

مطالعه آزمایشگاهی شکل پذیری قابهای فولادی دارای اتصالات خورجینی

علی اکبر آقاچوک^{۱*}، پیمان وشکینی^۲

۱- دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس.

• تهران؛ صندوق پستی: ۱۴۳ - ۱۴۱۱۵.

A_Agha@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: مهر ۱۳۸۰، پذیرش مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۲)

چکیده - در تحقیق حاضر دو نوع سیستم ساختمانی دارای اتصال خورجینی در نظر گرفته شد. الف - قاب مهاربندی نشده دارای اتصال تقویت شده (صلب) خورجینی؛ ب - قاب مهاربندی شده دارای اتصال متداول خورجینی. به منظور تعیین ظرفیت شکل پذیری این سیستمهای ساختمانی، چهار مدل آزمایشگاهی از قابهای دارای اتصال مذکور ساخته و آزمایش شد. پس از انجام آزمایشها، برای مدلهای آزمایشگاهی مهاربندی نشده دارای اتصال صلب خورجینی، ضریب شکل پذیری حداقل ۲/۴ و برای مدلهای آزمایشگاهی مهاربندی شده دارای اتصال متداول خورجینی، ضریب شکل پذیری برابر ۲ استخراج شد.

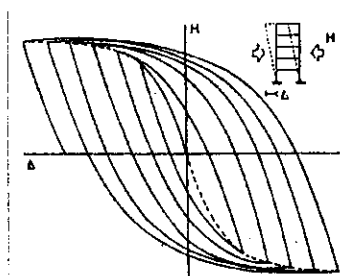
کلید واژگان: اتصال خورجینی، قاب فولادی، شکل پذیری.

۱ - مقدمه

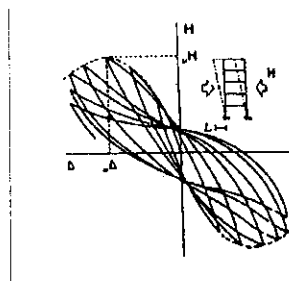
لنگر - چرخش آنها غیرخطی بوده و ظرفیت محدودی برای چرخش قبل از بروز ترک در آنها وجود دارد. متعاقباً تحقیقات متعدد آزمایشگاهی و نظری در زمینه تعیین مقدار سختی اولیه اتصال، درصد گیرداری، مقدار لنگر متناظر با تسلیم و لنگر نهایی اتصال [۱-۴] ظرفیت برشی اتصال [۵] مقادیر چرخش و لنگر متناظر با ترک خوردگی در اتصال [۶] و بررسی نیاز شکل پذیری سیستمهای سازه‌ای دارای این نوع اتصالات [۷] صورت گرفت.

بر اساس نتایج این مطالعات و با توجه به عملکرد ضعیف ساختمانهای مهار نشده دارای اتصالات متداول خورجینی در زلزله های گذشته، اگرچه کاربرد این سیستم در حال حاضر در کشور مردود شناخته نشده [۸] اما استفاده از مهاربند در این نوع ساختمانها ضروری تشخیص داده شده است. لیکن با توجه به رواج استفاده از اتصالات

ساختمانهای دارای اتصالات خورجینی به دلیل سهولت اجرا و مزایای اقتصادی، در حال حاضر متداولترین نوع ساختمانهای فولادی در کشور است. سهولت اجرا، ناشی از یکسره بودن تیرها در محل تقاطع با ستون و مزایای اقتصادی ناشی از بهینه بودن عملکرد تیرهای یکسره در برابر بارهای ثقلی است. لیکن به دلیل استاندارد نبودن این نوع اتصالات، کماکان موارد ناشناخته‌ای در مورد رفتار آنها، بویژه در برابر بارهای ناشی از زلزله وجود دارد. مشاهده خرابیهای وسیع در ساختمانهای با اتصالات خورجینی در زلزله سال ۱۳۶۹ منجیل و رودبار محققان کشور را بر آن داشت تا به مطالعه در زمینه رفتار این نوع سازه‌ها بپردازند. اولین نتایج این مطالعات مشخص ساخت که اتصالات متداول خورجینی، اتصالاتی نیمه صلب هستند که رابطه



الف) رفتار خوب



ب) رفتار بد

شکل ۱ نمونه رفتار سازه‌ها تحت بار افقی دوره‌ای صعودی

همچنان ملاحظه می‌شود بعد از اینکه تغییر مکان از مقدار متناظر با مقاومت ماکزیمم بیشتر شد، مقاومت سیستم زائل شده و لذا شکل‌پذیری به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد. از طرفی چرخه‌های هیستریزس به شکل له شده در آمده، طوری که مساحت محاط شده توسط یک چرخه هیستریزس - که بیانگر ظرفیت اتلاف انرژی سازه است - کوچک شده و سختی و مقاومت بر اثر تکرار بارگذاری تنزل پیدا می‌کنند.

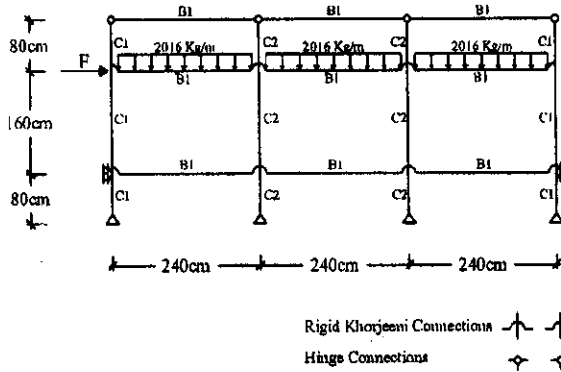
در مطالعه حاضر، چهار مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شده و تحت تأثیر بارهای رفت و برگشتی شبه دینامیکی مورد آزمایش قرار گرفت. در این مدل‌ها دو نمونه مربوط به قابهای مهاربندی شده دارای اتصالات خورجینی متداول و دو نمونه مربوط به قابهای فاقد مهاربندی دارای اتصالات خورجینی تقویت شده (صلب) بود. شکل ۲ نمای اتصالات مذکور را نشان می‌دهد.

خورجینی در صنعت ساختمان کشور و به دلیل محدودیتهای معماری در برخی از ساختمانها که اجازه تعبیه مهاربند را به طراح نمی‌دهد، محققان کشور همچنین سعی کرده‌اند روشهایی را برای افزایش صلبیت و مقاومت این نوع اتصالات ابداع کنند [۱-۳ و ۴]. در صورت اثبات رفتار صلب و مناسب این نوع اتصالات، در قاب‌های فاقد مهاربند نیز از این نوع اتصالات می‌توان استفاده کرد.

