



بررسی منحنی ممان-دوران اتصال تیر I شکل به ستون CFT به روش ریاضیاتی و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی

غلامرضا عبدالله زاده^۱، سخی یاپنگ غراوی^۲، سید مجتبی هاشمی^۳
(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۶/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۰۶)

چکیده

یکی از انواع اتصالات متداول پیچی، اتصال توسط ورق انتهایی می‌باشد. درک صحیح از رفتار سازه‌ای اتصالات و آگاهی مناسب از نحوه انتقال نیرو توسط آن و شناخت دقیق‌تر رفتار آنها جهت مدل‌سازی و تحلیل و همچنین نظارت دقیق بر اجرای آنها لازم و ضروری است. در این مطالعه روش اجزاء برای اتصال پیچی تیر I شکل به ستون CFT با ورق انتهایی مورد استفاده قرار گرفته است. سپس مقایسه‌ی نتایج رفتاری اتصال تیر به ستون با روش آزمایشگاهی، صحت مدل‌سازی نمونه‌های مدل‌سازی شده تحت بارگذاری مونوتونیک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که منحنی لنگر-دوران نمونه آزمایشگاهی و مدل ریاضیاتی در حد قابل قبولی به یکدیگر نزدیک می‌باشند و بنابراین می‌توان از این روش جهت پارامترسازی رفتار این نوع اتصال، با دقت مناسبی استفاده نمود.

کلمات کلیدی

اتصال پیچی ورق انتهایی، منحنی لنگر-دوران، مؤلفه‌ها، اتصال تیر به ستون CFT

Evaluation of the Moment-Rotation Curve of I Beam-to-CFT Column Connection using Mathematical Method and Compare with Experimental Results

G. Abdollahzadeh, S. Yapang Gharavi, M. Hashemi

ABSTRACT

One of the most common types of the bolted connections is the Endplate connection. Understanding of the structural behavior of connections and good knowledge of the power transmission by them and more accurate understanding their behavior for modeling and analysis and accurate monitoring on their implementation is necessary. In this study, component method is used for I beam-to-CFT column connection with end plate. Then, by comparing the results of behavior of the beam-to-column connection with experimental method, modeling accuracy of the modeled samples is investigated under monotonic loading. Analysis results shows that the moment - rotation curves of the experimental sample and mathematical model are reasonably close to each other and so we can use this method for the parameterization of this type of connection with reasonable accuracy.

KEYWORDS

Bolted endplate connection, Moment-rotation curve, Component method, Beam-to-CFT column connection

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بابل، abdollahzadeh@nit.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی بابل، s.gharavi@stu.nit.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله، دانشگاه صنعتی بابل، sm.hashemi@stu.nit.ac.ir



مدل سازی شده و مجموعه‌ی این فنرها به صورت سری یا موازی برای تعیین صلبیت اتصال مونتاژ می‌گردند. در این روش منحنی $M-\phi$ با استفاده از برنامه رایانه‌ای و یا نرم افزارهای اجزاء محدود به دست می‌آیند. مدل‌های مکانیکی، که از ترکیب فنرها و المان‌های صلب تشکیل شده‌اند، از نظر پیچیدگی محاسبه‌ای و اطمینان بین دو مدل‌سازی قبلی قرار می‌گیرند. به این دلیل، مدل‌سازی مکانیکی در این مطالعه به صورت قابل قبول برای تخمین پاسخ غیرخطی اتصال و برای محاسبه‌ی منحنی $M-\phi$ انتخاب شده است.

مزیت این روش، انعطاف‌پذیری آن در تطبیق با انواع مختلف اتصالات، با اصول یکسان می‌باشد. این روش در زمینه‌ی اتصالات سازه‌ای جایی که گونه‌های غیر مشابه و چندگانه در عمل استفاده می‌شود کاملاً مناسب است. در این موارد، مسئله‌ی تخمین پاسخ اتصال، به شناسایی مؤلفه‌های صحیح و سپس محاسبه‌ی پاسخ‌های منحصر بفرد تبدیل می‌شود. در این مطالعه اتصال پیچی تیر به ستون با ورق انتهایی برای اتصالات تیر I شکل به ستون CFT آزمایش می‌شود و نتایج با مدل پیشنهادی مقایسه شده است.

