

Experimental Study of Hysteresis Behavior of Reinforced Concrete Frame Equipped with TADAS Yielding Damper Under Cyclic loading

Reza Nazeran

Ph.D. Student, Civil Engineering Department, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

Ali Hemmati*

Assistant Professor, Seismic Geotechnical and High Performance Concrete Research Centre, Civil Engineering Department, Islamic Azad University, Semnan Branch, Semnan, Iran

ali.hemmati@semnaniau.ac.ir

Hasan Haji Kazemi

Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

A review of the damages caused by previous earthquakes shows that a significant number of the structures constructed in the country are neither earthquake-resistant nor have enough strength. Consequently, reliable, fast, and easy retrofitting methods are needed to improve these structures to withstand lateral forces. In the present study, 9 concrete frames were tested, and yielding steel dampers have been used for the seismic rehabilitation of the concrete moment-resisting frames. TADAS (Triangular-plate Added Damping and Stiffness) dampers are attached to the concrete frame using steel braces. The dampers and concrete beams are connected with concentric steel braces. Moreover, three concentric braces have been installed to investigate the influence of the braces on the strength and behavior of the structure. Compared to the moment-resisting frame, the structure that used TADAS dampers exhibited greater strength and recorded fewer damages. Cyclic displacement loading was applied to these frames, and their characteristics, including strength and crack, were investigated. In comparison with the control frame, the steel braces and yield dampers increased the structural strength of the concrete frames by 48% and 28%, respectively.

Keywords: Reinforced concrete frame; Yielding damper; TADAS; Cycle loading; Resistance

* Corresponding Author

Nazeran, R., Hemmati, A., haji kazemi, H. (2021). 'Experimental Study of Hysteresis Behavior of Reinforced Concrete Frame Equipped with TADAS Yielding Damper under Cyclic Loading', Journal of Concrete Structures and Materials, 6(2), pp. 203-226. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.327811.1256>
2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

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

مطالعه آزمایشگاهی رفتار هیستریزیس قاب خمشی بتنی مقاوم‌سازی شده با میراگر تسلیمی فلزی TADAS تحت بار چرخه‌ای جانبی

دریافت مقاله: ۱۳-۱۱-۱۴۰۰

پذیرش مقاله: ۳۱-۰۱-۱۴۰۱

رضا ناظران

دانشجوی دکتری تخصصی سازه، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

علی همتی

استادیار، مرکز تحقیقات ژئوتکنیک لرزه‌ای و بتن توانمند، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

ali.hemmati@semnaniau.ac.ir

(نویسنده مسئول)

حسن حاجی کاظمی

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

نگاهی به خسارت‌های ناشی از زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که درصد بالایی از ساختمان‌های بتن آرمه که تاکنون در کشور ساخته شده‌اند در برابر زلزله مقاوم نیستند و یا مقاومت کافی و قابل قبولی ندارند. از این رو ضرورت تقویت این ساختمان‌ها برای مقابله با نیروهای جانبی و با روش مقاوم‌سازی قابل اعتماد، سریع و آسان احساس می‌شود. در این مقاله ۹ قاب بتن آرمه مورد آزمایش قرار گرفتند و از میراگر تسلیمی فلزی برای بهسازی لرزه‌ای قاب‌های بتنی خمشی استفاده شده است. میراگر تسلیمی مورد نظر از نوع میراگر TADAS (Triangular-plate Added Damping And Stiffness) می‌باشد که با استفاده از مهاربند فلزی به قاب بتنی متصل شده است. مهاربند فلزی از نوع همگرا است که بین میراگر و تیر بتنی متصل شده است. همچنین در این مقاله سه مهاربند همگرا نیز در سازه قرار داده شده تا تاثیر آن بر مقاومت و رفتار سازه بررسی گردد. در سازه با میراگر TADAS مقدار مقاومت، بیش‌تر از قاب بتنی بدون میراگر بود و میزان خسارت وارد شده نسبت به قاب بدون میراگر، کمتر ثبت گردید. این قاب‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای جابجایی قرار گرفته و مشخصات آن‌ها شامل مقاومت، ترک‌خوردگی بررسی شد. با اضافه کردن مهاربند فولادی به قاب بتنی، مقاومت نمونه به مقدار ۴۸٪ نسبت به نمونه شاهد و با اضافه کردن میراگر تسلیمی به قاب بتنی، مقاومت نمونه‌ها حدود ۲۸٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. کلمات کلیدی: قاب خمشی بتن آرمه، میراگر تسلیمی، میراگر TADAS، بارگذاری چرخه‌ای، مقاومت.

در هنگام زلزله‌های قوی، ساختمان‌ها بعد از محدوده رفتار الاستیک، تغییر مکان‌های زیادی می‌یابند و فقط به واسطه چگونگی قابلیت تغییر مکان غیرالاستیک خود پایدار باقی می‌مانند. این تغییر مکان‌های غیرالاستیک موجب به‌وجود آمدن مفاصل پلاستیک به صورت موضعی در نقاطی از سازه می‌گردند که خود موجب افزایش شکل‌پذیری و همچنین افزایش استهلاک انرژی می‌گردد. در نتیجه مقدار زیادی از انرژی زلزله به واسطه تخریب‌های موضعی در سیستم مقاوم جانبی سازه مستهلک می‌گردد.

کارهای عددی به وسیله ابوالفاز و قبارا [۱-۲] در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ روی بادبندهای داخلی مستقیم هم‌مرکز و برون‌مرکز در قاب‌های بتن آرمه غیرشکل‌پذیر انجام شد که عملکرد لرزه‌ای مطلوب این ساختمان‌ها، به هنگام استفاده از بادبندهای برون‌مرکز را نشان می‌دهد.

ماهری و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۳ کارهای آزمایشگاهی در بررسی پارامترهای عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های مختلف قاب-بادبند برای اتصالات بین بادبند و قاب انجام دادند.

ماهری و حادجیپور [۴] در سال ۲۰۰۳ یک برنامه آزمایشگاهی بر روی اتصالات مستقیم بادبندهای ضربدری به گوشه قاب ترتیب دادند. آنان در این تحقیق روش پیچ و مهره کردن ورق‌های اتصال به اعضای بتنی و سپس جوش دادن ورق گاست به ورق‌های اتصال تیر و ستون را در سه شکل مورد بررسی قرار دادند. پژوهش آنان نشان داد که اتصال به وسیله پیچ‌های قالب شده و کاشته شده در بتن و پیچ‌هایی که تا سمت دیگر عضو امتداد داده شده و به کمک ورق دیگری در آن سمت مهره شده‌اند اتصالات مناسبی بوده و سختی را افزایش می‌دهد. همچنین روش اتصال به وسیله ایجاد پخ بتنی در گوشه قاب سختی کمتری نسبت به دو روش دیگر داشته و با توجه به مشکلات اجرایی استفاده از آن توصیه نمی‌شود.

بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی و نظری [۵-۶] در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۶ برای استفاده از اجزای سازه‌ای جدید برای بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی موجود که در آن عضو شکل‌پذیر سیستم بهسازی لرزه‌ای الحاقی همان اجزای بتنی ضعیف موجود هستند، دارای ضعف‌هایی مانند عدم تطابق ابعادی اجزای سازه‌ای جدید با اجزای بتنی موجود، نیاز نیرویی تقریباً زیاد در محل اتصال پیوند به اجزای بتنی طبقه و نیاز به دهانه‌های اشغال شده زیاد می‌باشد.

زهرائی و راد [۷] در سال ۲۰۰۷ مطالعه‌ای جهت بررسی کاربرد میراگرهای TADAS، استفاده از آنها در استهلاک انرژی زلزله وارد بر ساختمانهای بتنی و بررسی رفتار سازه‌های مجهز به این میراگرها انجام دادند. آنها ابتدا میراگرهای TADAS و رفتار سازه دارای چنین میراگرهایی بررسی نمودند. سپس از یک نوع میراگر در چهار ساختمان نمونه بتنی با خصوصیات مختلف استفاده کردند. همچنین با اعمال زلزله‌های گوناگون سعی شد نتایج جامع‌تری به دست آورند. در این رابطه میراگرهای لازم طراحی شده و عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های نمونه به کمک تحلیل دینامیکی غیر خطی مورد ارزیابی قرار گرفت. در اثر نصب میراگرها، پارامترهایی نظیر جابه‌جایی نسبی و

مطلق طبقات، شاخص آسیب طبقات و همچنین کل سازه و تشکیل مفاصل پلاستیک به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و نیز استهلاک انرژی هیسترتیک توسط اعضای سازه‌ای کاهش چشمگیری یافت. علیرغم کاهش نیروهای داخلی اعضای سازه‌ای، به علت افزودن سیستم مهاربندی برش طبقات کمی افزایش پیدا کرد، ولی قسمت عمده این نیروها در میراگرها متمرکز شدند. در تحقیق آن‌ها همچنین ترکیب سیستم قاب خمشی و دیوار برشی به همراه میراگر TADAS نیز مطالعه شد که به طور مشابه کاهش قابل ملاحظه‌ای در پارامترهای فوق به خصوص جابه جایی نسبی، مطلق طبقات و نیز استهلاک انرژی هیسترتیک در اعضای سازه‌ای را نشان می‌دهد.

سجادی و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۸ طی یک تحقیق عددی رفتار میراگرهای تسلیمی ADAS و TADAS را با سیستم‌های مهاربندی CBF، Chevron، EBF را تحت بارگذاری زلزله بررسی کردند. دوره تناوب سیستم با میراگر تسلیمی از دوره تناوب سیستم‌های مهاربندی دیگر بیش‌تر است. همچنین برش پایه در زلزله‌های در نظر گرفته شده، برای سازه با میراگر کمتر از برش پایه سیستم‌های مهاربندی است.

وارگاس و برونو [۹] در سال ۲۰۰۹ روش طراحی برای سازه‌های دارای میراگر تسلیمی، بر اساس شکل‌پذیری مورد نیاز، نسبت سختی ارائه کردند.

بن و چین [۱۰] در سال ۲۰۱۰ چند اتصال داخلی را با ورق‌های فولادی به روش‌های مختلف به جان تیرهای اتصال نصب کردند و با تعریف ۲ شاخص توان بخشی مقاومت و توان بخشی شکل‌پذیری، آن‌ها را تحت بارهای چرخه‌ای بررسی کردند.

بیات و عبدالله‌زاده [۱۱] در سال ۲۰۱۱ رفتار قاب فولادی با میراگر ADAS و سازه مهاربندی CBF را طی زلزله مورد مقایسه قرار دادند. بر اساس نتایج آنها ارتفاع سازه و خصوصیات هندسی میراگر تاثیر مهمی در کاهش پاسخ زلزله داشت. همچنین در سازه با میراگر، پروفیل دررفت سازه تحت تاثیر شدت زلزله نبوده و تنها باعث افزایش میزان انرژی ورودی به سازه می‌شود.

خیرالدین [۱۲] در سال ۲۰۱۲ تأثیر دیوار برشی و بادبند فلزی را در تقویت قاب خمشی بتن آرمه موجود و اندرکنش سه‌گانه آنها را بررسی نمود. نتایج پژوهش وی نشان می‌دهد استفاده از بادبند فلزی تغییرمکان جانبی سازه را تا حدود ۵۰ درصد کاهش می‌دهد.

