مطالعهٔ رفتاری و طبقه بندی اتصالات بتن آرمه در بار نهایی

داود مستوفی نژاد

دانشیار دانشکدهٔ مهندسی عمران- دانشگاه صنعتی اصفهان

جعفر سبحانی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشکدهٔ مهندسی عمران- دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت ۸۱/۶/۱۵ ، تاریخ تصویب ۸۲/۲/۱۷)

چکیده

تحقیقاتی که تا به حال بر روی اتصالات بتنی انجام شده، اکثراً محدود به تعدادی آزمایشات پراکنده با پارامترهای متغیر بوده است. بنابراین نیاز به یک مطالعهٔ تقریباً جامع بر روی نحوهٔ تأثیر پارامترهای مختلف طراحی، در رفتار اتصالات احساس می‌شود. در مقالهٔ حاضر برای نیل به این منظور، ۴۳۲ اتصال خارجی بتن آرمه با استفاده از روش اجزاء محدود تحلیل شده است. پارامترهایی که در این بررسی مد نظر قرار گرفته‌اند، عبارتند از: درصد فولاد طولی تیر و ستون متصل به اتصال (۱٪ و ۲٪ برای تیر، و ۱٪ و ۴٪ برای ستون)، میزان فولاد عرضی (سه مقدار)، و جزئیات مختلف فولادگذاری عرضی (۹ جزئیات). در بررسی‌هایی که در این مقاله ارائه شده است، نقش و تأثیر هر کدام از پارامترهای مذکور در میزان لنگر نهایی، دوران نهایی و میزان عملکرد اتصالات، مورد مطالعه قرار گرفته است. با بررسی‌هایی که بر روی رفتار اتصالات انجام شد، اتصالات مورد بررسی در چهار ردهٔ اتصالات صلب-مقاوم، نیمه صلب-مقاوم، صلب-نیمه مقاوم و نیمه صلب-نیمه مقاوم طبقه‌بندی شدند.

واژه‌های کلیدی : اتصالات تیر-ستون خارجی، لنگر مقاوم نهایی، دوران نهایی، عملکرد اتصالات، بتن آرمه

مقدمه

مطالعه و بررسی سازه‌های تخریب شده در اثر زلزله‌هایی که طی سالهای اخیر به وقوع پیوسته، مهندسان را به نقش و اهمیت اتصالات تیر-ستون در ایمنی ساختمانها واقف نموده است. در طرح ساختمانها در برابر زلزله اصل بر این است که سازه طوری طرح و ساخته شود که بتواند در برابر زلزله های متوسط بدون آسیب دیدگی مقاومت کند؛ در برابر زلزله های شدیدی که برای عمر مفید آن پیش‌بینی می‌شود، بدون آسیب دیدگی جدی مقاومت کرده، و در برابر زلزله های شدید غیر عادی، سازه دچار تخریب کلی نشود [۱]. مشاهدهٔ ساختمانهای آسیب دیده در برابر زلزله نشان داده است که تحت بار لرزه‌ای، اتصالات تیر-ستون آسیب پذیرترین المان سازه‌ای بوده و نسبت به سایر عناصر سازه‌ای نیاز به توجهات خاص در طرح و ساخت دارند. وقتی قاب بتن آرمهٔ شکل پذیر خمشی تحت تأثیر نیروهای جانبی ناشی از زلزله قرار می‌گیرد، باید اتصالات تیر-ستون قادر به انتقال نیروهای برشی بزرگی باشند که البته با تغییر شکل‌های زیادی هم همراه است. اولین مطالعات رفتاری اتصالات توسط هانسن و کونر[1] در آزمایشگاه‌های انجمن سیمان پرتلند (PCA) انجام گرفته است [۲]. از آن به بعد، این موضوع توسط محققینی در کشورهای آمریکا، کانادا، ژاپن و نیوزیلند مورد بررسی و مطالعه قرارگرفت. اگر چه اهداف این تحقیقات متفاوت بودند، اما تأکید اصلی این مطالعات، بررسی رفتار مهاری[2] فولاد های تیر و ایجاد رفتار شکل پذیر در بارگذاریهای متناوب بود [۲]. نتیجهٔ این تحقیقات منجر به تدوین اولین آیین نامه برای طراحی اتصالات بتن آرمه شد. کمیتهٔ ACI-ASCE 352 اولین توصیه‌های طراحی را در سال ۱۹۷۶ انتشار داد. همزمان، توصیه‌های متعددی توسط آیین نامه‌های مختلف توسعه یافت، اما این توصیه‌ها و قوانین در عمل با یکدیگر اختلافاتی داشتند. تحقیقات بیشتر محققین منجر به اصلاح توصیه نامهٔ کمیتهٔ ACI ASCE- 352 شد و در سال‌های ۱۹۸۵ و ۲۰۰۰، ویرایش‌های بعدی آن منتشر شد. در سالهای اخیر، با توسعهٔ استفاده از بتن‌های با مقاومت بالا و بتن

الیافی، تحقیقات در این زمینه بر روی بررسی رفتار اتصالات ساخته شده با چنین مصالحی متمرکز شده است [۱-۳].

در آنالیز و طرح اتصالات، ابهامات زیادی وجود دارد. هنوز به طور کامل تأثیر پارامترهای مختلف در رفتار و شکل پذیری اتصالات مورد بررسی قرار نگرفته است. محققین در طول سالیان متمادی بین دهۀ ۶۰ تا ۹۰ تلاش‌های زیادی در تبیین رفتار اتصالات انجام دادند. در بین این تحقیقات، مطالعات انجام گرفته بر اتصالات خارجی از اهمیت خاصی برخوردارند؛ به طوری که بیش از نیمی از تحقیقات بر روی بررسی رفتار این نوع اتصالات متمرکز شده است. این توجه خاص بدلیل هندسۀ خاص این اتصال و دریافت سهم بیشتری از بار جانبی نسبت به دو نوع اتصال دیگر، یعنی اتصالات گوشه و داخلی است. در اتصال خارجی بدلیل آنکه تنها یک تیر به ستون متصل شده است، لذا لنگر بیشتری به اتصال منتقل می‌شود؛ در حالیکه در اتصال داخلی بدلیل آنکه تیر از هر دو طرف به ستون متصل شده است، بنابراین مقدار زیادی از لنگرهای وارده خنثی می‌شود.

بین سالهای ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۶، تحقیقات متعددی بر روی رفتار اتصالات خارجی انجام گرفته است. اما اکثر این تحقیقات، تنها محدود به چند مطالعۀ آزمایشگاهی است که هرکدام تعداد محدودی اتصال را مورد بررسی قرار داده‌اند. از طرفی به دلیل بروز مشکلات خاصی در زمینۀ تحلیل‌های غیر خطی اجزاء محدود خصوصاً در زمینۀ مسائل بتن مسلح، از قبیل مدل کردن معیار شکست بتن، مدل کردن لغزش میلگردها، ترک‌خوردگی و شکست بتن، و همچنین طولانی بودن زمان تحلیل، کمتر مطالعۀ جامع و فراگیری در زمینۀ رفتار اتصالات بتن آرمه به صورت تحلیلی با ابزار اجزاء محدود، به چشم می‌خورد.

مروری بر محدودۀ این تحقیق

پارامترهایی که در این تحقیق برای بررسی رفتار اتصالات بتن آرمۀ خارجی در نظر گرفته شده است، عبارتند از: ۴ نوع ابعاد اتصال، ۲ مقدار مختلف برای فولاد تیر متصل به اتصال (۱٪ و ۲٪)، ۲ مقدار مختلف برای فولاد ستون متصل به اتصال (۱٪ و ۴٪)، ۳ مقدار مختلف فولاد عرضی (مطابق پیشنهادات آیین نامۀ ACI، ۷۵٪ و ۲ برابر مقدار پیشنهادی آیین نامه) و ۹ جزئیات مختلف برای فولادگذاری عرضی در نواحی مختلف اتصالات. بدین ترتیب، در مجموع ۴۳۲ نمونۀ اتصال بدست می‌آید که در این تحقیق مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در انتهای این تحقیق نیز سعی شده است تا طبقه بندی مناسبی از انواع اتصالات بتن آرمه از نظر رفتار در بار نهایی ارائه گردد.

معرفی اتصالات بتن آرمۀ مورد بررسی

مشخصات هندسی و ابعادی

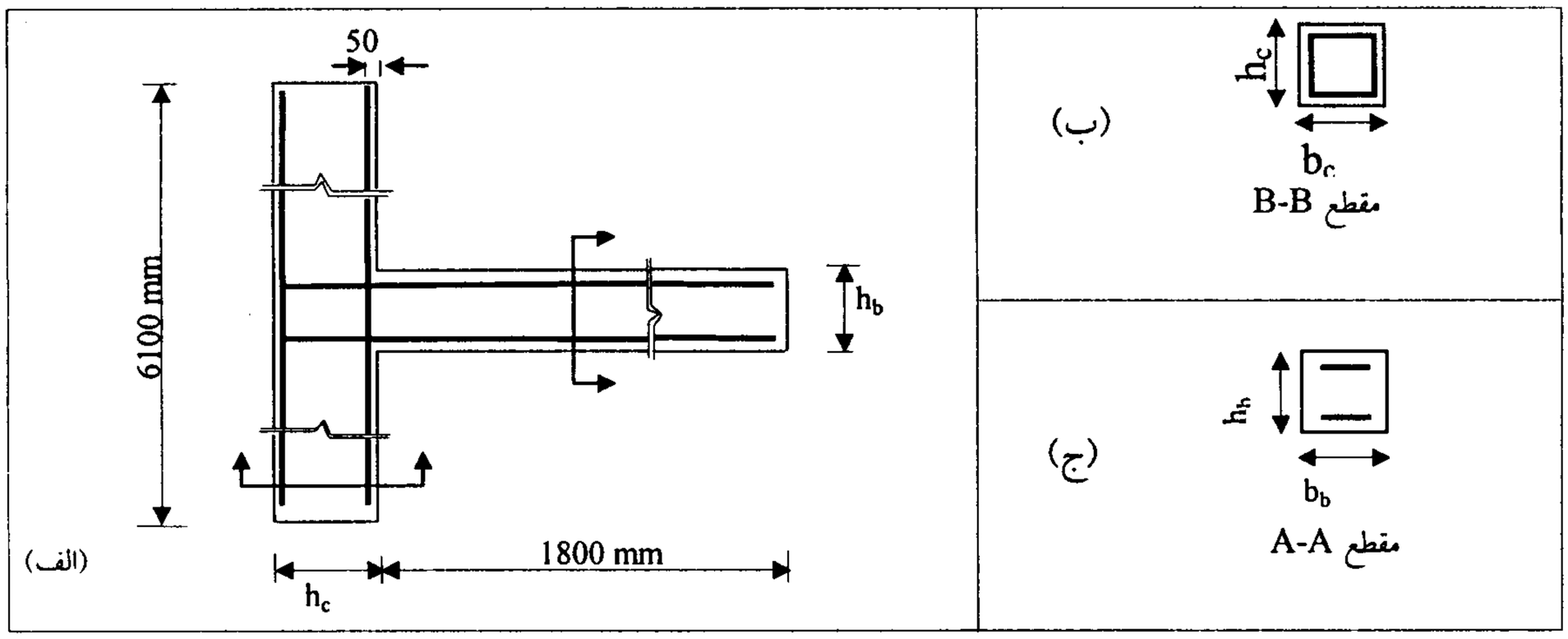
به دلیل محدودیت امکانات آزمایشگاهی که در بررسی‌های تجربی اتصالات وجود دارد، معمولاً از مقیاس‌های کوچکتر برای انجام تحقیقات استفاده شده است؛ اما به دلیل عدم محدودیت در انجام تحلیل‌های کامپیوتری، ابعادی که برای اتصالات انتخاب شده، ابعادی در حدود اندازه‌های واقعی می‌باشد که به طور معمول در ساختمانها کاربرد دارد. در شکل (۱)، ابعاد هندسی اتصال خارجی مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است. همچنین در جدول (۱)، مشخصات هندسی مقاطع تیر و ستون در انواع اتصالات مورد بررسی در این تحقیق آورده شده است.

