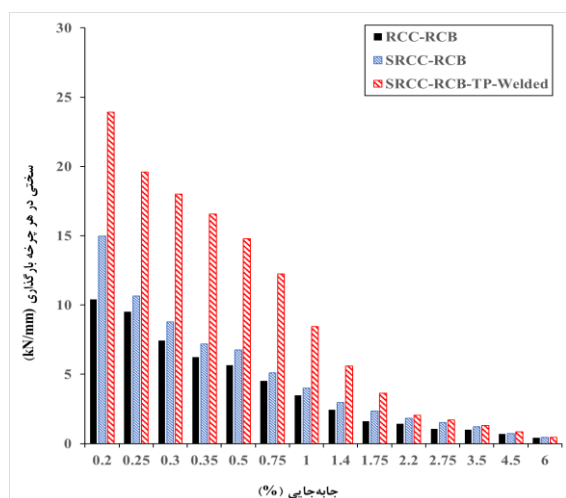
نمونه‌ها	حداکثر ظرفیت کششی (kN)	حداکثر ظرفیت فشاری (kN)	میانگین ظرفیت باربری (kN)	میزان افزایش نسبت به نمونه RCC-RCB
RCC-RCB	-۴۳.۵	۴۵.۷	۴۴.۶	-
SRCC-RCB	۴۷.۳	-۴۸.۷	۴۸	٪۸
SRCC-RCB-TP-Welded	۶۱.۵	-۵۹.۳	۶۰.۴	٪۳۵

۳-۳ - سختی، میرایی معادل، اتلاف انرژی و شکل پذیری

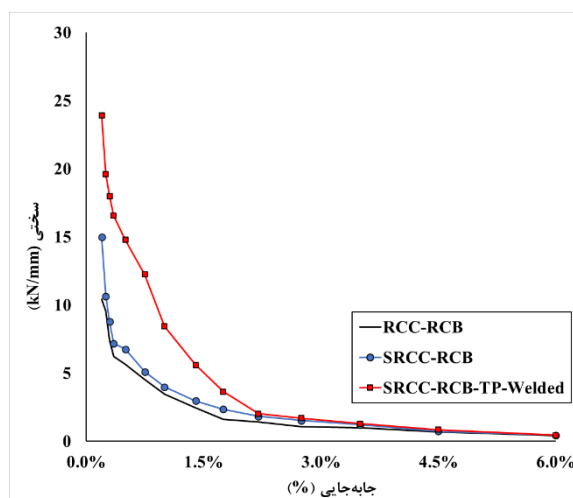
برای محاسبه سختی از رابطه ۳ استفاده می‌شود [۲۷]. سختی با توجه به نیرو و جابه‌جایی برای هر چرخه به دست می‌آید. نمودار مقایسه سختی و کاهش سختی نمونه‌ها تا جابه‌جایی ۶٪ در شکل ۱۲ ارائه شده است.

$$K_e = \frac{\sum_{i=1}^n F_i^j}{\sum_{i=1}^n \Delta_i^j} = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (3)$$

که در آن؛ $+F_i$ و $-F_i$ به ترتیب بیشترین نیروی کششی و فشاری جانبی در هر چرخه و $+\Delta_i$ و $-\Delta_i$ جابه‌جایی کششی و فشاری متناظر با بیشترین نیروی جانبی در هر چرخه می‌باشد. سختی چرخه‌ای در هر نمونه تحت بارگذاری جانبی برابر است با شیب خط در هر چرخه بارگذاری، که بیشترین نیروی کششی را به بیشترین نیروی فشاری متصل می‌سازد. با توجه به نتایج به دست آمده از سختی نمونه‌ها، مشاهده می‌شود که سختی در هر یک از نمونه‌ها با افزایش روند بارگذاری، به طور پیوسته کاهش یافته است. سختی اولیه نمونه SRCC-RCC RCB-TP-Welded نسبت به نمونه SRCC-RCB، ۶۰٪ و نمونه SRCC-RCB نسبت به RCC-RCB، ۴۴٪ افزایش یافته است. سختی اولیه در نمونه‌های فولادی محاط در ستون بتن آرمه با قطعه انتقالی در تیر بیشتر از دو نمونه RCC-RCB و SRCC-RCB بوده است. همچنین، سرعت کاهش سختی در نمونه‌های SRCC-RCB و RCC-RCB نسبت به نمونه SRCC-RCB-TP-Welded کمتر می‌باشد.



