

استفاده از میلگردهای کلاهیک دار نزدیک به هم در اتصال‌های تیر - ستون تحت بارگذاری چرخه‌یی

علیرضا پورحسن (کارشناس ارشد)

محمدرضا اصفهانی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۵ (۴۵-۵۱)
دوره‌ی ۲-۳۲، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۴۵-۵۱

در دو دهه‌ی اخیر، میلگردهای کلاهیک دار به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین انتخاب‌ها جهت کاهش ازدحام میلگردها در اتصال‌های تیر - ستون بتن مسلح مطرح شده‌اند. از طرفی، آیین‌نامه‌های موجود از جمله آیین‌نامه‌ی ۱۱-۳۱۸ ACI در مورد فاصله‌ی آزاد میلگردهای کلاهیک دار و استفاده از آن‌ها در چند ردیف، کاستی‌هایی دارند. به علاوه، نیاز به داده‌های آزمایشگاهی بیشتری در این زمینه احساس می‌شود. از طرف دیگر، اثر توأم پارامترهای طراحی میلگردهای کلاهیک دار ممکن است پاسخ اتصال را تحت تأثیر قرار دهد. در این پژوهش، ۴ نمونه‌ی اتصال خارجی تیر - ستون با ترکیب‌های متفاوت طول مهار، فاصله‌ی آزاد، و چیدمان متفاوت میلگردهای کلاهیک دار براساس ضوابط لرزه‌یی ویژه با مقیاس ۲:۳ اندازه‌ی واقعی ساخته شده و مورد آزمایش چرخه‌یی قرار گرفته و رفتار آن‌ها براساس معیارهای پذیرش برای قاب‌های خمشی تحت شرایط ویژه‌ی لرزه‌یی ارزیابی شده است. نتیجه‌ی بررسی‌ها نشان داده است که اتصال‌های آزمایش شده با میلگردهای با فاصله‌ی آزاد کمتر از مقدار تعیین شده در آیین‌نامه‌ها، رفتار مناسب لرزه‌یی نشان داده‌اند.

واژگان کلیدی: اتصال تیر - ستون، بارگذاری چرخه‌یی، بتن مسلح، طراحی لرزه‌یی، میلگرد کلاهیک دار.

ar.pourhassan@gmail.com
esfahani@um.ac.ir

۱. مقدمه

در طول نیم قرن گذشته، صنعت بتن‌های مسلح با مشکلاتی در ارتباط با ازدحام میلگردها و کمبود فضا برای مهار میلگرد مواجه بوده است. تغییرهای مستمر آیین‌نامه‌های طراحی به‌منظور تطبیق با ترافیک‌های سنگین (به‌عنوان نمونه، بار کامیون‌های در حال حرکت) و خطرهای فوق‌العاده (مانند اثرهای زلزله) منجر به افزایش استفاده از میلگردهای با قطر زیاد در سازه‌های بتن مسلح شده است. از طرفی طول مهار موردنیاز، تابع قطر میلگرد است. بنابراین، در پی افزایش اندازه‌ی میلگردها، طول مهار برای تأمین گیرایی مناسب نیز افزایش یافته است، که مشکل ازدحام را تشدید می‌کند.

استفاده از قلاب ۹۰ درجه‌ی استاندارد برای اطمینان از تأمین طول مهار کافی در منطقه‌هایی که میلگردهای با قطر زیاد ختم می‌شوند، اجتناب‌ناپذیر است. مشخص شده است که قطع میلگرد مستقیم با طول گیرایی ناکافی از مقطع بحرانی بسیار خطرناک است. خرابی ناشی از عدم مهار میلگردها نه فقط مانع رسیدن به لنگرهای طراحی و مقاومت برشی اعضا می‌شود، بلکه ممکن است منجر به فروریزش فاجعه‌انگیز به علت عدم انسجام سازه شود. این اتفاق ممکن است در حالت مهار میلگرد با قلاب نیز به علت عدم وجود فضای کافی برای مهار میلگرد

در ازدحام میلگردهای با قطر بالا و یا جای‌گیری بد بتن در اطراف میلگردها رخ دهد. استفاده از میلگردهای کلاهیک دار در سازه‌های بتن مسلح نسبتاً بزرگ، که در معرض بارهای فوق‌العاده از قبیل زلزله‌های شدید یا انفجار قرار دارند، در حال افزایش است، که علت آن اغلب فراهم آوردن راه حل مناسبی برای مشکل ازدحام فولاد است.^[۵-۱] ضابطه‌های طراحی میلگردهای کلاهیک دار برای نخستین بار در نسخه‌ی سال ۲۰۰۸ آیین‌نامه‌ی ACI ۳۱۸ اضافه شده است.^[۶] این ضابطه‌ها شامل الزاماتی برای طول مهار (l_{dt})، مشخصات مصالح (f'_c و f_y)، قطر میلگردهای مسلح‌کننده (d_b)، مساحت باربرخالص کلاهیک (A_{brg})، و همچنین پوشش آزاد بتن و فاصله‌ی آزاد میلگردها (c_s و c_{cb}) هستند. در توسعه‌ی آیین‌نامه‌ی مذکور، داده‌های پیشین آزمایش‌های مربوط به اتصال‌های تیر - ستون در نظر گرفته نشده و محدودیت‌های آیین‌نامه براساس نتایج آزمایش‌های غیرچرخه‌یی تعیین شده‌اند.^[۷] با وجود این، راهنمای طراحی اتصال‌های تیر - ستون یک‌پارچه‌ی بتنی با استفاده از میلگردهای کلاهیک دار از سال ۲۰۰۲ در دستورالعمل طراحی ACI-ASCE ۳۵۲R-۰۲ موجود بوده است.^[۸] در آیین‌نامه‌ی ۱۱-۳۱۸ ACI، فاصله‌ی آزاد میلگردهای کلاهیک دار (c_s) نباید کمتر از $4d_b$ (قطر میلگرد) باشد.^[۹] این یک مشکل جدی است، چرا که معمولاً از میلگردهای کلاهیک دار در ناحیه‌ی اتصال تیر - ستون به منظور حل مشکل ازدحام فولاد استفاده می‌شود، در حالی که فاصله‌ی آزاد میلگردها (c_s) در تیر یا ستون معمولاً بین $1d_b$ تا $3d_b$ است.^[۱۰] بنابراین ضابطه‌ی فاصله‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۹/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۴/۲/۲۷، پذیرش ۱۳۹۴/۳/۲۶.