جدول ۱ : مشخصات هندسی اتصالات مورد بررسی مطابق با شکل ۱.

نوع اتصال	h_b (mm)	b_b (mm)	h_c (mm)	b_c (mm)
C1	300	300	300	300
C2	300	300	500	500
C3	500	500	500	500
C4	500	300	300	300

میزان فولادهای طولی

- برای هر چهار نمونۀ اتصال که در قسمت قبل به آنها اشاره شد، دو درصد مختلف فولاد طولی برای هر کدام از تیر و ستون متصل به اتصال مورد استفاده قرار گرفته است. این مقادیر برای ستونهای اتصالات، ۱ و ۴ درصد؛ و برای تیر، ۱ و ۲ درصد فولاد طولی بوده است. این انتخاب بر اساس مفاهیم کلی طراحی به روش مقاومت نهایی و توصیه‌های آیین نامه‌های بتن صورت گرفته است. جهت



شکل ۱: مشخصات هندسی اتصالات؛ الف) نمای جانبی؛ ب) مقطع ستون؛ ج) مقطع تیر.

سهولت در بررسی و ارائهٔ نتایج، علامت‌های زیر را تعریف می‌کنیم:

- B_1 : ۱ درصد فولاد طولی برای تیر
- B_2 : ۲ درصد فولاد طولی برای تیر
- C_1 : ۱ درصد فولاد طولی برای ستون
- C_4 : ۴ درصد فولاد طولی برای ستون

میزان فولادهای عرضی

انتخاب فولاد عرضی برای اتصالات، بر اساس توصیه‌های آیین نامهٔ بتن آمریکا (ACI) که برای طرح سازه‌ها در برابر زلزله ارائه گردیده، انجام گرفته است [۴]. میزان این فولاد، در جدول پیوست ۱ ذکر گردیده است. در هر چهار نمونه، از سه درصد مختلف فولاد به عنوان فولاد عرضی استفاده شده است. اولین انتخاب برای فولاد عرضی، مقداری است که بر اساس آیین‌نامه بدست آمده و در پیوست ۱ ذکر گردیده است. دو انتخاب بعدی فولاد عرضی، دو و سه چهارم برابر میزان فولادی است که با توجه به ضوابط آیین نامه برای اتصالات بدست می‌آید. بر اساس توصیه‌های فصل ۲۱ آیین نامهٔ ACI، جهت حصول شکل پذیری مناسب در اتصالات، دو ناحیهٔ فولادگذاری عرضی در اجزاء متصل به اتصال وجود دارد؛ یکی ناحیهٔ با فولاد عرضی متراکم در نزدیکی اتصال و دیگری ناحیهٔ با فولاد عرضی غیر متراکم [۴]. در این تحقیق، علاوه بر استفاده از فولاد گذاری عرضی منطبق بر توصیهٔ فوق الذکر، از انواع دیگری از نحوهٔ توزیع فولادهای عرضی نیز استفاده شده است؛ به صورتیکه در بعضی از حالات، در نواحی دور از اتصال، از فولادگذاری عرضی متراکم استفاده شده؛ و همچنین در بعضی از حالات دیگر، در نواحی نزدیک اتصال، از فولادگذاری عرضی معمولی (غیر متراکم) استفاده گردیده است. بدین ترتیب، برای هر اتصال، ۹ حالت مختلف فولادگذاری عرضی مطابق شکل (۲) بوجود می‌آید.

برای بیان هر حالت از جزئیات فولادهای عرضی، در شکل (۲)، از علامتهای h،g،f،e،d،c،b،a و i استفاده شده است. برای مشخص کردن اینکه نمونهٔ مورد نظر بطور عادی، دو برابر و یا سه چهارم برابر حالت عادی فولادگذاری عرضی شده است، به ترتیب از علامت‌های O، H و L استفاده خواهد شد (منظور از O، H و L به ترتیب کلمات Ordinary، High و Low می‌باشد). با توصیفی که راجع به نامگذاری نمونه‌ها شد، با ترکیبی از این اسامی، یک نمونه بطور کامل نامگذاری می‌شود؛ به عنوان نمونه اتصالی که با اسم C1-B_1-C_4-b-H کد گذاری شده است، نمونه‌ای با مشخصات زیر است:

- مقطع تیر: ۳۰۰ mm ×۳۰۰، مقطع ستون: ۳۰۰ mm ×۳۰۰، ۱٪ فولاد طولی تیر، ۴٪ فولاد طولی ستون، آرماتور عرضی تیپ شکل ۲-ب، به صورتیکه در نواحی با فولاد متراکم، دو برابر مقدار پیشنهادی آیین نامه، فولاد عرضی دارد.

نحوهٔ مدل‌سازی و تحلیل اتصالات

برای مدل‌سازی سه بعدی و تحلیل اتصالات بتن آرمه از نرم افزار ANSYS استفاده شده است. برای معرفی مصالح بتنی، از المان‌های شش وجهی با معیار شکست ویلیام-وارنک که یک معیار شکست ۵ پارامتری با قابلیت شکست بتن در فشار و ترک خوردن در کشش است، استفاده گردیده است. برای فولادهای طولی و عرضی اتصالات، از منحنی تنش-کرنش مطابق با شکل (۳) استفاده شده است. همچنین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیتهٔ بتن به ترتیب ۳۰ و ۲۷۳۶۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

نرم افزار ANSYS اصولا پیوستگی بین بتن و میلگرد را به صورت کامل در نظر می‌گیرد که برای نواحی میلگرد با کشش حداکثر، صحیح نخواهد بود. برای رفع این مشکل ایده‌ای که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت و در عمل نیز رضایت بخش بود، استفاده از فنرهای غیر خطی برای برقراری ارتباط بین بتن و فولاد است. شکل (۴) ، نشانگر نحوهٔ مدلسازی رابطهٔ بتن و فولاد با استفاده از فنر غیر خطی می‌باشد. البته آنچه که در شکل (۴) نشان داده شده است، تنها نمایش کلی و دو بعدی از مدل می‌باشد؛ اما آنچه که در عمل استفاده شده است، شکل سه بعدی از این مدل است که نشان دادن آن در اینجا چندان آسان نیست. درحقیقت فلسفهٔ کار چنین است که در ناحیهٔ اتصال، احجام فولاد و بتن بطور کامل از یکدیگر جدا شده و سپس با استفاده از مجموعه‌ای از این فنرها، رابطهٔ بین فولاد و بتن برقرار می‌گردد. با استفاده از روابط ارائه شده در مرجع [۵]، مدل رفتاری فنرها مطابق شکل (۵) در نظر گرفته می‌شود. این مدل رفتاری بر اساس قطر میلگرد، مشخصات منحنی تنش-کرنش و جزئیات برآمدگی‌های سطح میلگرد، و با تکیه بر مشاهدات آزمایشگاهی ارائه گردیده است.

بررسی رفتار اتصالات خارجی

در بررسی‌هایی که در این تحقیق انجام گرفته است، از سه پارامتر لنگر مقاوم نهایی، دوران نهایی و عملکرد اتصالات برای مقایسهٔ رفتار اتصالات استفاده شده است. منظور از لنگر مقاوم نهایی اتصال، بیشترین لنگری است که توسط مجموعهٔ اتصال تحمل می‌شود. به همین ترتیب منظور از دوران نهایی، دورانی است که تحت اثر لنگر مقاوم نهایی بوجود می‌آید. برای بدست آوردن این مقدار، دوران تیر متصل به اتصال از میزان دوران ستون متصل به آن کسر می‌شود.

