



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۵۷ تا ۶۵  
Vol. 46, No. 2, Winter 2014, pp. 57- 65



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)  
(AJSR - CEE)

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار اتصال مفصل بتنی با جزئیات متداول

مجید محمدی<sup>۱\*</sup>، محمد امین<sup>۲</sup>

۱- استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله  
۲- کارشناسی ارشد، مهندسی عمران زلزله، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران

(دوریاقت ۱۳۹۰/۵/۱۰، پذیرش ۱۳۹۳/۸/۲۴)

### چکیده

در برخی موارد استفاده از مفاصل خمشی در سازه‌های بتنی، می‌تواند باعث کاهش ابعاد اعضاء و بهبود رفتار سازه شود. بر خلاف این موضوع و با وجود استفاده فراوان از این اتصالات در سازه‌هایی مثل پل، تاکنون برای اتصال مفصلی در ساختمان‌های بتنی معمولی جزئیات مناسبی که مورد قبول جامعه علمی و مهندسی باشد ارائه نشده است. جزئیات موجود که در آن‌ها آرماتورهای طولی در مقطعی که نیاز به رفتار مفصلی دارد به صورت ضربدری در می‌آید، به دلیل نبود نتایج تحقیقاتی عمیق، به طور معمول مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. در این تحقیق سعی شده تا دو سری از جزئیاتی که برای مفاصل خمشی پیشنهاد شده به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا سه نمونه تیر بتنی طره با اتصالات مختلف ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نمونه نخست دارای اتصال صلب است که به‌عنوان نمونه شاهد ملاک مقایسه سایر نمونه‌ها است. دو نمونه دیگر دارای جزئیاتی است که در برخی منابع برای رفتار مفصلی پیشنهاد شده است. در یکی از این نمونه‌ها، آرماتور طولی در محل اتصال به صورت ضربدری در آمده و در نمونه دیگر علاوه بر این کار، دو شیار عرضی در بالا و پایین محل ضربدری ایجاد شده است.

بارگذاری به صورت اعمال جابجایی به سر آزاد تیر انجام و نمودار خمش - دوران در محل اتصال ملاک مقایسه رفتار نمونه‌ها قرار گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده هیچ‌کدام از جزئیات موجود را، به دلیل رفتار طرد و مقاومت خمشی قابل توجه نمی‌توان به عنوان اتصال مفصلی در نظر گرفت.

### کلمات کلیدی

مفصل خمشی، اتصال صلب، اتصال نیمه صلب، صلبیت دورانی.

\* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: M.Mohammadigh@iiees.ac.ir

## ۱- مقدمه

اتصالات، از اعضای مهم سازه به حساب می‌آیند که وظیفه اصلی آن‌ها انتقال بار از یک عضو به عضو دیگر یا تکیه‌گاه است. در طراحی لرزه ای سازه‌ها سعی می‌شود تا حد امکان از ایجاد مفاصل پلاستیک در اتصالات جلوگیری شود گردد و شکل‌پذیری مورد نیاز در اعضای متصل به آن‌ها تأمین گردد. این امر نشان از اهمیت سلامت و کارکرد اتصالات در رفتار لرزه ای مناسب است. اتصالات بسته به میزان انتقال خمش از یک عضو به عضو دیگر به سه دسته گیردار، نیمه گیردار و مفصلی تقسیم می‌شوند. علت تخریب بسیاری از سازه‌ها در اثر پدیده‌های طبیعی ناشی از نبود شناخت و استفاده از اتصالات نامناسب در سازه‌ی مورد نظر است. استفاده نامناسب از اتصالات در سازه‌های بتنی گاهی موجب ایجاد تنش‌های مضاعف و در نهایت تسلیم‌های موضعی و در نتیجه تضعیف عضو ترک خورده و کاهش عمر مفید سازه خواهد شد.

میزان گیرداری هر اتصال را می‌توان با توجه به منحنی‌های لنگر-دوران آن و با مقایسه با معیارهای رفتاری اتصال ایده آل تعیین نمود [۴]. اتصال صلب به اتصالی گفته می‌شود که همه تلاش‌های موجود در یک طرف را بدون تغییر به طرف دیگر اتصال منتقل می‌نماید. این تلاش‌ها شامل نیروی برشی در دو جهت، نیروی محوری، خمش در دو جهت و پیچش می‌باشد. از جمله خصوصیات این گونه اتصالات عدم تغییر زاویه بین دو عضو متصل شده به هم قبل و بعد از بارگذاری است. کاربرد این گونه اتصالات در سازه‌ها و ساختمان‌ها زمانی مطرح می‌شود که انتقال لنگر بین المان‌های مختلف اهمیت بالایی دارد. یکی از موارد پر کاربرد این گونه اتصالات بین تیر و ستون در ساختمان‌های اسکلت بتنی است.

نوع دیگر اتصالات، اتصال مفصل خمشی است که آزادی حرکت زاویه‌ای را در راستای موردنظر در بر خواهد داشت. این اتصالات نیروی برشی و محوری را منتقل نموده و با تحمل دوران از انتقال لنگر جلوگیری می‌نمایند. چنین اتصالی را در سازه‌های فولادی به وفور می‌توان دید. در سازه‌های فولادی معمولاً اتصالاتی را که در آن‌ها بال‌های بالا و پایین عضو به محل اتصال متصل نشده باشند در دسته اتصالات مفصلی به حساب می‌آورند که از آن جمله می‌توان اتصال با نبشی نشیمن، یا اتصالی که در آن جان تیر از طریق دو نبشی یا صفحه به ستون وصل شده را نام برد. اتصالات نیمه صلب اتصالاتی هستند که مقداری از خمش را منتقل می‌سازند و زاویه بین دو عضو متصل شده نیز در طی بارگذاری تغییر می‌نماید. به بیان دیگر اتصالاتی را نیمه

صلب می‌نامند که صلب یا مفصلی نباشد.

