

بررسی تحلیلی رفتار لرزه‌ای تأثیر انواع چیدمان ورق‌های پیوستگی اتصال گیردار تیر به

ستون‌های فلزی پر شده با بتن*

(یادداشت پژوهشی)

امید رضایی فر^(۱) سید حسن یوسفی^(۲) عادل یونسی^(۳) مجید قلهکی^(۴)

چکیده استفاده از ورق‌های پیوستگی در تراز بال‌های کششی و فشاری تیر در داخل ستون جهت تأمین معیارهای سختی و مقاومت طبق ضوابط آئین‌نامه ۲۸۰۰ و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان می‌باشد. از آنجا که در ستون‌های قوطی به علت بسته بودن مقطع، عدم دید کافی و زاویه دید نامناسب، اجرای ورق‌های پیوستگی در داخل ستون مشکلات زیادی را به همراه دارد، ورق‌های پیوستگی از داخل ستون قوطی شکل حذف گردیده‌اند و صلبیت اتصال توسط سخت‌کننده‌هایی که از بیرون به اتصال جوش می‌شوند و اجرای آنها به هم‌راستب ساده‌تر از ورق‌های پیوستگی است، تأمین می‌شود. برای این منظور مدل‌های اتصال فاقد ورق پیوستگی، اتصال با ورق پیوستگی، اتصال با سخت‌کننده‌های خارجی دوزنقه‌ای شکل، اتصال با سخت‌کننده‌های داخلی شامل شبکه‌های آرماتور افقی و اتصال جدید پیشنهادی که شامل سخت‌کننده‌های خارجی، بتن و شبکه‌های آرماتور افقی می‌باشد توسط نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی و آنالیز شده است. نمودار بار-تغییر مکان مدل‌ها براساس تحلیل‌های مونوتونیک و سیکلیک رسم شده و از روی آنها صلبیت (درصد گیرداری)، مقاومت (ظرفیت نهایی)، شکل‌پذیری، میزان جذب انرژی و همچنین محل تشکیل مفاصل پلاستیک در هر اتصال تعیین گردیده است. از نتایج آنالیزها مشخص است که اتصال جدید پیشنهادی با کسب گیرداری ۹۶/۱۸ درصد، شکل‌پذیری ۷/۰۴، مقاومت نهایی ۸۹/۴۵ تن و انتقال مفصل پلاستیک به ناحیه‌ای دور از اتصال، معیارهای اتصالات صلب را به خوبی برآورده کرده و جایگزین مناسبی برای ورق‌های پیوستگی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی ستون قوطی شکل پر شده با بتن، اتصال صلب، ورق پیوستگی، سخت‌کننده خارجی، چشمه اتصال.

Analytical Study of Seismic Behavior Types of the Arrangement Effect on the Continuity Plates in Rigid Connection Between beam to Concrete Filled Steel Tube (CFST) Columns

O.Rezaifar

S.H.Yousefi

A.Yoonesi

M.Gholhaki

Abstract Using continuity plates in the balance of the tensile and compressive beam's flanges in the box column is for satisfying stiffness and strength criteria according to terms of the 2800 code and the tenth issue of national building regulations. Since in box columns due to section closure, lack of vision and inappropriate viewing angles performance of the continuity plates inside the column has many problems, continuity plates removed from the box column and rigidity of connection provide by stiffeners from outside welded the joint and their Installation is more simple than continuity plates. For this purpose connectivity models without continuity plates, connection with continuity plates, connection with trapezoidal external stiffener, connection with internal stiffener including networks of horizontal bar and the proposed new connection which includes of the external stiffeners, concrete and networks of horizontal bar by ANSYS software modeling and analyzed. Graph of force – displacement of models is drawn based on monotonic and cyclic analyzes and on their have been determined rigidity, strength, ductility, energy dissipation as well as the location of plastic hinges in every connection. The analysis determined that the proposed new connection with the acquisition of rigidity 96.18, ductility 7.04, ultimate strength 89.45 ton and transferred the plastic hinge into the area far from connection, therefore it is a good alternative for continuity plates.

Key words Ox Column Filled With concrete, Rigid Connection, Continuity Plate, External Stiffener, Panel Zone.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۵/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۱۱/۵ می‌باشد.

Email : Orezayfar@semnan.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

(۲) کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

(۳) دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

(۴) دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

مقدمه

برای طراحی یک سازه فولادی که از مجموعه‌ای از تیرها و ستون‌های متصل به هم در محل اتصال تشکیل شده، باید علاوه بر طراحی درست تیرها و ستون‌ها طوری عمل کرد که سیستم به صورت یکپارچه عمل کند. برای یکپارچه عمل کردن سیستم استفاده از اتصالات مناسب ضروری به نظر می‌رسد. کارآمد بودن یک اتصال را فاکتورهای مختلفی تعیین می‌کنند که سختی و مقاومت دو فاکتور مهم می‌باشند. در سازه‌های فولادی زمانی که تعداد طبقات زیاد و یا دهانه‌ها بزرگ‌تر می‌شوند، لازم است که از ستون‌هایی با ممان اینرسی بالا استفاده شود. در ایران مقاطع نوردشده استاندارد عملاً پاسخگوی این نیاز نیستند و لذا استفاده از مقاطع ساخته‌شده از ورق ضروری به نظر می‌رسد. ستون‌های قوطی به لحاظ این که در دو جهت دارای ممان اینرسی بالایی می‌باشند برای تحمل خمش مناسب به نظر می‌رسند؛ لیکن ستون‌های قوطی دارای مشکلاتی در زمینه اجرا می‌باشند. یکی از این مشکلات، تأمین صلبیت اتصالات تیر به این گونه ستون‌هاست که باید توسط سخت‌کننده‌ها تأمین شود. صلبیت یک اتصال تحت تأثیر صلبیت تکیه‌گاه‌های آن قرار دارد. در یک اتصال صلب تیر به ستون قوطی، در صورت نازک بودن بال ستون در غیاب سخت‌کننده در اثر انتقال نیروی کششی از بال تیر به بال ستون، تغییر شکل غیریکنواختی به وجود می‌آید که این تغییر شکل‌ها باعث می‌شود توزیع تنش در طول جوش از حالت یکنواخت خارج می‌شود و تمرکز تنش بالایی به وجود آید. سخت‌کننده این توزیع تنش را به حالت یکنواخت نزدیک می‌کند و صلبیت اتصال را تأمین می‌کند.

شانموگام و همکاران [1-7]، مطالعات مدون و منسجمی در این زمینه انجام داده‌اند. در مطالعات این تیم تحقیقاتی، سخت‌کننده‌های خارجی نبشی، ورق مثلثی، سخت‌کننده T شکل و همچنین ورق پیوستگی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. هدف از انجام این مطالعات، پیدا کردن سخت‌کننده خارجی مناسب به عنوان جایگزین

ورق پیوستگی داخلی بوده است، که بتواند فاکتورهای اساسی یک اتصال صلب و کارآمد را برآورده کند. از مطالعات این تیم تحقیقاتی نتیجه شده است که اتصال با سخت‌کننده T شکل بهترین عملکرد را در بین سایر اتصالات به خود اختصاص داده است و جایگزین بسیار مناسبی برای اتصال با ورق پیوستگی داخلی می‌باشد. مالک و حاجی فتحعلی [۸] بر روی عملکرد اتصال تیر I شکل به ستون قوطی در حالت‌های مختلف در حضور و عدم حضور ورق‌های پیوستگی با و بدون بتن پرکننده و همچنین استفاده از ورق‌های مثلثی پیرامونی با و بدون جوش این ورق‌ها به گوشه ستون‌ها در انواع مختلفی از سخت‌کننده‌ها مطالعاتی انجام داده‌اند. در حیطه مطالعات انجام‌شده توسط آنها نتایجی به شرح زیر حاصل شده است:

در اتصال با ورق‌های مثلثی پیرامونی سختی و شاخص گیرداری قابل ملاحظه‌ای (۹۱ درصد) ارائه گردیده است و در صورت استفاده از بتن داخل ستون در چنین اتصالی، شاخص گیرداری اتصال به میزان اندکی افزایش می‌یابد و به میزان ۹۳/۴ درصد می‌رسد. ویژگی‌های هندسی اتصال دارای ورق مثلثی پیرامونی منجر به ایجاد قابلیت تشکیل مفصل پلاستیک در تیر و موقعیت انتهای ورق‌های اتصال به فاصله مکفی و کنترل‌شده از بر ستون شده است و همچنین اتصال تضعیف‌شده استخوانی در تیر منجر به دورتر شدن موقعیت مفصل پلاستیک تیر از بر ستون می‌شود که ایده تیر ضعیف ستون قوی را تأمین می‌کند. زاهدی و سفیدگران [۹] به بررسی استفاده از سخت‌کننده‌های بیرونی به عنوان جایگزینی برای ورق‌های پیوستگی داخلی در اتصالات صلب تیر I به ستون قوطی پرداخته‌اند. برای مطالعه، اتصالات با انواع مختلف سخت‌کننده از جمله ورق‌های پیوستگی داخلی، سخت‌کننده‌های مثلثی، سخت‌کننده‌های نبشی و سخت‌کننده T مورد آنالیز قرار گرفته‌اند. نتایج آنالیزها نشان می‌دهد به جز ورق

از داخل ستون حذف می‌شوند و سخت‌کننده‌های خارجی ذوزنقه‌ای شکل که از بیرون در تراز بال‌های تیر به ستون متصل می‌شوند و همچنین شبکه‌های آرماتور افقی که در داخل ستون در نواحی چشمه اتصال قرار می‌گیرند، جایگزین می‌شوند و همچنین اتصال جدید پیشنهادی که شامل سخت‌کننده‌های خارجی ذوزنقه‌ای شکل به همراه شبکه‌های آرماتور افقی و بتن پر-کننده داخل ستون می‌باشد مدل‌سازی و آنالیز شده است. پس از آنالیز اتصالات، نمودار بار-تغییر مکان هر اتصال رسم شده و از روی آن سختی و مقاومت هر اتصال تعیین گردیده و مشخص شده است که کدام یک از اتصالات می‌توانند فاکتورهای لازم برای یک اتصال صلب را تأمین کند و جایگزین مناسبی برای ورق‌های پیوستگی داخلی شوند.

معرفی مدل‌ها

در این مقاله به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال تیر به ستون قوطی شکل پر شده با بتن ۷ مدل ارائه و بررسی شده است. مقطع تمامی تیرهای اتصالی به صورت I شکل و با مقطعی مطابق شکل (۱) می‌باشد. چشمه اتصال با استفاده از انواع سخت‌کننده خارجی و داخلی تقویت شده است که جزئیات این اتصالات در جدول (۱) و شکل (۱) ارائه شده است.

تحلیل عددی و تطبیق آزمایشگاهی

مشخصات مصالح و مدل. در مدل‌های مورد نظر مصالح موجود فولاد و بتن می‌باشد. فولاد دارای منحنی تنش- کرنش الاستوپلاستیک است. با توجه به این که تحلیل غیرخطی مصالح مورد نظر می‌باشد، مدل‌سازی رفتار بعد از تسلیم نیز لازم است. در برنامه ANSYS برای مدل‌کردن رفتار فولاد از انواع منحنی‌های الاستوپلاستیک می‌توان استفاده کرد. در این تحقیق برای مدل‌کردن رفتار فولاد از منحنی دوخطه الاستوپلاستیک نشان داده شده در شکل (۱) استفاده شده است. فولاد انتخاب شده از نوع معمول فولاد مورد استفاده در ایران یعنی ST37 می‌باشد.

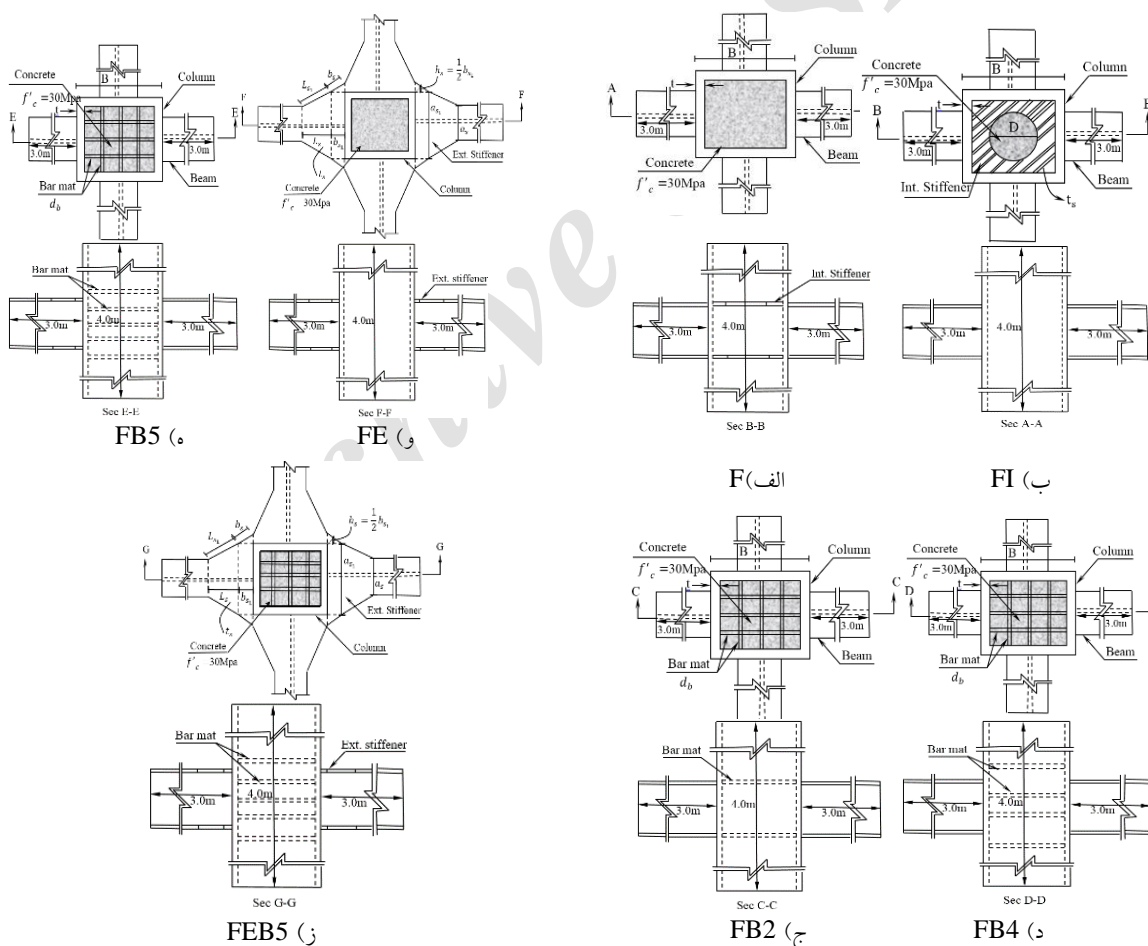
پیوستگی که اجرای آن در داخل ستون با مشکلاتی همراه است. سخت‌کننده T شکل در هر دو مشخصه سختی و مقاومت اتصال، عملکرد بهتری نسبت به سایر سخت-کننده‌ها داشته است. از دیگر مطالعات انجام گرفته بر روی اتصال تیرهای I شکل به ستون قوطی برای مناطق لرزه خیز می‌توان به مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام شده توسط گوسوامی و مورتی [10] اشاره نمود. در این مطالعات برای تقویت اتصال از ورق‌های لچکی مورب بر روی بال‌های فوقانی و تحتانی تیر استفاده شده است و رفتار اتصال پیشنهادی با اتصالات معمول مقایسه گردیده است. علاوه بر این مطالعات وسیع عددی و آزمایشگاهی بر روی اتصال تیرهای قوی با استفاده از ناودانی‌های متصل بر روی بال‌های فوقانی و تحتانی تیر توسط کامر و رائو [11 و 12] انجام گرفته است.

