

Experimental investigation into the effect of hook orientation of longitudinal rebars in columns on the performance of column-foundation connections

Mohammad Hossein Naserifard¹, Reza Morshed^{2*}, Abolfazl Eslami Hasanabadi²

1-PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

2-Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

ABSTRACT

In a structural building system, columns play a crucial role in transferring the forces exerted on the structure down to the foundation. Consequently, the method used to connect the columns to the foundation is vital, as it greatly influences the structural strength. Prior to the recent version of ACI 318, the typical approach for the hook orientation of column bars in the foundation was to bend at 90 degrees outward. However, in ACI 318-19, the requirement has shifted to a 90-degree bend towards the center of the column (inward). As a result, the 1399 edition of the 9th topic of the National Building Regulations now mandates that the hook orientation of the column reinforcing bars in the foundation be directed inward. Considering that previous studies have not examined the effect of hook orientation of the column reinforcements in the foundation, further research are needed to explore it. In this study, to assess the effect of hook orientation of the column bars (either inward or outward) on the performance of column-foundation connection, six specimens were built with identical dimensions and different percentages of longitudinal reinforcement in the columns. The results indicate that the load-carrying capacity of columns with longitudinal reinforcement bent inward exhibited a minor increase (ranging from 1 to 5%) in comparison to those with outward hooks. Where the column hook orientation of bars was directed inward toward the core, strength deterioration was postponed at greater drifts. This indicates that while the performance of the samples with an inward hooks is superior to those with an outward hooks, the difference was not significant to justify the code obligation for an inward orientation. Particularly, orienting the hook inward the column core at the column-foundation connections could come with difficulties in real field construction.

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 November 2024

Revise Date: 16 January 2025

Accept Date: 05 February 2025

Keywords:

Reinforced Concrete Column
Root Bars

Rebar hook orientation

Column To Foundation joint

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2025.487159.3563](https://doi.org/10.22065/jsce.2025.487159.3563)

*Corresponding author: Reza Morshed

Email address: morshed@yazd.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی تأثیر جهت خم میلگردهای انتظار ستون در پی بر روی عملکرد اتصال ستون به پی

محمدحسین ناصری فرد^۱، رضا مرشد^{۲*}، ابوالفضل اسلامی حسن آبادی^۳

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

۲و۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

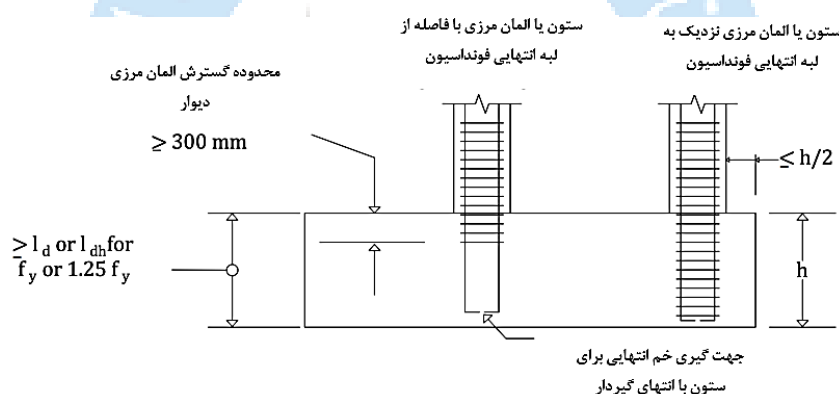
در سیستم سازه‌ای ساختمانی، ستون‌ها نقش انتقال نیروهای وارده بر سازه به فونداسیون را بر عهده دارند. از این رو نحوه‌ی اتصال ستون‌ها به فونداسیون دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشد که تأثیر بسزایی در مقاومت سازه دارد. تا قبل از ویرایش اخیر *ACI 318* حالت رایج خم انتهایی میلگردهای ریشه ستون در فونداسیون به صورت ۹۰ درجه و به سمت بیرون در نظر گرفته می‌شد. لکن در *ACI318-19* خم ریشه‌ی ستون به صورت ۹۰ درجه و به سمت مرکز ستون (داخل) الزام شده است. بر این اساس در ویرایش سال ۹۹ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان نیز جهت خم میلگردهای ریشه‌ی ستون در فونداسیون به سمت داخل در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مطالعات انجام‌یافته تاکنون شامل بررسی تأثیر جهت خم در میلگردهای ریشه‌ی ستون‌ها در فونداسیون نبوده، لازم است تا مطالعات و بررسی‌هایی به منظور بررسی تأثیر جهت خم میلگردهای ریشه‌ی ستون بر مقاومت ستون انجام گیرد. در پژوهش حاضر به منظور بررسی تأثیر جهت خم ریشه‌ی ستون (به سمت داخل یا خارج)، ۶ مدل با ابعاد ستون یکسان و با در نظر گرفتن درصد‌های مختلف میلگردهای طولی در ستون‌ها، تحت آزمایش قرار گرفتند. بر اساس نتایج به دست آمده، ظرفیت باربری نمونه‌های ستون با خم میلگرد به سمت داخل افزایش ناچیزی (در حدود ۱ تا ۵ درصد) نسبت به نمونه‌های ستون با خم میلگرد به سمت خارج نشان دادند. همچنین در نمونه‌هایی که خم ریشه‌ی ستون به سمت داخل هسته‌ی ستون بوده، زوال مقاومت در دررفت‌های بالاتر اتفاق افتاده است. بر این اساس هرچند رفتار نمونه‌های دارای خم داخل بهتر از نمونه‌های با خم بیرون است ولی نمی‌تواند الزام آیین‌نامه به خم داخل را توجیه نماید. به ویژه آنکه خم تمامی میلگردهای ریشه ستون‌ها به سمت داخل از نظر اجرایی با دشواری‌هایی همراه است.

کلمات کلیدی: ستون بتن آرمه، میلگردهای ریشه، جهت خم میلگرد، اتصال ستون به فونداسیون.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۳/۰۸/۲۱	۱۴۰۳/۱۰/۲۷	۱۴۰۳/۱۱/۱۷	۱۴۰۳/۱۱/۱۷	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	https://doi.org/10.22065/jsce.2025.487159.3563
*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: رضا مرشد Morshed@yazd.ac.ir					

۱- مقدمه

از جمله مهم‌ترین بخش‌های سازه، فونداسیون می‌باشد که وظیفه‌ی انتقال بارهای وارده به تیرها و ستون‌ها را به زمین بر عهده دارد؛ به همین دلیل، این عضو نیاز به طراحی و اجرای بسیار دقیق دارد تا توانایی تحمل نیروهای جانبی ناشی از زلزله را داشته باشد و امنیت سازه تأمین گردد. با توجه به اینکه نیروهای وارد بر سازه از طریق ستون‌ها به فونداسیون منتقل می‌شود، نحوه‌ی اتصال ستون‌ها به فونداسیون دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشد که تأثیر بسزایی در مقاومت سازه دارد. با توجه به مطالب مطرح شده، میلگردهای ستون بتنی در درون فونداسیون امتداد می‌یابند تا اتصال مناسب ستون‌های بتنی به فونداسیون سازه تأمین گردد که اصطلاحاً، ریشه‌ی ستون نامیده می‌شوند. مطابق ویرایش ۹۲ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، خم انتهایی ریشه‌ی ستون در فونداسیون به صورت خم ۹۰ درجه و به سمت بیرون در نظر گرفته می‌شدند. در ویرایش سال ۲۰۱۹، ACI318، خم ریشه‌ی ستون به صورت ۹۰ درجه و به سمت مرکز ستون (داخل) الزام شده است و این اجبار بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده توسط نیلسون و همکاران در سال ۱۹۷۶ [۲] مطرح شده است. مطالعات آزمایشگاهی مطرح‌شده نشان دادند که در اعضای خمشی دال‌ها و تیرها (اتصال T شکل یا L شکل) باید قلاب‌ها به سمت داخل و مرکز عضو خم گردد تا عضو توانایی تحمل خمشی در اعضای T و یا L شکل را داشته باشد. لازم به ذکر است این تحقیق جهت بررسی خم قلاب‌ها برای اتصالات تیر به ستون و نه اتصال ستون به فونداسیون مطرح شده بود. با رویکردی مشابه، مبحث نهم مقررات ملی ساختمان در ویرایش سال ۹۹ نیز، این اجبار را به کار گرفته است. مطابق بند ۹-۲۰-۲-۹ مبحث نهم، در ستون‌هایی که برای اتصال گیردار (صلب) به شالوده طراحی شده‌اند، در صورت نیاز به مهاری قلاب‌دار، انتهای آرماتورهای طولی تعبیه شده برای تحمل خمش باید دارای قلاب با خم ۹۰ درجه به طرف مرکز ستون در قسمت زیرین شالوده باشد (شکل ۱).