(ب) کاهش سختی در هر چرخه



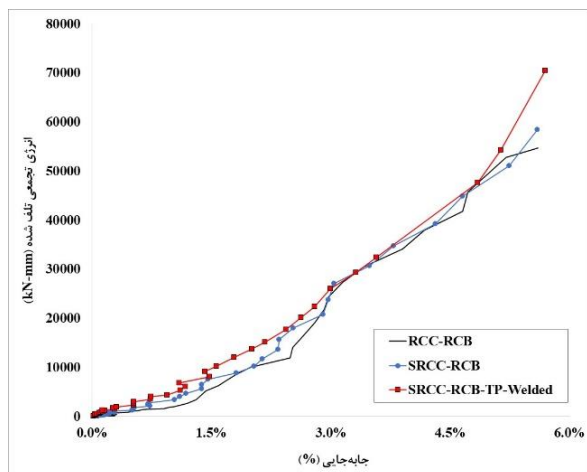
(الف) کاهش سختی چرخه‌ای نمونه‌ها

شکل ۱۲: سختی نمونه‌های مورد آزمایش

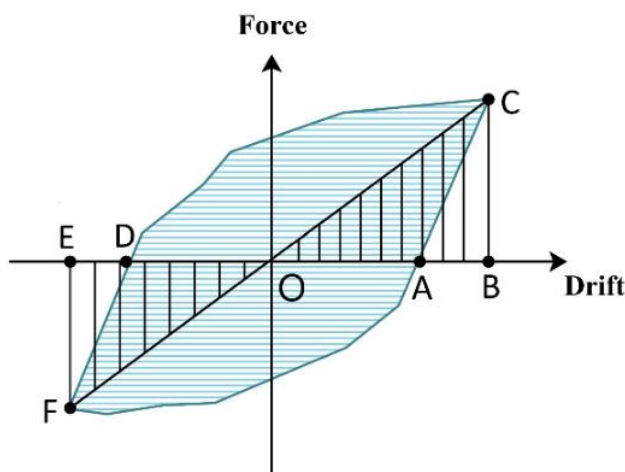
یکی از نتایج کلیدی به دست آمده از نمودار هیستریزیس، بررسی میزان اتلاف انرژی در طول بارگذاری و باربرداری است. این مقدار از طریق محاسبه مساحت محصور بین منحنی‌های بارگذاری و باربرداری محاسبه می‌شود و نشان‌دهنده انرژی مصرف شده در یک چرخه بارگذاری است. با افزایش روند بارگذاری، کاهش مقاومت و سختی نمونه در نمودار هیستریزیس به وضوح مشاهده می‌شود. این کاهش به صورت کاهش شیب منحنی در چرخه‌های بالاتر نمودار نمایان می‌گردد. هرچه سطح محصور زیر منحنی هیستریزیس کمتر باشد، میزان اتلاف انرژی در نمونه نیز کاهش می‌یابد. اتلاف انرژی یکی از پارامترهای کلیدی برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای اعضای سازه‌ای محسوب می‌شود. انرژی تلف شده در هر چرخه از رابطه ۴ به دست می‌آید که در شکل ۱۳-الف نشان داده شده است. همچنین انرژی تلف شده تجمعی در شکل ۱۳-ب ارائه شده است.

$$E_{Dissipation} = \frac{S_{DCA} + S_{AFD}}{S_{OCB} + S_{OFE}} \quad (4)$$

که در آن؛ S_{AFD} و S_{DCA} سطح محصور DCA و AFD و S_{OFE} و S_{OCB} سطح محصور OFE و OCB می‌باشد.