اهمیت انجام تحقیق

در تحقیق حاضر به بررسی و ارائه اتصال جدید در سازه‌های فولادی با شکل پذیری ویژه و مقایسه بین حالتی که تیر I و ستون قوطی شکل پر شده با بتن بدون هیچ‌گونه ورق پیوستگی، با ورق پیوستگی داخلی، با سخت‌کننده‌های خارجی ذوزنقه‌ای شکل در تراز بال‌های فوقانی و تحتانی تیرهای اطراف ستون و حالتی که از شبکه‌های آرماتور افقی به عنوان سخت‌کننده داخلی استفاده شده، پرداخته شده است. برای مدل‌کردن اتصال و استخراج منحنی بار-تغییر مکان از نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است. برای نزدیک‌بودن رفتار مدل به واقعیت، از تحلیل غیرخطی استفاده شده و برای فولاد از منحنی تنش-کرنش دوخطه الاستوپلاستیک استفاده شده است. از آنجایی که در ستون‌های CFST، فولاد اثر محصورکنندگی روی بتن دارد، در فرایند مدل‌سازی لحاظ شده است. روند انجام این تحقیق و آنالیز مدل‌ها بدین ترتیب بوده است که ابتدا یک اتصال با ورق‌های پیوستگی داخلی به عنوان سخت‌کننده توسط نرم‌افزار ANSYS مدل و تحلیل شده است و نمودار بار-تغییر مکان این مدل رسم شده است. در ادامه، این ورق‌ها

جدول ۱ جزئیات مدل‌ها (واحدها بر حسب Cm)

مدل		F	FI	FB2	FB4	FB5	FE	FEB5
ستون H=400	Bxt	450x25	450x25	450x 25	450x 25	450x25	450x25	450x 25
تیر L=645	brxtf	200x15	200x15	200x15	200x 15	200x15	200x 15	200x 15
	hxtw	400x8	400x8	400x8	400x8	400x8	400x8	400x8
	d	430	430	430	430	430	430	430
شبکه		-	-	*	*	*	-	*
آرماتور	db	-	-	25	25	25	-	25
سخت‌کننده داخلی	ts	-	*	-	-	-	-	-
	axb	-	400x 400	-	-	-	-	-
	D	-	210	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	*	*
سخت‌کننده خارجی	ts	-	-	-	-	-	15	15
	bs	-	-	-	-	-	212	212
	bs1	-	-	-	-	-	150	150
	ls	-	-	-	-	-	500	500
	ls1	-	-	-	-	-	515.4	515.4
	as	-	-	-	-	-	200	200
	as1	-	-	-	-	-	450	450

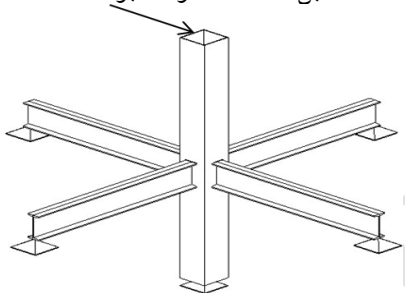


شکل ۱ جزئیات مدل‌ها

جدول ۲ مشخصات مصالح مصرفی

مصالح	F_y (MPa)	F_u (MPa)	F'_c (MPa)	E (MPa)	ν	γ ($\frac{kN}{m^3}$)
فولاد	240	370	-	2×10^5	0.3	78.55
بتن	-	-	30	0.27×10^5	0.2	24.00

هر کدام از تیرها و پای ستون روی تکیه‌گاه مفصلی قرار دارد. برای جلوگیری از تمرکز تنش در انتهای هر کدام از تیرها و پای ستون تمامی گره‌ها به هم کوپل می‌شوند تا یکپارچه عمل کنند. شرایط مرزی در این تحقیق به گونه‌ای است که تمامی درجات آزادی انتقالی در انتهای تیرها و پای ستون مقید شده‌اند و اعمال بار به صورت اعمال نیرو و تغییر مکان افقی در بالای ستون می‌باشد. با تعریف کردن Sub step برای بارگذاری، تغییر مکان‌ها به صورت تدریجی به سازه اعمال می‌شود و نتایج نیز در هر Sub step قابل مشاهده خواهد بود.



شکل ۳ شمای کلی اتصال و نحوه اعمال بار به آن

بارگذاری مدل‌ها. تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق بر سه نوع استوار است که عبارتند از: (۱) آنالیز استاتیکی تک‌آهنگ که به صورت افزایشی است، (۲) آنالیز هیستریزس که به صورت رفت و برگشتی است و (۳) آنالیز مودال. اساس تحلیل تک‌آهنگ به صورت کنترل بار است و اساس تحلیل هیستریزس به صورت کنترل تغییر مکان می‌باشد. نمودار تاریخچه زمانی بارگذاری در این تحقیق بر اساس الگوی بارگذاری SAC97 [۱۳] می‌باشد که در شکل (۴) نشان داده شده است.

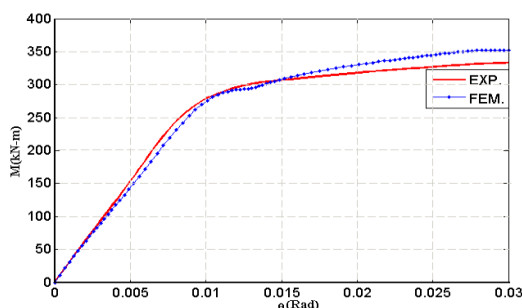
برای مصالح بتنی با توجه به این که بتن داخل ستون در عمل به بتن محصور شده تبدیل می‌شود، در اینجا تلاش شده است که این موضوع در انتخاب ضوابط و منحنی رفتاری تنش - کرنش بتن نیز لحاظ گردد و همچنین با توجه به این که مصالح به کار گرفته شده فولاد می‌باشد، معیار تسلیم، فون مایسز انتخاب شده است. قانون سخت‌شوندگی نیز ایزوتروپیک انتخاب شده است.



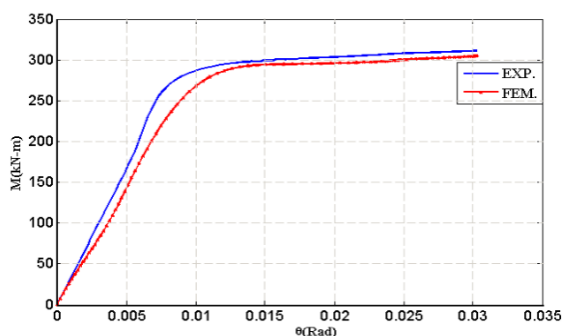
شکل ۲ منحنی الاستوپلاستیک فولاد

برای مدل کردن فولاد از المان‌های مختلفی از جمله SHELL, SOLID می‌توان استفاده کرد. در این تحقیق از المان پوسته‌ای سه‌بعدی چهارگره‌ی SHELL181 استفاده شده است. این المان اثرات هر دو تغییر شکل خمشی و غشایی را به خوبی در نظر می‌گیرد. المان دارای ۶ درجه آزادی در هر گره می‌باشد که شامل ۳ درجه آزادی انتقالی U_x , U_y و U_z در امتداد سه محور مختصات و ۳ درجه آزادی دورانی ROT_x , ROT_y , ROT_z حول سه محور مختصات می‌باشد. این المان قابلیت مدل‌سازی اجزای با ضخامت متغیر را نیز دارا می‌باشد. ضخامت‌ها در گره‌های المان تعریف می‌شوند و بین هر دو گره ضخامت به صورت خطی تغییر می‌کند.