شکل ۱: نحوه خم میلگرد ریشه‌ی ستون

ماهرنهلتر و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۳] به بررسی نحوه‌ی اتصال ستون به فونداسیون پرداخته و روش طراحی نوینی برای اتصالات لرزه‌ای ستون به فونداسیون معرفی کردند. مطالعات اولیه نشان می‌دهد که رفتار اتصال با میلگردهایی که بعداً جایگذاری می‌شوند مشابه رفتار اتصال با میلگردهای درجا می‌باشند. در این مطالعه، نتایج ۱۶ آزمایش تمام مقیاس نشان‌دهنده‌ی تأثیر مفید افزایش مقاومت پیوستگی در عملکرد لرزه‌ای اتصالات ستون به فونداسیون می‌باشد. همچنین روش طراحی جدیدی در این مطالعه برای این گونه اتصالات پیشنهاد شده است که موجب کاهش طول مهار می‌شود تا حدی که نیازی به قلاب نباشد. در سال ۲۰۱۳ ویتوشنسکی و اسنید [۴] به بررسی جهت خم قلاب ۹۰ و ۱۸۰ درجه در اعضای عریض پرداختند. این مطالعه به منظور بررسی تأثیر زاویه‌ی خم قلاب بر عملکرد قلاب‌های میلگردها انجام شده است. مطالعات آزمایشگاهی شامل ۲۴ نمونه‌ی انتهای تیر دارای جهت‌های مختلف قلاب و آرایش متفاوت بوده و نتایج تنش-جابجایی نمونه‌های مذکور مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان‌دهنده رابطه‌ی مشخصی بین زاویه‌ی خم قلاب و عملکرد قلاب نبودند و برای نمونه‌های مورد بررسی در این مطالعه، زاویه‌ی خم قلاب تأثیری بر تنش‌نهایی یا جابه‌جایی میلگردها نداشتند.

مشابه نتایج حاصل از مطالعات گذشته، نتایج این مطالعه به طور کلی نشان داد که لغزش میلگرد در نمونه‌های دارای چند میلگرد با فاصله کم‌تر افزایش می‌یابد.

فان و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۵] به بررسی آزمایشگاهی اتصال بتن آرمه پیش‌ساخته ستون به فونداسیون توسط دو روش اتصال مختلف و با استفاده از میلگردهایی با قطر زیاد پرداختند. در این مطالعه، دو نمونه تمام مقیاس اتصال بتن آرمه پیش‌ساخته ستون به فونداسیون، با استفاده از روش‌های اتصال طراحی شده به صورت لوله‌های دوغاب‌ریزی (PC-S) و داکت‌های موج دوغاب‌ریزی (PC-C) و یک نمونه مرجع در جازیز در نظر گرفته شدند. نتایج آزمایش نشان داد که هر دو نوع اتصال دارای مقاومت مشابهی نسبت به نمونه مرجع بودند. در نمونه‌ی PC-S کمناش میلگردهای طولی و خرابی خاموت‌ها در بالای میله‌های دوغاب‌ریزی، مشاهده شد که موجب شکل‌پذیری کم و نسبت دررفت جانبی نهایی ۴/۵٪ شد. در نمونه‌ی PC-C، رفتار پانچینگ مشخص بعد از نسبت دررفت جانبی ۲٪ مشاهده شد که به دلیل جابه‌جایی قابل توجه میلگردهای طولی با مقاومت بالا و قطر زیاد، در ناحیه‌ی همپوشانی بود. این سه نمونه مکانیزم مفصل پلاستیک متفاوتی در پای ستون نشان دادند که به صورت کرنش فولاد، الگوی ترک و مودهای خرابی مشخص شده است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، بهبودهای بیشتر با استفاده از میلگردهایی با مقاومت بالا و قطر زیاد در دو نوع اتصال پیش‌ساخته ستون به فونداسیون پیشنهاد می‌شود. در سال ۲۰۱۷ ترونک و همکاران [۶] به بررسی رفتار پانچینگ-برشی فونداسیون‌های بتن آرمه ستون در حالت‌های مختلف میلگردگذاری و تقویتی پرداختند. نتایج آزمایش نشان داد که مقاومت پانچینگ در صورت استفاده از میلگردهای اضافی طولی دور اتصال فونداسیون-ستون و با افزودن مواد (بتن با مقاومت بالا و بتن تقویت شده با AMF) به صورت قابل توجهی افزایش یافت. همچنین میلگردهای برشی جایگذاری شده دور اتصال، تأثیر قابل توجهی بر مقاومت پانچینگ-برشی فونداسیون نداشت. نتایج نشان داد که با اضافه کردن میلگرد طولی پایین به دور اتصال فونداسیون-ستون، نیروی نهایی و خیز هنگام خرابی افزایش یافت. اسمیدز و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۷] به بررسی مشارکت بتن و میلگردهای برشی بر روی مقاومت پانچینگ فونداسیون‌های ستون پرداختند.

هگر و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۸] رفتار پانچینگ فونداسیون‌های بتن آرمه را بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که زاویه‌ی صفحه خرابی برشی دارای شیب بیشتری نسبت به آزمایشات پانچینگ دال‌های تخت می‌باشد و لاغری برشی تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت برشی پانچینگ دارد. در این مطالعه، بر اساس اطلاعات موجود و مطالعات انجام‌شده، یک مدل طراحی پیشرفته به دست آمده است و در دو نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد بررسی، ظرفیت اتکایی خاک آزمایشگاهی از مقدار محاسبه شده توسط آیین‌نامه‌های موجود فراتر رفت. ژوو و همکاران در سال ۲۰۲۲ [۹] به بررسی آزمایشات بارگذاری ضربه‌ای پاندولی ستون‌های بتنی پیش‌ساخته دارای اتصالات مختلف به فونداسیون پرداختند. نتایج آزمایشات نشان داد که شرایط مرزی نیمه‌صلب ستون‌های پیش‌ساخته موجب کاهش خرابی ستون شدند ولی تغییر شکل جانبی افزایش یافت. در نمونه‌های تحت نیروی محوری قابل توجه و انرژی ضربه‌ای، خرابی برشی به همراه خردشدگی بتن در محل اعمال بار رخ داد. در سال ۲۰۲۱ پال و همکاران [۱۰] به مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی اتصال یکپارچه، مانند ستون پیش‌ساخته به فونداسیون پرداختند. نتایج نشان داد که به طور کلی، اتصالات پیش‌ساخته پیشنهادی نشان‌دهنده‌ی عملکرد سازه‌ای مشابه با اتصالات یکپارچه متناظر خود دارند. سپس مدل‌های صحت‌سنجی شده‌ی امان محدود به منظور تأمین طراحی لرزه‌ای و عملکرد سیستم اتصال پیشنهادی در نظر گرفته شدند و مدل‌های امان محدود مورد نظر به درستی ظرفیت باربری، سختی اولیه و رفتار پس از نقطه حداکثر را برای هر دو اتصال پیش‌ساخته و یکپارچه ستون به فونداسیون را شبیه‌سازی کردند.

خطیب و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۱] رفتار اتصالات نوین ستون فونداسیون دایره‌ای تحت بارهای چرخه‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد که خرابی در اتصالات پیشنهادی در مقدار بار بیشتری نسبت به اتصالات رایج رخ داد و اتصالات پیشنهادی موجب افزایش قابل توجه نیروی تسلیم، نیروی نهایی، شکل‌پذیری و سختی اولیه نسبت به اتصالات رایج شدند. وون و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۲] عملکرد چرخه‌ای اتصالات ستون فونداسیون دارای ستون کامپوزیت فولادی پر شده با بتن را بررسی کردند. در این مطالعه، سه حالت اتصال جدید پیشنهاد شده است و توسط مطالعات آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج آزمایش، مقدار شکل‌پذیری بر اساس نحوه‌ی اتصال ستون فونداسیون متفاوت بود. این به این معنی است که حتی اگر ستون دارای عملکرد خوب باشد، عملکرد چرخه‌ای سیستم دارای عملکرد مطلوبی بر اساس اتصال ستون فونداسیون نخواهد بود. در نهایت، اتصال دارای کوپلر جوشی در این مطالعه

پیشنهاد شده که یک روش معقول می‌باشد زیرا دارای عملکرد مشابه با رفتار ایده‌آل می‌باشد. میرعلمی و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۳] به بررسی مقاوم‌سازی اتصالات ستون بتن آرمه دایروی به فونداسیون با استفاده از میلگردهای GFRP و SMA و نوارهای CFRP پرداختند. در این مطالعه شش نمونه اتصال ستون بتن آرمه دایروی به فونداسیون در نظر گرفته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان داد که این پارامترها به طور قابل توجهی در نمونه تقویت‌شده با میلگردهای GFRP نسبت به نمونه کنترلی بهبود یافت. میلگردهای تقویتی SMA باعث کاهش جابه‌جایی ماندگار اتصالات شدند. همچنین، ترکیب میلگردهای SMA و نوارهای CFRP موجب افزایش شکل‌پذیری شد.