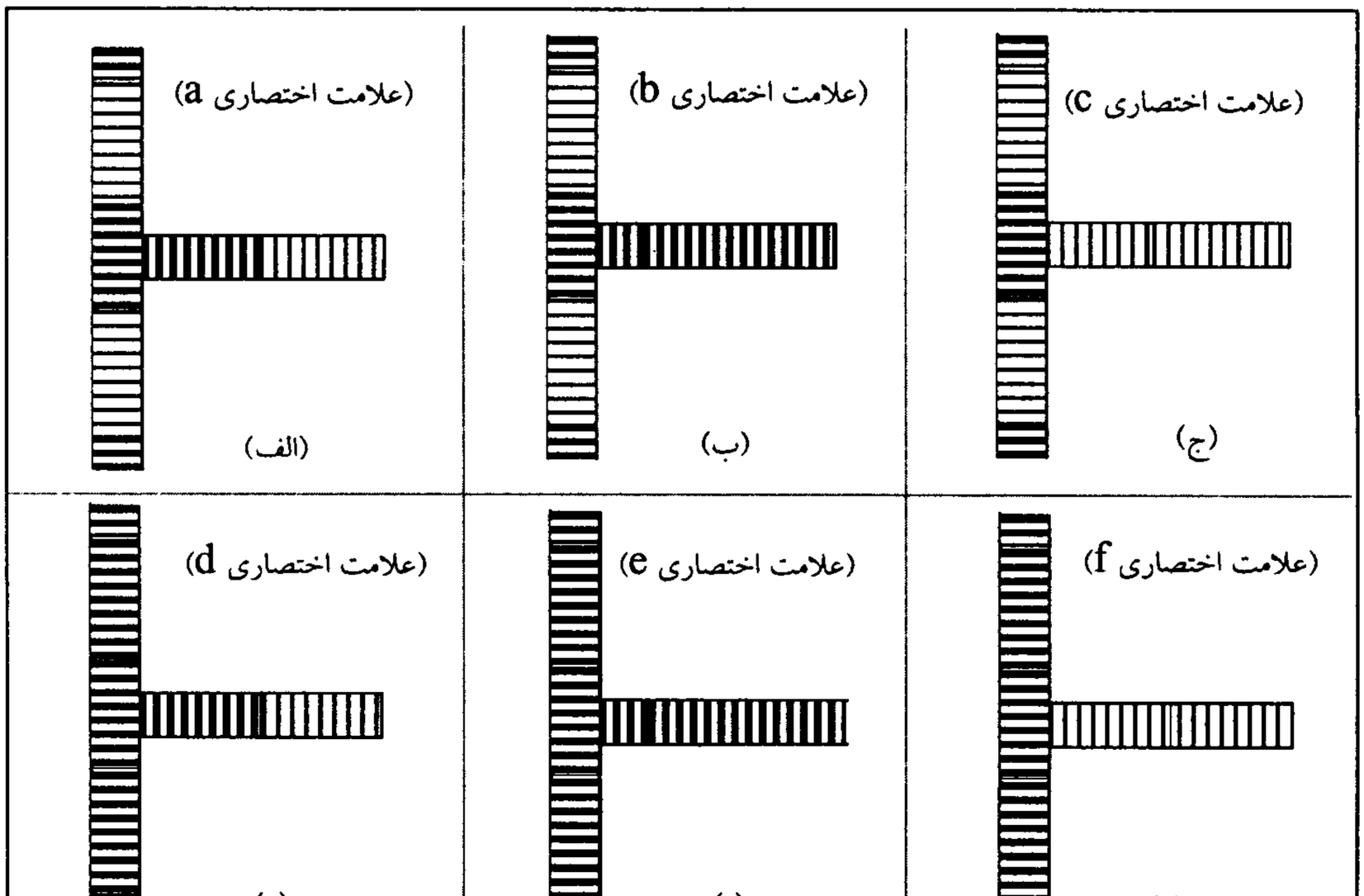
مطابق رابطهٔ ۱، عملکرد[۳] یک اتصال عبارتست از نسبت لنگر مقاوم نهایی اتصال (لنگر نهایی که توسط مجموعهٔ اتصال شامل تیر و ستون تحمل می‌شود و از نتایج تحلیل‌های غیر خطی اجزاء محدود حاصل می‌شود)، به لنگر پلاستیک تیر متصل به اتصال که بر حسب درصد بیان می‌شود [۶]. منظور از لنگر پلاستیک تیر، لنگری است که بر اساس اصول متعارف در محاسبات ظرفیت خمشی تیر بتن آرمه و مبتنی بر توزیع تنش به صورت غیر خطی و توزیع کرنش به صورت خطی، محاسبه می‌شود.

$$P = (M_u / M_p) \times 100 \qquad (۱)$$

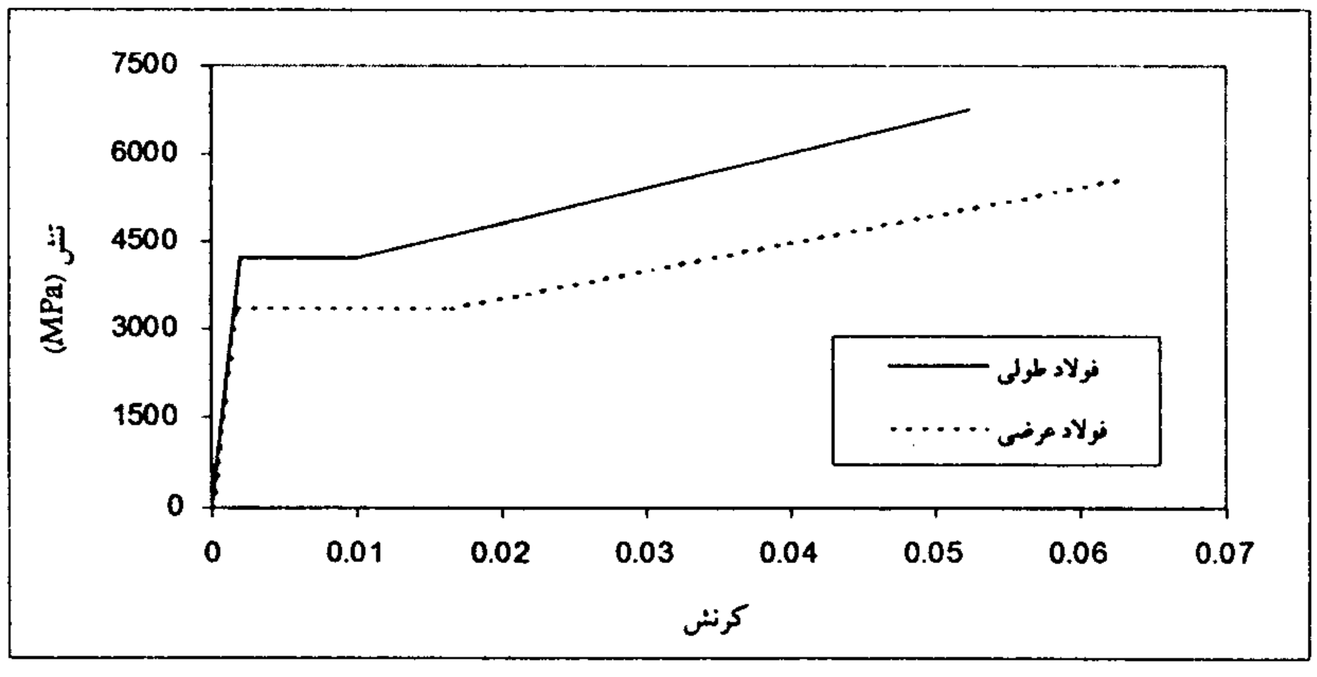
با این تعریف، مقاومت اتصالی با عملکردی بیش از صد درصد، از مقاومت محاسباتی تیر متصل به آن بیشتر است و به عبارت دیگر، این نوع اتصال چنان مقاوم است که پس از تشکیل مفصل پلاستیک در انتهای تیر متصل به آن، هنوز دارای ظرفیت بوده و به علت باز توزیع تنش و لنگر، قادر به باربری بیشتری می‌باشد. این نوع اتصال چنانچه دارای دوران مناسبی هم باشد، از نظر سازه‌ای مناسب می‌باشد. اما عملکرد کمتر از صد درصد، نشانگر آنست که قبل از تشکیل مفصل پلاستیک در انتهای تیر متصل به اتصال، در ناحیهٔ داخل اتصال، شکست اتفاق می‌افتد و اتصال مقاومت خود را از دست می‌دهد.

بررسی تأثیر میزان فولاد طولی تیر

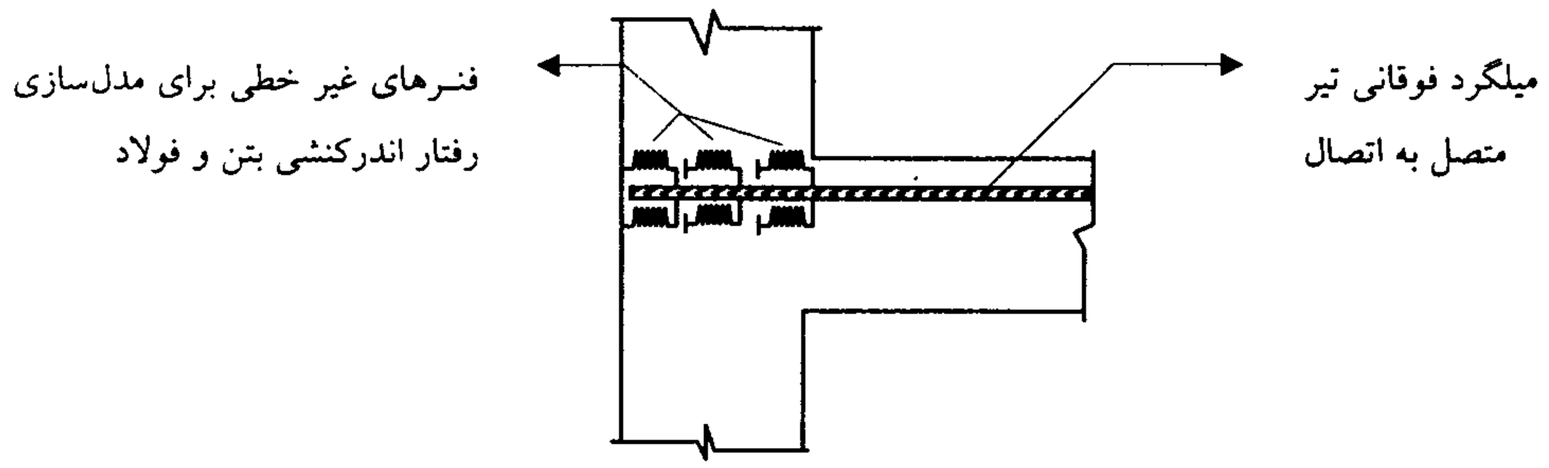
میزان فولاد طولی در تیر و یا در ستون متصل به آن، اهمیت ویژه‌ای را در رفتار اتصالات بتن آرمه ایفا می‌کند. در همین ارتباط و بر اساس نتایج مطالعهٔ موجود، نحوهٔ تأثیر افزایش فولاد طولی تیر متصل به اتصال از ۱٪ به ۲٪، در لنگر مقاوم نهایی، دوران نهایی و میزان عملکرد اتصالات، در جداول (۲) و (۳) آورده شده است. در این