۲- مدل‌های مکانیکی

اصولاً منحنی لنگر خمشی-دوران را به روش‌های نظری یا تجربی تعیین می‌کنند. روش معمول برای تعیین منحنی $M-\phi$ انجام آزمایش بر روی اتصال می‌باشد. برای ترسیم منحنی‌های $M-\phi$ ، لنگرهای خمشی مستقیماً توسط بارگذاری استاتیکی نمونه‌ی آزمایش و زوایای دوران بر حسب انتقال تیر نسبت به عمق آن اندازه‌گیری می‌شوند. با توجه به وجود مشکلات در انجام آزمایشات تجربی بر روی نمونه‌ی اتصال، روش جالب توجه دیگری که اخیراً توسط آئین نامه‌های اروپایی برای تعیین میزان صلبیت اتصال پیشنهاد شده است به نام نگرش یا روش اجزاء یا مؤلفه‌ها^۱ موسوم است. در این روش هر یک از

منحنی ممان (M) در برابر دوران (ϕ) اتصالات سازه‌ای نشان دهنده‌ی ویژگی مهمی از پاسخ آنها است. چون اتصالات سازه‌ای در گذشته صلب‌تر یا مفصلی طراحی می‌شدند و بنابراین لزوم تخمین رفتار غیرخطی اتصالات خیلی با اهمیت نبود. روش‌های خوبی امروزه برای ارزیابی مقاومت و سختی اولیه‌ی اتصالات به وجود آمده است، ولی برای ویژگی‌های دیگر پاسخ آنها، از قبیل ظرفیت دورانی یا منحنی $(M-\phi)$ یک روش مناسب با سطح مشابه وجود ندارد. اگر این ویژگی‌ها می‌توانست بطور قابل اطمینانی تخمین زده شود، یک سری پیشرفت‌های قابل توجه در طراحی سازه‌ها به دست می‌آید. تعدادی پیشنهاد برای تخمین این ویژگی‌های پاسخ وجود دارد که می‌توان در مرجع [۱-۳] یافت.

برای تخمین پاسخ اتصال، جدای از تست آزمایشگاهی، سه روش مدل سازی قابل استفاده وجود دارد. روش اول استفاده از مدل‌های تحلیلی یا تجربی می‌باشد [۴-۶]، مدل‌های تحلیلی و تجربی معمولاً روابط تحلیلی ساده‌ای را برای محاسبه‌ی پاسخ، ترکیب می‌کنند و بنابراین آنها از مزیت سادگی استفاده می‌کنند اگر چه میزان اطمینان کاهش می‌یابد. روش دوم مدل‌های پیشرفته‌ی اجزاء محدود است [۷ و ۸]، در مقایسه، مدل‌های اجزاء محدود پیشرفته، برای شبیه‌سازی پیچیده‌ی پاسخ غیرخطی اتصالات می‌تواند خیلی مطمئن‌تر باشد اگر چه استفاده از آنها با توجه به هزینه‌ی زیادی که در بردارند و فرآیند آماده‌سازی پیچیده‌ای که لازم دارند برای اهداف طرح عملی محدود می‌باشد. مدل‌های اجزاء محدود تفصیلی قادر به نشان دادن سهم هر مؤلفه و همچنین اندرکنش پیچیده‌ی بین اجزاء هستند. با این حال روش‌های مدل سازی المان محدود، وقت‌گیر و دارای محاسبات فشرده هستند. روش سوم استفاده از مدل‌های مکانیکی می‌باشد [۲، ۳ و ۹-۱۱]. در این روش هر یک از مکانیزم‌های تغییر شکل در اتصال مشخص و صلبیت آنها به صورت منفرد با انجام آزمایش و یا توسط آئین نامه‌ها در هر جزء تعیین می‌شود. صلبیت هر یک از این اجزاء توسط فنرهای خطی و یا غیر خطی