بارسلو و همکاران در سال ۲۰۲۲ [۱۴] به بهبود اتصالات ستون به فونداسیون با استفاده از نوارهای CFRP پرداختند. چهار نمونه اتصال ستون پیش‌ساخته به فونداسیون که قبلاً تحت بارگذاری چرخه‌ای و نیروی ثابت محوری مورد آزمایش قرار گرفته است. وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۵] عملکرد لرزه‌ای اتصال ستون به فونداسیون به وسیله‌ی میلگرد مهاری با مقاومت بالا را بررسی کردند. اتصال ستون به فونداسیون به وسیله‌ی میلگرد مهاری (ARCFC) برای ستون‌های فولادی پر شده با بتن پیشنهاد شده است که موجب سهولت ساخت اتصال ستون به فونداسیون می‌شود. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که تمامی نمونه‌ها دارای شکل‌پذیری خوب و ضریب شکل‌پذیری بزرگتر از ۴/۵ بودند. نتایج آزمایش نشان داد که عملکرد لرزه‌ای اتصال پیشنهادی مشابه اتصال مدفون بوده، در صورتی که مطابق هر دو اصل تعادل فشاری و تعادل خمشی طراحی شوند. سیموئز و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۶] به بررسی مقاومت فونداسیون بتن آرمه بدون میلگردهای عرضی مطابق تحلیل حدی پرداختند. فونداسیون‌های منفرد، اعضای بتن آرمه‌ای هستند که مقاومت خمشی و برشی پانچینگ آنها معمولاً حاکم بر طراحی هستند.

خاکسفیدی و قلعه‌نوی در سال ۱۴۰۰ [۱۷] به بررسی اثر نوع بتن و قطر میلگرد بر مقاومت پیوستگی در سازه‌های بتن آرمه پرداختند. در این پژوهش تعداد ۲۴ نمونه مکعبی به ابعاد $20 \times 20 \times 20$ سانتی‌متر و $25 \times 25 \times 25$ سانتی‌متر، از بتن فوق‌توانمند و معمولی مسلح‌شده با یک میلگرد مقاومت بالا از قطرهای ۱۲، ۱۶ و ۲۵ میلی‌متر در راستای مرکز نمونه، با دو طول پیوستگی (دو و چهار برابر قطر میلگرد)، ساخته شده و تحت آزمایش بیرون کشیدگی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که مقاومت فشاری بتن و نسبت پوشش بتن به قطر، طول پیوستگی و تنش تسلیم میلگرد نقش مهمی در امکان وقوع هر یک از حالت‌های گسیختگی دارند. همچنین بتن فوق‌توانمند با افزایش مقاومت پیوستگی تا نزدیک ۵ برابر بتن معمولی امکان کاهش عمده در طول مهاری مورد نیاز را فراهم می‌کند. با توجه به منحنی‌های پیوستگی-لغزش بتن فوق‌توانمند ساخته‌شده در این پروژه رفتار تردتری نسبت به بتن معمولی دارد. در بتن معمولی با افزایش طول پیوستگی، بیشینه تنش پیوستگی افزایش می‌یابد در حالی که در بتن فوق‌توانمند افزایش طول پیوستگی باعث کاهش بیشینه تنش پیوستگی می‌گردد. برای پیش‌بینی رفتار پیوستگی-لغزش مدل جدیدی پیشنهاد شده است.

وو و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۸] تا ۲۰۲۱ تاثیر پیکربندی قلابها بر کماتش میلگرد و عملکرد لرزه‌ای ستونهای بتن آرمه با مقاومت بالا را بررسی کردند. ستونهای مستطیلی با جزئیات متفاوت میلگردهای عرضی و نسبت متفاوت نیروی محوری تحت نیروی محوری ثابت و بارگذاری افقی قرار گرفتند. هر سه جزئیات میلگردهای عرضی مورد بررسی دارای یک خاموت بسته مستطیلی بزرگ بودند در حالیکه خاموتها و سنجاچه‌های کوچک متفاوت بودند: شامل دو سنجاچه عرضی (نوع I)، یک خاموت بسته لوزی شکل کوچک (نوع II) یا دو خاموت بسته مستطیلی کوچک (نوع III) نسبت نیروی محوری شامل ۰.۰۶ و ۰.۱۸ بود. مکانیسم ضد کماتش برای حالت‌های مختلف میلگردها عرضی پیشنهاد شده و سپس طول کماتش کلی میلگردهای طولی در ستون بتن آرمه با حالت‌های مختلف میلگردهای عرضی محاسبه شد. بر این اساس، تاثیر جزئیات میلگردهای عرضی بر کماتش میلگرد و عملکرد لرزه‌ای ستونهای بتن آرمه بررسی شد. نتایج کماتش میلگرد، صحت مکانیسم پیشنهادی و محاسبات طول کماتش میلگرد را تایید میکند.

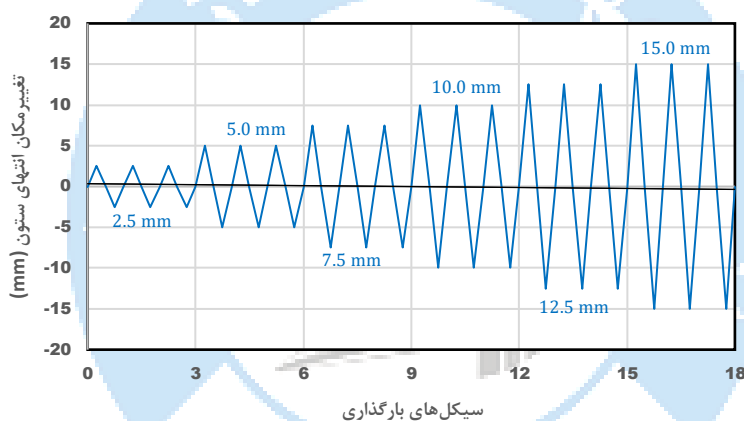
گووان و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۹] به بررسی عملکرد لرزه‌ای ستونهای بتنی پیش ساخته با ژاکتهای پیش ساخته بتن دارای عملکرد فوق بالا (UHPC) در ناحیه مفصل پلاستیک پرداختند. نتایج نشان داد که نمونه‌های دارای ژاکت UHPC پیشنهادی موجب دور شدن ناحیه آسیب دیده از بخش اتصال ستون-فونداسیون شده و دارای عملکرد لرزه‌ای قابل مقایسه با نمونه یکپارچه میباشد. ارتفاع ژاکت

UHPC یک عامل مهم بود که بر ناحیه مفصل پلاستیک تاثیر میگذارد زیرا ناحیه بتنی آسیب دیده به بالای این ارتفاع منتقل میشود، در حالی که تاثیر ضخامت ژاکت UHPC قابل توجه نبود.

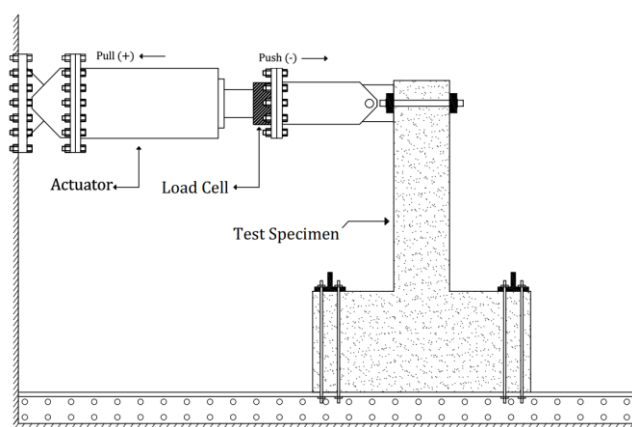
هابر و همکاران در سال [۲۰] ۲۰۱۴ به بررسی عملکرد لرزه‌ای ستونهای پیش‌ساخته با اتصالات ستون فونداسیون با وصله مکانیکی پرداختند. پنج مدل ستون پل با مقیاس ۱/۲ ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. نتایج نشان داد که رفتار این اتصالات جدید مشابه رفتار اتصال رایج بود، هرچند که مکانیسم مفصل پلاستیک میتواند به طور قابل توجهی تحت تاثیر کوپلرها باشد.