علاوه بر سازه‌های فولادی، در سازه‌های بتنی مثل پل‌ها نیز اتصالات مفصلی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به اتصال تیر عرشه به بالای ستون‌ها اشاره نمود که در آن در عمل تیر عرشه روی سر ستون می‌نشیند و هیچ‌گونه خمشی بین آن‌ها منتقل نمی‌شود. برای ایجاد اتصالات مفصل خمشی در ساختمان‌های بتنی دو راه عمده پیشنهاد شده که در هر دوی آن‌ها سعی می‌شود اتصال با کاهش صلبیت دورانی (ممان اینرسی) مقطع ایجاد گردد. در این حالت فرض بر این است که هر مقدار که صلبیت دورانی (ممان اینرسی) مقطع کمتر باشد رفتار این اتصال به مفصل خمشی نزدیک‌تر است. البته مقدار کاهش صلبیت دورانی که با کاهش ابعاد مقطع یا آرماتورهای آن انجام می‌گیرد تا جایی میسر است که مقطع باقیمانده ایمنی لازم برای سایر تلاش‌های موجود در مقطع را داشته باشد. یکی از روش‌های متداول برای دستیابی به اتصال مفصلی، استفاده از آرماتور ضربدری در محل اتصال می‌باشد. تمرکز آرماتورها در مرکز مقطع باعث کاهش ممان اینرسی مقطع می‌شود. در روش دیگر برای کاهش بیشتر ممان اینرسی علاوه بر ضربدری نمودن آرماتور، در بالا و پایین مقطع عضو در محل اتصال دو شیار ایجاد می‌کنند که در نتیجه باعث کاهش سطح مقطع در آن محل می‌گردد. هر چند که این جزئیات اجرایی را در برخی کتاب‌های می‌توان یافت ولی به دلیل نبود تحقیقاتی که رفتار آن‌ها را بررسی و تایید نمایند تاکنون مورد توجه مهندسی قرار نگرفته‌اند.

در این تحقیق تلاش می‌شود در یک مطالعه تجربی رفتار این دو نوع اتصال در مقایسه با اتصال کاملاً گیردار مورد بررسی قرار گیرد و در نهایت میزان توانایی جزئیات گفته شده برای ایجاد مفاصل خمشی ارائه شود. در این راستا سه آزمایش انجام و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده است.

## ۲- مزایای استفاده از اتصال مفصلی خمشی

در این بخش برخی مزایای استفاده از اتصالات مفصل خمشی به شرح زیر بیان می‌گردد:

۱- دهانه‌های کوتاه در ساختمان بلند: در این موقعیت چنانچه ظرفیت خمشی دو انتهای تیر زیاد باشد (اتصالات صلب)، به علت تعادل پیکره آزاد تیر، برش ایجاد شده در تیر بسیار زیاد می‌شود که طراحی آن برای مقاومت بسیار مشکل است. با توجه به اینکه شکست برشی یک شکست ترد و باید بر اساس مقاومت طراحی گردد، ابعاد مقطع تیر به طور نامناسبی بزرگ می‌گردد و

اتصال مفصلی هستند زیرا در غیر این صورت جابجایی غیر همسان این قسمت‌ها می‌تواند باعث ایجاد خمش‌های بسیار بزرگی در تیرهای واسط و سایر اجزای سازه گردد.

### ۳- بررسی آزمایشگاهی اتصالات مفصل خمشی مرسوم

در این تحقیق سه نوع اتصال بتنی که دارای ابعاد یکسان و مصالح مشابه هستند، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند تا رفتار، میزان جذب انرژی و مقدار دوران محل اتصال، به روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرد. نمونه نخست دارای اتصال کاملاً گیردار است که بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌های موجود ساخته شده است. نحوه آرماتورگذاری و قالب‌بندی این نمونه در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. دو نمونه دیگر دارای اتصالاتی هستند که در معدود پژوهش‌های ساختمانی به‌عنوان مفصل اجرا شده‌اند. اتصالات مورد بحث، در محل اتصال تیر طره به ستون و به فاصله ۵ سانتیمتری از بر ستون اجرا شده‌اند. ستون‌های نمونه به گونه‌ای به قاب آزمایش متصل می‌شوند که فاقد هرگونه آزادی حرکتی هستند. همان‌گونه که در شکل (۱-ب) نشان داده شده است بار به انتهای آزاد تیر وارد و مقدار جابجایی در همین نقطه نیز با استفاده از دستگاهی با دقت زیاد اندازه‌گیری می‌شود. مقدار بار اعمال شده نیز با استفاده از یک نیروسنج دقیق ثبت می‌گردد. برای بررسی میزان گیرداری اتصال لازم است علاوه بر خمش، میزان دوران مقطع در محل اتصال نیز اندازه‌گیری گردد. با توجه به کوچک بودن این دوران، دو صفحه در وجه جانبی مقطع در محل اتصال متصل و میله‌هایی به آن وصل شد. دوران مقطع در این محل باعث جابجایی افقی سر میله می‌شود. طول میله را می‌توان آنقدر بزرگ انتخاب نمود که دقت لازم در مقادیر جابجایی حاصل شود. با روابط هندسی می‌توان جابجایی افقی سر این دو میله را به دوران تبدیل کرد. این دو میله در شکل (۱-ب) دیده می‌شوند. دو میله قائم دیگر که از بالا و پایین به قاب بارگذاری متصل هستند نیز در نزدیکی انتهای تیر به گونه‌ای کار گذاشته شده‌اند که از دوران تیر حول محور طولی آن جلوگیری نمایند.