¹ Component approach



مکانیزم‌های تغییر شکل در اتصال مشخص و صلبیت آنها به صورت منفرد با انجام آزمایش و یا توسط آئین نامه‌ها در هر جزء تعیین می‌شود. صلبیت هر یک از این اجزاء توسط فنرهای خطی و یا غیر خطی مدل سازی شده و مجموعه‌ی این فنرها به صورت سری یا موازی برای تعیین صلبیت اتصال مونتاژ می‌گردند. در این روش منحنی $M-\varphi$ با استفاده از برنامه رایانه‌ای و یا نرم افزارهای اجزاء محدود به دست می‌آیند.

مدل سازی مبتنی بر مؤلفه یک توافق بین مدل سازی کلی و مدل سازی اجزای محدود است. جهت تسلط بر پیش زمینه تئوریک محدود مدل‌های کلی، روش مبتنی بر مؤلفه متکی بر نمایش‌های تحلیلی منابع مستقل شکل پذیری (نبشی‌ها، چشمه اتصال و ...) که در پاسخ سراسری اتصال با اسمبل کردن سهم‌های مؤلفه‌ها رسیده است، می‌باشد. جهت افزایش دقت و مطابقت، این روش از ارتباط‌های ساختاری غیرخطی مؤلفه‌ها به جای المان‌های بسیار زیاد بهره می‌گیرد. در روش مبتنی بر مؤلفه‌ها، مدل سازی به صورت یک ماکرو المان با ترکیب میله‌های صلب و فنرهایی که نشان‌دهنده ارتباط سازنده‌ی مؤلفه‌هاست فراهم می‌شود. روش مبتنی بر مؤلفه از ترکیب المان‌های صلب و تغییر شکل پذیر (فنر) استفاده می‌کند که می‌تواند منبع تغییر شکل یک جزء منفرد را نشان دهد. مؤلفه‌ها، معمولاً بوسیله خواص هندسی و خواص مواد و مصالح، بصورت مکانیکی مدل شده‌ند. ضمیمه ی ز آئین نامه‌ی اروپا^۱ ۳ اولین آئین‌نامه برای وفق دادن مفهوم مؤلفه‌ها برای تعیین خواص طراحی اتصالات پیچی بود. اگرچه پیش‌بینی پاسخ پیچیده‌ی هیستریزس همچنان به عنوان یک چالش باقی مانده است، همه مدل‌های ریاضیاتی در قسمت‌هایی بر اساس مشخصات مکانیکی ایده‌آل سازی شده‌اند. ایده‌آل سازی ممکن است منجر به حذف برخی از جنبه‌های رفتار فیزیکی که ممکن است قابل توجه باشد در ارائه‌ی ریاضیاتی شود.

مدل سختی یوروکد ۳ و مدل ویناند^۲ به عنوان مدل‌های اصلی در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۱]. نامگذاری هر مؤلفه در جدول (۱) نشان داده شده است. مدل مورد بررسی نیز در شکل (۱) ارائه شده است. از آنجائی که مدل برای تخمین سختی اولیه‌ی اتصال استفاده می‌شود، برای هر کدام از مؤلفه‌های آن فقط مقدار سختی آن لازم است. اگر چه، مدل می‌تواند برای تخمین منحنی $M-\varphi$ کامل توسعه یابد، لازم است که برای هر مؤلفه، منحنی $F-\delta$ مناسبی موجود باشد [۱۲]. اختلاف مدل اتصال CFT با مدل‌های ارائه شده در [۱۳] در ناحیه فشاری می‌باشد که یک مؤلفه برای بتن تحت فشار اضافه می‌شود. این مدل برای اتصالات تیر I شکل به ستون CFT به کار برده شد. به دلیل وجود مؤلفه‌های لغزش و بیضوی شدن سوراخ پیچ و برخی موارد دیگر در بارگذاری‌های چرخه‌ای و پیچیدگی مدل سازی این مؤلفه‌ها در روش مبتنی بر مؤلفه در این مطالعه بارگذاری مونوتونیک مورد بررسی قرار گرفته است.

