

## بررسی رفتار چرخه‌ای سیستم‌های مهاربندی مرکب

زهرا صنیعی نیا<sup>۱</sup> و مهدی قاسمیه<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup>دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۸۹/۰۶/۰۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۶/۰۸، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۶/۲۸)

### چکیده

یکی از مشکلات مهاربندهای هم مرکز در مناطق لرزه‌ای وقوع کمانش در هنگام اعمال بار فشاری است که این مساله باعث می‌شود مهاربند قبل از رسیدن به حد تسلیم ناپایدار شود. پر کردن قوطی‌های فولادی با بتن یک راه حل مناسب برای این مساله است. استفاده از مهاربندهای مرکب، ظرفیت فشاری و کششی مقطع را افزایش داده، و حتی بعد از چندین حلقه رفت و برگشتی و وارد شدن به مرحله غیر الاستیک رفتار هیستریزس مهاربند را بهبود می‌بخشد. زیرا که مدهای کمانشی را تغییر داده و بدین صورت کمانش‌های موضعی را به تاخیر انداخته و شکل پذیری مقطع را افزایش می‌دهد. این تحقیق به مطالعه بر روی روش‌های مختلف در بهبود مهاربندهای مرکب پرداخته و پارامترهای مختلفی از جمله نسبت عرض به ضخامت، نسبت لاغری، نوع بتن و فولاد مصرفی را مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که اثر پرکنندگی بر روی رفتار این نوع مهاربندهای مرکب بستگی به نسبت عرض به ضخامت و همچنین نسبت لاغری موثر دارد، بطوریکه در نسبت عرض به ضخامت کوچکتر، بهبود در رفتار مهاربند دیده می‌شود. همچنین در تراز شکل پذیری پایین، پرکنندگی قطعات فولاد و بتن در بهبود و ظرفیت بعد از کمانش نمونه‌ها تاثیر چشمگیری ندارد. در ادامه مقایسه عددی بین روش‌های طراحی ارائه شده در آیین‌نامه‌های معتبر بین المللی برای مهاربندهای مرکب صورت گرفته است بطوریکه آیین‌نامه ژاپن با در نظر گرفتن اثرات کمانش موضعی و پدیده ترک خوردگی بتن و میزان مشارکت آن در باربری، مقطع بزرگتری را پیشنهاد نمود که در نتیجه میزان جذب انرژی آن بمراتب بیشتر است.

**واژه‌های کلیدی:** مهاربند مرکب، رفتار هیستریزس، شکل‌پذیری، ظرفیت بعد از کمانش

### مقدمه

متنوعی در مورد نحوه عملکرد مهاربندهای مرکب وجود دارد.

Goal و همکارانش [۱] برای اولین بار رفتار اینگونه مهاربندها را با یک سری آزمایش، بررسی کردند. Broderick و همکاران [۲] یک سری مطالعات تجربی بر روی عملکرد اعضای فولادی توخالی و پر شده با بتن، تحت بار یکنواخت و متناوب محوری انجام دادند. در این آزمایشات مشاهده شد وجود بتن به عنوان یک ماده پرکننده بر روی مد خرابی و بار کششی و فشاری تاثیر گذار است. نتایج همچنین نشان داد که ماده پرکننده به مقاومت فشاری مهاربند حتی بعد از چندین بار رفت و برگشتی غیر الاستیک کمک می‌کند، و این امر به افزایش ظرفیت شکل پذیری با مانع شدن یا محدود کردن کمانش موضعی انجام می‌شود. kimura و همکاران نشان داده‌اند

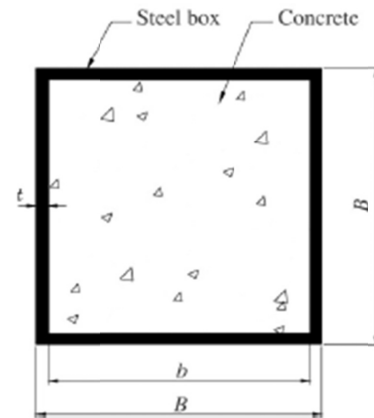
در اثر وقوع زلزله، انرژی جنبشی عظیمی به سازه وارد می‌شود و مطالعات نشان داده است که اتلاف انرژی، بصورت استفاده تنها از ظرفیت الاستیک اعضا، از لحاظ اقتصادی مناسب نمی‌باشد. نظر به اینکه هر یک از مواد مصرفی در ساختمان احتمالاً به سهم خود دارای شکل‌پذیری و میرایی ذاتی است، ما را به این سمت سوق می‌دهد که شاید به کمک همین مواد که متداول‌ترین آنها بتن و فولادند، و رفع عیوب هر یک به کمک دیگری بتوان به همان روشهای سنتی مهاربندهایی ساخت که علاوه بر دوام و پایداری در مقابل بارهای ثقلی، میرایی و شکل‌پذیری کافی در مقابل حرکات جانبی را نیز داشته باشند. چنین مهاربندهایی، مهاربندهای مرکب از بتن و فولادند (شکل ۱). در ادبیات فنی مطالعات و تحقیقات

کرنش نمی‌توان در نظر گرفت. اما از طرفی زمانیکه بتن در داخل قوطی یا لوله‌های فولادی محصور است، مقاومت محدود شده بتن فراتر از ظرفیت فشاری بتن خواهد بود. به منظور شناخت رفتار دقیق مهاربندهای قوطی شکل آزمایشات شکست این نوع مهاربندها توسط Elchalakon و Zhoo [۸] صورت گرفت، همچنین اثرات سه نوع پروتکل مختلف بارگذاری بر رفتار هیستریزس غیر الاستیک این مقاطع بررسی شد و محدوده مناسبی برای لاغری عضو برای طراحی اعضای لرزه‌ای پیشنهاد شد.

در کار تحقیقاتی دیگر که توسط Han و Yang [۹] صورت گرفت، ۸ نمونه پر شده با بتن تحت بار محوری ثابت و ممان خمشی متناوب افزایشی مورد آزمایش قرار گرفتند. پارامترهای مورد بررسی در آن تحقیق شامل مقاومت بتن و سطح بارگذاری می‌باشد. در نهایت رابطه ساده ای برای لنگر- انحنای بار- تغییر مکان و همچنین شاخص شکل پذیری برای مقاطع مرکب که تحت بار محوری همراه با لنگر خمشی متناوب هستند ارائه شد.