رفتار اتصالات در تئوری با آنچه در عمل دیده می‌شود بسیار متفاوت است. این تفاوت به ویژه در مصالحی همچون بتن آرمه، آشکارتر می‌شود. دلیل وجود این تفاوت را باید در خصوصیات بتن جستجو نمود. هیچ اتصالی به صورت مطلق صلب یا ساده نیست و حتی در بارگذاری‌های مختلف رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. دلیل اصلی آزمایش نمونه دارای اتصال صلب نیز دستیابی به اطلاعات رفتاری اتصالی است که در عمل مورد

از آنجا که در طراحی‌های معمول، همه کلیه نیروها از جمله خمش در اعضای سازه از تحلیل الاستیک بدست می‌آیند، این مطلب منجر به ابعاد بزرگ و غیر اقتصادی برای چنین تیرهایی می‌گردد. راهکار مناسب برای کاهش برش ایجاد شده در تیر، کاهش ظرفیت خمشی دو انتهای تیر، یعنی استفاده از اتصالات مفصلی است.

۲- اتصال تیر فرعی به تیر اصلی: که در این صورت تیر اصلی برای تحمل لنگر پیچشی ناشی از لنگر انتهایی تیر فرعی باید بسیار قوی و با ابعاد به نسبت بزرگ طراحی شود. در صورتی که اتصال تیرهای فرعی به اصلی مفصلی اجرا گردد در این صورت فقط تلاش‌های برشی از تیر فرعی به تیر اصلی منتقل و در نتیجه ابعاد مورد نیاز برای تیر اصلی کوچک‌تر می‌شود

۳- در مواردی که به دلایل معماری نیاز به ابعاد کوچک‌تر اجزای سازه‌ای باشد: در سازه با اتصال مفصل خمشی، ابعاد ستون و به‌ویژه تیر کوچک‌تر از همان سازه‌ای که با اتصال صلب ساخته شده است. ضمن اینکه استفاده از اتصال مفصلی، میزان آرماتور تیر اصلی را نیز کاهش می‌دهد.

۴- در مواردی که تراکم زیاد آرماتورها در محل اتصال مانع از بتن‌ریزی مناسب می‌شود: با اجرای اتصالات مفصل خمشی در محل اتصال تیر به ستون چنین سازه‌هایی، تراکم آرماتورها کاهش می‌یابد و بتن‌ریزی آسان می‌شود.

۵- صرفه اقتصادی: سازه‌های دارای اتصالات مفصل خمشی و سامانه باربر جانبی مجزا و مناسب، اقتصادی‌تر از سازه‌های مشابه دارای اتصال صلب هستند. یکی از دلایل اصلی این تفاوت را می‌توان ناشی از قوانین سخت‌گیرانه‌تر آیین‌نامه‌ها [۱] برای اتصالات خمشی همراه با دیوار برشی نسبت به سازه با اتصال مفصل خمشی و دیوار برشی دانست که از آن جمله می‌توان به اجبار آیین‌نامه‌ها برای طراحی جداگانه سیستم قاب خمشی سازه برای درصدی از بار زلزله اشاره نمود.

۶- در تیر با احتمال نشست نامتقارن در دو تکیه‌گاه طرفین: این مورد بیشتر برای پل‌ها به وجود می‌آید. در این سازه‌ها به دلیل طول زیاد دهانه، پی ستون‌ها صورت تکی اجرا می‌شود. در صورت بروز نشست نامتقارن در این پی‌ها، یکپارچگی بین تیرها بین دهانه‌های مجاور با وجود آزادی دورانی را می‌توان با استفاده از اتصال مفصلی تأمین نمود.

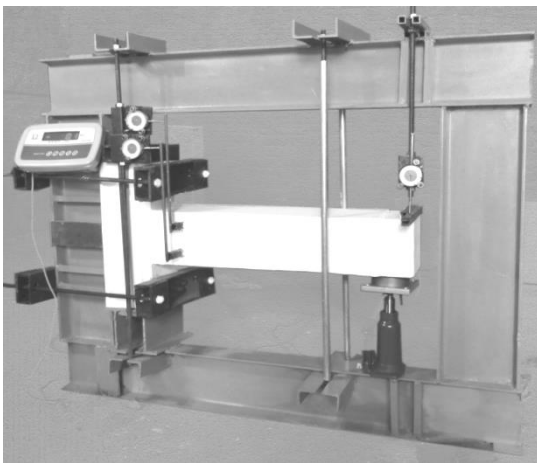
۷- در اتصال تیر بین دو سازه با پی‌های جدا از هم: در برخی مواقع و از جمله برای از بین بردن نامنظمی سازه لازم است که سازه در قسمت‌های مختلف اجرا گردد. برای ایجاد ارتباط بین این قسمت‌ها باید از تیرهایی استفاده نمود که در دو انتها دارای

در محل اتصال ایجاد شده است. در این حالت علاوه بر تجمع آرماتور در یک نقطه کاهش سطح مقطع بتن نیز باعث کاهش ممان اینرسی مقطع می‌گردد. این شیارهای مکعب مستطیلی هنگام بتن‌ریزی از بدنه اتصال حذف شده‌اند. نکته قابل توجه جزئیات اخیر این است که حداکثر عمق شیار به اندازه‌ای است که اتصال دچار زوال نرم شود و باید به گونه‌ای تعیین شود که مقدار آرماتور موجود در مقطع که در قسمت A-A شکل (۳): نشان داده شده از مقدار بالانس کمتر باشد، زیرا در غیر این صورت بتن دچار شکست شده و در نتیجه مقطع در عمل قابل استفاده نمی‌باشد. ابعاد و نحوه خم شدن آرماتور بر گرفته از جزئیاتی است که در کتب مرجع [۶] و همچنین تحقیقات هالفورد [۵] ارائه شده است.