رایس و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۳ با تغییر میزان سختی سیستم میراگر ADAS بصورت درصدی از سختی کل سازه، رفتار دینامیکی سازه‌های با پیوند کوتاه را مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از نرم افزار ETABS و رکورد زلزله‌های El Centro و YERMO و با میزان سختی‌های متفاوت سیستم میراگر با نسبت‌های ۰.۲۵٪، ۰.۵۰٪ و ۰.۷۵٪ کل سختی سازه، رفتار سازه و تاثیرات ADAS را بررسی نمودند. طراحی اولیه میراگرها براساس IBC2000 انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش سختی سیستم میراگر میزان انرژی تلف شده افزایش یافته و انرژی میرایی مدال کاهش می‌یابد. انرژی مکانیکی (جنبشی و پتانسیل) افزایش می‌یابد و انرژی ورودی ثابت است.

خزاعی [۱۴] در سال ۲۰۱۳ در مقاله‌ای با موضوع آنالیز دینامیکی غیرخطی بر روی قاب‌های فولادی با میراگر فلزی به تحقیق در این زمینه پرداختند. در این پژوهش سازه‌های فولادی ۴، ۷ و ۱۲ طبقه فولادی با بهره‌گیری از میراگرهای ADAS مورد تحلیل قرار گرفتند. آنالیزهای صورت گرفته به صورت دینامیکی غیرخطی و قاب‌های مورد مطالعه تحت اثر سه شتابنگاشت طیس، نورتریج و ال سنترو ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که نیروی برشی در بعضی طبقات قاب با میراگر ADAS در مقایسه با قاب بدون میراگر کاهش یافته است. با افزایش تعداد طبقات، مشاهده می‌شود که تغییر مکان جانبی طبقات و همچنین توزیع انرژی به ترتیب یکنواخت‌تر و مناسب‌تر در قاب‌های با میراگرهای ADAS اتفاق می‌افتد.

ساهو و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۵ میراگر ADAS را با میراگر صفحه‌ای ترکیب کردند و میراگر تسلیمی برشی و خمشی را ابداع کردند. بر اساس نتایج آنها، ضریب باربری و استهلاک انرژی در این نوع میراگرها حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد، بیش‌تر از میراگرهای ADAS می‌باشد. در این پژوهش ۹ قاب بتن آرمه با استفاده از میراگر تسلیمی فلزی جهت بهسازی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. میراگر تسلیمی TADAS را با استفاده از مهاربند فلزی همگرا به قاب بتنی متصل گردیده است تا تاثیر این میراگر را بر مقاومت و ترک خوردگی قاب‌ها، تحت بارگذاری چرخه‌ای جانبی بررسی گردد. از سه مهاربند همگرا نیز در سازه استفاده شده است تا تاثیر آن بر مقاومت و رفتار سازه بررسی گردد.

اینک و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۵ یک قاب بتنی را با میراگر تسلیمی و مهاربند فلزی تقویت و بهسازی کردند. این سازه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. بر اساس نتایج آنها، ظرفیت باربری قاب با میراگر حدود ۱/۹ برابر بیش‌تر از قاب بتنی معمولی بود. همچنین انرژی مستهلک شده نیز به مقدار زیادی نسبت به قاب معمولی افزایش یافت. ترک‌های مشاهده شده در قاب با میراگر به مراتب کمتر از قاب بتنی معمولی بود.

نتایج بدست آمده از مطالعات اخیر بر روی ظرفیت جذب انرژی وارده به سازه توسط میراگرهای تسلیم شونده فلزی TADAS [۱۷-۱۸] در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ استفاده از این میراگرها، علاوه بر از بین بردن ضعف‌های فوق، دارای مزایایی مانند افزایش شکل‌پذیری، سختی و مقاومت جانبی، توانایی وفق دادن با معماری، حداقل وزن اضافه شده به سازه اصلی و سیستم قاب مهاربندی فولادی خارجی با کمترین قطع عملکرد سازه‌ای ساختمان بتنی در آن جای می‌گیرد، است.

تحمیلی رودسری و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۸ طی مطالعه آزمایشگاهی تأثیر استفاده از استفاده از میراگر ADAS و TADAS را همراه با مهاربند Chevron را در قاب‌های بتن آرمه بررسی کردند. آنها ۷ قاب بتن آرمه ساختند و ۶ عدد از آنها را همراه با مهاربند Chevron و میراگر ADAS و TADAS با تعداد متفاوت پره‌های میانی تقویت کردند. قاب‌های آزمایشگاهی را تحت بار چرخه‌ای قرار دادند و میزان مقاومت، بازشدگی ترک‌ها، سختی، شکل‌پذیری، اتلاف انرژی و افت مقاومت نمونه‌ها را ارزیابی نمودند. نتایج آزمایشات آن‌ها نشانگر این مطلب بود که استفاده از میراگر تسلیمی باعث افزایش مقاومت قاب بتن آرمه می‌شود و میزان کاهش مقاومت هر چرخه بارگذاری و شکل‌پذیری را بررسی کردند که در تمام نمونه‌ها عملکرد میراگر ADAS از TADAS بهتر بوده است.

همتی و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۲۰ مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۳ نمونه قاب بتن آرمه انجام دادند. نمونه‌های آزمایشی شامل یک قاب بتن آرمه، یک قاب بتن آرمه با مهاربند همگرا (CBF) و یک قاب بتن آرمه با مهاربند واگرا (EBF) بود که رفتار چرخه‌ای آنها بررسی و با یکدیگر مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌داد که بارهای نهایی هر دو قاب بتنی با مهاربند همگرا (CBF) و واگرا (EBF)، به ترتیب حدود ۲/۱۱ و ۱/۹ برابر بیشتر از قاب بتن آرمه است. شکل پذیری قاب مقاوم‌سازی شده با مهاربندی واگرا بیشتر از قاب بتن آرمه و قاب مقاوم‌سازی شده با مهاربندی همگرا نیز می‌باشد. علاوه بر این، انرژی جذب شده از قاب‌های مقاوم‌سازی شده با مهاربند واگرا (EBF) و همگرا (CBF) حدود ۱/۹۸ و ۱/۶۳ برابر بیشتر از قاب بتن آرمه است.

۲- معرفی نمونه‌های مورد بررسی

به منظور بررسی رفتار قاب بتنی و قاب بتنی با میراگر تسلیمی، ۹ قاب بتنی در آزمایشگاه ساخته و مورد بررسی قرار گرفت. ۳ نمونه اول بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند و پس از آزمایش در سایر نمونه‌ها تغییراتی ایجاد شد. بتن مورد استفاده در این نمونه‌ها از نوع بتن معمولی ساخته شده در کارگاه، بتن با طرح اختلاط نشان داده شده در جدول ۱ می‌باشد. تعداد ۳ عدد نمونه مکعبی قبل از بتن‌ریزی نمونه‌ها، تهیه شد. نمونه‌های مکعبی به مدت ۲۸ روز در مخزن آب موجود در آزمایشگاه تحت عمل‌آوری با شرایط دمایی و محیطی آزمایشگاه قرار گرفتند. بعد از عمل‌آوری نمونه‌های مکعبی، مقاومت فشاری مکعبی نمونه‌ها با استفاده از جک هیدرولیکی آزمایشگاه سازه دانشگاه فردوسی مشهد، تعیین شد. روش تعیین مقاومت فشاری در شکل ۲ نشان داده شده است و نتایج آزمایش نمونه‌های مکعبی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱: طرح اختلاط بتن

دما (°K)	چگالی (kg/m ³)	نسبت آب به سیمان	سنگدانه درشت (شن) (kg/m ³)	سنگدانه ریز (ماسه) (kg/m ³)	سیمان تپ ۱ (kg/m ³)
293.5	2245	0.45	800	1100	300

طرح اختلاط مورد استفاده

جدول ۲: مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ۲۸ روزه گرفته شده از بتن مطابق استاندارد ۳-۱۶۰۸

انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	ابعاد (m)
1.33	25.1	25.3	23.6	26.4	0.15×0.15×0.15

نمونه بتن مکعبی

قاب بتنی مورد نظر یک قاب یک طبقه یک دهانه می‌باشد. آرماتورهای طولی تیر شامل ۴ عدد آرماتور Ø۱۰، آرماتور طولی ستون شامل ۶ عدد آرماتور Ø۱۰، آرماتورهای فونداسیون شامل ۱۲ عدد آرماتور Ø۱۶ می‌باشد. تعداد خاموت‌ها و مشخصات هندسی نمونه‌ها در جدول ۳ آورده شده است. در قاب‌های خمشی فقط فاصله آرماتورهای عرضی متفاوت انتخاب شده است. در این نمونه‌های Conc-F نشان دهنده قاب خمشی بتنی، حرف BR نشان دهنده نمونه همراه با مهاربند فولادی و حرف TADAS نشان دهنده نمونه همراه با میراگر TADAS می‌باشد.

جدول ۳: مشخصات آرماتورهای تیر، ستون و فونداسیون

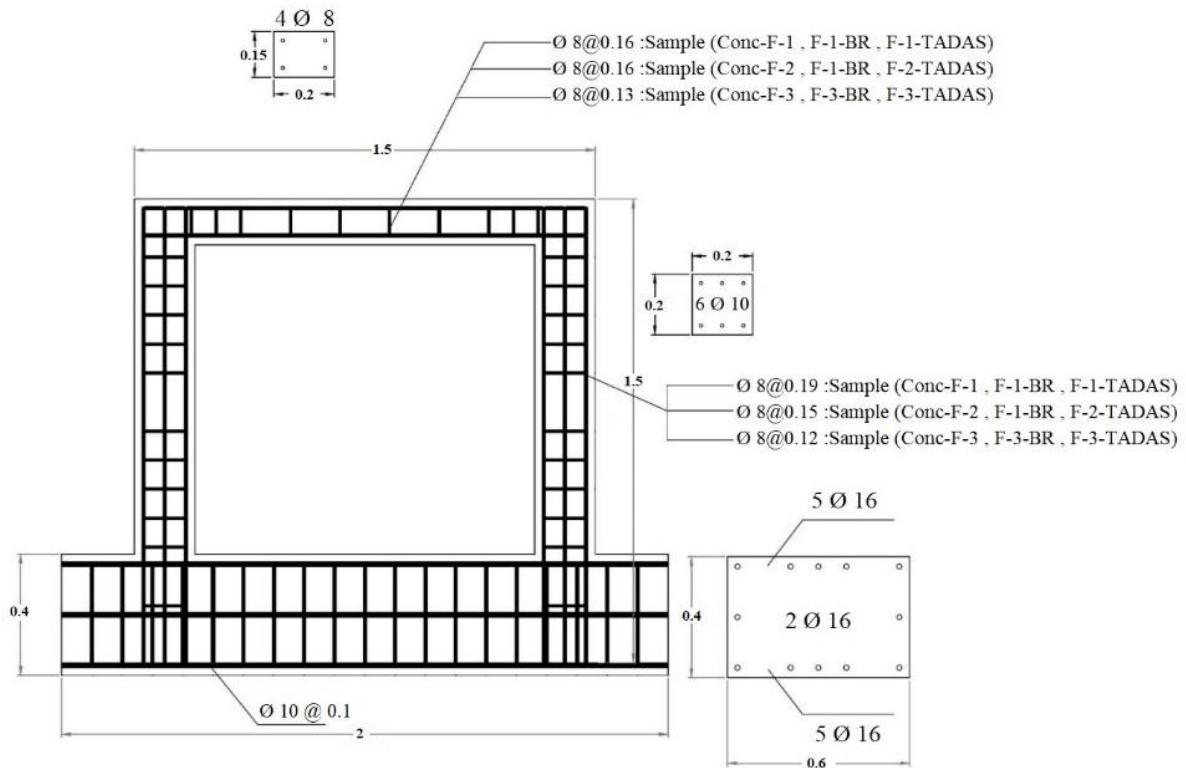
نمونه	ستون			تیر			فونداسیون				
	ابعاد: (m)	آرماتور طولی	ρ	آرماتور عرضی	ابعاد: (m)	آرماتور طولی	ρ	آرماتور عرضی	ابعاد: (m)	آرماتور طولی	آرماتور عرضی
Conc-F-1	0.2×0.2	6Ø10	1.18	7 Ø 8	0.15×0.2	4Ø10	1.05	8 Ø 8	0.4×0.6	12Ø16	20Ø10
Conc-F-2				9 Ø 8				8 Ø 8			
Conc-F-3				11Ø8				10Ø8			
F-1-BR				7 Ø 8				8 Ø 8			
F-2-BR				9 Ø 8				8 Ø 8			
F-3-BR				11Ø8				10Ø8			
F-1-ADAS				7 Ø 8				8 Ø 8			
F-2-ADAS				9 Ø 8				8 Ø 8			
F-3-ADAS				11Ø8				10Ø8			

