

Experimental evaluation of the confinement of crossties on development length of 90 degree bent standard hooks in tension

Masoud Fatemi Ghomi¹, Mehdi Alirezaei^{2*} , Mehdi Sharifi³, Mohammad Sajjad Zareian⁴

1. M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Shahab Danesh, Qom, Iran.
2. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Malayer, Malayer, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.
4. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahab Danesh University, Qom, Iran.

Abstract

In this study, the effect of crosstie on the anchorage strength of standard hooks is investigated. Bars with standard hooks in tension are often used to anchor reinforcing bars where concrete dimensions element are not sufficient to provide the required development length for straight reinforcement. In previous researches, concrete breakout failure was the predominant failure mode of hooked bars. Closely-spaced hooks provide a lower strength per hooked bar than more widely-spaced hooked bars because the area of the breakout surface is reduced for the more closely-spaced bars. The effects of f_y of bars, spacing, and confinement by ties or stirrups have been updated to reflect test results, in 25.4.3.1 of ACI 318-19. In this formula, The confining reinforcement factor ψ_r is based on test results reported by Ajaam et al. (2018). Base on ACI 318-19 definition, A_{th} is total cross-sectional area of ties or stirrups confining hooked bars. Therefore crossties are not included in the relationship. The purpose of this study is to expand the understanding of the behavior of confinement effect of crossties on development length bars with 90 degree bent hooks in tension. In this study, 3 simulated beam-column joints were tested as a continuation of previous work by Ajaam et al. (2018). The results of this experimental study show that the ACI318-19 provisions underestimate the contribution of confinement by crossties on the development length bars with 90 degree bent hooks in tension. The test parameters included bar size (18 mm), hook bend angle (90°), embedment length (250 mm), amount of confining reinforcement within the joint (no crosstie reinforcement to one SP), concrete compressive strength (25 MPa), center-to-center spacing between hooked bars (3db), number of hooked bars (3) and arrangement of hooked bars (one layer). The results of this study show that the current Code provisions overestimate the contribution of the concrete compressive strength and the bar size on the anchorage strength of hooked bars. The incorporation of the modification factors for cover and confining reinforcement in the provisions in the ACI Building Code (ACI 318-18) produces an unconservative estimation of anchorage strength of hooked bars, particularly with large hooked bars and closely-spaced hooked bars (hooked bars with center-to-center spacing less than 3db). Closely-spaced hooked bars exhibit less anchorage strength than widely-spaced hooked bars. The reduction in anchorage strength of closely-spaced hooked bars is a function of both the spacing between hooked bars and the amount of confining reinforcement. Both the hooks and the straight portion of hooked bars contribute to anchorage strength. Test results from this study, along with test results from earlier work covering specimens without and with confining reinforcement, concrete compressive strengths between 25 and 35 MPa, and bars stresses at anchorage failure ranging from 300 and 550 MPa, were used to develop descriptive equations for the anchorage strength of hooked bars. In addition to the design provisions for development and anchorage, test results for these specimens are compared with strengths based on the strut-and-tie method in ACI 318-19. Finally, a granular micromechanics model and associated model for reinforcing steel-concrete interaction are evaluated for their general applicability for use in finite element modeling of anchorage of headed and straight reinforcing bars to concrete.

Review History

Received: Feb 26, 2024

Revised: May 13, 2024

Accepted: Jul 13, 2024

Keywords

Anchorage

Confinement

Crossties

Experimental test

Beam-column joints

* Corresponding Author Email: m.alirezaei@iiees.ac.ir - ORCID: 0000-0002-1802-0451

بررسی تجربی محصورکنندگی سنجاقی‌ها در طول گیرایی میل‌گردهای کششی دارای قلاب استاندارد ۹۰ درجه

مسعود فاطمی قمی^۱، مهدی علیرضائی^{۲*} , مهدی شریفی^۳، محمدسجاد زارعیان^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهاب دانش، قم، ایران.

۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ملایر، ملایر، ایران.

۳. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

۴. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهاب دانش، قم، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

در این مطالعه، اثر سنجاقی روی طول مهاری قلاب‌دار میل‌گرد در کشش، بررسی شده است. معمولاً برای مهار آرماتورها در محدوده‌های کم‌حجم مثل محدوده تیر به ستون از مهار قلاب‌دار میل‌گرد استفاده می‌شود. در مطالعات، خرابی قلوه‌کن شدن بتن، حالت اصلی برای آرماتورهای قلاب‌دار بوده است. همچنین فاصله کم آرماتورهای مهار شونده در محل اتصال، یکی دیگر از دلایل عدم مهار آنها در چشمه اتصال است. در آیین‌نامه‌های جدید طراحی، آثار مقاومت مشخصه بتن، اثر محصورشدگی آن توسط تنگ‌های تأمین شده، مورد بررسی قرار گرفته است و در بخش ۱۰، ۲، ۳ و ۴ آیین‌نامه ACI 318-19 و همچنین در مبحث نهم، روابط جدیدی برای طول مهاری قلاب‌دار آرماتور در کشش داده شده است. اما پارامتر مهم این روابط Ψ_r یا ضریب مربوط به اثر محصورشدگی است که در مطالعات مهم اخیر در این ارتباط، مورد بررسی قرار گرفت. مطابق تعریف آیین‌نامه ACI 318-19 مقدار ضریب Ψ_r به میزان خاموت‌ها و تنگ‌های محصورکننده و فاصله آرماتورهای طولی مهار شونده وابسته است و تأثیر محصورکنندگی سنجاقی‌ها در طول گیرایی میل‌گرد کششی قلاب‌دار در نظر گرفته نشده است؛ پس در این مطالعه، به بررسی اثر وجودی سنجاقی بر طول مهاری آرماتورهای تیر با قلاب استاندارد پرداخته شده است. در این مطالعه سه نمونه تمام مقیاس با ابعادی برابر ولی با چیدمان‌های مختلف سنجاقی تحت بارگذاری شبه استاتیکی یک طرفه مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌های مورد آزمایش شامل یک نمونه فاقد سنجاقی و دو نمونه دیگر دارای سنجاقی تک و دوبل هستند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، در دو نمونه دارای سنجاقی، اثر آنها در مهار آرماتورهای قلاب‌دار، قابل توجه است. پارامترهای بکار رفته در آزمایش شامل قطر آرماتورها (با قطر ۱۸ میلی‌متر)، زاویه قلاب استاندارد (۹۰ درجه) طول مهار میل‌گرد (۲۵۰ میلی‌متر)، تعداد آرماتورهای عرضی محصورکننده چشمه اتصال (یکی از نمونه‌ها بدون سنجاقی بود)، مقاومت مشخصه بتن (۲۵ مگاپاسکال)، فاصله مرکز به مرکز آرماتورهای مهار شده (۳ برابر قطر)، تعداد میل‌گردهای قلاب شده (۳ عدد)، تعداد لایه‌های آرماتورهای مهار شوند (یک لایه) می‌شود.