Liang و همکارانش [۱۰] با استفاده از برنامه Opensees [۱۱] اثرات کمانش موضعی را جهت بدست آوردن مقاومت نهایی و شکل پذیری این مقاطع لحاظ نمودند. در بررسی صورت گرفته توسط Zhong و همکاران [۱۲] مشخص گردید، کمانش موضعی در نمونه‌های مرکب متفاوت از کمانش موضعی در نمونه‌های تو خالی است بطوریکه، در نمونه‌های مرکب در ابتدا بال مقطع به سمت خارج و سپس جان به سمت داخل کمانش می‌کند در حالیکه در نمونه‌های تو خالی، بال به سمت داخل و جان به سمت خارج کمانش می‌کند. Hajjar و همکاران [۱۳] در تحقیقات خود نشان دادند، پرکنندگی بتن با تغییر مد کمانشی موضعی در حوزه مفصل پلاستیک، مقاومت را افزایش و شکل پذیری را بهبود می‌بخشد. همچنین، حضور بتن شدت آن را کاهش داده، بصورتیکه در نمونه‌های تو خالی؛ کمانش موضعی در یک نوار خیلی باریک متمرکز می‌شود. لیکن در نمونه‌های مرکب، کمانش موضعی بر روی سطح بزرگتری گسترش یافته است و یک برآمدگی نسبتاً مسطحی را تشکیل داده و بدین شکل تمرکز تنش به خصوص در گوشه‌ها کاهش می‌یابد و میزان مقاومت خستگی نیز افزایش می‌یابد. Szmigiera [۱۴] در یک کار آزمایشگاهی ستون‌های تشکیل شده از پروفیل‌های فولادی تقویت شده با بتن را

که این مقاطع، مقاومت خوبی در مقابل آتش سوزی از خود نشان می‌دهند [۳]. Varma و همکاران [۴] رفتار مقاطع مرکبی را که فولاد و بتن آن از مصالح با مقاومت بالا تشکیل شده بود و تحت بار محوری و خمش به طور همزمان واقع بودند را در آزمایشگاه بررسی نمودند.

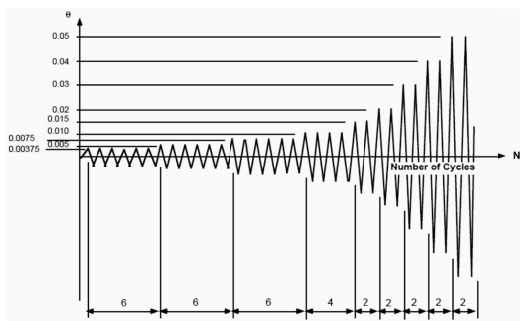


شکل ۱- مقطع یک مهاربند مرکب

Liang [۵] رفتار غیر الاستیک مقاطع مرکب را با استفاده از المان الیافی غیر خطی و با در نظر گرفتن اثرات کمانش موضعی به صورت عددی بررسی نمود. در آن تحقیق اثرات نسبت فولاد و مقاومت بتن بر روی مقاومت نهایی و شکل پذیری این اعضا با استفاده از مفهوم عرض موثر مورد بررسی قرار گرفت. Tort و Hajjar [۶] در یک کار تحقیقاتی به بررسی کمانش موضعی در تیر ستون‌های فولادی پر شده با بتن و همچنین اتصالات در قاب‌های مرکب پرداختند. در این راستا خرابی ناشی از کمانش موضعی با مشاهده و بررسی نتایج تجربی و با استفاده از تحلیل غیر خطی بصورت کمی مدلسازی شد بطوریکه مقادیر تابع خرابی بر اساس پارامترهایی که طبیعت این اعضای مرکب را نشان می‌دهند، تعریف شده است. بدین منظور المان الیافی پایه فرمولاسیون اجزای محدود برای تعیین ظرفیت کلی و تقاضای لرزه‌ای معرفی شده است.

نتایج تحقیقات انجام شده توسط Wenhui و Xiaoyang [۷] نشان می‌دهد که مقاومت مقاطع مرکب مجموع مقاومت‌های مواد تشکیل دهنده آنها است. بطوریکه مقاومت آن بدون توجه به محدودیت کرنشی به حاصل ضرب تنش جاری شدن در سطح مقطع آن در نظر گرفته می‌شود. این در حالیست که بتن کمتر شکل پذیر بوده و مقاومت آن را بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های

جهت تحلیل استفاده گردیده، برای مدل کردن مهاربندها از المان‌های تیر- ستون استفاده شده است. مصالح مورد استفاده در این تحقیق شامل فولاد به عنوان هسته و قوطی پیرامونی و بتن به عنوان بخشی از پوشش می‌باشد. رفتار غیر خطی بتن در نرم افزار Opensees بر مبنای تئوری شکست پلاستیک بتن است. همچنین برای بررسی رفتار متناوب نمونه‌های مورد بررسی از بارگذاری متناوب SAC [۱۸] استفاده شده است (شکل ۲).



شکل ۲- تاریخچه بارگذاری شکل SAC [۱۸]

به منظور اعتبار سنجی روش ارائه شده، چندین مهاربند مرکب متشکل از بتن و فولادی که توسط Broderick و همکارانش [۲] که در آزمایشگاه تحت بارگذاری محوری متناوب واقع شده، جهت مدلسازی انتخاب گردید. فولاد بکار رفته در این نمونه‌های مربع یا مستطیلی شکل، با مقاومت تسلیم ۲۳۵ پاسکال و مقاومت نهایی آن بین ۳۶۰ الی ۵۱۰ پاسکال می‌باشد. طول نمونه‌ها ۱۱۰۰ میلیمتر و مقاومت فشاری و کششی بتن داخل آنها بصورت میانگین به ترتیب ۲۴ و ۲/۵۳ پاسکال می‌باشد و به منظور بررسی رفتار متناوب نمونه‌ها از بارگذاری ECCS [۱۹] استفاده شده است. نتایج تجربی و عددی یکی از این نمونه‌ها با مقطع مربعی ۲۰×۲۰×۲ با استفاده از منحنی پاسخ بار- تغییر مکان در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. محورهای افقی و قائم به ترتیب نشان دهنده تغییر مکان محوری و نسبت نیرو به مقاومت اسمی مقطع می‌باشد. نتایج مدل عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی دارند؛ بصورتیکه در این نمونه بیشترین مقدار  $F/(fyAs)$  که نشان دهنده نسبت نیرو به مقاومت اسمی مقطع می‌باشد در حالت تجربی برابر ۱/۳ و در حالت عددی این مقدار ۱/۲۸ می‌باشد.

مورد بررسی و ارزیابی قرار داد. متغیرهای این آزمایش شامل نحوه بارگذاری و مقاومت بتن پوششی بود. Dicler و Mehta [۱۵] در تحقیق خود نحوه تغییر مکان در مقابل نیروی متناوب محوری و چگونگی کماتش این اعضا را با استفاده از مدلسازی‌های غیر خطی بررسی کردند. در ادامه رفتار محوری غیر خطی تحت بارگذاری متناوب بررسی و منحنی نیرو- تغییر مکان برای مهاربندهای با مقطع قوطی تحقیق شده است و لیکن روش ارائه شده در نحوه مدلسازی می‌تواند برای انواع دیگر مهاربندها مورد بررسی قرار گیرد. رهایی و علینیا [۱۶] سازه‌های بتنی را با استفاده از مهاربندهای همگرای متداول و سیستم‌های مهاربند مرکب مقاوم سازی نمودند. سپس رفتار این سازه‌ها توسط روش استاتیکی غیر خطی (پوش اور) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج دو روش مهاربندی با یکدیگر مقایسه شد. همچنین در سال‌های اخیر تحلیل‌های دینامیکی با استفاده از شتاب نگاشت‌های مختلف بر روی مهاربندهای مرکب توسط Shimizu و Watanabe ارائه شده است [۱۷].