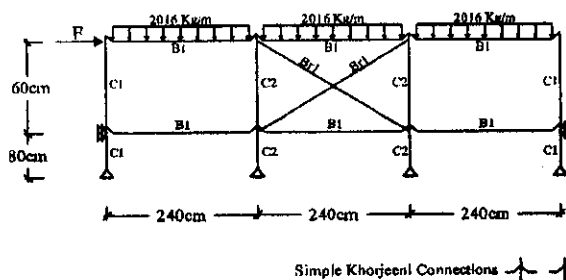
هدف از تحقیق حاضر، مطالعه آزمایشگاهی رفتار قابهای ساختمانی دارای اتصالات خورجینی در برابر بارهای جانبی و بررسی ظرفیت شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی آنها است. این مطالعه با اعمال بارهای جانبی رفت و برگشتی به صورت افزایشی و به دست آوردن منحنیهای رفتار چرخه‌ای (هیستریزس) برای مدل‌های آزمایشگاهی انجام شده است. این نوع مطالعات که در گذشته در نقاط مختلف دنیا بر روی زیرسازه‌ها یا سازه‌های مختلف انجام شده، نشان داده است که با توجه به نوع مصالح سازه‌ای و سیستم سازه‌ای مورد مطالعه، رفتارهای متفاوتی مشاهده می‌شود. در این نوع مطالعات که در آن بارگذاری تا حدی ادامه می‌یابد که تغییر شکلها از حد ارتجاعی خارج شود، عدم کاهش سختی و مقاومت و قابلیت بروز تغییر شکلهای بزرگ غیرالاستیک، مشخصه‌های رفتار مناسب‌تر در برابر زلزله است. این موضوع به عنوان نمونه در شکل ۱- که بیانگر رابطه نیروی برش پایه - تغییر مکان جانبی برای دو قاب مختلف است - نشان داده شده است.

شکل ۱- الف یک منحنی رفتار چرخه‌ای ثابت و استعداد خوب رفتار لرزه‌ای را نشان می‌دهد که بیانگر شکل‌پذیری زیاد، ظرفیت بالای اتلاف انرژی و چرخه‌های پایدار هیستریزس، بدون تنزل مقاومت و افت سختی است. از طرف دیگر، قاب شکل ۱- ب به گونه دیگری عمل می‌کند که مطلوب نیست. این شکل یک چرخه ناپایدار (منحنی رفتار چرخه‌ای کاهنده) و کم بودن استعداد مقاومت سازه را در برابر زلزله نشان می‌دهد.

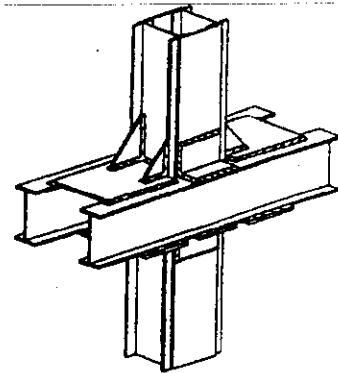
متداول طراحی شده و سپس با توجه به ضریب مدل $SL = 2$ ، ابعاد مقاطع مدل با توجه به مقاطع طبقه دوم ساختمان مذکور محاسبه و انتخاب شد. مدل‌های آزمایشگاهی متشکل از یک طبقه کامل همراه با نیمی از ستونهای فوقانی و تحتانی طبقه مذکور بود. از آنجا که لنگر ایجاد شده در ستونها در حوالی وسط به صفر می‌رسد انتهای پایین نیمه ستونها در مدل، با یک اتصال مفصلی به کف قوی آزمایشگاه متصل شد. ضمناً در دو مدل آزمایشی برای توزیع یکنواخت نیروی جانبی بین ستونها و نیز ایجاد لنگرهای مشابه قاب کامل در اتصالات، نیروی جانبی در تراز وسط ارتفاع ستون طبقه فوقانی اعمال شد. برای این منظور یک نیم طبقه فوقانی در مدل طراحی شد که وظیفه آن تحقق شرایط فوق بود. برای توضیح بیشتر در مورد مدل‌های آزمایشگاهی به مرجع [۹] رجوع شود. مدل‌های مذکور در شکل‌های ۳ تا ۶ و مشخصات مقاطع آنها در جداول ۱ تا ۴ ارائه شده است.



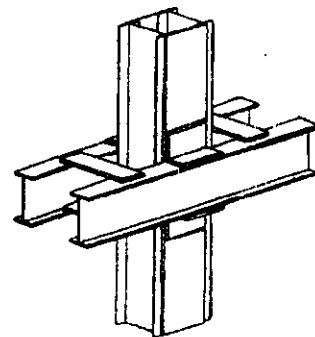
شکل ۳ مدل آزمایشگاهی اول



شکل ۴ مدل آزمایشگاهی دوم



الف) اتصال تقویت شده با سخت کننده جان و ورق بالا و پایین بالچکی








ب) اتصال ساده خورجینی بدون تقویت

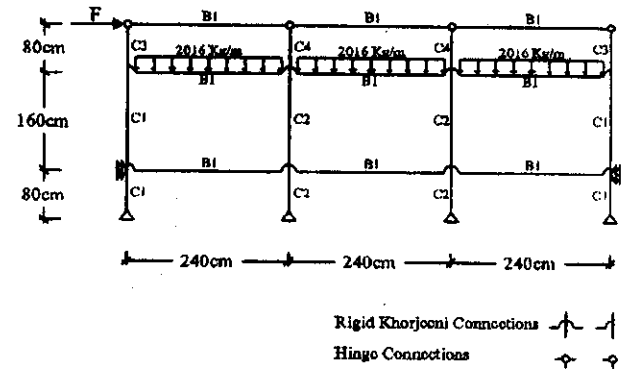
شکل ۲ اتصالات خورجینی به کاررفته در مدل‌های آزمایشگاهی اتصال خورجینی متداول، صرفاً شامل یک نبشی تحتانی و یک نبشی فوقانی است. لیکن در اتصال تقویت شده، براساس تحقیق انجام شده توسط آقایان مزروعی ومصطفایی [۳] علاوه بر نبشی‌های مذکور از ورقهای اتصال در بالا و پایین و نیز در طرفین ستون استفاده شده و ضمناً با استفاده از سخت کننده‌ها و لچکی‌ها، بر صلبیت و مقاومت اتصال افزوده می‌شود. در تحقیق مذکور که در حد اتصال انجام شده بود رفتار مناسبی از این اتصال مشاهده شده بود.