تیر رخ دهد. این پارامترها شامل: فاصله‌ی آزاد بین میلگردهای کلاهدار، تعداد ردیف‌های میلگردهای کلاهدار، و طول مهار میلگردهای کلاهدار هستند. شکل ۱، جزئیات میلگردگذاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. هر یک از نمونه‌ها شامل یک ستون و یک تیر است، که از یک طرف به آن متصل شده است. نمونه‌های آزمایش شامل نمونه‌های JHC۳۱۸ و JHC۳۵۲ با میلگردگذاری در ۱ ردیف در بالا و پایین تیر با فاصله‌ی آزاد کم و نمونه‌های JHT۳۱۸ و JHT۳۵۲ شامل ۲ ردیف میلگرد در بالا و پایین تیر هستند. نام‌گذاری نمونه‌ها به این صورت است که حرف J بیانگر اتصال (Joint)، حرف H بیانگر نوع مهار میلگردهای تیر با کلاهدار (Headed)، حرف C بیانگر فاصله‌ی نزدیک میلگردها (Closely Spaced)، حرف T بیانگر چیدمان میلگردها در ۲ ردیف (Two Layers) و عددهای ۳۱۸ و ۳۵۲ به ترتیب بیانگر تعیین طول مهار میلگردها براساس رابطه‌های آیین‌نامه‌های ۱۱-۳۱۸ ACI و ۰۲-۳۵۲R ACI هستند.

شکل ۲، میلگردهای کلاهدار را نشان می‌دهد، که جزئیات و اندازه‌های آن‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است، که در آن d_b قطر میلگرد، A_b مساحت میلگرد، d_h قطر کلاهدار، t_h ضخامت کلاهدار، و A_{brg} مساحت خالص باربر کلاهدار هستند. نسبت مساحت خالص باربر کلاهدار (A_{brg}) به مساحت میلگرد (A_b) برای کلیه‌ی میلگردها $۴/۰۶$ است، که نسبت کمیته‌ی ۴ براساس آیین‌نامه‌ی ۱۱-۳۱۸ ACI را برآورده می‌کند. فاصله‌ی میلگردهای کلاهدار در دسته‌ی نمونه‌های JHC و JHT متفاوت است. فاصله‌ی آزاد میلگردها در دسته‌ی JHC، $۲/۳۰ d_b$ (افقی) و در دسته‌ی JHT، $۱/۲۵ d_b$ (عمودی) است، که از مقدار کمیته‌ی $۴ d_b$ تعیین شده در آیین‌نامه‌ی ۱۱-۳۱۸ ACI خیلی کوچک‌تر هستند. تعداد و اندازه‌ی میلگردهای تیر و ستون در هر ۴ نمونه مشابه است، که مقاومت خمشی یکسانی می‌دهد و منجر به مقاومت جانبی کلی یکسانی در اتصال می‌شود. مقاومت فشاری طراحی بتن ۳۵ MPa و مقاومت مشخصه‌ی طراحی میلگردهای طولی تیر و ستون، ۴۵۰ MPa بوده است. در جدول ۲، مشخصات مصالح مصرفی از جمله: مقاومت بتن در روز آزمایش ($f'_{c, meas}$)، تنش تسلیم ($f_{y, meas}$)، و تنش نهایی ($f_{u, meas}$) اندازه‌گیری شده‌ی میلگردهای تیر و ستون ارائه شده است.

کمیته‌ی طول مهار میلگردهای کلاهدار از مقطع بحرانی در آیین‌نامه‌های ۱۱-۳۱۸ ACI ($l_{dt, 318}$) و ۰۲-۳۵۲R ACI ($l_{dt, 352}$) برای اتصال‌های

جدول ۱. اندازه‌های کلاهدارها و میلگردهای کلاهدار.

نوع میلگرد	d_b (mm)	d_h (mm)	t_h (mm)	A_b (mm ²)	A_{brg} (mm ²)	A_{brg}/A_b
Φ۲۰	۲۰	۴۵	۳۰	۳۱۴	۱۲۷۶	۴

جدول ۲. مقارنت اندازه‌گیری شده‌ی مصالح.

نمونه	$f'_{c, meas}$ (MPa)	$f_{y, meas}$ (MPa)	$f_{u, meas}$ (MPa)
JHC۳۱۸ و JHC۳۵۲	۳۴/۶	۴۷۱	۶۲۰
JHT۳۱۸ و JHT۳۵۲	۳۸/۸		

آزاد کمیته‌ی $۴ d_b$ اجرایی نخواهد بود. از طرفی، با مشخص کردن فاصله‌ی آزاد کمیته‌ی $۴ d_b$ بین میلگردهای کلاهدار، می‌توان به طور ضمنی استفاده از آن‌ها در چند ردیف را ممنوع دانست. علاوه بر این، هیچ ضابطه‌ی خاصی در رابطه با میلگردهای کلاهدار استفاده شده در کاربردهای لرزه‌یی در فصل ۲۱ آیین‌نامه‌ی ۱۱-۳۱۸ ACI (سازه‌های مقاوم در برابر زلزله) وجود ندارد.

