

Experimental Investigation of Cyclic Degradation of Light RC Beams under Periodic Loading

Taghi Mofid¹, Hamidreza Tavakoli^{2*}

1- PhD candidate, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2 -Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

Structural elements and systems experience a decrease in strength and stiffness throughout their lifetimes, called degradation. One of the most common types of degradation in RC (Reinforced Concrete) structures is the cyclic degradation caused by earthquakes. Structures that experience one or more earthquakes during their lifetime, experience a degree of degradation that affects their seismic response to subsequent earthquakes. Existing numerical models take into account the cyclic degradation of an earthquake, but many of these models neglect the effects of degradation caused by previous earthquakes; Recent studies show that this degradation has significant effects on the response of structural elements. In this study, the cyclic degradation of RC beams and their impact on the post-earthquake behavior of the beams is investigated experimentally. For this purpose, 12 RC beams are manufactured and subjected to displacement-control loading. Periodic loading with uniform amplitude is used to simulate the earthquake cyclic degradation. Three levels of slight, moderate and extensive degradation are selected to investigate the effect of cyclic degradation on the post-earthquake behavior of elements. After the experiment, the results of the hysteresis diagrams, strength degradation and energy absorption of the specimens are presented and discussed. The results of this study show that as the level of cyclic degradation increases, the energy absorption of RC beams decrease; Especially in the extensive level of degradation, the energy absorption of the beams is reduced by more than 40%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 January 2020

Revise Date: 14 May 2020

Accept Date: 27 May 2020

Keywords:

Cyclic degradation

RC Beams

Periodic loading

Hysteresis behavior

Post-earthquake behavior

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.217276.2060>

*Corresponding author: Hamidreza Tavakoli.

Email address: tavakoli@nit.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی زوال چرخه‌ای تیر بتن آرمه تحت بارگذاری تناوبی

تقی مفید^۱، حمیدرضا توکلی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

چکیده

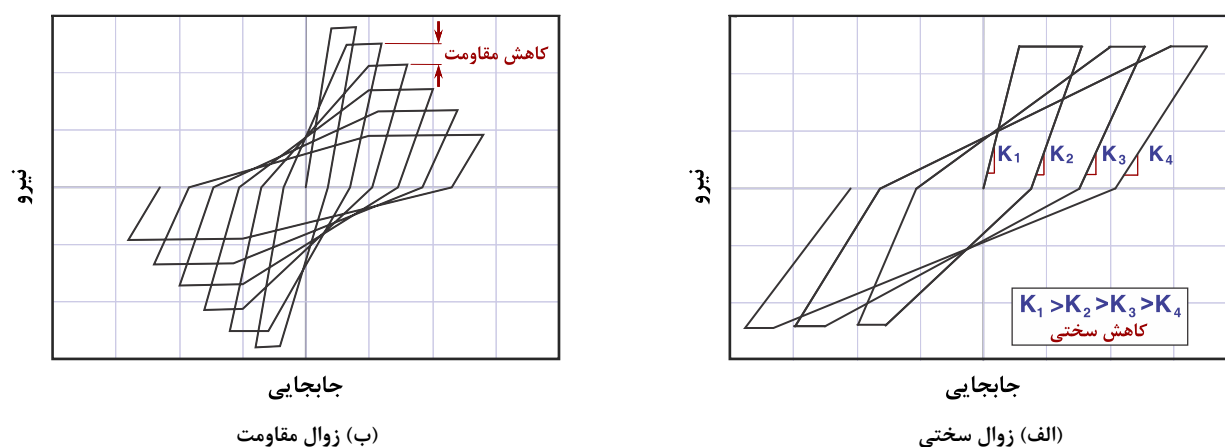
المان‌ها و سیستم‌های سازه‌ای در طول عمر خود دچار کاهش مقاومت و سختی می‌گردند که اصطلاحاً زوال نامیده می‌شود. یکی از متداول‌ترین نوع زوال در سازه‌های بتن آرمه، زوال چرخه‌ای می‌باشد که به دلیل بارهای رفت و برگشتی ناشی از زلزله ایجاد می‌شود؛ سازه‌هایی که در طول عمر خود، یک یا چند زلزله را تجربه می‌نمایند، دچار درجه‌ای از زوال می‌گردند که پاسخ لرزه‌ای آن‌ها را در برابر زلزله‌های بعدی تحت تأثیر قرار می‌دهد. مدل‌های رفتاری موجود، زوال چرخه‌ای حاصل از حرکت رفت و برگشتی در طول یک زلزله را در نظر می‌گیرند ولی بسیاری از این مدل‌ها اثرات زوال ناشی از زلزله‌های قبلی را در نظر نمی‌گیرند؛ در صورتی که این زوال می‌تواند اثرات قابل توجهی در رفتار المان‌های سازه‌ای داشته باشد. در این پژوهش، به بررسی زوال چرخه‌ای تیر بتن آرمه و تأثیر آن در رفتار بعد از زلزله آن‌ها به صورت آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. برای این منظور، ۱۲ تیر بتن آرمه با مشخصات یکسان ساخته شده و تحت بارگذاری جابجایی کنترل قرار می‌گیرند. برای ایجاد زوال ناشی از زلزله، از بارگذاری تناوبی با دامنه ثابت (هارمونیک) استفاده می‌شود. به منظور بررسی اثر زوال چرخه‌ای در رفتار بعد از زوال المان‌ها سه سطح زوال کم، متوسط و زیاد انتخاب می‌گردد. پس از انجام آزمایش، نتایج مربوط به نمودارهای هیستریزس، زوال مقاومت و ظرفیت جذب انرژی برای نمونه‌ها ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرند. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که با افزایش سطح زوال، میزان جذب انرژی تیرهای بتن آرمه کاهش می‌یابد؛ به خصوص در تیرهای با سطح زوال زیاد، میزان جذب انرژی تیرها بیش از ۴۰ درصد کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: زوال چرخه‌ای، تیر بتن آرمه، بارگذاری چرخه‌ای، پاسخ لرزه‌ای، رفتار هیستریزس.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.217276.2060	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.217276.2060	۱۴۰۰/۰۶/۳۱	۱۳۹۹/۰۳/۰۷	۱۳۹۹/۰۳/۰۷	۱۳۹۹/۰۲/۲۵	۱۳۹۸/۱۱/۰۷
حمیدرضا توکلی tavakoli@nit.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:			

۱- مقدمه

سازه‌های بتن آرمه در برابر بارهای رفت و برگشتی ناشی از زلزله، دچار زوال مقاومت و سختی می‌شوند که اختصاراً زوال چرخه‌ای نامیده می‌شود [۱]. در شکل ۱، مفهوم زوال چرخه‌ای در سازه‌های بتن آرمه با استفاده از نمودار هیستریزیس به صورت شماتیک بیان شده است. در این شکل، زوال چرخه‌ای در دو حالت زوال سختی و زوال مقاومت نشان داده شده است؛ در زوال سختی مقادیر سختی هر سیکل نسبت به سیکل قبلی کاهش می‌یابد (شکل ۱-الف) و در زوال مقاومت، مقادیر مقاومت بیشینه در هر سیکل نسبت به سیکل قبلی کاهش می‌یابد (شکل ۱-ب). المان‌ها و سیستم‌های سازه‌ای که در طول عمر خود یک یا چند زلزله را تجربه می‌کنند، دچار گونه‌ای از زوال مقاومت یا سختی و یا ترکیبی از آن‌ها می‌گردند.



تاکنون مدل‌های عددی زیادی برای شبیه‌سازی رفتار هیستریزیس المان‌های سازه‌ای و پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای ارائه شده است [۲]. این مدل‌ها زوال چرخه‌ای حاصل از حرکت رفت و برگشتی در طول یک زلزله را در با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود شبیه‌سازی می‌کنند؛ بسیاری از آزمایشات موجود در زمینه رفتار هیستریزیس المان‌های بتن آرمه، به بررسی المان سالم می‌پردازند و اطلاعات بسیار محدودی در مورد المان‌های آسیب‌دیده (المان‌هایی که قبلاً زلزله را تجربه نموده‌اند) وجود دارد؛ به همین دلیل، مدل‌های عددی نیز معمولاً زوال ناشی از زلزله‌های قبلی را در نظر نمی‌گیرند؛ در صورتی که مطالعات اخیر نشان می‌دهد که زوال ناشی از زلزله‌های قبلی اثر قابل‌توجهی در پاسخ لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای دارد [۳-۷]. در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی اثر زوال چرخه‌ای ناشی از زلزله‌های قبلی بر رفتار لرزه‌ای تیرهای بتن آرمه پرداخته می‌شود. برای این منظور، اثر زوال ناشی از زلزله‌های قبلی با استفاده از بارگذاری رفت و برگشتی با دامنه ثابت (تناوبی)، معادل می‌گردد؛ همچنین با هدف مطالعه دقیق‌تر اثر زوال چرخه‌ای، سه سطح زوال کم، متوسط و زیاد انتخاب و مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- تحقیقات آزمایشگاهی پیشین

آزمایشات متعددی برای بررسی عملکرد المان‌های بتن آرمه در برابر بارگذاری‌های چرخه‌ای انجام شده است [۸-۱۶]. یکی از مهم‌ترین آزمایشات انجام شده در این زمینه، آزمایشات انجام شده توسط کونات و همکاران [۸] می‌باشد. آن‌ها اثر بارگذاری چرخه‌ای با دامنه‌های ثابت را بر روی ستون‌های بتن آرمه پایه پل با مقیاس ۲۵ درصد بررسی کردند. نتایج آزمایشات آن‌ها نشان داد که دامنه‌های بارگذاری کمتر از دامنه تسلیم ($A < 2\Delta_y$) اثر قابل‌توجهی بر زوال مقاومت ستون‌های بتن آرمه ندارند؛ همچنین با افزایش دامنه بارگذاری، تعداد سیکل لازم برای گسیختگی کامل کاهش می‌یابد. در آزمایشی دیگر، آکان و سوچواغلو [۹] دوازده نمونه ستون بتن آرمه با مقیاس کامل را تحت بارگذاری چرخه‌ای تکراری مورد مطالعه قرار دادند. مشاهدات آن‌ها نشان داد که استفاده از بارگذاری‌های چرخه‌ای با دامنه

ثابت کمتر از $3/5$ درصد دریافت، اگرچه تأثیر زیادی بر روی منحنی‌های ظرفیت المان‌های بتن‌آرمه ندارند ولی موجب افت مقاومت و سختی در چرخه‌های با دامنه بالا (یعنی دامنه دریافت نهایی) می‌شوند. در سال ۲۰۱۵، نوجوان [۱۰] اثر چرخه‌های افزایشی زیر $3/7$ درصد دریافت را بر ظرفیت تغییرشکل ستون‌های مستطیلی در چرخه‌های بعدی بررسی کرد. نتایج آزمایشات وی نشان داد که چرخه‌های افزایشی زیر $3/7$ درصد دریافت باعث تغییر ظرفیت تغییرشکل ستون‌ها در جابجایی‌های بزرگ نمی‌شود.