پاسخ اتصالات پیچی تیر به ستون می‌تواند با استفاده از اتصالات سپری که برای مدل سازی مؤلفه‌های ناحیه‌ی کششی آنها استفاده می‌شوند، توصیف شود [۱۱ و ۱۶-۱۴]. معمولاً این قبیل مؤلفه‌ها برای اتصالات با ورق انتهایی، ورق انتهایی و بال ستون در خمش هستند. شکل (۲) موقعیت این مؤلفه‌های کششی را در هندسه‌ی اتصال نمایش می‌دهد. معمولاً ارجح است که برای طراحی، این مؤلفه‌ها برای پاسخ اتصال بحرانی شوند، از آنجایی که می‌توانند سطوح بالایی از شکل پذیری را ارائه دهند [۱۷] و در نتیجه ظرفیت دورانی و اثر آن بر طراحی پلاستیک سازه را افزایش می‌دهند. در نتیجه، برای تخمین معتبر رفتار اتصال و منحنی $M-\varphi$ آن قابل اهمیت است. در این راستا، یک مدل برای تخمین منحنی نیرو (F) در برابر جابجایی (δ) اتصالات سپری توسعه داده شده است. مدل به صورت خلاصه در [۱۳] مطرح شده که شامل مبانی اساسی آن است. در این مطالعه از روابط ارائه شده در

² Waynand

¹ Eurocode 3



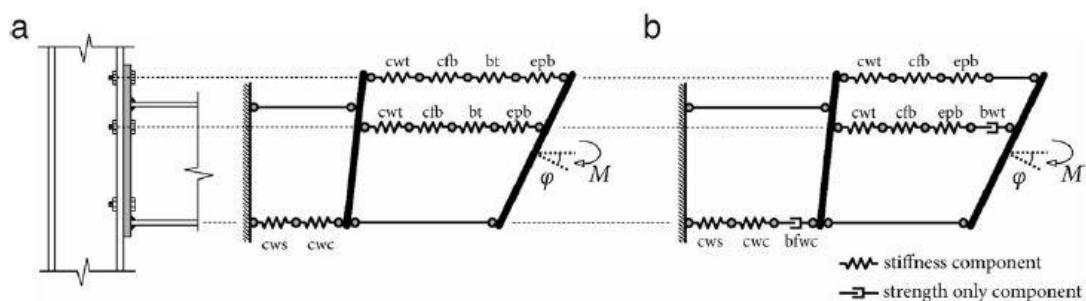
بعدي اندرکنش بال-پیچ و تغییر شکل برشی بال در نظر گرفته می‌شود. شکل (۳) مدل مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول (۱): نامگذاری مؤلفه‌های مختلف استفاده شده در

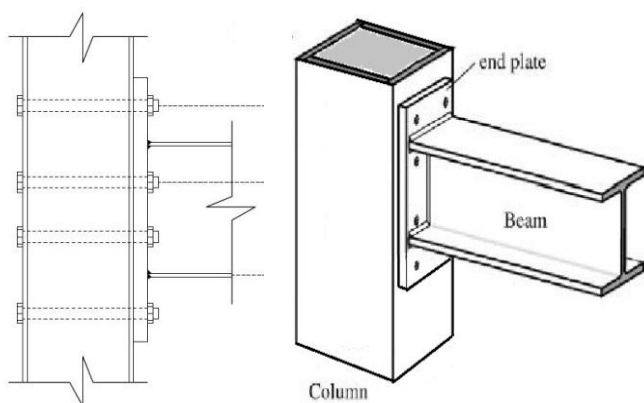
مدل‌های مکانیکی

مؤلفه‌ها	مخفف	مؤلفه‌ها	مخفف
جان ستون در برش	cws	پیچ‌ها در کشش	Bt
جان ستون در فشار	cwc	ورق انتهایی در خمش	Epb
بال/جان ستون در فشار	bfwc	جان تیر در کشش	Bwt
جان ستون در کشش	cwt	هسته بتنی در فشار	Cc
بال ستون در خمش	cfb		