کلمات کلیدی

طول مهاری آرماتور

محصورشده

سنجاقی

آزمایش تجربی

اتصال تیر به ستون

۱- مقدمه

به طور کلی طبق ضوابط مبحث نهم [1] و ACI 318-19، دو رابطه برای تعیین L_{dh} (طول مهار می‌لگرد قلابدار در کشش) داده شده است. رابطه اول مربوط به ضوابط غیرلرزه‌ای بوده که در این مطالعه روی آن بحث شده است. رابطه دوم به صورت زیر است که در بخش ضوابط لرزه‌ای مبحث نهم آورده شده است.

$$l_{dh} = f_y d_b / (5.4 \lambda \sqrt{f'_c}) > 8 d_b \text{ و } 150 \text{ mm} \quad (1)$$

در این رابطه اثر محصورشدگی آرماتورها دیده نشده است اما در رابطه اول که به صورت زیر و در بخش ضوابط غیرلرزه‌ای داده شده، به شکل مستقیم تابعی از محصورشدگی آرماتورهای مهار شوند نیز است:

$$l_{dh} = \frac{\psi_e \psi_r \psi_o \psi_c}{\lambda} \frac{0.043 f_y}{\sqrt{f'_c}} d_b^{1.5} \quad (2)$$

البته در این رابطه اثر سنجاقی بر روی طول مهار دیده نشده است. در رابطه اخیر، ψ_e (ضریب پوشش) برای میلگردهای با اندود اپوکسی یا با اندود دو گانه‌ای اپوکس و روی برابر 1.2، برای میلگردهای بدون اندود و میلگردهای با اندود روی (گالوانیزه) برابر یک است. مقدار ψ_o (ضریب محل مهار) برای میلگردهای با قطر کوچکتر یا مساوی ۳۴ میلی‌متر و مهار شده در هسته‌ی ستون و با پوشش جانبی عمود بر صفحه‌ی قلاب بیش از ۶۵ میلی‌متر و یا با پوشش جانبی عمود بر صفحه‌ی قلاب بیش از شش برابر قطر میلگرد برابر یک و برای سایر موارد برابر 1.25 می‌باشد. مقدار ψ_c برای بتن با مقاومت کمتر از ۴۲ مگاپاسکال برابر $f'_c / 105 + 0.6$ و برای بتن با مقاومت بزرگتر یا مساوی ۴۲ مگاپاسکال برابر یک در نظر گرفته شود. اما مقدار ψ_r (ضریب آرماتور محصورکننده) برای میلگردهای با قطر کوچکتر یا مساوی ۳۴ میلی‌متر با $A_{th} \geq 0.4 A_{hs}$ و یا با فاصله میلگردهای مهار شونده بیش از شش برابر قطر میلگرد برابر یک و برای سایر موارد برابر 1.6 پارامتر ψ_r در رابطه (۲) عمدتاً حاصل مطالعات عجم است [4]. همچنین در تفسیر ACI و در تفسیر بند ۳، ۳، ۴، ۲۵ به صراحت به آرماتورهای محیطی به عنوان A_{th} اشاره شده است [2]. در ACI و همچنین مبحث نهم، تعریف A_{th} به صورت زیر در متن اصلی بیان شده است:

مساحت کل تنگ‌ها و خاموت‌های محصورکننده میلگردهای

مهار شده با قلاب، A_{th} که حداقل طولی معادل $0.75 l_{dh}$ از انتهای خم را در امتداد l_{dh} محصور کرده‌اند، شامل موارد «الف و ب» زیر است:

الف- تنگ‌ها و خاموت‌های محصورکننده‌ی قلاب (حداقل دو تنگ یا خاموت) موازی طول l_{dh} با فاصله‌ی مساوی در طول انتهای آزاد خم. فاصله‌ی این تنگ‌ها و خاموت‌ها باید کمتر از هشت برابر قطر میلگرد بوده و در طول پانزده برابر قطر میلگرد، اندازه‌گیری شده از قسمت مستقیم میلگرد مهار شده واقع باشند.