اگرچه در بیشتر مطالعات آزمایشگاهی به بررسی رفتار لرزه‌ای ستون‌های بتن‌آرمه پرداخته شده است ولی به دو دلیل می‌توان گفت که تیرها بیشتر از ستون‌ها مستعد زوال و تشکیل مفاصل پلاستیک هستند: دلیل اول اینکه عموماً آئین‌نامه‌های سازه‌های بتن‌آرمه، تأکید بر رعایت ضابطه تیر ضعیف و ستون قوی می‌نمایند و بدیهی است که احتمال ایجاد آسیب و مفاصل پلاستیک در تیرهای ضعیف بیشتر از ستون‌های قوی خواهد بود؛ دلیل دوم اینکه تیرها برخلاف ستون‌ها فاقد نیروی محوری هستند، به همین دلیل ظرفیت کمتری نسبت به ستون‌ها خواهند داشت. از طرفی دیگر، در اکثر آزمایشات انجام شده بر روی رفتار سیکلی المان‌های بتن‌آرمه، از پروتکل‌های بارگذاری شبه استاتیکی با سرعت بسیار پائین استفاده شده است [۱۱]؛ در صورتی که نرخ بارگذاری زلزله نسبت به پروتکل‌های شبه استاتیکی بسیار زیاد بوده و تأثیر قابل توجهی در پاسخ لرزه‌ای المان‌های بتن‌آرمه دارد [۱۷-۲۰].

با توجه به توضیحات فوق، در پژوهش حاضر، اثر زوال چرخه‌ای در تیرهای بتن‌آرمه به صورت آزمایشگاهی و با در نظر گرفتن نرخ بارگذاری بررسی می‌شود.

۳- زوال چرخه‌ای ناشی از زلزله

۳-۱ بارگذاری سیکلی معکوس

متداول‌ترین روش برای بررسی رفتار المان‌های سازه‌ای در برابر زلزله، استفاده از بارگذاری‌های سیکلی معکوس می‌باشد که منجر به تولید منحنی‌های هیستریزیس با شکل‌های نسبتاً منظم می‌شوند [۲۱]. تاکنون پروتکل‌های بارگذاری متعددی برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای المان‌ها ارائه شده است. شکل ۲ نمونه‌ای از این پروتکل‌ها را نشان می‌دهد. این پروتکل‌ها از چندین سیکل تشکیل شده‌اند و برای اینکه بتوانند ماهیت رفت و برگشتی زلزله را شبیه‌سازی نمایند، در هر سیکل، دو بار جهت اعمال بارگذاری جهت اعمال بارگذاری به عنوان اصلی‌ترین عامل زوال چرخه‌ای محسوب می‌شود. زیرا که با عوض شدن جهت بارگذاری، ترک‌های باز شده در المان شروع به بسته شدن کرده و ترک‌های جدیدی نیز شروع به باز شدن می‌نمایند؛ در حقیقت، تکرار این چرخه، موجب ایجاد ترک‌های جدید و رشد ترک‌های قبلی شده و موجب کاهش مقاومت و سختی المان می‌گردد. این پروتکل‌ها عموماً به صورت جابجایی کنترل می‌باشند و با اعمال آن به المان‌های سازه‌ای، پاسخ هیستریزیس المان‌ها حاصل می‌شود. منحنی‌های هیستریزیس، زوال چرخه‌ای را به وضوح نمایش می‌دهند و مدل‌های عددی نیز با استفاده از این منحنی‌ها به پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای المان‌ها می‌پردازند. در میان مدل‌های عددی ارائه شده، روش‌های مختلفی برای در نظر گرفتن رفتار هیستریزیس ارائه شده است. از جمله این روش‌ها عبارت‌اند از مدل الاستوپلاستیک^۱، مدل سخت‌شوندگی مقاومتی^۲، مدل زوال سختی^۳، مدل جمع شدگی^۴، مدل زوال مقاومت چرخه‌ای^۵، مدل ترکیبی زوال سختی و مقاومت^۶ و مدل زوال مقاومت درون سیکلی^۷. مطالعات مختلفی در مورد عملکرد مدل‌های فوق در سیستم‌های سازه‌ای مختلف انجام شده است [۲۲-۲۶]. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر، زوال مقاومت چرخه‌ای تیرهای بتن‌آرمه مورد بررسی و آزمایش قرار می‌گیرد؛ لذا در ادامه به تعاریف ارائه شده در مورد زوال مقاومت چرخه‌ای پرداخته می‌شود.

¹ Elasto-Plastic Behavior

² Strength-Hardening Behavior

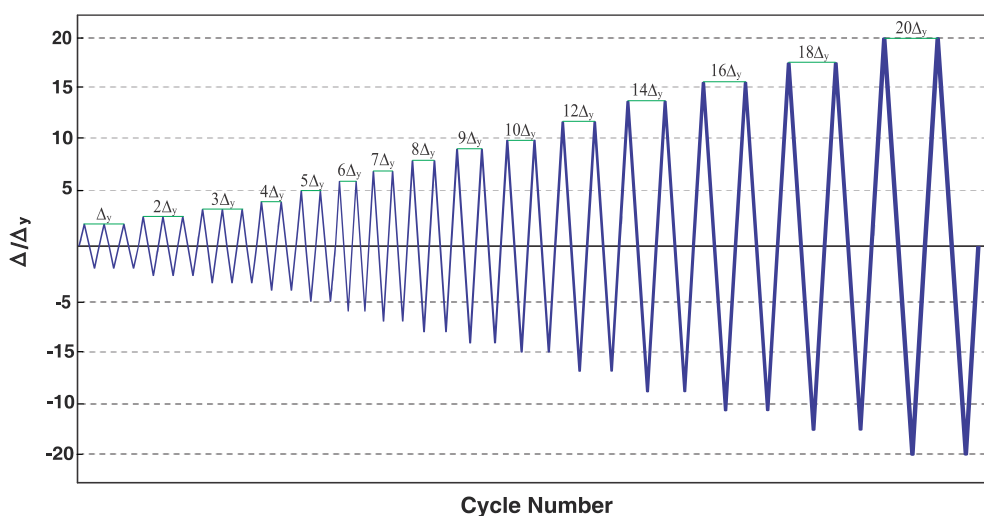
³ Stiffness-Degrading Behavior

⁴ Pinching Behavior

⁵ Cyclic Strength Degradation

⁶ Combined Cyclic Stiffness and Strength Degradation

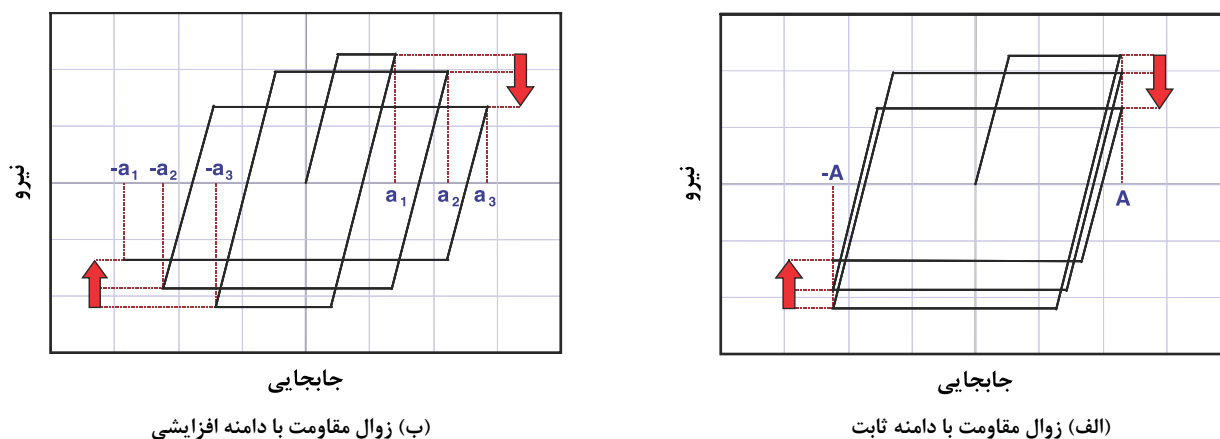
⁷ In-Cycle Strength Degradation



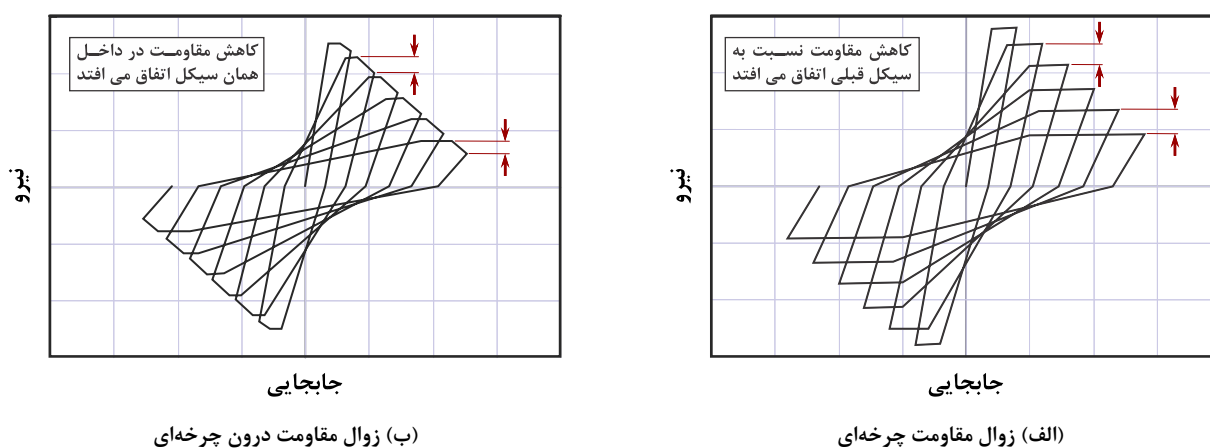
شکل ۲: پروتکل بارگذاری سیکلی معکوس

۳-۲ زوال مقاومت چرخه‌ای و انواع آن

زوال مقاومت چرخه‌ای عموماً به دلیل اثرات غیرخطی مصالح و اثرات غیرخطی هندسی ($P-\Delta$) و یا ترکیبی از آن‌ها اتفاق می‌افتد. در المان‌های بتن‌آرمه اثرات غیرخطی مصالح و هندسی موجب وقوع پدیده‌هایی مانند کنده شدن پوشش بتن (کاور)، تخریب بتن، ترک برشی، بریدن یا کماتش میلگردهای سراسری می‌شود. به‌طور کلی، مدل‌های هیستریزیسی که زوال مقاومت چرخه‌ای را در نظر می‌گیرند به چهار شیوه عمل می‌نمایند که در شکل ۳ و ۴ به توضیح هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود [۲۶-۲۲]. شکل ۳ زوال مقاومت چرخه‌ای مربوط به دو حالت دامنه ثابت و دامنه افزایشی را نشان می‌دهد. در حالت دامنه ثابت، افت مقاومت زمانی اتفاق می‌افتد که یک سیکل با دامنه ثابت، چندین بار تکرار می‌شود (شکل ۳-الف)؛ مدل‌های هیستریزیسی که این نوع زوال را در نظر می‌گیرند، عموماً کاهش مقاومت را به صورت تابعی از انرژی هیستریزیس مستهلک‌شده در نظر می‌گیرند که برابر است با مساحت داخل چرخه‌های هیستریزیس. در شکل ۳-ب نیز افزایش دامنه موجب افت مقاومت در سیکل‌های بعدی می‌شود. مدل‌های هیستریزیسی که این نوع زوال را در نظر می‌گیرند، میزان کاهش مقاومت را تابعی از سطح شکل‌پذیری در نظر می‌گیرند که از رابطه $\mu = \frac{u_{max}}{u_y}$ محاسبه می‌گردد و u_y و u_{max} به ترتیب برابر جابجایی حداکثر و جابجایی تسلیم می‌باشند. همان‌طوری که قبلاً نیز اشاره شد، در هر دو حالت الف و ب، افت مقاومت زمانی اتفاق می‌افتد که جهت بارگذاری تغییر می‌کند؛ به عبارتی دیگر افت مقاومت در لحظه‌ی باربرداری اتفاق می‌افتد؛ از طرفی دیگر، در هر دو حالت شکل ۳، فرض شده است که سختی در طول سیکل ثابت می‌ماند؛ در صورتی که امکان وقوع زوال سختی و مقاومت به صورت هم‌زمان وجود دارد. به همین دلیل شکل ۴ نوع دیگری از زوال مقاومت را ارائه می‌دهد که نه تنها زوال مقاومت و سختی را به صورت هم‌زمان در نظر می‌گیرد بلکه به زوال مقاومت ایجاد شده در طول هر سیکل نیز توجه می‌کند. شکل ۴ زوال مقاومت را به دو حالت چرخه‌ای و درون چرخه‌ای دسته‌بندی نماید. در حالت چرخه‌ای، مقاومت بیشینه هر سیکل بعد از پایان سیکل کاهش می‌یابد؛ در صورتی که در حالت درون چرخه‌ای، افت مقاومت در طول هر سیکل اتفاق می‌افتد. بسیاری از المان‌ها و سیستم‌های سازه‌ای که در معرض زلزله قرار می‌گیرند، ترکیبی از زوال‌های مقاومت اشاره‌شده را تجربه می‌کنند.