بدلیل وجود چند تیپ فاصله آرماتور عرضی در این تحقیق، در جدول ۴ به بررسی فاصله آرماتورهای عرضی المان تیر و ستون طبق آیین نامه پرداخته شده است.

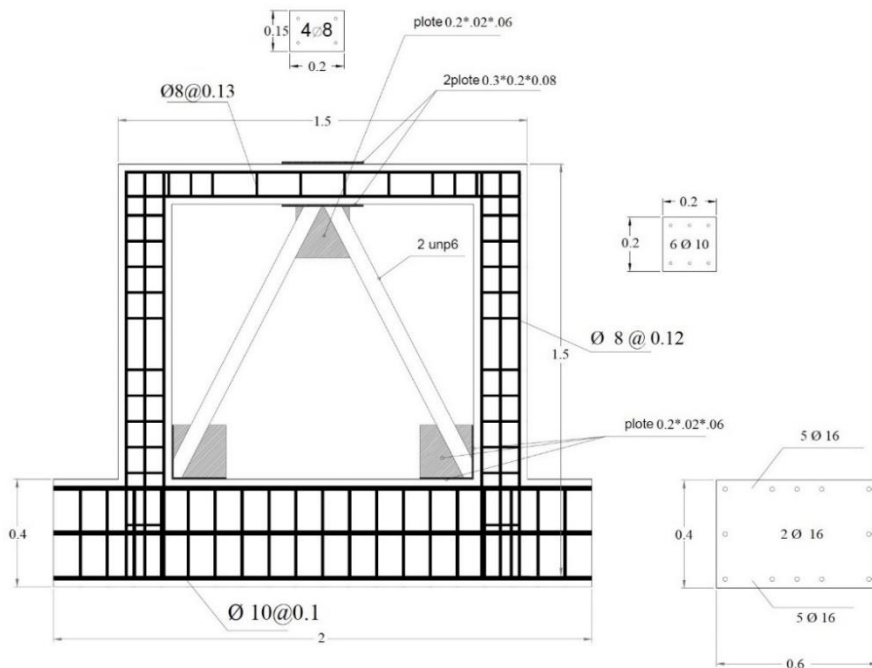
جدول ۴: بررسی فاصله خاموت عرضی با مقادیر مجاز آیین نامه

نمونه	ستون				تیر				
	ابعاد: (m)	آرماتور طولی	آرماتور عرضی	فاصله خاموت عرضی: (m)	ابعاد: (m)	آرماتور طولی	آرماتور عرضی	فاصله خاموت عرضی: (m)	فاصله خاموت عرضی حداکثر طبق آیین نامه: (m)
Conc-F-1	0.2×0.2	6Ø10	7 Ø 8	0.19	0.15×0.2	4Ø10	8 Ø 8	0.16	0.15
Conc-F-2			9 Ø 8	0.15			8 Ø 8	0.16	0.15
Conc-F-3			11Ø8	0.12			10Ø8	0.13	0.15
F-1-BR			7 Ø 8	0.19			8 Ø 8	0.16	0.15
F-2-BR			9 Ø 8	0.15			8 Ø 8	0.16	0.15
F-3-BR			11Ø8	0.12			10Ø8	0.13	0.15
F-1-ADAS			7 Ø 8	0.19			8 Ø 8	0.16	0.15
F-2-ADAS			9 Ø 8	0.15			8 Ø 8	0.16	0.15
F-3-ADAS			11Ø8	0.12			10Ø8	0.13	0.15

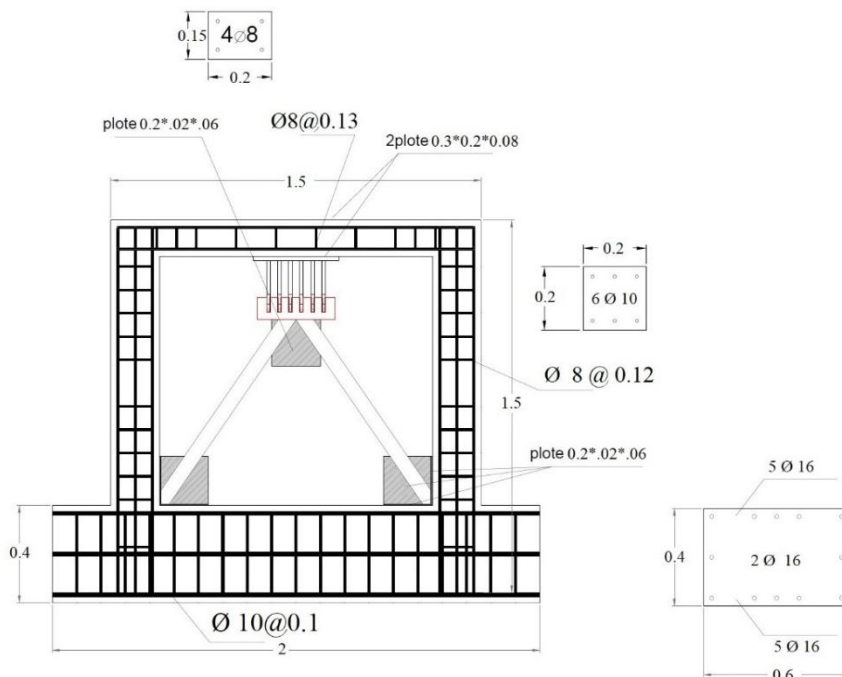
در شکل ۱ تا ۳ نمای هندسی قاب بتنی، قاب بتنی با مهاربند و قاب بتنی با میراگر TADAS مورد آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۱: مشخصات قاب‌های بتن آرمه طبق جدول ۳ و ۴ (واحد تصویر بر اساس متر میباشد).



شکل ۲: نمای هندسی قاب بتنی مهاربندی شده (واحد تصویر بر اساس متر میباشد).



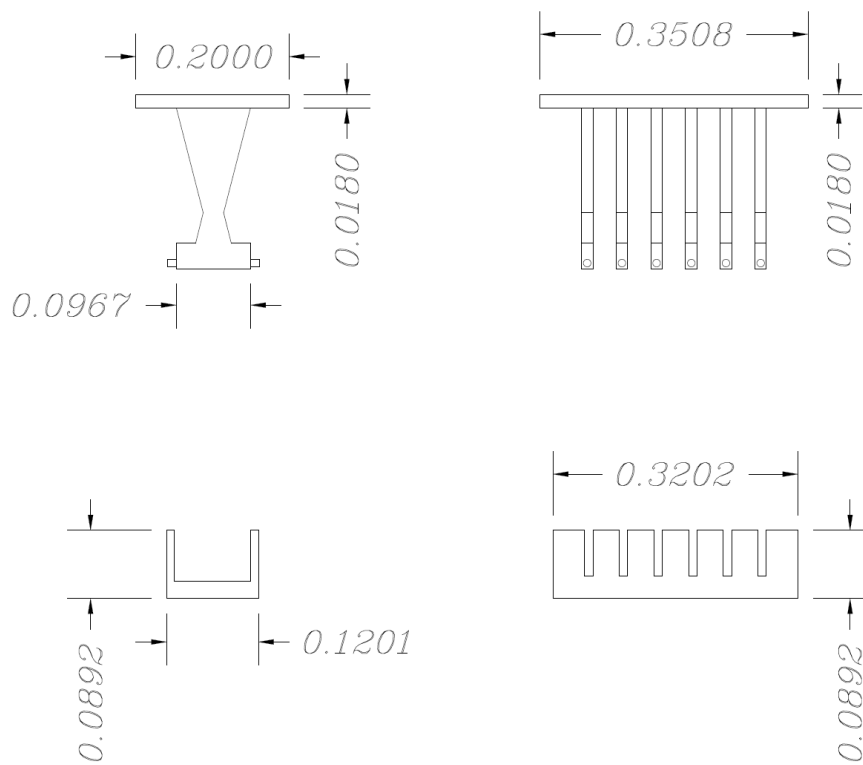
شکل ۳: نمای قاب خمشی بتنی و نحوه قرارگیری مهاربند و میراگر تسلیمی همراه با ابعاد هندسی نمونه‌ها (واحد تصویر بر اساس متر میباشد).

در شکل ۴ آرماتور بندی قاب بتنی قبل از قالب بندی نشان داده شده است. در این نمونه فاصله خاموت‌های تیر و ستون (قاب بتنی Conc-F-1) در مقدار حداکثر فاصله قرار گرفته بود. بعد از انجام آزمایش این نمونه مشخص شد که فاصله خاموت باید کاهش یابد. بنابراین، در قاب‌های دیگر مقدار فاصله خاموت کاهش یافت.



شکل ۴: آرماتور بندی قاب بتن آرمه.

نحوه قرارگیری صفحات میراگر در داخل شیارهای پایین میراگر در شکل ۵ نشان داده شده است. به منظور جلوگیری از تاثیر نیروهای ثقلی بر میراگر، قسمت پایین صفحات به صفحه پایین میراگر جوش نشده‌اند و اجازه دوران دارند. فولاد مورد استفاده برای ورق صفحات و ورق‌های بالا و پایین میراگر از نوع St-37 می‌باشد. مشخصات هندسی و نمای ساخته شده میراگر TADAS در شکل ۶ نشان داده شده است.