۲. هدف آزمایش

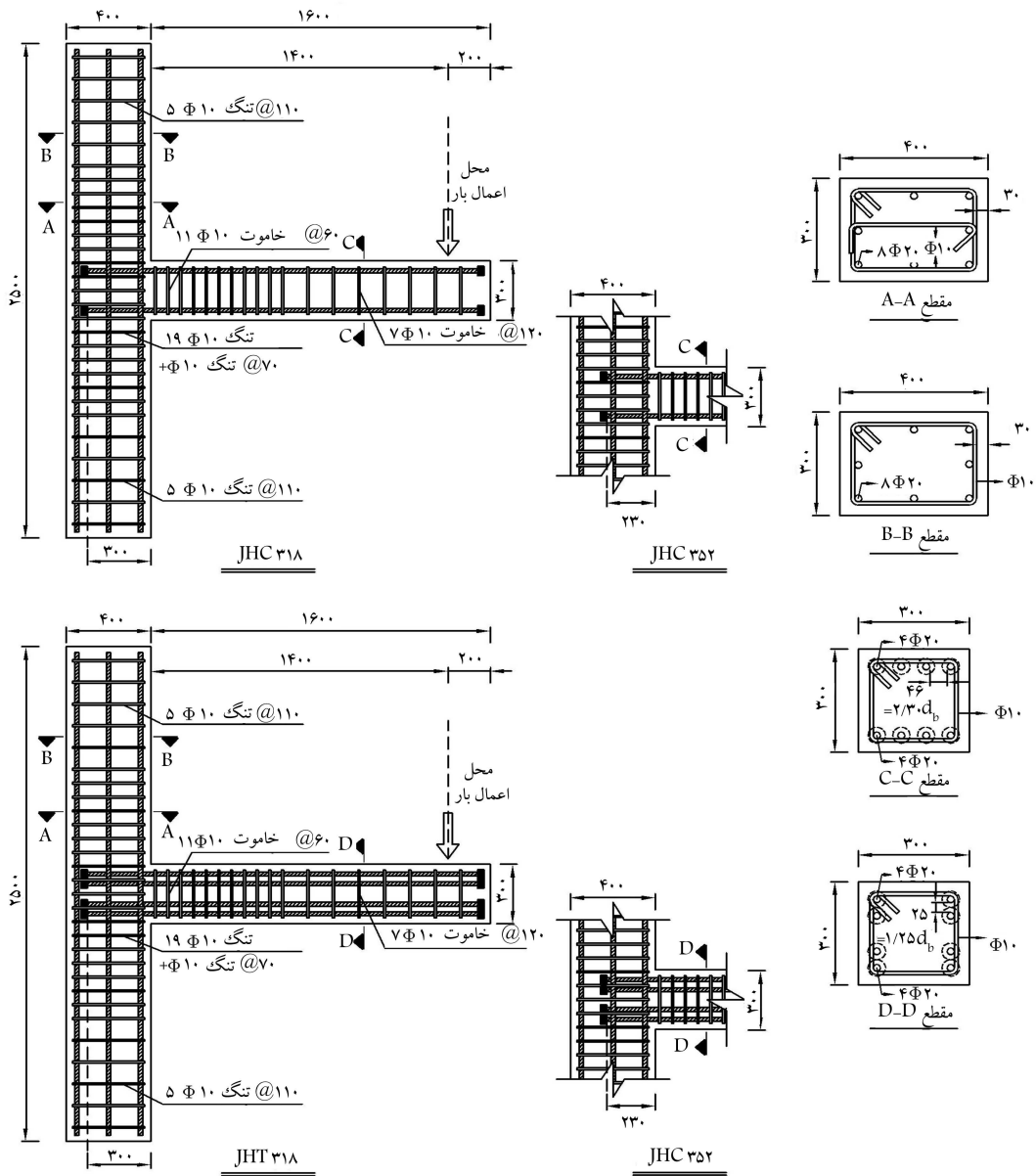
همان‌طور که اشاره شده است، آیین‌نامه‌های موجود در مورد فاصله‌ی آزاد میلگردهای کلاهدار و استفاده از آن‌ها در چند ردیف کاستی‌هایی دارند. به علاوه، تعداد داده‌های موجود مربوط به آزمایش اتصال‌های تیر-ستون تحت بارگذاری چرخه‌یی با تغییرشکل‌های غیرکشسان، بسیار اندک است. از طرفی استفاده از میلگردهای کلاهدار به منزله‌ی یکی از بهترین انتخاب‌ها در ساخت و سازه‌های اخیر بتن مسلح به شدت در حال افزایش است و به‌عنوان مصالحی مهم و محبوب شناخته می‌شوند. همچنین تاکنون گزارشی برای بررسی اثر توأم پارامترهای طراحی میلگردهای کلاهدار، که به احتمال فراوان پاسخ اتصال را تحت تأثیر قرار خواهد داد، ارائه نشده است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی محدودیت‌های مربوط به فاصله‌ی آزاد میلگردهای کلاهدار و همچنین استفاده از میلگردهای کلاهدار در ۲ ردیف به همراه اثر متقابل‌شان در برابر طول مهار میلگردهای مذکور در اتصال‌های خارجی تیر-ستون بتن مسلح با طراحی ویژه‌ی لرزه‌یی است.

۳. برنامه‌ی آزمایش

در این پژوهش، ۴ اتصال تیر-ستون با مقیاس ۲:۳ مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. ۲ عدد از نمونه‌ها با یک ردیف افقی از میلگردهای کلاهدار نزدیک به هم و ۲ تای دیگر با ۲ ردیف افقی میلگردهای کلاهدار بوده‌اند. در مورد دو نمونه‌ی با آرایش مشابه، هر نمونه طول مهار متفاوتی براساس رابطه‌های آیین‌نامه‌ی ۱۱-۳۱۸ ACI و دستورالعمل طراحی ۰۲-۳۵۲R ACI-ASCE دارد، که هر ۴ نمونه را از هم متمایز می‌کند. در نمونه‌های با ۲ ردیف افقی میلگرد کلاهدار، میلگردها به نحوی قرار گرفته‌اند که کلاهدارها دو به دو در راستای عمود به هم چسبیده‌اند. هر یک از این نمونه‌ها نشان دهنده‌ی یک اتصال خارجی تحت بارگذاری جانبی زلزله است، که از نقاط عطف تغییرشکل بین طبقه‌ها جدا شده است. این نمونه‌ها از یک ساختمان نمونه به ارتفاع طبقه‌ی ۳/۳ متر و طول دهانه‌ی ۵/۰ متر با مقیاس تقریبی ۲:۳ اندازه‌ی واقعی ساخته شده‌اند.