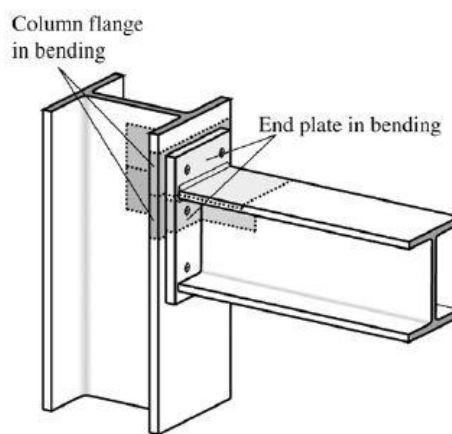
یوروکد ۳ [۱۱] استفاده شده است. برای براحتی قابل اجرا بودن اتصال در کارهای عملی از اتصال با پیچ‌های عبور کرده از درون ستون CFT استفاده شده است. زیرا استفاده از سخت‌کننده‌ها درون مقاطع تو خالی براحتی قابل اجرا نمی‌باشد. برای استفاده از مبانی یوروکد ۳، اتصال مطرح شده در این مطالعه که در آن پیچ‌های عبور کرده از عمق ستون به عنوان عامل پیوستگی در کشش در نظر گرفته می‌شوند و با استفاده از این سخت‌کننده‌ها از جداول موجود در یوروکد ۳ [۱۱] مؤلفه‌های سپری معادل محاسبه شده‌اند. جنبه‌های بیشتری از رفتار سپری با مدل مطرح شده [۱۳] شامل سختی افزایش یافته و مقاومت بال نزدیک جان از قبیل: عمل توزیع شده‌ی نیروی پیچ به بال از طریق سر پیچ، خمش میله‌ی پیچ، پیش تنیدگی پیچ، تأثیر سه



شکل (۱): (a) مدل سختی ویناند و همکارانش [۱۳] و یوروکد ۳ [۱۱] برای اتصال ورق انتهایی، (b) و توسعه یافته‌ی آن برای تخمین منحنی $M-\phi$ کامل



شکل (۳): اتصال تیر به ستون با ورق انتهایی



شکل (۲): مؤلفه‌های سپری در اتصال با ورق انتهایی

هدف اولیه‌ی مدل سپری شبیه‌سازی مؤلفه‌های سپری مناسب در ناحیه‌ی کشش اتصالات پیچی تیر به ستون



جدول (۲): مصالح مصرفی و مشخصات هندسی

پیچ	ورق انتهایی	ستون	تیر
8.8	PL 470x200x25	BOX 200x200x8	IPE 240
فاصله تال به عمود بر امتداد نیرو (mm)	فاصله تال به بالا و پائین در امتداد نیرو (mm)	فاصله افقی پیچ‌ها (mm)	فاصله پیچ‌ها تا بال تیر (mm)
۵۰	۵۰	۱۰۰	۶۵



شکل (۳): بارگذاری نمونه در آزمایشگاه

۴- ارزیابی از طریق نتایج آزمایشگاهی

عملکرد مدل‌های مکانیکی اتصالات تیر I شکل به ستون CFT برای اولین بار در این مطالعه در برابر نتایج آزمایشگاهی این اتصالات ارزیابی شده است. برای اتصالات ورق انتهایی آزمایش با بارگذاری مونوتونیک در آزمایشگاه انجام شده است. برای آماده‌سازی مدل‌های مکانیکی، یک برنامه ویژه توسعه یافت که به طور اتوماتیک