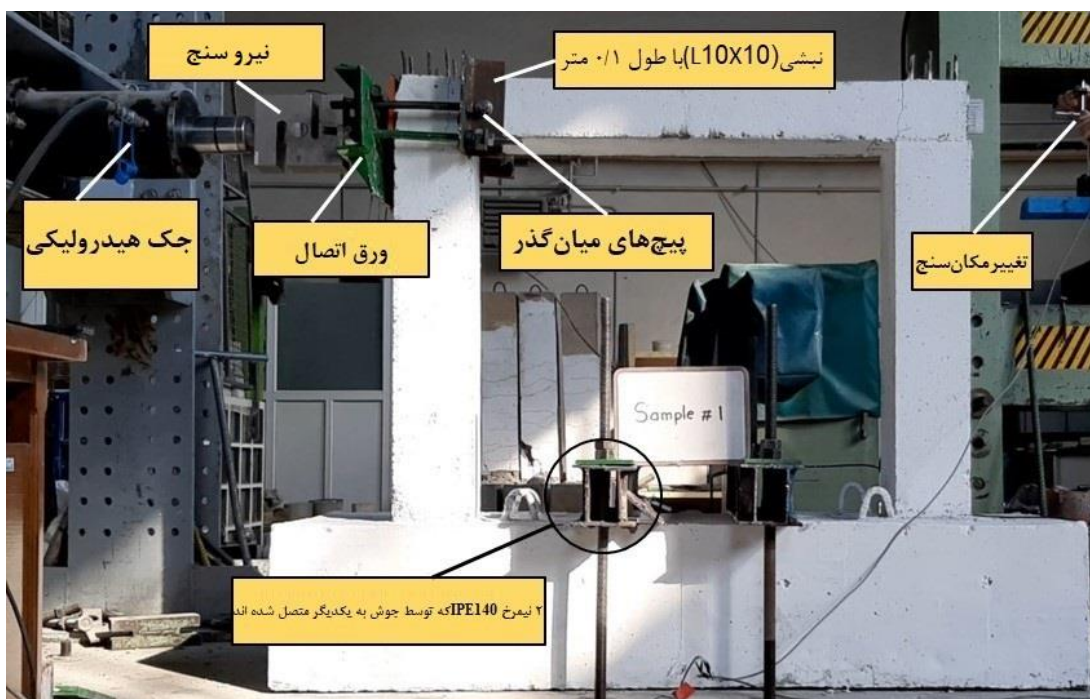
شکل ۵: صفحه گسترده میراگر تسلیمی آماده شده جهت نصب در قاب خمشی بتنی (واحد تصویر بر اساس متر میباشد).



شکل ۶: میراگر تسلیمی آماده شده جهت نصب در قاب خمشی بتنی.

۳- چیدمان آزمایش

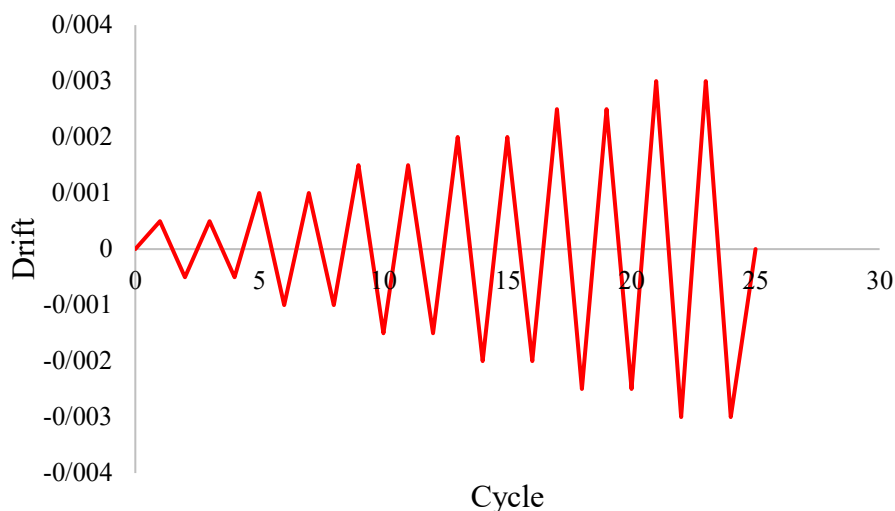
در شکل ۷ نحوه بارگذاری، موقعیت دستگاه تغییرمکان سنج، نبشی‌ها، پیچ‌های میان‌گذر، در نمونه نشان داده شده است. جک هیدرولیکی آزمایشگاه دارای ظرفیت ۸۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد. همچنین از چهار مقطع IPE140 که به صورت ۲ تایی به هم جوش داده شده‌اند و برای مهار فونداسیون به کف صلب آزمایشگاه استفاده شده است. یک ورق مدفون در اتصال تیر به ستون قبل از بتن‌ریزی کار گذاشته شد. سپس نیروسنج جک به این ورق متصل شد و بارگذاری انجام شد. به دلیل نبود طول مهاری کافی، ورق از اتصال خارج شد. البته نتایج این نمونه در مقاله آورده نشده است. به همین دلیل در نمونه‌های دیگر دو عدد نبشی L10x10 با استفاده از پیچ‌های میان‌گذر به یک ساق نبشی متصل شده است. سپس با استفاده از چهار پیچ دیگر ساق دیگر نبشی به ورق متصل به نیروسنج وصل شده است.



شکل ۷: نحوه چیدمان آزمایش قاب خمشی بتنی (واحد تصویر بر اساس متر می‌باشد).

۴- نتایج آزمایش

کلیه نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای به صورت جابجایی کنترل قرار گرفتند. در شکل ۸ پروتکل بارگذاری چرخه‌ای بر روی نمونه‌ها نشان داده شده است. پروتکل بارگذاری استفاده شده در این پژوهش ATC-24 می‌باشد. در این پروتکل مقدار جابجایی طبقه با گام‌های ۰/۵ درصد افزایش می‌یابد. هر چرخه دو مرتبه تکرار شد تا رفتار غیرخطی بتن و اثرات میراگر افزوده شده به سیستم قابل مشاهده باشد. مقدار جابجایی وارده از طرف جک هیدرولیکی با استفاده از نیروسنج به نیرو تبدیل می‌شود. مقدار جابجایی جانبی قاب نیز توسط حسگر تغییر مکان سنج در کنار قاب اندازه‌گیری می‌شود.



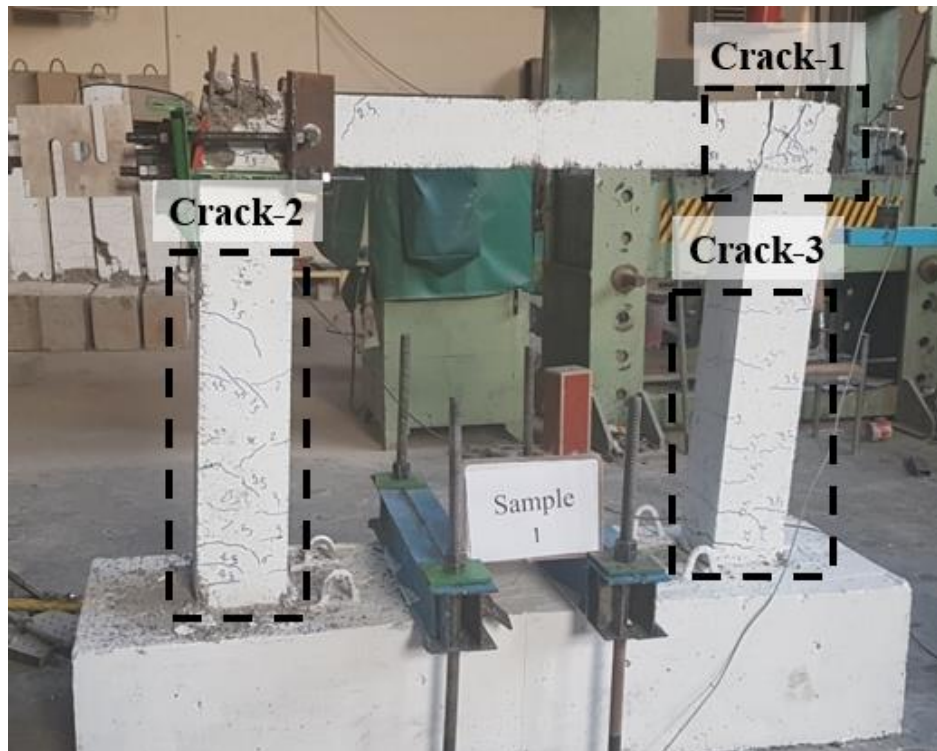
شکل ۸: منحنی پروتکل بارگذاری چرخه‌ای جابجایی کنترل.

در ادامه نتایج بارگذاری شامل، ترک خوردگی‌های تیر و ستون، منحنی‌های هیستریزس نمونه‌ها بررسی می‌شود.

۵- تحلیل و تفسیر نتایج

۵-۱ قاب های بتن آرمه

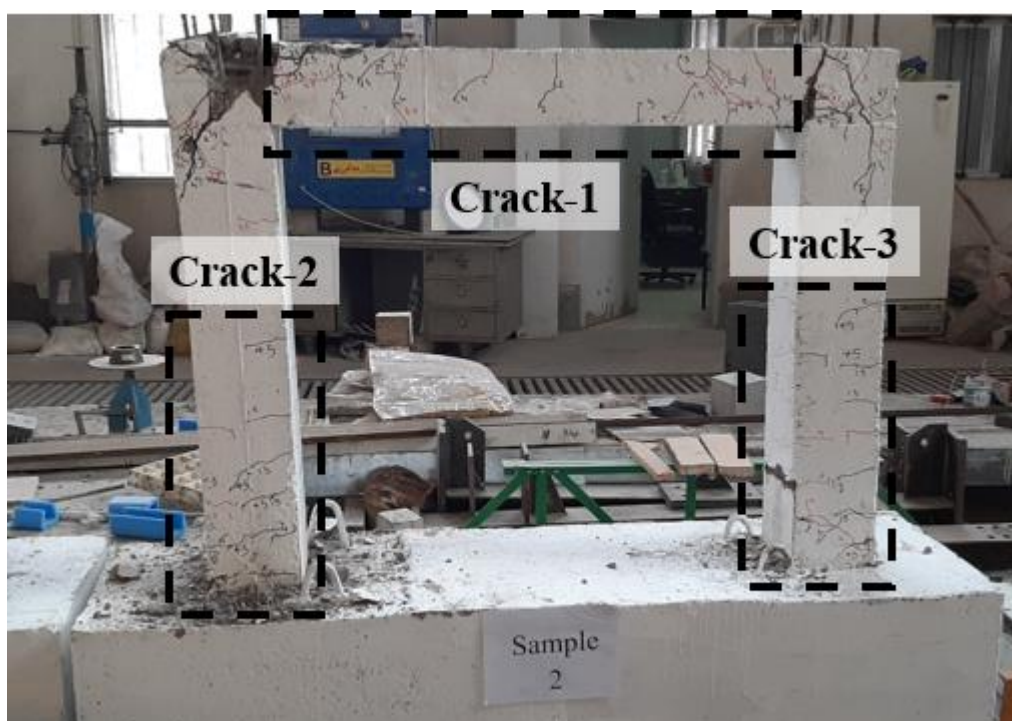
شکل ۹، ترک خوردگی نمونه Conc-F-1 در زمان آزمایش را نشان می‌دهد. قسمت چشمه اتصال نزدیک جک بارگذاری و ورق‌های متصل به جک، دچار ترک خوردگی بسیار زیادی شده است.



شکل ۹: وضعیت ترک خوردگی نمونه Conc-F-1 بعد از آزمایش.