۲- شرح مدل‌های آزمایشگاهی

با توجه به محدودیتهای آزمایشگاهی، مقیاس یک دوم برای مدلسازی انتخاب و مقرر شد تا رفتار یک طبقه از قابهای چهار طبقه و سه دهانه مورد مطالعه قرار گیرد. ازاین رو دو ساختمان با مشخصات مورد نظر براساس بارگذارهای










جدول ۳ مشخصات مقاطع مدل آزمایشگاهی سوم

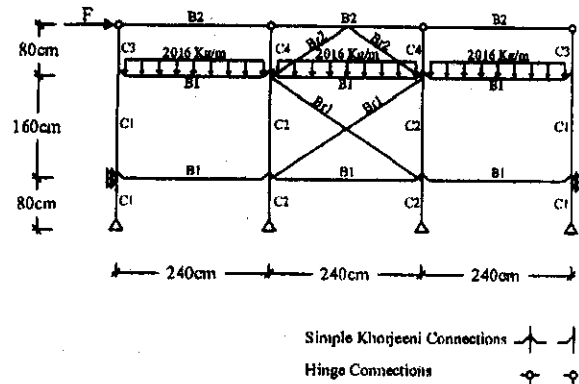
نویسجات	مشخصات مقطع	نوع مقطع
	2IPE140 $a_1=92$	C1
	2IPE140 PL 170*6 $a_1=115$	C2
	2IPE140 PL140*8 & PL100*6 $a_1=92$	C3
	2IPE140 PL170*8 & PL100*6 $a_1=115$	C4
	2IPE140	B1



شکل ۵ مدل آزمایشگاهی سوم




جدول ۴ مشخصات مقاطع مدل آزمایشگاهی چهارم

نویسجات	مشخصات مقطع	نوع مقطع
	IPE140	C1
	2IPE140 $a_1=80$	C2
	2IPE140 PL125*8 & PL100*6 $a_1=73$	C3
	2IPE140 PL125*8 & PL100*6 $a_1=80$	C4
	2IPE120	B1
	2IPE140	B2
	2UNP100	Br1
	2UNP50	Br2
	2UNP120	Br3







شکل ۶ مدل آزمایشگاهی چهارم

جدول ۱ مشخصات مقاطع مدل آزمایشگاهی اول

نویسجات	مشخصات مقطع	نوع مقطع
	2IPE 140 $a_1=92$	C1
	2IPE 140 PL 170*6 $a_1=115$	C2
	2IPE 140	B1

جدول ۲ مشخصات مقاطع مدل آزمایشگاهی دوم

نویسجات	مشخصات مقطع	نوع مقطع
	2IPE 140	C1
	2IPE 140 $a_1=80$	C2
	2IPE 120	B1
	2UNP 65	Br1

به منظور مقایسه رفتار مدل‌های آزمایشگاهی با رفتار مدل کامپیوتری آنها و انجام تحلیل غیر خطی، لازم بود مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی پروفیلها و ورقهای استفاده شده در مدل‌های آزمایشگاهی مشخص شود. لذا با تهیه نمونه های کششی بر اساس استاندارد ASTM [۱۰] از پروفیلها و ورقهای به کار رفته در ساخت مدل‌های آزمایشگاهی و انجام آزمایش کشش فولاد بر روی این نمونه ها، مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی آنها تعیین شد. این مقادیر در جدول ۵ ارائه شده است.

بار زنده آنها برابر $200 \frac{kg}{m^2}$ بود. از آنجا که در آیین‌نامه زلزله ایران مقدار وزن ساختمان براساس بار مرده، به‌علاوه درصدی از بار زنده (۲۰ درصد) به‌دست می‌آید، مقدار سربار گسترده روی قابها با توجه به عرض بارگیر $4/8 m$ برابر $4032 \frac{kg}{m}$ محاسبه شد. با توجه به ضریب مدل برای بار خطی که در این آزمایش برابر ۲ بوده، مقدار بار گسترده اعمالی به مدل برابر $2016 \frac{kg}{m}$ حاصل شد.

برای شبیه‌سازی این سربار گسترده در مدل‌های آزمایشگاهی، از شمش‌هایی سربی هر یک به ابعاد تقریبی $5 \times 10 \times 35$ سانتی‌متر و به وزن تقریبی $18/5$ کیلوگرم استفاده شد، که در تراز تیرها بر روی قابها تعبیه و مهار شدند.

پس از بارگذاری ثقلی مدل‌های آزمایشگاهی، سختی چرخشی هر یک از اتصال‌های خورجینی میانی و کناری در مدل‌های آزمایشگاهی تعیین شد. روش کار در تعیین سختی چرخشی اتصالات به این صورت بود که پس از اتمام بارگذاری ثقلی و ثبت مقادیر نهایی خیز تیرها، مدل کامپیوتری مدل‌های آزمایشگاهی توسط برنامه SAP 90 تهیه شد. سپس با روش سعی و خطا، سختی اتصالات در مدل‌های کامپیوتری تغییر داده شد تا مقادیر خیز وسط دهانه تیرها در مدل‌های کامپیوتری با مقادیر به‌دست آمده از بارگذاری ثقلی مدل‌های آزمایشگاهی برابر شود. مقادیر سختی به‌دست آمده از این روش، برای اتصالات میانی و کناری مدل‌های آزمایشگاهی در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶ مقادیر سختی اتصالات میانی و کناری مدل‌های آزمایشگاهی و مقادیر خیز و وسط دهانه تیرها

سختی اتصال میانی (Lm/m)	سختی اتصال کناری (Lm/rad)	خیز دهانه میانی (mm)	خیز دهانه کناری (mm)	
3400	1750	0.954	1.231	مدل آزمایشگاهی با اتصال صلب خورجینی
450	200	1.111	3.079	مدل آزمایشگاهی با اتصال ساده خورجینی

جدول ۵ مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی پروفیلها و ورقهای بکار رفته در ساخت مدل‌های آزمایشگاهی

PL 6	PL 8	UNP 65	IPE 120	IPE 140	
3146	3229	2774	3400	3446	(Py Kg/cm ²)
4056	5166	4258	4871	4882	(Fu Kg/cm ²)

۳- تجهیزات آزمایش

برای اعمال نیروی جانبی به مدل‌های آزمایشگاهی از جکهای هیدرولیکی که با پمپ دستی کار می‌کنند، استفاده شد. برای مدل‌های مهاربندی نشده از جک با ظرفیت اسمی ۵۰ تن و طول استروک ۲۵ سانتی‌متر و برای مدل‌های مهاربندی شده از جک با ظرفیت اسمی ۱۰۰ تن و طول استروک ۸ سانتی‌متر استفاده شد.