می‌باشد. در روش مؤلفه‌ها، مؤلفه‌های انفرادی متنوعی از اتصال گردآوری می‌شوند تا مدل مکانیکی را تشکیل دهند. هر عضو به وسیله‌ی یک فنر کششی نمایش داده می‌شود که می‌تواند به فنرهای دیگر یا المان‌های صلب متصل شود. به این جهت که بهتر بتواند منابع تغییر شکل و انتقال نیروهایی را که در اتصال واقعی رخ می‌دهد، تولید کند. انتخاب مؤلفه‌ها و روشی که آنها با هم اتصال داده می‌شوند فاکتورهای مهمی برای اعتبار هر مدل مکانیکی و توانایی آن برای شبیه‌سازی شکل‌پذیری و انتقال نیرو هستند. هدف اصلی مدل‌سازی، محاسبه‌ی منحنی $M-\phi$ اتصال یا ویژگی‌های توصیفی مقاومت، سختی دورانی اولیه و ظرفیت دورانی می‌باشد. مدل‌های مکانیکی متنوعی در گذشته برای اتصالات پیشنهاد شده است [۲، ۳ و ۹-۱۱]. در مدل پیشنهادی اختلاف مدل اتصال CFT با مدل ارائه شده در ناحیه فشاری می‌باشد که یک مؤلفه برای بتن، تحت فشار اضافه می‌شود. این مدل برای نمونه مورد مطالعه بررسی و نتایج با مشاهدات آزمایشگاهی مقایسه شدند.

۳- ارزیابی آزمایشگاهی

برای اعتبارسنجی نتایج مدل پیشنهادی یک مدل آزمایشگاهی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. روش معمول برای تعیین منحنی $M-\phi$ انجام آزمایش بر روی اتصال می‌باشد. برای ترسیم منحنی‌های $M-\phi$ ، لنگرهای خمشی مستقیماً توسط بارگذاری استاتیکی نمونه‌ی آزمایش و زوایای دوران بر حسب انتقال تیر نسبت به عمق آن اندازه‌گیری می‌شوند. برای انجام آزمایش ابتدا مقاطع تهیه و سپس جوشکاری‌ها، سوراخ‌کاری‌ها و مونتاژ نهایی در کارگاه انجام شد. به دلیل عدم اطمینان جوشکاری در کارگاه، جوش‌های مورد نیاز در کارخانه انجام گرفت. نوع مصالح مصرفی و مشخصات هندسی اتصال در جدول (۲) ارائه شده است. بتن با مقاومت پائین ۱۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع برای پر کردن مقطع قوطی استفاده شده است. نمونه‌ی اتصال و نحوه‌ی بارگذاری و راه اندازی آن در شکل (۴) نشان داده شده است.

مدل، رفتار سازگار، دستیابی نسبی به مقادیر کم خطای متوسط و انحراف استاندارد را نشان می‌دهد. عملکرد مدل‌های مکانیکی اجزای یک پیش‌بینی رضایت‌بخش از منحنی $M-\varphi$ واقعی را می‌دهد. دلیل اختلافات موجود باید وجود نقص‌ها، عدم تناسب و تنش‌های پسماند از راه اندازی آزمایش باشد، که نمی‌توان به راحتی در مدل‌های محاسباتی وارد کرد. تأثیر این عوامل می‌تواند در مقادیر سختی اولیه بسیار زیاد باشد [V]. مدل مکانیکی و به ویژه مدل سپری که برای "مؤلفه‌های ورق انتهایی در خمش" استفاده می‌شود، اثرات غشائی را نادیده می‌گیرند و بنابراین نمی‌تواند منحنی واقعی را در مقیاس کامل نتیجه دهد [V].