ب- تنگ‌ها و خاموت‌های محصور کننده قلاب (حداقل دو تنگ یا خاموت) عمود بر طول l_{dh} با فاصله‌های مساوی در امتداد طول مستقیم. فاصله این تنگ‌ها و خاموت‌ها باید کمتر از هشت برابر قطر میلگرد باشد.

همچنین طبق بند ۹-۲۰-۵-۴-۳ آرماتور طولی که در ناحیه‌ی اتصال تیر به ستون قطع می‌شوند، باید تا وجه دورتر هسته ناحیه اتصال ادامه داشته، و طول گیرایی آنها برای کشش مطابق بند ۹-۲۰-۶-۵-۵-۵-۵ برای فشار مطابق بند ۹-۲۱-۳-۸ باشد. طبق بند ۹-۲۰-۶-۵-۵-۵-۵ طول گیرایی میلگردها که به قلاب استاندارد ختم شده‌اند، باید با استفاده رابطه داده شده در این بند محاسبه شود؛ ولی نباید کمتر از ۸ برابر قطر میلگرد و ۱۵۰ میلی‌متر باشد.

در ACI 318-14 رابطه طول مهار قلابدار میلگردها در کشش به صورت $l_{dh} = \frac{\psi_e \psi_r \psi_o \psi_c}{\lambda} \frac{0.043 f_y}{\sqrt{f'_c}} d_b$ بود. همانطور از این رابطه دیده می‌شود، دو پارامتر مهم ψ_r و ψ_o در ویرایش قبلی آیین‌نامه وجود ندارند. مقدار ψ_r به صورت پله‌ای ۱/۶ یا ۱ داده شده است. در صورت عدم اقتناع شرایط، به یکباره، طول مهار قلابدار در کشش ۶۰٪ افزایش می‌یابد.

از طرف دیگر، ابعاد ستون باید طوری انتخاب شود که مهار آرماتورهای طولی تیر در آن ممکن باشد. یکی از فاکتورهای مهم در انتخاب ابعاد ستون، همین موضوع ابعاد مناسب آنها برای مهار آرماتور در آنها است؛ بنابراین حداقل بعد ستون را می‌توان به صورت زیر بر اساس طول مهار قلابدار آرماتور پیشنهاد داد:

حداقل مقدار بعد ستون = پوشش خالص ستون + قطر خاموت

$$L_{dh} + \text{ستون}$$

بنابراین، طول L_{dh} یکی از موارد مهم در تعیین ابعاد ستون‌ها است. همان‌طور که پیشتر گفته شد، این طول وابستگی زیادی به

(۱۱)، زاویه خم قلاب (۹۰ درجه یا ۱۸۰ درجه)، طول مهارب آنها و غیره بود. تنش تسلیم میلگردهای انتخابی قلاب شده (۲۲۸۰۰ تا ۱۳۸۸۰۰ psi)، مقاومت فشاری بتن (۴۴۹۰ تا ۱۴۰۵۰ psi)، فاصله مرکز به مرکز بین میلگردهای قلاب شده (۲ تا ۱۲ برابر قطر میلگرد) و تعداد میلگردهای قلاب شده ۲، ۳، ۴ و ۶ عدد انتخاب شد. برخی از نمونه‌ها حاوی کرنش سنج‌هایی بودند که در امتداد بخش مستقیم میله‌های قلاب‌دار و روی تقویت‌کننده‌های محدود کننده در اتصال مجدد نصب شده‌اند. نتایج نشان داد، آیین‌نامه در تخمین ظرفیت اتصال، برای حالتی که فاصله آرماتورها کم باشد، تخمین دست بالایی از ظرفیت خمشی دارد. با فاصله مرکز به مرکز کمتر از ۶ برابر قطر میلگرد قلاب‌دار اثر کاهش ظرفیت خمشی به شکل معنی‌داری افزایش پیدا می‌کند. میلگردهای قلاب‌دار در اتصالات تیر-ستون با نسبت عمق موثر تیر به طول تعبیه بیشتر از ۱/۵ در مقایسه با میلگردهای قلاب شده با نسبت کمتر از ۱/۵ ظرفیت خمشی کمتری دارند. همچنین آنها نشان دادند که طول مهاری قلاب باید به شکلی انتخاب شود که شکست مهاری قبل از تسلیم آرماتور ایجاد شود.

Samir Yasso و همکاران [6, 7] در سال ۲۰۱۷ نسبت به انجام و مطالعه نتایج ۳۳۸ آزمایش نمونه اتصال ستون تیر شبیه سازی شده در دانشگاه کانزاس، شامل دو، سه، یا چهار میلگرد قلاب دار شماره ۵، ۸، یا ۱۱ (شماره ۱۶، ۲۵، یا ۳۶) با خم ۹۰ درجه یا ۱۸۰ اقدام کردند. این آزمایش‌ها برای بررسی آثار فاصله میلگردهای دارای قلاب استاندارد و میزان بسیج ظرفیت خمشی به واسطه مهار این میلگردها در خارج از هسته ستون یا واسط عمق ستون، پوشش بتنی میلگردهای دارای قلاب‌های ۹۰ درجه بود. در آزمایش‌هایی که در دانشگاه کانزاس انجام شد، فاصله مرکز به مرکز بین میلگردهای دارای قلاب استاندارد، از ۳ تا ۱۲ برابر قطر میلگردها متغیر بود، میلگردهای قلاب‌دار در داخل یا خارج هسته ستون قرار می‌گرفتند، و میلگردهای قلاب‌شده به سمت دور ستون کشیده می‌شدند.