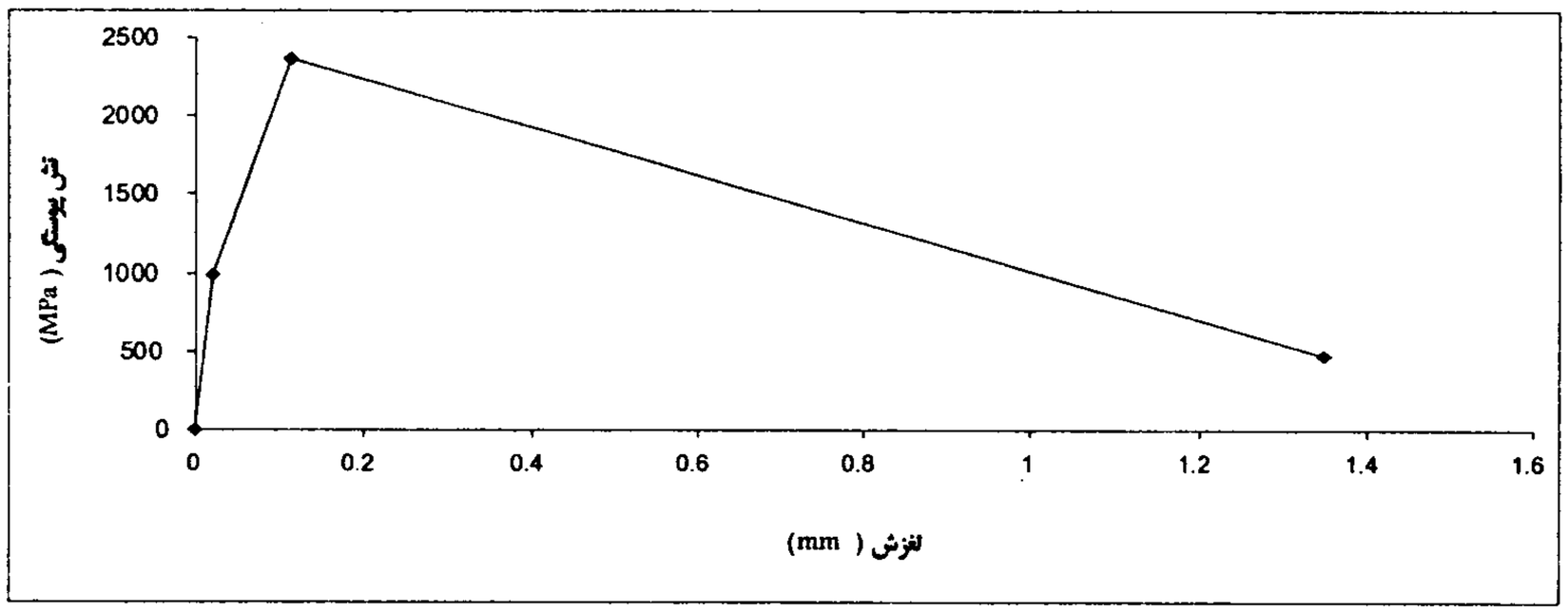
شکل ۲ : نمایش انواع فولاد عرضی در نواحی مختلف تیر و ستون در نمونه‌های اتصال C1، C2، C3 و C4.



شکل ۳ : منحنی تنش-کرنش برای فولادهای طولی و عرضی اتصالات.



شکل ٤ : نمایش دو بعدی ارتباط بتن و فولاد با فنر غیر خطی.



شکل ٥ : نمودار تنش پیوستگی-لغزش برای فنر غیر خطی.

جداول منظور از دامنه، بیشترین و کمترین میزان تغییر در لنگر یا دوران نهایی اتصالات می‌باشد. در این دامنه میزان فولاد طولی ستون و ۹ جزئیات مختلف فولاد عرضی متغیر می‌باشند.

با توجه به جدول (۲)، مشاهده می‌شود که افزایش فولاد طولی تیر از ۱ به ۲ درصد در اتصالات مورد مطالعه، حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد لنگر مقاوم نهایی اتصال را افزایش داده است. بیشترین افزایش در لنگر مقاوم نهایی مربوط به اتصال C1 با ۵۹ درصد و کمترین افزایش مربوط به اتصال C4 با ۳۸ درصد بوده است. با توجه به جدول (۲)، مشاهده می‌شود که میزان افزایش لنگر مقاوم اتصال C4 با سایر اتصالات متفاوت است و در مقایسه با بقیهٔ اتصالات، با افزایش میزان فولاد طولی تیر از ۱ به ۲ درصد، بطور متوسط میزان افزایش لنگر مقاوم نهایی در حدود ۱۰ درصد کمتر می‌باشد.

همچنین با توجه به جدول (۲)، مشاهده می‌شود که افزایش فولاد طولی تیر از ۱ به ۲ درصد، حدود ۲۴ تا ۳۶ درصد از میزان دوران نهایی اتصالات می‌کاهد. در بین چهار نوع اتصال مورد بررسی، بیشترین کاهش در دوران نهایی، مربوط به اتصال نوع C2 می‌باشد که دارای کاهشی با مقدار متوسط ۳۶ درصد است. کمترین میزان کاهش در دوران نهایی اتصالات مربوط به اتصال نوع C4 با مقدار متوسط کاهشی در حدود ۲۴ درصد می‌باشد. تفاوت‌هایی که در این دو مورد مشاهده می‌شود، بیشتر مربوط به شکل و نحوهٔ اتصال تیر و ستون با ابعاد مختلف به اتصالات مربوطه می‌باشد.

جدول (۳)، نشان می‌دهد که با افزایش فولاد طولی تیر، عملکرد اتصال کاهش می‌یابد. همانطوریکه در جدول ۲ عنوان شد، با افزایش میزان فولاد طولی تیر از ۱٪ به ۲٪ ، لنگر مقاوم نهایی اتصالات افزایش می‌یابد؛ اما در اینجا مشاهده می‌شود که این افزایش، تأثیر منفی در عملکرد اتصالات دارد. همچنین جدول (۴) نشان می‌دهد که اتصالات با فولاد طولی تیر ۱٪، عموماً دارای عملکرد بالای ۱۰۰ درصد، و اتصالات با ۲٪ فولاد طولی تیر، دارای عملکرد کمتر از ۱۰۰ درصد می‌باشند. این موضوع نشانگر عملکرد بهتر اتصالات با فولاد طولی تیر کمتر در موقع زلزله می‌باشد.

از نظر میزان عملکرد، اتصال C4 در بین چهار نوع اتصال مورد بررسی (انواع C1، C2، C3 و C4) دارای رفتار نامناسب‌تری می‌باشد. در این نوع اتصال برای هر دو حالتی که فولاد طولی تیر ۱٪ و یا ۲٪ بوده است، عملکرد پایین‌تر از ۱۰۰٪ مشاهده شده است. به عنوان نمونه، اگر اتصال C2 با این اتصال مقایسه شود، مشاهده می‌شود که به طور متوسط، میزان عملکرد اتصال C2 معادل ۱/۷ برابر عملکرد اتصال C4 می‌باشد. پایین بودن عملکرد این اتصال را نیز مشابه با لنگر مقاوم نهایی آن، می‌توان با توجه به ابعاد تیر و ستون متصل به اتصال توجیه کرد. در این اتصال، به دلیل ضعیف بودن ستون نسبت به تیر (در مقایسه با سایر اتصالات)، ستون دچار خرابی شده و در نتیجه اتصال مقاومت خود را از دست می‌دهد.

بررسی تأثیر میزان فولاد طولی ستون

در جدول (۴)، مقایسه‌ای بین لنگر مقاوم نهایی و دوران نهایی اتصالات با افزایش میزان فولاد طولی ستون از ۱ به ۴ درصد ارائه شده است. در این جدول، به عنوان نمونه منظور از اتصال $C1\text{-}B_1$، اتصالی از نوع C1 با ۱ درصد فولاد طولی در تیر متصل به اتصال، و منظور از اتصال $C4\text{-}B_2$، اتصالی از نوع C4 با ۲ درصد فولاد طولی در تیر متصل به اتصال می‌باشد. با توجه به جدول (۴)، مشاهده می‌گردد که افزایش میزان فولاد طولی ستون کمترین تأثیر را در اتصال $C1\text{-}B_2$ با ۹/۵ درصد افزایش متوسط لنگر مقاوم نهایی، و بیشترین تأثیر را در اتصال $C4\text{-}B_2$ با ۱۸/۷ درصد افزایش در متوسط لنگر مقاوم نهایی داشته است. این موضوع را می‌توان بر اساس شکل اتصال توضیح داد؛ اتصال C4 که دارای تیر قوی به ابعاد ۳۰۰×۵۰۰ mm در مقابل ستون ضعیف ۳۰۰×۳۰۰ mm می‌باشد، به دلیل ضعف ستون نسبت به تیر متصل به آن، در ناحیهٔ ستون دچار شکست می‌شود. به همین جهت وقتی میزان فولاد طولی ستون افزایش می‌یابد، در واقع ستون تقویت می‌شود و در نتیجه با تقویت ستون، اتصال افزایش باربری بیشتری را نسبت به دیگر انواع اتصالات از خود نشان خواهد داد.

نتایج مذکور نشان می‌دهد که تأثیر میزان فولاد طولی ستون درافزایش لنگر مقاوم نهایی اتصال، به اندازهٔ تأثیر فولاد طولی تیر متصل به اتصال نیست. همانگونه که از جداول (۲) و (۴) مشاهده شد، وقتی درصد فولاد طولی تیر از ۱ به ۲ درصد افزایش می‌یابد، در حدود ۴۰ تا ۵۵ درصد به مقدار لنگر مقاوم نهایی اتصال افزوده می‌شود؛ در حالیکه این افزایش برای میزان فولاد طولی ستون (که از ۱ به ۴٪ افزایش پیدا می‌کند) بین ۱۰ تا ۱۹ درصد محدود می‌شود.

جدول ۲ : میزان افزایش (کاهش) لنگر مقاوم نهایی (دوران نهایی) اتصال با افزایش فولاد طولی تیر از ۱٪ به ۲٪.