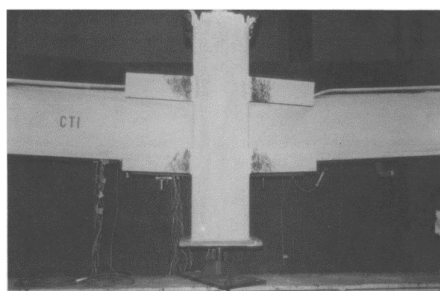
شرایط مرزی. مدل به کار رفته به این صورت است که چهار تیر هر کدام به طول ۳ متر از چهار طرف به یک ستون قوطی به طول ۴ متر متصل می‌شوند. انتهای



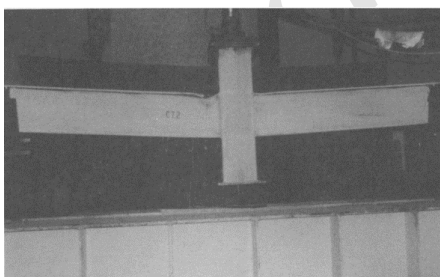
شکل ۵ منحنی ممان- دوران نمونه با سخت‌کننده خارجی T



شکل ۶ منحنی ممان- دوران نمونه با ورق پیوستگی



(الف)



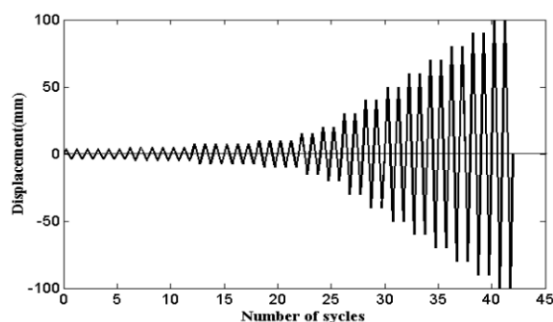
(ب)

شکل ۷ انجام آزمایش، الف) سخت‌کننده T، ب) ورق

پیوستگی [4]

بررسی نتایج تحلیل

در این بخش پس از انجام آنالیزهای استاتیکی تک‌آهنگ، رفت و برگشتی، آنالیز مودال و حصول نتایج این آنالیزها،



شکل ۸ نمودار تاریخچه زمانی بارگذاری SAC97 [۱۳]

صحت‌سنجی تحلیلی مدل

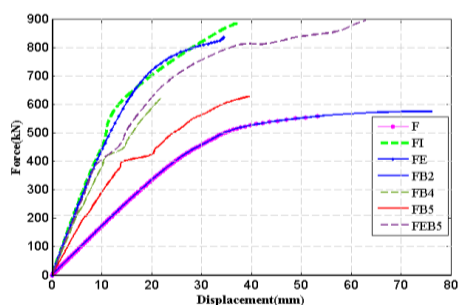
علی‌رغم این‌که مطالعات آزمایشگاهی دارای دقت و اعتبار بالایی می‌باشند ولی با توجه به این‌که هزینه‌بر و زمانبر هستند و نیاز به امکانات و تجهیزات خاص دارند کمتر مورد توجه محققان قرار می‌گیرند. بر همین اساس استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود برای مطالعه مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به این‌که هدف از مدل‌سازی در نرم‌افزار به دست آوردن رفتار واقعی سازه با تقریب قابل قبول می‌باشد، عوامل مختلفی مانند نوع المان، اندازه مش، شرایط تکیه‌گاهی، نوع رفتار مصالح و... روی رفتار نهایی مدل تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین انتخاب صحیح موارد ذکر شده سبب افزایش دقت حل می‌شود. به منظور بررسی و تأیید صحت کار مدل‌سازی با نرم‌افزار ANSYS، باید نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی معتبر سنجیده شود.

در این تحقیق برای تأیید مدل‌سازی از دو نمونه آزمایشگاهی ارائه شده توسط شانموگام و همکاران [1,4] استفاده شده است. نمونه با سخت‌کننده خارجی T و با ورق پیوستگی داخلی توسط نرم‌افزار ANSYS مدل و آنالیز شده و نتایج حاصل به صورت منحنی ممان- دوران ارائه شده است. نتایج اجزای محدود مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی موجود در مقاله شانموگام و همکاران مقایسه شده است. تطابق خوب نتایج، صحت کار مدل-سازی را تأیید می‌کند.

مقایسه منحنی‌های ممان- دوران آزمایشگاهی و تحلیلی این دو نمونه در اشکال (۵ و ۶) ارائه شده است.

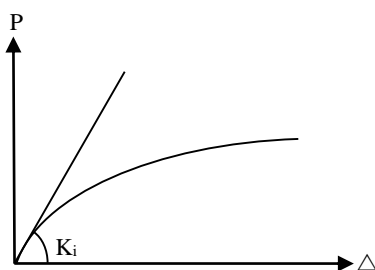
از آنجا که سه مود اول حاکم است و مودهای بعدی از اهمیت چندانی برخوردار نمی‌باشند نتایج این سه مود در جدول (۳) ارائه شده است. برای هر اتصال مود سوم دارای بیشترین فرکانس می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در مودهای بالاتر فرکانس‌ها افزایش می‌یابد و مدل‌های با سختی بالاتر فرکانس‌های بیشتری دارند.

بررسی نتایج تحلیل و مدل‌سازی تحت تأثیر بارگذاری تک‌آهنگ. به کمک منحنی بار- تغییر مکان اتصالات پارامترهای درصد گیرداری، ضریب شکل‌پذیری و مقاومت نهایی قابل محاسبه است. در شکل (۸) منحنی بار- تغییر مکان مدل‌های مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل ۸ منحنی بار- تغییر مکان اتصالات مورد مطالعه

مقایسه اتصالات از دیدگاه درصد گیردای. برای محاسبه درصد گیرداری، مطابق رابطه (۱) سختی (شیب منحنی) اتصال شکل (۹) بر سختی خمشی تئوریک اعضای متصل به اتصال تقسیم می‌شود که مقدار به‌دست‌آمده همان درصد گیرداری اتصال می‌باشد.



شکل ۹ نحوه تعیین شیب منحنی

به مقایسه، بررسی و بحث در نتایج استخراج شده پرداخته شده است. پارامترهایی که در این بخش مورد مقایسه قرار گرفته‌اند عبارتند از ظرفیت نهایی، شکل‌پذیری، سختی اولیه، محل تشکیل مفصل پلاستیک، تنش حداکثر، میزان جذب انرژی و فرکانس‌های سازه. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که اتصال با سخت‌کننده‌های خارجی دوزنقه‌ای شکل بهترین رفتار را در مقایسه با سایر اتصالات دارد و جایگزین بسیار مناسبی است برای اتصال با ورق پیوستگی که مدنظر آئین نامه می‌باشد.

بررسی نتایج آنالیز مودال اتصالات. در جدول (۳) مقادیر فرکانس و تغییر مکان افقی سه مود اول هر اتصال تحت آنالیز مودال ارائه شده است. این آنالیز برای بررسی رفتار فرکانسی اتصالات انجام گرفته است.

جدول ۳ نتایج آنالیز مودال اتصالات

نام مدل	شماره مود	فرکانس (Hz)	تغییر مکان افقی (mm)
F	۱	۱۶/۹۱۵	۱۵/۶
	۲	۱۶/۹۱۷	۱۵/۷
	۳	۲۲/۳۶۹	۲۱/۵
FI	۱	۱۷/۲۵۷	۱۵/۶
	۲	۱۷/۲۷۳	۱۵/۷
	۳	۲۲/۸۶۸	۲۱/۰۱
FE	۱	۱۶/۱۸۲	۱۵/۳۵
	۲	۱۶/۲۱۴	۱۵/۳۳
	۳	۲۳/۱۶۷	۲۰/۴۹
FB2	۱	۱۶/۴۳۵	۱۵/۵۸
	۲	۱۶/۷۶۴	۱۵/۵۱
	۳	۲۲/۹۷۸	۲۰/۶۶
FB4	۱	۱۷/۰۲۹	۱۵/۶۹
	۲	۱۷/۰۵۲	۱۵/۶۸
	۳	۲۲/۷۴۷	۲۰/۹۶
FB5	۱	۱۳/۳۰۷	۱۴/۴۶
	۲	۱۳/۴۱۲	۱۴/۴۸
	۳	۲۱/۵۲۸	۲۰/۴۷
FEB5	۱	۱۶/۱۷۵	۱۵/۳۳
	۲	۱۶/۲۰۷	۱۵/۳۲
	۳	۲۳/۱۵۷	۲۰/۴۷

امر مبین این است که اتصال با سخت‌کننده خارجی از لحاظ گیرداری جایگزین مناسبی برای ورق پیوستگی داخلی می‌باشد.