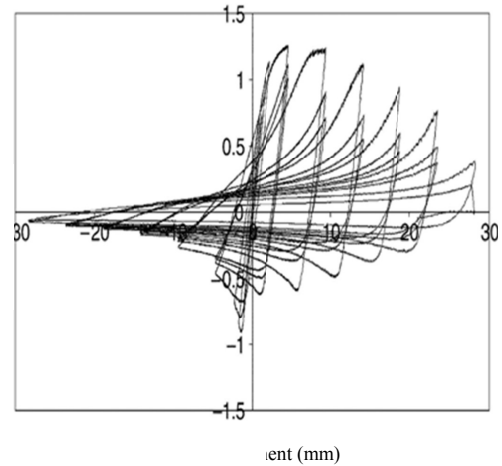
با توجه به اینکه در تحقیقات انجام شده تا کنون نگاهی متمرکز بر روی کلیه پارامترهای موثر، از جمله پارامترهای هندسی، مکانیکی و چگونگی رفتار لرزه‌ای مهاربندهای مرکب به صورت جامع صورت نگرفته است لذا لزوم انجام این تحقیق ضروری به نظر می‌رسد. همچنین در تحقیقات صورت گرفته تا کنون، هیچ گونه مقایسه رفتاری بین مهاربندهای مرکب طراحی شده توسط آیین‌نامه‌های مختلف بین المللی انجام نشده است، لذا لازم به نظر می‌رسد تا با مقایسه جذب انرژی در رفتار چرخه ای اینگونه مهاربندها، صحت و دقت روابط موجود در آیین‌نامه‌های مختلف (ژاپن، اروپا و آمریکا) مورد بحث و بررسی قرار گیرد. با توجه به دلایل ذکر شده در فوق، سعی شده تا با انجام مدلسازی عددی به این دو مهم پرداخته شود.

## مدلسازی عددی

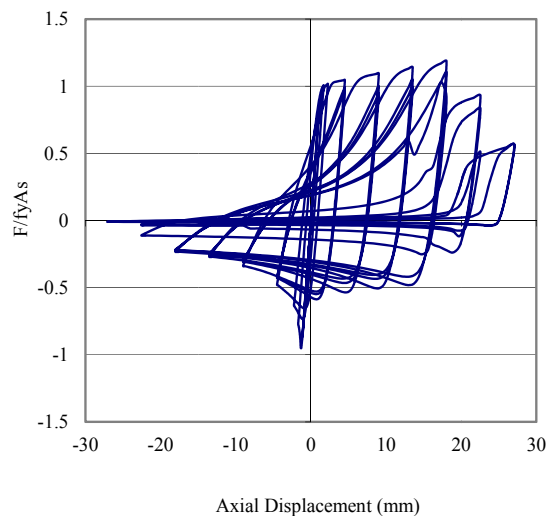
در تحقیق انجام شده برای بررسی رفتار مهاربندها از تحلیل کماتش و تحلیل غیر خطی مادی (پلاستیسیته مستقل از زمان) استفاده شده است. به منظور دستیابی به عملکرد دقیق این مقاطع از نرم افزار Opensees [۱۱]

### بررسی پارامترهای تاثیرگذار در مهاربندهای مرکب

این بخش اختصاص به مطالعات عددی بر روی عملکرد اعضای فولادی تو خالی و پر شده با بتن تحت بار یکنواخت متناوب محوری دارد. وجود بتن در داخل مقاطع قوطی شکل فولادی باعث بهبود رفتار مهاربند و جذب انرژی بیشتر و جلوگیری از کمانش‌های موضعی قوطی فولاد می‌شود. در واقع در این نمونه‌ها مشاهده گردید بتن به عنوان یک ماده پرکننده بر روی حالت خرابی و بار کششی و فشاری تاثیر گذار است؛ زیرا در این حالت، قوطی فولادی فقط امکان کمانش به سمت خارج را دارد. در مجموع نتایج اینطور نشان داده که ماده پرکننده بعد از چندین بارگذاری رفت و برگشتی، به مقاومت فشاری مهاربند کمک نموده و این امر به افزایش ظرفیت شکل پذیری با مانع شدن یا محدود کردن کمانش موضعی منجر می‌شود. در ادامه ظرفیت شکل پذیری نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شده و اثرات لاغری، نسبت عرض به ضخامت، مقاومت فولاد و مقاومت ماده پرکننده بررسی می‌گردد. جهت بررسی واقع بینانه، مدل‌های ساخته شده در ابعاد و اندازه‌های واقعی تعریف شده اند. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، نمونه‌ها از مقاطع مربعی و با طول‌های ۳ متر و ۶ متر تشکیل شده اند و شرایط مرزی برای تمام نمونه‌ها بصورت دو سر مفصل می‌باشد. نمونه‌ها تحت بارگذاری یکنواخت و متناوب با تاریخچه بارگذاری SAC [۱۸] قرار گرفته اند که بر اساس جابجایی طبقه و از نوع تغییر مکانی می‌باشد و بر حسب طول مهاربند متغیر است. نسبت لاغری اعضا در طول ۳ متر از ۳۹/۱ تا ۱۰۲/۱ متغیر است و در طول ۶ متر از ۷۸/۲ تا ۲۰۴/۱ متغیر می‌باشد. در حالی که نسبت عرض به ضخامت آنها بین ۸ تا ۱۸ می‌باشد. بتن نیز از سه نوع مختلف با مقاومت‌های فشاری ۲۱ مگاپاسکال و ۲۸ مگاپاسکال و ۳۵ مگاپاسکال می‌باشد که جزئیات بیشتر در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۳- منحنی پاسخ بار-تغییر مکان نمونه تجربی [۲]



شکل ۴- منحنی پاسخ بار-تغییر مکان نمونه عددی حاضر

همچنین مطابق با بارگذاری حداکثر تغییر مکان محوری عضو در حالت تجربی نزدیک به ۳۰ میلیمتر و در حالت عددی این مقدار برابر ۲۷ میلیمتر است. در مدل عددی به علت اینکه از المان‌های فایبر (المان‌های یک بعدی) استفاده شده است لذا در چرخه‌های انتهایی اختلاف اندکی بین نمونه تحلیلی با نمونه تجربی وجود دارد.

جدول ۱- مشخصات هندسی نمونه‌های مورد بررسی

Name	Dimension-Tube Section	Slenderness Ratio		Width/Thickness
	height × width × Thickness	L=3000mm	L=6000mm	
	(mm×mm×mm)			
Specimen1	80×80×6	99.3	198.6	11.3
Specimen2	80×80×8	102.1	204.1	8
Specimen3	100×100×6	78.2	156.4	14.7
Specimen4	100×100×8	79.9	159.7	10.5
Specimen5	100×100×10	81.6	163.3	8
Specimen6	120×120×6	64.5	128.9	18
Specimen7	120×120×8	65.6	131.2	13
Specimen8	120×120×10	66.8	133.6	10
Specimen9	150×150×8	51.7	103.5	16.8
Specimen10	150×150×10	52.5	105	13
Specimen11	150×150×15	54.4	108.9	8
Specimen12	200×200×12	39.1	78.2	14.7
Specimen13	200×200×15	39.7	79.4	11.3

جدول ۲- مشخصات بتن در مدل‌های عددی

Concrete Type1			
Compressive Strength	21MPa	Compressive Strain	0.002
Ultimate Strength	15MPa	Ultimate Strain	0.004
Concrete Type2			
Compressive Strength	28MPa	Compressive Strain	0.002
Ultimate Strength	12MPa	Ultimate Strain	0.004
Concrete Type3			
Compressive Strength	35MPa	Compressive Strain	0.002
Ultimate Strength	15MPa	Ultimate Strain	0.0035