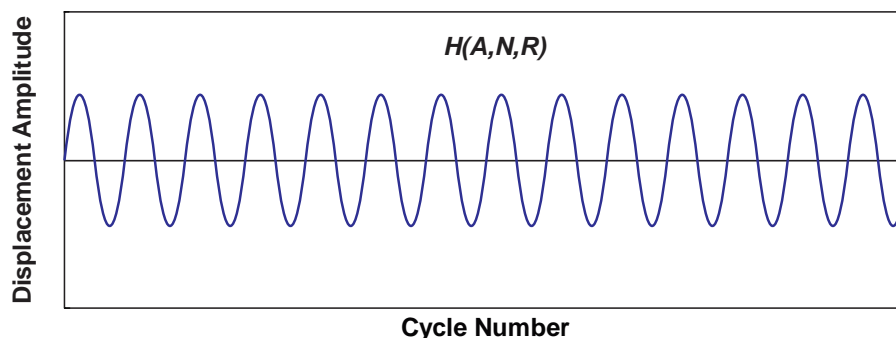
شکل ۳: انواع زوال مقاومت چرخه‌ای با سختی ثابت



شکل ۴: تفاوت زوال مقاومت چرخه‌ای و درون چرخه‌ای

۳-۳ بارگذاری تناوبی با دامنه ثابت

در این پژوهش، برای معادل سازی زوال ناشی از زلزله‌های قبلی از بارگذاری تناوبی با دامنه ثابت (هارمونیک) مطابق شکل ۵ استفاده شد. ایده معادل سازی اثرات زلزله با استفاده از بارگذاری هارمونیک با دامنه ثابت، اولین بار توسط سید و همکاران [۲۷] برای بررسی اثرات زلزله بر پدیده روانگرایی خاک ارائه شد. بارگذاری‌های هارمونیک به دلیل مزایایی که دارند برای شبیه‌سازی اثرات زلزله بر المان‌های سازه‌ای نیز توسط برخی محققین [۸، ۲۸] استفاده شده است. از جمله مزایای بارگذاری هارمونیک می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) با توجه به ثابت بودن دامنه در این نوع بارگذاری‌ها اثر تغییرات دامنه بر زوال چرخه‌ای حذف شده و مشاهده‌ی میزان افت مقاومت در پاسخ المان‌ها، ساده‌تر خواهد بود؛ (۲) این نوع بارگذاری‌ها آسیب تجمعی ناشی از زلزله را در سیکل‌های متوالی و به صورت منظم ایجاد می‌کنند و به راحتی می‌توان میزان آسیب را با کم و زیاد کردن تعداد سیکل و یا دامنه، مدیریت کرد؛ (۳) به دلیل ثابت بودن دامنه در کلیه سیکل‌ها، امکان بارگذاری با سرعت و فرکانس ثابت در آزمایشگاه فراهم می‌باشد؛ در صورتی که در بارگذاری‌های سیکلی افزایشی امکان بارگذاری با سرعت و فرکانس ثابت مقدور نیست. مطابق شکل ۵، برای تعریف پروتکل بارگذاری هارمونیک، سه پارامتر دامنه (A)، تعداد سیکل (N) و نرخ بارگذاری (R) می‌بایست تعیین گردند که در ادامه به توضیح هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود.



شکل ۵: بارگذاری تناوبی با دامنه ثابت (هارمونیک)

۳-۳-۱ دامنه A

مطالعات آزمایشگاهی قبلی نشان می‌دهند که اعمال بارگذاری‌های تکراری با دامنه‌های کمتر از Δ_y (جابجایی تسلیم)، تأثیر چندانی بر پاسخ المان‌های سازه‌ای در بارگذاری‌های بعدی ندارند [۸-۱۰]. برای انتخاب دامنه‌های بارگذاری هارمونیک، ابتدا باید جابجایی متناظر نقطه‌ی تسلیم یعنی Δ_y تعیین گردد. برای این هدف، دو نمونه تیر تحت بارگذاری مونوتونیک قرار داده شد و از میانگین نتایج آن‌ها جابجایی تسلیم برابر $\Delta_y = 1.85 \text{ mm}$ تعیین گردید (در قسمت ۵-۱ توضیح داده شده است). همان‌طوری که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، سه دامنه‌ی $1\Delta_y$ ، $2\Delta_y$ و $3\Delta_y$ به عنوان دامنه‌های بارگذاری هارمونیک انتخاب شدند.

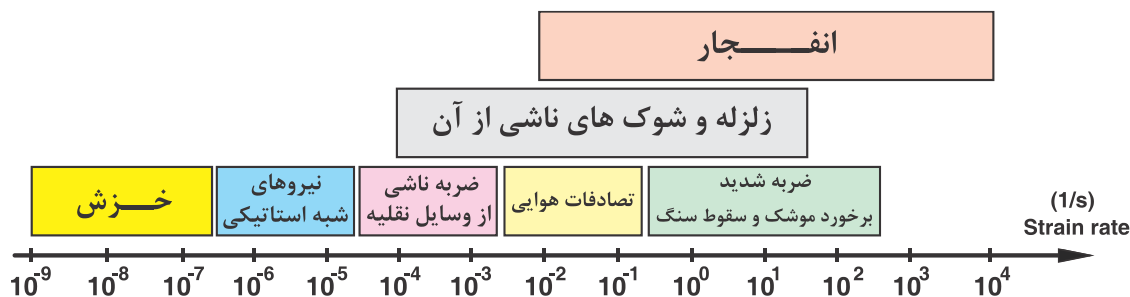
۳-۳-۲ تعداد سیکل N

تعیین تعداد سیکل لازم در یک بارگذاری هارمونیک، به دامنه بارگذاری (A) وابسته است و هرچه دامنه بارگذاری بزرگ‌تر باشد، تعداد سیکل کمتری برای رسیدن به یک سطح زوال مشخص، لازم خواهد بود. یکی از چالش‌های مطرح‌شده در این پژوهش، چگونگی تعیین سطح زوال ناشی از زلزله بود؛ برای این کار، دو روش مطرح است؛ در روش اول، سطح زوال با توجه به تاریخچه زلزله تعیین می‌گردد و در روش دوم سطح زوال با توجه به پاسخ لرزه‌ای خود المان به دست می‌آید. اگرچه روش اول دقت بالاتری در تعیین سطح زوال خواهد داشت ولی سطح زوال به دست آمده از این روش، متأثر از نوع زلزله خواهد بود (یعنی در صورت تغییر تاریخچه زلزله، سطح زوال نیز تغییر خواهد یافت). در روش دوم سطح زوال مستقل از نوع زلزله بوده و صرفاً به پاسخ خود المان بستگی خواهد داشت. در این آزمایش از روش دوم که جامع‌تر می‌باشد، استفاده گردید. در اکثر آزمایشات قبلی [۸-۱۰] شاخص خرابی المان به صورت تابعی از مقاومت بیشینه المان تعریف شده است و به صورت قراردادی، نقطه‌ای که مقاومت المان نسبت به مقاومت بیشینه خود، به اندازه ۲۰ درصد افت نماید به عنوان نقطه‌ی خرابی کامل در نظر گرفته شده است. در این پژوهش برای تعیین شاخص زوال، سه نمونه تحت بارگذاری هارمونیک کامل قرار گرفتند تا به خرابی کامل برسند (در بخش ۵-۲ توضیح داده شده است). سپس با استفاده از نمودار کاهش مقاومت، سه سطح زوال کم، متوسط و زیاد به ترتیب برابر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد افت در مقاومت تعریف شدند (شکل ۱۲).

۳-۳-۳ نرخ بارگذاری R

در آزمایشات انجام شده بر روی رفتار چرخه‌ای المان‌های بتن‌آرمه، عموماً از پروتکل‌های بارگذاری شبه استاتیکی با سرعت بسیار پائین می‌شود [۱۱]؛ در صورتی که نرخ بارگذاری زلزله نسبت به پروتکل‌های شبه استاتیکی بسیار زیاد بوده و تأثیر قابل توجهی در پاسخ لرزه‌ای المان‌های بتن‌آرمه دارد [۱۷-۲۰]. شکل ۶ محدوده نرخ کرنش ایجاد شده در المان‌ها را تحت رویدادهای مختلف نشان می‌دهد [۲۹].

مطابق این شکل، نرخ کرنش ناشی از زلزله در محدوده 10^{-4} تا $10^{-1/5}$ می‌باشد. با توجه به تجربیات نویسندگان در آزمایشات قبلی [۲۸] و با توجه به ظرفیت دستگاه بارگذاری، نرخ بارگذاری هارمونیک برابر $0/3$ هرترز در نظر گرفته شد تا هم در محدوده‌ی نرخ زلزله بوده و هم در محدوده فرکانس مجاز دستگاه بارگذاری قرار گیرد. سرعت بارگذاری مربوط به بارگذاری نمونه‌ها در جدول ۸ آمده است. همان‌طوری که در این جدول نشان داده شده، با توجه به اینکه دستگاه بارگذاری مورد استفاده در این پژوهش، دارای سرعت ثابت می‌باشد و امکان تغییر سرعت در طول بارگذاری در آن‌ها ممکن نیست لذا کلیه بارگذاری‌های سیکلی افزایشی با سرعت 400 (mm/min) انجام شد.