شکل ۱۳ (ب) انرژی تلف شده تجمعی نمونه‌ها



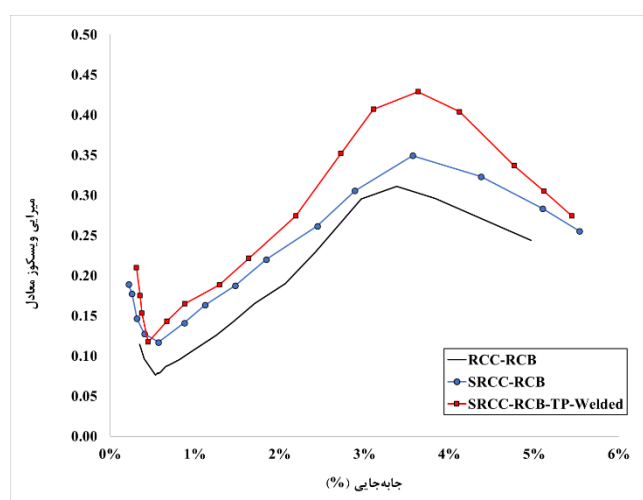
شکل ۱۳ (الف) سطح محصور هر چرخه از نمودار هیستریزس

شکل ۱۳: انرژی تلف شده نمونه‌های مورد آزمایش

میرایی ویسکوز معادل یکی از پارامترهای مهم در تحلیل رفتار دینامیکی سازه‌ها است که نشان می‌دهد در هر چرخه بارگذاری، چه میزان انرژی توسط سازه جذب و تلف شده است. با توجه به نتایج هیستریزس به دست آمده، می‌توان میرایی ویسکوز معادل را محاسبه نمود (شکل ۱۴) که معادله آن در رابطه ۵ ارائه شده است.

$$Equivalent\ Viscous\ Damping = \frac{E_D}{2\pi} \quad (5)$$

در این معادله E_D برابر با سطح زیر منحنی هر یک از چرخه‌های منحنی هیستریزس می‌باشد.



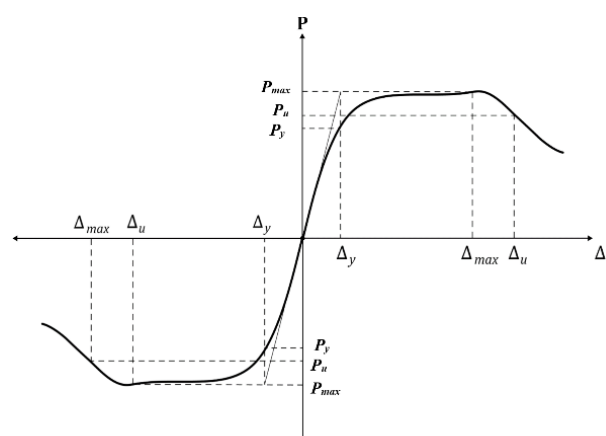
شکل ۱۴: میرایی ویسکوز معادل نمونه‌های مورد آزمایش

شکل‌پذیری یکی از ویژگی‌های کلیدی در ارزیابی رفتار سازه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای است. سازه‌های شکل‌پذیر توانایی جذب و اتلاف انرژی را دارند و می‌توانند تغییرات قابل توجهی را بدون آسیب تحمل کنند. ارزیابی میزان شکل‌پذیری در چنین شرایطی به‌طور معمول

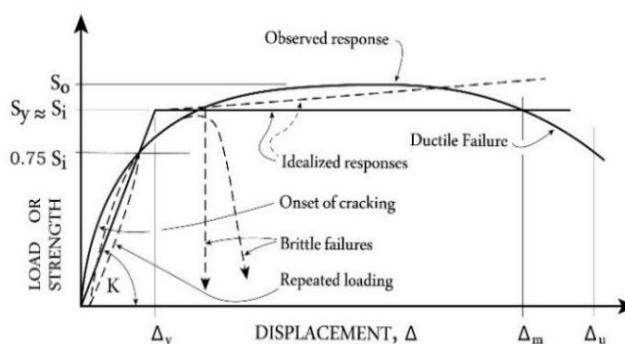
از طریق بررسی قابلیت نمونه‌ها در تحمل بارهای چرخه‌ای متعدد بدون وقوع خرابی‌های عمده انجام می‌شود. این پارامتر به‌طور مستقیم بر عملکرد لرزه‌ای و دوام سازه تأثیرگذار است. شکل‌پذیری جانبی به عنوان نسبت جابه‌جایی نهایی به جابه‌جایی در نقطه تسلیم نمونه تعریف می‌شود (معادله ۶). با توجه به تعریف شکل‌پذیری جانبی، جابه‌جایی نهایی، جابه‌جایی متناظر با نیروی ۸۵ درصد نیروی تسلیم در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱۵-ب) [۲۸].