۴. نمونه‌های آزمایش

نمونه‌های آزمایش در این پژوهش مطابق ضابطه‌ها و توصیه‌های ACI (آیین‌نامه‌های ۱۱-۳۱۸ ACI و ۰۲-۳۵۲R ACI) برای طرح لرزه‌یی اعضاء قاب خمشی ویژه، جز در مورد چند پارامتر طراحی که مورد توجه در این پژوهش هستند، طراحی و میلگردگذاری شده‌اند. بنابراین انتظار می‌رود که اگر پارامترهای مورد بررسی در آزمایش، سبب خرابی زودرس نامطلوب نشوند، در نمونه‌ها مکانیزم مفصل‌شدن در



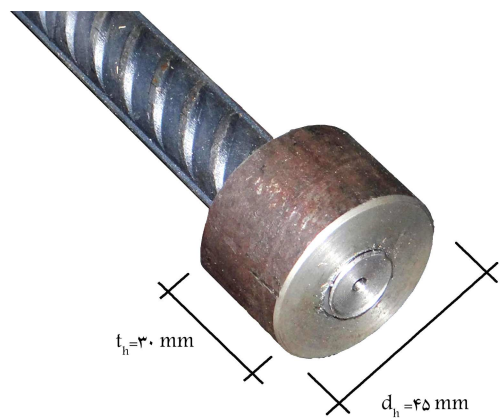
شکل ۱. جزئیات و اندازه‌های نمونه‌های آزمایش (تمام اندازه‌ها به میلی‌متر است).

لرزه‌یی (نوع ۲) مطابق روابط ۱ و ۲ مشخص می‌شوند:

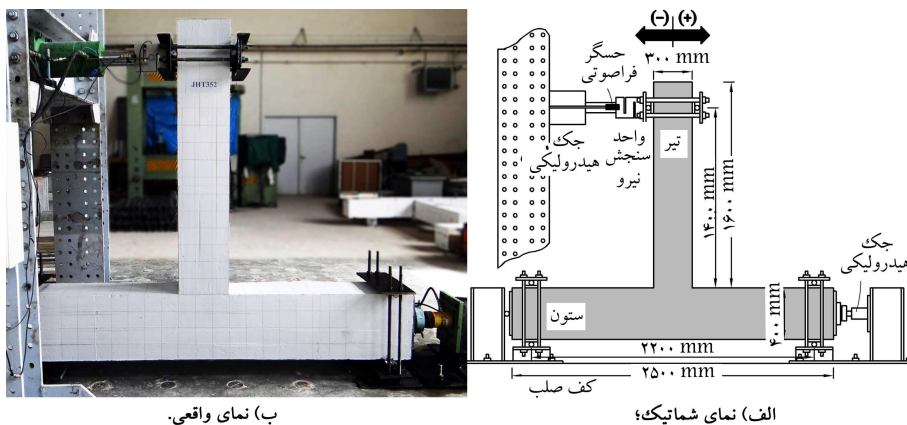
$$l_{dt, 318} = \frac{f_y d_b}{5.12 \sqrt{f'_c}} \quad (1)$$

$$l_{dt, 352} = \frac{f_y d_b}{6.16 \sqrt{f'_c}} \quad (2) \quad \text{برای اتصال‌های نوع ۲}$$

که در آن‌ها، f'_c مقاومت فشاری مشخصه بتن، f_y مقاومت تسلیم مشخصه فولاد، d_b قطر میلگرد است. این تذکر لازم است که طول مهار میلگردهای کلاهک‌دار و موقعیت مقطع بحرانی آیین‌نامه‌های ACI ۳۱۸-۱۱ و ACI ۳۵۲R-۰۲ و تعریف‌های متفاوتی دارند. در جدول ۳، طول مهار مورد نیاز و فراهم شده طبق تعریف‌های دو دستورالعمل ذکر شده به تفکیک برای نمونه‌های آزمایش نشان داده شده است. هر دو آیین‌نامه‌ی ACI ۳۱۸-۱۱ و ACI ۳۵۲R-۰۲ الزام دارند که کلاهک مهار شده در اتصال تا وجه دور چشمه‌ی اتصال ادامه



شکل ۲. کلاهک.



شکل ۳. نحوه ی پیکربندی آزمایش.

جدول ۳. طول مهار موردنیاز و فراهم شده در نمونه ها.

آیین نامه	نمونه	طول مهار (mm)	
		فراهم شده	موردنیاز*
ACI 318-11	JHC318	300	260
	JHC352	230	260
	JHT318	300	291
	JHT352	230	291
ACI-ASCE 352R-02	JHC318	300	243
	JHC352	230	243
	JHT318	300	229
	JHT352	230	229

*محاسبه شده براساس مقادیر مقاومت مشخصه ی بتن و فولاد.

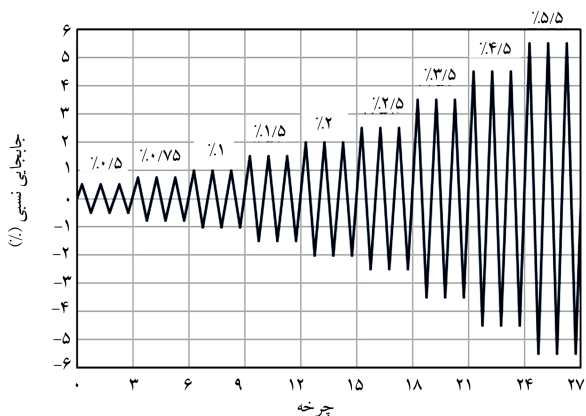
**محاسبه شده براساس مقادیر مقاومت اندازه گیری شده ی بتن و فولاد مصرفی.

یابد. اما در نمونه های JHC352 و JHT352، مورد مذکور رعایت نشده است.

۵. پیکربندی آزمایش و نحوه ی بارگذاری

شکل ۳، نمای شماتیک و واقعی پیکربندی آزمایش را نشان می دهد. نمونه ها به نحوی آزمایش شده اند که ستون در موقعیت افقی قرار داشته است. ستون در هر دو انتها (به عنوان بالا و پایین ستون) با اتصال هایی با عملکرد مفصلی در کف صلب مهار شده است. ابتدای تیر نیز توسط یک اتصال مفصلی به جک هیدرولیکی رفت و برگشتی متصل بوده است. بنابراین، ابتدای تیر و بالا و پایین ستون همگی در صفحه ی بارگذاری قابلیت دوران داشته اند، تا نقاط عطف یک قاب خمشی تحت بارگذاری جانبی زلزله را شبیه سازی کنند. ارتفاع ستون طبقه از مفصل تا مفصل (l_c) ۲۲۰۰ میلی متر و طول تیر از نقطه ی بارگذاری تا سطح اتصال به ستون (l_b) ۱۴۰۰ میلی متر بوده است.