Sperry و همکاران [8] اثر زاویه میلگردهای مهارشونده در اتصال تیر به ستون را بررسی کردند. تنش تسلیم آرماتورها در محدوده شکست، در این مطالعات بین ۲۲۸ تا ۹۴۷ مگاپاسکال و مقاومت بتن مورد استفاده بین ۳۰ تا ۱۱۴ مگاپاسکال بود. در این تحقیق نشان داده شد که طول مهاری میلگردها چندان به زاویه آنها

اثر محصورشدگی آرماتورهای طولی دارد. آیین‌نامه‌های طراحی بر اساس تحقیقات آقای عجم، تنها اثر محصورشدگی خاموت‌های پیرامونی مقطع را ملاک قرار داده‌اند. دلیل این مورد هم عدم مطالعات دقیق در ارتباط با اثر سنجاقی در این ارتباط است.

پس در این پژوهش با ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی به بررسی تاثیر محصورکنندگی سنجاقی در طول گیرایی میل‌گردهای کششی دارای قلاب استاندارد پرداخته خواهد شد.

تا به امروز محققین زیادی روی رفتار طول مهاری قلاب‌دار و مستقیم آرماتورها در اتصالات تیر - ستون در قاب‌های خمشی بتن مسلح تحقیق نموده‌اند. اولین آزمایش‌های انجام گرفته روی اتصالات تیر - ستون به پژوهش‌های آقای هانسون در سال ۱۹۶۰ برمی‌گردد. ادامه کارهای هانسون در دیگر کشورها به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات پیگیری شد. نتایج کارهای تحقیقاتی انجام گرفته تا سال ۱۹۷۶ باعث انتشار ACI/ASCE352 شد که این گزارش در سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۰۰ با استفاده از دیگر تحقیقات صورت گرفته تجدید چاپ شد.

Ajaam و همکاران [4] در سال ۲۰۱۸، بررسی آزمایشگاهی اثر فاصله بین آرماتورهای مهار شوند در چشمه اتصال را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. در این پژوهش، ۶۷ نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت که در هر یک تعداد آرماتورهای مهار شوند متفاوت بود. گروه‌های ۳، ۴ و ۶ تایی با قطرهای ۱۶، ۲۵ و ۳۲ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که آنچه ACI 318-14 برای ظرفیت خمشی آرماتورها در نظر می‌گیرد، تا حدود زیادی دست بالا است. این مورد در نمونه‌های با شش میلگرد که فاصله مرکز به مرکز آرماتورها کاهش یافته بود، بیشتر از نمونه‌های دیگر بود.

Ajaam و همکاران [5] در سال ۲۰۱۷، اثر ظرفیت خمشی اتصال تیر به ستون با میلگردهای دارای قلاب استاندارد را مورد بررسی قرار دادند. هدف از این مطالعه گسترش درک رفتار میلگردهای قلاب شده در بتن با مقاومت بالا و توسعه دستورالعمل‌های طراحی بود که امکان استفاده از میلگردهای با رده‌های بالای مقاومتی و همچنین بتن با مقاومت بالا را فراهم می‌کند. در این مطالعه، ۱۲۲ اتصال ستون تیر شبیه سازی شده به عنوان ادامه کار قبلی آنها، در دانشگاه کانزاس مورد آزمایش قرار گرفتند. پارامترهای آزمایش شامل اندازه میلگردها (شماره ۵، ۸ و

۲- ضرورت انجام تحقیق

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، رابطه I_{dh} ارائه شده توسط مبحث نهم و ACI 318-19 شامل پارامتر ψ_r است که در تفسیر ACI به صراحت، اثر آرماتورهای محیطی را ملاک تعیین این پارامتر دانسته است. از این‌رو در مطالعه حاضر باتوجه‌به اینکه اثر وجودی سنجاقی توسط محقق مختلف در گذشته مورد بررسی جدی قرار نگرفته، به عنوان عنصر کلیدی در پژوهش مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در ویرایش‌های قبلی آیین‌نامه این پارامتر موجود نبود. پس نتایج حاصل از این پژوهش و پژوهش‌های موازی، می‌تواند اثر مهمی در طراحی سازه‌های بتنی داشته باشند.

۳- برنامه آزمایشگاهی

برای بررسی آثار محصور شدگی چشمه اتصال تیر به ستون توسط سنجاقی‌های آن برنامه آزمایشگاهی مطابق با مشخصات درج شده در ادامه انجام شد. تعداد نمونه‌های مورد بررسی ۳ عدد به‌صورت تقریباً با مقیاس واقعی بوده‌اند. به شکل کلی هر نوع تحقیقی که مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی باشد، با توجه به چگونگی آزمایش، روش‌های تجربی انجام آزمایش و تفسیر نتایج بدست آمده از اهمیت به سزایی برخوردار است.

مطالعات آزمایشگاهی به دو صورت مدل‌های با مقیاس (مقیاس کوچک) و یا مدل نمونه واقعی (نمونه کامل) صورت می‌گیرد. از طرفی درستی نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی به مقیاس انتخاب شده بستگی دارد. نتایج به دست آمده از ارزیابی آزمایش با نمونه‌های کامل و یا مدل‌های انتخابی با مقیاس ۱:۲ و یا ۱:۳ و یا در موارد خاص بسته با ابعاد سازه در مقیاس کوچک‌تر (مانند سازه‌های بلند در مقیاس به کوچکی ۱:۱۰۰) قابل قبول‌تر خواهد بود.