حضور ورق‌های پیوستگی در تراز بال‌های فوقانی و تحتانی تیرها در داخل ستون که مطلوب آئین‌نامه ۲۸۰۰ و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران می‌باشد با مشکلاتی در زمینه اجرا همراه است. از این رو، پیشنهاد می‌شود که تیر با سخت‌کننده‌های خارجی به همراه شبکه‌های آرماتور افقی و بتن پرکننده داخل آن به ستون متصل شود تا جایگزین مناسبی برای اتصال با ورق‌های پیوستگی باشد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که درصد گیرداری از ۹۳/۴۸ به ۹۶/۱۸ درصد می‌رسد که باعث افزایش سختی اتصال به میزان ۲ درصد شده است. این نتیجه بیانگر آن است که این اتصال از نظر شاخص گیرداری جایگزین مناسبی برای اتصال با ورق‌های پیوستگی داخلی است و مشکلات مربوط به اجرای دشوار و نامطمئن ورق‌های پیوستگی به علت عدم جوشکاری ضلع چهارم ورق‌ها به ستون را ندارد. برای مقایسه تأثیر سخت‌کننده خارجی با شبکه‌های آرماتور افقی، میزان گیرداری اتصال این دو مدل مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج مبین این مطلب است که شاخص گیرداری مدل سوم ۹۵/۷۵ درصد و مدل چهارم ۹۲/۰۱ درصد است و نشان می‌دهد که شاخص گیرداری اتصال با سخت‌کننده خارجی حدود ۴/۰۶ درصد بیشتر از اتصال با شبکه آرماتور افقی می‌باشد.

جدول ۴ شاخص گیرداری اتصالات مورد مطالعه

نام مدل	گیرداری (R %)	$\frac{R_i}{R^*} \times 100$
F	۸۵/۳۷	۹۱/۳۲
FI(*)	۹۳/۴۸	۱۰۰
FE	۹۵/۷۵	۱۰۲/۴۲
FB2	۹۲/۰۱	۹۸/۴۳
FB4	۹۳/۳۴	۹۹/۸۵
FB5	۹۴/۲۸	۱۰۰/۸۶
FEB5	۹۶/۱۸	۱۰۲/۸۹

$$R = \frac{k_i}{K_{total}} \times 100 \quad (1)$$

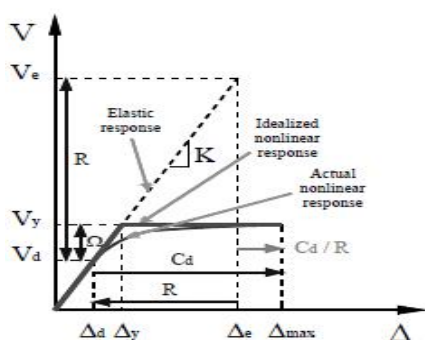
در اینجا $K_{total} = \sum \frac{3EI}{L^3}$ ، L طول هر عضو و EI صلبیت خمشی مقطع هر عضو اتصالی می‌باشد.

مدل اول فاقد هرگونه ورق پیوستگی و ورق پیرامونی است و دارای گیرداری به میزان ۸۵/۳۷ درصد می‌باشد. با اضافه کردن ورق‌های پیوستگی در تراز بال‌های فوقانی و تحتانی تیر در داخل ستون، گیرداری به میزان ۹/۴۹ درصد رشد داشته است و به ۹۳/۴۸ درصد رسیده است و سبب صلب شدن اتصال گردیده است. برای بررسی و مقایسه مدل اول و سوم ورق‌های پیوستگی از داخل ستون حذف شده‌اند و با سخت‌کننده‌های خارجی جایگزین شده‌اند. مشاهده می‌شود که درصد گیرداری به میزان ۱۲/۱۶ افزایش یافته و از ۸۵/۳۷ به ۹۵/۷۵ رسیده است که تأمین‌کننده گیرداری اتصال طبق AISC می‌باشد. اتصال پیشنهادی که شامل سخت‌کننده‌های خارجی است و به وسیله بتن پرکننده و شبکه‌های آرماتور افقی داخل ستون تقویت می‌شود، دارای درصد گیرداری حدود ۹۶/۱۸٪ می‌باشد که در بین تمامی مدل‌ها بیشترین درصد گیرداری را داراست و اتصال کاملاً صلب محسوب می‌شود. مقایسه این مدل با مدل اول نشان می‌دهد که حضور سخت‌کننده‌های خارجی، بتن و شبکه‌های آرماتور افقی درصد گیرداری را به میزان ۱۲/۶۶٪ افزایش داده است.

باتوجه به این که هدف انجام این تحقیق حذف ورق‌های پیوستگی داخلی و جایگزینی آن با سخت‌کننده‌های خارجی بوده است، در این بخش به مقایسه این دو اتصال پرداخته شده است. نتایج بیانگر این مطلب است که اتصال با ورق پیوستگی داخلی دارای شاخص گیرداری ۹۳/۴۸ درصد و اتصال با سخت‌کننده خارجی دارای شاخص گیرداری ۹۵/۷۵ درصد است که شاخص گیرداری اتصال با سخت‌کننده خارجی به میزان ۲/۴۳ درصد بیشتر از اتصال با ورق پیوستگی داخلی است. این

مفصل پلاستیک در تیر، مقدم بر ستون اتفاق افتد. با بررسی منحنی‌های بار-تغییر مکان تیر در مدل‌های مورد مطالعه، ملاحظه می‌شود در مدل‌هایی که نتایج تحلیل آنها حاکی از آن بوده است که در آنها مفصل پلاستیک به‌طور کامل در تیر تشکیل می‌شود، نسبت شکل‌پذیری افزون-تری در مقایسه با سایر اتصالات حاصل شده است. جدول (۵) مقادیر شکل‌پذیری را برای انواع مدل‌های مورد مطالعه ارائه می‌دهد.

$$\mu = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y} \quad (2)$$



شکل ۱۱ نحوه تعیین ضریب شکل‌پذیری [۱۴]

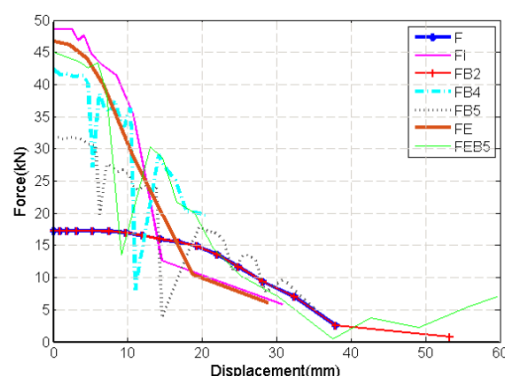
جدول ۵ ضریب شکل‌پذیری اتصالات مورد مطالعه

نام مدل	شکل‌پذیری (μ)	$\frac{\mu_i}{\mu} \times 100$
F	۳/۶۶	۵۹/۹۰
FI(*)	۶/۱۱	۱۰۰
FE	۴/۴۶	۷۲/۹۹
FB2	۳/۸۲	۶۲/۵۲
FB4	۴/۰۱	۶۵/۶۳
FB5	۴/۲	۶۸/۷۴
FEB5	۷/۰۴	۱۱۵/۲۲