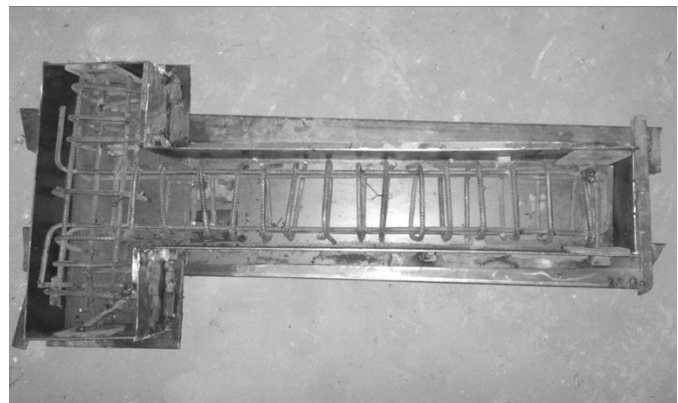
نکته دیگر اینکه جزئیات آرماتورگذاری مقطع نمونه دارای اتصال کاملاً گیردار مشابه دو نمونه دیگر است با این تفاوت که در آن آرماتورهای طولی به صورت مستقیم بدون اینکه در محل اتصال به صورت ضربدری در آیند وارد ستون می‌شوند. به عبارت دیگر در طول تیر جزئیات آرماتور گذاری به صورتی که در مقطع B-B شکل (۲) و شکل (۳): نشان داده شده در می‌آید.

استفاده قرار می‌گیرد و در آیین نامه‌ها به عنوان گیردار کامل در نظر گرفته می‌شود.

در این تحقیق، اتصال با آرماتور ضربدری و اتصال با آرماتور ضربدری و بتن شیاردار [۵] اتصالاتی هستند که مورد آزمایش قرار می‌گیرند. در شکل (۲) نمونه دارای اتصال با آرماتور ضربدری نشان داده شده است. آرماتورهای طولی و عرضی استفاده شده در این نمونه همگی از آرماتور آجدار نمره ۸ هستند. آرماتور بالایی تیر پس از طی طول مستقیمی با زاویه ۳۰ درجه رو به پایین خم خورده و در نهایت بر روی آرماتور طولی ستون خم می‌شود و دقیقاً مثل همین روش برای آرماتور زیرین ولی به صورت بالعکس صورت می‌پذیرد. آرماتورهای فوقانی و تحتانی تیر در فاصله نزدیک به محل اتصال تیر به ستون به هم می‌رسند و به صورت ضربدری از هم عبور می‌نمایند. تصور بر آن است که در این حالت تجمع آرماتورها در یک نقطه، سبب کاهش صلبیت دورانی (ممان اینرسی) مقطع اتصال می‌شود. شکل (۳): جزئیات نمونه دیگر را نشان می‌دهد که در آن علاوه بر جزئیاتی که در نمونه قبلی مورد استفاده قرار گرفت شیاری عرضی به ارتفاع ۲/۵ و عرض ۳ سانتیمتر در بالا و پایین مقطع