اتصال	دامنهٔ افزایش (کاهش) لنگر مقاوم نهایی (دوران نهایی) درصد	متوسط افزایش (کاهش) لنگر مقاوم نهایی (دوران نهایی)، درصد
C1	51-59 (25-28)	54 (26)
C2	50-57 (33-40)	53 (36)
C3	48-53 (27-35)	51 (29)
C4	38-45 (23-26)	42 (24)

جدول ۳ : میزان عملکرد اتصالات با فولاد طولی تیر برابر با ۱٪ و ۲٪.

اتصال	دامنهٔ تغییر عملکرد اتصال با ۱٪ فولاد طولی تیر (درصد)	دامنهٔ تغییر عملکرد اتصال با ۲٪ فولاد طولی تیر (درصد)
C1	105-134	85-105
C2	110-143	90-112
C3	101-130	87-109
C4	84-105	67-86

در جدول (۵)، بطور خلاصه دامنهٔ تغییرات عملکرد و همچنین متوسط مقادیر عملکرد اتصالات آورده شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود، افزایش فولاد طولی ستون، باعث بهبود عملکرد اتصال می‌شود. با توجه به جدول ۵، عملکرد اتصالات با افزایش فولاد طولی ستون بین ۹/۵ تا ۱۷ درصد افزایش داشته است. بیشترین افزایش مربوط به اتصال C4 می‌باشد که نشانگر اهمیت فولاد طولی ستون در تغییر رفتار اتصالات با تیر قوی در مقابل ستون ضعیف می‌باشد.

جدول ۴ : مقایسهٔ لنگر مقاوم نهایی (دوران نهایی) اتصال با افزایش فولاد طولی ستون از ۱٪ به ٤٪.

اتصال	دامنهٔ افزایش (کاهش) لنگر نهایی مقاوم (دوران نهایی) (درصد)	متوسط افزایش (کاهش) لنگر نهایی مقاوم (دوران نهایی) (درصد)
$C1-B_1$	13-15 (7.5-8.5)	14 (8.1)
$C1-B_2$	9-10 (8.2-9)	9.5 (8.6)
$C2-B_1$	14-15.6 (12-16.3)	15 (14.3)
$C2-B_2$	10.6-11.7 (14-16.7)	11 (15.3)
$C3-B_1$	12.5-13 (6-13)	12.8 (10)
$C3-B_2$	10-12 (11-12)	11 (11.5)
$C4-B_1$	14.5-16 (13.7-15)	15 (14.5)
$C4-B_2$	18-19.5 (13-16.7)	18.7 (14.6)

جدول ۵ : مقایسهٔ عملکرد اتصال با افزایش فولاد طولی ستون از ۱٪ به ٤٪.

اتصال	دامنهٔ تغییر عملکرد اتصال با ۱٪ فولاد طولی ستون (درصد)	دامنهٔ تغییر عملکرد اتصال با ۴٪ فولاد طولی ستون (درصد)	مقدار متوسط افزایش عملکرد اتصال با ۴٪ فولاد طولی ستون نسبت به اتصال با ۱٪ فولاد طولی ستون (درصد)
$C1-B_1$	105-118	119-134	14
$C1-B_2$	87-97	95-107	9.5
$C2-B_1$	110-124	127-143	15
$C2-B_2$	91-102	101-114	11
$C3-B_1$	101-115	113-130	13
$C3-B_2$	87-98	97-109	10
$C4-B_1$	84-100	97-105	16
$C4-B_2$	66-73	79-86	17

جدول ۶ : بررسی تأثیر جزئیات فولادگذاری عرضی تیر و ستون در نواحی مختلف اتصالات برای لنگر مقاوم نهایی و دوران نهایی اتصال .

اتصال	لنگر			دوران		
	کمترین	بیشترین	نسبت بیشترین به کمترین (درصد)	کمترین	بیشترین	نسبت بیشترین به کمترین (درصد)
C1	i	e	12.2	i	a	22.5
C2	i	e	12.9	i	a	20.0
C3	i	e	13.4	i	a	24.4
C4	h	d	8.8	h	f	24.0

بررسی تأثیر آرایش فولادهای عرضی در اتصالات مورد بررسی

در جدول (۶)، نوع آرایشی که در هر یک از انواع اتصالات مورد بررسی، منجر به کمترین و بیشترین دوران و یا لنگر مقاوم شده، معرفی گردیده است. در این جدول، متوسط نسبت بیشترین لنگر و دوران به کمترین لنگر و دورانی که توسط آرایش ذکر شده در جدول حاصل گردیده، آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، آرایشهای مختلف فولاد گذاری عرضی، ۸ تا ۱۴ درصد در لنگر مقاوم و ۲۰ تا ۲۵ درصد در دوران اتصال تغییر ایجاد نموده است.

در بین چهار نوع اتصال مورد بحث، سه نوع C1،

C2 وC3 رفتار مشابهی دارند؛ بدین معنی که در هر سه نوع اتصال، فولادگذاری عرضی تیر و ستون با جزئیات "I" کمترین لنگر مقاوم، و فولادگذاری عرضی تیر و ستون با جزئیات "e" بیشترین لنگر مقاوم را در اتصالات ایجاد نموده است. جزئیات نوع "I" در اتصالی بکار رفته است که در تمام نواحی آن از فولادهای عرضی بصورت غیر متراکم استفاده شده است و از طرفی در جزئیات "e"، در تمام نواحی اتصال، فولادهای عرضی بصورت متراکم استفاده شده است. همچنین در این سه نوع اتصال، فولادگذاری عرضی با جزئیات "I" کمترین، و با جزئیات "a" (فولادهای عرضی در ناحیهٔ نزدیک به اتصال به صورت متراکم و در بقیهٔ قسمت‌ها به صورت غیر متراکم)، بیشترین دوران را ایجاد نموده است.

این مسئله در مورد اتصال C4 صادق نیست؛ در این نوع اتصال، فولادگذاری عرضی با جزئیات "h" (با فولادگذاری عرضی در ناحیهٔ ستون به صورت غیر متراکم و در ناحیهٔ تیر بصورت متراکم)، کمترین و با جزئیات "d" (با فولادگذاری عرضی در تمام ناحیهٔ ستون بصورت متراکم و در ناحیهٔ نزدیک به اتصال تیر بصورت متراکم، و در بقیهٔ نواحی تیر بصورت غیر متراکم)، بیشترین لنگر مقاوم را ایجاد کرده است. همچنین فولادگذاری عرضی با جزئیات "h" کمترین و با جزئیات "f" بیشترین دوران نهایی را در اتصال ایجاد نموده است.

در توجیه تفاوت‌های رفتاری فوق‌الذکر می‌توان گفت که در اتصالات از نوع C1 تا C3، با تقویت ناحیهٔ تیر، لنگر مقاوم نهایی افزایش می‌یابد؛ از طرفی در این اتصالات با تأمین شرایط محصور شدگی در نواحی نزدیک به اتصال تیر و ستون، شکل پذیری این اتصالات نیز افزایش می‌یابد. اما در مورد اتصال C4، بدلیل ضعف ستون متصل به اتصال در مقابل تیر، وضعیت متفاوت است. هر چه تراکم فولاد عرضی در ناحیهٔ ستون این نوع اتصال افزایش می‌یابد، با تقویت ستون در برابر تیر، لنگر مقاوم نهایی آن افزایش پیدا می‌کند.

بررسی تأثیر میزان فولاد عرضی در رفتار اتصالات مورد بررسی

در این تحقیق، علاوه بر تغییر میزان فولادهای طولی در ستون و تیر اتصال، و همچنین در نظر گرفتن جزئیات مختلف فولاد عرضی در نواحی مختلف تیر و ستون و لحاظ کردن میزان فولاد عرضی بر اساس مقادیر پیشنهادی آیین نامهٔ ACI، دو مقدار دیگر فولاد عرضی با همان جزئیات ولی با مقادیر سه چهارم و دو برابر مقدار پیشنهادی ACI در نمونه‌ها استفاده شده است. هدف از این بخش مقایسهٔ رفتاری اتصالات با میزان فولاد عرضی مختلف می‌باشد. بدین منظور، در این قسمت، اتصالات با فولاد طولی تیر و فولاد طولی ستون مشابه، ولی با جزئیات فولادگذاری متفاوت و با لحاظ نمودن مقادیر مختلف فولاد عرضی با هم مقایسه می‌شود.

در جدول (۷)، نتایج بررسی‌ها خلاصه شده است. در این جدول، M_u و θ_u به ترتیب عبارتند از لنگر مقاوم نهایی اتصال و دوران نهایی اتصال. منظور از اعدادی که در کنار پارامترها در داخل پرانتز نوشته شده است، عبارت است از؛ (۱) : میزان تراکم فولاد عرضی بر اساس پیشنهاد آیین نامهٔ ACI، (۰/۷۵) : میزان تراکم فولاد عرضی برابر سه چهارم مقدار پیشنهادی آیین نامه، و (۲) : میزان تراکم فولاد عرضی به میزان دو برابر مقدار توصیه شده در آیین نامه.

با دقت در نتایج جدول (۷) می‌توان به نکات زیر دست یافت:

- هر چه تراکم فولاد عرضی در ناحیهٔ تیر اتصال بیشتر می‌شود، لنگر مقاوم اتصال افزایش پیدا می‌کند. اما در مورد اتصال C4 وضعیت به گونه‌ای دیگر است؛ در این اتصال ترتیب فوق بصورت d، f، e، a، c، b، i، g و h می‌باشد. این وضعیت نشان دهندهٔ تأثیر تراکم فولاد عرضی در ناحیهٔ ستون اتصال بر لنگر نهایی اتصال می‌باشد که این مورد نیز به دلیل شکل خاص این اتصال (تیر قوی متصل شده به یک ستون ضعیف) می‌باشد.
- هرچه تراکم فولاد عرضی در ناحیهٔ نزدیک به اتصال بیشتر می‌شود، قابلیت تغییر شکل اتصال نیز افزایش پیدا می‌کند. بدین ترتیب اتصال با جزئیات a که از این لحاظ مناسب‌ترین شکل را دارد، داری بیشترین دوران می‌باشد. در مورد اتصال C4، این ترتیب بصورت f، d، e، c، a، b، i، g، و h است. این ترتیب نشان می‌دهد که در این اتصال به دلیل ضعیف بودن ستون در مقابل تیر متصل به اتصال،

با افزایش تراکم فولاد عرضی در ستون، به‌دلیل محصور شدگی اتصال، قابلیت تغییر شکل اتصال بیشتر می‌شود و با متراکم شدن فولاد عرضی در ناحیهٔ تیر اتصال، قابلیت تغییر شکل اتصال کاهش پیدا می‌کند.