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (۶)$$

در این پژوهش برای محاسبه شکل‌پذیری جانبی از روش پائولی [۲۹] استفاده شده است (شکل ۱۵-الف). در روش پائولی برای محاسبه شکل‌پذیری از روی نمودار هیستریزس، لازم است که مساحت زیر منحنی‌های بارگذاری و باربرداری برابر باشند تا محاسبه شکل‌پذیری به‌طور صحیح انجام شود. نتایج شکل‌پذیری نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود در صورت استفاده مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه و مقطع انتقالی در ناحیه اتصال تیر به ستون شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. شکل‌پذیری نمونه SRCC-RCB-TP-Welded نسبت به نمونه SRCC-RCB، ۵٪ و نمونه SRCC-RCB نسبت به نمونه RCC-RCB، ۸٪ افزایش یافته است. همچنین، اثر همزمان مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه، مقطع انتقالی در ناحیه اتصال تیر به ستون و نحوه مهار آرماتورهای طولی تیر به روش جوش، باعث افزایش ۱۳٪ شکل‌پذیری در نمونه SRCC-RCB-TP-Welded نسبت به نمونه RCC-RCB شده است.



(ب) منحنی پوش



(الف) منحنی نیرو-جابه‌جایی المان بتن‌آرمه [۲۹]

شکل ۱۵: شکل‌پذیری نمونه‌ها

جدول ۴: نتایج شکل‌پذیری نمونه‌ها

μ_{avg}	μ (-)	Δ_u (فشار-mm)	Δ_y (فشار-mm)	μ (+)	Δ_u (کشش-mm)	Δ_y (کشش-mm)	نمونه‌ها
۶.۹۱	۵.۱۸	-۷۲.۶	-۱۴	۸.۶۳	۸۸	۱۰.۲	RCC-RCB
۷.۴۵	۷.۵۴	-۹۰.۸	-۱۲.۰۴	۳.۶۸	۳۴.۶۳	۹.۴	SRCC-RCB
۷.۸۱	۷.۷۵	-۵۵	-۷.۱	۷.۸۸	۵۳.۶	۶.۸	SRCC-RCB-TP-Welded

۴- نتیجه گیری

این مقاله بررسی آزمایشگاهی اثر مهار آرماتورهای طولی تیر بتن آرمه در اتصال تیر بتن آرمه به مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه و تاثیر قطعه انتقالی فولادی در ناحیه اتصال تیر، پرداخته است. سه نمونه آزمایشگاهی ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌ای جانبی قرار گرفته است. پارامترهای مورد نظر به منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای مهار آرماتورهای طولی تیر در اتصال پیشنهادی، ظرفیت باربری، سختی، میرایی معادل و ضریب شکل‌پذیری نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد. نتایج اصلی این مطالعه به طور خلاصه به شرح زیر می‌باشد:

- استفاده از مقطع فولادی I شکل محاط در ستون بتن آرمه موجب افزایش ظرفیت باربری نمونه می‌شود. همچنین، با استفاده از قطعه انتقالی (قطعه فولادی) در ناحیه اتصال تیر بتن آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه، در شرایط بارگذاری مشابه، ظرفیت باربری، سختی، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی در هر چرخه هیستریزس بهبود می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد نمونه SRCC-RCC-TP-Welded عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به دو نمونه RCC-RCB و SRCC-RCB داشته و ظرفیت باربری، سختی، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی بیشتری داشته است.
- در نمونه RCC-RCB، ترک‌ها و آسیب‌ها در ناحیه نزدیک به ناحیه اتصال ایجاد شده و در سطح تیر گسترش نیافته‌اند. در نمونه SRCC-RCB، ناحیه خرابی و آسیب در طول ۱۵۰ میلی‌متر از ناحیه اتصال به وجود آمده و به دلیل جذب انرژی بیشتر نسبت به نمونه RCC-RCB، ترک‌ها در طول تیر گسترش یافته‌اند. در نمونه‌های SRCC-RCB-TP-Welded، طول ناحیه خرابی و آسیب به حدود ۲۰۰ میلی‌متر از ناحیه اتصال می‌رسد. همچنین ترک‌ها، در نمونه‌های SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Welded، به طور کامل در تمام طول تیر گسترش یافته‌اند و در ناحیه اتصال آسیب یا خرابی مشاهده نشده است.
- ظرفیت باربری نمونه SRCC-RCB-TP-Welded در مقایسه با نمونه‌های RCC-RCB (تیر و ستون بتن آرمه) و SRCC-RCB (تیر بتن آرمه و ستون SRC) به ترتیب ۳۵٪ و ۲۶٪ افزایش یافته است. این افزایش ناشی از تأثیر مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه و استفاده از قطعه انتقالی در ناحیه اتصال بوده، که منجر به بهبود توزیع تنش و افزایش جذب انرژی نمونه شده است. همچنین ظرفیت باربری نمونه SRCC-RCB نسبت به نمونه RCC-RCB، ۸٪ افزایش یافته است.
- نتایج نشان می‌دهد که سختی نمونه‌های SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Welded در مقایسه با نمونه بدون مقطع فولادی (RCC-RCB) به طور چشمگیری افزایش یافته است. این افزایش سختی موجب بهبود رفتار لرزه‌ای اتصال و کاهش آسیب در نواحی بحرانی می‌شود. نمونه SRCC-RCB-TP-Welded، به دلیل افزایش ظرفیت باربری و جذب انرژی، نسبت به دو نمونه دیگر، افزایش قابل توجهی در سختی از خود نشان داده است.
- سختی اولیه نمونه SRR-CRB-TP-Welded در مقایسه با نمونه SRCC-RCB به میزان ۶۰٪ افزایش یافته است که نشان دهنده اثر قطعه انتقالی و نحوه مهار آرماتور در عملکرد اتصال پیشنهادی است. همچنین نتایج نشان می‌دهد سختی اولیه نمونه SRCC-RCB نسبت به نمونه RCC-RCB، ۴۴٪ افزایش یافته است. استفاده از مقطع انتقالی (قطعه فولادی) در ناحیه اتصال تیر به ستون و استفاده از مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه می‌تواند سختی را نسبت به نمونه اتصال تیر و ستون بتن آرمه به میزان قابل توجهی افزایش دهد. علاوه بر بررسی سختی اولیه، روند تغییرات سختی در طول چرخه‌های بارگذاری نیز مورد بررسی قرار گرفت. نشان داد که با افزایش تعداد چرخه‌ها، سختی مؤثر در همه نمونه‌ها به تدریج کاهش می‌یابد که این امر ناشی از ایجاد ترک و کاهش ظرفیت باربری موضعی در اثر آسیب‌های تجمعی می‌باشد. در مقایسه نتایج نمونه‌ها، نمونه SRCC-RCB-TP-Welded با وجود کاهش سختی در چرخه‌های پایانی، همچنان سختی بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد، که نشان‌دهنده عملکرد بهتر آن در برابر کاهش تدریجی سختی و افزایش چرخه‌های بارگذاری است.
- استفاده از مقطع فولادی در تیر و ستون بتن آرمه، موجب افزایش قابل توجه در جذب انرژی و سختی نمونه‌ها می‌شود. استفاده