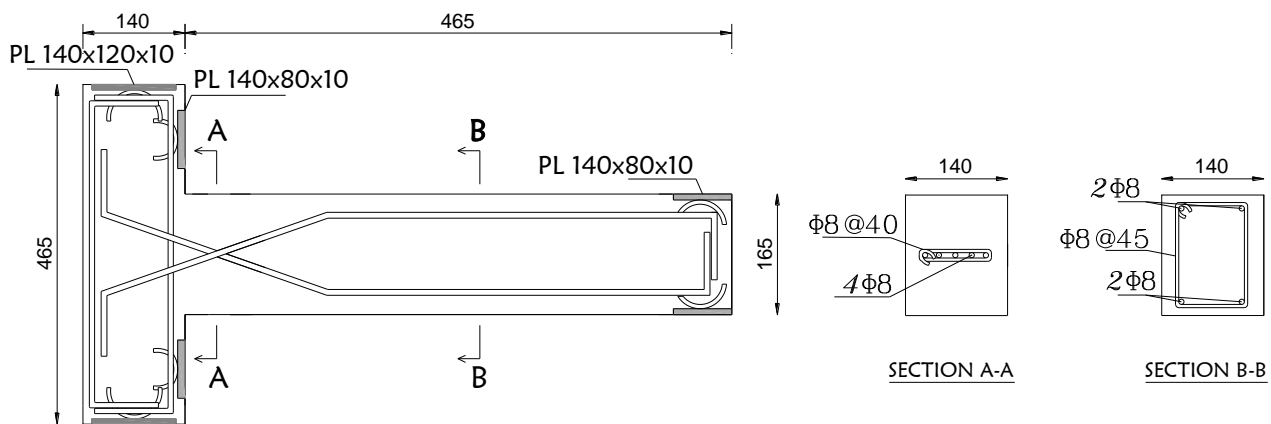


ب) نمونه اتصال صلب در قاب آزمایش

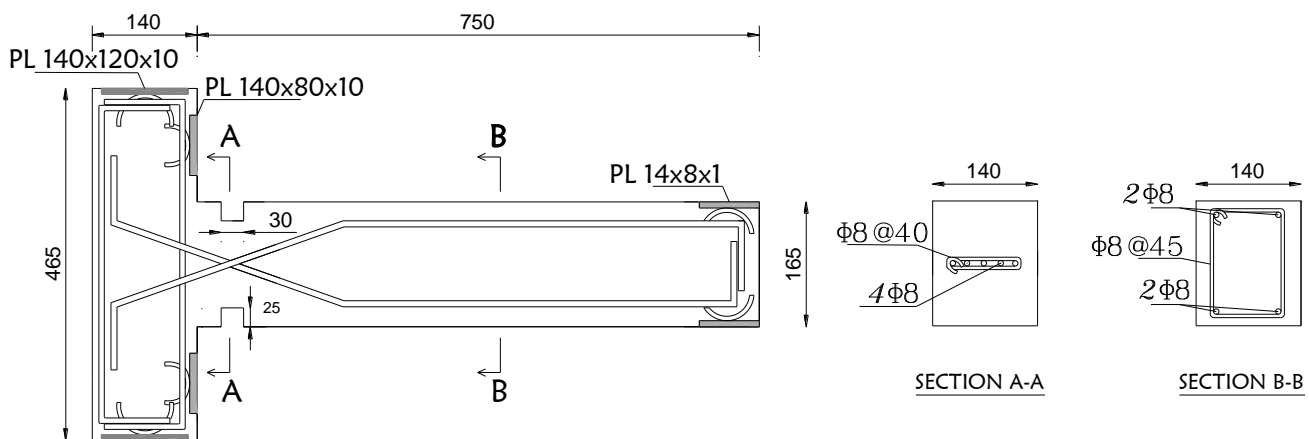


الف) آرماتور گذاری و قالب بندی نمونه دارای اتصال گیردار

شکل (۱): نمونه دارای اتصال صلب در زمان اجرا و آزمایش

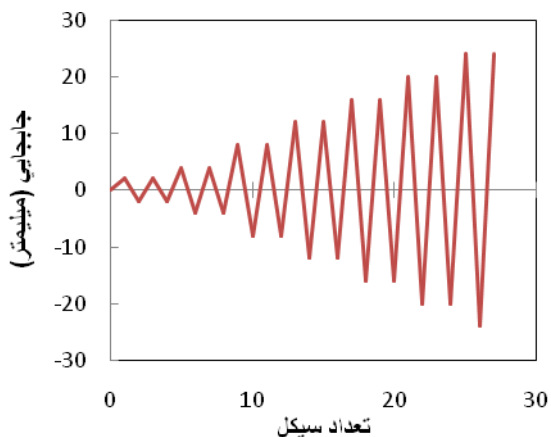


شکل (۲): جزئیات نمونه اتصال با آرماتور ضربدری اتصال (ابعاد به میلی‌متر)



شکل (۳): جزئیات نمونه اتصال با آرماتور ضربدری و شیار در مقطع بتنی محل اتصال (ابعاد به میلی‌متر)

در سیکل‌های بعدی به گونه‌ای تنظیم شده است که تا حد امکان همه حالت‌های خرابی نمونه‌ها را در برگیرد.



شکل (۴): نمودار جابجایی اعمال شده به نمونه‌های آزمایشگاهی

#### ۴- اعمال گام‌های جابجایی مختلف به نمونه

بارگذاری نمونه‌ها، به صورت گام‌های جابجایی مشخص و برای هر جابجایی به تعداد دو دوره صورت پذیرفته است. این شیوه بارگذاری بر اساس آیین نامه ATC-24 [۷] و در نظر گیری محدودیت آزمایشگاه برای انجام تعداد سیکل‌های بیشتر صورت پذیرفته است. جابجایی‌ها توسط یک جک هیدرولیکی به سر آزاد تیر نمونه‌ها اعمال شد که اولین گام جابجایی آن به نمونه به مقدار ۲ میلی‌متر بود. در این گام انتظار می‌رود که هر سه نمونه ترک خوردگی را تجربه نمایند. نکته قابل توجه آن است که هر چند جابجایی متناظر وقوع اولین ترک در نمونه‌ها یکسان نیستند ولی به منظور مقایسه نتایج یک تاریخچه جابجایی یکسان به همه نمونه‌ها اعمال شده که در شکل (۴): نشان داده شده است. جابجایی اولین سیکل و همچنین گام‌های افزایش آن

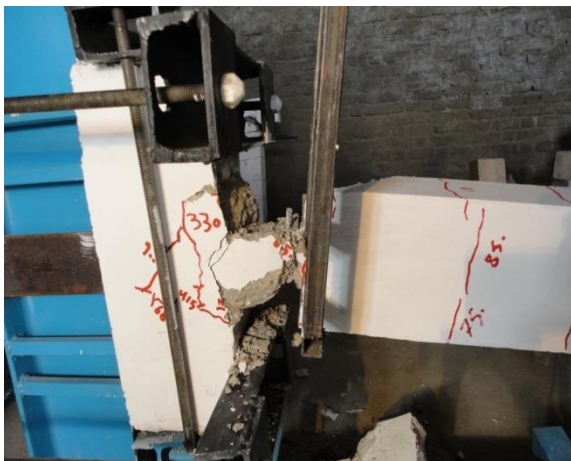
## ۵- رفتار نمونه‌های مورد آزمایش

بین محل اتصال تا وسط تیر به وجود آمدند که با افزایش مقدار جابجایی، فراوانی آن‌ها بیشتر شد و در نهایت مقطع مانند آنچه در شکل ۵-ب مشاهده می‌شود درآمد. در این گام‌ها و در زمانی که نمونه به تسلیم رسید، بسیاری از ترک‌هایی که در قسمت‌های فوقانی و تحتانی نمونه قرار داشتند با گسترش بیشتر به یکدیگر متصل شدند ضمن اینکه این ترک‌ها نیز مقدار اندکی در داخل بدنه ستون نیز پیشروی نمودند. در گام‌های بعد مشاهده گردید که در قسمت فشاری محل اتصال، تکه‌هایی از مقطع خرد و از آن جدا شدند. در جابجایی‌های حدود ۱۲ سانتیمتر که به صورت رفت و برگشتی به نمونه اعمال گردید، تمامی پوشش اطراف آرماتورهای طولی و عرضی از مقطع جدا شده و مقطع در محل اتصال تنها به صورت هسته بتنی که اطراف آن را آرماتورهای طولی و عرضی گرفته بودند باقی ماند. همان‌گونه که در شکل (۵-ب) دیده می‌گردد، در ستون این نمونه، به غیر از چند ترک مختصر، آثار خرابی دیگری مشاهده نشد و در آن میزان تخریب ایجاد شده در ستون از نمونه دارای اتصال گیردار به مراتب کمتر بود.