۵- نتیجه گیری

یک روش برای برآورد منحنی $M-\varphi$ از اتصالات پیچی تیر به ستون در این مطالعه پیشنهاد شد. برای این هدف مدل مکانیکی که شامل مؤلفه‌های اتصال با منحنی $F-\delta$ آنها استفاده شدند. تمرکز ویژه بر روی شبیه سازی مؤلفه‌های سپری ناحیه کششی قرار گرفت. از بررسی مدل پیشنهادی در برابر مشاهده‌ی آزمایشگاهی رفتار رضایت بخش و سازگار مشخص شد. منحنی $M-\varphi$ همچنین مقادیر سختی اولیه، مقاومت نهایی و ظرفیت دورانی به طور موفقیت آمیزی با یک محدوده‌ی خطای قابل قبول پیش بینی شدند. نتایج ظرفیت دورانی رضایت بخش در نظر گرفته می‌شوند.

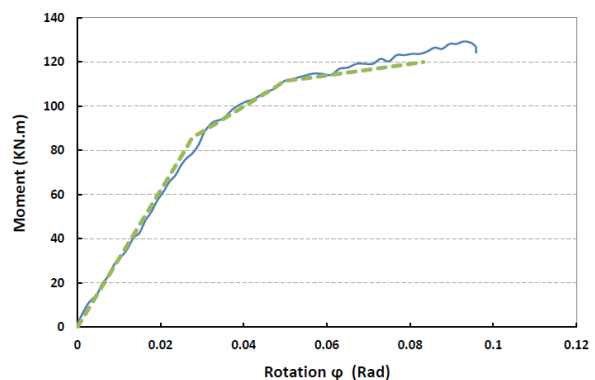
روش پیشنهاد شده را می‌توان برای انواع اتصالات تیر به ستون تنظیم کرد، به شرطی که مدل‌های مکانیکی مؤلفه‌های مناسب با پاسخ غیر خطی آنها در دسترس باشند. در این مطالعه اتصالات با ورق انتهایی برای مقطع ستون CFT بررسی شدند.

۵- مراجع

[1] Shi, Y.J., Chan, S.L. and Wong, Y.L. (1996), "Modeling for Moment-Rotation Characteristics for End-Plate Connections", Journal of Structural Engineering ASCE, Vol.122, No. 11, pp. 1300-1306.

یک مدل با فنر و المان‌های صلب مناسب تولید می‌کند. مدل نهایی حل شد و منحنی $M-\varphi$ اتصال از نتایج استخراج شد. بسته‌ی نرم‌افزاری MATLAB برای تجزیه و تحلیل مورد استفاده قرار گرفت.

برای فنرهای ناحیه‌ی کششی، متناظر با مؤلفه‌های سپری، منحنی $F-\delta$ با استفاده از مدل سپری توسعه یافته که در بخش ۲ به طور خلاصه شرح داده شده است، محاسبه شد. همه‌ی داده‌های هندسی مورد نیاز برای محاسبات به طور مستقیم از خواص هندسی اتصال بدست می‌آید به جز پهنای سپری معادل که با توجه به مفاد یوروکد ۳ [۱۱] تخمین زده شده است. فنرهای متناظر با اجزاء غیر سپری نیز شامل منحنی‌های $F-\delta$ مربوطه‌ی خود، در مدل‌های مکانیکی تحت ارزیابی قرار می‌گیرند. پاسخ الاستیک برای همه‌ی مؤلفه‌های سختی غیر سپری با استفاده از روابط یوروکد ۳ [۱۱] برای محاسبه‌ی سختی اولیه و مقاومت آنها محاسبه شد. بررسی عمیق در مورد پاسخ کامل هر مؤلفه از محدوده‌ی این مطالعه خارج است. در شکل (۵) منحنی $M-\varphi$ برای آزمایش مونوتونیک انجام شده و مدل مکانیکی پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل (۵): منحنی ممان-دوران ($M-\varphi$) برای آزمایش مونوتونیک و مدل مکانیکی

