

مقاوم سازی ساختمان های بتنی با سیستم های کابلی و بهینه سازی فرم کابل و محدوده ی نیروی پیش تنیدگی

مجید برقیان (استادیار)

صمد مقصودپور (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده ی فنی، گروه عمران، دانشگاه تبریز

در این تحقیق استفاده از سیستم های کابلی به منظور مقاوم سازی ساختمان ها بررسی می شود. اولین سیستم، سیستم با کابل یکپارچه است که در آن از کابل های پیش تنیده با اتصال لغزشی در کف طبقات میانی، برای افزایش سختی جانبی سازه استفاده می شود و برای استهلاک انرژی در انتهای هر کابل یک میراگر فنری نصب می شود. سیستم بعدی، یک سیستم ضربداری شامل کابل های پیش تنیده یی است که به صورت ضربداری در یک یا چند دهانه از قاب استفاده می شوند. این سیستم ها به دلیل برخورداری از مقاومت کششی بالای کابل، سهولت و سرعت بالای اجرا، مقرون به صرفه بودن، و... علاوه بر آن که می توانند جایگزین سیستم های دیگر شوند، برای مقاوم سازی سازه های موجود نیز قابل استفاده اند. نیروی پیش تنیدگی کابل ها، در این سیستم ها باید در محدوده ی مشخصی قرار گیرد. این محدوده در قاب های بتنی سه و شش طبقه در چندین حالت یافت می شود. توسط سیستم با کابل یکپارچه می توان سختی جانبی کابل در هر طبقه را به راحتی با تغییر نقطه ی عبور کابل از کف آن تنظیم کرد. با مدل سازی سیستم در نرم افزار SAP 2000، حالت بهینه ی فرم کابل در قاب ها به دست آمد. در این حالت، بیشترین درصد کاهش تغییر مکان جانبی نسبی مربوط به طبقاتی است که در سیستم قاب خمشی دارای بیشترین مقدار هستند. در نهایت، مقایسه ی نتایج قاب خمشی با سیستم های کابلی نشان دهنده ی کاهش چشمگیر تغییر مکان ها و نیروهای داخلی اعضا است.

واژگان کلیدی: بهینه سازی، تغییر مکان جانبی نسبی، سیستم کابلی، کابل های پیش تنیده، محدوده ی پیش تنیدگی.

barghian@tabrizu.ac.ir
maghsodpour@gmail.com

۱. مقدمه

در ساختمان های بتنی به منظور مقابله با نیروهای جانبی معمولاً سیستم هایی نظیر قاب خمشی، دیوارهای برشی بتنی یا فولادی، قاب-دیوار، مهاربندهای فلزی و سیستم لوله یی یا لوله در لوله به کار می روند. نتایج بررسی ها در زلزله های مختلف جهان بر روی ساختمان ها، حاکی از آن است که خسارات ناشی از زلزله در ساختمان های دارای دیوار برشی کم تر بوده است. به طور مثال در زلزله ی ۱۹۸۵ مکزیکوسیتی بیش از ۲۸۰ ساختمان با سیستم قاب خمشی و با تعداد طبقات ۶ الی ۱۵ فرو ریختند در حالی که تعداد ساختمان های فروریخته شده که دارای سیستم مقاوم جانبی دیوار برشی بودند صفر بود. بنابراین استفاده از دیوارهای برشی توصیه می شود.^[۱] البته در ساختمان های بلند معمولاً دیوارهای برشی را به تنهایی به کار نمی برند زیرا تغییر مکان کنسولی شکل دیوار در طبقات بالا، به عوامل غیر سازه یی آسیب وارد می کند. برای حل این مشکل از سیستم قاب-دیوار استفاده می شود. در این سیستم نیز به علت ناسازگاری حرکت جانبی قاب (حالت برشی) و دیوار (حالت خمشی) در ارتفاع، نیروهای اندرکش بین دیوار و قاب ایجاد می شوند و باعث افزایش نیروهای داخلی قاب در طبقات بالایی می شوند (درواقع دیوار به نفع بارهای خارجی عمل می کند).