در گام‌های اولیه بارگذاری آزمایش نمونه دارای آرماتور ضربدری و شیار در بتن مقطع مشاهده شد که ترک‌های ریزی در محل اتصال ایجاد گردید که با افزایش بارگذاری بازتر شده و در امتداد مسیرشان پیشروی نمودند. البته برخلاف دو نمونه‌ای که پیش از این اشاره شد با اعمال جابجایی بیشتر، دیگر شاهد ایجاد ترک‌های خمشی در قسمت‌های مختلف از طول تیر نبودیم بلکه در این نمونه شاهد رشد و افزایش ترک‌ها تنها در محل اتصال بودیم. ترک‌های ایجاد شده و مناطق خرد شده در انتهای آزمایش این نمونه در شکل (۵-ج) مشاهده می‌گردد.

نحوه ترک‌خوردگی و خردشدگی نمونه‌های مورد مطالعه در شکل (۵) نشان داده شده است. در نمونه دارای اتصال گیردار، ترک‌های ابتدایی مقطع که در شکل ۵-الف قابل مشاهده است، در محل اتصال تیر به ستون و چند سانتی‌متر داخل ستون شروع و با افزایش جابجایی بازتر شدند و گسترش یافتند. با اعمال جابجایی در گام‌های نهایی، عرض ترک‌های ایجاد شده بیشتر شد و این ترک‌ها بعد از بار برداری نیز باز ماندند، تا آنکه بار معکوس باعث بسته شدن آن‌ها شد. در گام‌های نهایی ترک‌هایی که به صورت قائم در نقاط مختلف تیر ایجاد شده بودند به هم رسیدند. هر چند که فراوانی این ترک‌ها در نزدیکی اتصال بسیار بیشتر از سایر نقاط تیر بود ولی در حد فاصل بین اتصال تا وسط تیر نیز دیده می‌شدند (شکل ۵-الف). بعد از جاری شدن آرماتورهای مقطع، با اعمال جابجایی بیشتر بر میزان ترک‌ها افزوده نشد و همان ترک‌های موجود باز و بسته شدند. در نهایت ترک‌ها بیشتر درون ستون نفوذ نموده و به شکل قطاع دایره‌ای در محل اتصال، ستون را تخریب نمودند. این رفتار با یافته‌های محققین و آموزه‌های موجود مبنی بر حفظ سلامت ستون‌های ساختمان کاملاً مغایر است. در جابجایی ۱۲ سانتیمتری در رأس تیر، تمامی بتن پوشش آرماتورها در محل اتصال از مقطع جدا شد و فقط هسته بتنی که آرماتورهای طولی و عرضی آن را در بر گرفته‌اند در مقطع باقی ماند.

در نمونه دارای آرماتور ضربدری، طی گام‌های نخست سر تیر این نمونه، ترک‌هایی مویی در محل اتصال تیر به ستون ایجاد شد. پس از آن و با اعمال جابجایی بیشتر، ترک‌ها در مقطع نمونه گسترش یافته و یا بازتر شدند. در گام‌های پایانی آزمایش، در طول تیر ترک‌های خمشی در بالا و پایین مقطع در حد فاصل



ب) اتصال با آرماتور ضربدری در محل اتصال



الف) اتصال گیردار



ج) اتصال با آرماتور ضربدری و شیار در مقطع بتنی محل اتصال

شکل (۵): نحوه شکست نمونه‌های مورد آزمایش

$$M_{BA} = \frac{2EI}{L'}(-\theta_A - \frac{3\Delta}{L'}) \quad (2)$$

که در آن  $\theta_A$  و  $\Delta$  به ترتیب زاویه دوران سر تیر در نقطه A و مقدار افت تیر در نقطه B و P نیروی قائم متمرکز وارد به مرکز تیر است [۲]. در ضمن E و I به ترتیب مدول الاستیسته و ممان اینرسی تیر، L و L' به ترتیب طول کل و نصف طول تیر است.  $M_{BA}$  و  $M_{AB}$  لنگرهای تیر AB به ترتیب در سر A و B هستند. از طرفی بر اساس روابط تعادل می‌توان روابط ۳ و ۴ را نیز نوشت:

$$M_{AB} = k_\theta \times \theta_A \quad (3)$$

$$M_{BA} = \frac{PL}{4} + k_\theta \times \theta_A \quad (4)$$

با توجه به این روابط می‌توان مقدار  $\theta_A$  را به صورت رابطه ۵ به دست آورد:

$$\theta_A = \frac{-PL^2}{16(EI + k_\theta L/2)} \quad (5)$$

خط تیر در واقع خطی بر روی نمودار خمش- دوران ( $M-\theta$ ) محل تکیه‌گاه است که دو نقطه زیر را به هم وصل می‌نماید: نقطه ۱ بر روی محور افقی که بیانگر مقدار دوران سر تیر در محل تکیه‌گاه است وقتی که باری به صورت متمرکز به وسط تیر وارده شده و مقدار  $k_\theta$  صفر است این نقطه با  $\theta_s$  نشان داده می‌شود. نقطه ۲ بر روی محور قائم M و بیانگر مقدار خمش تیر در محل تکیه‌گاه است زمانی که تکیه‌گاه کاملاً گیردار ( $k_\theta$  بینهایت) است که این نقطه با  $M_r$  نشان داده می‌شود [۳].

همان‌گونه که بیان شد؛ با ترسیم خط تیر به همراه

### ۶- بررسی و مقایسه نمودار لنگر- دوران

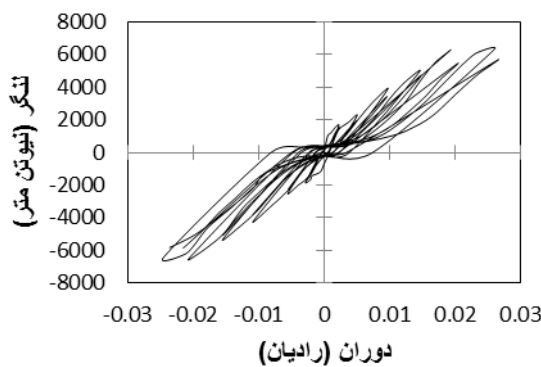
نمودار لنگر - دوران اتصال نمونه‌های مورد مطالعه معیار مناسبی برای سنجش میزان گیرداری و طبقه‌بندی آن‌ها در یکی از سه گروه کاملاً گیردار، نیمه گیردار و مفصلی است [۸]. شکل ۶، منحنی لنگر - دوران هر سه نمونه مورد مطالعه شامل اتصال کاملاً گیردار، اتصال با آرماتور ضربدری و اتصال دارای آرماتور ضربدری و بتن شیاردار را نشان می‌دهد. در این نمودارها مقدار لنگر و دوران نمونه‌های آزمایشگاهی در محل اتصال در برابر یکدیگر رسم شده‌اند.