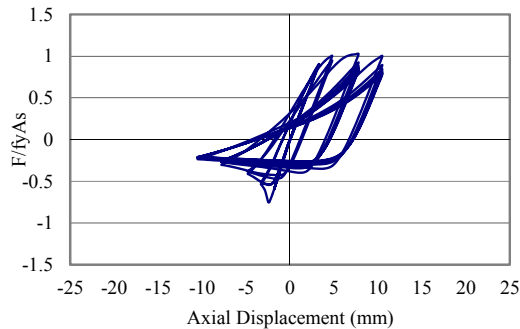
### اثر پرکنندگی بتن

به منظور بررسی اثر پرکنندگی بتن رفتار یک نمونه فولادی تو خالی را با نمونه مشابه مرکب، مقایسه شده است. نمونه مورد نظر با ابعاد  $80 \times 80 \times 6$  با طول ۳ متر، تحت بارگذاری متناوب قرار گرفته و میزان جذب انرژی در هر دو نمونه با یکدیگر مقایسه می‌شود. فولاد مصرفی در تمام نمونه‌ها از نوع فولاد نرم سازه ای است و بتن با مقاومت ۲۸ مگاپاسکال می‌باشد. منحنی هیستریزس نمونه تو خالی و پر شده با بتن در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه گردیده است. همان طور که مشاهده می‌شود تعداد چرخه‌های بارگذاری که توسط نمونه پر شده با بتن

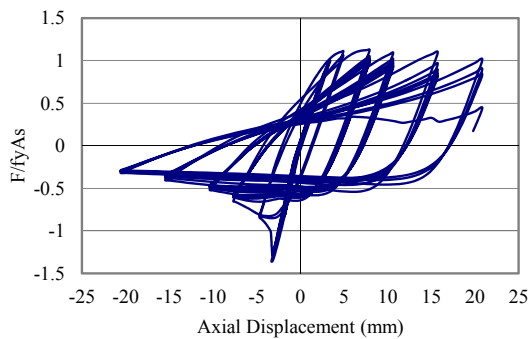
تحمل می‌شود، بیشتر از تعداد چرخه‌های مشابه در نمونه تو خالی است. همچنین میزان تغییر شکل محوری در نمونه پر شده با بتن بیشتر است. در شکل ۷ مجموع انرژی جذب شده توسط این دو نمونه ارائه شده است، که نشان می‌دهد پرکنندگی بتن به مقدار قابل توجهی در حدود ۲/۵ برابر به جذب انرژی بیشتر منجر شده است. همانطور که از منحنی‌های هیستریزس مشخص است یکی از نقاط ضعف مهاربندهای فولادی وجود کماتش‌های موضعی در خارج از محدوده الاستیک تحت رفتار چرخه ای می‌باشد، که این امر منجر به ایجاد یک رفتار کاملاً غیر یکسان در کشش و فشار می‌شود که منجر به کاهش عملکرد لرزه‌ای اینگونه مهاربندها خواهد شد. مقایسه

### اثر نسبت عرض به ضخامت در مهاربند مرکب

برای بررسی این پارامتر، منحنی هیستریزیس و منحنی بار-تغییر مکان محوری نمونه‌های ارائه شده در جدول ۱، در طول ۳ متر و ۶ متر ترسیم گردید. تمام نمونه‌ها از فولاد نرم عادی و بتن با مقاومت ۲۸ مگاپاسکال تشکیل شده است. در ادامه منحنی هیستریزیس دو نمونه از مقاطع مورد بررسی در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.



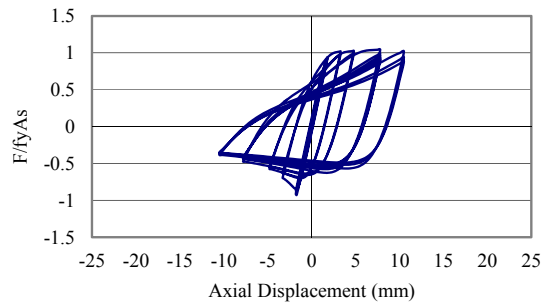
شکل ۸ - منحنی هیستریزیس نمونه ۸×۸×۸



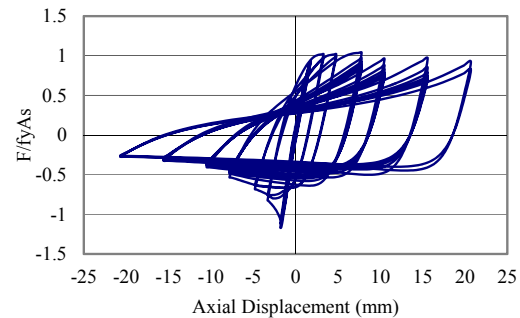
شکل ۹ - منحنی هیستریزیس نمونه ۱۲×۱۲×۶

از نمودارهای هیستریزیس مقاطع فوق مشخص گردید هنگامیکه نسبت عرض به ضخامت کاهش می‌یابد، به دلیل آنکه این پدیده کمانش موضعی در مقطع را کاهش می‌دهد، در نتیجه منحنی هیستریزیس، منحنی پر تر و یکنواخت تری می‌باشد. همچنین نتایج مدل‌های نمونه دوم با ابعاد ۸×۸×۸ میلی‌متر و نسبت کمترین عرض به ضخامت برابر ۸ و نمونه ششم با ابعاد ۱۲×۱۲×۶ میلی‌متر با بیشترین نسبت عرض به ضخامت برابر ۱۸ با یکدیگر مقایسه شده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). منحنی‌های هیستریزیس هر نمونه با مقطع توخالی خود

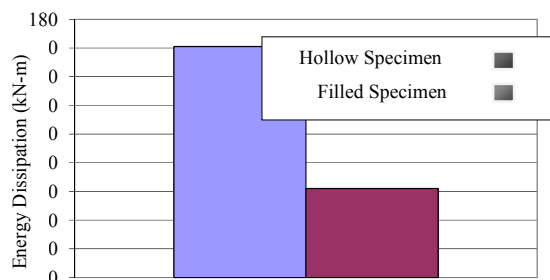
نتایج هیستریزیس مهاربند فولادی با مهاربند مرکب، نشان می‌دهد که وجود بتن به عنوان راهکاری به منظور به تعویق انداختن کمانش‌های موضعی در جذب انرژی بیشتر در رفتار چرخه ای مفید خواهد بود.