در ابتدای بارگذاری ترک‌های ریزی در قسمت تیر ایجاد شد. با افزایش بارگذاری، محل این ترک‌ها به ستون منتقل شد و ترک‌های بیشتری در ستون شکل گرفت. با افزایش مقدار جابجایی جانبی بر تعداد ترک‌ها افزوده شد. توالی ترک‌های ایجاد شده در نمونه، در شکل ۹ نشان داده شده است. ترک‌های افقی در ستون ناشی از فاصله زیاد خاموت‌ها و طراحی برشی نامناسب قاب خمشی می‌باشد. در قسمت تکیه‌گاه، علاوه بر وجود ترک‌های افقی در ستون‌ها، بتن کاور ستون‌ها در نواحی تکیه‌گاه جدا شده بود. در ناحیه اتصال تیر به ستون سمت راست، ترک‌های قطری و برشی دیده می‌شود که ممکن است به دلیل عدم مهارشدگی مناسب باشد. به دلیل اینکه در این نمونه، ترک‌های متعددی در ستون دیده شد و ضعف برشی در قاب خمشی مشهود بود، سعی شد تا در مدل‌های بعدی، فاصله خاموت‌ها کمتر شود. همان‌طور که دیده می‌شود ترک‌های ایجاد شده در تیر به میزان زیادی کمتر از ستون می‌باشد.

در شکل ۱۰ نمونه Conc-F-2 بعد از بارگذاری نشان داده شده است. در این نمونه فقط فاصله خاموت‌های ستون نسبت به نمونه Conc-F-1 کاهش یافته است.



شکل ۱۰: ترک خوردگی نمونه Conc-F-2 بعد از آزمایش.

همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، ترک‌های افقی در ستون ایجاد شده است. همانند نمونه Conc-F-1 در این نمونه، در تیر نیز ترک‌هایی ایجاد شده است. این ترک‌ها در نواحی تکیه‌گاهی شروع و سپس در میانه تیر ایجاد شده‌اند. در این حالت، با کاهش فاصله خاموت‌ها ترک‌های ستون کاهش یافته است.

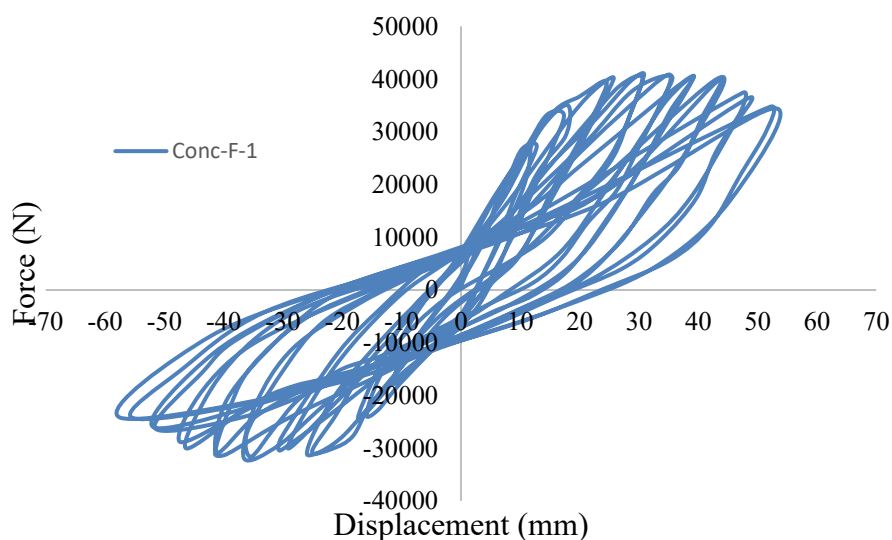
در شکل ۱۱ نمونه Conc-F-3 بعد از آزمایش نشان داده شده است. در این نمونه فاصله خاموت‌های تیر و ستون به صورت همزمان نسبت به نمونه Conc-F-1 کاهش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، ترک خوردگی عمدتاً در تیر دیده شده و ترک‌های قابل ملاحظه‌ای در ستون مشاهده نمی‌شود. فقط دو ترک افقی در تکیه‌گاه سازه دیده می‌شود که بعد از ایجاد ترک در تیر رخ داده است. دیده می‌شود که محل تشکیل ترک‌ها در نزدیکی اتصال تیر به ستون کاهش یافته و عمدتاً به قسمت میانه تیر منتقل شده است.



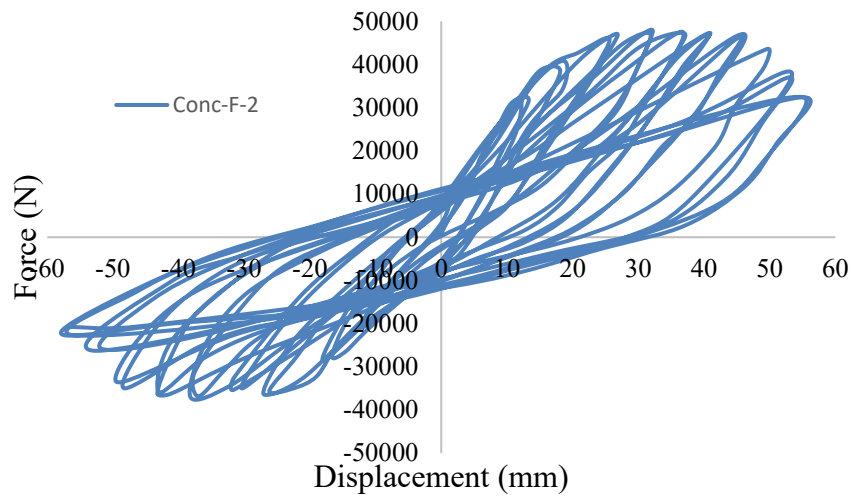
شکل ۱۱: نحوه ترک خوردگی نمونه *Conc-F-3* بعد از آزمایش.

۵-۱-۱ منحنی های هیستریزیس قاب های بتن آرمه

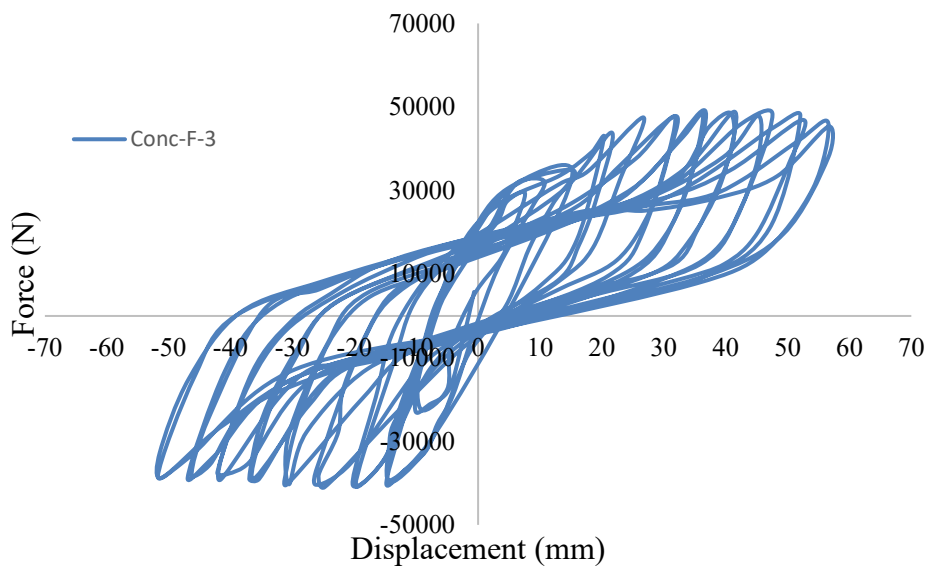
در منحنی هیستریزیس، نیروی ایجاد شده در نیروسنج در مقابل جابجایی ثبت شده در حسگر تغییر مکان سنج ترسیم می شود. این منحنی نشان دهنده میزان مقاومت نمونه، سختی اولیه و ثانیه و نرم شوندگی و سخت شوندگی رفتار نمونه و انرژی مستهلک شده در نمونه ها می باشد. مطالعه رفتار هیستریزیس نمونه ها درک درستی از چگونگی رفتار قاب در زمان بارهای چرخه ای همانند زلزله بدست می دهد. در شکل ۱۲ تا ۱۴ منحنی های هیستریزیس نمونه قاب خمشی بتنی *Conc-F-1*، *Conc-F-2* و *Conc-F-3* آورده شده است.



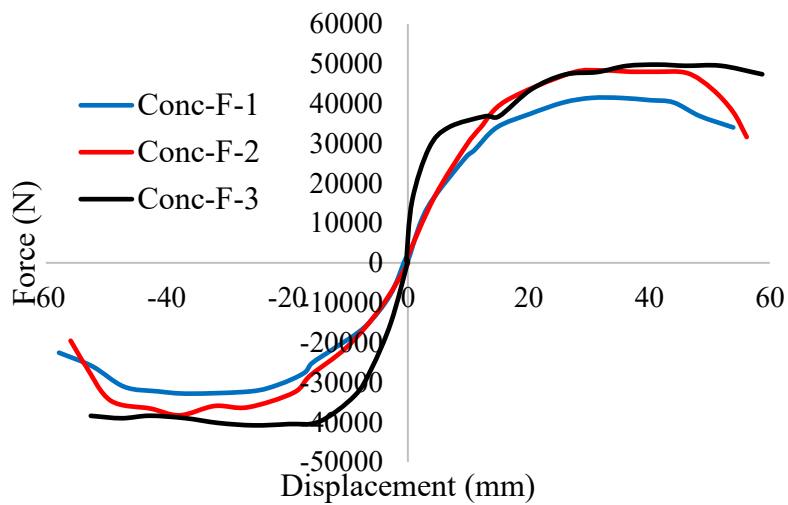
شکل ۱۲: منحنی هیستریزیس نمونه *Conc-F-1*.



شکل ۱۳: منحنی هیستریزیس نمونه Conc-F-2.



شکل ۱۴: منحنی هیستریزیس نمونه Conc-F-3.

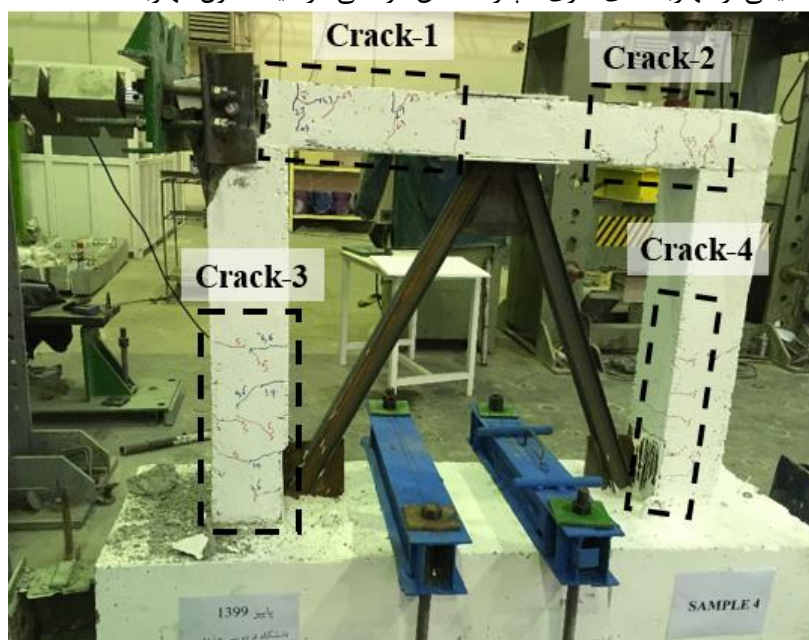


شکل ۱۵: منحنی پوش نمونه‌های قاب بتنی Conc-F.