بر اساس استاندارد، برای بررسی و تعیین میزان گیرداری اتصالات مورد مطالعه، باید خط تیر برای تیری که در هر دو انتها دارای اتصال مورد مطالعه است رسم شود سپس با یافتن نقطه برخورد پوش هریک از منحنی‌های به دست آمده با خط تیر، صلبیت اتصالات مزبور تعیین شد. نکته قابل توجه آن است که نمونه‌های آزمایش شده عملاً تیرهای طره بودند در حالی که برای ترسیم خط تیر باید اتصال مزبور در دو سر یک تیر به کار رود. برای تبدیل این دو به یکدیگر، تیر جدیدی به طول دو برابر تیر طره مورد آزمایش، در نظر گرفته شد که در شکل (۷) نشان داده شده است. در هر یک از اتصالات دو سر این تیر، فنرهای پیچشی وجود دارند که مقدار سختی این پیچشی این فنر ( $k_\theta$ ) برای هر یک از نمونه‌ها برابر شیب نمودار پوش لنگر- دوران نمونه‌ها است. با استفاده از روابط شیب افت، دو معادله ۱ و ۲ برای دو نقطه A و B از تیر جدید به دست می‌آید:

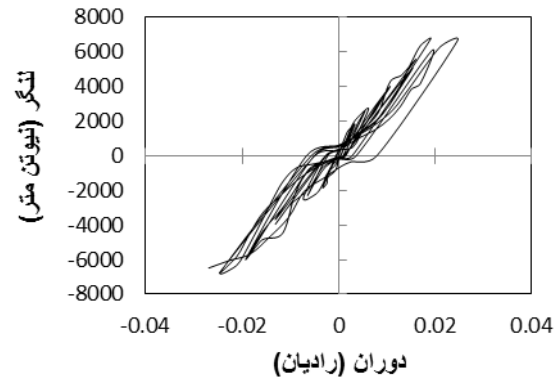
$$M_{AB} = \frac{2EI}{L'}(-2\theta_A - \frac{3\Delta}{L'}) \quad (1)$$

صلب می‌باشد و بنابراین اتصال بالا در ناحیه اتصال نیمه صلب قرار می‌گیرد. همان‌گونه که از شکل ۸ مشخص است منحنی پوش و این اتصال مشابه اتصال صلب می‌باشد، ضمن اینکه نسبت صلبیت آن نیز نزدیک به صلبیت اتصال صلب می‌باشد. محل برخورد خط تیر با منحنی پوش لنگر- دوران اتصال با آرماتور ضربدری و بتن دندانه‌دار در محل اتصال در قسمت مثبت نمودار ۵۱٪ و در قسمت منفی نمودار ۵۵٪ لنگر نهایی اتصال صلب است. بنابراین این نوع اتصال نیز جزو اتصالات نیمه صلب محسوب می‌گردد و نمی‌توان آن را اتصال مفصلی فرض نمود.

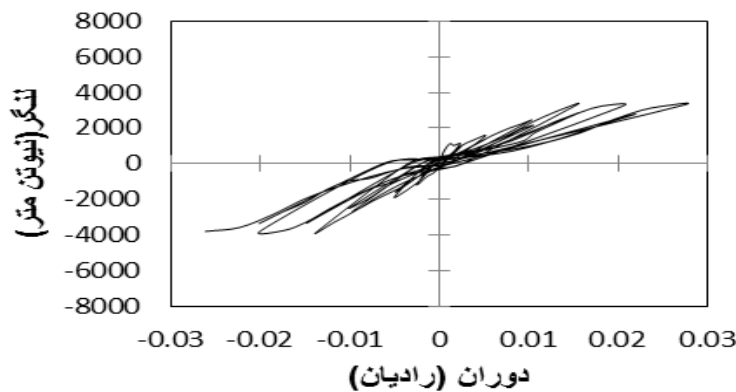
منحنی‌های لنگر- دوران اتصال‌های مورد مطالعه و یافتن نقطه برخورد پوش هر یک از این منحنی‌ها با خط تیر، صلبیت این اتصالات تعیین می‌گردد. نسبت لنگر متناظر این محل برخورد به لنگر اتصال کاملاً صلب نسبت صلبیت اتصال نامیده می‌شود. بر اساس استاندارد، اتصالاتی با نسبت صلبیت صفر تا ۲۰ درصد در رده اتصالات مفصل خمشی (ساده) و ۹۰ درصد تا ۱۰۰ درصد صلب و بقیه نیمه صلب تلقی می‌شوند [۳]. بر اساس نتایج به‌ست آمده از آزمایش، محل برخورد خط تیر با منحنی پوش لنگر- دوران اتصال با آرماتور ضربدری در محل اتصال در قسمت مثبت نمودار ۸۱٪ و در قسمت منفی نمودار ۸۱٪ لنگر حداکثر اتصال