قطع دیوارهای برشی در مناطق فوقانی سازه، تأثیرات پیچیده یی بر توزیع لنگرها و برش ها بین قاب و دیوار داشته و تعیین نراز قطع دیوار را بسیار مشکل می کند. همچنین ایجاد بازشوها در دیوارها، به دلایل معماری، مشکل سازند -- در محل ایجاد بازشوها نیروهای زیادی به دیوارها اعمال می شود و باعث بروز شکست های غیرمنتظره می شود.^[۲] سیستم دیگری که در چندین سال اخیر مورد توجه قرار گرفته و عملاً در کشورهایمانند آمریکا و ژاپن اجرا شده، دیوار برشی فولادی است. اساس ایده ی این دیوارها بهره گیری از میدان کشش قطری است که پس از کمانش ورق فولادی در آن ایجاد می شود. این موضوع برای اولین بار توسط واگنر در سال ۱۹۳۱ با آزمایش روی پانل های برشی آلومینیومی ارائه شد. پس از وی دانشمندان بسیاری چون کوهن، باسلر، راکبی، پورتر و... بر روی میدان کشش قطری تیرورق ها مطالعه کردند. در دهه ی ۸۰ میلادی در دانشگاه آلبرتا ی کانادا برای اولین بار طرح استفاده از دیوار برشی فولادی با ورق نازک مطرح شد و پس از آن دیگر محققین (دکتر سعید صبوری و همکاران ایشان)، یک مدل ریاضی برای اندرکش ورق فولادی و قاب محیطی آن ارائه کردند. در دهه ی ۹۰ و پس از آن نیز، مطالعاتی در مورد

۴. عدم نیاز به نگهداری درمورد خود کابل، و نیز نگهداری ساده‌ی میراگرهای فنری در سیستم با کابل یکپارچه، با توجه به تعداد کم آنها در کل سازه؛
۵. عدم نیاز به تعمیر، یا تعمیر سریع آن بعد از زلزله؛
۶. افزایش ایمنی با افزایش قابل ملاحظه‌ی سختی جانبی؛
۷. ممانعت کم‌تر برای ملاحظات معماری در مقایسه با دیوارهای برشی و مهاربندها؛
۸. مقاومت بالای کابل در برابر خوردگی، سایش و خستگی.

در این تحقیق نحوه‌ی مدل‌سازی این سیستم‌های کابلی شرح داده می‌شود. محدوده‌ی نیروی پیش‌تندگی کابل‌ها و فرم بهینه‌ی کابل در سیستم با کابل یکپارچه، با فرض دو قاب بتنی سه و شش طبقه و بررسی نتایج مدل‌های مختلف ایجاد شده، تعیین می‌شود. سپس نتایج هر دو سیستم کابلی با نتایج قاب خمشی مقایسه می‌شوند تا میزان و نحوه‌ی تأثیر سیستم‌های مذکور بر سختی و مقاومت قاب‌ها مشخص شود.

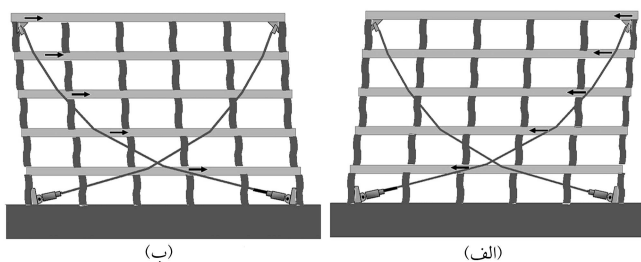
۲. معرفی سیستم‌های کابلی و نحوه‌ی عملکرد آنها

۱.۲. سیستم با کابل یکپارچه:

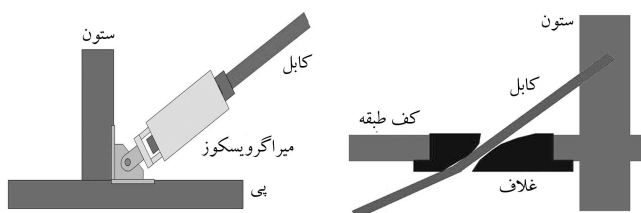
در این سیستم به دلیل یکپارچگی کابل مهار و اتصال لغزشی آن به دال‌های کف طبقات -- علی‌رغم این که پیش‌تندگی کابل تاحدودی باعث محکم‌تر شدن این اتصالات می‌شود -- نیروهای کششی ایجاد شده در کابل تحت تأثیر نیروهای جانبی، در تمامی طبقات با هم برابر خواهند بود. مؤلفه‌های افقی این نیروی کششی به دلیل شکستگی امتداد کابل در محل عبور از کف طبقات مختلف، و با توجه به زوایای کابل نسبت به افق، متفاوت خواهد بود. برآیند این مؤلفه‌ها در دو طبقه‌ی مجاور، نیرویی است که برخلاف جهت نیروی زلزله به کف طبقه اعمال می‌شود و مانع تغییر مکان بیشتر آن می‌شود. شمایی از عملکرد شرح داده شده برای این سیستم، تحت اثر بارهای جانبی در دو جهت مخالف در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین نحوه‌ی اتصال کابل به کف طبقات و اتصال آن در اولین طبقه به ستون و پی در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به توضیحات بالا در مورد عملکرد سیستم، مطمئناً تعیین نقاط عبور کابل از کف هر طبقه (به عبارت دیگر زوایای امتداد کابل

مسائل اجرایی و تحلیلی دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک به صورت تجربی و نظری انجام گرفت. ایجاد بازشوها در این سیستم به دلیل کاهش مقاومت و سختی دیوار برشی فولادی، مشکل‌سازند.^[۳] در سازه‌های بتنی گاهی از انواع مهارهای فلزی، از جمله از مهارهای فلزی ضربدری و زانویی، نیز استفاده شده است. این مهارها برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود به صورت خارجی و برای سازه‌های جدید به صورت داخلی تعبیه شده‌اند. درمورد مقاوم‌سازی با این نوع مهاربندی‌ها، مثال‌های عملی بسیاری ارائه شده است؛ همچنین آزمایش این نوع مهاربندی‌ها نیز گزارش شده است. براین اساس، این مهاربندی‌ها ظرفیت مقاومت برشی سازه را افزایش می‌دهند، اگرچه مسائلی همچون مشکلات اجرایی و ملاحظات معماری در معایب این‌گونه بادبندی‌ها ذکر شده است.^[۴] موضوع تحقیق این نوشتار، بررسی استفاده از کابل در دو سیستم متفاوت برای مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر نیروهای جانبی است. سیستم اول (سیستم با کابل یکپارچه) شامل کابل‌های پیش‌تندیه‌ی است که موجب افزایش سختی جانبی سازه می‌شوند و برای استهلاک انرژی در انتهای هر کابل یک میراگر فنری با مایع گران‌رو (ویسکوز) قرار داده می‌شود. از این سیستم می‌توان به صورت خارجی برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود استفاده کرد. شکل ۱ ساختمان بتنی را نشان می‌دهد که سیستم با کابل یکپارچه در آن به منظور مقاوم‌سازی به صورت خارجی اجرا شده است.^[۵] سیستم دوم یا سیستم ضربدری دارای کابل‌های پیش‌تندیه‌ی است که به صورت ضربدری در یک یا چند دهانه از قاب (شبه مهاربندهای فلزی) استفاده می‌شوند. به دلیل جدید بودن این سیستم‌ها، علی‌رغم جست‌وجوی زیاد انجام شده توسط مؤلفین، به جز اطلاعات مختصری که در قالب یک فایل نمایشی ارائه شده بود اطلاعات دیگری پیدا نشد. به نظر مؤلفین این سیستم‌ها کارایی بالایی دارند و می‌توانند با انجام تحقیقات نظری و تجربی، جایگزین خوبی برای سیستم‌های دیگر باشند. مزایای این سیستم‌ها را می‌توان چنین عنوان کرد:

۱. مقاومت کششی بسیار بالای کابل اجازه‌ی اعمال نیروهای پیش‌تندگی قابل توجهی را در کابل‌ها داده و سختی سیستم را هرچه بیشتر افزایش می‌دهد؛
۲. سطح مقطع کوچک و وزن کم کابل در مقابل مقاطع دیگر (دیوارهای برشی بتنی و فولادی و مهاربندهای فلزی) علاوه بر کاهش هزینه‌ی سازه نسبت به سایر سیستم‌های مقاوم‌سازی، به دلیل ارتباط نیروهای زلزله با وزن سازه می‌تواند باعث کاهش نیروهای اعمالی نیز بشود؛
۳. سهولت و سرعت بالای اجرا به خصوص برای سیستم با کابل یکپارچه؛



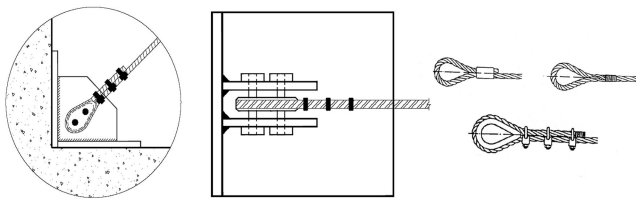
شکل ۲. عملکرد سیستم کابلی در برابر بارهای جانبی.



شکل ۳. نحوه‌ی اتصال کابل به کف طبقات و پی.



شکل ۱. مقاوم‌سازی ساختمان بتنی توسط سیستم با کابل یکپارچه به صورت خارجی.

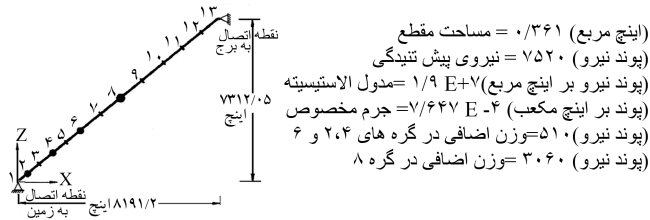


شکل ۶. نحوه‌ی اتصال کابل به قاب توسط ایجاد حلقه، و روش‌های مختلف ایجاد حلقه.

و داخل شیار قطعه‌ی اتصال قرار می‌گیرد و این قطعه توسط پین‌هایی به ورق‌ها متصل می‌شود. برای ایجاد حلقه سه روش وجود دارد: [۷] دو سر پرس کردن کابل با اتصال بست‌گلوبی، اتصال بست‌های U شکل، و گیس‌بافت کردن طناب فولادی با دست (شکل ۶).

۳. مدل‌سازی سیستم‌های کابلی

مدل‌سازی این سیستم‌ها با نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ انجام گرفت. ابتدا برای اطمینان از صحت مدل‌سازی عضو کابلی، مثالی حل شده از NONSAP که جواب‌های آن با برنامه‌ی اجزای محدود FINELE نیز به دست آمده بود [۸]، توسط مؤلفین در این برنامه مدل شد. اطلاعات مثال در شکل ۷ و جدول ۱ آورده شده است. [۹]



شکل ۷. اطلاعات مثال حل شده‌ی NONSAP.

جدول ۱. اطلاعات مثال حل شده‌ی NONSAP.

گره	X (اینچ)	Z (اینچ)	بارگره‌ی ناشی از وزن (پوند نیرو)
۱	۰	۰	-
۲	۳۰۵/۵۶	۲۷۲/۷۳	-۶۹/۶
۳	۹۷۳/۵۱	۸۶۸/۹۹	-۹۵/۵۱
۴	۱۶۴۱/۴۶	۱۴۶۵/۲۵	-۷۹/۱۳
۵	۲۰۸۰/۴	۱۸۵۷/۰۹	-۶۲/۷۶
۶	۲۵۱۹/۳۴	۲۲۴۸/۹۳	-۷۹/۱۳
۷	۳۱۸۷/۲۹	۲۸۴۵/۱۹	-۹۵/۵۱
۸	۳۸۵۵/۲۴	۳۴۴۱/۴۵	-۱۱۰/۵۱
۹	۴۷۳۳/۱۲	۴۲۲۵/۱۱	-۱۲۵/۵۲
۱۰	۵۶۱۱	۵۰۰۸/۷۷	-۱۲۵/۵۲
۱۱	۶۴۸۸/۸۸	۵۷۹۲/۴۳	-۱۲۵/۵۲
۱۲	۷۳۶۶/۷۶	۶۵۷۶/۰۹	-۱۲۱/۷
۱۳	۸۱۹۱/۲	۷۳۱۲/۰۵	-