برای اندازه‌گیری نیروی جانبی اعمال شده توسط جکهای هیدرولیکی از نیروسنجهایی با ظرفیت اسمی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ تن استفاده شد.

برای اندازه‌گیری جابه‌جایی جانبی مدل‌های آزمایشگاهی و میزان دوران اتصالات، در اثر اعمال نیروی جانبی، از تغییر مکان‌سنجهایی با ظرفیت ۰،۳،۵،۱۰،۲۰/۲ و ۱ سانتی‌متر استفاده شد.

برای ثبت اطلاعات از ثبات اطلاعات^۱ استفاده شد. اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط نیروسنجها و تغییر مکان‌سنجها از طریق کابل‌هایی به این دستگاه منتقل شده و دستگاه ثبت اطلاعات آنها را بر روی دیسک ذخیره می‌کرد.

۴- بارگذاری ثقلی مدل‌های آزمایشگاهی و تعیین سختی اتصالات خورجینی

مقدار بار مرده قابهای در نظر گرفته شده برابر $800 \frac{kg}{m^2}$ و

1. Data logger

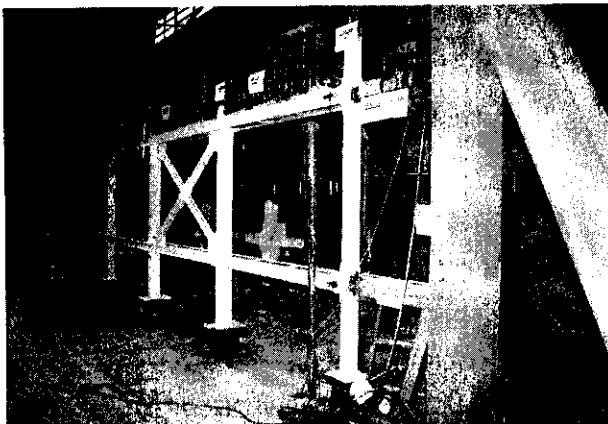
۵- نحوه برپایی مدل‌های آزمایشگاهی

هدف از انجام آزمایشهای حاضر، به دست آوردن رابطه بین نیروی برشی و تغییر مکان نسبی طبقه مورد نظر در آزمایش بود. برای این منظور با تعبیه کردن تکیه گاههایی در تراز تیر تحتانی طبقه، از تغییر مکان جانبی این تراز جلوگیری شد. در مدل‌های آزمایشگاهی اول و دوم، جکهای اعمال کننده نیروی جانبی، در تراز تیر فوقانی طبقه قرار داشتند، اما در مدل‌های آزمایشگاهی سوم و چهارم، این جکها در تراز نیم طبقه فوقانی قرار داشتند. مراحل مختلف برپایی مدل عبارت بود از:

- الف - نصب تکیه‌گاههای صلب مثلثی شکل در دو سمت کناری مدل آزمایشگاهی؛
- ب - نصب نشیمن‌گاه جکهای اعمال کننده نیروی جانبی بر روی تکیه‌گاههای صلب مثلثی شکل در تراز تعیین شده به منظور اعمال نیروی جانبی؛
- پ - قرار دادن و تنظیم نیروسنجها و جکهای اعمال کننده نیروی جانبی در محل‌های خود بر روی نشیمن‌گاه؛
- ت - نصب تکیه‌گاههای تراز تیر تحتانی بر روی تکیه‌گاههای صلب مثلثی شکل؛
- ث - نصب سیستم اطمینان (مهارهای جانبی). برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه مدل‌های آزمایشگاهی و همچنین به منظور جلوگیری از سقوط ناگهانی این مدل پس از وقوع مکانیزم در سیستم، از ۸ عدد مهار جانبی استفاده شد. مهارهای جانبی از آرماتورهای آجدار نمره ۸- که از یک طرف به دیوار صلب و از طرف دیگر به انتهای فوقانی ستونهای مدل توسط بستهای دو پیچ متصل شده بودند- تشکیل می‌شد. علاوه بر این به منظور داشتن تخمینی از نیروهای محوری ایجاد شده در این مهارها بر اثر حرکت جانبی مدل‌های آزمایشگاهی، یک نیروسنج یک تنی در یکی از مهارهای جانبی ستونهای میانی مدل قرار داده شد؛
- ج - زدن آب آهک به مدل آزمایشگاهی برای تشخیص

نقاطی از مدل که در آنها تسلیم رخ می‌دهد؛

ز- قرار دادن پایه‌های فلزی در محل‌های تعیین شده در اطراف مدل آزمایشگاهی، برای نگهداری تغییر مکان‌سنجها؛
و - نصب تغییر مکان‌سنجها به پایه‌های فلزی؛
هـ - اتصال کابل‌های نیروسنجها و تغییر مکان‌سنجها به دستگاه ثبت اطلاعات و تنظیم دستگاه ثبت کننده اطلاعات؛
ی - انجام پیش آزمایش (Pre Test).
در شکل ۷ تصویر برپایی مدل آزمایشگاهی دوم مشاهده می‌شود.



شکل ۷ تصویر برپایی مدل آزمایشگاهی دوم

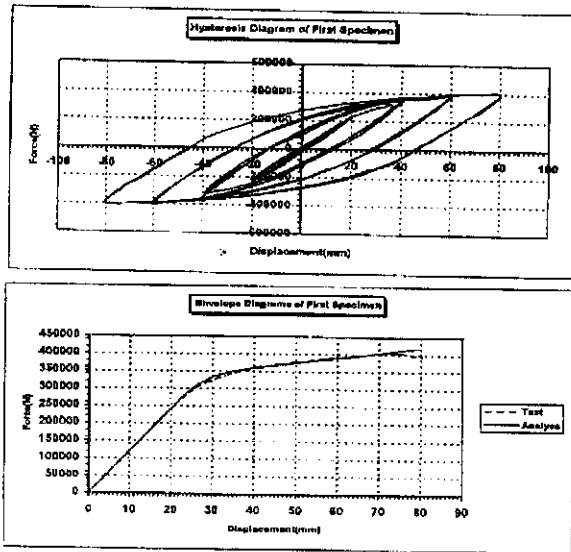
در شکل ۸ تصویر جک هیدرولیک و نشیمن‌گاه آن، نیروسنج، تکیه‌گاه در تراز تیر تحتانی طبقه، پایه‌های فلزی نگهدارنده تغییر مکان‌سنج، تغییر مکان‌سنج‌های واقع در تراز طبقه و نیم طبقه تحتانی برای ثبت تغییر مکان جانبی مدل و اتصال مفصلی پای ستون مشاهده می‌شود.