ب) نمودار لنگر- دوران اتصال با آرماتور ضربدری در محل اتصال

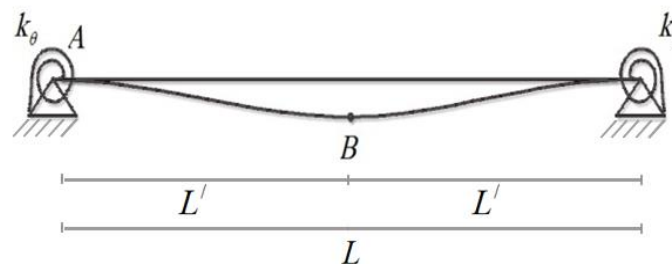


الف) نمودار لنگر- دوران اتصال گیردار



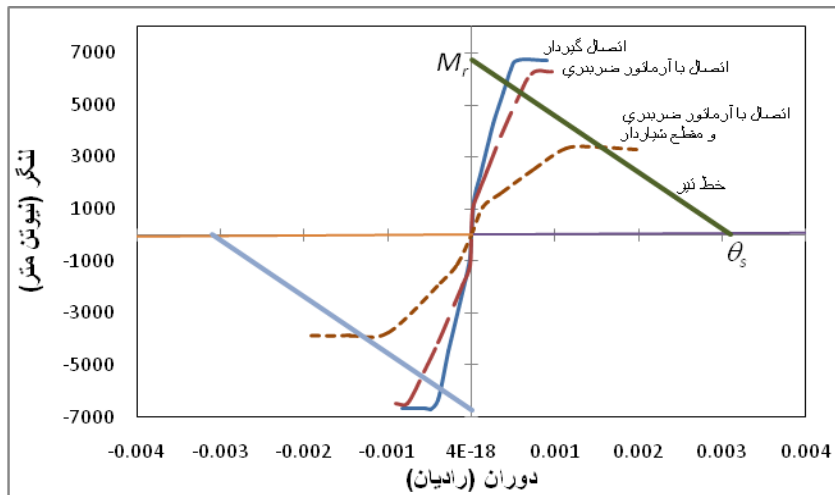
ج) اتصال با آرماتور ضربدری و شیار در مقطع بتنی محل اتصال

شکل (۶): نمودار لنگر- دوران نمونه‌های مورد آزمایش



شکل (۷): تیر بر روی اتصال مفصلی با فنر پیچشی در دو انتها





شکل (۸): بررسی و مقایسه منحنی پوش لنگر- دوران سه اتصال مختلف در قسمت مثبت نمودار

## ۷- نتیجه گیری

این است که حالت‌های شکست این دو نوع اتصال به گونه‌ای است که ممکن است پایداری لرزه‌ای سازه را با خطرات جدی مواجه سازد بنابراین استفاده از این دو نوع اتصال در سازه‌های بتنی به هیچ وجه توصیه نمی‌شود.

## ۸- مراجع

- [۱] آیین نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله و مهندسی زلزله، استاندارد ۸۴-۲۸۰۰، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴.
- [۲] بدیعی، مجید، "تئوری مقدماتی سازه‌ها"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۳.
- [۳] فروغی، محمد، "بی بعد کردن محور لنگر دوران، راه حلی برای مقایسه صلبیت اتصالات مختلف با شرایط متفاوت"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- [۴] AISC, "Qualifying Cyclic Tests of Beam to Column and Link to Column Connections", Seismic Provisions for Steel Building, 2002.
- [۵] K. M. Holford ; R. Pullin and R. J. Lark; "Acoustic Emission Monitoring of Concrete Hinge Joint Models", DGZfP-Proceedings BB 90-CD, Lecture 19, 2004.
- [۶] Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318- 10), 2010.
- [۷] ATC-24, Guidelines for Seismic Testing of Components of Steel Structures, Applied Technology Council, 1992.
- [۸] M. Haskett, D. J. Oehlers, M.S. Mohamed Ali, C. Wu-2009 , "Rigid body moment- rotation mechanism for reinforced concrete beam hinges", Engineering Structures 31, 2009.

در این تحقیق دو نوع از جزئیاتی که در جامعه مهندسی و برخی مراجع به عنوان اتصال مفصلی در سازه‌های بتنی مشهور شده‌اند مورد آزمایش قرار گرفت. در هر دو نوع این اتصالات، آرماتورهای طولی به صورت ضربدری در می‌آیند. در یکی از نمونه‌ها برای کاهش اثر بتن مقطع، شیاری عرضی در بالا و پایین مقطع در همان محلی که آرماتور ضربدری شده نیز اجرا می‌شود. بنابراین دو نمونه که در هر دوی آن‌ها آرماتور طولی در محل اتصال به صورت ضربدری در آمد تهیه شد که فقط در یکی از آن‌ها شیاری عرضی نیز اجرا شد.

برای مقایسه نتایج با اتصال گیردار کامل، نمونه‌ای با این نوع اتصال نیز تهیه و آزمایش شد. همه حالات یاد شده در انتهای یک تیر و در محل اتصال به ستون به کار گرفته و سر دیگر تیر بارگذاری شد. نمودار لنگر- دوران در محل اتصال تحت بار تکراری به دست آمد سپس برای تعیین میزان گیرداری اتصال، محل برخورد پوش نمودار یاد شده با نمودار خط تیر که نحوه محاسبه آن نیز از نظر گذشت به دست آمد.

بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که اتصال دارای آرماتور ضربدری بسیار مشابه اتصال صلب می‌باشد و با معیارهای اتصال مفصل خمشی تفاوت زیادی دارد. اتصال دارای آرماتور ضربدری و بتن شیاردار، نیز جزو اتصالات نیمه صلب دسته‌بندی می‌گردد. بر اساس نتایج به دست آمده، مقاومت نهایی این اتصال از دو نوع اتصال گیردار کامل و اتصال با آرماتور ضربدری کمتر است ولی هنوز معیارهای لازم برای ایجاد مفصل خمشی را برآورده نمی‌نماید. بر اساس این نتایج، مقدار گیرداری اتصال با آرماتور ضربدری و اتصال مشابه آن که دارای شیار در بالا و پایین مقطع بتنی است به ترتیب بیش از ۸۰٪ و ۵۰٪ می‌باشد. نکته قابل توجه دیگر در اتصالات یاد شده