

بررسی تجربی و تئوری کاربرد مهاربند کابلی در مقاوم سازی قاب های خمشی فولادی

یوسف حسین زاده* (دانشیار)

مجید برقیان (دانشیار)

مجتبی امتناع (کارشناس ارشد)

مصطفی خالصه دهقان (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۳ (درداشت ثنی)
دروی ۲ - ۳۰، شمار ۴/۲، ص. ۱۱۷-۱۲۵، (یادداشت ثنی)

قاب های خمشی فولادی با شکل پذیری مناسب و جذب انرژی بالا، تغییر مکان های جانبی زیاد در برابر نیروهای زلزله دارند. در این نوشتار، امکان استفاده از مهاربند کابلی برای کنترل تغییر مکان جانبی و افزایش مقاومت قاب های خمشی، ضمن حفظ شکل پذیری آنها بررسی شده است. با انجام آزمایش و تحلیل اجزاء محدود نمونه ی قاب خمشی، قاب خمشی مقاوم سازی شده با مهاربند کابلی و اگر، قاب خمشی با مهاربند کابلی ضربدیری، نیروی محوری ستون ها و رفتار چرخه یی برش پایه - جابجایی قاب ها بررسی شده است. همچنین در قاب مهار شده با مهاربند کابلی و اگر، تأثیر موقعیت اتصال کابل به تیر در شکل پذیری و مقاومت قاب مورد توجه قرار گرفته است. بررسی ها نشان داده است که مهاربند کابلی و اگر با افزایش مقاومت و سختی جانبی قاب خمشی فولادی، کاهش قابل توجهی در شکل پذیری قاب ایجاد نمی کند و رفتار مناسبی نسبت به مهاربند کابلی ضربدیری دارد و نیز افزایش نیروی محوری ستون ها در قاب خمشی با مهاربند و اگر به اندازه ی قابل توجهی کمتر از قاب با بادبند ضربدیری است.

hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir
barghian@tabrizu.ac.ir
mojtaba-ementena88@ms.tabrizu.ac.ir
mkhdehghan@yahoo.com

واژگان کلیدی: قاب خمشی فولادی، مقاوم سازی، مهاربند کابلی و اگر، مهاربند کابلی ضربدیری، برش پایه، بارهای چرخه یی.

۱. مقدمه

و مهاربند کابلی ضربدیری،^[۱] برای بررسی امکان کاربرد مهاربندهای کابلی در قاب های خمشی انجام شده است.

استفاده از کابل ضربدیری باعث افزایش زیاد سختی جانبی و مقاومت قاب می شود. کاهش شکل پذیری و افزایش قابل توجه نیروی محوری ستون ها از آثار دیگر افزودن این نوع مهاربند است. در این نوشتار سعی شده است با استفاده از افزودن مهاربند کابلی و اگر، افزایش سختی و مقاومت جانبی و کاهش شکل پذیری، کنترل و افزایش نیروی محوری ستون های اطراف بادبند محدود و نیز تأثیر موقعیت اتصال کابل به تیر در تغییرات ایجاد شده در رفتار قاب بررسی شود. برای این منظور رفتار قاب های خمشی مقاوم سازی شده با مهاربند کابلی و اگر، قاب خمشی ساده و قاب خمشی مقاوم سازی شده با مهاربند کابلی ضربدیری، تعیین و با یکدیگر مقایسه شده اند. نخست با ساخت دو نمونه قاب خمشی فولادی و قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی و اگر و سپس با انجام آزمایش، رفتار این دو قاب تحت اثر نیروی جانبی استاتیکی تعیین شده است. با ایجاد مدل اجزاء محدود، قاب خمشی آزمایش و با استفاده از نرم افزار ABAQUS،^[۲] و مقایسه ی داده های تجربی با نتایج تحلیل مدل اجزاء محدود، دقت مناسب مدل اجزاء محدود در پیش بینی رفتار قاب مشخص شده است. در مدل اجزاء محدود، رفتار غیرخطی هندسی و مصالح، جزئیات اجزای

قاب های خمشی فولادی به منزله ی یکی از سیستم های مقاوم در برابر نیروهای جانبی، شکل پذیری مناسب و ظرفیت جذب انرژی بالا دارند. این قاب ها تحت اثر نیروهای جانبی زلزله، به دلیل نداشتن سختی جانبی کافی، تغییر مکان های بزرگی را تجربه می کنند. در شرایطی از جمله: تغییر کاربری سازه، نادرست بودن فرض های اولیه محاسباتی یا اشتباه در فرایند اجرا، مقاوم سازی قاب های خمشی فولادی ضرورت پیدا می کند. روش های مختلفی برای مقاوم سازی این قاب ها از جمله: استفاده از فولاد ضد زنگ،^[۱] دیوار برشی فولادی،^[۲] مهاربند مقاوم در برابر کمانش،^[۳] استفاده از میراگر در قاب خمشی،^[۴] و مهاربندهای کششی محض^[۵] وجود دارد.

مزایای کاربرد کابل به عنوان مهاربند قاب خمشی فولادی شناخته شده است. حذف امکان کمانش و تغییر شکل ماندگار عضو مهاربند یا قاب، مقاومت کششی بالا و امکان اعمال نیروهای پیش تیندگی قابل توجه در کابل ها برای افزایش سختی جانبی سازه، وزن کم و صرفه جویی در هزینه ی مقاوم سازی از جمله ی این مزایا هستند. با توجه به این مزایا، پژوهش هایی درباره ی رفتار مهاربند کابلی یکپارچه،^[۶]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۷/۹، اصلاحیه ۱۳۹۲/۳/۵، پذیرش ۱۳۹۲/۴/۲۶.