بابت بررسی بیشتر و دقیق‌تر آثار سنجاقی بر طول مهارى قلابدار، مطالعات آزمایشگاهی مطابق با جزئیاتی که در ذیل به آن اشاره می‌شود، انجام شد. به همین منظور پس از بررسی و تحقیق در مورد امکانات آزمایشگاه، سه نمونه مطابق با جزئیات ارائه شده ساخته شدند. نمونه‌ها در مقیاس یک‌به‌یک، طراحی و ساخته شدند. مقطع ستون‌های مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. ابعاد نمونه‌های مورد مطالعه به شکلی در نظر گرفت که تا

وابسته نبوده و آرماتورهای عرضی، تاثیر زیادی در طول مهارى آرماتورهای دارای قلاب ۱۸۰ درجه دارند.

Peckover و Darwin [9] در یک پژوهش آزمایشگاهی اثر پارامترهای مختلف از جمله طول میلگردهای قلابدار و فاصله جانبی آنها را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها اولیه بر روی میلگردهای با قطر ۱۶ و ۲۵ میلی‌متر با قلاب ۹۰ درجه و ۱۸۰ درجه در بتن ریخته شده با مقاومت فشاری اسمی ۳۰ مگاپاسکال انجام شد. هدف این مطالعه به دست آوردن درک مناسب از ظرفیت خمشی میلگردهای قلابدار در بتن به عنوان تابعی از متغیرهای کلیدی و استفاده از داده‌ها برای ایجاد روابط طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان بود. نتایج آزمایش از نظر کیفی با نتایج مطالعات قبلی مطابقت داشت و نشان داد که ظرفیت خمشی ایجاد شده ناشی از میلگردهای قلابدار با افزایش طول تعبیه آنها در بتن، پوشش جانبی افزایش می‌یابد. همچنین طول ستون باید به شکلی انتخاب شود که واکنش‌های تکیه‌گاهی، اندرکنشی با نیروهای داخل چشمه نداشته باشند.

L. A. Nazzari [10] در سال ۲۰۲۳ به بررسی مهار میلگردهای تقویتی با مقاومت بالا در بتن پرداخت. در مجموع ۳۱ یک آزمایش تجربی روی اتصالات شبیه سازی شده ستون-فونداسیون انجام شد تا ظرفیت مهار و رفتار میلگردهای سردار و با مقاومت بالا بررسی شود. متغیرهای مورد بررسی شامل فاصله بین میلگرد سردار، تعداد میلگردهای سردار آزمایش شده به صورت همزمان، اندازه میلگردها و سطح مقطع آرماتورها بود. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که گروهی کردن آرماتورهای قلابدار در کشش و فاصله کم آنها به شکل مستقیمی می‌تواند باعث کاهش ظرفیت مهارى میلگرد شود.

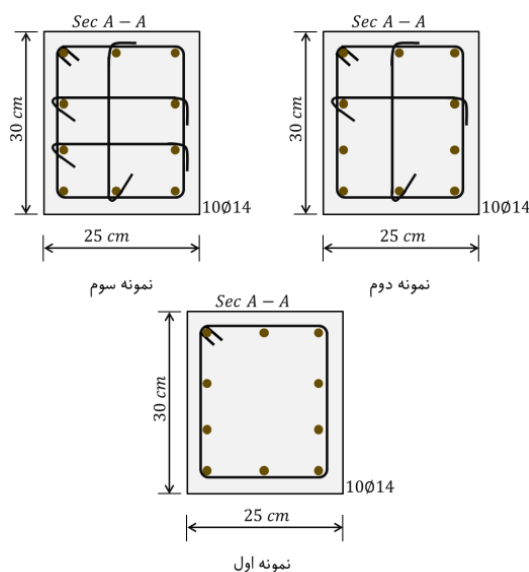
Choi و همکاران [11] در سال ۲۰۱۹ به بررسی اثربخشی الیاف فولادی به عنوان یک روش تقویتی در اتصالات تیر به ستون خارجی تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداختند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که استفاده از الیاف فولادی با درصد حجمی ۲٪ می‌تواند عملکردی مشابه با اتصالات تقویت شده با تنگ‌های فولادی معمولی داشته باشد. همچنین، استفاده همزمان از الیاف فولادی و تنگ‌های فولادی با فاصله بیشتر، باعث کاهش مقاومت برشی اتصال و افزایش آسیب در تیر می‌شود.

مقاومت مشخصه تمام نمونه‌ها C20 انتخاب شده است. بعد ستون به شکلی در نظر گرفته شده است که طول مهاري آرماتورهای قلاب‌دار در آن تأمین نشود. برای همین منظور با اضافه کردن سنجاقی‌هایی به آن اثر آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. در نمونه اول مقطع فاقد سنجاقی، در نمونه دوم، مقطع دارای یک سنجاقی و در نمونه سوم، مقطع دارای دو سنجاقی مطابق جزئیات هستند. همچنین در شکل (۲)، جزئیات برنامه آزمایشگاهی نشان داده شده است. جزئیات این پیکربندی و چگونگی آزمایش بیشتر براساس مرجع [4] می‌باشد. در این پیکربندی فرض بر آن است که نقطه میانی ستون نقطه عطف بوده و لنگر در آن کمینه است [12]. بنابراین هندسه مورد آزمایش به شکلی است که از میانه ستون طبقه بالا و پایین، دارای شرایط مفصل‌گونه باشد.