برای بارگذاری جانبی مدل‌های آزمایشگاهی از روش کنترل تغییر مکان استفاده شد. معیار کنترل کننده تغییر مکان، تغییر مکان جانبی خالص طبقه (تغییر مکانی نسبی) بود. سیکل‌های بارگذاری با استفاده از توصیه‌های مرجع [۱۱] به شرح زیر تعیین می‌شود:

- ۱- سه سیکل بارگذاری تا تغییر مکان $0.25\Delta y (\Delta \leq 0.5\Delta y)$
- ۲- سه سیکل بارگذاری تا تغییر مکان

در شکل ۹ منحنی هیستریزس نیرو- تغییر مکان جانبی این نمونه به دست آمده از آزمایش و منحنی پوش آن، مشاهده می شود.

این مدل در طی ۲۰ سیکل تا تغییر مکان جانبی نسبی طبقه برابر با ۸۰ میلیمتر، تحت بارگذاری جانبی دوره ای



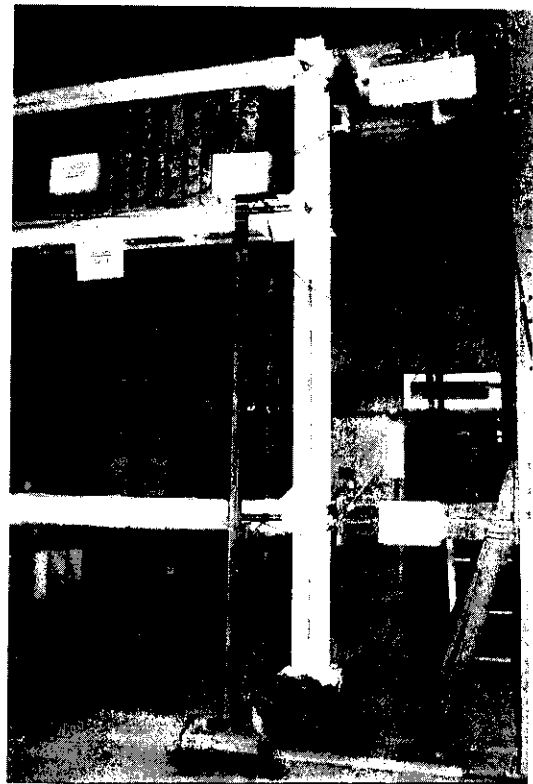
شکل ۹ منحنیهای هیستریزس و پوش مدل آزمایشگاهی اول قرار گرفت. رفتار مدل تا تغییر مکان جانبی نسبی طبقه برابر ۲۰ میلیمتر خطی بوده و رفتار غیرخطی از این تغییر مکان به بعد شروع شد. در پایان به علت ایجاد تغییر شکلهای بزرگ در پای ستونهای طبقه، آزمایش متوقف شد. برای توضیحات بیشتر به مرجع [۹] رجوع شود.

در شکل ۱۰ تصویر مفصل پلاستیک در انتهای تحتانی ستون میانی و کمانش ورقهای تقویتی آن مشاهده می شود. مدل های آزمایشگاهی مورد مطالعه همچنین با استفاده از نرم افزار DRAIN-2DX مورد تحلیل هل دادن^۱ قرار گرفت. در منحنی مربوط به پوش رابطه نیرو- تغییر مکان جانبی حاصل از آزمایش، نتایج حاصل از این تحلیل نیز نشان داده شده که بیانگر تطابق بسیار خوب نتایج آزمایش و

۱. Push Over

$$0.6\Delta y (\Delta \leq 0.8\Delta y)$$

- ۳- سه سیکل بارگذاری تا تغییر مکان $\Delta = 1\Delta y$
- ۴- سه سیکل بارگذاری تا تغییر مکان $\Delta = 2\Delta y$
- ۵- سه سیکل بارگذاری تا تغییر مکان $\Delta = 3\Delta y$
- ۶- سه سیکل بارگذاری تا تغییر مکان $\Delta = 4\Delta y$



شکل ۸ تصویر جک، نیروسنج، تغییر مکان سنجهای ثبت کننده تغییر مکان جانبی مدل آزمایشگاهی و اتصال مفصلی پای ستون

پس از تکمیل سیکل بارگذاری $\Delta = 4\Delta y$ سیکلهای بارگذاری باید تا جایی که نمونه مقاومت می کند ادامه یابد تا تغییر مکانهای $\Delta = 5\Delta y, \Delta = 6\Delta y, \Delta = 7\Delta y$ و ... ایجاد شود که هر یک از تغییر مکانها باید در دو سیکل تکرار شود.

۶- نتایج آزمایش بارگذاری جانبی مدل های

آزمایشگاهی

۱-۶ نتایج مدل آزمایشگاهی اول

مرجع [۹] رجوع شود.

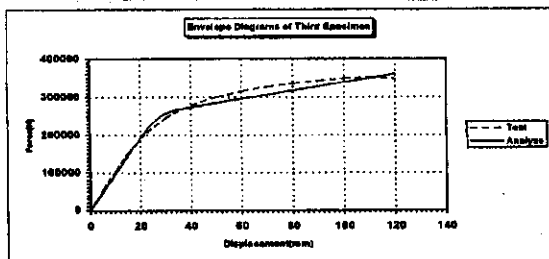
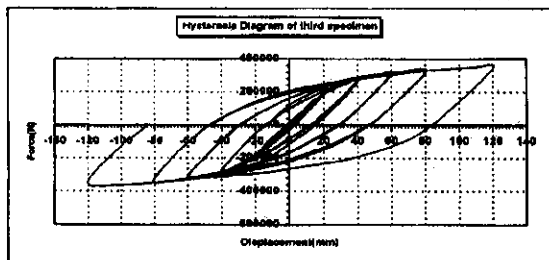
در شکل ۱۲ تصویر کمانش ورق اتصال مهاربند، پارگی جوش اتصال سخت کننده ورق اتصال به ورق اتصال مهاربند، پوسته شدگی آهک مهاربند، پوسته شدگی آهک ستون میانی و پوسته شدگی آهک نبشی اتصالات میانی در نیم طبقه تحتانی مشاهده می شود.