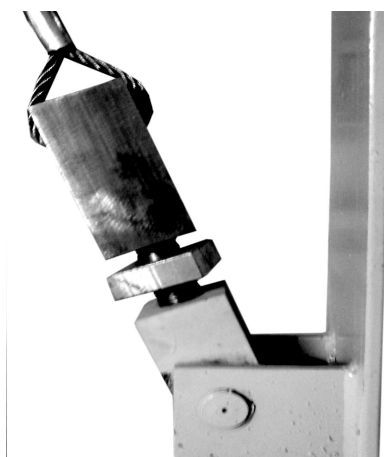
مقاومت نهایی 37 kN انتخاب شده است. برای ایجاد نیروی پیش‌تension در کابل، اتصالی مطابق شکل ۱ طراحی و اجرا شده است. این اتصال با مقاومت بالا با دو قطعه‌ی فولادی در دو طرف پیچ وسط با رزوه‌ی ایجادشده در داخل قطعات است. پیچ وسط با دنده‌ی معکوس در دو طرف، بین این دو قطعه هم‌دور می‌شوند که به این طریق کابل متصل شده به این قطعه پیش‌تension می‌شود. ابعاد هندسی و مجموعه‌ی نمونه و قاب آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه‌ی قاب، از دو مهار در طرفین قاب‌ها استفاده و در هر نمونه‌ی آزمایش، ۸ کرنش‌سنج نصب شده است. محل نصب کرنش‌سنج‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. در هر یک از نقاط A، B، C و D یک کرنش‌سنج بر روی ورق اتصال (کرنش‌سنج‌های ۱، ۲، ۳ و ۴) و در هر کدام از نقاط E و F دو کرنش‌سنج در طرفین ستون (کرنش‌سنج‌های ۵ و ۶ در نقطه‌ی E و کرنش‌سنج‌های ۷ و ۸ در نقطه‌ی F) نصب شده‌اند. برای تعیین تغییرمکان جانبی قاب در هر لحظه، در گوشه‌ی پایین قاب، یک جابجایی‌سنج با دامنه‌ی تغییرمکان 10 cm نصب شده است. قاب‌ها تحت بار افزایش‌یابنده به صورت یک‌نواخت تا مرحله‌ی خرابی قرار گرفته‌اند و مقادیر کرنش، تغییرمکان و بار ثبت شده است. شکل ۳، دو نمونه‌ی ساخته‌شده‌ی مورد آزمایش را نشان می‌دهد. به دلیل اعمال نیرو در یک جهت، فقط مهاربند کششی نمونه‌ها نصب شده است.

۲. بررسی تجربی رفتار قاب خمشی فولادی و قاب خمشی با مهاربند کابلی واگرا

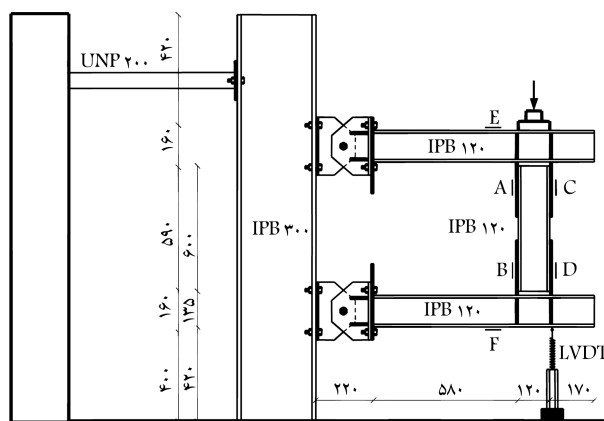
به منظور بررسی رفتار قاب خمشی فولادی ساده و قاب خمشی مقاوم سازی شده با مهاربند کابلی و اگرآ و تهیه داده‌هایی جهت کنترل دقت مدل‌های اجزاء محدود، نخست یک قاب خمشی و یک قاب با مهاربند و اگرآ ساخته و رفتار نیرو - جابجایی آنها تحت اثر بارهای استاتیکی، بررسی شده است.

۱.۲. ابعاد هندسی و مشخصات نمونه‌ها

دو نمونه‌ی قاب خمشی ساده و قاب خمشی با مهاربند کابلی و اگر با ابعاد 750×870 mm، طراحی و ساخته شده است. تیر و ستون‌ها از پروفیل IPB۱۲۰ و اتصال‌گیردار تیر به ستون با استفاده از ورق‌های فولادی به ابعاد $100 \times 100 \times 210$ mm ساخته شده است. طراحی قاب با هدف جلوگیری از تسلیم اعضا و تیر و ستون در طول بارگذاری به منظور بررسی تأثیر رفتار مهاربند کابلی و اتصالات تیر به ستون در رفتار قاب انجام شده است. از ورق مضاعف چشمه‌ی اتصال و ورق‌های پیوستگی به ضخامت 10 mm برای جلوگیری از ایجاد ناپایداری و تسلیم موضعی در محل اتصال تیر به ستون استفاده شده است. اتصالات تیر به ستون، چشمه‌ی اتصال و اتصال ستون به کف ستون با جوش‌های نفوذی کامل یا گوشه یا بیشینه‌ی بعد ممکن اجرا شده است. مهاربند کابلی، از کابل به قطر 10 mm با



شکل ۱. اتصال اعمال‌کننده‌ی نیروی بیش‌تندی‌گی کابل.



شکل ۲. نحوه‌ی استقرار نمونه قاب‌های خمشی در زیر جک و محل نصب کرنش سنج‌ها و جابجائی سنج (ابعاد به میلی‌متر).



ب) قاب خمشی با مهاربند کابلی واگرا.



الف) قاب خمشی؛

شکل ۳. نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه.

واگرا بیشتر از مقادیر نظیر در قاب خمشی ساده است. بنابراین تنش در اعضای قاب مهاربندی شده نسبت به قاب خمشی بدون مهاربندی، به دلیل وجود مهاربند افزایش یافته است. در نتیجه مهاربندی قاب خمشی همان طوری که انتظار می‌رفت باعث افزایش نیروی محوری ستون‌ها شده است. در بخش‌های بعد و در تحلیل اجزاء محدود بحث بیشتری درباره‌ی مقادیر این افزایش ارائه شده است.

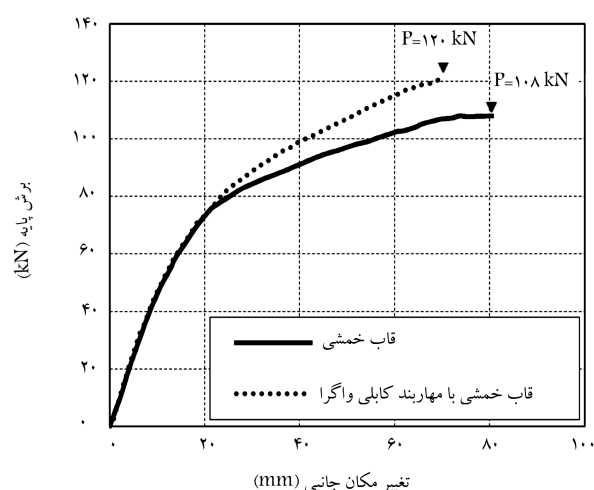
۳.۲. ایجاد مدل اجزاء محدود و مقایسه‌ی داده‌های تجربی با نتایج

مدل اجزاء محدود

برای بررسی بیشتر رفتار قاب‌های خمشی و قاب‌های مهاربند شده با مهاربند واگرا و همگرا، مدل اجزاء محدود برای این ۳ نوع قاب ایجاد شده است. به منظور بررسی دقت مدل‌های اجزاء محدود، داده‌های تجربی برای قاب‌های آزمایش شده، با نتایج تحلیل مدل اجزاء محدود حاصل از نرم‌افزار ABAQUS مقایسه شده است. اعضاء قاب با اجزاء شش وجهی مرتبه‌ی اول کاهش یافته‌ی C3D8R، [۹] مدل‌سازی شده‌اند. رفتار غیرخطی فولاد به صورت دوخطی، رفتار غیرخطی هندسی و جزئیات تمامی ورق‌های اتصال و پیچ‌ها در مدل لحاظ شده‌اند. در شکل ۶، نمودارهای تجربی و نتایج تحلیل اجزاء محدود برای رابطه‌ی نیرو- تغییر مکان قاب خمشی ساده نشان داده شده است. مقادیر سختی جانبی اولیه‌ی K ، برش پایه‌ی نهایی V_{max} و تغییر مکان جانبی نهایی δ قاب خمشی در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. مطابق جدول ۱، اختلاف نتایج آزمایش و مدل اجزاء محدود، در مقدار برش پایه‌ی نهایی ۹٪ و در سختی اولیه ۶/۶٪ است. بنابراین، دقت نتایج مدل اجزاء محدود در حد قابل قبول است.

جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج مدل اجزاء محدود و داده‌های تجربی در قاب خمشی.

V_{max} (kN)			K (kN/mm)		
درصد	آزمایش	اجزاء محدود	درصد	آزمایش	اجزاء محدود
اختلاف			اختلاف		
۹	۱۰۸	۹۹	۶/۶	۴/۲۴	۴/۵۲



شکل ۴. نمودارهای تجربی نیرو- تغییر مکان جانبی.

۲.۲. بررسی داده‌های تجربی

نمودارهای تجربی نیرو- تغییر مکان جانبی قاب خمشی ساده و قاب خمشی با مهاربند کابلی، در شکل ۴ ارائه شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که سختی اولیه‌ی هر دو قاب تا تغییر مکان ۲۰ mm یکسان است. بنابراین انتظار می‌رود در این محدوده از تغییر مکان جانبی، شکل‌پذیری قاب مهاربندی شده و قاب خمشی یکسان باشد. این نمودار، افزایش سختی جانبی قاب خمشی در اثر افزودن مهاربندی را در تغییر مکان‌های زیاد نشان می‌دهد. این افزایش سختی جانبی در تغییر مکان‌های زیاد محدود است و باعث کاهش زیاد در شکل‌پذیری قاب خمشی نمی‌شود. این موضوع در تحلیل اجزاء محدود و مقایسه‌ی سه مدل قاب خمشی ساده، قاب خمشی با مهاربند کابلی واگرا و قاب خمشی با مهاربند کابلی ضربدری بیشتر بررسی شده است. برای مقایسه‌ی نیروی محوری ستون‌ها در دو نمونه‌ی آزمایشی، نمودارهای به دست آمده از کرنش سنج‌های ۵ و ۶، نصب شده در نقطه‌ی E روی نمونه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. کرنش نهایی قاب خمشی با مهاربند

۳. بررسی اثر افزودن مهاربندهای کابلی به قاب خمشی

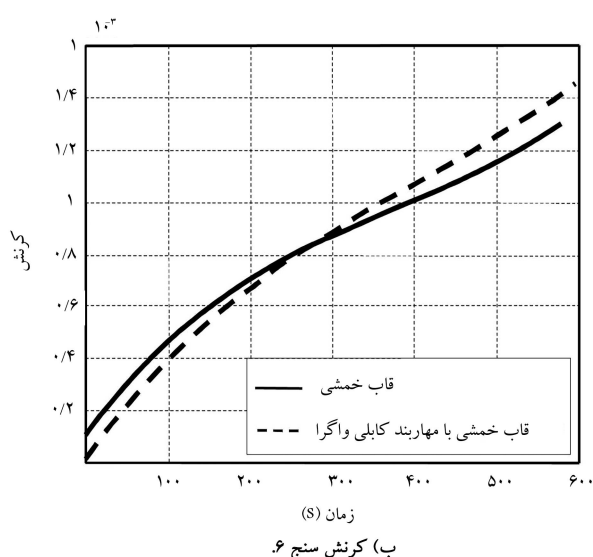
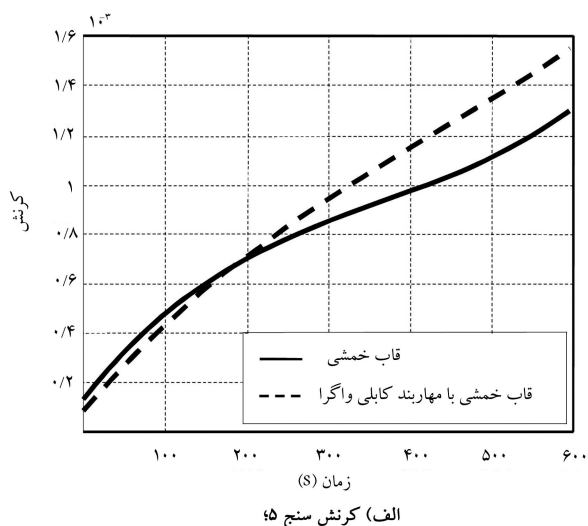
به منظور بررسی تأثیر افزودن مهاربند به قاب خمشی، سه مدل قاب خمشی فولادی، قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی و اگرآ و قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی ضربدری به کمک نرم افزار ABAQUS ایجاد و رفتار چرخه‌ی نیرو - جابجایی و نیروی محوری ستون‌های قاب‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت، نتایج حاصل از این بررسی‌ها بیان شده است.

۱.۳. مدل‌های اجزاء محدود سه بعدی

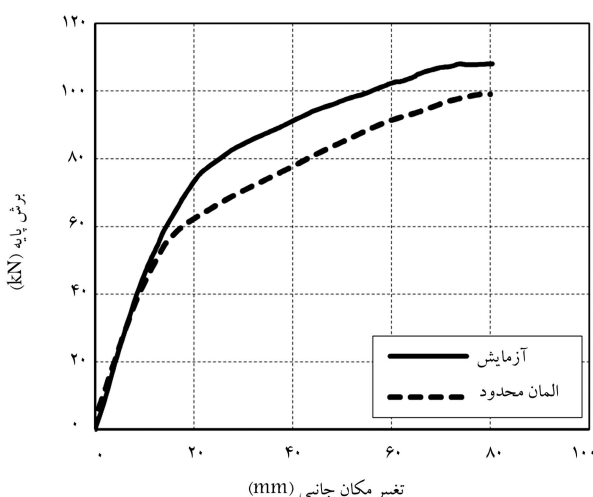
مدل‌های اجزاء محدود سه قاب مورد بررسی، به صورت سه بعدی ایجاد و تحلیل شده‌اند (شکل ۷). مشخصات مصالح فولاد و پیچ در جدول ۲ نشان داده شده است. کابل فولادی به قطر ۱۰ mm از نوع ۱۲ × ۶ هسته‌ی الیافی با مدول یانگ ۱۴۰ MPa، مقاومت نهایی ۳۷ kN و ضریب پواسون ۰/۳ است. تحلیل نمونه‌ها به صورت غیرخطی و با اعمال رفتار غیرخطی هندسی، تحت بارگذاری چرخه‌ی با دامنه‌ی افزایش یابنده مطابق شکل ۸ انجام شده است.