بار محوری رفت و برگشتی به شکل استاتیکی، موازی محور طولی ستون توسط یک جک هیدرولیکی با ظرفیت کششی و فشاری ۶۰۰ kN و دامنه ی خطی رفت و



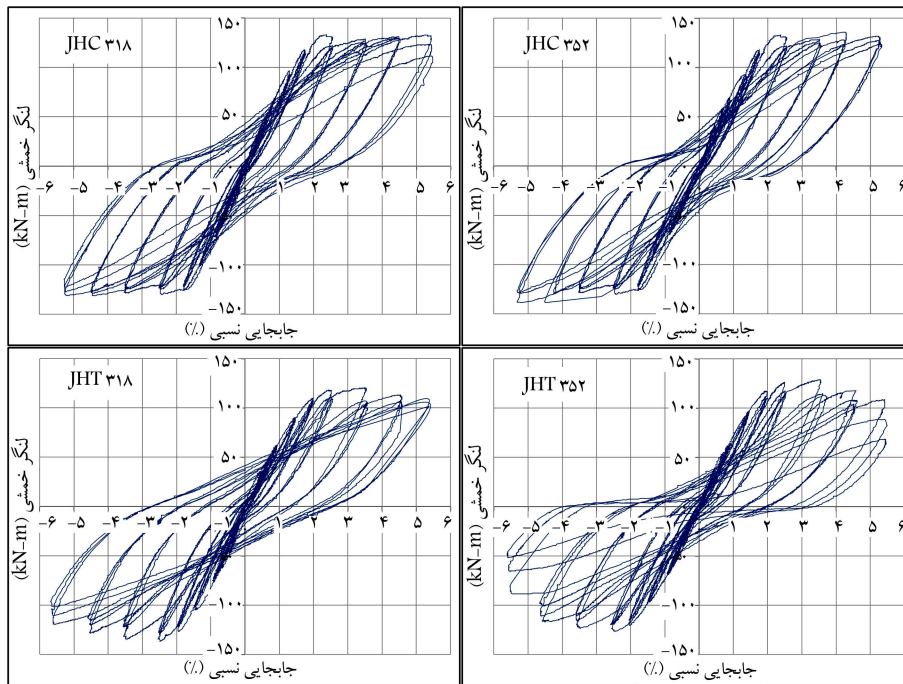
شکل ۴. تاریخچه ی بارگذاری.

برگشت ± 90 mm جهت مثبت و منفی بارگذاری در شکل ۳ مشخص شده است. نتیجه های پژوهش های پیشین نشان داده اند که وجود نیروی محوری در ستون می تواند فقط باعث افزایش اندک مقاومت برشی اتصال شود یا اصلاً تأثیری نداشته باشند^[۹] بنابراین نیروی محوری اندکی برابر ۷۰ kN جهت به دست آمدن پیکربندی بهتر نمونه در طول آزمایش توسط جک هیدرولیکی در یک انتهای ستون اعمال شده است. در طول این آزمایش ها، مقدار نیروی وارد بر تیر به وسیله ی یک واحد سنجش نیرو با ظرفیت ± 200 kN اندازه گیری شده است. از یک حسگر فراصوتی نیز جهت اندازه گیری جابه جایی نوک تیر (δ_{beam}) استفاده شده است، که موقعیت آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

شکل ۴، الگوی تغییر مکان چرخه یی جانبی اعمال شده توسط جک در طول هر آزمایش را نشان می دهد. در مجموع ۲۷ چرخه ی تغییر مکان استاتیکی تا جابه جایی نسبی ۵/۵٪ اعمال شده است. سه چرخه ی متوالی با جابه جایی نسبی یکسان جهت بررسی کاهش مقاومت و سختی تحت بارگذاری چرخه یی رفت و برگشتی اعمال شده است.

۶. تحلیل نتیجه های آزمایش

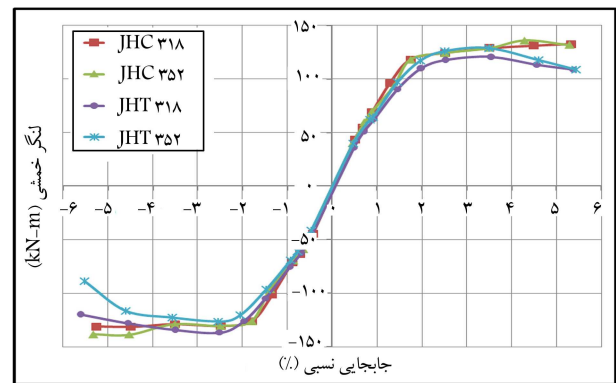
شکل ۵، پاسخ های پسماند لنگر تیر (در بر ستون) در مقابل جابه جایی نسبی (از این پس بار - جابه جایی) را برای نمونه های آزمایش نمایش می دهد و در شکل ۶، منحنی پوش بار - جابه جایی نمونه ها مقایسه شده است. همچنین جدول ۴، مقاومت



شکل ۵. نمودارهای بار-جابجایی برای نمونه‌های آزمایش.

جدول ۴. مقادیر لنگر و جابه‌جایی نسبی از آزمایش.

δ_{peak} (%)	M_{peak} (kN-m)	M_n در δ (%)	M_n (kN-m)	مشخصه
۲٫۰	۱۳۸	۱٫۵	۱۳۲	+
۵٫۲	۱۳۹	۳٫۴	۱۳۲	-
۲٫۴	۱۳۳	۲٫۱	۱۲۸	+
۴٫۳	۱۳۱	۲٫۲	۱۲۸	-
۴٫۲	۱۳۶	۲٫۱	۱۲۸	+
۴٫۵	۱۳۹	۲٫۲	۱۲۸	-
۳٫۵	۱۲۱	۲٫۴	۱۱۷	+
۲٫۵	۱۳۷	۱٫۸	۱۱۷	-
۳٫۵	۱۲۹	۱٫۹	۱۱۷	+
۲٫۵	۱۲۷	۱٫۹	۱۱۷	-