باتوجه به جدول (۵) در بررسی مقایسه اتصالات مورد مطالعه، مدل دارای ورق دوزنقه‌ای پیرامونی شامل بتن و شبکه‌های آرماتور افقی در داخل ستون، بزرگ‌ترین نسبت شکل‌پذیری را از بین مدل‌های مورد مطالعه دارد

از جدول (۴) ملاحظه می‌شود که مدل اول با درصد گیرداری ۸۵/۳۷ در زمره اتصالات صلب طبقه-بندی نمی‌شود و سایر اتصالات با درصد گیرداری بالای ۹۰ درصد در محدوده اتصالات صلب طبقه‌بندی می‌شوند. مقایسه اتصالات صلب نشان می‌دهد که مدل پنجم با درصد گیرداری ۹۶/۱۸٪ نسبت به سایر اتصالات از نقطه نظر گیرداری عملکرد مناسب‌تری دارد و همچنین داده‌های جدول (۴) نشان می‌دهند که مدل‌های دارای سخت‌کننده‌های خارجی درصد گیرداری بیشتری در مقایسه با مدل‌های با ورق پیوستگی دارند. علاوه بر این مشکلات اجرایی مربوط به اجرای دشوار و نامطمئن ورق‌های پیوستگی را مرتفع نموده‌اند.

در شکل (۱۰) میزان کاهش سختی به‌ازای افزایش تغییر مکان برای مدل‌های مورد نظر ارائه شده است. باتوجه به شکل میزان سختی اولیه مدل‌های F و FB2 نسبت به سایر مدل‌ها کمتر می‌باشد و نرخ کاهش آن نیز کمتر می‌باشد. از طرفی مدل‌های FI و FE و FEB5 سختی اولیه بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها کسب کرده‌اند و نرخ کاهش سختی در این مدل‌ها نیز بیشتر از سایرین می‌باشد.



شکل ۱۰ منحنی سختی-تغییر مکان مدل‌ها

مقایسه اتصالات از دیدگاه شکل‌پذیری. به‌طور معمول در قاب‌های خمشی چنین انتظار می‌رود که بروز پلاستیسیته در نواحی دور از بر ستون و به شکل تشکیل

در مدل پیشنهادی ۷ درصد بیشتر از مدل دارای ورق پیوستگی داخل ستون می‌باشد. همچنین از مقایسه ظرفیت نهایی مدل‌های سوم و هفتم نتیجه می‌شود که حضور بتن به همراه شبکه‌های آرماتور افقی باعث افزایش ۵/۱ درصدی ظرفیت اتصال می‌شود. با مقایسه اتصالات چهارم، پنجم و ششم می‌توان به تأثیر شبکه آرماتور افقی در افزایش ظرفیت نهایی اتصال اشاره کرد. با افزایش تعداد شبکه‌ها از دو به پنج، ظرفیت نهایی اتصال حدود ۸/۷ درصد و از چهار به پنج شبکه حدود ۱ درصد افزایش می‌یابد. از مقایسه ظرفیت نهایی مدل اول و دوم مشخص می‌شود که ظرفیت نهایی مدل دوم تقریباً ۵۱/۳ درصد بیشتر از مدل اول می‌باشد.

مقایسه اتصالات از دیدگاه محل تشکیل مفصل

پلاستیک. به‌طور کلی مکان‌های تشکیل مفصل پلاستیک تیر در اتصالات مختلف با هم متفاوت می‌باشد، ولی نتایج بیانگر این مطلب است که در اتصالاتی که پهنای بال تیر آنها در حضور ورق‌های دوزنقه‌ای پیرامونی در نزدیکی اتصال افزایش یافته باشد مفصل پلاستیک از بر ستون فاصله می‌گیرد و به‌طور کامل در تیر تشکیل می‌گردد. با جا دادن بتن داخل ستون قوطی شکل، کرنش پلاستیک در ستون کاهش می‌یابد و روند گسترش پلاستیسیته از ستون به داخل بال تیر انجام می‌گردد. همچنین مقایسه‌ها نشان می‌دهد در مدل‌های دارای ورق پیرامونی، ابتدا ورق پیرامونی در بر اتصال پلاستیک شده و با افزایش بار پلاستیسیته در ورق پیشروی می‌کند و در انتهای ورق به تیر گسترش می‌یابد و مفصل پلاستیک به‌طور کامل در تیر تشکیل می‌شود. چنانچه انتظار می‌رفت، موقعیت مفصل پلاستیک به اندازه طول ورق دوزنقه‌ای از بر ستون فاصله گرفته است. تنش حداکثر در داخل تیر و با فاصله مناسب از بر اتصال در محل تشکیل مفصل پلاستیک اتفاق می‌افتد. این موضوع نشان‌دهنده اثر مطلوب تقویت اتصال مورد مطالعه از راه دیافراگم پیرامونی است، که

و مدل دوم بعد از مدل هفتم بزرگ‌ترین نسبت شکل-پذیری را داراست. این امر مبین این مطلب است که وجود ورق‌های پیوستگی در افزایش شکل‌پذیری نقش مؤثری دارد.

مقایسه اتصالات از دیدگاه مقاومت نهایی. در جدول (۶) مقادیر بار حداکثر حاصل از تحلیل برای هر یک از اتصالات مورد مطالعه همراه با نسبت مقادیر بار فوق به مقدار بار حداکثر به‌دست‌آمده از تحلیل مدل اتصال با ورق پیوستگی داخلی (اتصال مرجع) ارائه شده است.

جدول ۶ مقاومت نهایی اتصالات مورد مطالعه

نام مدل	بار حداکثر (kN)	$\frac{P_{max i}}{P_{max}}$
F	۵۵/۷۷	۶۶/۱۱
FI(*)	۸۴/۳۶	۱۰۰
FE	۸۵/۰۹	۱۰۰/۸۶
FB2	۵۷/۷۲	۶۸/۴۲
FB4	۶۲/۱۸	۷۳/۷۱
FB5	۶۲/۷۶	۷۴/۳۹
FEB5	۸۹/۴۵	۱۰۶

از میان مدل‌های مطالعه‌شده، مدل هفتم بیشترین بار قابل تحمل را داراست و از طرفی، مدلی که بدون ورق پیوستگی و سخت‌کننده خارجی بوده است (مدل اول)، کمترین بار قابل تحمل را نشان داده است. آن‌طور که از نتایج خلاصه‌شده در جدول (۵) برای مدل‌های تحت بررسی استنتاج می‌شود، بار حداکثر اتصال دارای سخت‌کننده پیرامونی (مدل سوم)، به میزان ۸۶٪ از اتصال با ورق پیوستگی داخل ستون افزون‌تر بوده است. البته لازم به ذکر است که میزان مصالح مصرفی در اتصال دارای ورق دوزنقه‌ای پیرامونی اندکی بیش از مدل دارای ورق پیوستگی داخل ستون می‌باشد. نتیجه دیگری که از جدول (۶) استنتاج می‌شود این است که میزان بار حداکثر

پلاستیک در داخل تیر از کنج ستون شروع شده و در همان مکان گسترش پیدا کرده و به دنبال آن به جان تیر نفوذ کرده است.

مقایسه تنش حداکثر اتصالات. میزان حداکثر تنش ایجاد شده در هر اتصال در قالب جدول (۷) ارائه شده است. برای بررسی دقیق تر این موضوع نسبت تنش حداکثر هر حالت نسبت به حالت مرجع نیز ارائه گردیده است.