منحنی اسکلتون نمودارهای نیرو - تغییرمکان جانبی نمونه‌های اجزاء محدود در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. جدول ۳، مقادیر نسبت سختی جانبی اولیه‌ی نمونه به سختی جانبی قاب خمشی K/K_A، نیروی برشی نهایی V_{max} و تغییرمکان جانبی نهایی δ قاب‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۹ و جدول ۳ مشخص می‌شود که با مهاربندی قاب با کابل به صورت اگرآ، سختی جانبی اولیه ۱۷٪ و سختی جانبی نهایی ۷۰٪ بیشتر شده است، که این امر باعث کاهش ۳۷٪ تغییرمکان جانبی و افزایش ۱۲٪ در برش پایه شده است. در مهاربندی قاب با کابل ضربدری، سختی جانبی اولیه ۲۳٪ و سختی جانبی نهایی ۱۷۰٪ افزایش می‌یابد، که نتیجه‌ی آن کاهش ۵۰٪ در تغییرمکان جانبی و افزایش ۳۶٪ در برش پایه است. افزایش سختی جانبی و برش پایه در حالت مهاربندی کابلی ضربدری نسبت به مهاربند کابلی و اگرآ بیشتر است. نمودارهای چرخه‌ی نیرو - جابجایی سه مدل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طوری که از نمودارها مشخص است، نمودار چرخه‌ی قاب خمشی، در بین



شکل ۵. نمودارهای کرنش محوری اندازه‌گیری شده در بال ستون‌ها.



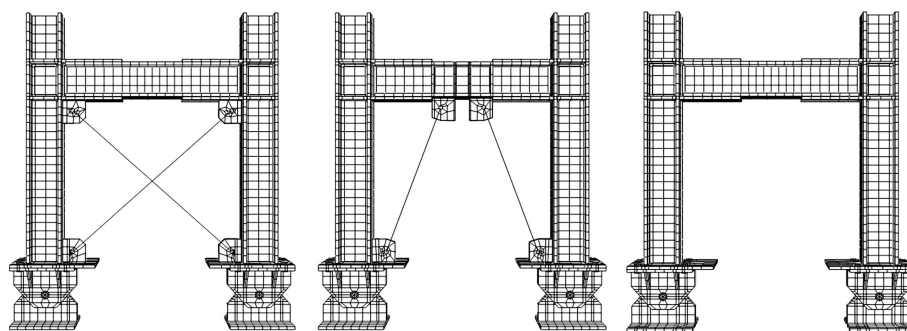
شکل ۶. مقایسه‌ی نمودارهای تجربی و حاصل از مدل اجزاء محدود برای رابطه‌ی نیرو - تغییرمکان در قاب خمشی ساده.

جدول ۲. مشخصات مصالح (تنش‌ها مگاپاسکال).

مصالح	E	σ_1	ϵ_1	σ_2	ϵ_2	ν
پیچ A325	۲۱۰	۰/۶۴	۰	۰/۸۹	۰/۱۲	۰/۳
فولاد ST37	۲۱۰	۰/۲۴	۰	۰/۴۸	۰/۲۸	۰/۳

جدول ۳. مقادیر سختی جانبی، برش پایه و تغییرمکان جانبی قاب‌ها.

نمونه	قاب خمشی	قاب با مهاربند و اگرآ	قاب با مهاربند ضربدری
K/K _A	۱	۱/۱۷	۱/۲۳
V _{max} (kN)	۱۲۱	۱۳۶	۱۶۴
V _{max} /V _{max} ^A	۱	۱/۱۲	۱/۳۵
d (mm)	۸۰	۵۰	۴۰
d/d ^A	۱	۰/۶۳	۰/۵

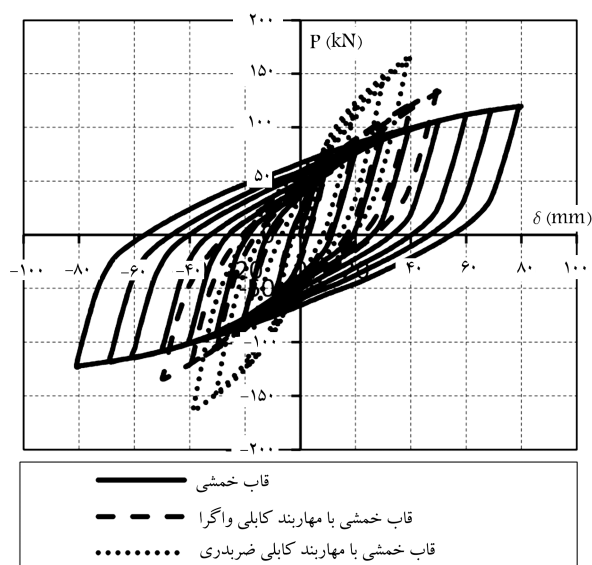


الف) قاب خمشی؛

ب) قاب با مهاربند واگرا؛

ج) قاب با مهاربند ضربدری.

شکل ۷. مدل‌های اجزاء محدود.



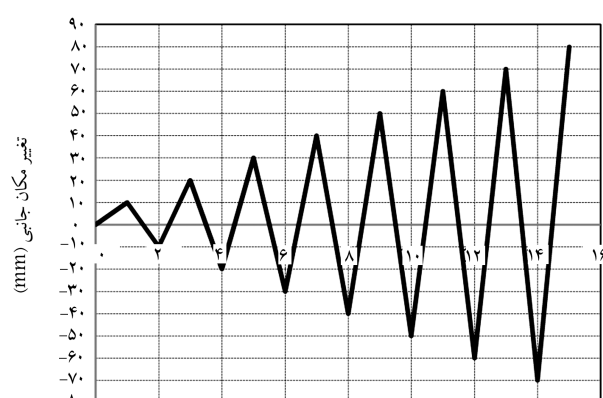
شکل ۱۰. نمودارهای چرخه‌ی مدل‌های اجزاء محدود.

برای بررسی نیروی محوری ستون‌ها، نمودار نیروی محوری ستون سمت راست نمونه‌های اجزاء محدود در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با مقایسه‌ی این نمودارها مشخص می‌شود که افزایش نیروی محوری ستون‌های قاب خمشی در مهاربندی کابلی واگرا ۷/۵٪ و در مهاربند کابلی ضربدری ۳۳٪ است. بنابراین افزایش نیروی محوری ستون‌ها در مهاربند کابلی ضربدری به مقدار قابل توجهی بیشتر از مهاربند کابلی واگراست.