مـروری بر معیارهای طبقه بندی اتصالات در آیین نامه‌های مختلف طراحی

بررسی آیین نامه‌های طراحی، منجمله آیین نامه‌های مختلف آمریکایی و اروپایی، نشان دهندهٔ ابهامات بسیاری در زمینهٔ طراحی و طبقه‌بندی اتصالات می‌باشد. کمیتهٔ مشترک ACI-ASCE-۳۵۲ در زمینهٔ اتصالات، توصیه‌هایی را برای طرح اتصالات بتن‌آرمه ارائه داده است. در این توصیه‌ها بر اساس نحوهٔ بار وارد بر سازه، نوعی طبقه‌بندی برای اتصالات ارائه شده است که در آن اتصالات به دو دستهٔ تیپ ۱ و تیپ ۲ تقسیم می‌شود.

اتصـال تیپ۱: مطابـق با توصیه نامهٔ کمیتهٔ ACI- 352 ASCE، اتصـالی تیپ۱ تعریف می‌شود که با فراهم کردن شـرایط مقاومتـی آیـین‌نامهٔ ACI-318 ، تغییر شکل غیر الاستیک قابل توجهی نداشته باشد.

اتصـال تیپ۲: این اتصال عناصر سازه‌ای را به هم متصل مـی‌کـند کـه با داشتن مقاومت مناسب، بتوانند تحت بار و مـنجمله در سـیکل‌های لرزه‌ای، تغییر شکل غیر الاستیک قابل ملاحظه‌ای داشته باشند

جدول ۷ : بررسی تأثیر میزان فولاد عرضی در لنگر مقاوم نهایی و نیز دوران نهایی اتصال .

نوع اتصال	لنگر مقاوم نهایی		دوران نهایی		دامنه تغییر عملکرد اتصال		
	$\frac{Mu(1)}{Mu(0.75)}$ (درصد)	$\frac{Mu(2)}{Mu(1)}$ (درصد)	$\frac{\theta u(1)}{\theta u(0.75)}$ (درصد)	$\frac{\theta u(2)}{\theta u(1)}$ (درصد)	۰/۷۵ فولاد عرضی آیین نامه‌ای عادی	فولاد عرضی آیین نامه‌ای عادی	دو برابر فولاد عرضی آیین نامه‌ای عادی
C1-B_1-C_1	7-9	6-12	8-12	13-19	95-110	105-118	111-131
C1-B_1-C_4	5-8	5-12	7-12	13-18	110-126	119-134	126-151
C1-B_2-C_1	7-10	6-13	6-12	14-17	79-91	87-98	92-109
C1-B_2-C_4	5-9	7-13	8-11	14-18	88-100	96-107	102-120
C2-B_1-C_1	9-12	6-11	7-13	11-15	74-86	84-94	89-105
C2-B_1-C_4	6-11	5-11	8-15	12-16	114-135	127-143	132-157
C2-B_2-C_1	8-13	8-14	8-15	13-19	80-94	91-102	99-116
C2-B_2-C_4	7-10	6-11	8-13	12-18	92-104	100-114	107-124
C3-B_1-C_1	5-7	5-10	6-9	10-14	94-108	100-114	106-126
C3-B_1-C_4	5-8	5-8	7-10	9-16	106-122	113-130	119-139
C3-B_2-C_1	5-7	5-10	6-13	10-16	81-93	87-98	91-106
C3-B_2-C_4	4-6	4-10	6-13	10-15	91-104	97-110	101-119
C4-B_1-C_1	8-12	10-18	14-17	16-25	75-85	84-91	102-108
C4-B_1-C_4	8-10	9-19	14-18	18-27	88-98	97-105	106-125
C4-B_2-C_1	7-10	5-19	12-15	19-25	61-67	67-73	70-87
C4-B_2-C_4	7-9	7-15	15-19	15-26	73-81	79-86	85-99

با توجه به این تقسیم‌بندی ملاحظه می‌گردد که آنچه که در آیین‌نامهٔ ACI-ASCE 352 در زمینهٔ طبقه‌بندی اتصالات بیان شده است [۳]، تنها شامل تعیین یک محدودیت کلی بوده و معیار واضح و روشنی برای طبقه‌بندی اتصالات نمی‌باشد.

لازم به ذکر است که طبقه‌بندی اتصالات فولادی، چه در آیین نامه‌های اروپایی و چه در آیین‌نامه‌های آمریکایی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. آیین‌نامهٔ AISC، در روش تنش مجاز، اتصالات را به سه گروه صلب، نیمه صلب و ساده تقسیم می‌کند؛ همین آیین نامه در روش LRFD، طبقه‌بندی اتصالات را به دو گروه FR (مقید کامل[۴]) و PR (نیمه مقید[۵]) کاهش می‌دهد [۸،۷]. از طرفی در آیین نامهٔ فولاد اروپا ($EC3^6$) [۸]، برای طبقه‌بندی اتصالات فولادی جزئیات بیشتری آورده شده و معیارهای واضح‌تری ذکر گردیده است. از آنجا که در تحقیق حاضر از ایدهٔ بکار رفته در روش EC3 برای طبقه بندی اتصالات استفاده خواهد شد، در ادامه به شرح بیشتر این روش پرداخته می‌شود.

دیـدگاه آیین‌نامهٔ اروپایی EC3 در طبقه‌بندی اتصالات

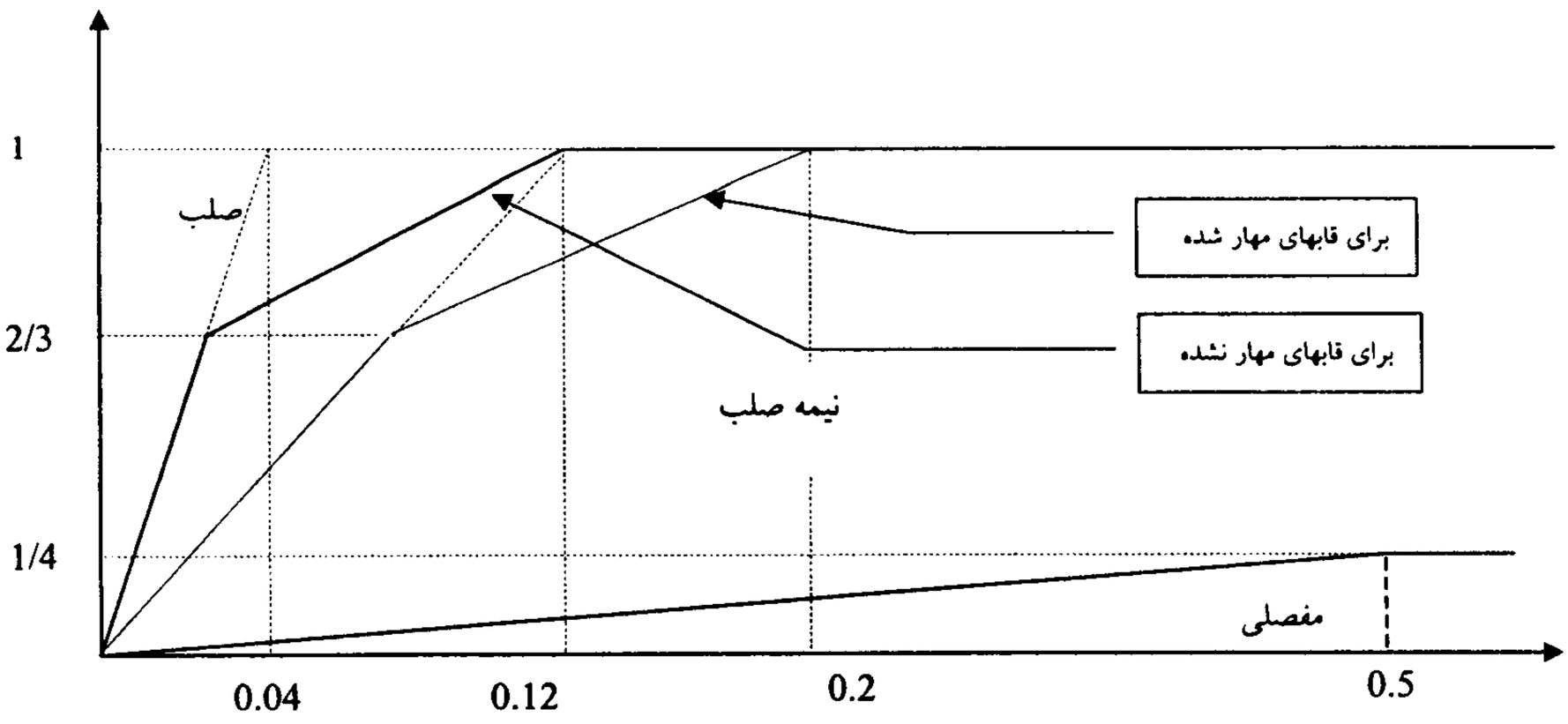
هر چند که طبقه بندی انجام شده در آیین نامهٔ اروپایی، برای اتصالات فولادی ارائه شده است، با این وجود در این طبقه بندی نکتهٔ مفهومی جالبی جلب نظر می‌کند که مبنای علمی و تجربی بسیار قوی دارد.