۲- مطالعه‌ی آزمایشگاهی و نحوه‌ی اعمال بارگذاری

در پژوهش حاضر به منظور بررسی تأثیر جهت خم ریشه‌ی ستون، نمونه‌های ساخته‌شده تحت بارگذاری چرخه‌ای با تاریخچه نشان داده شده در شکل ۲ به صورت کنترل جابه‌جایی مطابق پروتکل ASTM E2126(2019) [۲۱] با گام افزایشی ۲/۵ میلی‌متر در هر سه سیکل متوالی قرار گرفتند. آزمایش تا دریفت ۶۰ میلی‌متر ادامه یافت مگر آنکه نمونه‌ها قبل از آن دچار افت باری حداقل برابر ۲۰٪ بار نهایی گردند. در این آزمایش دو قسمت انتهایی فونداسیون دارای اتصال مفصلی بوده و حرکت انتقالی در راستای محور طولی ستون و دورانی داخل و خارج صفحه آن مقید شده است. جابه‌جایی اعمال شده به ستون از طریق یک جک مطابق پروتکل بارگذاری از پیش مشخص شده به انتهای ستون وارد شده است. (شکل ۳)



شکل ۲: پروتکل بارگذاری اعمال شده به انتهای ستون



شکل ۳: برپایی آزمایش و نحوه‌ی اعمال جابه‌جایی

مطابق آزمایش انجام شده بر روی بتن، سه نمونه در روز تست در شرایط عمل آوری مشابه نمونه‌های اصلی، مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد، برای ستون و فونداسیون برابر $25 \pm 1/2$ و $30 \pm 1/5$ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین مشخصات مکانیکی میلگردهای مورد استفاده، بر اساس نتایج آزمایش، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی میلگردهای استفاده شده در آزمایش

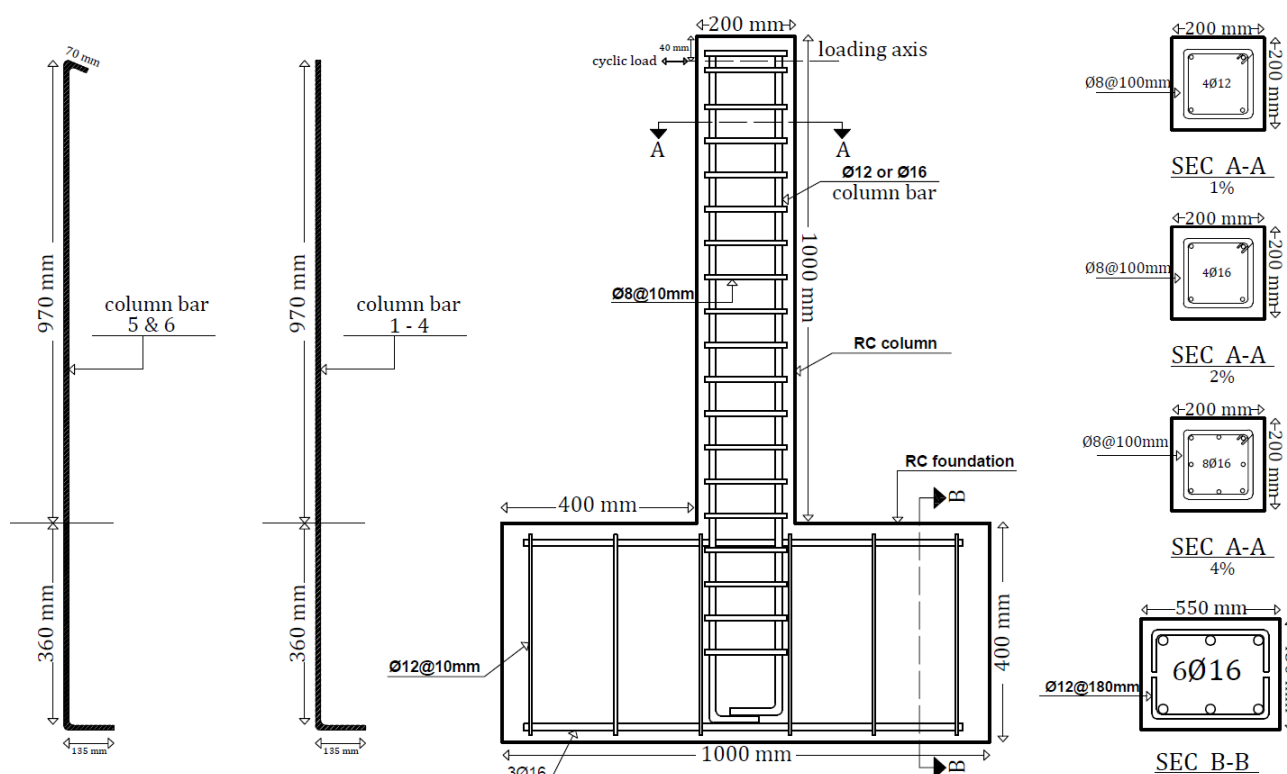
سایز قطر میلگرد (میلی‌متر)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)
۸	۵۷۷	۳۸۰
۱۲	۵۰۶	۳۷۰
۱۶	۵۴۰	۴۰۷

۳- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر، مطالعه‌ای به صورت آزمایشگاهی به منظور بررسی تأثیر جهت خم میلگردهای ریشه‌ی ستون (به سمت داخل یا خارج) انجام گرفت. به منظور بررسی تأثیر جهت خم ریشه‌ی ستون، شش مدل با ابعاد ستون یکسان و با در نظر گرفتن درصد‌های مختلف میلگردهای طولی در ستون‌ها، تحت آزمایش و بررسی قرار گرفتند. مشخصات نمونه‌های مورد بررسی مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شد. نامگذاری نمونه‌ها بر اساس جهت خم میلگرد انتظار ستون در فونداسیون و درصد تسلیم ستون انجام شد. حرف i بیانگر جهت خم داخل و حرف o خم سمت بیرون را بیان می‌کند. همچنین عدد انتهایی نام‌گذاری نشان دهنده درصد تسلیم آرماتور ستون می‌باشد. شکل ۴ نیز مشخصات هندسی و مقطع عرضی ستون‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات نمونه‌های مورد بررسی

ردیف	نمونه	درصد میلگرد	آرماتور ستون	جهت خم
۱	Co-1	یک درصد	۴۵۱۲	داخل
۲	Co-1	یک درصد	۴۵۱۲	خارج
۳	Co-2	دو درصد	۴۵۱۶	داخل
۴	Co-2	دو درصد	۴۵۱۶	خارج
۵	Co-4	چهار درصد	۸۵۱۶	داخل
۶	Co-4	چهار درصد	۸۵۱۶	خارج



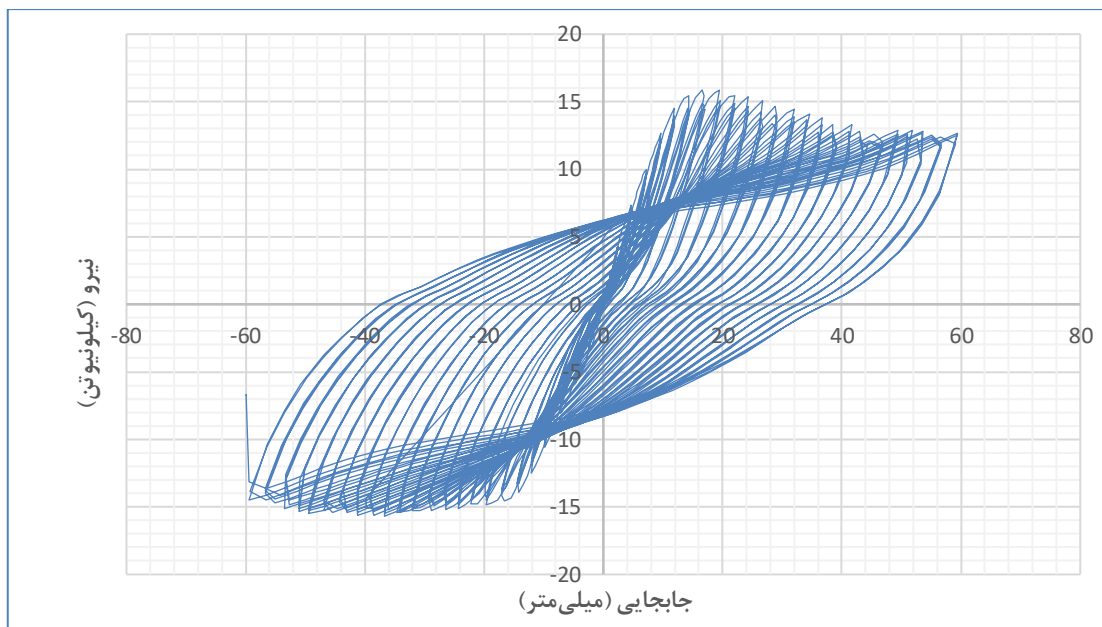
شکل ۴: شماتیک ابعاد هندسی ستون و فونداسیون

لازم به ذکر است، نمونه‌های ۳ و ۴ همانند نمونه‌های ۱ و ۲ بوده، با این تفاوت که درصد میلگردهای طولی ستون متفاوت بود؛ در حالی که در نمونه‌های ۵ و ۶ از یک خم ۱۳۵ درجه با طول ۷۰ میلی‌متر در قسمت انتهایی (قسمت انتهایی بالای ستون) میلگردهای طولی جهت به حداقل رساندن لغزش میلگرد در بتن استفاده شد. برای فونداسیون از شش میلگرد سایز قطر ۱۶ میلی‌متر، در بالا و پایین مقطع فونداسیون استفاده گردید. همچنین از میلگرد شماره ۱۲ (قطر برابر ۱۲ میلیمتر) با فواصل ۱۸۰ میلی‌متر برای فونداسیون و میلگرد شماره ۸ (قطر برابر ۸ میلی‌متر) با فواصل ۱۰۰ میلی‌متر برای ستون‌ها استفاده گردید.