۴. بررسی اثر افزودن مهاربند و موقعیت آن در رفتار

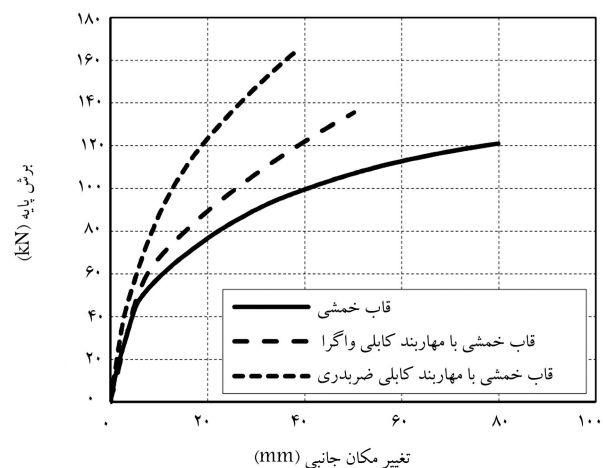
قاب خمشی مقاوم‌شده

در این بخش ۱۰ مدل اجزاء محدود دو بعدی برای قاب خمشی ساده، قاب با مهاربند کابلی ضربدری و قاب با مهاربند کابلی واگرا با هندسه و مشخصات یکسان ایجاد شده است. نمونه‌ها به صورت Wire^[۹] و با اجزاء Beam^[۹] برای تیر و ستون و اجزاء Truss^[۹] برای کابل مدل شده‌اند. این مدل‌ها با لحاظ کردن رفتار غیرخطی هندسی تحلیل و نتایج با هم مقایسه شده‌اند.



پله‌های بارگذاری

شکل ۸. دامنه‌ی جابجایی اعمال شده در نمونه‌های سه بعدی.



شکل ۹. نمودارهای اسکلتون نیرو- تغییر مکان جانبی مدل‌های اجزاء محدود.

سه نمودار چاق‌ترین است که نشان‌دهنده‌ی شکل‌پذیری زیاد آن است. در حالت مهاربندی با کابل واگرا، نمودار چرخه‌ی مقداری لاغر شده و در حالت مهاربندی کابلی ضربدری به صورت قابل توجهی لاغرتر شده است. بنابراین از نمودارهای چرخه‌ی نیز می‌توان نتیجه گرفت که مهاربند کابلی واگرا باعث افزایش سختی و کاهش شکل‌پذیری و قدرت جذب انرژی زلزله در قاب خمشی می‌شود. با وجود این، افزایش در سختی و کاهش شکل‌پذیری در مهاربند کابلی ضربدری بیشتر از مهاربند کابلی واگراست.

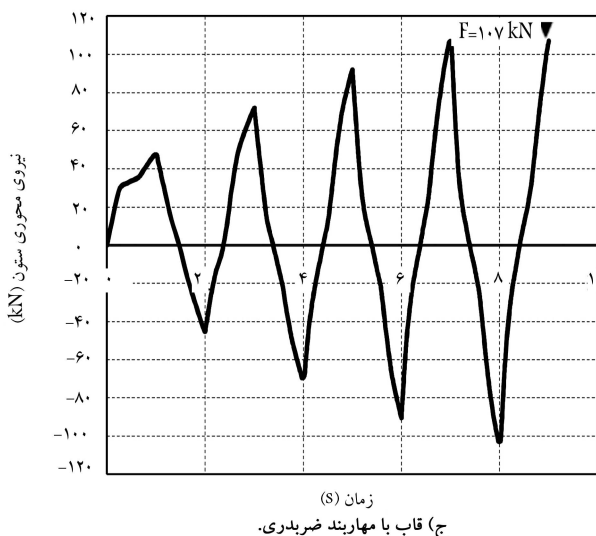
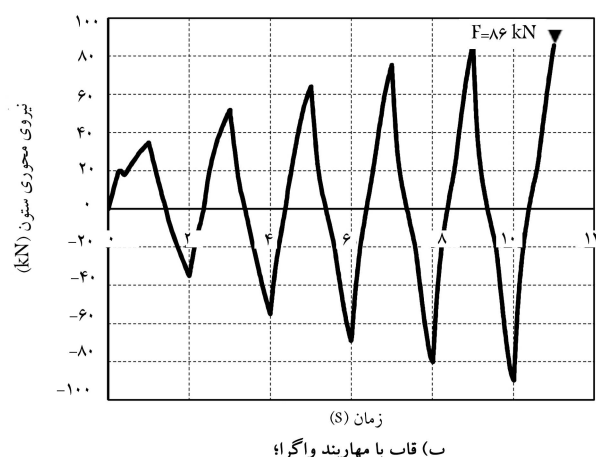
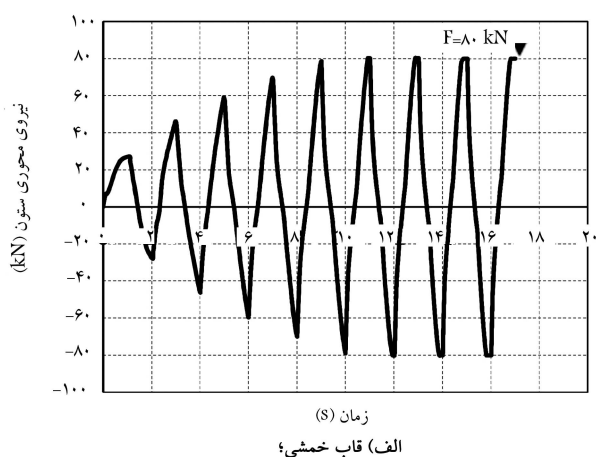
جدول ۴. مشخصات مصالح (تنش ها و مدول یانگ مگاپاسکال).

مصالح	E	σ_1	ϵ_1	σ_2	ϵ_2
فولاد SN۴۰۰B	۲۱۰	۰/۲۸۱	۰	۰/۴۲۹	۰/۳۲

جدول ۵. هندسه‌ی نمونه‌های اجزاء محدود دو بُعدی.