شکل ۶: نرخ کرنش ناشی از رویدادهای واقعی [۲۹]

۴- طرح آزمایش

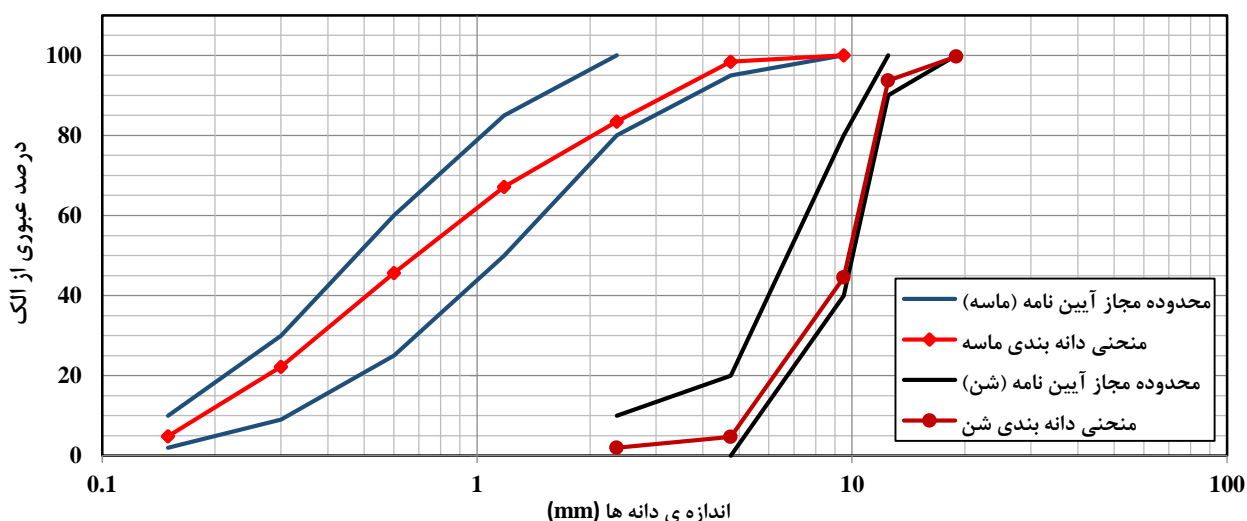
در این آزمایش، ۱۲ تیر بتن‌آرمه با مشخصات یکسان ساخته شد؛ جزئیات مربوط به مشخصات مصالح مصرفی، مشخصات هندسی، الگوی بارگذاری و راه‌اندازی آزمایش در ادامه شرح داده شده است.

۴-۱- مشخصات مصالح

مشخصات مصالح مصرفی برای کلیه نمونه‌ها یکسان بوده و همه آن‌ها از یک طرح اختلاط، ساخته شدند. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ ۲ بوده و نسبت آب به سیمان برابر $0/31$ می‌باشد. طرح اختلاط بتن بر اساس روش پیشنهاد شده توسط استاندارد ACI-211 [۳۰] برای مقاومت ۲۸ روزه ۳۵ مگاپاسگال طراحی شد. قطر بزرگ‌ترین سنگ‌دانه مصرفی برای مصالح ریزدانه و درشت‌دانه به ترتیب برابر $4/75$ و $12/5$ انتخاب شدند. جدول ۱ مقادیر وزنی طرح اختلاط استفاده شده را نشان می‌دهد. ماسه مصرفی در این آزمایش از نوع ماسه معمولی بوده و الزامات مربوط به استاندارد ASTM-C33M [۳۱] را شامل می‌باشد. مصالح درشت‌دانه مصرفی نیز از نوع سبک‌دانه‌های معدنی اسکوریا انتخاب شد که الزامات مربوط به استاندارد ASTM-C330M [۳۲] را به صورت کامل ارضا می‌نماید. شکل ۷ نمودار دانه‌بندی مصالح ریزدانه و درشت‌دانه را نشان می‌دهد که در محدوده مجاز قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایشات مربوط به چگالی مصالح نشان داد که مقادیر چگالی توده‌ای برای مصالح ریزدانه و درشت‌دانه به ترتیب برابر 1865 و 950 کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد.

جدول ۱: مقادیر وزنی مصالح برای یک مترمکعب بتن

مصلح	وزن (کیلوگرم)
سیمان پرتلند تیپ ۲	۴۷۰
درشت‌دانه	۵۳۸
ریزدانه	۵۷۴
آب	۱۴۳
فوق روان‌کننده	۲/۴



شکل ۷: منحنی دانه بندی شن و ماسه

در این تحقیق از دو نوع میلگرد برای آرمه کردن بتن استفاده شد. میلگرد $\text{Ø}10$ به عنوان میلگرد سراسری و میلگرد $\text{Ø}8$ به عنوان میلگرد عرضی استفاده شد. میلگرد $\text{Ø}10$ از نوع میلگرد A3 و میلگرد $\text{Ø}10$ از نوع میلگرد A2 بوده و به منظور تعیین تنش تسلیم و نهایی این میلگردها ۳ نمونه از هر میلگرد تحت آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM-A370 [۳۳] قرار گرفتند. نتایج این آزمایشات نشان داد که تنش تسلیم و نهایی میلگرد $\text{Ø}10$ به ترتیب برابر ۴۰۵ و ۶۱۰ مگاپاسگال و برای میلگرد $\text{Ø}10$ به ترتیب برابر ۳۷۰ و ۵۸۱ مگاپاسگال می باشد.

۲-۴- نحوه ساخت و عمل آوری نمونه ها

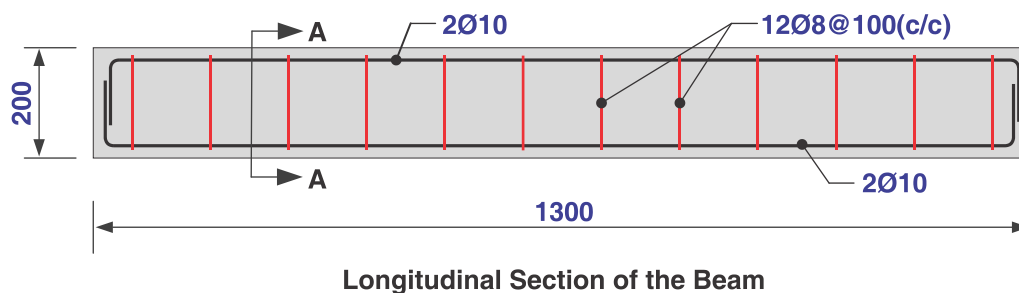
برای ساخت مخلوط بتن، ابتدا درشت دانه و سپس ریزدانه درون میکسر ریخته شده و با هم مخلوط شده سپس به ترتیب سیمان و آب حاوی فوق روان کننده به تدریج به مخلوط اضافه شدند. پس از اختلاط کامل مصالح با یکدیگر، بتن تازه در قالب های موردنظر که از قبل روغن کاری شده اند، در سه لایه ریخته شد. مطابق شکل ۸ قفسه میلگردهای تیر که از قبل بافته شده بود درون قالب قرار گرفته و عملیات متراکم کردن مخلوط های بتن توسط ویبره دستی انجام گرفت. سپس سطح نمونه ها صاف شده و روی آن ها را با یک نایلون خیس پوشانده تا آب بتن تبخیر نشود و عمل هیدراتاسیون به صورت صحیح انجام گیرد. بعد از ۲۴ ساعت نمونه ها از قالب خارج شدند و با استفاده از گونی های مرطوب پوشانده شدند تا رسیدن به سن ۲۸ روز، تحت عمل آوری در دمای 25 ± 4 قرار گرفتند. با توجه محدودیت حجمی میکسر های آزمایشگاهی در هر میکسر دو نمونه تیر ساخته می شد و برای کنترل مقاومت میکسر های مختلف، از هر میکسر سه عدد نمونه استوانه ای تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند.



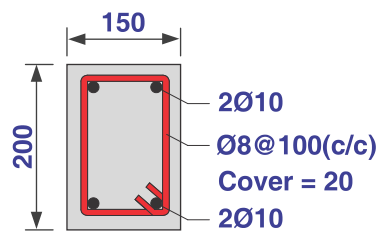
شکل ۸: جزئیات ساخت نمونه‌ها

۳-۴- جزئیات نمونه‌ها

در این تحقیق، ۱۲ تیر بتن‌آرمه با مشخصات یکسان و با مقیاس ۵۰ درصد ساخته شدند. برای طراحی این تیرها از آئین‌نامه طراحی ACI-318 [۳۴] استفاده شد. شکل ۹ مقطع عرضی و طولی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، طول تیرها برابر ۱۳۰۰ میلی‌متر و مقطع عرضی تیرها دارای ۱۵۰ میلی‌متر عرض و ۲۰۰ میلی‌متر ارتفاع می‌باشد؛ لازم به ذکر است که این ابعاد با در نظر گرفتن محدودیت تکیه‌گاه و ظرفیت دستگاه بارگذاری انتخاب شدند. مطابق شکل ۱۲، در هر نمونه از ۲ میلگرد $\varnothing 10$ در بالا و پائین مقطع به عنوان آرماتورهای طولی و ۱۲ عدد خاموت $\varnothing 8$ نیز به عنوان آرماتور عرضی در طول تیر و با فاصله مرکز به مرکز ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شدند. به منظور جلوگیری از لغزش میلگرد در داخل بتن، دو سر میلگردهای سراسری به اندازه ۱۲۰ میلی‌متر و به صورت خم استاندارد ۹۰ درجه و میلگردهای عرضی نیز با استفاده از خم ۱۳۵ درجه خم شدند. مطابق توصیه آئین‌نامه، موقعیت قرارگیری خم ۱۳۵ درجه‌ی خاموت‌ها در طول تیر به صورت گردشی در نظر گرفته شدند.



Longitudinal Section of the Beam



Section A-A

شکل ۹: جزئیات هندسی نمونه‌ها

۴-۴- راه‌اندازی آزمایش و مشخصات دستگاه

این آزمایش در محل آزمایشگاه سازه و زلزله دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و با استفاده از دستگاه^۸ UTM با ظرفیت بارگذاری ۱۵۰ کیلونیوتن انجام شد. شکل ۱۰ نمای شماتیک و آزمایشگاهی آزمایش را نشان می‌دهد. مطابق این شکل در ابتدا و انتهای تیرها دو تکیه‌گاه غلتکی و مفصلی تعبیه شدند و با توجه به اینکه بارگذاری تیرها به صورت رفت و برگشتی انجام می‌شد قسمت فوقانی تیرها با استفاده از ۴ بولت فولادی به IPE400 بسته شد. نحوه بارگذاری نمونه‌ها به صورت جابجایی کنترل بوده و در مرکز تیر به صورت جابجایی نقطه‌ای اعمال گردید. به منظور جلوگیری از ایجاد برش سوراخ کننده و خرابی موضع در محل اعمال بار نقطه‌ای دو صفحه فولادی به ابعاد ۱۸۰×۱۰۰×۱۰ نیز در قسمت فوقانی و تحتانی محل اعمال بار، تعبیه شدند. در طول بارگذاری هر تیر، میزان جابجایی مرکز تیر و نیروی متناظر آن با استفاده از لودسل و LVDT^۹ به صورت خودکار و توسط کامپیوتر متصل به دستگاه، ذخیره شدند.