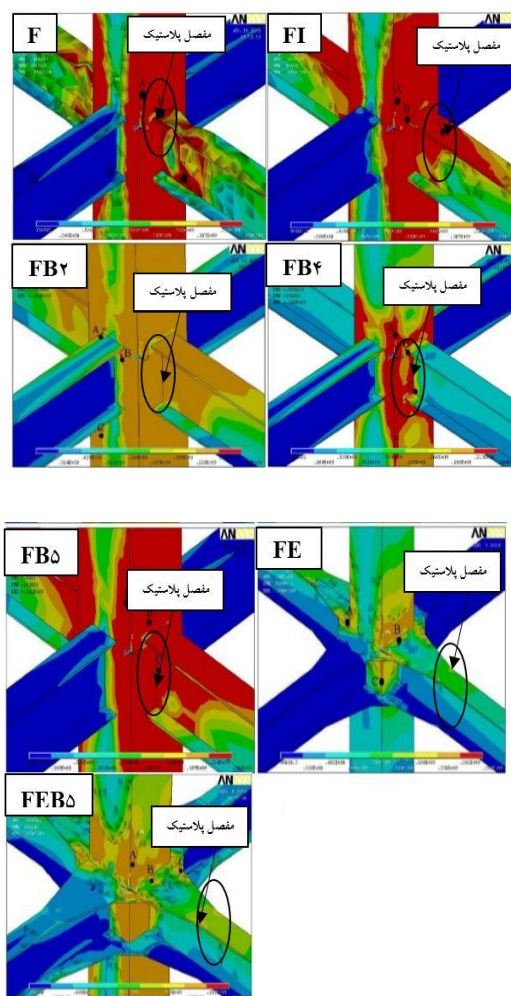
جدول ۷ مقادیر حداکثر تنش اتصالات

نام مدل	محل حداکثر تنش	حداکثر تنش (Mpa)	$\frac{\sigma_i}{\sigma_*} \times 100$
F	B	۲۸۵	۱۰۲/۱۵
FI(*)	C	۲۷۹	۱۰۰
FE	B	۳۳۰	۱۱۸/۲۸
FB2	C	۳۰۵	۱۰۹/۳۱
FB4	A	۲۹۴	۱۰۵/۳۸
FB5	A	۲۶۰	۹۳/۱۹
FEB5	A	۳۶۴	۱۳۰/۴۶

حضور المان خارجی سبب افزایش سختی در اطراف چشمه اتصال می شود. از آنجایی که نیرو به نسبت سختی توزیع می شود، تنش در این اتصالات افزایش می یابد. بنابراین، مدل های FE با حدود ۱۸ درصد و مدل FB5 با ۳۰/۴۶ درصد افزایش تأثیر المان های خارج را به خوبی نشان می دهند.

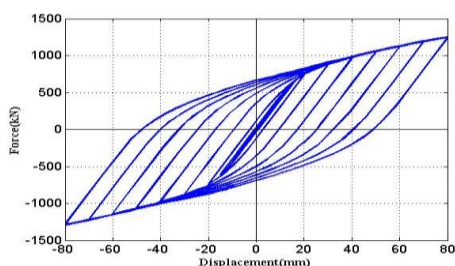
بررسی نتایج تحلیل و مدل سازی تحت تأثیر بارگذاری رفت و برگشتی. مجموعه منحنی های حاصل از بارگذاری چرخه ای مدل های اجزای محدود اتصالات مورد مطالعه به صورت چرخه های هیسترتیک بار-تغییر مکان تیر در اشکال (۱۳ تا ۱۹) ارائه شده است.

باتوجه به فرم دوزنقه ای شکل سبب شده است که تشکیل مفصل پلاستیک در موقعیت مناسب و در فاصله ای برابر با طول ورق دوزنقه ای شکل از بر اتصال انجام گیرد. با جا دادن بتن داخل ستون قوطی شکل دارای سخت کننده خارجی، کرنش پلاستیک در مقایسه با مدل ستون قوطی شکل بدون بتن پرکننده تغییر چندانی نشان نداده است.

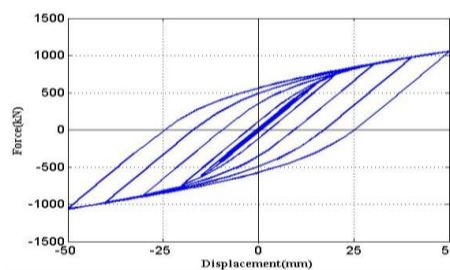


شکل ۱۲ توزیع تنش اتصالات

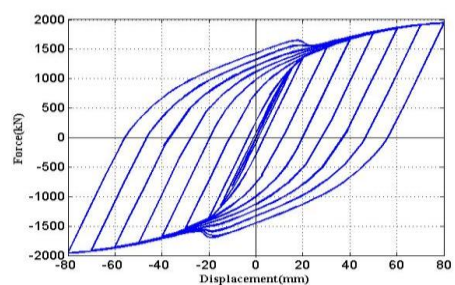
نکته مهمی که از استفاده بتن در داخل ستون استنتاج می شود، کاهش قابل ملاحظه مقادیر تنش و تغییر شکل ورق در ستون است. در مدل شامل ورق پیوستگی داخلی به همراه بتن داخل ستون کرنش



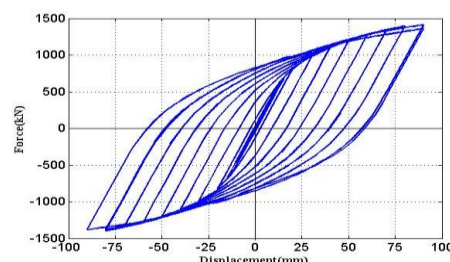
شکل ۱۸ منحنی هیستریزس مدل FB5



شکل ۱۳ منحنی هیستریزس مدل F

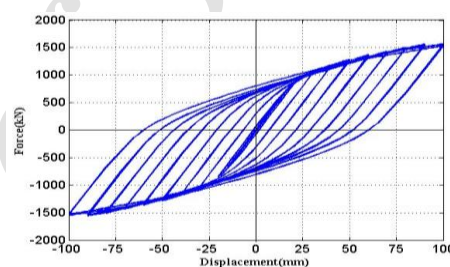


شکل ۱۹ منحنی هیستریزس مدل FEB5



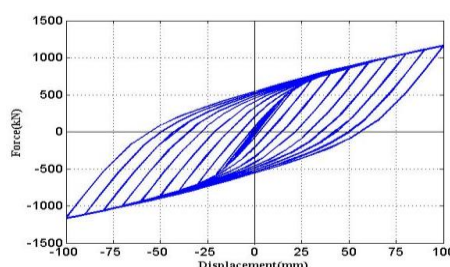
شکل ۱۴ منحنی هیستریزس مدل FI

منحنی هیستریزس مدل‌ها نشان می‌دهد که اتصال پیشنهادی دارای بیشترین جذب انرژی است و پس از آن مدل سوم از جذب انرژی بالایی برخوردار است که علت این امر وجود سخت‌کننده‌های خارجی بوده است.



شکل ۱۵ منحنی هیستریزس مدل FE

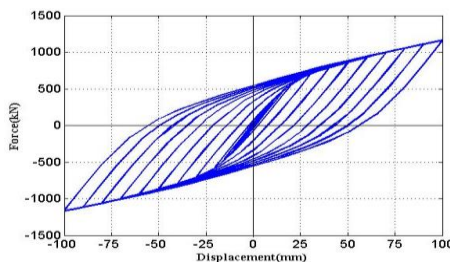
مقایسه میزان جذب انرژی اتصالات. یکی از پارامترهایی که کفایت اتصال را بیان می‌کند، میزان انرژی جذب شده توسط اتصال می‌باشد. هرچه این مقدار بیشتر باشد رفتار اتصال مناسب‌تر است. میزان انرژی جذب شده توسط اتصالات براساس چرخه هیستریزس مدل‌ها در قالب جدول (۷) ارائه شده است.