شماره‌ی نمونه	مشخصات نمونه
۱	قاب خمشی فولادی
۲	قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی واگرا $X = ۱۲۰۰ \text{ mm}$
۳	قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی واگرا $X = ۹۰۰ \text{ mm}$
۴	قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی واگرا $X = ۶۰۰ \text{ mm}$
۵	قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی واگرا $X = ۳۰۰ \text{ mm}$
۶	قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی همگرا $X = ۳۰۰ \text{ mm}$
۷	قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی همگرا $X = ۶۰۰ \text{ mm}$
۸	قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی همگرا $X = ۹۰۰ \text{ mm}$
۹	قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی همگرا $X = ۱۲۰۰ \text{ mm}$
۱۰	قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی ضربدری

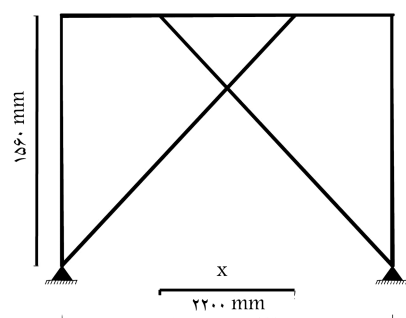
این نمونه‌ها به صورت دو بُعدی Wire و با اجزاء از نوع B۳۱، در نرم افزار ABAQUS ایجاد شده‌اند.^[۹] در همه‌ی نمونه‌ها برای مقطع تیر و ستون از نیم رخ بال پهن $۱۰ \times ۷ \times ۱۵۰ \times ۱۵۰$ H- و برای مقطع مهاربند از کابل فولادی با قطر ۱۰ mm استفاده شده است. هندسه‌ی مدل‌ها در شکل ۱۲، مشخصات مصالح در جدول ۴ و مشخصات هندسی نمونه‌ها در جدول ۵ ارائه شده‌اند. نمونه‌های اجزاء محدود تحت تغییرمکان جانبی با دامنه‌ی افزایش یابنده مطابق شکل ۱۳ و با لحاظ کردن رفتار غیرخطی هندسی تحلیل شده‌اند. نمودارهای چرخه‌یی حاصل از تحلیل نمونه‌ها در شکل ۱۴ نشان داده شده‌اند. به دلیل کثرت نمودارها فقط ۴ نمودار از ۱۰ نمودار ارائه شده است. به منظور مقایسه، منحنی‌های اسکلتون حاصل از نمودارهای چرخه‌یی در شکل ۱۵ و نتایج مهم حاصل از نمودارهای اسکلتون در جدول ۶ ارائه شده‌اند. برای مقایسه، مقدار سختی جانبی K برابر شیب قسمت خطی نمودار نیرو - تغییرمکان، برش پایه‌ی نهایی ($V_{\max}$) و تغییرمکان جانبی نهایی (δ) برای هر نمونه، همچنین نسبت هر کمیت بر مقدار آن کمیت در نمونه‌ی قاب خمشی بدون مهاربند در جدول ۶ نشان داده شده‌اند. در جدول ۶، برای نمونه‌ی قاب خمشی بدون مهاربند، مقدار سختی اولیه $۲/۵۴ \text{ kN/mm}$ ، مقدار برش پایه ۹۱ kN ، مقدار تغییرمکان جانبی نهایی ۹۰ mm و مقدار این کمیت‌ها برای نمونه‌ی ۲، یعنی قاب با مهاربند کابلی واگرا با $X = ۱۲۰۰ \text{ mm}$ به ترتیب $۲/۷۶$ ، ۱۰۹ و ۸۰ است. بنابراین افزودن مهاربند کابلی واگرا باعث افزایش سختی جانبی و مقدار برش پایه‌ی قاب خمشی و در نتیجه کاهش تغییرمکان آن و کاهش شکل‌پذیری شده است. با مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های ۲ تا ۶ در جدول ۶، می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش فاصله بین انتهای کابل‌های مهاربند واگرا بر روی تیر، سختی جانبی قاب و برش پایه روندی افزایشی دارد، تا در نمونه‌ی ۶ به ترتیب به مقادیر $۳/۶۳ \text{ kN/mm}$ و ۱۲۸ kN برسد و تغییرمکان جانبی تا



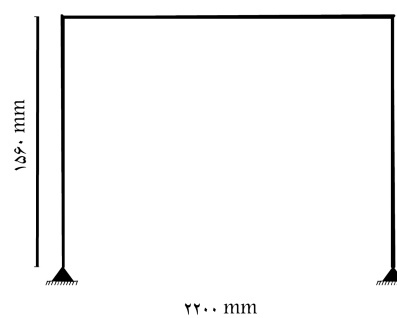
شکل ۱۱. نمودار نیروی محوری ستون سمت راست.

۱.۴. مشخصات مدل‌های اجزاء محدود دو بُعدی

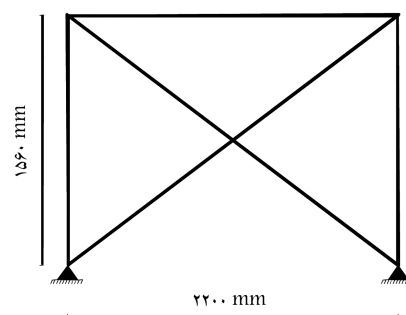
یک نمونه قاب خمشی فولادی، یک نمونه قاب با مهاربند کابلی ضربدری، ۴ نمونه قاب با مهاربند کابلی واگرای غیرمتقارب با موقعیت‌های مختلف محل اتصال کابل‌ها بر روی تیر و ۴ نمونه قاب با مهاربند کابلی واگرای متقارب با موقعیت‌های مختلف محل اتصال کابل‌ها بر روی تیر، با ابعاد و مشخصات یکسان ایجاد شده‌اند.



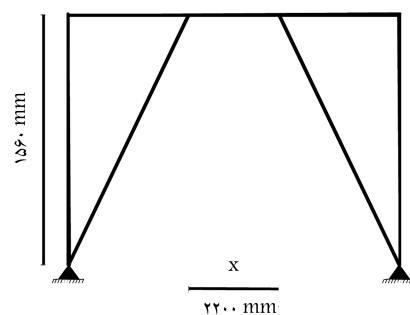
(ج) قاب با مهاربند واگرای متقارب؛



(الف) قاب خمشی؛



(د) قاب با مهاربند کابلی ضربدری.



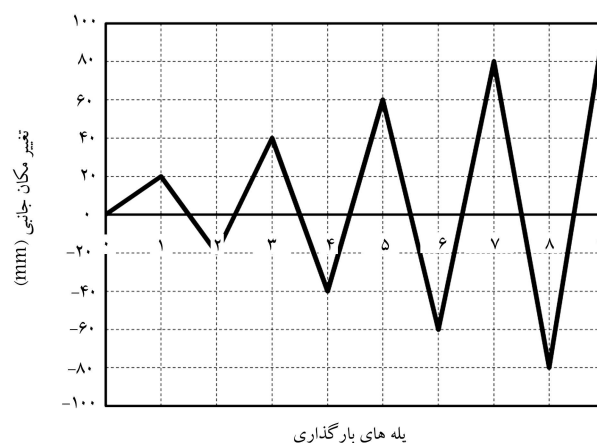
(ب) قاب با مهاربند کابلی واگرای غیر متقارب؛

شکل ۱۲. هندسه‌ی مدل‌های اجزاء محدود دو بُعدی.

جدول ۶. مقادیر سختی جانبی، برش پایه و تغییرمکان جانبی مدل‌های اجزاء محدود قاب‌های خمشی (واحد‌ها kN و mm).