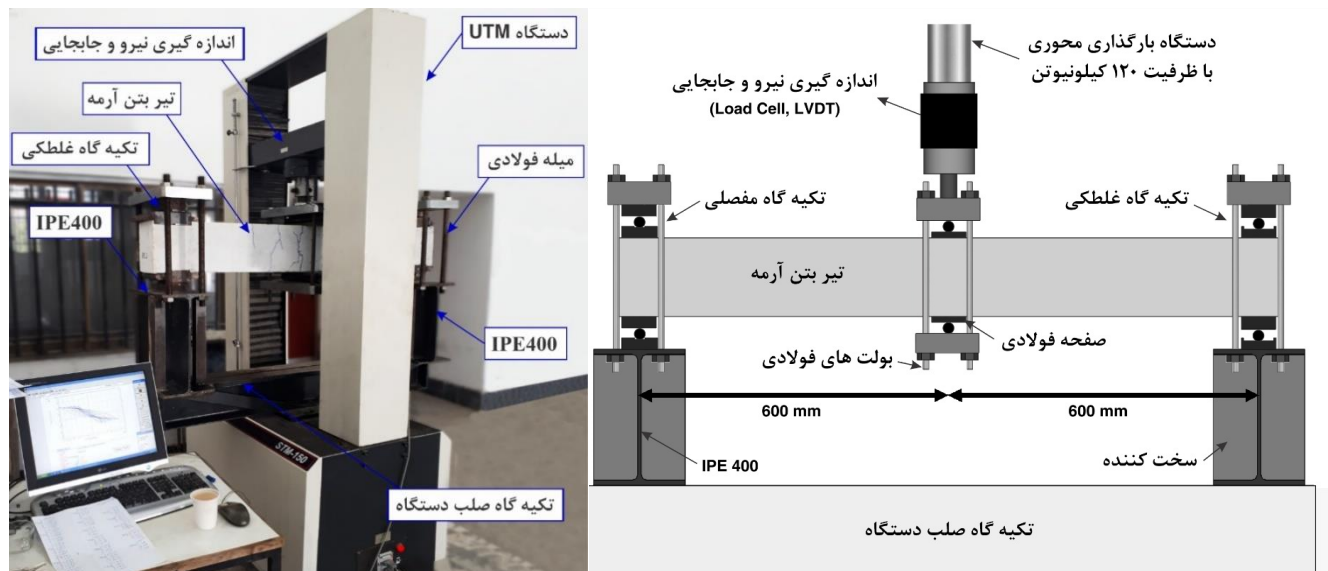
۴-۵- روش بارگذاری

جدول ۲ خلاصه بارگذاری‌های انجام شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. مطابق این جدول، دو نمونه تحت بارگذاری مونوتونیک تا گسیختگی کامل قرار گرفتند (نمونه‌های MON1 و MON2). یک نمونه تحت بارگذاری سیکلی معکوس قرار گرفت که اختصاراً CYC نامیده شد. سه نمونه FH-1، FH-2 و FH-3 تحت بارگذاری هارمونیک تا گسیختگی کامل قرار گرفتند. شش نمونه بعدی نیز به صورت دو مرحله‌ای بارگذاری شدند؛ بدین صورت که در مرحله اول تحت بارگذاری هارمونیک و در مرحله دوم تحت بارگذاری سیکلی معکوس قرار گرفتند؛ به عبارت دیگر، در مرحله اول نمونه‌ها توسط بارگذاری هارمونیک تا سطحی مشخص از زوال، بارگذاری می‌شدند و به منظور مطالعه رفتار نمونه‌های آسیب‌دیده، در مرحله دوم تحت بارگذاری سیکلی معکوس قرار می‌گرفتند. این نمونه‌ها اختصاراً H-C نامیده شدند. مطابق جدول ۲، نمونه‌های H-C به سه نوع S، M و E دسته‌بندی شده‌اند که این حروف به ترتیب نمایانگر سطح زوال کم، متوسط و زیاد در بارگذاری هارمونیک (مرحله ۱) می‌باشد که در بخش ۶-۲ توضیح داده شده است؛ یکی از اهداف این دسته‌بندی بررسی تأثیر سطوح

^۸ Universal Testing Machine

^۹ Linear Variable Differential Transducer

مختلف زوال در رفتار سیکلی نمونه‌ها در مرحله ۲ می‌باشد. در این جدول حرف H بیانگر بارگذاری هارمونیک، حرف C نمایانگر بارگذاری سیکلی معکوس، عدد بعد از A بیانگر ضریب Δ_y و عدد بعد از N نشان دهنده تعداد سیکل هارمونیک می‌باشد.



ب: جزئیات آزمایشگاهی اجرای آزمایش

الف: نمای شماتیک اجرای آزمایش

شکل ۱۰: جزئیات راه‌اندازی آزمایش

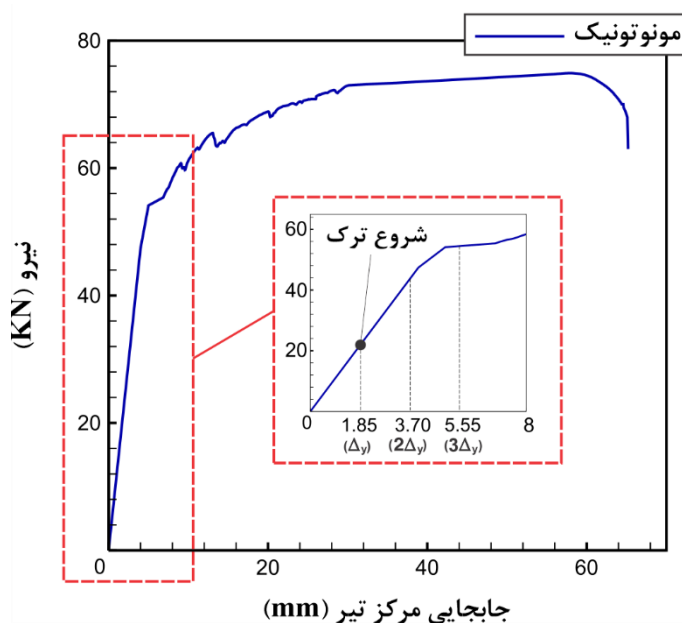
جدول ۲: جزئیات بارگذاری نمونه‌ها

نام نمونه	مرحله ۲		مرحله ۱				نوع بارگذاری
	بارگذاری سیکلی معکوس		بارگذاری هارمونیک				
	Speed (mm/sec)	R (هرتز)	Speed (mm/sec)	R (هرتز)	N	A	
MON1	-	-	-	-	-	-	مونوتونیک کامل
MON2	-	-	-	-	-	-	مونوتونیک کامل
CYC	400.0	Var	-	-	-	-	سیکلی معکوس (نمونه مرجع)
FH-1	-	-	133.2	0.3	-	1 Δ_y	هارمونیک کامل با دامنه $y\Delta$
FH-2	-	-	266.4	0.3	-	2 Δ_y	هارمونیک کامل با دامنه $y\Delta 2$
FH-3	-	-	400.0	0.3	-	3 Δ_y	هارمونیک کامل با دامنه $y\Delta 3$
H-A1N100-C	400.0	Var	133.2	0.3	100	1 Δ_y	زوال کم
H-A2N100-C	400.0	Var	266.4	0.3	100	2 Δ_y	زوال متوسط
H-A3N100-C	400.0	Var	400.0	0.3	100	3 Δ_y	زوال زیاد
H-A2N20-C	400.0	Var	266.4	0.3	20	2 Δ_y	زوال کم
H-A2N140-C	400.0	Var	266.4	0.3	140	2 Δ_y	زوال متوسط
H-A2N230-C	400.0	Var	266.4	0.3	230	2 Δ_y	زوال زیاد

۵- بررسی و تفسیر نتایج

۵-۱- بارگذاری مونوتونیک

در بارگذاری‌های مونوتونیک، دامنه بارگذاری به صورت افزایشی و با سرعت ثابت (شتاب صفر) در نظر گرفته شد تا اثرات دینامیکی ناشی از شتاب، حذف شود. بارگذاری مونوتونیک نمونه‌ها با سه هدف زیر انجام شد: (۱) بررسی نقطه شروع ترک به منظور تعیین جابجایی تسلیم؛ (۲) تعیین دامنه‌های بارگذاری هارمونیک؛ (۳) مقایسه منحنی مونوتونیک با منحنی پوش هیستریزس. در این آزمایش، ۲ نمونه MON1 و MON2 به صورت مونوتونیک بارگذاری شدند که شکل ۱۱، میانگین دو حالت را نشان می‌دهد. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، اولین ترک در نمونه‌ها در جابجایی‌های $\Delta_y = 1.80 \text{ mm}$ و $\Delta_y = 1.90 \text{ mm}$ اتفاق افتاد، بنابراین جابجایی تسلیم نمونه‌ها به صورت میانگین برابر $\Delta_y = 1.85 \text{ mm}$ به دست می‌آید. بعد از تعیین جابجایی تسلیم نمونه‌ها می‌بایست دامنه‌های بارگذاری هارمونیک انتخاب شود. همان‌طوری که در بخش ۳-۳-۱ نیز اشاره شد، دامنه‌های کمتر از Δ_y (ناحیه الاستیک)، تأثیر چندانی بر پاسخ المان‌های سازه‌ای خواهند داشت و دامنه هارمونیک می‌بایست در محدوده بعد از تسلیم انتخاب شود. مطابق شکل ۱۱ و با توجه به مشاهدات نویسندگان در آزمایشات قبلی [۳۵-۳۷] سه دامنه Δ_y ، $2\Delta_y$ و $3\Delta_y$ به عنوان دامنه‌های بارگذاری هارمونیک انتخاب شدند.

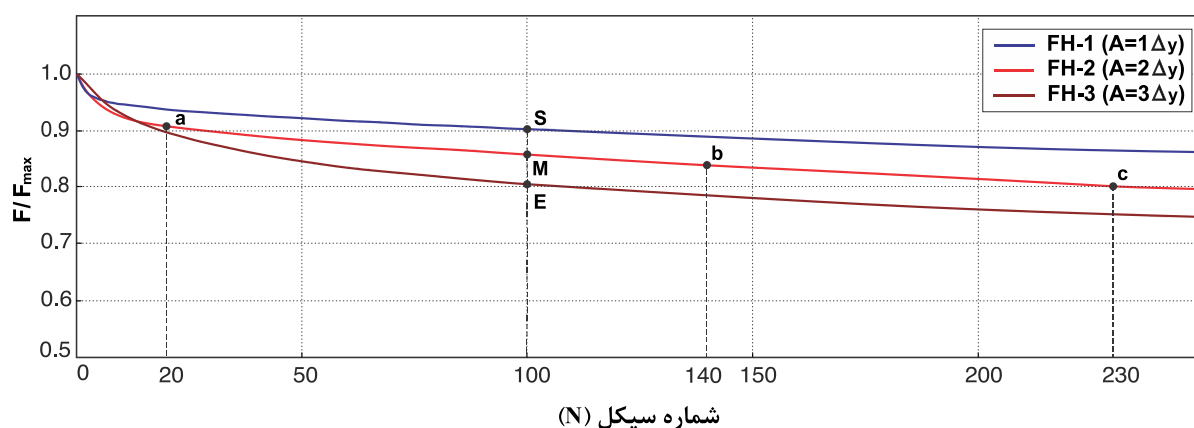


شکل ۱۱: نمودار نیرو-جابجایی تحت بارگذاری مونوتونیک

۵-۲- بارگذاری هارمونیک کامل

همان‌طوری که در بخش‌های قبلی اشاره شد، در این پژوهش برای تعریف سطوح زوال از معیار افت مقاومت استفاده می‌شود. برای این کار، سه نمونه FH-1، FH-2 و FH-3 به ترتیب با دامنه‌های Δ_y ، $2\Delta_y$ و $3\Delta_y$ تحت بارگذاری هارمونیک کامل قرار گرفتند تا به گسیختگی کامل برسند. شکل ۱۲، نمودار نیروی متناظر هر سیکل را برای این سه نمونه نشان می‌دهد که برای مقایسه بهتر سه حالت، هر یک از نمودارها نسبت به نیروی بیشینه خود، نرمالایز شده است. مطابق این نمودار، با افزایش شماره سیکل، نیروی تحمل شده توسط نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این نمودارها رابطه بین دامنه هارمونیک و افت مقاومت را به خوبی بیان می‌کنند؛ در این مطالعه برای تعریف سطوح زوال، از این نمودار استفاده می‌شود. تعداد سیکل و دامنه هارمونیک مربوط به سه سطح زوال کم، متوسط و زیاد می‌بایست از این نمودارها

استخراج شود. برای این کار، سه روش زیر را می توان استفاده کرد: (۱) فرض شود دامنه بارگذاری ثابت و تعداد سیکل متغیر است؛ به عنوان مثال در نمودار FH-2 میزان افت مقاومت در سیکل های ۲۰، ۱۴۰، ۱۴۰ و ۲۳۰ ام به ترتیب برابر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد می باشد. (۲) در روش دوم فرض می شود که تعداد سیکل ثابت و دامنه های هارمونیک متغیر است؛ به عنوان مثال در سیکل ۱۰۰ ام، میزان افت مقاومت منحنی های FH1، FH2 و FH3 به ترتیب برابر ۱۰، ۱۴ و ۲۰ درصد می باشد. (۳) در روش سوم نیز فرض می شود که هم دامنه و هم تعداد سیکل متغیر است. بدیهی است در میان این روش ها، استفاده از روش سوم، نیازمند انجام آزمایشات متعدد خواهد بود. در این پژوهش، از دو روش اول و دوم برای تعیین سطوح زوال استفاده می شود و نتایج آن ها با یکدیگر مقایسه می شود. با توجه به توضیحات ارائه شده، سه سطح زوال کم، متوسط و زیاد معادل S^{10} ، M^{11} و E^{12} مطابق جدول ۳ تعریف گردید.