رفتار کلی منحنی‌ها به صورت پایدار می‌باشد. با افزایش بارگذاری، افت مقاومت قابل توجهی در نمودار دیده نمی‌شود. ولی سختی حلقه‌های هیستریزس با افزایش بارگذاری از مقدار سختی اولیه کمتر می‌شود که نشان دهنده افزایش تعداد ترک‌ها و همچنین افزایش عرض ترک می‌باشد. در نمونه‌های F-1 و F-2 نرم‌شوندگی مقاومتی بعد از حداکثر مقاومت مشاهده می‌شود، ولی در نمونه F-3 اثر نرم‌شوندگی نسبت به نمونه‌های دیگر کمتر است. این به دلیل ترک خوردگی کمتر نمونه F-3 است. تقریباً در کلیه نمونه‌ها اثر پینچینگ دیده می‌شود. در قاب بتنی F-1 مقدار حداکثر مقاومت برابر ۴۰/۸۷ کیلونیوتن، قاب F-2 برابر ۴۷/۵۹ کیلونیوتن و برای قاب F-3 برابر ۴۹/۱۷ کیلونیوتن می‌باشد. دیده می‌شود که کاهش ترک‌ها و کاهش فاصله آرماتورهای عرضی و تقویت قسمت بارگذاری جک هیدرولیکی سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است.

۵-۲ قاب های بتن آرمه با مهاربند فولادی

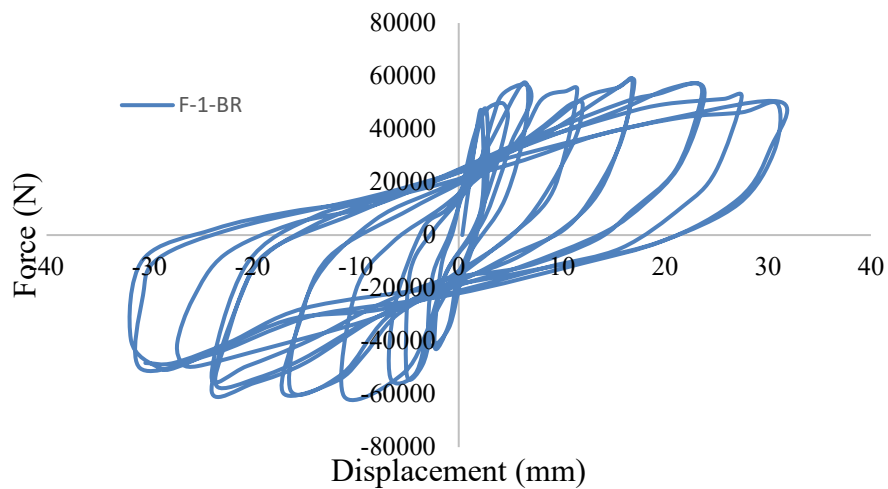
در شکل ۱۶ وضعیت نمونه Conc-BR بعد از انجام آزمایش نشان داده شده است. در محل اتصال مهاربند به تیر بتنی از ورق فولادی و پیچ‌های میان‌گذر استفاده شده است. به همین دلیل ترک‌های ایجاد شده در تیر، بین اتصال و ورق متصل کننده مهاربند است. به دلیل صلبیت زیاد ورق‌های بالا و پایین تیر، سختی خمشی تیر در این قسمت به میزان زیادی افزایش یافته است. این ترک‌ها از قسمت ناحیه اتصال تیر به ستون شروع شده و با افزایش جابجایی رشد کرده‌اند. همچنین در ستون قاب بتنی، ترک‌های افقی مشاهده می‌شود. در ستون سمت راست، ترک‌های کمتری نسبت به ستون سمت چپ دیده می‌شود. تغییرشکل پلاستیک قابل ملاحظه‌ای در مهاربند بعد از جابجایی نهایی مشاهده نشد. فقط یکی از مهاربندهای فلزی دچار کمناش موضعی در میانه طول مهاربند شد.



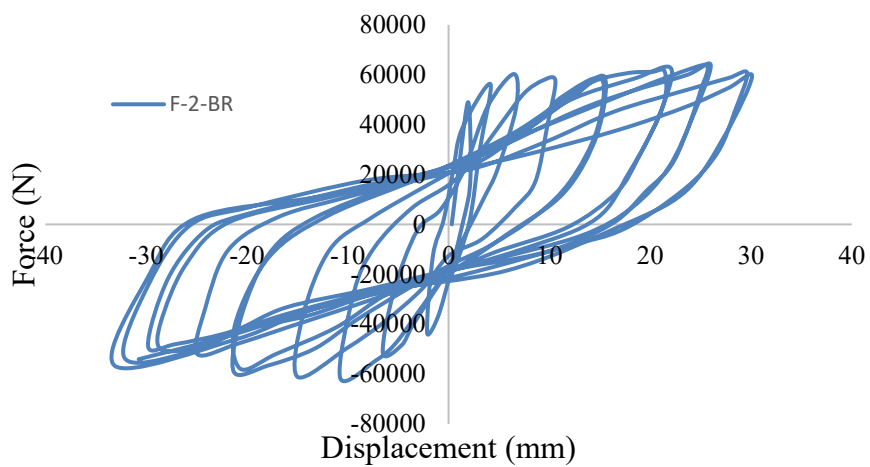
شکل ۱۶: وضعیت ترک خوردگی نمونه Conc-BR.

۵-۲-۱ منحنی‌های هیستریزس قاب های بتن آرمه با مهاربند فولادی

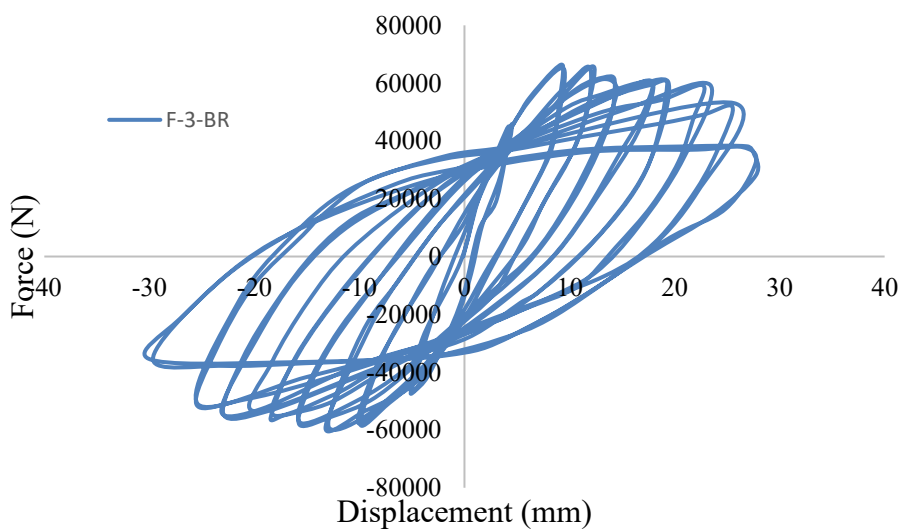
در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ منحنی هیستریزس نمونه قاب‌های بتنی با مهاربند فولادی نشان داده شده است.



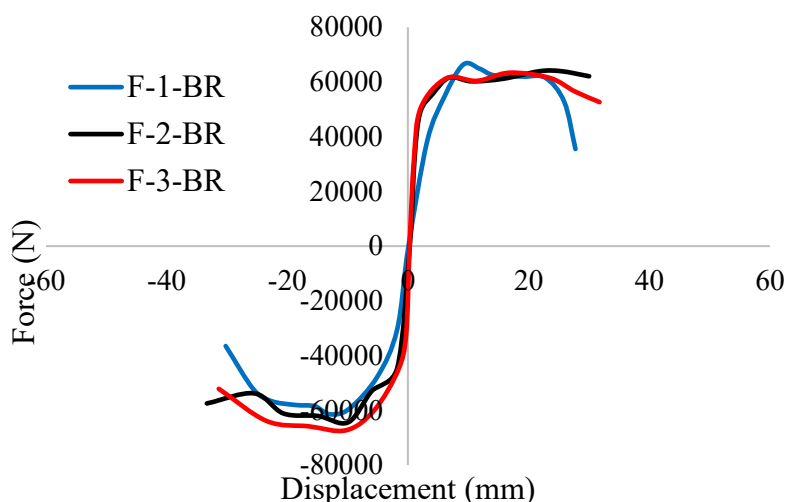
شکل ۱۷: منحنی هیستریزیس نمونه F-1-BR.



شکل ۱۸: منحنی هیستریزیس نمونه F-2-BR.



شکل ۱۹: منحنی هیستریزیس نمونه F-3-BR.



شکل ۲۰: منحنی پوش نمونه‌های قاب بتنی با مهاربند فولادی.

با اضافه کردن مهاربند فلزی به قاب بتنی، اثر لاغرشدگی یا پینچینگ در منحنی کمتر شده است. همچنین مقدار مقاومت نیز افزایش زیادی داشته است. مقدار مقاومت حداکثر نمونه F-1-BR برابر ۶۰/۷۴ کیلونیوتن، مقاومت نمونه F-2-BR برابر ۶۳/۹۱ کیلونیوتن و مقاومت نمونه F-3-BR برابر ۶۵/۸۴ کیلونیوتن می‌باشد. در مقایسه با نمونه‌های قاب خمشی بتنی دیده می‌شود که مقدار جابجایی نهایی به میزان زیادی کاهش یافته است. به دلیل سختی زیاد مهاربند فولادی، شکل‌پذیری نمونه کاهش یافته است. همچنین مقدار مقاومت حداکثر نمونه افزایش یافته است که ناشی از اضافه شدن مهاربند به قاب خمشی بتنی است.

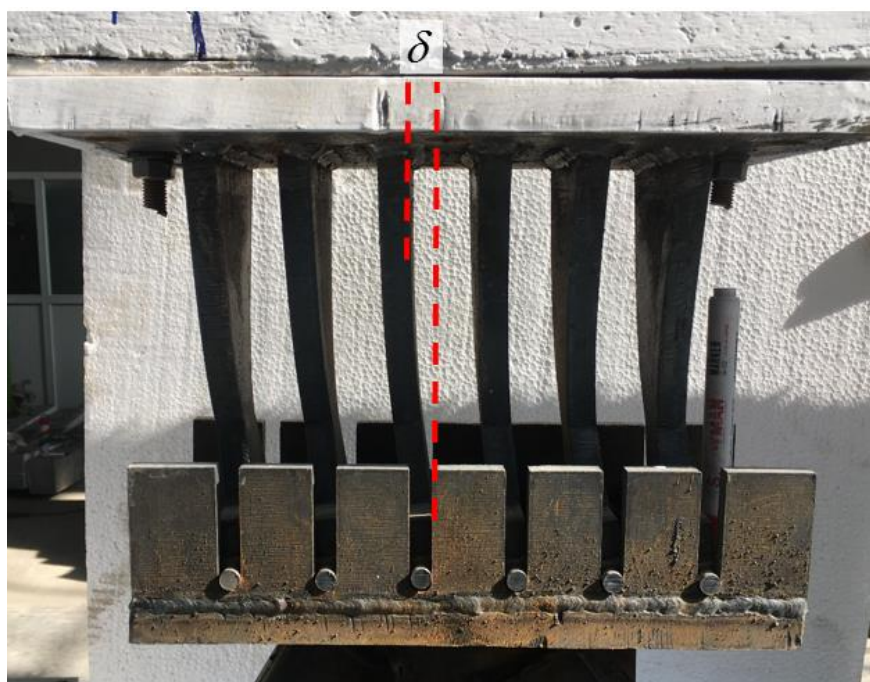
۳-۵ قاب های بتن آرمه با میراگر تسلیمی TADAS

در شکل ۲۱ وضعیت ترک خوردگی قاب بتنی با میراگر TADAS دیده می‌شود. مشاهده شد با اینکه قاب تحت بارگذاری جانبی قرار گرفته است، ابتدا ترک‌ها در تیر ایجاد شده‌اند. این ترک‌ها در دو قسمت بین چشمه اتصال و میراگر ایجاد شده‌اند. برخلاف نمونه‌های قبلی در ستون ترک‌ها به مقدار بسیار زیادی کاهش یافته است. این ترک‌ها در ابتدای بارگذاری ایجاد شده‌اند و با تغییر شکل میراگر، ترک‌ها کاهش یافته‌اند. عمده تغییر شکل جانبی وارد شده به قاب بتنی توسط میراگر تسلیمی جذب شده است.