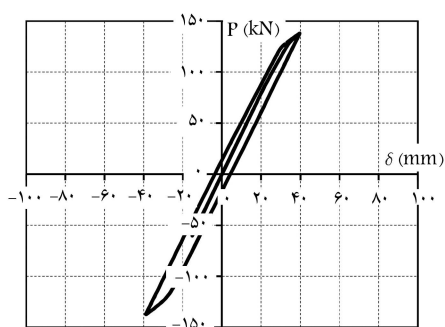
نمونه	K	K/K _A	V _{max}	V _{max} /V _{max} ^A	d	d/d ^A
۱	۲,۵۴	۱	۹۱	۱	۹۰	۱
۲	۲,۷۶	۱,۰۹	۱۰۹	۱,۲	۸۰	۰,۹
۳	۲,۹۱	۱,۱۵	۱۱۵	۱,۲۶	۶۸	۰,۷۶
۴	۳,۱۰	۱,۲۲	۱۲۰	۱,۳۲	۶۰	۰,۶۷
۵	۳,۲۶	۱,۲۸	۱۲۱	۱,۳۳	۴۹	۰,۵۴
۶	۳,۶۳	۱,۴۳	۱۲۸	۱,۴	۴۳	۰,۴۸
۷	۳,۷۸	۱,۴۹	۱۳۲	۱,۴۵	۴۱	۰,۴۵
۸	۳,۸۷	۱,۵۳	۱۳۵	۱,۴۸	۴۰	۰,۴۴
۹	۳,۹۲	۱,۵۴	۱۳۸	۱,۵۲	۴۰	۰,۴۴
۱۰	۳,۹۳	۱,۵۵	۱۴۱	۱,۵۵	۴۰	۰,۴۴

۶۳ kN است، که با مهاربندی کابلی واگرا در نمونه‌ی ۲ به مقدار ۷۶ kN رسیده است. با کاهش فاصله بین انتهای کابل‌های مهاربند واگرا بر روی تیر از نمونه‌ی ۲ تا ۶، نیروی محوری روندی افزایشی دارد، تا به مقدار ۹۱ kN در نمونه‌ی ۵ برسد. از نمونه‌ی ۶ تا ۱۰ تغییرات چندانی در نیروی محوری ستون دیده نمی‌شود.

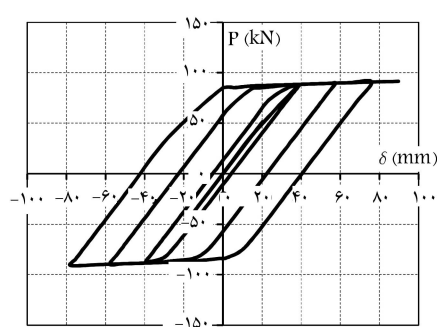


شکل ۱۳. دامنه‌ی جابجایی اعمال‌شده در نمونه‌های اجزاء محدود.

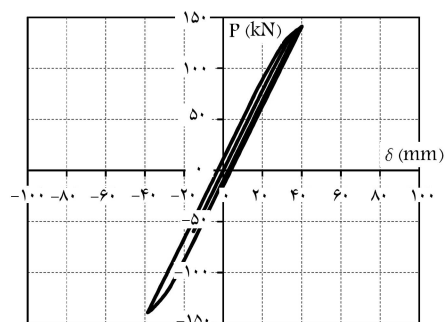
مقدار ۴۳ mm در نمونه‌ی ۶ روندی کاهشی دارد. با توجه به جدول مذکور، روند افزایش سختی جانبی و برش پایه و در نتیجه روند کاهش تغییرمکان جانبی از نمونه‌ی ۶ به بعد تا نمونه‌ی ۱۰، یعنی قاب خمشی با مهاربند کابلی ضربدری مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، در نمونه‌هایی که کابل‌ها از روی هم رد و مهاربند واگرای ضربدری ایجاد شده است، روند کاهش بسیار ملایم‌تر است. روند تغییرات در مقدار سختی جانبی یا به عبارتی در شکل‌پذیری، با توجه به نمودارهای چرخه‌های هیستریزس در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشهود است. برای راحتی مقایسه‌ی منحنی‌های اسکلتون نمودارهای چرخه‌ی نمونه‌ها در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند. تغییرات در مقدار نیروی محوری نهایی ستون‌ها در این ۱۰ نمونه، در شکل ۱۶ به صورت نمودار میله‌ای نشان داده شده است. نیروی محوری ستون قاب خمشی



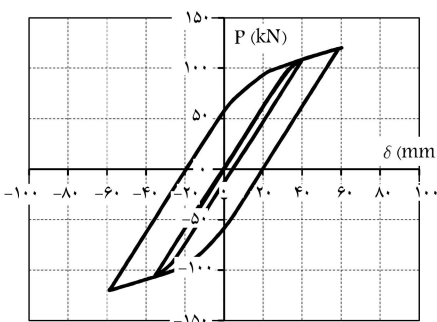
ج) قاب با مهاربند واگرای متقارب؛



الف) قاب خمشی؛

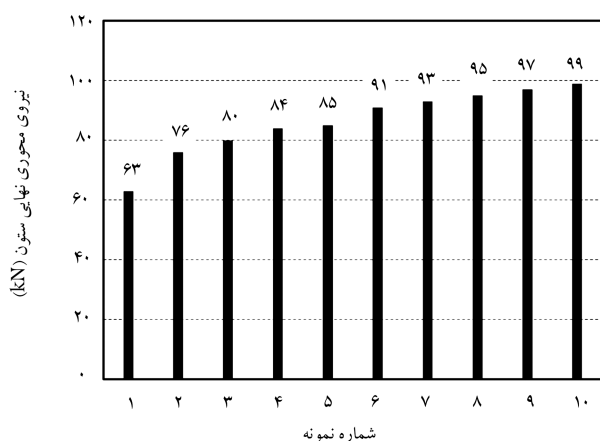


د) قاب با مهاربند کابلی ضربدری.

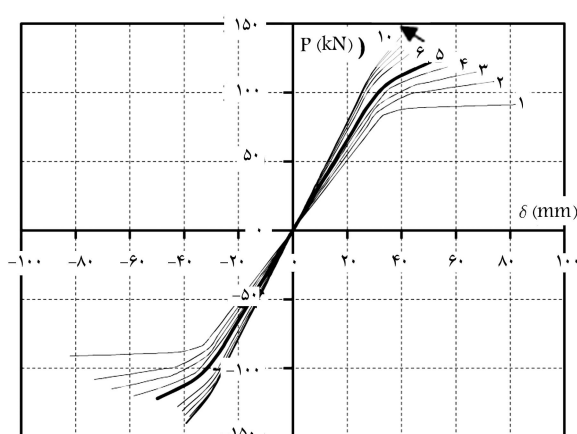


ب) قاب با مهاربند واگرای غیر متقارب؛

شکل ۱۴. نمودار چرخه‌ی مدل‌های اجزاء محدود دو بُعدی.