از مقطع فولادی به ویژه در ناحیه اتصال و ستون تأثیرات مثبتی بر عملکرد سازه در برابر بارگذاری‌های لرزه‌ای دارد. نتایج نشان می‌دهد که جذب انرژی نمونه SRCC-RCB-TP-Welded نسبت به نمونه‌های RCC-RCB و SRCC-RCB به ترتیب ۲۹٪ و ۲۱٪ افزایش یافته است. همچنین نمونه SRCC-RCB نسبت به نمونه RCC-RCB، ۷٪ افزایش یافته است. علاوه بر این با توجه به افزایش جذب انرژی در نمونه SRCC-RCB-TP-Welded، میرایی و اسکوز معادل در این نمونه با توجه به استفاده از مقطع فولادی (TP) در ناحیه اتصال تیر بتن آرمه به ستون SRC، نسبت به نمونه SRCC-RCB، ۲۳٪ افزایش یافته و نمونه SRCC-RCB نسبت به نمونه RCC-RCB، ۱۲٪ افزایش یافته است. این نتایج حاکی از نقش مؤثر مقطع فولادی (TP) در بهبود رفتار لرزه‌ای ناحیه اتصال تیر بتن آرمه به ستون SRC می‌باشد.

- نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد شکل‌پذیری نمونه SRCC-RCB-TP-Welded نسبت به نمونه SRCC-RCB، ۵٪ و نمونه SRCC-RCB نسبت به نمونه RCC-RCB، ۸٪ افزایش یافته است. علاوه بر این، شکل‌پذیری نمونه SRCC-RCB-TP-Welded نسبت به نمونه RCC-RCB، ۱۳٪ افزایش یافته که نشان‌دهنده تأثیر مثبت قطعه انتقالی در ناحیه اتصال تیر به ستون، مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه و نحوه مهار آرماتورهای طولی تیر به روش جوشی در اتصال پیشنهادی است. افزایش شکل‌پذیری را می‌توان ناشی از استفاده همزمان از قطعه انتقالی و مهار مناسب آرماتور دانست، که باعث کاهش تمرکز تنش و توزیع یکنواخت‌تر کرنش در اتصال شده است.

سپاسگزاری

این طرح تحقیقاتی با استفاده از اعتبار ویژه پژوهشی دانشگاه سمنان با شماره طرح ۱۴۰۳۹۹۳ انجام شده است.

مراجع

- [1] XUE Yicong YU Yunlong, YY. (2020). *Theoretical Model on Shear Strength of Steel Reinforced Concrete Short Columns*. Journal of Building Structures 41:162–70. <https://doi.org/10.14006/j.zjzjgxb.2020.S1.018>.
- [2] Xu Z-H, Bai G-L, Zhao J-Q. (2021). Experimental and numerical investigation on seismic performance of SRC variable-column exterior joints in CAP1400 NPP. Structures, vol. 29, Elsevier; , p. 663–83.
- [3] Xu Z-H, Zhao J-Q, Bai G-L, Du N-J. (2025). *Study on Seismic Performance of SRC Frame-Bent Structures in CAP1400 Nuclear Power Plants*. Nuclear Engineering and Technology 57:103121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.net.2024.07.052>.
- [4] Feili A, Dashtipour M, Mousavi SH. (2021). *Expansion of DEMATEL Technique to Identify and Prioritize the Effective Factors on Knowledge Sharing*. Industrial Engineering and Strategic Management 1:43–58.
- [5] Wardhana K, Hadipriono FC. (2003). *Study of Recent Building Failures in the United States*. Journal of Performance of Constructed Facilities 17:151–8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2003\)17:3\(151\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2003)17:3(151)).
- [6] Ravasini S, Belletti B, Brunesi E, Nascimbene R, Parisi F. (2021). *Nonlinear Dynamic Response of a Precast Concrete Building to Sudden Column Removal*. Applied Sciences 11:599. <https://doi.org/10.3390/app11020599>.
- [7] Zhu X, Zhang Q, Zhang D, Du Y, Zhang Q. (2021). *Experimental and Numerical Study on the Dynamic Response of Steel-Reinforced Concrete Composite Members under Lateral Impact*. Thin-Walled Structures 169:108477.
- [8] Sharma H, Hurlbauss S, Gardoni P. (2012). *Performance-Based Response Evaluation of Reinforced Concrete Columns Subject to Vehicle Impact*. International Journal of Impact Engineering 43:52–62. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.11.007>.
- [9] Pham TM, Hao H. (2017). *Effect of the Plastic Hinge and Boundary Conditions on the Impact Behavior of Reinforced Concrete Beams*. International Journal of Impact Engineering 102:74–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.12.005>.