به طور کلی مدل‌های مکانیکی در پیش‌بینی منحنی‌های $M-\varphi$ کامل، قابل اعتماد ظاهر می‌شوند و قادر به برآورد سختی اولیه، مقاومت و حتی ظرفیت دورانی اتصالات به طور مؤثر هستند. مدل پیشنهادی ثابت می‌کند که عملکرد آن کاملاً رضایت‌بخش است. برای ویژگی ظرفیت دورانی،



- [17] Kuhlmann, U. and Kuhnemund, F. (2000), "Procedures to Verify Rotation Capacity", In: Ivanyi M, Baniotopoulos CC, Editors. Semi-rigid joints in structural steel-work. CISM courses and lectures, Vol. 419. Wien (New York): Springer-Verlag.
- [2] Silva, L.S. and Coelho, A.M.G. (2001), "A Ductility Model for Steel Connections", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 57, No. 1, pp. 45-70.
- [3] Coelho, A.M.G. and Silva, L.S. (2005), "Ductility Analysis of End Plate Beam-to-Column Joints", In: Hoffmeister B, Hechler O, Editors. Eurosteel, 4th European conference on steel and composite structures.
- [4] Frye, M.J. and Morris, G.A. (1975), "Analysis of Flexibly Connected Steel Frames", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 2, pp. 280-291.
- [5] Krishnamurthy, N., Huang, H., Jeffrey, P.K. and Avery, L.K. (1979), "Analytical M- θ Curves for End-Plate Connections", Journal of the Structural Division ASCE, Vol. 105, No. 1, pp. 133-145.
- [6] Wu, F.H. and Chen, W.F. (1990), "A Design Model for Semi-rigid Connections", Engineering Structures, Vol. 12, pp. 88-97.
- [7] Krishnamurthy, N. and Graddy, D.E. (1976), "Correlation Between 2- and 3-Dimensional Finite Element Analysis of Steel Bolted End-Plate Connections", Computers and Structures, Vol. 6, No. 4-5, pp. 381-389.
- [8] Bursi, O.S. and Jaspart, J.P. (1997), "Calibration of a Finite Element Model for Isolated Bolted End-Plate Steel Connections", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 44, No. 3, pp. 225-262.
- [9] Weynand, K., Jaspart, J.P. and Steenhuis, M. (1995), "The Stiffness Model of Revised Annex J of Eurocode 3", In: Bjorhovde R, Colson A, Zandonini R, Editors. Connections in steel structures III- Proceedings of the 3rd international workshop on connections in steel structures.
- [10] Huber, G. and Tschemmerneegg, F. (1998), "Modeling of Beam-to-Column Joints", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 45, No. 2, pp. 199-216.
- [11] Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-8: Design of joints (2003), BS EN 1993-1-8:2003.
- [12] Del Savio, A.A., Nethercot, D.A., Vellasco, P.C.G.S., Andradec, S.A.L. and Martha, L.F. (2009), "Generalised Component-Based Model for Beam-to-Column Connections Including Axial Versus Moment Interaction", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, No. 8-9, pp. 1876-1895.
- [13] Lemonis, M.E. and Gantes, C.J. (2009), "Mechanical Modeling of the Nonlinear Response of Beam-to-Column Joints", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, No. 4, pp. 879-890.
- [14] Zoetemeijer, P. (1974), "A Design Method for the Tension Side of Statically Loaded, Bolted Beam-to-Column Connections", Heron, Vol. 20, No. 1, pp. 1-59.
- [15] Packer, J.A. and Morris, L.J. (1979), "A Limit State Design Method for the Tension Region of Bolted Beam Column Connections", The Structural Engineer, Vol. 55, No. 10, pp. 446-458.
- [16] Mann, A.P. and Morris, L.J. (1979), "Limit Design of Extended End-Plate Connections", Journal of the Structural Division ASCE, Vol. 105, No. 3, pp. 511-526.