شکل ۱۲: نمودار نیروی متناظر هر سیکل

جدول ۳: جزئیات بارگذاری هارمونیک

روش	سطح زوال	دامنه (A)	تعداد سیکل (N_h)	درصد زوال مقاومت	حالت ایجاد زوال
۱	زوال کم	$2\Delta y$	20	10	دامنه ثابت و تعداد سیکل متغیر
	زوال متوسط	$2\Delta y$	140	15	
	زوال زیاد	$2\Delta y$	230	20	
۲	زوال کم	$1\Delta y$	100	10	تعداد سیکل ثابت و دامنه های متغیر
	زوال متوسط	$2\Delta y$	100	14	
	زوال زیاد	$3\Delta y$	100	20	

۵-۳- منحنی های هیستریزس نیرو-تغییر مکان

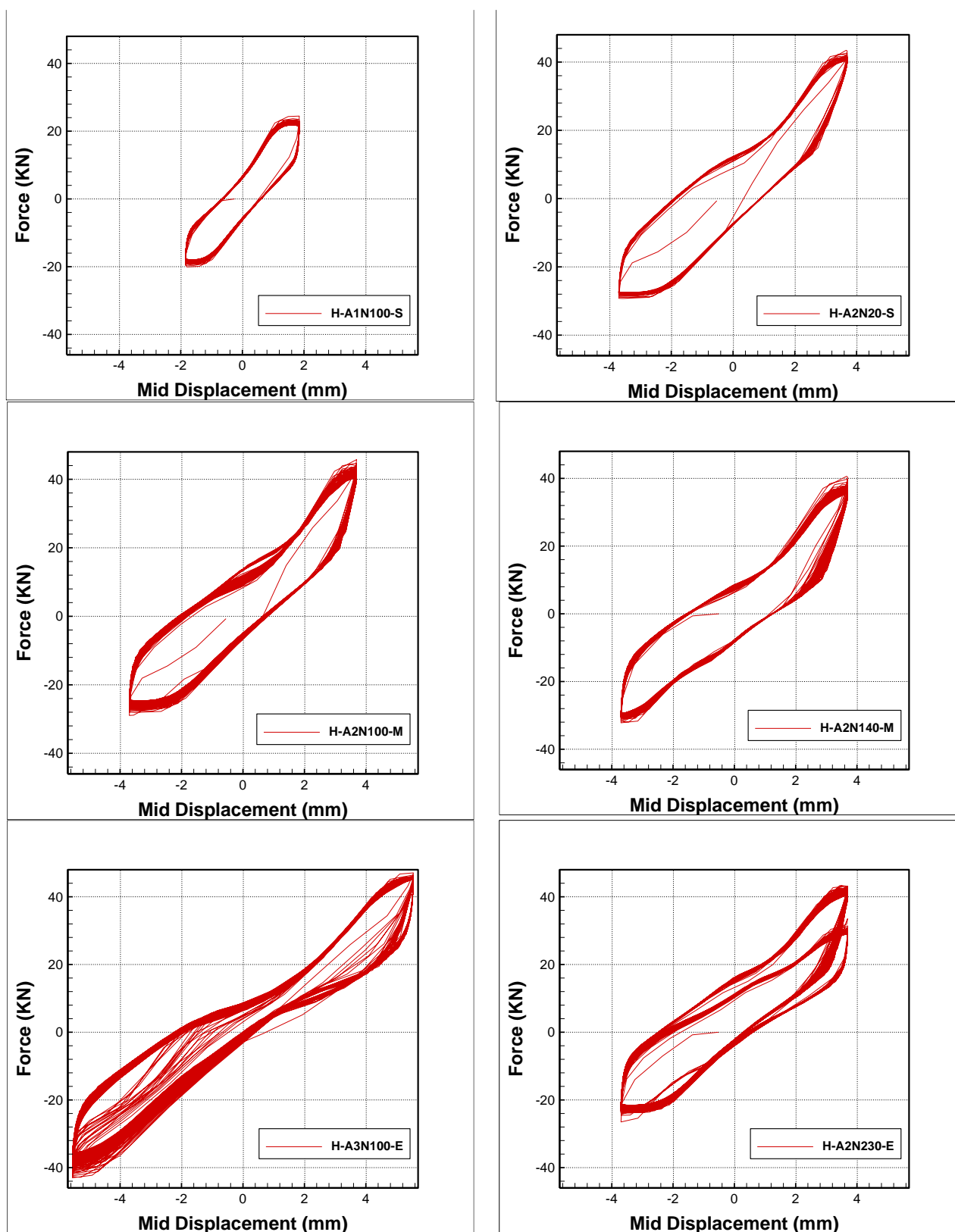
نمودار هیستریزس، رابطه ی بین نیرو و جابجایی متناظر آن را بیان می کند؛ در این نمودار هر سیکل رفت و برگشت با یک حلقه هیستریزس نمایش داده می شود. شکل ۱۳ چرخه های هیستریزس نمونه ها تحت بارگذاری هارمونیک را نشان می دهد. مساحت داخل

¹⁰ Slight

¹¹ Moderate

¹² Extensive

حلقه‌های هیستریزیس بیانگر انرژی جذب‌شده توسط المان می‌باشد؛ در ادامه برای مقایسه دقیق‌تر چرخه‌های هیستریزیس، انرژی مستهلک‌شده در هر چرخه محاسبه و با یکدیگر مقایسه می‌گردند.



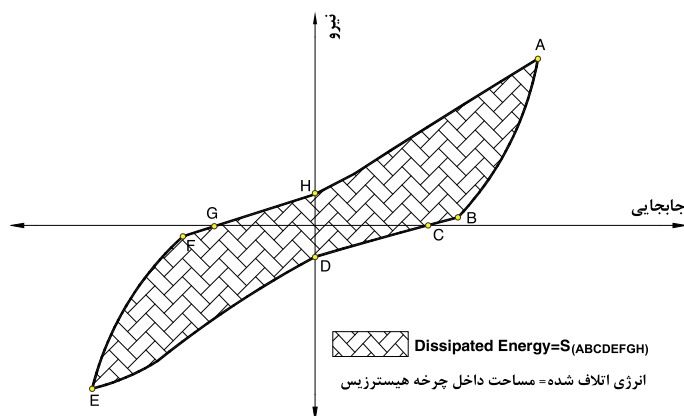
(الف) روش دامنه ثابت و تعداد سیکل متغیر

(ب) روش دامنه‌های متغیر و تعداد سیکل ثابت

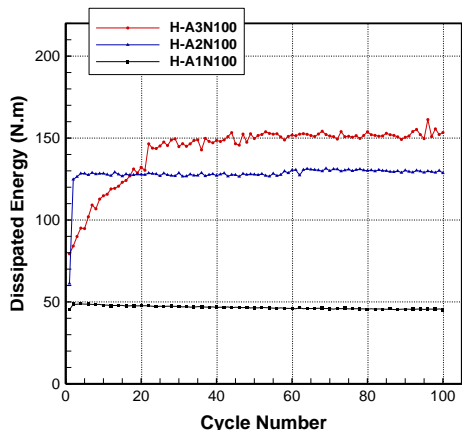
شکل ۱۳: نمودارهای هیستریزس نیرو-تغییر مکان برای بارگذاری‌های هارمونیک

۵-۴- انرژی مستهلک شده

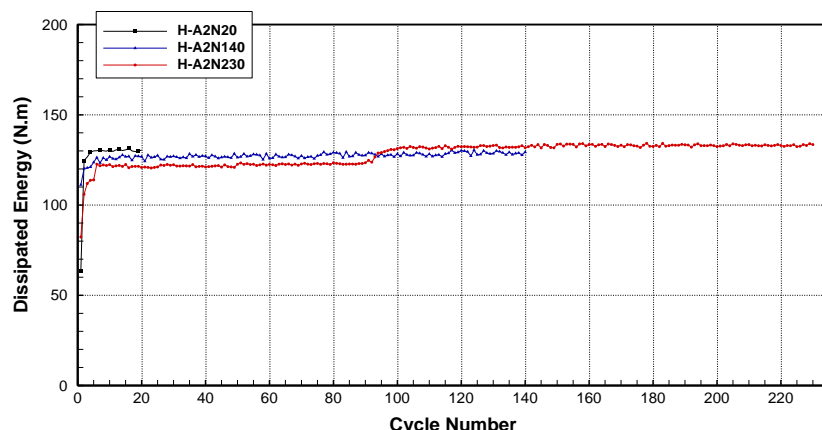
اتلاف انرژی مهم‌ترین و اساسی‌ترین ویژگی سازه‌های بتن‌آرمه برای مقابله در برابر زلزله محسوب می‌شود. بررسی میزان انرژی تلف شده در چرخه‌های هیستریزس، معیار مناسبی برای مقایسه نمودارهای هیستریزس با یکدیگر می‌باشد. همان‌طوری که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، انرژی جذب شده در یک چرخه برابر است با مساحت محصور شده توسط حلقه هیستریزس نیرو-تغییر مکان. در این قسمت، برای محاسبه مساحت محصور شده توسط هر حلقه، از نرم‌افزار MATLAB استفاده شد و مقادیر انرژی جذب شده به ازای هر سیکل در شکل ۱۵ برای نمونه‌های تحت بارگذاری هارمونیک نشان داده شده است. در حالت الف، مقادیر انرژی جذب شده در هر سه منحنی با افزایش شماره سیکل با شیب نسبتاً یکسانی رو به افزایش می‌باشند؛ در حالی که در حالت ب، شیب مربوط به منحنی‌ها متفاوت می‌باشد؛ بدین ترتیب که منحنی با دامنه $1\Delta_y$ تقریباً افقی می‌باشد ولی منحنی‌های $2\Delta_y$ و $3\Delta_y$ با شیب تندتری افزایش می‌یابند. در نظر نویسندگان، علت این اتفاق، ناشی از وارد شدن مصالح به محدوده‌ی غیرخطی می‌باشد و بدیهی است هرچه دامنه‌ی بارگذاری بزرگ‌تر باشد رفتار غیرخطی نمونه‌ها حاکم خواهد شد و جذب انرژی بیشتری اتفاق خواهد افتاد. اگرچه سطوح زوال مقاومت مربوط دو حالت الف و ب، یکسان می‌باشند (مطابق جدول ۳) ولی مقایسه انرژی‌های جذب شده در دو حالت، نشان می‌دهد که روش دامنه‌های متغیر، حساسیت بیشتری نسبت به روش دامنه ثابت دارد؛ زیرا که در روش دامنه‌های متغیر، افزایش دامنه موجب افزایش شیب نمودار جذب انرژی می‌شود؛ در صورتی که در روش دامنه ثابت، این روند تقریباً ثابت است.