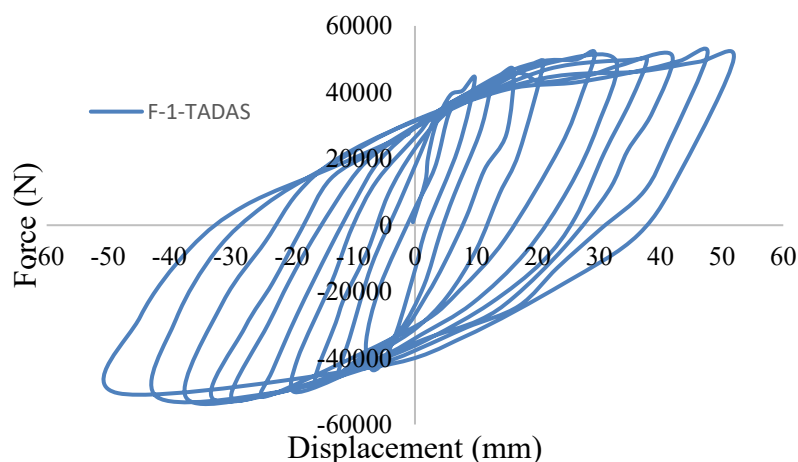
شکل ۲۱: وضعیت ترک خوردگی قاب بتنی با میراگر TADAS.

در شکل ۲۲ تغییرشکل میراگر تسلیمی TADAS در حین بارگذاری نشان داده شده است. در این شکل میزان انحراف جانبی میراگر تسلیمی نسبت به محور قائم بدون تغییرشکل نشان داده شده است. دیده می‌شود که تغییرشکل کلیه ورق‌ها به صورت یکنواخت بوده و کلیه ورق‌ها تحت اثر بارگذاری جانبی قرار گرفته‌اند. با وارد شدن جابجایی جانبی در چرخه‌های اولیه، میراگر نیز دچار تغییرشکل شد و انرژی وارد شده به قاب بتنی توسط میراگر جذب شد. با جذب انرژی توسط میراگر، ترک‌ها و تغییرشکل‌های قاب به میزان قابل توجهی کاهش یافت.

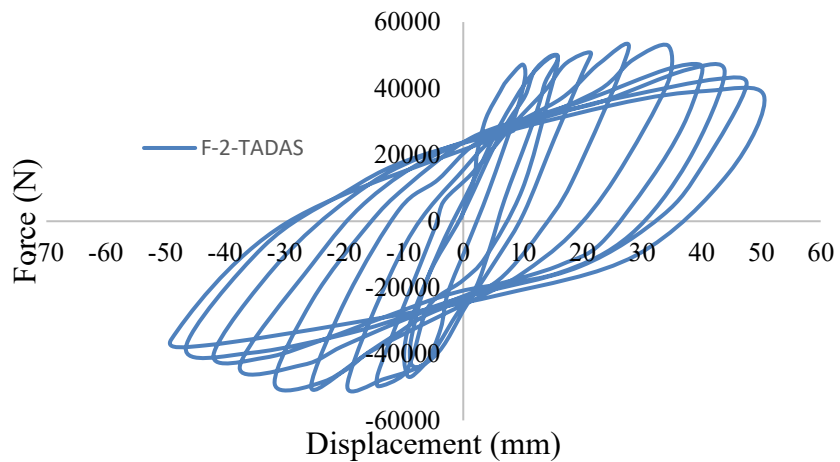


شکل ۲۲: تغییرشکل جانبی میراگر TADAS در اثر بارگذاری جانبی.

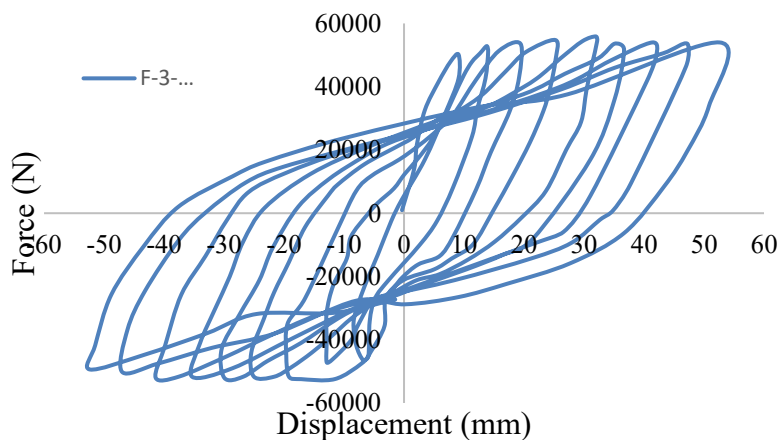
۵-۳-۱ منحنی‌های هیستریزیس قاب‌های بتن آرمه با میراگر تسلیمی TADAS در شکل ۲۳ تا ۲۵ منحنی هیستریزیس قاب‌های بتنی با میراگر تسلیمی TADAS آورده شده است.



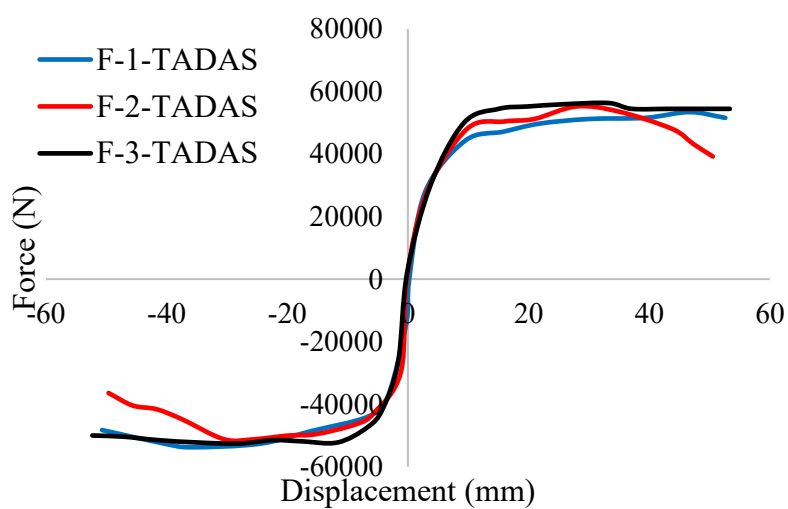
شکل ۲۳: منحنی هیستریزیس قاب بتنی با میراگر تسلیمی F-1-TADAS



شکل ۲۴: منحنی هیستریزیس قاب بتنی با میراگر تسلیمی F-2-TADAS

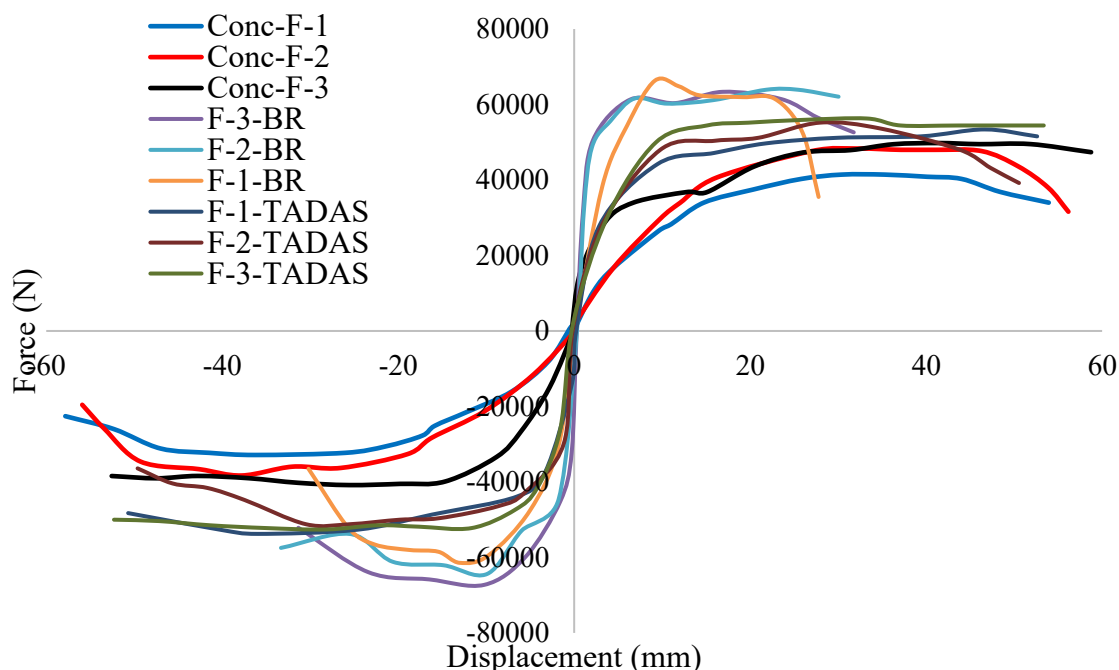


شکل ۲۵: منحنی هیستریزیس قاب بتنی با میراگر تسلیمی F-3-TADAS



شکل ۲۶: منحنی پوش نمونه‌های قاب بتنی با میراگر TADAS

با فعال شدن میراگر تسلیمی، رفتار منحنی هیستریزیس به صورت سخت‌شونده می‌باشد و نرم‌شوندگی قابل توجهی در آن دیده نمی‌شود. مقدار مقاومت حداکثر نمونه F-1-TADAS برابر ۵۲/۳۸ کیلونیوتن، مقاومت نمونه F-2-TADAS برابر ۵۲/۹۶ کیلونیوتن و مقاومت نمونه F-3-TADAS برابر ۵۵/۸۹ کیلونیوتن می‌باشد. میراگر در همان لحظات اولیه بارگذاری فعال شده است. به دلیل اینکه مقدار نیروی تسلیم میراگر عدد کوچکی است، به عنوان فیوز عمل کرده است. مقدار شکل‌پذیری قاب بتنی با میراگر تسلیمی به مقدار زیادی افزایش داده است. با اینکه مقدار مقاومت قاب بتنی F-1 کمتر از نمونه F-2 و F-3 است، ولی با اضافه کردن میراگر TADAS مقدار مقاومت افزایش یافته است و مقدار کاهش مقاومت را جبران کرده است. بنابراین با استفاده از میراگر می‌توان بخشی از کاهش مقاومت میراگر را جبران کرد.