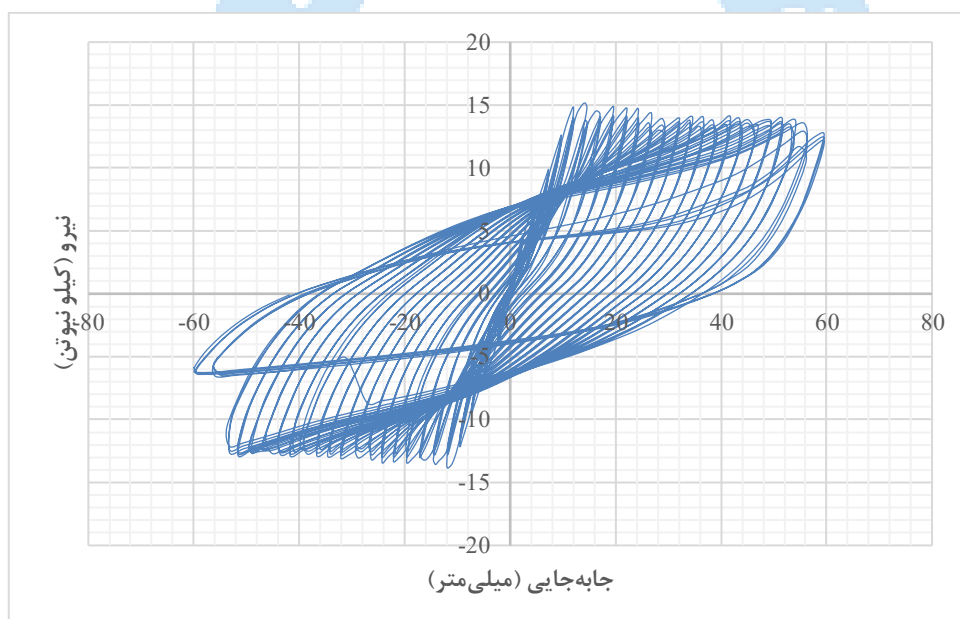
۴- بررسی نتایج آزمایشگاهی نمونه‌ها

با شروع بارگذاری، جابه‌جایی اعمال شده و نیروی اعمال شده به انتهای ستون توسط سیستم اعمال نیروی ثابت و نمودار نیرو در برابر جابه‌جایی برای نمونه‌ها تا انتهای بارگذاری و اعمال جابه‌جایی ۶۰ میلی‌متر در سیکل انتهایی ترسیم گردید (شکل ۵-۱۰). با دقت در نتایج مشاهده می‌گردد ظرفیت باربری نمونه‌های با ρ نسبت میلگردهای طولی برابر ۱٪ و ۲٪ و خم به سمت خارج هسته، دچار افت ناگهانی مقاومت گردید. همچنین همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش درصد میلگرد ستون، مقاومت نهایی نیز افزایش داشته است.

در نمونه‌ی Ci-1 مقاومت بیشینه ۱۵/۸۷ کیلونیوتن در تغییر مکان جانبی ۲۰ میلی‌متر اتفاق افتاد. این مقدار برای نمونه‌ی C0-1 برابر ۱۵/۱۵ کیلونیوتن و در تغییر مکان جانبی ۱۴/۲ میلی‌متر مشاهده گردید.

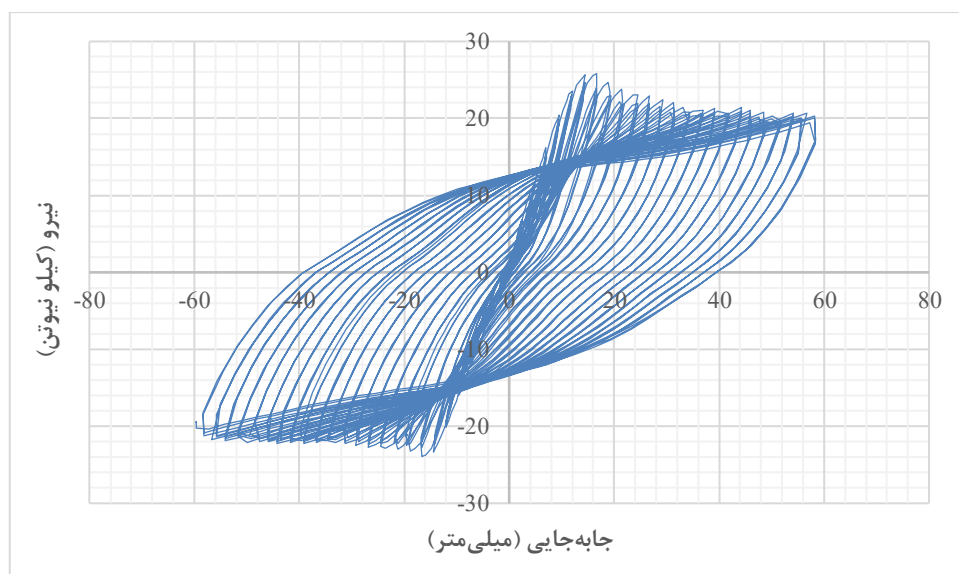


شکل ۵: نمودار نیرو جابه‌جایی نمونه‌ی ۱ با درصد میلگرد ۱٪ و جهت خم میلگرد به سمت داخل هسته‌ی ستون

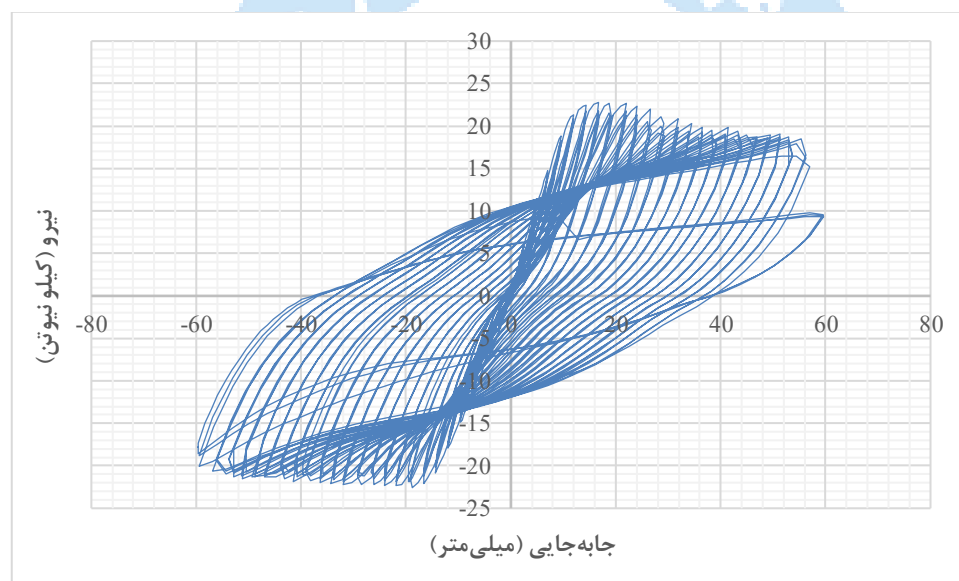


شکل ۶: نمودار نیرو جابه‌جایی نمونه‌ی ۲ با درصد میلگرد ۱٪ و جهت خم میلگرد به سمت خارج هسته‌ی ستون

نمونه‌ی **Ci-2** مقاومت بیشینه $23/9$ کیلو نیوتن در تغییر مکان جانبی 17 میلی متر را نشان داد. در مورد نمونه‌ی **C0-2** مقاومت بیشینه در تغییر مکان جانبی 20 میلی متر و برابر $23/75$ کیلو نیوتن مشاهده شد.