شکل ۱۶ منحنی هیستریزس مدل FB2

جدول ۸ مقادیر انرژی مطلق و نسبی اتصالات

$\frac{E_i}{E^*} \times 100$	انرژی اتصال E_i (kJ)	نام مدل
۷۲/۳۵	۱۳۹۰۵/۶۷	F
۱۰۰	۱۹۲۲۰	FI(*)
۱۰۳/۰۱۷	۱۹۸۰۰	FE
۷۴/۶	۱۴۳۳۸/۲	FB2
۸۲/۶	۱۵۸۷۵/۷۲	FB4
۸۵/۳۴	۱۶۴۱۰/۰۲	FB5
۱۴۳/۷۵	۲۷۶۱۹/۱۴	FEB5



شکل ۱۷ منحنی هیستریزس مدل FB4

۵- در بین مدل‌های مطالعه‌شده مدل (FEB5)، شکل-پذیری معادل $7/04$ را داراست و بعد از آن اتصال با ورق‌های پیوستگی داخلی بیشترین شکل‌پذیری را به خود اختصاص داده است که نشان‌دهنده تأثیر المان‌های داخلی یعنی شبکه‌های آرماتور و ورق‌های پیوستگی در میزان شکل‌پذیری می‌باشد.

۶- مقاومت نهایی اتصال پیشنهادی بالاترین مقدار را در بین مدل‌ها به خود اختصاص داده است که علت این امر حضور هم‌زمان سخت‌کننده‌های خارجی، شبکه‌های آرماتور افقی و بتن پرکننده داخل ستون می‌باشد.

۷- وجود سخت‌کننده‌های خارجی در اطراف اتصال، محل تشکیل مفصل پلاستیک را از بر ستون به فاصله طول ورق‌های پیرامونی دور می‌کند و به منطقه امن و کنترل‌شده‌ای در داخل تیر هدایت می‌کند.

۸- افزایش تعداد شبکه‌های آرماتور افقی در چشمه اتصال سبب افزایش $2/75$ درصدی میزان گیرداری شده و شکل‌پذیری را به میزان $3/75$ درصد بالا برده و همچنین مقاومت نهایی چشمه اتصال را $6/67$ درصد بهبود بخشیده است.

۹- از روی منحنی هیستریزس مدل‌ها نتیجه شده که میزان استهلاک انرژی مدل پیشنهادی به علت عریض‌تر بودن منحنی نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر بوده است.

۱۰- از نظر توزیع تنش، ورق‌های پیوستگی بهترین عملکرد را داشته‌اند. لازم به ذکر است که توزیع تنش در نزدیکی چشمه اتصال غیریکنواخت می‌شود و با دور شدن از آن یکنواخت می‌گردد.

۱۱- باتوجه به این که درصد گیرداری مدل اول کمتر از 90 درصد است، جزو اتصالات نیمه‌صلب محسوب می‌شود و سایر مدل‌ها با داشتن درصد گیرداری بالای 90 درصد جزو اتصالات صلب طبقه‌بندی می‌شوند.

باتوجه به این که اتصال شامل ورق‌های پیوستگی، با توصیه‌های آئین‌نامه 2800 تطابق دارد، به‌عنوان معیار مقایسه در نظر گرفته شده است و مقدار انرژی جذب‌شده در چرخه مورد بحث، در مقایسه با مقادیر متناظر محاسبه‌شده، برای مدل با ورق پیوستگی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی مدل هفتم به علت حضور سخت‌کننده خارجی بیشتر از سایر مدل‌ها بوده است.

نتیجه‌گیری

نتایج قابل ملاحظه‌ای که از این بررسی‌ها به دست آمده است، به شرح زیر می‌باشد:

۱- باتوجه به اجرای دشوار ورق‌های پیوستگی و جایگزینی آن با سخت‌کننده‌های خارجی مشاهده می‌شود که سخت‌کننده‌های خارجی سبب افزایش درصد گیرداری و مقاومت نهایی اتصال می‌شوند و مفصل پلاستیک را به منطقه امن و کنترل‌شده‌ای هدایت می‌کنند، ولی به میزان اندکی شکل‌پذیری اتصال را کاهش می‌دهند؛ از این‌رو، این سخت‌کننده‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای ورق‌های پیوستگی داخل ستون باشند.

۲- جانمایی ورق‌های پیوستگی داخل ستون سبب افزایش گیرداری، شکل‌پذیری و ظرفیت نهایی اتصال شده است.

۳- از مقایسه مدل‌های با سخت‌کننده‌های خارجی نتیجه می‌شود که شبکه‌های آرماتور در اتصال سبب افزایش درصد گیرداری اتصال از $95/75$ به $96/18$ درصد می‌شوند و شکل‌پذیری اتصال را به میزان $57/74$ درصد افزایش می‌دهند و سبب بهبود قابل-ملاحظه‌ای در ظرفیت اتصال می‌شوند.

۴- در حیطه بررسی‌ها، مدل پیشنهادی (FEB5) با سختی $96/18$ درصد و مدل (FE) با سختی $95/75$ درصد بیشترین درصد گیرداری را به خود اختصاص داده‌اند و جایگزین مناسبی برای اتصال با ورق‌های پیوستگی داخلی می‌باشند.

مراجع

1. Lee, S.L., Ting, L. C. and Shanmugam, N. E., "Box Column to I-beam Connections with External Stiffeners", *Journal of Construct. Steel Research*, Vol.18, pp. 209-226, (1991).
2. Lee, S.L., Ting, L. C. and Shanmugam, N. E., "Use of External T-stiffeners in Box-column to I-beam Connections", *Journal of Construct. Steel Research*, Vol. 26, pp. 77-98, (1993).
3. Lee, S.L. Ting, L. C. and Shanmugam, N. E., "Nonlinear Analysis of I-beam to Box Column Connections", *Journal of Construct. Steel Research*, Vol. 28, pp. 257-278, (1994).
4. Lee, S.L. Ting, L. C. and Shanmugam, N. E., "Behavior of I-beam to Box-column Connection Stiffened Externally and Subjected to Fluctuating Loads", *Journal of Construct. Steel Research*, Vol. 20, pp.129-148, (1991).
5. Lee, S.L. Ting, L. C. and Shanmugam, N. E., "Static Behavior of I-beam to Box-column Connections with External Stiffeners", *The Structural Engineer*, Vol. 71(15), pp.269-275, (1993).
6. Shanmugam, N. E, Fellow, ASCE and. Ting, L. C, "Welded Interior Box-column to I-beam Connections", *Journal of structural engineering*, pp. 824-830, (1995).
7. Lee, S.L. Ting, L. C. and Shanmugam, N. E., "Design of I-beam to Box-column Connections Stiffened Externally" , *Engineering Journal*, pp. 141-149, (1993).
۸. مالک شاهرخ، حاجی فتحعلی، «مطالعه رفتار تیر به ستون قوطی شکل»، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشکده فنی، (۱۳۸۹).
۹. زاهدی مرتضی، سفیدگران مجید، «استفاده از سخت‌کننده‌های بیرونی به‌عنوان جایگزینی برای ورق‌های پیوستگی داخلی در اتصالات صلب تیر I به ستون قوطی شکل»، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (۱۳۸۵).
10. Goswami, R. and Murty, C.V.R., "Externally Reinforced Welded I-beam-to Box-column Seismic Connection", *Journal of engineering mechanics ASCE*, Vol. 136(1), pp. 23-30, (2010).
11. Satish Kumar, S.R. and Prasada Roa, D.V. "RHS Beam-to-column Connection with Web Opening- Experimental Study and Finite Element Modeling", *Journal of constructional steel research*, Vol. 62, pp. 739-746, (2006).
12. Prasada Roa, D.V. and Satish Kumar, S.R. "RHS Beam-to-column Connection with Web Opening Parametric Study and Design Guidelines", *Journal of constructional steel research*, Vol. 62, pp. 747-756, (2006).
13. Clark, P., Protocol for Fabrication, "Inspection, Testing, and Documentation of Beam-column Connection Test and other Experimental Specimen", *SAC Joint Venture, Sacramento, California*, (1997)
14. Uang, C. M., "Establishing R (or R_w) and C_d Factors for Building Seismic Provisions.", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.117, No 10, pp.19-28 , (1991).