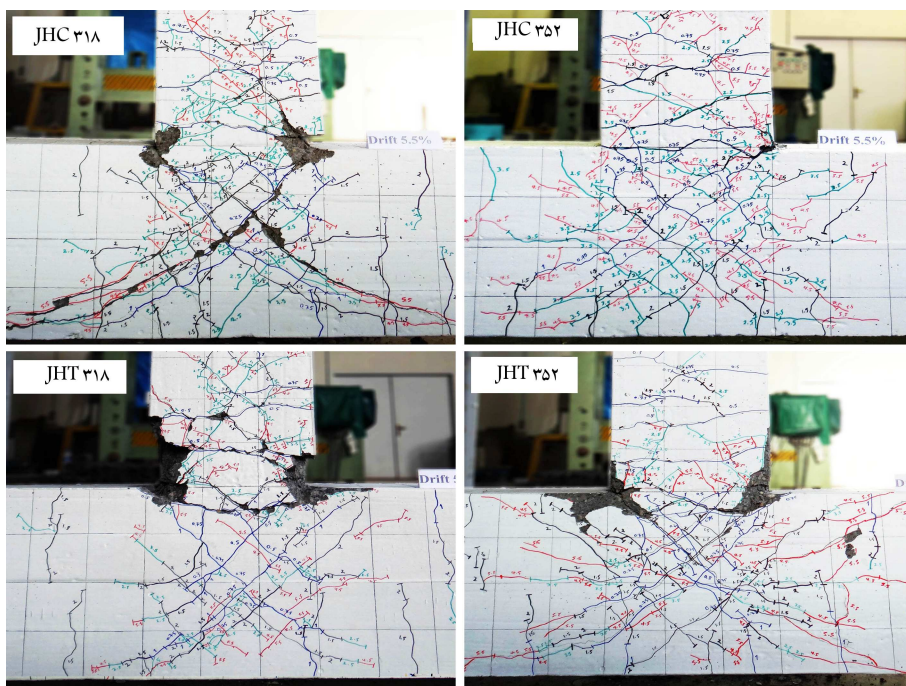


شکل ۶. نمودار پوش بار-جابجایی.

خمشی اسمی تیر (M_n)، بیشینه لنگر تیر (M_{peak})، و جابه‌جایی نسبی متناظر آن (δ_{peak}) در طول آزمایش را نشان می‌دهد. در تمامی نمونه‌ها، M_{peak} از M_n تجاوز کرده است، که آن را می‌توان نشان‌دهنده‌ی تشکیل مفصل خمیری در نمونه‌ها دانست. در اینجا، جابه‌جایی نسبی (δ) از تقسیم جابه‌جایی انتهای تیر به طول تیر از نقطه‌ی بارگذاری تا محور ستون تعیین شده است.

از مقایسه‌ی حلقه‌های پسماند (شکل ۵) می‌توان نتیجه گرفت که رفتار کلی نمونه‌های با یک ردیف میلگرد کلاهدار نزدیک به هم در تیر با طول‌های مهار متفاوت (نمونه‌های JHC318 و JHC352)، بسیار مشابه هم هستند. در دو نمونه‌ی مذکور، رفتار شکل‌پذیر با جمع‌شدگی نسبت به محور (pinching) بسیار اندکی مشاهده شده است. از منحنی پوش بار-جابجایی (شکل ۶) نیز مشاهده می‌شود که دو نمونه‌ی JHC318 و JHC352 در هر دو جهت بارگذاری بدون کاهش در مقاومت جانبی، رفتار مشابهی از نظر روند مقاومتی داشته و همچنین در هر دو جهت به بیشینه‌ی بار تقریباً یکسانی رسیده‌اند. در نمونه‌ی با ۲ ردیف میلگرد در بالا و پایین تیر و طول مهار بلندتر (JHT318)، رفتار شکل‌پذیر با جمع‌شدگی

نسبت به محور بسیار کم مشاهده شده است (شکل ۵). همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در نمونه‌ی اخیر، پس از جابه‌جایی نسبی ۳٫۵٪ و در واقع پس از تشکیل مفصل خمیری در تیر، افت مقاومت مشاهده شده است. در نمونه‌ی با دو ردیف میلگرد در بالا و پایین تیر و طول مهار کوتاه‌تر (JHT352)، رفتار شکل‌پذیر با جمع‌شدگی نسبت به محور بیشتر از سایر نمونه‌ها و همچنین افت مقاومت بیشتر تا انتهای آزمایش مشاهده شده است. در نمونه‌ی مذکور، افت مقاومت در چرخه‌های تکراری جابه‌جایی ۵٫۵٪ نیز به نسبت سایر نمونه‌ها بیشتر بوده است، که علت آن را می‌توان لغزش میلگردهای تیر در اتصال دانست. بنابراین رفتار دو نمونه‌ی ذکر شده نیز شکل‌پذیر همراه با کاهش اندک مقاومت تا انتهای آزمایش بوده است، که در حد قابل قبول است. بیشترین کاهش مقاومت مربوط به نمونه‌ی JHT352 بوده است،



شکل ۷. الگوهای ترک خوردگی در انتهای آزمایش.

برای صلاحیت داشتن اتصال به عنوان عضوی از یک قاب خمشی در شرایط لرزه‌یی شدید و به دست آوردن عملکرد رضایت‌بخش، الزاماتی را مطرح می‌کند.

طبق آیین‌نامه‌ی ۵-۰۵ ACI 374.1-05، برای پذیرش قاب خمشی با رفتار لرزه‌یی مناسب، باید در سومین چرخه‌ی تکرار جابه‌جایی نسبی ۳/۵٪، این معیارها برای هر دو جهت بارگذاری تأمین شود:

الف) بیشینه‌ی نیروی اعمالی در هر جهت بارگذاری نباید کمتر از ۷۵٪ بیشینه‌ی مقاومت جانبی در همان جهت باشد؛

ب) انرژی مستهلک‌شده‌ی نسبی β نباید کمتر از ۰/۱۲۵ باشد؛

ج) سختی سکانتی حدود صفر (K_s) که سختی سکانتی بین جابه‌جایی نسبی ۳۵٪ تا ۳۵٪+ است، نباید کوچک‌تر از ۵٪ سختی اولیه (K) از اولین چرخه در همان جهت باشد.