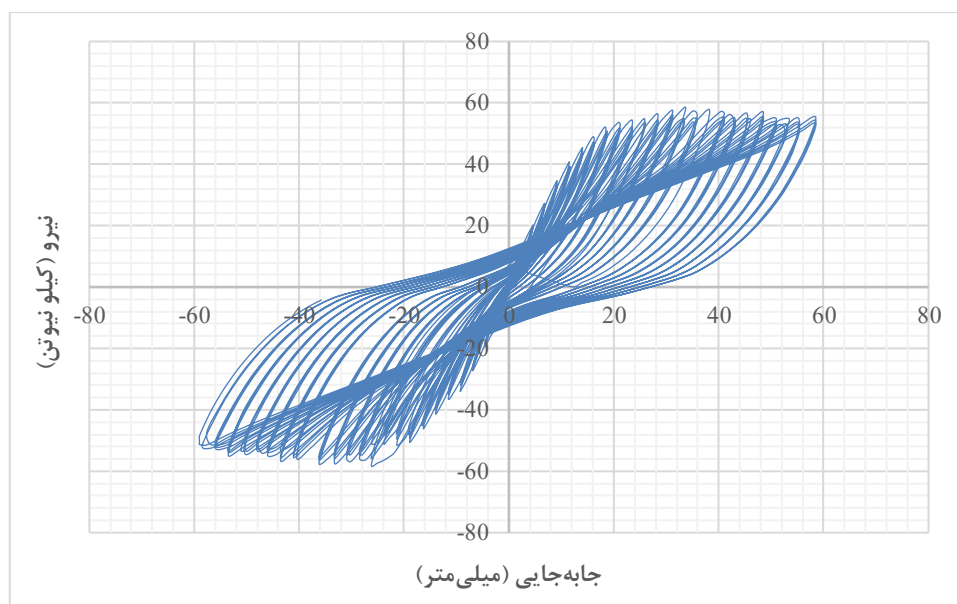


شکل ۷: نمودار نیرو جابه‌جایی نمونه‌ی ۳ با درصد میلگرد ۲٪ و جهت خم میلگرد به سمت داخل هسته‌ی ستون

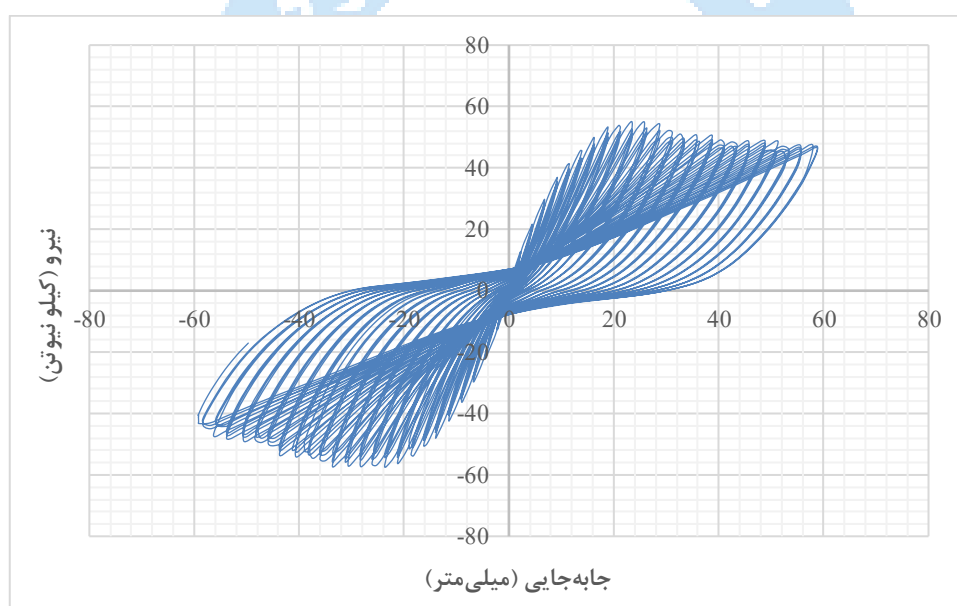


شکل ۸: نمودار نیرو جابه‌جایی نمونه‌ی ۴ با درصد میلگرد ۲٪ و جهت خم میلگرد به سمت خارج هسته‌ی ستون

در نمونه‌ی Ci-4 مقاومت بیشینه ۵۸/۲۵ کیلونیوتن در تغییرمکان جانبی ۳۳/۷ میلی‌متر اتفاق افتاد. این مقدار برای نمونه‌ی C0-4 برابر ۵۷/۳۵ کیلونیوتن و در تغییرمکان جانبی ۲۳/۷ میلی‌متر مشاهده گردید.



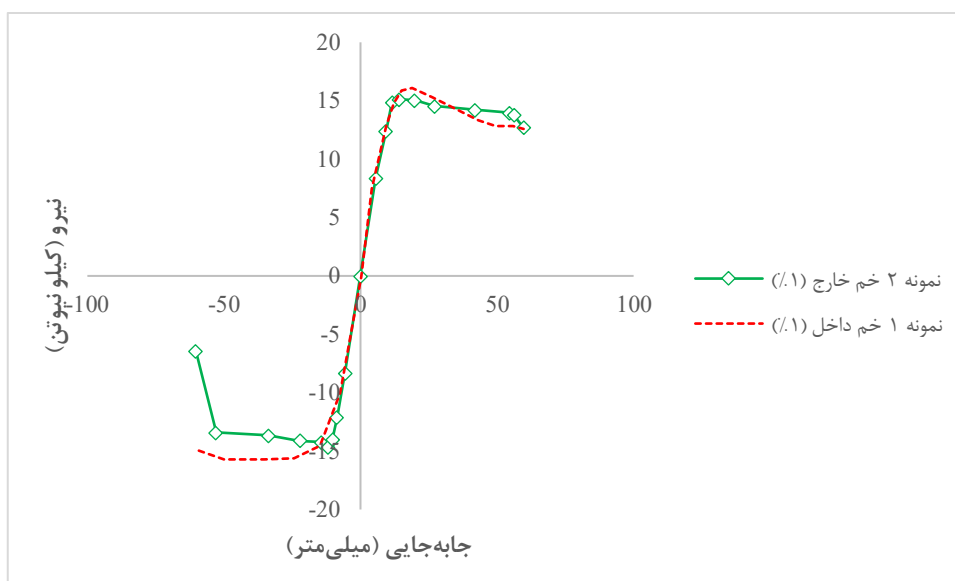
شکل ۹: نمودار نیرو و جابہ جایی نمونه‌ی ۵ با درصد میلگرد ۴٪ و جهت خم میلگرد به سمت داخل هسته‌ی ستون



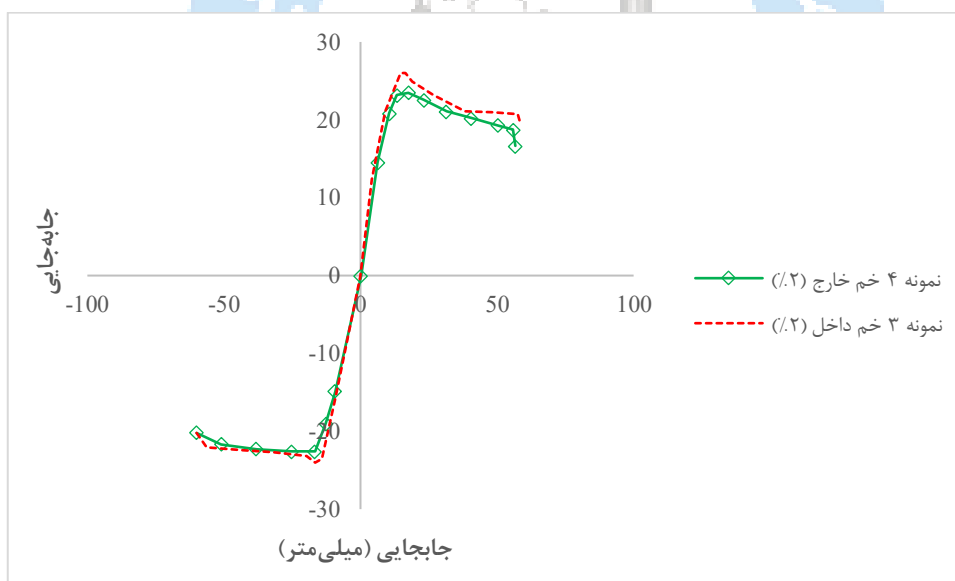
شکل ۱۰: نمودار نیرو و جابہ جایی نمونه‌ی ۶ با درصد میلگرد ۴٪ و جهت خم میلگرد به سمت خارج هسته‌ی ستون

همچنین پوش منحنی نیرو-جابہ جایی برای تمامی نمونه‌ها ترسیم و در هر دسته جداگانه بررسی و مقایسه گردید. (شکل ۱۱-۱۳). مطابق نتایج استخراج شده پوش منحنی‌های چرخه‌ای مشاهده می‌شود، تأثیر جهت خم انتهایی به سمت داخل هسته‌ی ستون برای نسبت میلگردهای طولی ۱٪ در ستون متفاوت از ۲٪ و ۴٪ است. در حالت اول (درصد میلگرد کمتر، ۱٪) با خم میلگرد به سمت داخل، مقاومت نهایی در حدود ۴/۷٪ نسبت به حالتی که جهت خم به سمت خارج هسته‌ی ستون باشد، افزایش داشته است. حال آن که این مقدار برای حالت دوم (درصد میلگرد بیشتر، ۲٪) اختلاف مقادیر پایین‌تری را تجربه نموده است (حدود ۰/۶٪). در حالت سوم (درصد