شکل ۱۴: انرژی جذب شده در هر چرخه هیستریزس



(ب) روش دامنه‌های متغیر و تعداد سیکل ثابت



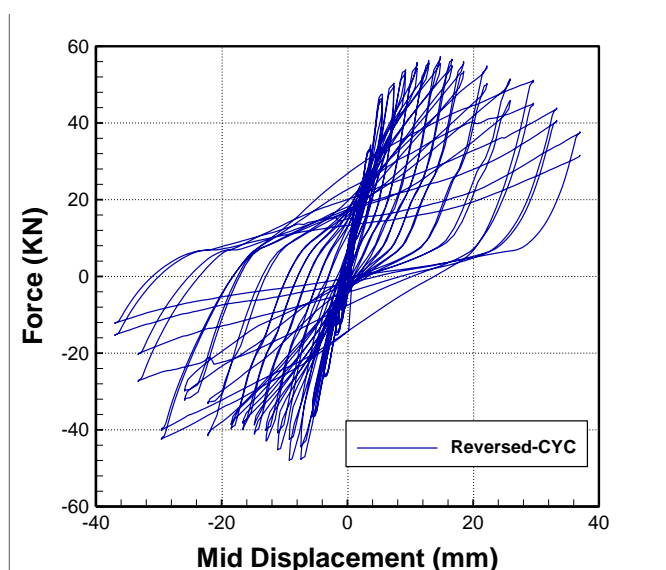
(الف) روش دامنه ثابت و تعداد سیکل متغیر

شکل ۱۵: انرژی اتلاف شده در بارگذاری هارمونیک

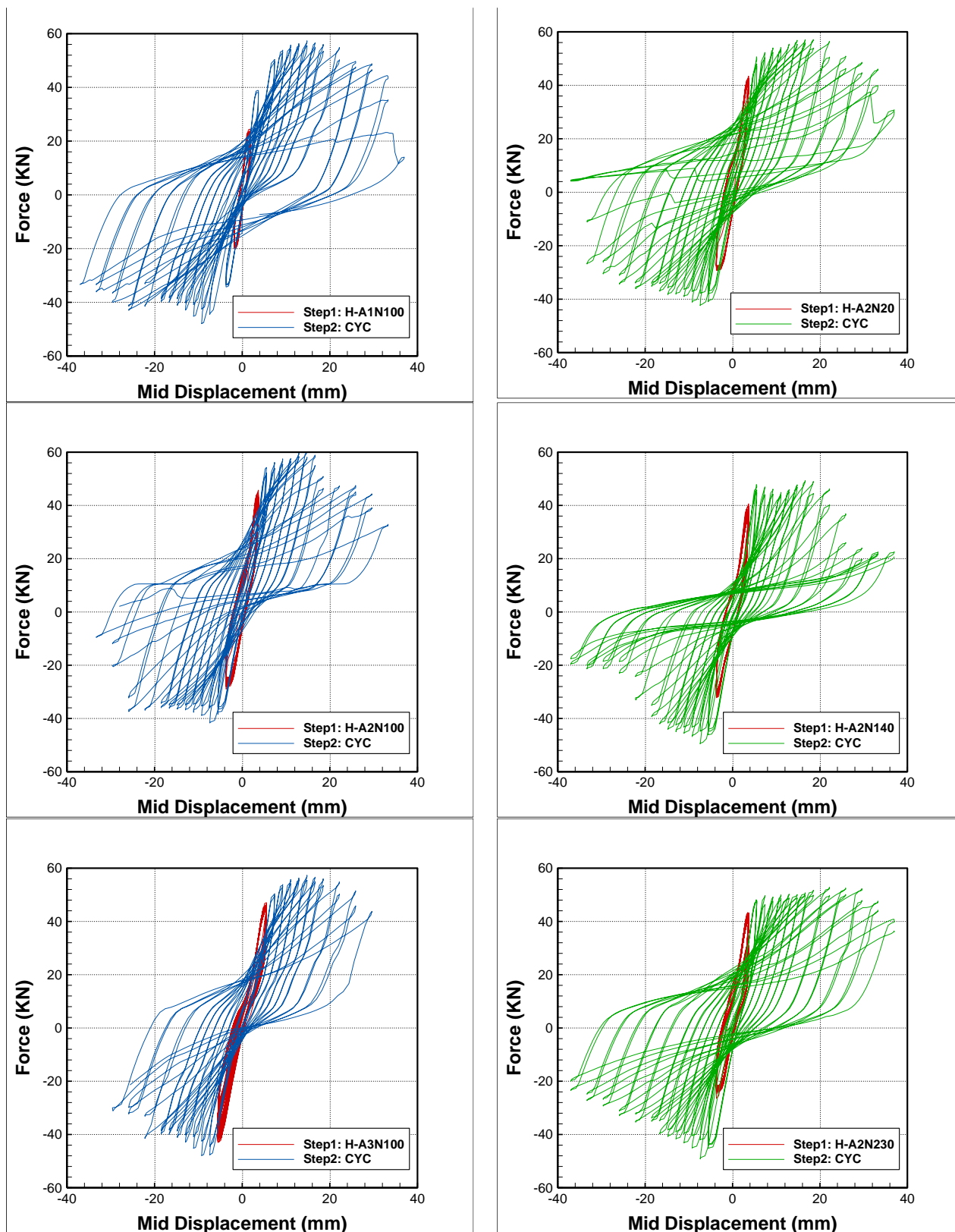
به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان نتیجه گرفت که روش بارگذاری هارمونیک با دامنه‌های متغیر و تعداد سیکل ثابت عملکرد بهتری در تعریف سطوح مختلف زوال خواهند داشت؛ زیرا که انرژی جذب شده در المان را به راحتی شبیه‌سازی می‌کند و از طرفی دیگر با توجه به اینکه تعداد سیکل تعریف شده در این روش، برای تمامی سطوح زوال، یکسان است، لذا مدت زمان ایجاد زوال در تمامی سطوح، یکسان خواهد بود و این امر با ماهیت یک زلزله که دارای مدت زمان ثابت می‌باشد، متناسب می‌باشد.

۵-۷- اثر زوال چرخه ای در رفتار بعد از زوال تیرها

در این قسمت، به منظور بررسی اثر ناشی از زوال هارمونیک در رفتار بعد از زوال تیرها، شش تیر به صورت دو مرحله‌ای بارگذاری شدند؛ در مرحله اول تحت بارگذاری هارمونیک تا سطح مشخصی از زوال قرار گرفتند و در مرحله دوم تحت بارگذاری سیکلی معکوس (شکل ۲) بارگذاری شدند. جزئیات بارگذاری مرحله یک و دو به صورت کامل در جدول ۲ ارائه شده است. علاوه بر شش تیر فوق، یک تیر سالم نیز به عنوان نمونه مرجع، تحت بارگذاری سیکلی معکوس قرار گرفت تا سایر تیرهای آسیب دیده نسبت به آن مقایسه گردند. شکل ۱۶ و ۱۷ نمودار هیستریزیس مربوط به این هفت نمونه را نشان می‌دهد. در ادامه میزان جذب انرژی هر یک از نمودارها محاسبه می‌شود. انرژی مستهلک شده در سیکل‌های بارگذاری مرحله ۲ برای دو حالت دامنه‌های ثابت و متغیر در شکل ۱۸ نشان داده شده است. یکی از مهم‌ترین نتایجی که در این نمودارهای شکل ۱۸ قابل مشاهده است، کاهش میزان جذب انرژی در سطوح زوال بالاتر می‌باشد؛ به عبارت دیگر هرچه سطح زوال قبلی یک تیر، بالاتر باشد، میزان جذب انرژی آن در بارگذاری‌های بعدی، کمتر خواهد بود. به منظور بررسی دقیق‌تر میزان کاهش انرژی نمونه‌ها، اختلاف هر نمودار با نمودار مربوط به مدل مرجع، در جدول ۴ خلاصه شده است. مطابق این جدول، در حالت‌های دامنه ثابت و متغیر، میانگین درصد کاهش انرژی جذب شده نمونه‌ها با افزایش سطح زوال، افزایش می‌یابد؛ بنابراین هرچه سطح زوال یک تیر بیشتر باشد، میزان جذب انرژی آن در بارگذاری‌های بعدی کمتر خواهد بود؛ به ویژه برای سطح زوال زیاد که میزان کاهش بیش از ۴۰ درصد می‌باشد. به عنوان نتیجه‌ای دیگر، روش بارگذاری هارمونیک در حالت دامنه متغیر، نتایج مطلوب‌تری نسبت به حالت دامنه متغیر دارد؛ زیرا در حالت دامنه ثابت، درصد کاهش انرژی مربوط به سطوح زوال متوسط و زیاد بسیار نزدیک به هم می‌باشند (مطابق جدول ۴)؛ در صورتی که در حالت دامنه متغیر، توزیع درصد کاهش، منطقی‌تر می‌باشد.



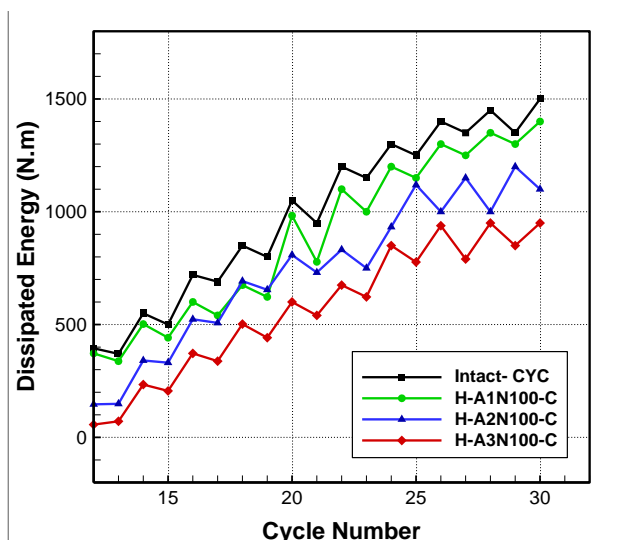
شکل ۱۶: نمودارهای هیستریزیس نیرو-تغییر مکان نمونه CYC (نمونه مرجع)



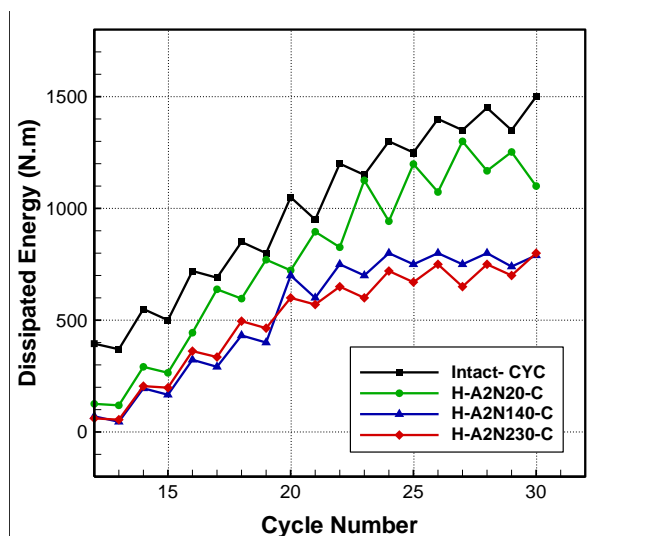
(ب) روش دامنه‌های متغیر و تعداد سیکل ثابت