در جدول ۵، نتایج آزمایش که مرتبط با معیارهای پذیرش آیین‌نامه‌ی ۵-۰۵ ACI 374.1 هستند، ارائه شده است. معیارهای شرح داده‌شده‌ی الف، ب، و ج به ترتیب در ستون‌های سوم تا پنجم جدول ۵ آمده‌اند. علاوه بر معیارهای عنوان‌شده، محدودیت عدم تجاوز بیشینه‌ی مقاومت به دست آمده در آزمایش از λ برابر مقاومت اسمی محاسبه‌شده‌ی نمونه‌ها نیز در ردیف دوم جدول ۵ کنترل شده است. علت این کنترل، اطمینان از تأمین رفتار تیر ضعیف - ستون قوی بوده است. λ ضریب اضافه مقاومت ستون طبق آیین‌نامه‌ی ۳۱۸ ACI است، که برابر ۱/۲۵ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کلیه‌ی معیارهای پذیرش برآورده شده و عملکرد هر ۴ نمونه رضایت‌بخش تلقی شده‌اند. در ستون‌های ششم تا هشتم جدول ۵، جهت اطمینان از حصول عملکرد رضایت‌بخش، معیارهای پذیرش در جابه‌جایی نسبی ۴/۵٪ نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این جابه‌جایی نسبی نیز معیارهای پذیرش قاب خمشی به عنوان اتصال با رفتار رضایت‌بخش لرزه‌یی برآورده شده‌اند.

به طور خاص، کاهش مقاومت در طول سومین چرخه با جابه‌جایی نسبی ۳/۵٪

که در جابه‌جایی نسبی ۵/۵٪ در جهت منفی به حدود ۷۵٪ بیشینه‌ی مقاومت خود رسیده است.

در شکل ۷، وضعیت نمونه‌ها در انتهای آزمایش (جابه‌جایی نسبی ۵/۵٪) نشان داده شده است. تشکیل مفصل خمیری در تیر در مجاورت ستون در کلیه‌ی نمونه‌ها مشاهده شده است. گسترش ترک‌های ضربدری در چشمه‌ی اتصال به علت بارگذاری رفت و برگشتی اجتناب‌ناپذیر بوده است. عرض ترک‌ها در نمونه‌ی JHC 318 تا جابه‌جایی نسبی ۴/۵٪ افزایش چندانی نداشته و به حدود ۰/۹ میلی‌متر محدود بوده است. تشکیل مفصل خمیری تا چرخه‌ی دوم تکرار جابه‌جایی نسبی ۵/۵٪ گسترش یافته و در چرخه‌ی سوم تکرار این جابه‌جایی، افزایش ناگهانی عرض ترک‌های برشی رخ داده است. علت این شکست برشی پس از تشکیل مفصل خمیری، که با افت مقاومت خمشی در این چرخه همراه بوده است، را می‌توان لغزش میلگردهای تیر دانست. اما تا پایان چرخه‌های جابه‌جایی نسبی ۳/۵٪، افت مقاومت نمونه در حدود ۵٪ بوده است، که مقدار قابل قبولی است.^[۱۴] از طرفی رفتار کلی نمونه تا پایان آزمایش رضایت‌بخش بوده است. در کلیه‌ی نمونه‌ها افزایش عرض ترک‌های خمشی در جابه‌جایی نسبی حدود ۳/۵٪ و خرد شدن مشهود بتن کناره‌ها در حدود جابه‌جایی نسبی ۴/۵٪ رخ داده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در نمونه‌های با طول مهار کوتاه‌تر (JHT 352 و JHC 352) تعداد ترک‌های برشی در انتهای آزمایش، گسترده‌تر از نمونه‌های مشابه با طول مهار بلند ولی با عرض محدود ترک‌ها بوده‌اند. از طرفی، حلقه‌های پسماند و نمودار پوش بار-جابه‌جایی برای نمونه‌های ذکر شده رفتار رضایت‌بخشی را نشان داده‌اند.

۷. ارزیابی عملکرد طبق آیین‌نامه‌ی ۵-۰۵ ACI 374.1

در این بخش به بررسی رفتار لرزه‌یی اتصال‌های آزمایش‌شده براساس معیارهای پذیرش آیین‌نامه‌ی ۵-۰۵ ACI 374.1^[۱۴] با عنوان «معیارهای پذیرش قاب‌های خمشی براساس آزمایش‌های سازه‌یی و تفسیر» پرداخته شده است. آیین‌نامه‌ی مذکور،

جدول ۵. مقایسه نتیجه‌های آزمایش و معیارهای پذیرش آیین‌نامه‌ی ۰۵-۳۷۴/۱-ACI.

مشخصه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
	M_{peak} M_n	M_{peak} M_n	M_{peak} M_n	M_{peak} M_n	M_{peak} M_n	M_{peak} M_n	M_{peak} M_n	M_{peak} M_n
معیار پذیرش	≤ 0.75	≥ 0.75	≥ 0.75	≥ 0.75	≥ 0.75	≥ 0.75	≥ 0.75	≥ 0.75
JHC۳۱۸	۱/۰۴	۱/۰۳	۰/۹۴	۰/۳۶	۰/۳۹	۰/۹۷	۰/۳۷	۰/۳۶
JHC۳۵۲	۱/۰۶	۱/۰۸	۰/۹۲	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۹۳	۰/۳۰	۰/۱۷
JHC۳۱۸	۱/۰۳	۱/۱۷	۰/۸۵	۰/۲۹	۰/۳۴	۰/۸۸	۰/۳۷	۰/۲۶
JHC۳۵۲	۱/۱۰	۱/۰۸	۰/۸۸	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۸۱	۰/۳۲	۰/۲۶

* علامت + یا - بیانگر جهت بارگذاری مطابق شکل ۳ هستند.

M_n : مقاومت خمشی اسمی تیر (محاسبه شده بر مبنای مشخصات اندازه‌گیری شده‌ی مصالح).

M_{peak} : بیشینه‌ی لنگر اندازه‌گیری شده‌ی تیر.

M_{Trd} : بیشینه‌ی لنگر اندازه‌گیری شده‌ی تیر در طول سومین تکرار جابه‌جایی نسبی ۳/۵ یا ۴/۵ درصد.