شکل ۵ - منحنی هیستریزیس نمونه تو خالی

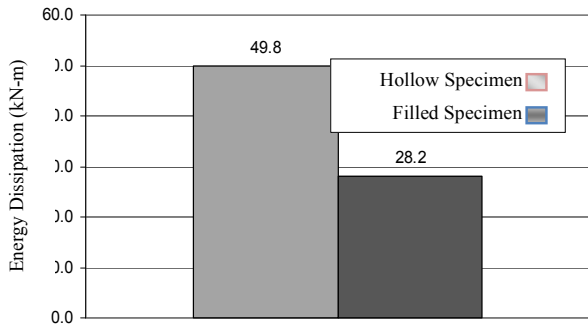


شکل ۶ - منحنی هیستریزیس نمونه پر شده با بتن



شکل ۷ - انرژی جذب شده در دو نمونه پر و تو خالی

همچنین با استفاده از منحنی‌های نیرو-تغییر مکان، ظرفیت شکل پذیری در هر دو نمونه با یکدیگر مقایسه گردیده است. به طوریکه شکل پذیری در نمونه تو خالی معادل ۵/۵ و در نمونه پر شده با بتن ۱۰ می‌باشد که نسبت این دو مقدار ۱/۸۱ می‌باشد



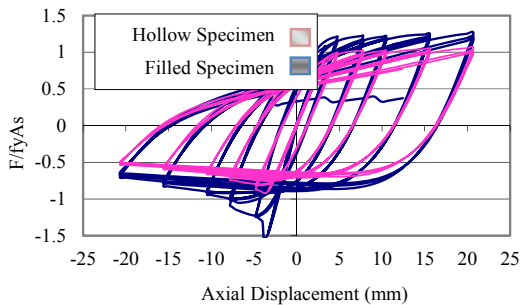
شکل ۱۲- مقایسه انرژی جذب شده نمونه‌های توخالی و پر شده با بتن  $80 \times 80 \times 8$



شکل ۱۳- مقایسه انرژی جذب شده نمونه‌های توخالی و پر شده با بتن  $120 \times 120 \times 6$

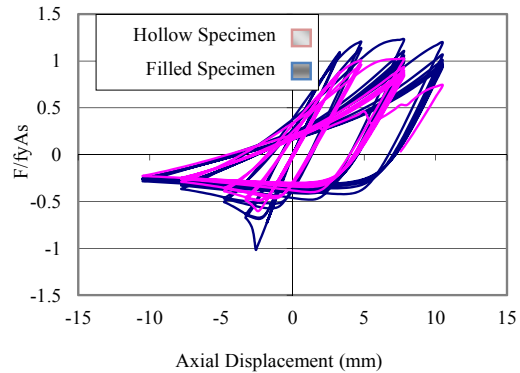
### اثر نسبت لاغری موثر در مهاربند مرکب

برای بررسی پارامتر لاغری، منحنی هیستریزیس نمونه‌های فوق با طول ۶ متری، مورد بررسی قرار گرفت. منحنی هیستریزیس نمونه‌ها نشان دادند در مهاربندها هر چقدر لاغری عضو کوچکتر باشد، احتمال وقوع کمانش موضعی کاهش می‌یابد؛ در نتیجه نقش بتن پرکننده به عنوان عامل جلوگیری کننده از کمانش کم‌رنگ خواهد شد؛ که این موضوع در شکل ۱۴ به خوبی نشان داده شده است.

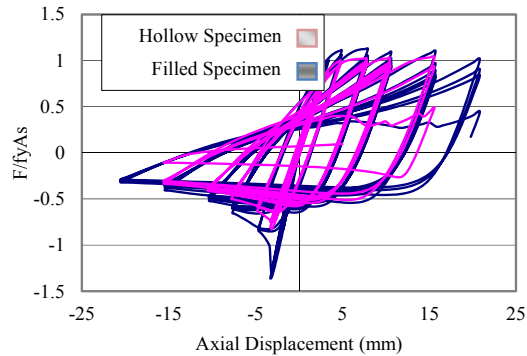


شکل ۱۴- مقایسه رفتاری دو نمونه توخالی و پر شده با بتن نمونه  $12 \times 12$  با لاغری  $39/1$

ترسیم شده است، تا بدین شکل نسبت عرض به ضخامت بر روی میزان تاثیر محصور کنندگی بتن نیز بررسی شود.

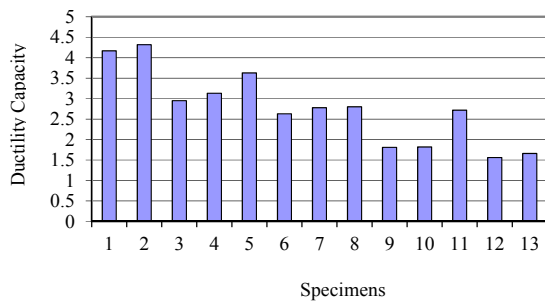


شکل ۱۰- مقایسه منحنی هیستریزیس نمونه‌های تو خالی و پر شده با بتن  $80 \times 80 \times 8$



شکل ۱۱- مقایسه منحنی هیستریزیس نمونه‌های تو خالی و پر شده با بتن  $120 \times 120 \times 6$

همانطور که از اشکال فوق مشخص است، با نسبت عرض به ضخامت کمتر، اثر بتن بعنوان عاملی برای بتاخیر انداختن کمانش موضعی، خود را بیشتر و موثرتر نشان می‌دهد. همچنین توانایی در جذب انرژی بیشتر برای هر دو نمونه، در هر دو حالت پر و تو خالی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه گردیده است. از دو نمودار فوق مشخص است، که میزان افزایش در جذب انرژی بواسطه وجود بتن در نمونه اول با کمترین مقدار نسبت عرض به ضخامت، معادل ۷۶٪ می‌باشد. این در حالیست که همین مقدار در نمونه ششم که دارای بیشترین نسبت عرض به ضخامت را در بین نمونه‌های دیگر دارد، برابر ۵۷٪ می‌باشد. این مطلب گویای آن است که با نسبت عرض به ضخامت کمتر، وجود بتن در بهبود مهاربند موثرتر خواهد بود.



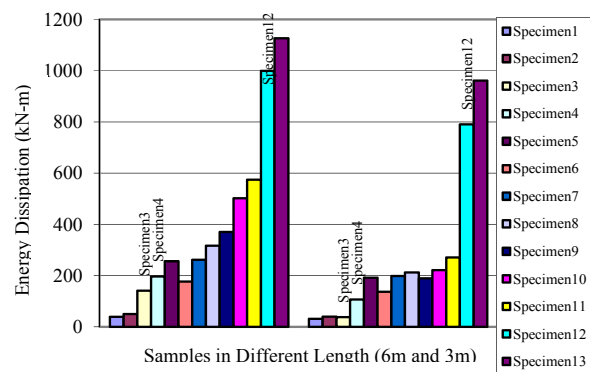
شکل ۱۷- شکل پذیری نمونه‌های مختلف در طول ۳ متری

تغییرات ظرفیت شکل پذیری با نسبت عرض به ضخامت یک روند خاصی را دنبال نمی‌کند، برای مثال ظرفیت شکل پذیری نمونه ۵ با ابعاد  $100 \times 100 \times 10$  (با نسبت عرض به ضخامت ۸) بیشتر از نمونه ۶ با ابعاد  $120 \times 120 \times 6$  (با نسبت عرض به ضخامت ۱۸) می‌باشد. همچنین می‌توان به خوبی مقدار شکل پذیری را بر چگونگی عملکرد بتن در بهبود رفتار مهاربند، مشاهده کرد، به طوری که در تراز شکل پذیری پایین، پرکنندگی قطعات فولاد با بتن در افزایش ظرفیت بعد از کمانش تاثیر چشمگیری ندارد؛ علت در این است که در این مرحله کمانش موضعی خیلی تاثیر گذار نیست؛ لیکن در تراز شکل پذیری بالا، از آنجاییکه کمانش‌های موضعی در مقاطع توخالی فولادی مهمتر هستند و از طریق بتن داخل تا حدودی محدود می‌شوند، لذا پرکنندگی این مقاطع توسط ملات، تاثیر بیشتری در مقاومت پس از کمانش نمونه‌ها دارد.