(الف) روش دامنه ثابت و تعداد سیکل متغیر

شکل ۱۷: نمودارهای هیستریزیس نیرو-تغییر مکان برای بارگذاری‌های دو مرحله‌ای



(ب) حالت دامنه‌های متغیر و تعداد سیکل ثابت



(الف) روش دامنه ثابت و تعداد سیکل متغیر

شکل ۱۸: نمودار تغییرات انرژی مستهلک‌شده در هر چرخه

جدول ۴: مقایسه میزان کاهش انرژی نسبت به نمونه مرجع

حالت دامنه متغیر و تعداد سیکل ثابت			حالت دامنه ثابت و تعداد سیکل متغیر			شماره سیکل
درصد کاهش نسبت به نمونه مرجع			درصد کاهش نسبت به نمونه مرجع			
زوال زیاد	زوال متوسط	زوال کم	زوال زیاد	زوال متوسط	زوال کم	
58.84	33.78	11.66	60.41	60.41	47.07	15
48.30	27.28	16.63	49.78	49.78	38.34	16
51.06	26.47	21.66	51.42	51.42	7.50	17
40.92	18.50	20.61	41.68	41.68	29.83	18
44.79	18.21	22.19	41.95	41.95	3.69	19
42.83	22.99	6.40	42.86	42.86	31.14	20
43.10	23.09	18.12	40.00	40.00	5.72	21
43.77	30.67	8.33	45.83	45.83	31.14	22
45.87	34.78	13.04	47.83	47.83	2.13	23
34.62	28.25	7.69	44.62	44.62	27.48	24
37.85	10.47	8.00	46.40	46.40	4.13	25
32.99	28.57	7.14	46.43	46.43	23.33	26
41.46	14.81	7.41	51.85	51.85	3.70	27
34.48	31.03	6.90	48.28	48.28	19.43	28
37.04	11.11	3.70	48.15	48.15	7.22	29
36.67	26.67	6.67	46.67	46.67	26.67	30
42.16	24.17	11.63	47.13	47.13	19.28	میانگین

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، زوال چرخه‌های تیرهای بتن‌آرمه تحت بارگذاری تناوبی با دامنه ثابت (هارمونیک) و تأثیر آن در بارگذاری‌های بعدی مورد آزمایش قرار گرفت. برای این هدف، ۱۲ تیر بتن‌آرمه با مشخصات یکسان ساخته شده و تحت بارگذاری هارمونیک و سیکلی معکوس قرار گرفت. برای ایجاد زوال ناشی از زلزله، از بارگذاری هارمونیک یکنواخت و برای بررسی رفتار المان‌های زوال دیده در زلزله‌های بعدی از بارگذاری سیکلی معکوس افزایشی استفاده شد. دو حالت بارگذاری هارمونیک (دامنه ثابت و دامنه متغیر) انتخاب و در سه سطح

- زوال کم، متوسط و زیاد مورد بررسی قرار گرفت. پس از انجام آزمایش، نتایج مربوط به نمودارهای هیستریزس، زوال مقاومت و ظرفیت جذب انرژی برای نمونه‌ها ارائه و مورد بحث قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از این آزمایش عبارت‌اند از:
- ۱- نتایج آزمایشات مربوط به بارگذاری هارمونیک کامل نشان داد که هر چه دامنه بارگذاری هارمونیک در تیرهای بتن‌آرمه، بزرگ‌تر باشد، زوال مقاومت بیشتری توسط تیرها تجربه می‌شود.
 - ۲- مقایسه مقادیر انرژی جذب‌شده در هر سیکل نشان می‌دهد که در دامنه‌های هارمونیک بالاتر ($2\Delta y$ و $3\Delta y$)، روند رشد مقادیر انرژی با افزایش تعداد سیکل به صورت افزایشی می‌باشد؛ در صورتی که در دامنه $1\Delta y$ این روند به صورت کاهشی می‌باشد.
 - ۳- روش بارگذاری هارمونیک با دامنه‌های متغیر و تعداد سیکل ثابت، نسبت به روش دامنه ثابت، عملکرد بهتری در تعیین سطوح زوال ناشی از زلزله‌های قبلی دارد.
 - ۴- نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که با افزایش سطح زوال مقاومت چرخه‌ای، میزان جذب انرژی تیرهای بتن‌آرمه کاهش می‌یابد؛ به‌خصوص در تیرهای با سطح زوال زیاد، میزان جذب انرژی تیرها بیش از ۴۰ درصد کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] Abdelnaby, A. (2012). *Multiple earthquake effects on degrading reinforced concrete structures*, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [2] FEMA-P440A. (2009). *Effects of Strength and Stiffness Degradation on Seismic Response*, in Federal Emergency Management Agency.
- [3] Abdelnaby, A.E. and A.S. Elnashai, (2014). Performance of degrading reinforced concrete frame systems under the Tohoku and Christchurch earthquake sequences. *Journal of Earthquake Engineering*. **18**(7): p. 1009-1036.
- [4] Hosseinpour, F. and A. Abdelnaby, (2017). Fragility curves for RC frames under multiple earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. **98**: p. 222-234.
- [5] Hosseinpour, F. and A. Abdelnaby, (2017). Effect of different aspects of multiple earthquakes on the nonlinear behavior of RC structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. **92**: p. 706-725.
- [6] Oyguc, R., C. Toros, and A.E. Abdelnaby, (2018). Seismic behavior of irregular reinforced-concrete structures under multiple earthquake excitations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. **104**: p. 15-32.
- [7] Kalantari, A. and H. Roohbakhsh, (2019). Expected seismic fragility of code-conforming RC moment resisting frames under twin seismic events. *Journal of Building Engineering*. p. 101098.
- [8] Kunnath, S.K., A. El-Bahy, A. Taylor, and W. Stone, (1997). Cumulative seismic damage of reinforced concrete bridge piers.
- [9] Acun, B. and H. Sucuoglu, (2010). Performance of Reinforced Concrete Columns Designed for Flexure under Severe Displacement Cycles. *ACI Structural Journal*. **107**(3).
- [10] Nojavan, A., (2015). Performance of full-scale reinforced concrete columns subjected to extreme earthquake loading.
- [11] Chae, Y., J. Lee, M. Park, and C.-Y. Kim, (2019). Fast and slow cyclic tests for reinforced concrete columns with an improved axial force control. *Journal of Structural Engineering*. **145**(6): p. 04019044.
- [12] Xue, J., X. Zhang, X. Ke, and L. Ma, (2019). Seismic resistance capacity of steel reinforced high-strength concrete columns with rectangular spiral stirrups. *Construction and Building Materials*. **229**: p. 116880.
- [13] Tena-Colunga, A., L.A. Urbina-Californias, and H.I. Archundia-Aranda, (2017). Cyclic behavior of continuous reinforced concrete haunched beams with transverse reinforcement designed to fail in shear. *Construction and Building Materials*. **151**: p. 546-562.
- [14] Su, C. and H. Lin, (2017). Mechanical performances of steel fiber reinforced high strength concrete disc under cyclic loading. *Construction and Building Materials*. **146**: p. 276-282.
- [15] Ma, H., J. Xue, X. Zhang, and D. Luo, (2013). Seismic performance of steel-reinforced recycled concrete columns under low cyclic loads. *Construction and Building Materials*. **48**: p. 229-237.
- [16] Liu, C., et al., (2019). Cyclic load tests and seismic performance of recycled aggregate concrete (RAC) columns. *Construction and Building Materials*. **195**: p. 682-694.
- [17] Ghannoum, W., et al., (2011). Experimental investigations of loading rate effects in reinforced concrete columns. *Journal of Structural Engineering*. **138**(8): p. 1032-1041.

- [18] Adhikary, S.D., B. Li, and K. Fujikake, (2012). Dynamic behavior of reinforced concrete beams under varying rates of concentrated loading. *International Journal of Impact Engineering*. **47**: p. 24-38.
- [19] Li, M. and H. Li, (2012). Effects of strain rate on reinforced concrete structure under seismic loading. *Advances in Structural Engineering*. **15**(3): p. 461-475.
- [20] Zhang, H., H.-N. Li, C. Li, and G.-W. Cao, (2018). Experimental and numerical investigations on seismic responses of reinforced concrete structures considering strain rate effect. *Construction and Building Materials*. **173**: p. 672-686.
- [21] Krawinkler, H. (2009). Loading histories for cyclic tests in support of performance assessment of structural components. in *The 3rd international conference on advances in experimental structural engineering, San Francisco*.
- [22] Chenouda, M. and A. Ayoub, (2008). Inelastic displacement ratios of degrading systems. *Journal of structural engineering*. **134**(6): p. 1030-1045.
- [23] Hatzigeorgiou, G.D. and D.E. Beskos, (2009). Inelastic displacement ratios for SDOF structures subjected to repeated earthquakes. *Engineering Structures*. **31**(11): p. 2744-2755.
- [24] Sivaselvan, M., (2013). Hysteretic models with stiffness and strength degradation in a mathematical programming format. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. **51**: p. 10-27.
- [25] Kottari, A., A. Charalampakis, and V. Koumousis, (2014). A consistent degrading Bouc–Wen model. *Engineering Structures*. **60**: p. 235-240.
- [26] Qiu, J.-L. and J.-X. Gong, (2019). Analytical hysteretic model for reinforcing bars. *Computers & Structures*. **214**: p. 48-59.
- [27] Das, B.M. and Z. Luo, (2016). *Principles of soil dynamics*. Cengage Learning.
- [28] Tavakoli, H., S. Mahmoudi, A. Goltabar, and P. Jalali, (2017). Experimental evaluation of the effects of reverse cyclic loading rate on the mechanical behavior of reinforced SCC beams. *Construction and Building Materials*. **131**: p. 254-266.
- [29] Riisgaard, B., T. Ngo, P. Mendis, C. Georgakis, and H. Stang. (2007). Dynamic increase factors for high performance concrete in compression using split Hopkinson pressure bar. in *6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*.
- [30] ACI-211-2, (2004). *Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete*. p. American Concrete Institute.
- [31] ASTM-C33/C33M, (2013). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. p. ASTM Standard.
- [32] ASTM-C330/C330M, (2013). *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*. p. ASTM Standard.
- [33] ASTM-A370, (2012). *Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products*. p. ASTM Standard.
- [34] ACI-318, (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. p. American Concrete Institute.
- [35] Tavakoli, H., P. Jalali, and S. Mahmoudi, (2018). A comparative study of the effect of adding steel fiber on the mechanical behavior of RSCC beams under displacement and force control conditions. *Construction and Building Materials*. **166**: p. 315-323.
- [36] Tavakoli, H., P. Jalali, and S. Mahmoudi, (2019). Experimental evaluation of the effects of adding steel fiber on the post-cyclic behavior of reinforced self-compacting concrete beams. *Journal of Building Engineering*. **25**: p. 100771.
- [37] Akbarpour, S., H. Dabbagh, and H.R. Tavakoli, (2018). The Effects of Steel Fiber and Nano-SiO₂ on the Cyclic Flexural Behavior of Reinforced LWAC Beams. *KSCE Journal of Civil Engineering*. **22**(10): p. 3919-3930.