نمونه‌های آزمایش در محل کارخانه تولید بتن (شرکت نانو بتن امین) مطابق شکل (۳) ساخته شد. که پس از بتن ریزی و عمل آوری نمونه‌ها برای انجام آزمایش به دانشگاه قم حمل شد. برای نمونه‌ها تا حد امکان سعی شد عمل آوری به شکل مناسب انجام شود. رطوبت رسانی به نمونه‌ها و جلوگیری از تر و خشک شدن آنها صورت گرفت. رطوبت رسانی به نمونه‌ها به صورت مستقیم و با آب آشامیدنی انجام شد. برای اطمینان از رده مقاومتی بتن که نقش مهمی در طول مهاري قلابدار آرماتورها در کشش دارند، آزمایش بتن در محل برای تعیین مقاومت آنها انجام شد. از نمونه‌های ساخته شده مطابق با مبحث نهم مقررات ملی پنج نمونه گرفته شد که دو نمونه در سن ۷ و سه نمونه دیگر در سن ۲۸ روزگی شکسته شد. متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه ۱۸ مگاپاسکال و متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه ۲۶ مگاپاسکال بدست آمد که این مقاومت‌ها، براساس نمونه استوانه‌ای شکل می‌باشند.

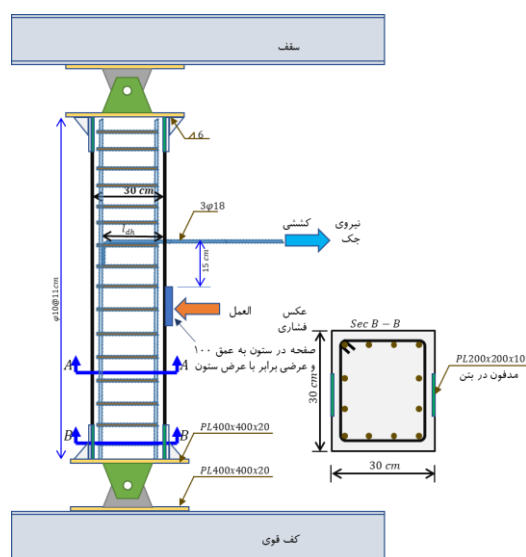
همچنین برای بررسی تنش تسلیم مورد انتظار میل‌گردهای مورد بررسی، نمونه‌هایی از آنها تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. سرعت نرخ کشش در آنها ۱۵ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شده بود. پراکندگی بین نمونه‌های مربوط به میلگرد بسیار ناچیز بود و نیروی تسلیم آنها حدود ۷۸۰۰۰ نیوتن برآورد شد. با توجه به وجود ناحیه تخت در نمودار شکل (۵) مشخص است رده آرماتورها S400 بوده است. ضمناً آرماتور استفاده شده متعلق به شرکت کویر کاشان بود.

حد امکان نزدیک به نمونه‌های واقعی باشند. برای این منظور و با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی، ارتفاع کل ستون ۲/۸ متر در نظر گرفته شد که تقریباً برابر با ارتفاع یک طبقه در یک ساختمان متعارف است. فرض شد که نقطه عطف لنگر در میانه ستون ایجاد می‌شود؛ بنابراین دو انتهای ستون به صورت مفصلی در نظر گرفته شد. برای این منظور از یک اتصال مفصلی استفاده شد. همچنین مقطع ستون نیز به شکلی در نظر گرفته شد که حدود واقعی یک ستون را داشته باشند و از طرف دیگر، مطالعه طول مهاري میل‌گرد که هدف اساسی این پژوهش است را اقناع کند.



شکل ۱. مقطع ستون‌های استفاده شده در مطالعه حاضر

Fig. 1. Column sections used in this study



شکل ۲. جزئیات برنامه آزمایشگاهی

Fig. 2. Details of the experimental program



شکل ۶. نمونه شماره سه قبل از آزمایش

Fig. 6. SP 3 before testing



شکل ۳. روند ساخت نمونه‌ها

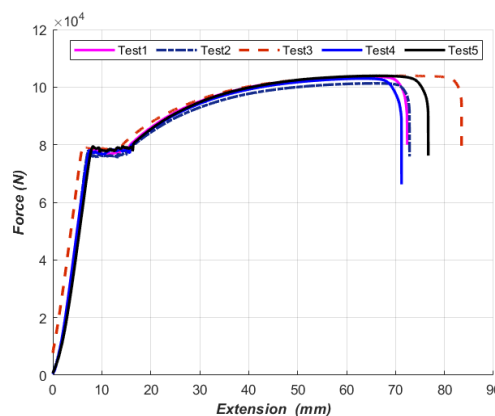
Fig. 3. The process of making samples

تمام آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، روی نمونه از پیش ساخته شده در آزمایشگاه سازه دانشگاه قم انجام شده است. با توجه به امکانات آزمایشگاه، برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای پیکربندی پیشنهادی، از بارگذاری استاتیکی یک طرفه استفاده شد. از این رو از یک جک ۴۰ تنی برای اعمال بار به مدل استفاده شد. برای برآورد اولیه ظرفیت نهایی نمونه‌ها، مقدار ظرفیت نهایی میلگردهای متصل به جک (میلگردهای بالایی که تحت کشش قرار خواهند گرفت) و با توجه به کرنش سختی فولاد، حدود ۲۵ تن برآورد شد.

شکل (۵)، نمونه شماره ۲ قبل از شروع آزمایش نشان داده است. همچنین در شکل (۶)، نمای نزدیکتری از محل اعمال بار جانبی در محل اتصال تیر به ستون برای نمونه شماره ۳، قبل از آزمایش، نشان داده شده است.