### اثر مقاومت فولاد در مهاربند مرکب

به منظور بررسی جنس فولاد در رفتار مهاربندهای مقاوم در کمانش، چند نوع فولاد مختلف برای هسته در نظر گرفته شده که مشخصات آنها در جدول ۳ آمده است. در ادامه به منظور بررسی این مورد، یکی از این نمونه‌ها مانند نمونه ۵ را تحت بارگذاری متناوب مطابق با پروتکل بارگذاری SAC [۱۸] قرار داده و منحنی هیستریزس را با سه نوع فولاد مختلف با یکدیگر مقایسه می‌نمایم. این فولادها عبارتند از: فولاد نرم معمولی، فولاد پر مقاومت و کم آلیاژ و فولاد آب دیده و فوق العاده مقاوم [۲۰]. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ رفتار هیستریزس و میزان جذب انرژی توسط هر یک از فولادها را ارائه نموده است.

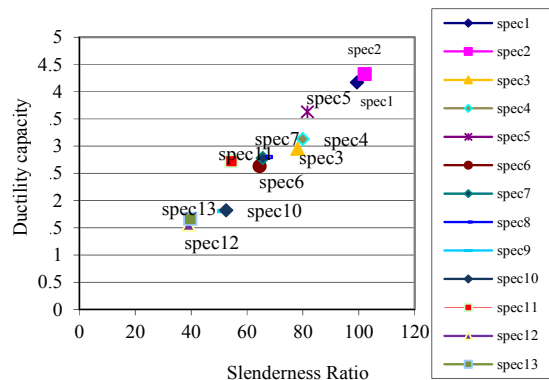
در یک دیدگاه کلی، مقادیر فوق گویای این مطلب است که هر چه میزان لاغری عضو کمتر باشد، مقدار انرژی جذب شده بیشتر خواهد بود، ولی با نگاه دقیقتر به شکل ۱۵، فرضیه فوق همواره برقرار نخواهد بود. برای مثال بین نمونه‌های ۳ و ۴ که تقریباً هر دو به یک اندازه لاغر هستند، نمونه ۴ انرژی بیشتری جذب می‌کند؛ زیرا که نسبت عرض به ضخامت آن کمتر است. این روند همچنین در نمونه‌های ۱۲ و ۱۳ و نمونه‌های ۷ و ۸ مشابه می‌باشد. لذا در رفتار یک مهاربند مرکب، می‌بایست دو پارامتر لاغری و نسبت عرض به ضخامت را به طور همزمان در نظر بگیریم.



شکل ۱۵- مقدار انرژی جذب شده در دو حالت ۳ متری و ۶ متری

### اثر شکل پذیری مهاربند مرکب

شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان می‌دهند که ظرفیت شکل پذیری با نسبت لاغری اعضا نسبت مستقیم دارد و رابطه زیر تقریباً به صورت خطی است.



شکل ۱۶- رابطه ظرفیت شکل پذیری مقطع با نسبت لاغری

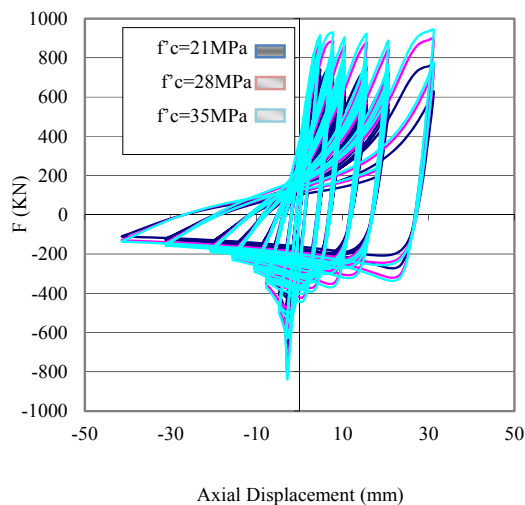


جدول ۳ - مشخصات فولادهای مصرفی در مدل‌سازی [۲۰]

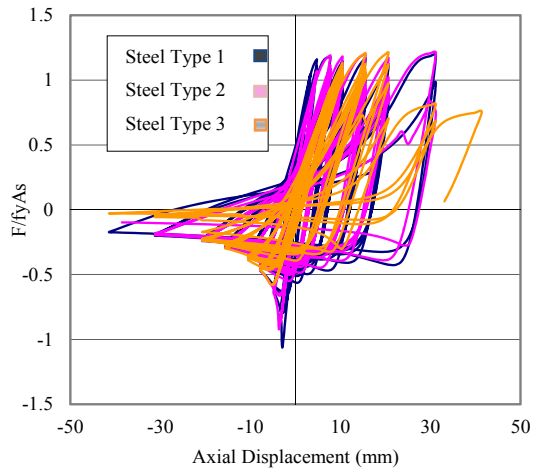
Steel Material	Type	$\sigma_u/\sigma_y$	Ultimate Strain (%)	Ultimate Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
Carbon Steel: A36	1	1.56	20	375	240	200
High-Strength, Low-Alloy Carbon; A440, A441, A572	2	1.36	17	470	346	200
Heated-Treated Structural Alloy Steels; A514	3	1.10	7	762	692	200

### اثر نوع بتن مصرفی در مهاربند مرکب

برای این منظور همان نمونه قبلی (نمونه ۵) را با سه نوع مختلف بتن که جزئیات آن در جدول ۲ شرح داده شده، تحت بار متناوب قرار گرفته و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شود. منحنی‌های ارائه شده در شکل ۲۰ نشان می‌دهند که نوع مقاومت فشاری بتن ( $f'_c$ ) تاثیر چندانی در بهبود رفتار هیستریزس نداشته. همچنین انرژی‌های محاسباتی از این سه نوع بتن مصرفی که در شکل ۲۱ ارائه شده است نشان می‌دهد که بتن بیشتر به عنوان عاملی برای تغییر دادن مدهای کمانش موضعی به کار می‌رود. از دیگر نتایج مهم این است که مقاومت بتن بیش از ۲۸ مگاپاسکال تاثیری در مقاومت سیستم ندارد.

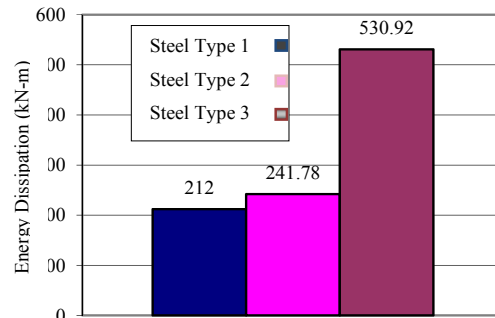


شکل ۲۰ - مقایسه رفتاری بین سه نوع مختلف بتن



شکل ۱۸ - مقایسه رفتاری سه نوع فولاد (نمونه ۵)

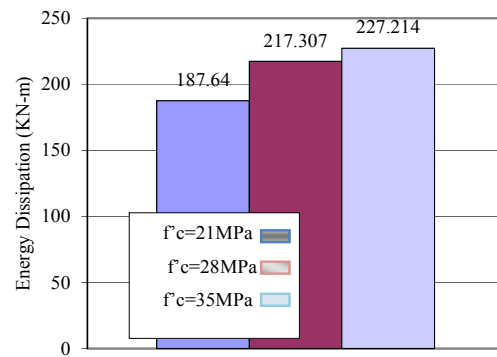
از نمودارهای فوق مشخص است که فولاد پرمقاومت مقدار انرژی بیشتری نسبت به فولاد نرمه معمولی جذب می‌کند. البته فولاد فوق العاده مقاوم به نسبت دو نوع قبلی مقدار خیلی بیشتری انرژی جذب می‌کند. همچنین از نکات قابل توجه دیگر این است که ظرفیت شکل پذیری در فولاد پرمقاومت به نسبت فولاد نرمه معمولی کمتر می‌باشد؛ لیکن فولاد فوق العاده مقاوم به نسبت هر دو از شکل پذیری بالاتری برخوردار است.