β : انرژی مستهلک شده‌ی نسبی. [۱۰]

K_s : سختی سکانتی حدود صفر. [۱۰]

K : سختی اولیه. [۱۰]

۱۱-۳۱۸ ACI کمیته‌ی فاصله‌ی آزاد میلگردها را برابر $4d_b$ مشخص و به طور ضمنی استفاده از چند ردیف میلگرد کلاهدار را ممنوع کرده است. نتیجه‌های به‌دست‌آمده بدین قرار است:

- اتصال‌های تیر - ستون خارجی با میلگردهای کلاهدار با فاصله‌ی آزاد $2,3d_b$ و همچنین عدم امتداد طول مهار میلگردها تا وجه دور اتصال، براساس معیارهای پذیرش آیین‌نامه‌ی ۰۵-۳۷۴/۱-ACI، رفتار مناسب و عملکرد لرزه‌یی رضایت‌بخش به همراه تشکیل مفصل خمیری در تیر داشته‌اند.
- اتصال‌های تیر - ستون خارجی با میلگردهای کلاهدار در دو ردیف در بالا و پایین تیر، با فاصله‌ی آزاد $1,25d_b$ و همچنین عدم امتداد طول مهار میلگردها تا وجه دور اتصال، براساس معیارهای پذیرش آیین‌نامه‌ی ۰۵-۳۷۴/۱-ACI، رفتار مناسب و عملکرد لرزه‌یی رضایت‌بخش به همراه تشکیل مفصل خمیری در تیر داشته‌اند.

۳. اتصال‌های با استفاده از میلگردهای کلاهدار با فاصله‌ی $2,3d_b$ در ۱ ردیف، در مقایسه با اتصال با میلگردهای کلاهدار با فاصله‌ی $1,25d_b$ در ۲ ردیف رفتار بهتری نشان داده‌اند، که علت آن را می‌توان فاصله‌ی بیشتر میلگردها و اثر کمتر تداخل گوه‌ی باربری کلاهدارها در سرعت‌بخشیدن به لغزش میلگردها دانست.

۴. به‌طور کلی استفاده از میلگردهای کلاهدار با چیدمان‌ها و فاصله‌های متعارف اجرایی (که کمتر از مقدار مجاز آیین‌نامه‌ی ۱۱-۳۱۸ ACI هستند) را می‌توان راه حل مناسبی جهت کاهش ازدحام میلگرد در اتصال‌های خارجی تیر - ستون دانست.

به ترتیب در نمونه‌های JHT۳۱۸، JHT۳۵۲ و JHC۳۱۸، JHC۳۵۲، به میزان بیشینه‌ی ۶، ۱۰، ۱۵ و ۱۲ درصد بوده است. این مقادیر افت برای جابه‌جایی نسبی ۴/۵٪ در این نمونه‌ها به ترتیب ۳، ۱۱، ۱۶ و ۲۱ درصد بوده است، که باز هم کمتر از مقدار مجاز ۲۵٪ هستند. در چرخه با جابه‌جایی نسبی ۳/۵٪، نمونه‌های با ۱ ردیف میلگرد کلاهدار نزدیک به هم، استهلاک انرژی (β) و همین‌طور سختی سکانت در حدود جابه‌جایی نسبی صفر (K_s/K) بالاتری نسبت به نمونه‌های با ۲ ردیف میلگرد در بالا و پایین تیر داشته‌اند. این موضوع احتمالاً به علت فاصله‌ی کمتر میلگردهای قرارگرفته در ۲ ردیف است، که لغزش میلگردها را سرعت بخشیده است. به‌طورکلی از نظر معیارهای آیین‌نامه‌ی ۰۵-۳۷۴/۱-ACI، نمونه‌ی JHC۳۱۸ رفتار بهتری نسبت به ۳ نمونه‌ی دیگر داشته است.

۸. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضابطه‌هایی از آیین‌نامه‌ی ۳۱۸ ACI در مورد مهار میلگردهای کلاهدار در اتصال‌های بتن مسلح مورد ارزیابی قرار گرفته است. این ارزیابی از طریق انجام آزمایش با بارگذاری چرخه‌یی شبه‌استاتیکی جانبی بر ۴ نمونه‌ی اتصال تیر - ستون خارجی با مقیاس ۳:۲ اندازه‌ی واقعی انجام شده است. این آزمایش‌ها در درجه‌ی اول تأثیر استفاده از الف) فاصله‌ی آزاد کم (کمتر از $4d_b$) بین میلگردهای کلاهدار، ب) چند ردیف میلگرد کلاهدار در تیر، و ج) اثر متقابل طول مهار میلگردهای کلاهدار و چیدمان میلگردهای کلاهدار در عملکرد لرزه‌یی اتصال خارجی تیر - ستون را مورد بررسی قرار داده است. لازم به ذکر است که آیین‌نامه‌ی

(References) منابع

1. Wallace, J.W., McConnell, S.W., Gupta, P. and Cote, P.A. "Use of headed reinforcement in beam-column joints subjected to earthquake loads", *ACI Structural Journal*, **95**(5), pp. 590-606 (1998).
2. Chun, S.-C., Lee, S.-H., Kang, T.H.-K., Oh, B. and Wallace, J.W. "Mechanical anchorage in exterior beam-column joints subjected to cyclic loading", *ACI Structural Journal*, **104**(1), pp. 102-113 (2007).
3. Lee, H.-J. and Yu, S.-Y. "Cyclic response of exterior beam-column joints with different anchorage methods", *ACI Structural Journal*, **106**(3), pp. 329-339 (2009).
4. Kang, T.H.-K., Shin, M., Mitra, N. and Bonacci, J.F. "Seismic design of reinforced concrete beam-column joints with headed bars", *ACI Structural Journal*, **106**(6), pp. 868-877 (2009).
5. Kang, T.H.-K., Ha, S.-S. and Choi, D.-U. "Bar pullout tests and seismic tests of small-headed bars in beam-column joints", *ACI Structural Journal*, **107**(1), pp. 32-42 (2010).
6. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-08) and Commentary (ACI318R-08)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA (2008).
7. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-11) and Commentary (ACI318R-11)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA (2011).
8. Joint ACI-ASCE Committee 352, *Recommendation for Design of Beam-Column Connections in Monotonic Reinforced Concrete Structures (ACI352R-02)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA (2002).
9. Meinheit, D.F. and Jirsa, J.O. "Shear strength of R/C beam-column connections", *Journal of Structural Division*, **107**(11), pp. 2227-2244 (1981).
10. ACI Committee 374, *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary (ACI 374.1-05)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA (2005).