۴- نتایج آزمایشگاهی

نمونه‌ها تحت بارگذاری یک‌طرفه قرار گرفتند. در شکل (۷)، نتایج آزمایش کشش برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌های بدست آمده، ملاحظه می‌شود که برای نمونه شماره ۱ که فاقد هر گونه سنجاقی در مقطع بوده، افت مقاومت از نیرویی در حدود ۷۰ کیلونیوتنی شروع شده و جابه‌جایی زیادتر آن نسبت به بقیه نمونه‌ها بیانگر بیرون آمدن میلگرد از هسته بتنی



شکل ۴. نتایج آزمایش کشش بر روی میلگردهای استفاده شده

Fig. 4. Tensile test results on used rebars



شکل ۵. نمونه شماره دو قبل از آزمایش

Fig. 5. SP 2 before testing

شکل (۸)، نمونه شماره یک در انتهای بارگذاری و نظیر با نقطه شکست نمونه، را نشان داده است. در این لحظه، بیرون‌زدگی میلگرد تحت کشش قلابدار از بتن قابل مشاهده است که دلیل پرش در نمودار فوق برای SP1 لغزش یکی از میلگردهای تحت کشش می‌باشد. بیشتر ترک‌خوردگی برشی در چشمه اتصال و یا قلوه کن شدن کاور بتن در بخش انتهایی اتصال این محدوده مشهود است.

مقدار تنش ایجاد شده در میل‌گردها با توجه به اینکه مقدار نیروی کششی برای نمونه‌ها در حدود ۲۰ تن است که اندکی کمتر از تنش تسلیم آنها است.

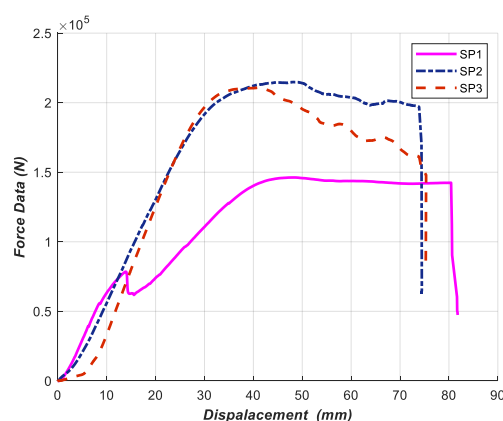
۴-۱- توسعه ترک‌ها در نمونه‌ها

در نمونه SP2 و SP3، وجود ترک‌هایی با زاویه نزدیک ۹۰ درجه در وجوه مختلف اتصال با عرض حدود ۱ تا ۲ میلی‌متر همان‌گونه که در شکل (۹) دیده می‌شود در بخش‌های زیادی از چشمه اتصال مشهود است. به دلیل مفصلی بودن دو انتهای ستون (برای اقناع شرایط نقطه عطف لنگر در میانه ارتفاع) تمرکز اصلی ترک‌ها در نواحی نزدیک اتصال تیر به ستون رخ داد. بازتویع ترک‌ها به سمت پشت اتصال، منجر به ایجاد ترک‌هایی با زاویه تند در این سمت شد. وقتی تنش در بتن به مدول گسیختگی برسد، ترک در بتن ایجاد شده و آرماتورهای آن ناحیه وارد عمل می‌شوند. در ابتدا ترک‌های موازی با میلگرد تیر با عرض کم ایجاد و سپس ترک‌های قطری دیگر نیز توسعه یافتند. در این حالت خاموت ستون به کار افتاده و مانع توسعه این ترک‌ها شد. به سبب حضور خاموت‌ها، در این گام، ستون دچار خرابی نشد.

نمونه SP1 که فاقد سنجاقی می‌باشد که در شکل (۸) نشان داده شده است. پیدایش ترک‌های عرضی و افزایش عمق آنها در طول آزمایش، از عمده مشاهدات در هنگام آزمایش بود. برای نمونه شماره ۳ که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، در انتهای آزمایش، عرض ترک زیاد شد و به دنبال آن، جابه‌جایی آرماتورهای افقی تیر نیز افزایش یافت. در انتهای آزمایش بخش قابل توجهی از بتن سمت آرماتورها به صورت قلوه‌کن شده، جدا شد.

است. تقریباً برای تمام نمونه‌ها جابه‌جایی حدود ۷۵ میلی‌متر، در زمان شکست است. در نمونه شماره یک، تکیه‌گاه پایین میلگردها که نقش مستطیل ویتنی برای بتن تیر را بازی می‌کردند، در تراز جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر دچار کماتش موضعی شد. در نمونه‌های بعدی ضعف آن اصلاح شد.

همچنین افت مقاومت بعد از ظرفیت نهایی آن، در نمونه شماره ۳ اندکی بیشتر از نمونه ۲ مشاهده شد. شیب بخش خطی سه نمونه تقریباً با هم برابر است ولی سطح زیر نمودار نمونه ۱ و دو نمونه بعدی به میزان قابل توجهی متفاوت است. جابه‌جایی نهایی گسیختگی میلگردها بین نمونه‌های مختلف، تقریباً برابر است.



شکل ۷. نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌های مختلف

Fig. 7. Force-displacement diagram of different samples



شکل ۸. نمونه شماره ۱ و جداشدن پوشش پشتی ستون

Fig. 8. SP 1 and pull out of cover of the column

۵- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، نکات مهم در تحقیق انجام شده به طور خلاصه مرور و نتایج برگرفته از آن تشریح می‌شود.