شکل ۱۹ - انرژی جذب شده در سه نوع فولاد (نمونه ۵)

مرتبه دوم و همچنین اثرات بلند مدت بارگذاری بر روی بتن از جمله جمع شدگی و خزش رفتار واقعی تری ارائه گردیده است. لذا مقطع بزرگتر با ابعاد  $120 \times 120 \times 8$  طراحی می‌گردد. لازم به ذکر است که در آیین‌نامه‌های ایران تا کنون به این نوع مقاطع توجه خاصی صورت نگرفته و روابط طراحی ارائه نشده اند. در مجموع، لازم به ذکر است از آنجاییکه در دو آیین‌نامه Eur4 و AISC در طراحی مهاربند مرکب بر روی موارد مشابهی از جمله محدودیت نسبت عرض به ضخامت، و میزان باربری کششی و فشاری مقطع مرکب تحت هر دو عامل بتن و فولاد، تاکید شده است، لذا مقاطع تقریباً مشابهی نیز بدست آمده است. در حالیکه در آیین‌نامه AIJ همان طور که در فوق ذکر شد با تاکید بر روابط محدود کننده تری، رفتار واقع بینانه تری از اندرکنش بتن و فولاد و همچنین میزان باربری هر یک توصیف کرده است، لذا مقطع بزرگتری بدست می‌آید.

در ادامه مقایسه ای بین انرژی‌های جذب شده در هر چرخه بین مهاربندهای طراحی شده توسط آیین‌نامه‌های فوق در شکل ۲۲ ارائه شده است. با توجه به دلایل ذکر شده در فوق از آنجاییکه در روابط طراحی ارائه شده در آیین‌نامه ژاپن اثرات رفتار غیر خطی بتن در دراز مدت تحت خزش به صورت دقیق تری مورد بررسی قرار گرفته و از ظرفیت کششی بتن تحت بارهای چرخه ای صرف نظر شده است لذا مقطع بزرگتر و در نتیجه جذب انرژی بیشتری برای مهاربند طراحی شده توسط این آیین‌نامه تحت رفتار چرخه ای پیش بینی می‌شود؛ بررسی‌های بیشتر نشان میدهد که رفتار این مهاربند مرکب مشابه رفتار مهاربند مقید شده در مقابل کمناش تحت یک تقاضای نیرویی مشخص می‌باشد. بطوریکه انرژی جذب شده مهاربند مرکب طراحی شده توسط آیین‌نامه AIJ برابر  $253/88$  کیلو ژول می‌باشد در حالیکه انرژی جذب شده مهاربند مرکب طراحی شده توسط آیین‌نامه‌های AISC و EUC به ترتیب  $82/66$  و  $47/83$  کیلو ژول می‌باشد.



شکل ۲۱- مقایسه رفتاری بین سه نوع مختلف بتن

### مقایسه رفتاری بین مهاربند مرکب طراحی

#### شده توسط آیین‌نامه‌های اروپا، آمریکا و ژاپن

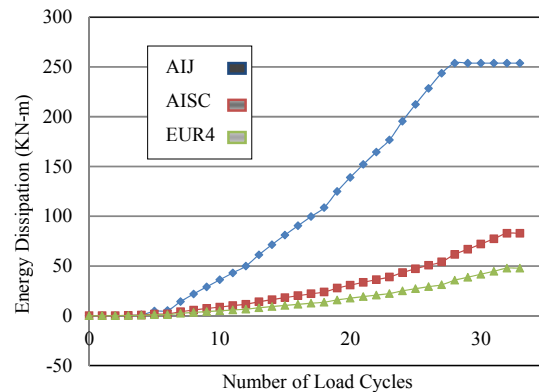
جهت مقایسه بین کارایی مهاربند مرکب متشکل از بتن و فولاد می‌بایست این نوع مهاربند را تحت یک نیروی مشخص طراحی کرده، سپس مشخصات آنها را با یکدیگر مقایسه نمود. بدین منظور قاب یک دهانه که ارتفاع آن ۳ متر با طول دهانه ۵ متر انتخاب می‌گردد. طراحی بر اساس یک ساختمان یک طبقه با ابعاد در پلان  $20 \times 10$  متری که در هر راستا و در یک دهانه مهاربند به صورت chevron قرار داده شده است که با فرض حداکثر نیروی اعمالی به مهاربند برابر ۱۲ تن انجام می‌گردد.

در Eurocode4 [۱۹] که به طراحی مقاطع مرکب پرداخته است، در روابط طراحی ارائه شده علاوه بر ظرفیت محوری عضو مرکب، اثرات کمناش موضعی و همچنین اثرات بلند مدت بارگذاری از جمله خزش و جمع شدگی بتن نیز در نظر گرفته شده است. در این راستا بر اساس نیروی طراحی، مقطع پیشنهادی توسط Eurocode4 [۱۹]، مقطع قوطی مربعی  $70 \times 70 \times 3$  میلیمتر طراحی می‌گردد. در آیین‌نامه امریکایی AISC Seismic Provisions [۲۱]، در روابط مربوط به مقاطع مرکب به اثرات کمناش موضعی به صورت دقیقتر توجه نموده و همچنین مقاومت کششی و مقاومت موثر مقطع با توجه به ترک خوردگی بتن را نیز تحت پوشش قرار داده است. در این رابطه AISC، مقطع قوطی مربعی  $80 \times 80 \times 4$  میلیمتر را پیشنهاد می‌نماید. در آیین‌نامه ژاپن AIJ [۲۲]، در بررسی کمناش‌های موضعی و اثرات ترک خوردگی بتن و نقش باربری آن علاوه بر موارد فوق اثرات

تفاوت در مقاومت فشاری بتن، تاثیر کمی بر شروع کمانش موضعی، مد کمانش موضعی و شدت کمانش موضعی و تعداد سیکل‌ها تا شکست نهایی دارد. این نکته نیز قابل توجه است که افزایش مقاومت بتن به بیش از ۲۸ مگاپاسکال اثر چشمگیری بر رفتار مهاربند مرکب ندارد.

همچنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در تراز شکل پذیری پایین، پرکنندگی قطعات فولاد و بتن در بهبود و ظرفیت بعد از کمانش نمونه‌ها تاثیر چشمگیری ندارد. زیرا در این مرحله، کمانش موضعی خیلی تاثیر گذار نیست. لیکن، در تراز شکل پذیری‌های بالاتر، از آنجاییکه کمانش‌های موضعی در مقاطع تو خالی فولادی مهمتر هستند و از طریق بتن داخل تا حدودی محدود می‌شوند، لذا پرکردن این مقاطع، در بهبود رفتار بعد از کمانش بیشتر نمایان است. در واقع این موضوع تاکید بر این واقعیت است که حد بالای ظرفیت کششی در مهاربندهای مرکب اساساً بر عهده مقطع فولادی است. نکته دیگر اینکه، ظرفیت شکل پذیری تحت بارگذاری یک طرفه کششی ممکن است برای نمونه‌های پر شده با بتن کمتر باشند.

در پایان، طراحی مهاربند مرکب بر اساس ضوابط مندرج در آیین‌نامه‌های معتبر اروپا، آمریکا و ژاپن تحت تقاضای مشخص صورت گرفت و مقایسه مقدار انرژی جذب شده در سیکل‌های بارگذاری ارائه گردید. نتایج نشان داد که در بین آیین‌نامه‌های فوق، آیین‌نامه ژاپن با در نظر گرفتن اثرات کمانش موضعی و پدیده ترک خوردگی بتن و میزان مشارکت آن در باربری، مقطع بزرگتری را پیشنهاد نمود که در نتیجه میزان جذب انرژی آن به مراتب بیشتر است.



شکل ۲۲- مقایسه رفتاری مهاربند مرکب طراحی شده توسط آیین‌نامه‌های AIJ و AISC و Eur4

### نتیجه‌گیری

در مهاربندهای مرکب استفاده از بتن در داخل مقاطع قوطی شکل جدار نازک به بهبود رفتار مهاربند کمک نموده و از نتایج بدست آمده از تحلیل‌ها می‌توان به تاخیر انداختن شروع کمانش موضعی، ارتقا رفتار کمانش، بهبود مقاومت عضو در برابر کمانش، افزایش شکل پذیری و جذب انرژی بیشتر و افزایش در بیشترین بار جذبی در چرخه اول بارگذاری متناوب اشاره نمود. همچنین مقدار جذب انرژی برای مقاطع پر شده با بتن و یا تو خالی با افزایش لاغری کاهش می‌یابد (تفاوت چشمگیری در این رابطه بین این دو حالت وجود ندارد). نتایج تحلیل نشان می‌دهد که اثر پرکنندگی بر روی رفتار این نوع مهاربندهای مرکب بستگی به نسبت عرض به ضخامت و همچنین نسبت لاغری موثر دارد، بطوریکه در نسبت عرض به ضخامت کوچکتر، بهبود در رفتار مهاربند دیده می‌شود. البته در اعضای پر شده با بتن که دارای نسبت عرض به ضخامت خیلی کوچکتر هستند، دیگر وجود بتن تاثیری بر روی رفتار مهاربند مرکب نخواهد داشت.

## مراجع

- 1- Goal, S.C. (1987). "Seismic behavior of hollow and concrete-filled square tubular brace in members." Vo. 1, Chapter 10, Department of civil engineering, University of Michigan Pub.
- 2- Broderick, B.M., Goggins, J.M., and Elghazouli, A.Y. (2001). "Cyclic performance of steel and composite bracing members." *J. of Structural Steel Research*. No. 61, PP. 493-514 .
- 3- Kimura, M., Ohata, H., Kaneko, H. and Kodaria, M. (2001). "Fire resistance of concrete-filled square steel tubular columns subjected to combined load." *J. of structural and Construction engineering*, transaction of AIJ., No. 417, PP. 63-70.
- 4- Varma, A. H., Ricles, J. M. and Sause, R. (2001). "Seismic behavior and modeling of high-strength composite concrete-filled steel tube (CFT) beam-columns." *J. of Constructional Steel Research*., No. 58 1, PP. 725-758.
- 5- Liang, Q.Q. (2001). "Inelastic behavior of concrete-filled thin-walled steel tubular columns subjected to local buckling." ASCE, *J. of Structural Eng.*, Vol. 130, No. 3, PP. 443-451.
- 6- Tort, C. and Hajjar, J.F. (2002). "Capacity assessment of rectangular concrete-filled steel tube(RCFT) members and connections for performance-Based design of composite frames." Report St-03-1, Dept. of Civil Eng., University of Minnesota.
- 7- XIAO, Y., Wenhui, H.E. and MAO, X. (2003). "Confinement design of CFT columns for improved seismic performance." Proceeding of the Annual Conference of Japan Concrete Institute., PP. 517-530.
- 8- Elchalakani, M., Zhao, X.L., and Grzebieta, R.H. (2003). "Tests of cold-framed circular tubular braces under cyclic axial loading." *ASCE, J. of Structural Eng.*, Vol. 129, No. 4, PP. 507-514.
- 9- Han, L. H. and Yang, Y. F. (2004). "Cyclic performance of concrete-filled steel CHS columns under flexural loading." *J. of Constructional Steel Research*., No. 61, PP. 423-452.
- 10- Liang, Q.Q, Uy, B. Liew, J.Y.R. (2005). "Nonlinear analysis of concrete-filled thin-walled steel box columns with local buckling effects." *J. of Constructional Steel Research*., No. 62, PP. 581-591.
- 11- Mazzoni, S., McKenna, F., H.Scott, M. and etal, G.L. (2007). *Open system for earthquake engineering simulation (opensees) command language manual*. Chapter 15, university of california Pub.
- 12- Zhong, S.T. (2005) "The comparison of behavior for circular and square concrete-filled steel tube(CFST) under axial comparison." *J. of China civil engineering*., No. 40, PP. 33-38
- 13- Hajjar, J.F (2005). "Concrete filled steel tube columns under earthquake loads." *J. of Structural engineering material*., No. 2, PP. 72-81.
- 14- Szmigiera, E. (2007). "Influence of concrete and fibre concrete on the load-carryng capacity and deformability of composite steel-concrete columns." *J. of Civil Engineering and Management*. Vol. 8, No. 1, PP. 55-61.
- 15- Dicleli, M. and Mehta, A. (2007). "Simulation of inelastic cyclic buckling behavior of steel box sections." *J. of Computers& Structures*., No. 85, PP. 446-457.
- 16- Rahai, A.R. and Alinia, M.M. (2007). "Performance evaluation and strengthening of concrete structures with composite bracing members." *J. of Construction and Building Materials*, ., No. 7, PP. 421-437.
- 17- Shimizu, S. and Watanabe, T. (2008). "Behavior of concrete-filled steel columns under the seismic loading." *J. of Thin-walled Structures*, No. 08, PP. 327-335.
- 18- SAC Joint Venture (a partnership of: Structural Engineers Association of California, Applied Technology Council, California Universities for Research in Earthquake Engineering), A Program to Reduce the Earthquake Hazards of Steel Moment Frame Structures, funded by the Federal Emergency Management Agency.
- 19- European Steel Design-Composite column Design. Eurocode4.
- 20- ASTM. (1988). Specification for Structural Steel (A36-88c), American Society for Testing and Materials
- 21- AISC. (2005). Seismic provision for structural steel Building. ANSI,AISC 341-05,CA,2005
- 22- Architectural Institute of Japan (AIJ). (2001). Standard of Structural Calculation of Steel Reinforced Concrete Structures. 5th Edition.