شکل ۱۲ تصویر کمانش ورق اتصال مهاربند (مدل آزمایشگاهی دوم)

۳-۶- نتایج مدل آزمایشگاهی سوم

در شکل ۱۳ منحنی هیستریزس نیرو- تغییر مکان جانبی این نمونه، به دست آمده از آزمایش و منحنی پوش آن، به دست آمده از آزمایش و تحلیل کامپیوتری، مشاهده می شود.



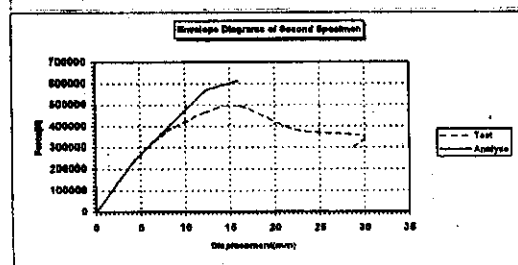
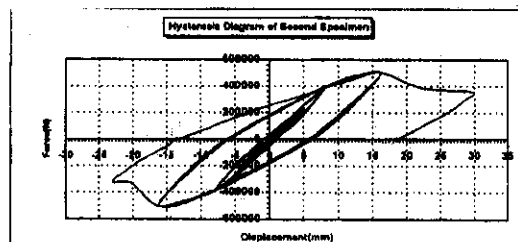
شکل ۱۳ منحنیهای هیستریزس و پوش (مدل آزمایشگاهی سوم)



شکل ۱۰ تصویر انتهای ستون میانی و کمانش ورقهای تقویتی ستون در پایان آزمایش (مدل آزمایشگاهی اول)

۲-۶- نتایج مدل آزمایشگاهی دوم

در شکل ۱۱ منحنی هیستریزس نیرو- تغییر مکان جانبی این نمونه به دست آمده از آزمایش و منحنی پوش آن به دست آمده از آزمایش و تحلیل کامپیوتری، مشاهده می شود.

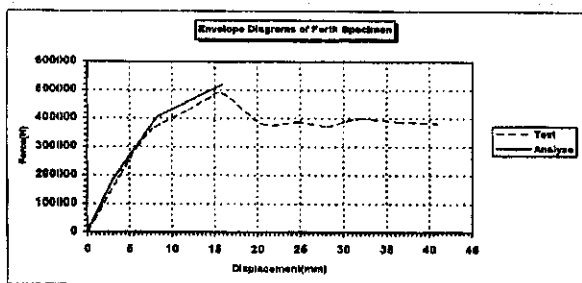
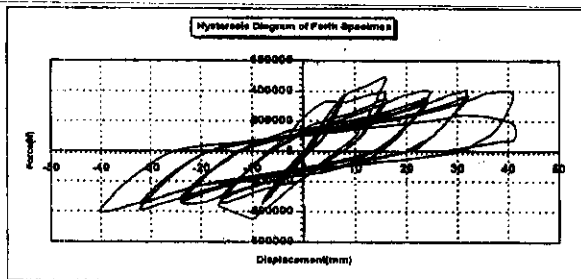


شکل ۱۱ منحنیهای هیستریزس و پوش مدل آزمایشگاهی دوم

این مدل در طی ۱۲ سیکل تا تغییر مکان جانبی نسبی طبقه برابر ۱۶ میلیمتر تحت بارگذاری جانبی دوره ای قرار گرفت. رفتار مدل تا تغییر مکان جانبی نسبی طبقه برابر ۸ میلیمتر، خطی بوده و رفتار غیرخطی از این تغییر مکان به بعد شروع شد. در پایان به علت کمانش ورقهای اتصال مهاربند آزمایش متوقف شد. برای توضیحات بیشتر به

۶-۴- نتایج مدل آزمایشگاهی چهارم

در شکل ۱۶ منحنی هیستریزس نیرو- تغییر مکان جانبی این نمونه، به دست آمده از آزمایش و منحنی پوش آن، به دست آمده از آزمایش و تحلیل کامپیوتری، مشاهده می‌شود.



شکل ۱۶ منحنی‌های هیستریزس و پوش (مدل آزمایشگاهی چهارم)

این مدل در طی ۱۹ سیکل تا تغییر مکان جانبی نسبی طبقه برابر ۴۰ میلیمتر، تحت بارگذاری جانبی دوره‌ای قرار گرفت. رفتار مدل تا تغییر مکان جانبی نسبی طبقه برابر ۸ میلیمتر، خطی بوده و رفتار غیرخطی از این تغییر مکان به بعد شروع شد. در پایان به علت شکستن برخی از نبشی‌های اتصالات میانی و جوشهای این اتصالات در تراز نیم طبقه تحتانی، آزمایش متوقف شد. برای توضیحات بیشتر به مرجع [۹] مراجعه شود.

در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ تصاویر بریده شدن نبشی فوقانی اتصال میانی نیم طبقه تحتانی از محل اتصال دو بال نبشی به یکدیگر و پارگی جوش متصل کننده نبشی تحتانی این اتصال به تیر، پارگی بال ناودانی در مجاورت محل تقاطع مهاربندها و کمانش مهاربند فشاری، مشاهده می‌شود.

این مدل در طی ۲۱ سیکل تا تغییر مکان جانبی نسبی طبقه برابر ۱۲۰ میلیمتر، تحت بارگذاری جانبی دوره‌ای قرار گرفت. رفتار مدل تا تغییر مکان جانبی نسبی طبقه برابر ۲۰ میلیمتر خطی بوده و رفتار غیرخطی از این تغییر مکان به بعد شروع شد. در پایان به علت ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ در پای ستون‌های طبقه و تسلیم تیر طبقه در انتهای ورق‌های تقویتی اتصال، آزمایش متوقف شد. برای توضیحات بیشتر به مرجع [۹] رجوع شود.

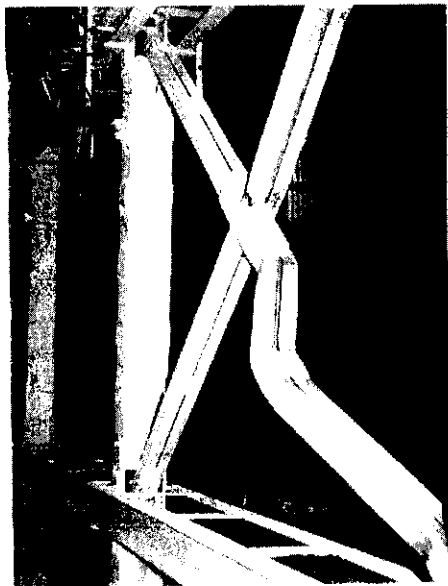
در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ تصاویر تسلیم تیر طبقه در انتهای ورق تقویتی اتصال کناری و تشکیل مفصل پلاستیک در انتهای تحتانی ستون کناری، مشاهده می‌شود.