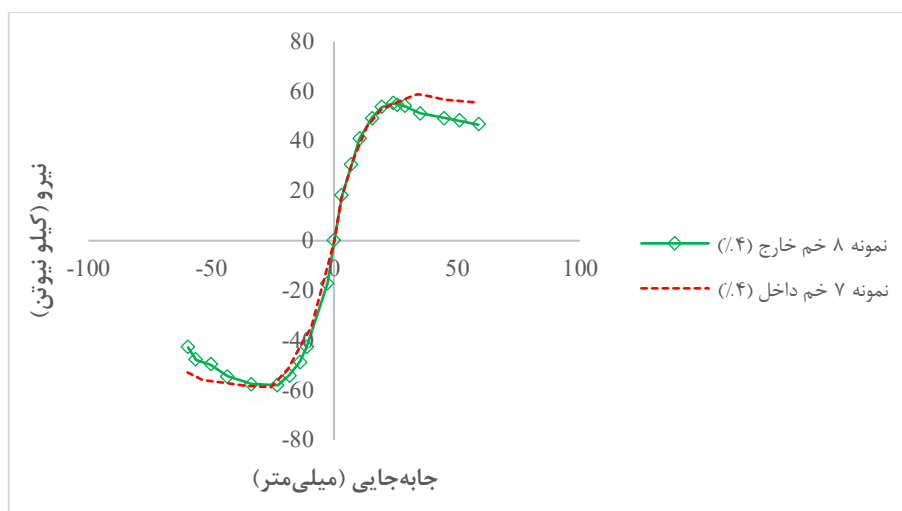
میلگرد ۴٪)، مقاومت نهایی در حالتی که خم انتهایی ستون به سمت داخل بوده به میزان تقریباً ۱/۵٪ بیشتر از حالتی است که، خم به سمت خارج هسته باشد.



شکل ۱۱: نمودار پوش-نیرو-جابجایی نمونه‌ی ۱ و ۲ با درصد میلگرد ۱٪



شکل ۱۲: نمودار پوش-نیرو-جابجایی نمونه‌ی ۳ و ۴ با درصد میلگرد ۲٪



شکل ۱۳: نمودار پوش نیرو-جابہ جایی نمونه‌ی ۵ و ۶ با درصد میلگرد ۰.۴٪

با دقت در شکل‌های ۱۴ تا ۱۹ مشخص می‌شود که در نمونه‌های هر سه گروه عمده خرابی در قسمت اتصال ستون به شالوده بوده است. در دسته اول (درصد میلگرد ۰.۱٪) ترک خوردگی ناشی از خمش در ستون مشاهده گردید و در حالتی که خم به سمت خارج بوده شکست آرماتورهای طولی ستون در چرخه‌های انتهایی مشاهده گردید. این خرابی در گروه دوم (درصد میلگرد ستون ۰.۲٪) محسوس تر بوده و علاوه بر ترک‌های خمشی در ستون، بتن در پای اتصال به طور کامل دچار تخریب فشاری قرار گرفته است. در گروه سوم (درصد میلگرد ۰.۴٪) نیز مود خرابی همانند نمونه‌های قبل به صورت خمشی و در پای اتصال صورت گرفته است.



شکل ۱۵: گسیختگی نمونه‌ی ۲ با درصد میلگرد ۰.۱٪ و جهت خم میلگرد به سمت خارج هسته‌ی ستون



شکل ۱۴: گسیختگی نمونه‌ی ۱ با درصد میلگرد ۰.۱٪ و جهت خم میلگرد به سمت داخل

هسته‌ی ستون



شکل ۱۷: گسیختگی نمونه‌ی ۴ با درصد میلگرد ۲٪ و جهت خم میلگرد به سمت خارج هسته‌ی ستون



شکل ۱۶: گسیختگی نمونه‌ی ۳ با درصد میلگرد ۲٪ و جهت خم میلگرد به سمت داخل هسته‌ی ستون



شکل ۱۹: گسیختگی نمونه‌ی ۶ با درصد میلگرد ۴٪ و جهت خم میلگرد به سمت خارج هسته‌ی ستون



شکل ۱۸: گسیختگی نمونه‌ی ۵ با درصد میلگرد ۴٪ و جهت خم میلگرد به سمت داخل هسته‌ی ستون

با توجه به جدول ۳ مشخص است، ظرفیت باربری ستون در حالتی که خم به سمت داخل هسته‌ی ستون می‌باشد بیشتر بوده ولی این اختلاف در تمامی موارد مورد آزمایش کمتر از ۵٪ است. بیشترین اختلاف در ظرفیت باربری برای درصد میلگرد ۱٪ اتفاق افتاد. همچنین نسبت مقاومت در دررفت ۲٪ به مقاومت بیشینه در تمامی موارد اعدادی نزدیک به واحد را تجربه کرده است، به این معنی که در نمونه‌های مورد بررسی مقاومت بیشینه در دررفت‌های نزدیک به ۲٪ رخ داده است. با توجه به نمودارها و نتایج مشخص است که جهت خم داخل مزیت اندکی نسبت به جهت خم خارج داشته و این اختلاف در همه حالات کمتر از ۵٪ بوده است. بنابراین در صورت رعایت طول مهاری لازم، جهت خم داخل و خارج نتایجی نزدیک به هم و با اختلاف کمتر از ۵٪ را نتیجه می‌دهند. لازم به ذکر است در نمونه‌هایی که خم ریشه‌ی ستون به سمت خارج هسته‌ی ستون بوده، زوال مقاومت بیشتری در دررفت‌های بالاتر اتفاق افتاد؛ به طوری که برای نمونه‌های خم به سمت داخل نسبت مقاومت در دررفت ۴٪ به مقاومت بیشینه بالای ۰/۹ و تقریباً نزدیک به واحد، ولی برای نمونه‌های خم به سمت خارج این نسبت زیر ۰/۹ می‌باشد. اگرچه جهت خم داخل تأثیر بالایی در افزایش مقاومت نهایی نداشته ولی زوال مقاومت با تأخیر بیشتری در این حالت اتفاق افتاده است و اتصال دارای اتلاف انرژی بالاتری بوده است.

جدول ۳: مقادیر مقاومت و دررفت در مقاومت بیشینه نمونه‌های مورد بررسی

ردیف	نمونه	جهت خم	ρ	مقاومت در دررفت ۲٪	مقاومت در دررفت ۴٪	ظرفیت باربری حداکثر (kN)	دررفت در مقاومت بیشینه %	نسبت مقاومت در دررفت ۴٪ به حداکثر دررفت	اختلاف ظرفیت باربری حداکثر در دو حالت خم داخل و خارج (%)
۱	Ci-1	داخل	۱٪	۱۵/۸۶	۱۵/۱۲	۱۵/۸۷	۲	۰/۹۵	۴/۷٪
۲	Co-1	خارج	۱٪	۱۵	۱۲/۴۷	۱۵/۱۵	۱/۴۲	۰/۸۳	
۳	Ci-2	داخل	۲٪	۲۲/۳	۲۰/۶۷	۲۳/۹	۱/۷	۰/۹۳	۱۰/۱۶٪
۴	Co-2	خارج	۲٪	۲۳/۷۵	۲۰/۱	۲۳/۷۵	۲	۰/۸۵	
۵	Ci-4	داخل	۴٪	۵۴	۵۴	۸۵/۲۵	۳/۳۷	۱	۱۱/۵٪
۶	Co-4	خارج	۴٪	۵۳/۵	۴۷/۳۹	۵۷/۳۵	۲/۳۷	۰/۸۸	

در ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها، مساحت داخل هر چرخه بیانگر مقدار انرژی مستهلک در آن چرخه می‌باشد. بدین ترتیب مقدار استهلاک انرژی تجمعی تا یک چرخه مشخص به صورت جمع مساحت داخل چرخه‌های متوالی تا آن چرخه خاص است. همان طور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، میزان انرژی جذب شده در نمونه‌ها با خم به سمت داخل نسبت به سمت خارج بیشتر است که این اختلاف برای تمامی نمونه‌های در حدود ۴ تا ۶٪ بوده است. همچنین لازم به ذکر است با دو برابر شدن درصد میلگرد مقطع، میزان جذب انرژی تقریباً دو برابر و با افزایش درصد میلگرد مقطع به چهار برابر، میزان جذب انرژی نیز تقریباً ۴ برابر شده است. بنابراین می‌توان استنباط نمود میزان جذب انرژی ارتباط مستقیمی با درصد میلگرد مقطع داشته و برای حالتی که جهت خم به سمت داخل باشد افزایش اندکی نسبت به حالتی که جهت خم به سمت خارج باشد، داشته است.