شکل ۱۶. تغییرات در نیروی محوری نمونه‌های اجزاء محدود.



شکل ۱۵. منحنی‌های اسکلتون چرخه‌های هیستریزس نمونه‌های اجزاء محدود.

اجزاء محدود سه بُعدی، نسبت سختی قاب خمشی با مهاربند کابلی واگرا به سختی قاب خمشی ساده، ۱/۱۷ و این نسبت برای قاب با مهاربند کابلی ضربدری ۱/۲۳ است. از نظر شکل‌پذیری، قاب خمشی با مهاربند کابلی واگرا، رفتار بهتری نسبت به حالت ضربدری نشان می‌دهد. نسبت نیروی محوری ستون‌ها در قاب خمشی با کابل واگرا به قاب خمشی ساده ۱/۱ و این نسبت برای قاب با مهاربند کابلی ضربدری ۱/۳۳ است. بنابراین، در قاب خمشی با مهاربند کابلی واگرا، افزایش نیروی محوری ستون‌ها نسبت به حالت ضربدری کمتر است.

برای بررسی اثر موقعیت اتصال کابل مهاربند واگرا به تیر در قاب مقاوم‌شده، ۱۰ نمونه مدل اجزاء محدود دو بُعدی برای قاب خمشی، قاب با مهاربند کابلی واگرای غیرمتقارب و قاب با مهاربند واگرای متقارب با فواصل مختلف برای انتهای کابل‌ها بر روی تیر و قاب خمشی با مهاربند کابلی ضربدری ایجاد و تحلیل شدند.

۵. نتیجه‌گیری

نمونه‌های قاب خمشی و قاب با مهاربند کابلی واگرا ساخته و آزمایش شدند و نتایج آزمایش نشان داد که در صورت مهاربندی قاب خمشی با مهاربند کابلی واگرا، سختی قاب بیشتر می‌شود و نیروی محوری ستون‌ها افزایش می‌یابد. برای قاب خمشی آزمایش‌شده، نمونه‌ی اجزاء محدود ایجاد و نتایج تحلیل آن با داده‌های تجربی مقایسه شده است. اختلاف در مقادیر برش پایه و سختی اولیه حاصل از تحلیل مدل اجزاء محدود با داده‌های تجربی به ترتیب ۹ و ۶۶ درصد است. بنابر این مدل اجزاء محدود، دقت مناسبی در پیش‌بینی رفتار قاب‌های مورد بررسی دارد. سه مدل اجزاء محدود برای قاب خمشی، قاب با مهاربند کابلی واگرا و قاب با مهاربند کابلی ضربدری در نرم‌افزار ABAQUS ایجاد و تحلیل شدند. در نمونه‌های

مهاربندی شده به قاب خمشی ساده در بیشترین مقدار، یعنی فاصله‌ی کم بین انتهای کابل‌ها بر روی تیر، $1/35$ و در کمترین مقدار، یعنی فاصله‌ی زیاد بین انتهای کابل‌ها بر روی تیر، برابر $1/2$ و در مهاربند کابلی ضربدری $1/57$ است. بنابراین، نیروی محوری ستون‌ها در حالت مهاربند واگرا کمتر است و در این حالت با تغییر فواصل انتهای کابل بر روی تیر، امکان کنترل مقدار نیروی محوری ستون‌ها وجود دارد. در حالت کلی، مهاربند کابلی واگرا نسبت به مهاربند کابلی ضربدری از لحاظ شکل‌پذیری و نیروی محوری ستون‌ها رفتار مناسب‌تری دارد و در این نوع مهاربند نیاز به تقویت ستون‌ها و پی کمتر است. همچنین در مهاربند کابلی واگرا با تغییر فاصله بین محل اتصال کابل‌ها بر روی تیر، امکان کنترل سختی جانبی قاب و نیروی محوری ستون‌ها وجود دارد.

در نمونه‌های اجزاء محدود دو بُعدی، نسبت سختی قاب خمشی مهاربندی شده به سختی قاب خمشی ساده، در بیشترین مقدار (فاصله‌ی کم بین انتهای کابل‌ها بر روی تیر) $3/26$ و در کمترین مقدار (فاصله‌ی زیاد بین انتهای کابل‌ها بر روی تیر) $2/26$ و در حالت مهاربند کابلی ضربدری $3/93$ بود. بنابراین، نتایج این نمونه‌ها نیز رفتار مناسب قاب خمشی با مهاربند کابلی واگرا را نشان می‌دهد. همچنین با بررسی نتایج این نمونه‌ها مشخص می‌شود که در قاب خمشی با مهاربند کابلی واگرا، امکان کنترل سختی جانبی قاب خمشی وجود دارد. با افزایش فاصله، انتهای کابل‌ها بر روی تیر سختی جانبی کمتر و قاب شکل‌پذیرتر خواهد شد. با کاهش فاصله، بین انتهای کابل‌های مهاربند روی تیر، قاب سخت‌تر و شکل‌پذیری آن کمتر می‌شود. در نمونه‌های اجزاء محدود، نسبت نیروی محوری ستون‌ها در قاب خمشی

منابع (References)

1. Di Sarno, L., Elnashai, A.S. and Nethercot, D.A. "Seismic retrofitting of framed structures with stainless steel", *Journal of Constructional Steel Research*, **62**(1-2), pp. 93-104 (2006).
2. Mahtab, M. and Zahedi, M. "Seismic retrofit of steel frames using steel plate shear walls", *Asian Journal of Applied Sciences*, **1**(4), pp. 316-326 (2008).
3. Kurata, M. "Strategies for rapid seismic hazard mitigation for sustainable infrastructure systems", Ph.D Dissertation, Georgia Institute of Technology, Georgia, USA (2009).
4. Xie, Q. "State of the art of buckling- restrained braces in Asia", *Journal of Constructional Steel Research*, **61**(6), pp. 727-748 (2005).
5. Uriz, P. and Whittaker, A.S. "Retrofit of pre-northridge steel moment-resisting frames using fluid viscous damper", *The Structural Design of Tall Buildings*, **10**(5), pp. 371-390 (2001).
6. Filiatrault, A. and Tremblay, R. "Design of tension-only concentrically braced steel frames for seismic induced impact loading", *Engineering Structures*, **20**(12), pp. 1087-1096 (1998).
7. Sorace, S. and Terenzi G. "The damped cable system for seismic protection of frame structures- Part I: General concepts, testing and modeling", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **41**(5), pp. 915-928 (2012).
8. Hou, X. and Tagawa, H. "Displacement-restraint bracing for seismic retrofit of steel moment resisting frames", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(5), pp. 1096-1104 (2009).
9. ABAQUS. ABAQUS Documentation. Version 6.10-1. Hibbit, Karlson and Sorensen, Inc. (2010).