شکل ۲۷: منحنی پوش کلیه نمونه‌های قاب‌های بتنی مورد آزمایش.

مطابق شکل ۲۷ دیده می‌شود که قاب بتنی مقدار مقاومت کمتری ولی در عوض، تغییرشکل مناسبی دارد که همراه با تحمل تغییرشکل‌های غیرخطی زیاد و ترک‌های گسترده در تیر و ستون می‌باشد. این ترک‌ها و همچنین تسلیم شدگی برخی فولادها، میزان سطح عملکرد سازه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در نمونه با مهاربند فلزی، مقدار مقاومت از سایر نمونه‌ها بیشتر است ولی مقدار جابجایی نهایی نمونه کمتر از سایر نمونه‌ها است. به دلیل اینکه مهاربند فلزی یک سیستم با سختی و مقاومت تسلیم زیاد است، ولی تغییرشکل کمی دارد. در این نمونه نیز، مقاومت کل سیستم زیاد شده است ولی مقدار تغییرشکل قاب بتنی با مهاربند فلزی کاهش یافته است. در منحنی پوش آور قاب با میراگر تسلیمی دیده می‌شود که مقدار نیروی تسلیم قاب با میراگر کمتر از نیروی تسلیم قاب با مهاربند فلزی است. در نتیجه میراگر زودتر فعال شده و در اتلاف انرژی شرکت داشته است. از طرفی مقدار مقاومت قاب بتنی با میراگر بیشتر از قاب بتنی و کمتر از قاب با مهاربند فلزی است. در نمونه F-1 و F-2 مقدار فاصله خاموت بیشتر است و نرم‌شوندگی در منحنی هیستریزیس دیده می‌شود، با اضافه کردن میراگر این اثر کمتر شده و مقدار مقاومت نمونه‌ها F-1-TADAS و F-2-TADAS به هم نزدیک شده است. حتی مقدار مقاومت این

نمونه‌ها به نمونه F-3-TADAS نیز نزدیک‌تر شده است. بنابراین با استفاده از میراگر، زوال مقاومتی نمونه‌های ضعیف، کمتر شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ۹ قاب بتن آرمه با مهاربند فولادی و میراگر تسلیمی تقویت شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. میراگر انتخاب شده از نوع میراگر تسلیمی TADAS بود. سه قاب بتن آرمه، سه قاب بتنی با مهاربند فولادی و سه قاب بتنی با میراگر مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی نتایج زیر بدست آمد:

۱- در قاب‌های بتنی با توجه به فاصله خاموت‌ها، پس از بارگذاری در آزمایشگاه، ترک‌های خمشی زیادی در تیر و ستون‌ها مشاهده شد. ابتدا ترک‌های با عرض کم و تعداد زیاد ایجاد شد و سپس ترک‌های با عرض بیشتر در تیر و ستون ایجاد شدند. در نهایت با خرابی قسمت چشمه اتصال، باربری نمونه متوقف شد. مقاومت حداکثر قاب‌های بتنی نسبت به قاب با مهاربندی و قاب با میراگر کمتر می‌باشد. پس از بررسی نمودارهای هیستریزس، مشخص گردید رفتار کلی منحنی‌ها به صورت پایدار می‌باشد. با افزایش بارگذاری، افت مقاومت قابل توجهی در نمودار دیده نمی‌شود. ولی سختی حلقه‌های هیستریزس با افزایش بارگذاری از مقدار سختی اولیه کمتر می‌شود که نشان دهنده افزایش تعداد ترک‌ها و همچنین افزایش عرض ترک می‌باشد.

۲- در نمونه قاب با مهاربند فولادی ترک‌های قائم در قسمت ورق اتصال گاست به مهاربند ایجاد شد. ولی حجم ترک‌های ایجاد شده در تیر و ستون به مراتب کمتر از قاب بتنی معمولی بود. با اضافه کردن مهاربند فلزی به قاب بتنی، اثر لاغرشدگی یا پینچینگ در منحنی کمتر شده است. همچنین مقدار مقاومت نیز افزایش زیادی داشته است.

در مقایسه با نمونه‌های قاب خمشی بتنی دیده می‌شود که مقدار جابجایی نهایی به میزان زیادی کاهش یافته است. همچنین مقدار مقاومت حداکثر نمونه افزایش یافته است که ناشی از اضافه شدن مهاربند به قاب خمشی بتنی است.

۳- در قاب با میراگر، ترک‌های ایجاد شده در تیر و ستون به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. عمده تغییرشکل‌ها در قسمت میراگر متمرکز شده و خرابی‌ها در قاب بتنی کمتر شده است. با فعال شدن میراگر تسلیمی، رفتار منحنی هیستریزس به صورت سخت‌شونده می‌باشد و نرم‌شوندگی قابل توجهی در آن دیده نمی‌شود. میراگر در همان لحظات اولیه بارگذاری فعال شده است. به دلیل اینکه مقدار نیروی تسلیم میراگر عدد کوچکی است، به عنوان فیوز عمل کرده است.

۴- با اضافه کردن مهاربند فولادی به قاب بتنی، مقاومت نمونه به مقدار ۴۸٪ نسبت به نمونه شاهد و با اضافه کردن میراگر تسلیمی به قاب بتنی، مقاومت نمونه‌ها به مقدار ۲۸٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت.

۷- قدردانی و تشکر

در پایان از آزمایشگاه سازه دانشگاه فردوسی مشهد که تدارک حضور و انجام آزمایشات این پژوهش را فراهم نمودند، کمال تشکر و سپاس را دارم و امید آن است که همچون سابق زمینه‌ساز پیشرفت اهداف علمی باشند.

مراجع

1. Abou-Elfath H, and Ghobarah A. (2000). Behaviour of reinforced concrete frames rehabilitated with concentric steel bracing. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(3), 433-444.
2. Ghobarah A, and Abou Elfath H. (2001). Rehabilitation of a reinforced concrete frame using eccentric steel bracing. *Engineering structures*, 23(7), 745-755.
3. Maheri MR, and Akbari R. (2003). Seismic behaviour factor, R, for steel X-braced and knee-braced RC buildings. *Engineering structures*, 25(12), 1505-1513.

4. Maheri MR, and Hadjipour A. (2003). *Experimental investigation and design of steel brace connection to RC frame. Engineering Structures, 25(13), 1707-1714.*
5. Maheri MR, Kousari R, and Razazan M. (2003). *Pushover tests on steel X-braced and knee-braced RC frames. Engineering Structures, 25(13), 1697-1705.*
6. Ferraioli M, Avossa AM, and Malangone P. (2006). *Performance-based assessment of R.C. buildings strengthened with steel braces. Proceedings of the 2nd International Congress Nalps, Italy.*
7. Zahrai SM, and Rad B. (2007). *Analytical investigation of TADAS damper applied in seismic rehabilitation & design of concrete structures. ESTEGHLAL, 25(2), 51-64.*
8. Alehashem SMS, Keyhani A, and Pourmohammad H. (2008). *Behavior and performance of structures equipped with ADAS & TADAS dampers (a comparison with conventional structures). In The 14th World Conference on Earthquake Engineering (pp. 12-17).*
9. Vargas R, and Bruneau M. (2009). *Analytical response and design of buildings with metallic structural fuses. I. Journal of Structural Engineering, 135(4), 386-393.*
10. Yen JYR, and Chien HK. (2010). *Steel plates rehabilitated RC beam-column joints subjected to vertical cyclic loads. Construction and Building Materials, 24(3), 332-339.*
11. Bayat M, and Abdollahzade GR. (2011). *Analysis of the steel braced frames equipped with ADAS devices under the far field records. Latin American Journal of Solids and Structures, 8(2), 163-181.*
12. Sharbatdar MK, Kheyroddin A, and Emami E. (2012). *Cyclic performance of retrofitted reinforced concrete beam-column joints using steel prop. Construction and Building Materials, 36, 287-294.*
13. Rais S, Ounis O, & Chebili R. (2013). *Study and modelling of dynamic behaviour of structures with energy dissipation devices type Adas. In 2nd Turkish Conference on Earthquake Engineering and Seismology-TDMSK-, Antakya, Hatay/Turkey (pp. 25-27).*
14. Khazaei M. (2013). *Investigation on dynamics nonlinear analysis of steel frames with steel dampers. Procedia Engineering, 54, 401-412.*
15. Sahoo DR, Singhal T, Taraithia SS, and Saini A. (2015). *Cyclic behavior of shear-and-flexural yielding metallic dampers. Journal of Constructional Steel Research, 114, 247-257.*
16. Ince G, Ince HH, and Ocal C. (2015). *Seismic behavior of RC frames retrofitted by eccentrically braced frames with vertical link. In 27th The IIER International Conference, Russia.*
17. Mahmoudi M, Abdi MGh, and Mahmoudi F. (2014). *Influence of the TADAS Dampers on the Ductility Reduction Factor of Steel Frames. 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul AUG.*
18. Aguiar R, Mora, D, and Rodríguez M. (2016). *CEINCI-LAB un software libre para hallar la curva de capacidad sismica de pórticos con disipadores ADAS o TADAS. Revista ingeniería de construcción, 31(1), 37-53.*
19. TahamouliRoudsari M, Eslamimanesh MB, Entezari AR, Noori O, and Torkaman M. (2018). *Experimental assessment of retrofitting RC moment resisting frames with ADAS and TADAS yielding dampers. In Structures (Vol. 14, pp. 75-87). Elsevier.*
20. Hemmati A, Kheyroddin A, and Farzad M. (2020). *Experimental study of reinforced concrete frame rehabilitated by concentric and eccentric bracing. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 8(1), 97-108.*

Analytical Investigation on The Impact Response of FRP-Retrofitted RC Slabs

Hesam Soltani

Ph.D. student of Structural Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Hatef Abdoos

Ph.D. student of Structural Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Alireza Khaloo*

Distinguished Professor, Department of civil engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

khaloo@sharif.edu

Abstract

This study aims to analytically investigate the impact response of FRP-retrofitted RC slabs. In this regard, based on the orthotropic plate theories, an applicable formulation is derived to assess the displacement of simply supported RC slabs due to the applied impact loading induced by dropping an impactor. The results have then been compared with the experimental data available in the literature. The proposed analytical formulation is proved to be reliable and efficacious to an extent that the displacement can be attained up to seven percent error. The effect of number of FRP layers and compressive reinforcement ratio have also been examined on the impact response of FRP-retrofitted RC slabs. The results indicate that adding 7 layers of GFRP strips to the bottom face of the RC slabs can attenuate the displacement values up to 33 percent. Moreover, the effect of compressive reinforcements on improving the impact response of RC slabs was estimated to be 30 and 23 percent, respectively, for RC slabs being examined.

Keywords: RC slabs; Analytical investigation; Orthotropic plates; Impact loading; FRP layers

* Corresponding Author

Soltani, H., Abdoos, H. Khaloo, A., (2021). 'Analytical investigation on the impact response of FRP-retrofitted RC slabs', *Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(2), pp. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.335415.1262> 2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

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