جدول ۴: مقادیر انرژی جذب شده در نمونه‌های مورد بررسی

ردیف	نمونه	انرژی (نیوتن . میلی‌متر)	درصد اختلاف انرژی خم نمونه داخل نسبت به نمونه با خم خارج (%)	میزان افزایش انرژی جذب شده نسبت به نمونه با درصد میلگرد ۱٪ و جهت خم داخل	میزان افزایش انرژی جذب شده نسبت به نمونه با درصد میلگرد ۱٪ و جهت خم خارج
۱	Ci-1	۱۷۵۰	+۵/۷۵	۱	۱
۲	Co-1	۱۶۵۵			
۳	Ci-2	۲۷۰۳	+۴/۵	۱/۵۴	۱/۵۶
۴	Co-2	۲۵۸۶			
۵	Ci-4	۶۲۴۴	+۵/۹	۳/۵۶	۳/۵۶
۶	Co-4	۵۸۹۶			

۵- نتیجه گیری

این تحقیق به بررسی تأثیر جهت خم میلگردهای طولی ستون در محل اتصال به شالوده می‌پردازد. بدین منظور ۶ نمونه آزمایشگاهی با ابعاد یکسان تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. متغیرهای آزمایشگاهی شامل نسبت میلگردهای طولی ستون (۱، ۲ و ۴٪) و جهت خم میلگردهای طولی (داخل یا خارج) بوده است. مطابق نتایج این تحقیق مشاهده گردید:

۱- تغییر جهت خم میلگردهای طولی ستون در محل اتصال به شالوده از خارج به داخل، تأثیر مثبتی در مقاومت ستون تحت بار جانبی خواهد داشت. البته این تفاوت کمتر از ۵٪ مقاومت نهایی قابل تحمل نمونه‌ها بوده و برای حالتی که ستون درصد میلگرد کمتری (۱٪) دارد، محسوس‌تر می‌باشد. با افزایش درصد میلگرد طولی ستون به ۲ و ۴٪، تأثیر جهت خم انتهای از حالت جهت خم به سمت خارج هسته ستون به سمت داخل تا حدود ۱٪ کاهش داشته است. در حقیقت تأثیر جهت خم ریشه ستون مطابق نتایج این تحقیق برای ستون با درصد میلگرد پایین (۱٪) بیشتر از تأثیر آن در ستون یا درصد میلگرد طولی بالاتر (۲ و ۴٪) است. لذا از آنجا که در بهترین حالت نیز این افزایش مقاومت بیشینه در نتیجه تغییر جهت خم کمتر از ۵٪ می‌باشد، شاید بتوان گفت قابل اغماض می‌باشد.

۲- در نمونه‌هایی که خم ریشه‌ی ستون به سمت خارج هسته‌ی ستون بود، افت مقاومت در دررفت‌های بالاتر بیشتر بود. زوال مقاومت در دررفت ۴٪ در نمونه‌های با خم خارج تا ۱۰٪ نسبت به نمونه‌های با خم داخل بیشتر بوده است. در حالت جهت خم داخل، زوال مقاومت با تأخیر بیشتری اتفاق افتاده است و اتصال دارای اتلاف انرژی بالاتری بوده است، هرچند اختلاف حاصله چندان محسوس نبوده (در بالاترین حالت در حدود ۶٪) و عملکرد خم خارج نیز مناسب بوده است. لذا از حیث انرژی نیز ستون‌های دارای خم انتهای به سمت داخل هسته ستون عملکرد کمی مناسب‌تر در مقایسه با ستون‌های دارای خم انتهای به سمت خارج هسته ستون دارند اما به دلیل اختلاف انرژی کم (حدود ۵٪)، قابل اغماض می‌باشد.

۳- میزان انرژی جذب شده در نمونه‌های با خم به سمت داخل هسته ستون تا حدود ۶٪ نسبت به خم به سمت خارج هسته ستون افزایش داشته است. ضمناً میزان جذب انرژی ارتباط مستقیمی با درصد میلگرد داشت و با افزایش درصد میلگرد، میزان جذب انرژی نیز افزایش یافت.

۴- در مجموع با توجه به نمونه‌های مورد آزمایش در این تحقیق، رفتار ستون با خم میلگرد به سمت داخل، تا حدودی بهتر ارزیابی گردید ولی اختلاف نتایج چندان محسوس نیست که الزام آیین‌نامه به خم داخل را توجیه نماید. از این رو خم میلگردهای ریشه به سمت داخل تنها در حد یک توصیه پیشنهاد می‌گردد. لازم به ذکر است که این نتایج با توجه به تعداد محدودی نمونه حاصل گردید و نتایج حاصل باید با آزمایشات بیشتری بر روی نمونه‌های با مقیاس واقعی تأیید گردند.

مراجع

- [1] Moehle, J. P. (2015). Seismic design of reinforced concrete buildings (Vol. 814). New York: McGraw-Hill Education.
- [2] Nilsson, I. H., & Losberg, A. (1976). Reinforced concrete corners and joints subjected to bending moment. *Journal of the Structural Division*, 102(6), 1229-1254.
- [3] Mahrenholtz, C., Akguzel, U., Eligehausen, R., & Pampanin, S. (2014). New design methodology for seismic column-to-foundation anchorage connections. *ACI Structural Journal*, 111(5), 1179.
- [4] Witushynsky, N., & Sneed, L. (2013). Evaluation of the Orientation of 90° and 180° Reinforcing Bar Hooks in Wide Members.
- [5] Fan, J.-J., Feng, D.-C., Wu, G., Hou, S., & Lu, Y. (2020). Experimental study of prefabricated RC column-foundation assemblies with two different connection methods and using large-diameter reinforcing bars. *Engineering Structures*, 205, 110075.
- [6] Truong, G. T., Choi, K.-K., & Kim, H.-S. (2017). Punching-shear behaviors of RC-column footings with various reinforcement and strengthening details. *Engineering Structures*, 151, 282-296.
- [7] Schmidt, P., Ungermann, J., & Hegger, J. (2021). Contribution of concrete and shear reinforcement to the punching shear resistance of column bases. *Engineering Structures*, 245, 112901.
- [8] Hegger, J., Ricker, M., Ulke, B., & Ziegler, M. (2007). Investigations on the punching behaviour of reinforced concrete footings. *Engineering Structures*, 29(9), 2233-2241.
- [9] Zhou, Y., Yang, J., Luo, X., Hwang, H.-J., Chen, H., Sun, J., Yi, W., & Kang, S.-M. (2022). Pendulum impact loading tests of precast concrete columns with various column base connections. *Engineering Structures*, 252, 113736.
- [10] Pul, S., Senturk, M., Ilki, A., & Hajirasouliha, I. (2021). Experimental and numerical investigation of a proposed monolithic-like precast concrete column-foundation connection. *Engineering Structures*, 246, 113090.
- [11] Khateeb, B. M., Siddiqui, N. A., Almusallam, T. H., Abbas, H., & Al-Salloum, Y. A. (2020). Behavior of novel CFST circular column-to-foundation connections under cyclic loading. *Engineering Structures*, 221, 111051.
- [12] Won, D., Lee, J., Seo, J., Kang, Y.-J., & Kim, S. (2020). Hysteretic performance of column-footing joints with steel composite hollow RC columns under cyclic load. *Journal of Building Engineering*, 29, 101165.
- [13] Miralami, M., Esfahani, M. R., & Tavakkolizadeh, M. (2019). Strengthening of circular RC column-foundation 14 with GFRP/SMA bars and CFRP wraps. *Composites Part B: Engineering*, 172, 161-172.
- [13] Pereiro-Barceló, J., Bonet, J. L., Rueda-García, L., & Ciurana-Tatay, Á. (2022). Behaviour of retrofited precast UHPC and Ni-Ti SMA column-to-foundation connection with CFRP wrapping layers. *Construction and Building Materials*, 323, 126536.
- [15] Wang, X., Xu, T., Liu, J., Wang, S., & Chen, Y. F. (2020). Seismic performance of high-strength anchor rebar column-foundation connection for CFST. *Journal of Constructional Steel Research*, 173, 106269.
- [16] Simões, J. T., Faria, D. M., Ruiz, M. F., & Muttoni, A. (2016). Strength of reinforced concrete footings without transverse reinforcement according to limit analysis. *Engineering Structures*, 112, 146-161.
- [17] Khaksefidi, S., & Ghalehnovi, M. (2021). The effect of concrete type and rebar diameter on bond strength in reinforced concrete structures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 1), 367-387.

- [18] Wu, D., Ding, Y., Su, J., Li, Z.X., Zong, L. and Feng, K., (2021). Effects of tie detailing configurations on reinforcement buckling and seismic performance of high-strength RC columns. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147, p.106791.
- [19] Guan, D., Chen, Z., Liu, J., Lin, Z. and Guo, Z., (2021). Seismic performance of precast concrete columns with prefabricated UHPC jackets in plastic hinge zone. *Engineering Structures*, 245, p.112776
- [20] Haber, Z.B., Saiidi, M.S. and Sanders, D.H., (2014). Seismic performance of precast columns with mechanically spliced column-footing connections. *ACI Structural Journal*, 111(3), pp.639-650
- [21] ASTM E2126. (2019). *Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.