شکل ۱۴ تصویر تسلیم تیر در انتهای ورق تقویتی اتصال کناری (مدل آزمایشگاهی سوم)



شکل ۱۵ تصویر تغییر شکل دائمی در انتهای تحتانی ستون کناری در پایان آزمایش (مدل آزمایشگاهی سوم)



شکل ۱۹ تصویر کمانش مهاربند فشاری
(مدل آزمایشگاهی چهارم)

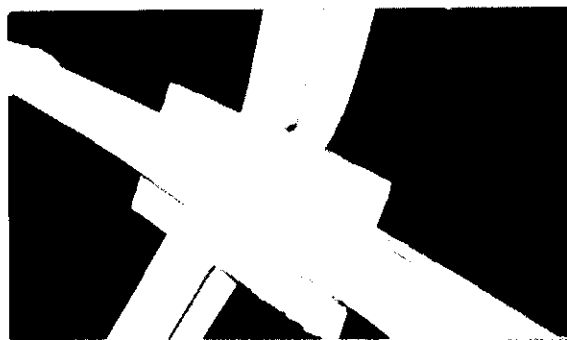
مکان نظیر نقطه شروع رفتار غیرخطی در منحنی پوش نیرو- تغییر مکان جانبی مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. برای تعیین تغییر مکان حداکثر مدلها، نتایج آزمایش نشان داد که مدل‌های مذکور قابلیت تحمل تغییر مکانهای بزرگی را بدون کاهش در مقاومت دارا هستند. لذا با توجه به محدودیت‌هایی که در مراجع مختلف در خصوص تغییر شکل نسبی طبقات یا دوران مفصل پلاستیک بیان می‌شود، مقدار $h/3$ که ارتفاع طبقه است، در نظر گرفته شد. از تقسیم کردن تغییر مکان نهایی (Δu) بر تغییر مکان تسلیم (Δy) ضریب شکل‌پذیری (μ) به دست می‌آید. مقادیر مذکور در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۸ مقادیر تغییر مکان تسلیم (Δy)، تغییر مکان نهایی (Δu) و ضریب شکل‌پذیری (μ) مدل‌های آزمایشگاهی اول و سوم

تغییر مکان نهایی آزمایشگاهی (mm)	تغییر مکان تسلیم آزمایشگاهی (mm)	μ حاصل از آزمایش	
48.00	20.00	2.400	مدل آزمایشگاهی اول
48.00	20.00	2.400	مدل آزمایشگاهی سوم



شکل ۱۷ تصویر بریده شدن نبشی فوقانی اتصال میانی نیم طبقه تحتانی در محل اتصال دو بال نبشی به یکدیگر در پایان آزمایش (مدل آزمایشگاهی چهارم)



شکل ۱۸ تصویر پارگی بال ناودانی در مجاورت محل تقاطع مهاربندها (مدل آزمایشگاهی چهارم)

۷- شکل‌پذیری مدل‌های آزمایش شده

بر اساس نتایج به دست آمده از مدل‌های آزمایشگاهی و مقایسه این نتایج با نتایج تحلیل مدل کامپیوتری آنها، ضریب شکل‌پذیری (μ) مدل‌های آزمایشگاهی تعیین شد.

۷-۱- ضریب شکل‌پذیری (μ) مدل‌های آزمایشگاهی مهاربندی نشده

ضریب شکل‌پذیری به صورت نسبت تغییر مکان حداکثر (Δu) به تغییر مکان متناظر با تسلیم (Δy) تعریف می‌شود. تغییر مکان تسلیم حاصل از آزمایش، برابر با تغییر

شده، ارائه شده است.

جدول ۱۰ حداکثر دوران اتصالات مدل‌های آزمایشگاهی، ثبت شده در طی انجام آزمایش

انصال مدل آزمایشگاهی	کناری (rad)	میانی (rad)
اول	- 0.019660	+0.021283
دوم	-----	+0.009133
سوم	- 0.040250	- 0.061310
چهارم	+0.017991	- 0.011250

۸- نتایج و پیشنهادها

در تحقیق حاضر دو نوع سیستم ساختمانی دارای اتصالات خورجینی در نظر گرفته شد. ۱- قاب مهاربندی نشده دارای اتصالات تقویت شده (صلب) خورجینی ۲- قاب مهاربندی شده دارای اتصالات متداول خورجینی. به منظور تعیین ضریب شکل‌پذیری این سیستم‌های ساختمانی، چهار مدل آزمایشگاهی قاب دارای اتصالات خورجینی در نظر گرفته شد و با آزمایش آنها ظرفیت شکل‌پذیری مدل‌های آزمایشگاهی به‌دست آمد. در جریان آزمایش مدل‌های آزمایشگاهی، مشاهداتی ثبت شد که برخی از آنها ذیلاً ذکر می‌شود.

۱- در آزمایش‌های اول و سوم مشاهده شد که اتصالات تقویت شده خورجینی رفتار مناسبی داشته و به دلیل مقاومت بالا، در مقابل لنگرهای ایجاد شده مقاومت می‌کنند. لذا تغییر شکلهای غیرارتجاعی در نواحی خارج از اتصالات رخ می‌دهد. این چنین رفتاری در مقابل بارهای جانبی برای قاب بسیار مطلوب است.