- [10] Zhou L, Yi-sheng S. (2019). *Experimental Study on Seismic Behavior of SRC Deep Beam-to-CFST Column Frames*. Journal of Constructional Steel Research 155:157–75. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.12.014>.
- [11] Zhou C, Xue J, Hu Z, Liu Z. (2020). *Coupled Translational-Torsional Response for SRC Frame with Special-Shaped Columns under Earthquake*. Journal of Building Engineering 31:101440. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101440>.
- [12] Xu C, Liu X, Zha X, Peng S. (2020). *Experimental Research on Seismic Damage of a Full-Web SRC Frame Structure*. Journal of Building Engineering 27:100959. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100959>.
- [13] Zhu Y, Xing Z, Guo Y, Wang Z, Zheng L, Chen Y. (2025). *Corrosion-Compression Failure Analysis of Circular SRC Short Columns under Chloride Environment*. Engineering Failure Analysis 169:109164. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109164>.
- [14] Wu C, Liu J, Shi W. (2020). *Seismic Performance of Composite Joints between Prefabricated Steel-Reinforced Concrete Columns and Steel Beams: Experimental Study*. Bulletin of Earthquake Engineering 18:3817–41. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00842-y>.
- [15] Yang H, Yang X, Mao Z. (2022). *Compressive Performance of Steel-Reinforced Concrete Columns after Exposure to High Temperature*. Journal of Building Engineering 59:105120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105120>.
- [16] Lan X, Wang Y, Tan B, Zhang Y. (2024). *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 309:118057. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118057>.
- [17] Tavasoli E, Rezaifar O, Kheyroddin A. (2022). *Seismic Performance of RC Joints Retrofitted by External Diagonal Bolts*. Journal of Building Engineering 46:103691. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103691>.
- [18] Tavasoli E, Rezaifar O, Kheyroddin A. (2023). *Experimental Study of Shear Retrofit of RC Beam-Column Joints Using External Post-Tensioned Bolts (In Persian)*. Amirkabir Journal of Civil Engineering 55:681–700.
- [19] Derakhshesh P, Mirghaderi SR, Nouri G, Farzam M. (2023). *Behavior of New Hybrid Connection between Steel Beam and Concrete-Encased Composite Column*. Journal of Constructional Steel Research 210:108043. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108043>.
- [20] Gautham A, Sahoo DR. (2022). *Performance of SRC Column-RC Beam Joints under Combined Axial and Cyclic Lateral Loadings*. Engineering Structures 260:114218.
- [21] Rong B, Xu M, Sun J, Zhang R, Sun Y, Zhang W, et al. (2022). *Experimental and Numerical Research on Seismic Behavior and Shear Capacity of SRC Column-RC Beam Composite Joints*. Journal of Building Engineering 50:104181. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104181>.
- [22] Moharram MI, Bompa D V, Elghazouli AY. (2017). *Experimental and Numerical Assessment of Mixed RC Beam and Steel Column Systems*. Journal of Constructional Steel Research 131:51–67. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.12.019>.
- [23] Pan P, Lin X, Lam A, Chen H, Ye L. (2014). *Monotonic Loading Tests of Ring-Beam Connections for Steel Reinforced Concrete Columns and RC Beams*. Journal of Structural Engineering 140:4013092. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000911](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000911).
- [24] ACI-318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19): An ACI Standard: Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19): An ACI Report*.
- [25] Annual Book of ASTM Standards AI. (2015). ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA: .
- [26] Committee ACI. (2005). *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary*. ACI 374:1–5.
- [27] Zhang J, Pei Z, Rong X. (2022). *Experimental Seismic Study of an Innovative Precast Steel-concrete Composite Beam-column Joint*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 161:107420. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107420>.
- [28] Park R. (1989). *Evaluation of Ductility of Structures and Structural Assemblages from Laboratory Testing*. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering 22:155–66. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.22.3.155-166>.
- [29] Paulay T, Priestley MJN. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*.