آیین نامهٔ EC3، سه نوع اتصال را به صورت: صلب، نیمه صلب و مفصلی معرفی می‌نماید. این آیین نامه، دو سیستم طبقه بندی جداگانه برای قاب مهار شده و قاب مهار نشده در نظر می‌گیرد. در روش پیشنهادی آیین‌نامهٔ اروپا در رسم منحنی لنگر-دوران، محور بیان کنندهٔ لنگر با توجه به لنگر پلاستیک مقطع تیر متصل به اتصال، بی بعد می‌شود؛ بدین ترتیب که اگر M_P لنگر پلاستیک (بیشترین لنگر همپایه شده در نمودار لنگر-دوران) مقطع تیر متصل به اتصال بوده، و M مقدار لنگر اتصال (که از نتایج مطالعات آزمایشگاهی و یا تحلیل غیر خطی بدست آمده است و لنگری است که توسط کل مجموعهٔ اتصال تحمل می‌شود) باشد، در این صورت $\overline{m}$ میزان لنگر همپایه شدهٔ اتصال است که از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$\overline{m} = \frac{M}{M_P} \qquad (۲)$$

به همین شیوه، محور دوران در منحنی لنگر-دوران بصورت زیر نیز بدون بعد خواهد شد:

$$\overline{\theta} = \frac{\theta}{\theta_P} \qquad (۳)$$



شکل ٦ : طبقه بندی اتصالات در قابهای مهار نشده و مهار شده بر اساس آیین نامهٔ EC3 [۸] .

در رابطهٔ فوق، θ دوران محاسباتی اتصال، θ_p میزان دوران پلاستیک تیر متصل به اتصال (حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی و یا تحلیل غیر خطی اتصـــال)، و $\overline{\theta}$ دوران همپایه شدهٔ اتصال می‌باشد.

مرز بین ناحیهٔ صلب و نیمه صلب یک منحنی سه خطی است؛ در حالیکه ناحیهٔ نیمه صلب و مفصلی با استفاده از یک منحنی دو خطی از یکدیگر جدا می‌شوند. شکل (۶)، این مرزها را برای دو سیستم قاب مهار شده و مهار نشده نشان می‌دهد.

آیین نامهٔ اروپایی، بر اساس مقاومت اتصال نیز نوعی طبقه بندی دارد. در این نگرش چنانچه $\overline{m}$ نهایی در نمودار لنگر-دوران بیشتر از ۱/۲ باشد، و یا به عبارتی چنانچه بخش انتهایی منحنی لنگر-دوران اتصال، حداقل ۲۰ درصد بالاتر از منحنی مرزی ناحیهٔ صلب و نیمه صلب قرار گیرد، آن را اتصال تمام مقاوم[۷]، و چنانچه این مقدار کمتر از ۱ بوده و بخش انتهایی پایین‌تر از مرز مذکور قرار گیرد، آن را اتصال نیمه مقاوم[۸] نامگذاری می‌کند. البته در صورتی که میزان دوران اتصال نیز کافی بوده و $1<\overline{m}<1.2$ باشد، این نوع اتصال، نیز از نوع تمام مقاوم خواهد بود. البته در این آیین نامه، بحثی راجع به *"ظرفیت دورانی کافی"*[۹] وجود ندارد و معلوم نیست که چه میزان ظرفیت دورانی به عنوان ظرفیت دورانی مناسب شناخته می‌شود. لازم به ذکر است که در یک اتصال تمـام مقاوم در حالت نهایی، مفصل پلاستیک در ناحیهٔ تیر اتصـال تشـکیل شده که به باز توزیع تنش و لنگر در سازه کمـک مـی‌کند؛ ولی برعکس موقعی که اتصال از نوع نیمه مقـاوم باشـد، مفصـل پلاسـتیک در ناحـیهٔ سـتون و یا در داخل هستهٔ اتصال تشکیل می‌گردد.

طبقه‌بندی اتصالات بتنی مورد بررسی

در بخشهای قبلی این مقاله، تأثیر پارامترهای مختلف در رفتار اتصالات، بطور جداگانه و با ارائهٔ جداولی مورد بررسی قرار گرفت. اما آنچه در ادامهٔ مقاله بدان پرداخته می‌شود، در واقع نوعی نگرش کلی بر تمام پارامترهای مورد بحث در قالب طبقه‌بندی اتصالات می‌باشد. در این بخش سعی خواهد شد که اتصالات مورد بررسی در این تحقیق با استفاده از اصول طبقه بندی اتصالات که در بخش قبل مورد بحث قرار گرفت، دسته بندی گردند. برای طبقه‌بندی اتصالات، از نمودارهای همپایه شدهٔ لنگر-دوران که در بخش قبلی معرفی شد، استفاده خواهد شد.

در شکل (۷)، نمونه‌هایی از نمودار لنگر-دوران اتصالات C1، C2، C3 و C4 در مختصات همپایه شده ارائه گردیده است. در این شکل، نمودارهای مربوط به اتصالات با درصدهای مختلف فولاد طولی و عرضی تیر و ستون نشان داده شده است. در این نمودارها همچنین مرزبندی آیین نامهٔ EC3 برای طبقه بندی اتصالات نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها، در ادامه جدولی از گروه بندی تمام اتصالات مورد بررسی ارائه خواهد شد.

بر اساس بررسی‌هایی که در بخشهای گذشتهٔ این مقاله راجع به اتصالات مختلف گزارش شد، در جدول ۸، اتصالات مورد نظر به سه گروه تفکیک شده است. گروه اول نمونه‌هایی را شامل می‌شود که لنگر همپایه شدهٔ آنها ($\overline{m}$) کمتر از ۱ بوده، در حالیکه برای گروه دوم، $\overline{m}$ بین ۱ و ۱/۲، و برای گروه سوم لنگر همپایه شده بیشتر از ۱/۲ می‌باشد. البته این نوع تفکیک برای هر سه دسته فولاد گذاری عرضی متراکم با رعایت ضوابط ویژهٔ آیین نامهٔ ACI، و دو و ۰/۷۵ برابر فولاد عرضی پیشنهادی ACI، بطور جداگانه در همان جدول ارائه شده است. هر کدام از خانه‌های جدول با یکی از چهار رنگ سفید، خاکستری، سیاه ملایم و سیاه رنگ مشخص شده است. از طرفی هر کدام از خانه‌های جدول، ظرفیت پذیرش حداکثر ۹ نمونه اتصال با جزئیات مختلف فولاد گذاری عرضی را دارد که عبارتند از جزئیات نوع a، b، c، d، e، f، g، h و i که وضعیت آنها بطور مفصل در قسمت‌های قبل معرفی گردید.

هر کدام از این چهار رنگ، مشخص کنندهٔ تعداد جزئیات اتصالاتی است که در گروه مربوط قرار گرفته است. رنگ سفید به معنی آن است که در این گروه نمونه‌ای وجود ندارد، و رنگ خاکستری بدان معنی است که در این گروه ۴ نمونه وجود دارد. همچنین در رنگهای سیاه روشن و سیاه به ترتیب، ۵ و تمام ۹ نمونهٔ فولادگذاری عرضی اتصال جای گرفته است. به عنوان مثال، با توجه به این جدول، تمام ۹ نمونهٔ فولاد عرضی اتصال $C1\text{-}B_1C_4O$ در گروه اتصالات تمام مقاوم قرار

گرفته است که با توجه به نمودار مربوطه، جزء اتصالات نیمه صلب (برای قاب مهار شده) طبقه بندی می‌شود.

توجه شود که در جدول (۸) از علائم اختصاری زیر استفاده شده است:

R-FS : صلب-تمام مقاوم

SR-FS :نیمه صلب-تمام مقاوم

R-PS : صلب-نیمه مقاوم

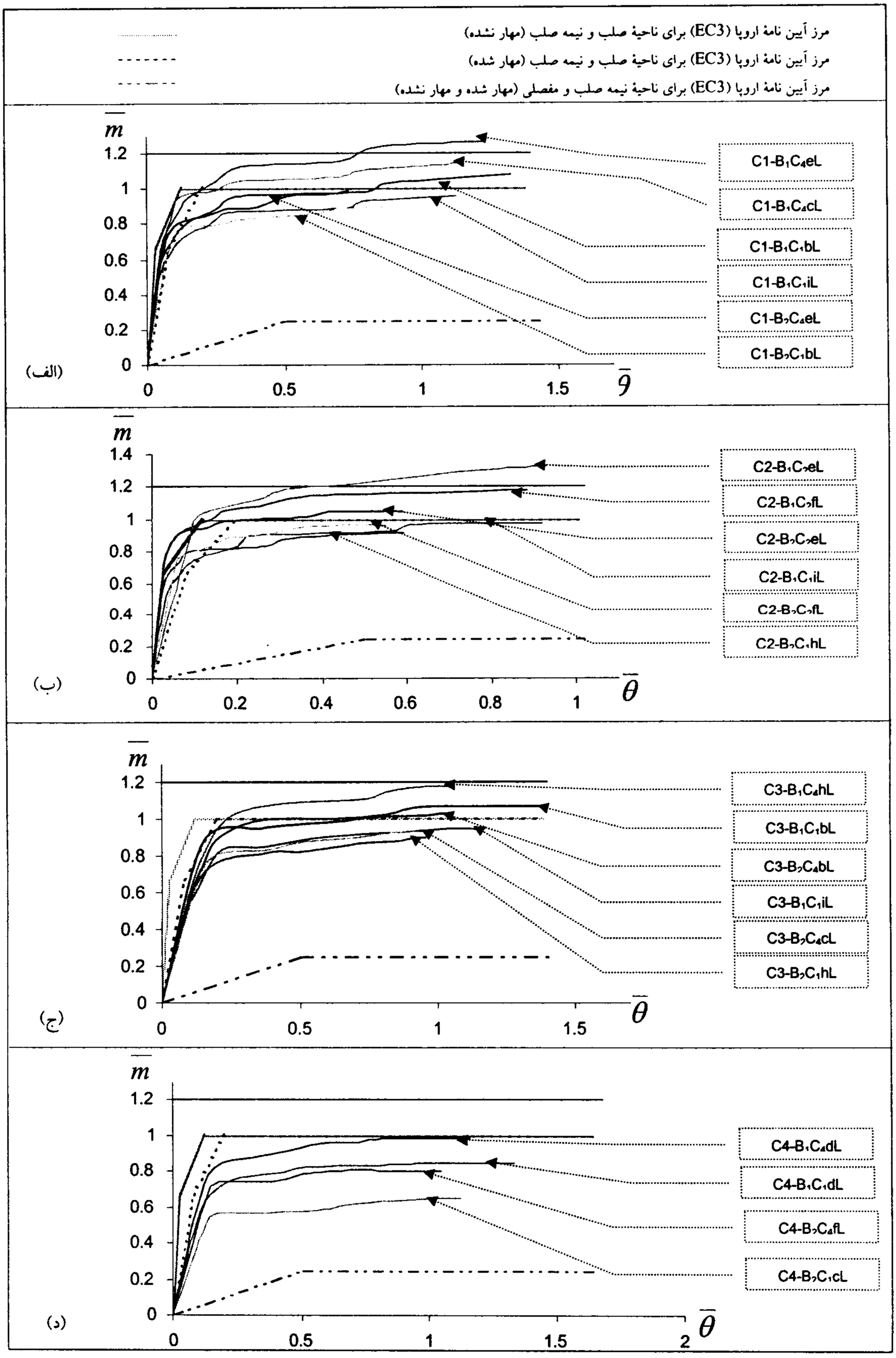
SR-PS : نیمه صلب-نیمه مقاوم

لازم به ذکر است که بررسی‌های انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد که در تمام انواع اتصالات مورد مطالعه به جز اتصال C4، ترتیب جایگذاری در هر خانهٔ جدول (یعنی ترتیب صعودی $\bar{m}$) به صورت i، c، f، g، a، d، h، b و e، و برای اتصال C4، این ترتیب بصورت h، g، i، b، c، a، e، f و d می‌باشد. بدین ترتیب در گروه‌های چهار تایی (رنگ خاکستری) برای اتصالات C1، C2 و C3، جزئیات i، c، f و g، و برای اتصال نوع C4، جزئیات h، g، i و b قرار دارد. همچنین در گروه‌های ۵ تایی برای اتصالات C1، C2 و C3، جزئیات a، d، h، b و e و برای اتصال C4، جزئیات c، a، e، f و d جای گرفته است.