مهمترین نتایج فصل‌های مختلف این پژوهش عبارت‌اند از:

- با توجه به منحنی نیرو - جابه‌جایی بدست آمده از آزمایش، لغزش میل‌گرد در نمونه ۱ که فاقد سنجاقی است سریع‌تر از سایر نمونه‌های ایجاد شده است.
- با اینکه نمونه شماره ۳ یک سنجاقی بیشتر داشت، ولی به طور کلی عملکرد نمونه شماره ۲ که دارای یک سنجاقی و نمونه شماره ۳ که دارای دو سنجاقی می‌باشد یکسان برآورد شد.
- شیب نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه شماره ۱ که بدون سنجاقی می‌باشد، در محدوده حدود یک سوم ظرفیت نمونه شماره ۲ که دارای یک سنجاقی و نمونه شماره ۳ که دارای دو سنجاقی می‌باشد با آنها برابر بود ولی در محدوده فرای این ناحیه، شیب نمودار کاهش محسوسی داشت.
- به‌طورکلی، وجود سنجاقی، در رفتار اتصال و کاهش طول مهار شده قلاب‌دار میل‌گردهای طولی تیر اثر مثبت دارد؛ بنابراین توصیه می‌شود با مطالعات بیشتر و بررسی اثر فاصله آرماتورهای مهارشوند و اثر سنجاقی در این حالت‌ها، اثر سنجاقی بر طول مهاری آرماتورهای قلاب‌دار در کشش، به شکل صریح در آیین‌نامه‌های طراحی مورداستفاده قرار گیرد.
- قطر میل‌گردهای استفاده شده در این مطالعه نسبت به مطالعات Ajaam کمتر و تقریباً با کران پایین قطر میل‌گردهای مورداستفاده توسط ایشان برابر است؛ بنابراین برای بررسی بیشتر این اثر، نیاز است اثر قطرهای مختلف و اثر فاصله آنها نیز بررسی شوند. همچنین در مطالعات Ajaam تعداد ۱۲۲ نمونه با تنش تسلیم‌های مختلف فولاد مورد ارزیابی قرار گرفت ولی در مطالعه حاضر، تنش تسلیم میلگردهای مورد استفاده ثابت و در رده S400 بودند.

قدردانی نویسندگان

در انتها از همکاری آزمایشگاه سازه دانشگاه قم، برای تحقق اهداف پژوهشی این تحقیق، قدردانی می‌شود.



شکل ۹. نمونه شماره ۲ ترک‌هایی با زاویه نزدیک ۹۰ درجه
Fig. 9. SP 2 and cracks with an angle close to 90 degrees



شکل ۱۰. افزایش عمق ترک‌ها در هنگام آزمایش برای نمونه شماره سه
Fig. 10. Crack depth increase during testing in SP 3

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارند.

منابع مالی

بخشی از هزینه‌های این مطالعه با پشتیبانی سازمان نظام مهندسی استان قم انجام شده است.

سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان با هم برابر است.

References

- [1] Iranian National Building Code, Subject #9 2021. (In Persian)
- [2] ACI Committee 2019. *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary*. American Concrete Institute.
- [3] Ajaam, A.H., Yasso, S., Darwin, D., O'Reilly, M. and Sperry, J. 2018. Anchorage strength of closely spaced hooked bars. American Concrete Institute. doi: 10.14359/51702065
- [4] Ajaam, A.H., Darwin, D. and O'Reilly, M. 2017. *Anchorage strength of reinforcing bars with standard hooks*. University of Kansas Center for Research, Inc.
- [5] Farshadfar, O., Ajaam, A.H., Hano, M., O'Reilly, M. and Darwin, D. 2014. *Bond Strength of Reinforcing Bars with Deformation Spacings that Exceed Maximum Specified in ASTM A615*. University of Kansas Center for Research, Inc.
- [6] Sperry, J., Yasso, S., Searle, N., DeRubeis, M., Darwin, D., O'Reilly, M. and Ajaam, A.H. 2017. Conventional and high-strength hooked bars—Part 1: Anchorage tests. American Concrete Institute. doi: 10.14359/51689456
- [7] Sperry, J., Darwin, D., O'Reilly, M., Lequesne, R.D., Yasso, S., Feldman, L. and Lepage, A. 2017. Conventional and High-Strength Hooked Bars—Part 2: Data Analysis. American Concrete Institute. doi: 10.14359/51689457
- [8] Sperry, J., Darwin, D., O'Reilly, M., Lepage, A., Lequesne, R.D., Matamoros, A. and Ajaam, A. 2018. Conventional and high-strength steel hooked bars: Detailing effects. *ACI Structural Journal*, 115(1), pp. 247-48. doi: 10.14359/51700920
- [9] Peckover, J. and Darwin, D. 2013. *Anchorage of High-Strength Reinforcing Bars with Standard Hooks: Initial Tests*. University of Kansas Center for Research, Inc.
- [10] Nazzal, L.A. 2023. *Anchorage of High-Strength Reinforcing Bars in Concrete*. PhD Dissertation. University of Kansas.
- [11] Choi, C.S. and Bae, B.I. 2019. Effectiveness of steel fibers as hoops in exterior beam-to-column joints under cyclic loading. *ACI Structural Journal*, 116(2), pp. 205-219.
- [12] Yasso, S., Darwin, D. and O'Reilly, M. 2021. Effects of concrete tail cover and tail kickout on anchorage strength of 90-degree hooks. American Concrete Institute.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Fatemi Ghomi, M., Alirezai, M., Sharifi, M. and Zareian, S., 2025. Experimental evaluation of the confinement of crossties on development length of 90 degree bent hooks in tension. *Modares Civil Engineering journal*, 25(4), pp.49-58.

DOI: 10.22034/25.4.5