۲- همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، به علت زیاد بودن فواصل خطوط جوش در جوشکاری منقطع ورق تقویتی به بال ستون، ورقهای تقویتی بالهای ستون کماتش کرده‌اند. در نتیجه لازم است در طراحیها فواصل خطوط

۲-۷- ضریب شکل‌پذیری (μ) مدل‌های آزمایشگاهی

مهاربندی شده

برای هر یک از مدل‌های آزمایشگاهی فوق نیز مانند مدل‌های آزمایشگاهی مهاربندی نشده، ضریب شکل‌پذیری محاسبه شد. تغییر مکان تسلیم حاصل از آزمایش از معادلسازی منحنیهای پوش مدلها به منحنی دو خطی به‌دست آمد، به این صورت که یک خط در امتداد شیب قسمت خطی منحنی پوش و خط دیگری از نقطه اوج منحنی پوش (نقطه قبل از وقوع افت مقاومت) در امتداد شیب قسمت غیرخطی ترسیم و تغییر مکان نظیر محل برخورد این دو خط، به عنوان تغییر مکان تسلیم در نظر گرفته شد. تغییر مکان نهایی برابر $h/1$ - که h ارتفاع طبقه است - در نظر گرفته شد. مقدار $h/1$ از روی منحنیهای هیستریزس نیرو- تغییر مکان جانبی مدل‌های آزمایشگاهی دوم و چهارم انتخاب شد، به این دلیل که منحنیهای هیستریزس این مدلها تا تغییر مکان نظیر $h/1$ رفتاری پایدار و بدون افت مقاومت و سختی از خود نشان دادند و از تغییر مکان نظیر $h/1$ به بعد در منحنیهای هیستریزس این مدلها افت مقاومت و سختی قابل توجهی به چشم می‌خورد. مقادیر تغییر مکانها و ضریب شکل‌پذیری در جدول ۹ ارائه شده‌اند.

جدول ۹ مقادیر تغییر مکان تسلیم (Δy)، تغییر مکان نهایی

(Δu) و ضریب شکل‌پذیری (μ)

(مدل‌های آزمایشگاهی دوم و چهارم)

مدل آزمایشگاهی	Δu حاصل از آزمایش	تغییر مکان نهایی (mm)	تغییر مکان تسلیم آزمایشگاهی (mm)
مدل آزمایشگاهی دوم	2.000	16.00	8.000
مدل آزمایشگاهی چهارم	2.133	16.00	7.500

در جدول ۱۰ مقادیر حداکثر دوران اتصالات کناری و میانی مدل‌های آزمایشگاهی که در ضمن آزمایش مدلها اندازه‌گیری

۱۰- منابع

- [۱] مقدم، حسن؛ کرمی، رضا؛ "مطالعات انجام شده در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن"؛ ۱۳۷۰.
- [۲] زاهدی، مرتضی؛ برخوردار، محمد علی؛ فروغی، محمد؛ "بررسی اتصالات خورجینی گیردار و فرمول‌بندی حاکم بر آنها؛" چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف؛ تهران اردیبهشت ۱۳۷۶.
- [۳] مزروعی، علی؛ مصطفایی، حسین؛ "شیوه‌های نوین اتصالات خورجینی؛" سومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی زلزله؛ تهران ۱۳۷۸.
- [۴] میرقادری، سید رسول؛ مزروعی، علی؛ دهقانی رنانی، مهدی؛ "بررسی نظری و تجربی اتصالات تیرهای خورجینی به ستون و ارائه جزئیات یک اتصال گیردار جدید؛" پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ دانشگاه تهران؛ ۱۳۷۹.
- [۵] مزروعی، علی؛ مصطفایی، حسین؛ "بررسی تجربی رفتار برشی اتصالات خورجینی متداول و تقویت شده؛" اولین کنفرانس علمی - تخصصی مهندسان راه و ساختمان ایران؛ تهران مهرماه ۱۳۷۸.
- [۶] مقدم، حسن؛ مؤید علایی، علی؛ "تقویت لرزه‌ای سازه‌های اتصال خورجینی؛" پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ دانشگاه صنعتی شریف؛ ۱۳۷۹.
- [۷] آقاچوک، علی‌اکبر؛ فتحی، مجتبی؛ "بررسی رفتار دینامیکی غیر خطی قابهای با اتصال خورجینی تحت نیروهای زلزله؛" پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ تربیت مدرس؛ ۱۳۷۶.
- [۸] کمیته بازنگری آیین‌نامه؛ "آیین‌نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله؛" نشریه شماره ۲۵۳ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن؛ استاندارد ۲۸۰۰؛ ویرایش دوم؛ ۱۳۷۸.

جوش در جوشکاری منقطع، به‌دقت و با توجه به ظرفیت کماتش ورقهای تقویتی، طراحی شود.

۳- همانگونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود در مدل آزمایشگاهی دوم به علت زیاد بودن فاصله بین انتهای مهاربند تا جان ستون، ورق اتصال مهاربند در این محل کماتش کرده است. برای جلوگیری از این پدیده باید انتهای مهاربند تا حد امکان به طرف جان ستون امتداد یافته و فاصله بین انتهای مهاربند تا جان ستون به حداقل مقدار ممکن کاهش یابد.

۴- همانگونه که در منحنی هیستریزس مدل آزمایشگاهی چهارم مشاهده می‌شود، سیستم قابهای با اتصالات متداول خورجینی و مهاربندی هم‌مرکز، به علت افت مقاومت و سختی، سیستم مطلوبی برای مقابله با نیروهای زلزله نیست. لذا توصیه می‌شود در زمینه سیستمهای دیگر در ساختمانهای دارای اتصال خورجینی - که بتواند انرژی تحمیل شده از طرف زلزله را با یک رفتار پایدار و مناسب جذب و مستهلک نماید - تحقیقات بیشتری صورت گیرد.

در نهایت با توجه به نتایج آزمایشها، ظرفیت شکل‌پذیری قاب‌های فولادی مهار نشده دارای اتصالات خورجینی تقویت شده، حداقل برابر ۲/۴ و ظرفیت شکل‌پذیری قاب‌های مهار شده دارای اتصالات خورجینی متداول حداکثر برابر ۲ پیشنهاد می‌شود.

۹- تشکر و قدردانی

آزمایشهای گزارش شده در این مقاله در آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن و با پشتیبانی مالی این مرکز انجام شد. ضمناً در طراحی روند آزمایش و برپایی مدل آزمایشگاهی جناب آقای دکتر علی مزروعی راهنمایی‌های ارزنده‌ای ارائه فرمودند. نویسندگان بدین‌وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از ایشان و نیز مسؤولان محترم این مرکز ابراز می‌دارند.

[11] AISC, "Qualifying Cyclic Tests of Beam - to - Column and Link - to - column Connections", Seismic Provisions for Steel Building, Appendix S, pp. 25-32.

[9] آفاکوچک، علی‌اکبر؛ وشکینی، پیمان؛ "تعیین ضریب رفتار (R) برای قابهای فولادی دارای اتصالات خورجینی؛" پایان نامه کارشناسی ارشد؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ ۱۳۸۰.

[10] "Standard Test Methods for Testing of Metallic Materilas (Metric) ", ASTM Designation: E8M-99, 1997; pp. 78-98.