جدول ۸ : طبقه بندی انواع اتصالات مورد بررسی بر اساس آیین نامهٔ اروپایی EC3.

نوع اتصال	۷۵٪ فولاد عرضی آیین‌نامه‌ای (L)			فولاد عرضی آیین نامه‌ای (O)			۲ برابر فولاد عرضی آیین‌نامه‌ای (H)		
	$\bar{m}<1.0$	$1.0<\bar{m}<1.2$	$\bar{m}>1.2$	$\bar{m}<1.0$	$1.0<\bar{m}<1.2$	$\bar{m}>1.2$	$\bar{m}<1.0$	$1.0<\bar{m}<1.2$	$\bar{m}>1.2$
C1-B_1C_1*	SR-FS			R-FS				R-FS	R-FS
C1-B_1C_4		R-FS			R-FS				R-FS
C1-B_2C_1	SR-PS			SR-PS			R-FS		
C1-B_2C_4	SR-PS				SR-PS			R-FS	
C2-B_1C_1		SR-PS			R-FS				R-FS
C2-B_1C_4		R-FS				R-FS			R-FS
C2-B_2C_1	R-PS			R-PS				R-FS	
C2-B_2C_4	R-PS				R-FS			R-FS	
C3-B_1C_1	SR-FS				SR-FS			SR-FS	
C3-B_1C_4		SR-FS				SR-FS			R-FS
C3-B_2C_1	SR-PS			SR-PS			SR-FS		
C3-B_2C_4	SR-PS				R-FS			R-FS	
C4-B_1C_1	SR-PS			SR-PS				R-FS	
C4-B_1C_4	SR-PS				SR-FS			R-FS	
C4-B_2C_1	SR-PS			SR-PS			SR-FS		
C4-B_2C_4	SR-PS			SR-PS			SR-FS		

* *اتصال C1، با ۱٪ فولاد طولی تیر و ۱٪ فولاد طولی ستون*



شکل ۷ : نمونه‌هایی از طبقه بندی اتصالات الف) C1؛ ب) C2؛ ج) C3؛ و د) C4 بر اساس روش آیین نامهٔ EC3.

جمع بندی و نتیجه گیری

در بررسی‌هایی که برای مقایسهٔ رفتاری اتصالات بتن آرمه انجام شد، سه معیار لنگر مقاوم نهایی اتصال، دوران نهایی اتصال و همچنین میزان عملکرد اتصالات مورد توجه قرار گرفت. این بررسی‌ها نتایج زیر را نشان دادند:

۱- افزایش میزان فولاد طولی تیر از ۱ به ۲ درصد، بین ۴۰ تا ۶۰ درصد لنگر نهایی مقاوم را افزایش می‌دهد. بیشترین افزایش مربوط به اتصال نوع C1 و کمترین مقدار افزایش در مورد اتصال C4 مشاهده شد. همچنین با افزایش میزان فولاد طولی تیر از ۱٪ به ۲٪، مشاهده گردید که در حدود ۲۴ تا ۳۶ درصد از دوران اتصالات کاسته می‌شود که بیشترین کاهش مربوط به اتصال C2 و کمترین میزان کاهش مربوط به اتصال C4 بود. از طرفی افزایش فولاد طولی تیر منجر به کاهش میزان عملکرد اتصالات؛ به گونه‌ای که عملکرد اتصالات با فولاد طولی ۲ درصد کمتر از ۱۰۰ درصد بود.

۲- افزایش فولاد طولی ستون از ۱ به ۴ درصد تغییرات کمتری را در مقایسه با افزایش فولاد طولی تیر، در میزان لنگر و دوران نهایی اتصالات و همچنین میزان عملکرد آنها بوجود می‌آورد. افزایش فولاد طولی ستون از ۱٪ به ۴٪ در تصال C1 و C4 با میزان فولاد طولی تیر ۲ درصد، به ترتیب کمترین و بیشترین افزایش در لنگر نهایی اتصالات را داشته است. افزایش فولاد ستون بطور متوسط ۱۴ درصد از دوران اتصالات می‌کاهد.

۳- جهت مطالعهٔ چگونگی تأثیر آرایش فولادهای عرضی در رفتار اتصالات، ۹ جزئیات مختلف مورد بررسی قرار گرفت. ملاحظه گردید که آرایشهای مختلف فولاد عرضی ۸ تا ۱۴ درصد در لنگر نهایی و ۲۰ تا ۲۵ درصد در دوران نهایی اتصالات تغییر حاصل نموده است. جزئیات i کمترین تغییر را در لنگر و دوران نهایی اتصالات C1، C2 و C3 ایجاد کرده، در حالیکه در اتصال C4، جزئیات h کمترین تغییر را بوجود آورده است. همچنین به ترتیب جزئیات e و a بیشترین تغییر را در لنگر مقاوم نهایی و دوران نهایی اتصالات C1، C2 و C3 ایجاد نموده است. همچنین در مورد اتصال C4، جزئیات d و f به ترتیب بیشترین تأثیر را در لنگر مقاوم و دوران نهایی اتصالات بوجود آورده است.

۴- در این تحقیق از سه مقدار مختلف فولاد عرضی در نمونه‌های مورد مطالعه استفاده شد. این مقادیر به‌صورت میزان تراکم فولاد عرضی مطابق با توصیه‌های آیین نامه، و نیز دو برابر و ۷۵ درصد این مقدار در نظر گرفته شد. نتایج این بررسی نشان داد که افزایش میزان فولاد عرضی منجر به افزایش لنگر مقاوم و دوران نهایی اتصال می‌گردد؛ اگر چه این افزایش به‌صورت خطی متناسب با میزان افزایش تراکم فولاد عرضی نیست. همچنین تأثیر افزایش تراکم فولاد عرضی بیشترین تأثیر را در اتصال نوع C4 داشته است و موجب بهبود نسبی رفتار آن شده است. اتصال نوع C4 از ستون ضعیف و تیر قوی برخوددار بوده است.

۵- در این تحقیق با ایده گرفتن از آیین‌نامهٔ اروپایی EC3 ، اتصالات بتن آرمهٔ مورد بررسی به چهار دسته شامل اتصالات صلب-مقاوم، صلب-نیمه مقاوم، نیمه صلب-مقاوم و نیمه صلب-نیمه مقاوم طبقه‌بندی گردید. بررسی‌های انجام گرفته نشان داد که این طبقه بندی برای اتصالات بتن آرمه قابل کاربرد هستند؛ اگر چه این زمینه به تحقیقات به مراتب بیشتری نیاز دارد.

مراجع

1 - Ha, G. J., Kim, J. K. and Chung, L. (1992). "Response of reinforced concrete high- strength concrete beam–column joints under load reversals." *Magazine of Concrete Research*, Vol. 44, No. 160, PP. 175-184.

2 - Ehsani, M. R. and Wight, J. K. (1985). "Exterior reinforced concrete beam to column connections subjected to earthquake-type loading." *ACI Journal*, PP. 402-499.

3 - ACI–ASCE Committee 352, (1985). "Recommendations for design of beam–column joints in monolithic reinforced concrete structures." *ACI Journal*, Proceedings, Vol. 82, No. 3, PP. 266-283.

4 - ACI Building Code 318/318R-299, (2000). Chapter 21-Special Provision for Seismic Design.

5 - Ueda, I. L. and Hawkins N. M. (1986). "Beam bar anchorage in exterior column-beam connections." *ACI Journal*, PP. 927-936.

6 - Nilson, I. H. E. (1973). "Reinforced concrete corner and joints subjected to bending moment." *National Swedish for Building Research*.

7 - Kishi, N., Hasam, R., Chen, W. F. and Goto, Y. (1997). "Study of eurocode 3 steel connection classification." *Journal of Engineering Structures*, Vol. 119, No. 9, PP. 772-779.

8 - EUROCODE 3 Draft Version 5, November, (1990).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1-Hanson & Conner
2-Anchorage
3-Performance
4-Fully Restrained
5- Partially Restrained
6-Eurocode 3
7-Full Strength
8-Partial Strength
9-Efficient Rotational Capacity

پیوست ۱

جدول پ۱- میزان فولاد عرضی در نواحی مختلف اتصالات بر اساس محدودیتهای آیین نامهٔ ACI.

محل فولاد گذاری	ابعاد سطح مقطع (mm)	مساحت فولاد عرضی (mm^2)	فاصلهٔ بین فولادهای عرضی (mm)	درصد حجمی فولاد عرضی
ناحیهٔ متراکم تیر	300×300	78.5	62.5	1
	300×500	78.5	112.5	0.6
ناحیهٔ غیر متراکم تیر	300×300	78.5	125	0.5
	300×500	78.5	225	0.3
ناحیهٔ متراکم ستون	300×300	360	75	4
	500×500	437	96	2.1
ناحیهٔ غیر متراکم ستون	300×300	360	250	1.2
	500×500	437	250	0.8