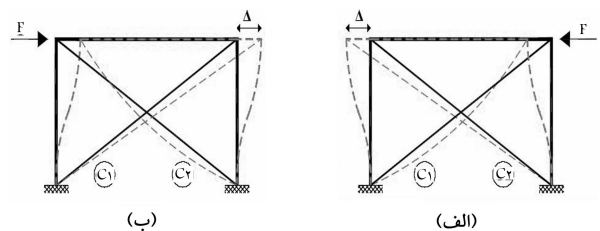
نسبت به افق در هر طبقه) به عنوان یکی از پارامترهای تعیین‌کننده‌ی سختی جانبی کابل از اهمیت خاصی برخوردار است. به دلیل تغییر شکل جانبی قاب خمشی در حالت برشی، مقادیر تغییر مکان‌های جانبی نسبی طبقات پایینی بزرگ‌ترند. با توجه به این نکته، در سیستم قاب خمشی مهار شده با کابل می‌توان به راحتی با تغییر محل عبور کابل از کف طبقه، سختی جانبی ناشی از آن را با توجه به نیاز طبقات توزیع کرد. در این صورت به طبقاتی که تغییر مکان جانبی نسبی بزرگ‌تری دارند سختی بیشتری داده خواهد شد و با ایجاد یکنواختی در تغییر مکان‌ها سیستم مقاوم بهتری خواهیم داشت.

۲.۲. سیستم کابلی ضربه‌داری:

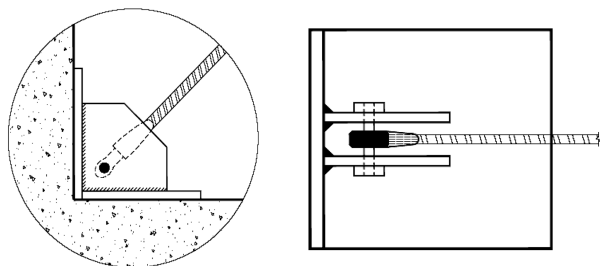
در این سیستم از کابل‌های پیش‌تنیده به صورت ضربه‌داری در یک یا چند دهانه‌ی قاب و به صورت مجزا در هر طبقه (مثل بادبندها) استفاده می‌شود. عملکرد این سیستم در یک قاب یک طبقه و یک دهانه، به صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. با اعمال نیروی جانبی به طرف راست (شکل ۴ الف) و ایجاد تغییر مکان افقی، کابل C۱ به کشش افتاده و در برابر تغییر مکان افقی قاب مقاومت می‌کند. در این حالت کابل C۲ نیز به دلیل پیش‌تنیده بودن، در سختی کل سیستم مؤثر است ولی تأثیر آن در مقایسه با کابل C۱ کم‌تر است. اگر نیروی جانبی به سمت چپ اعمال شود (شکل ۴ ب) نقش اصلی برای مقابله با نیروی جانبی برعهده‌ی کابل C۲ خواهد بود. در این سیستم برای استهلاک انرژی می‌توان از میراگرهای فذری استفاده کرد که برخلاف سیستم یکپارچه تعداد آنها کم خواهد بود. برای اتصال کابل به اعضای قاب، در صورت عدم وجود میراگرها، دو روش پیشنهاد می‌شود:

الف) استفاده از سوکت‌های مخصوص که توسط فلزات مذاب (مانند روی) به کابل وصل می‌شوند. شکل و مشخصات این نوع سوکت‌ها در برخی آیین‌نامه‌ها -- نظیر آیین‌نامه‌ی ۳۰۲ [۶] BS -- موجود است. شمای کلی اتصال در شکل ۵ ارائه شده است.

ب) در این روش به جای استفاده از سوکت، انتهای خود کابل به صورت حلقه درآمده

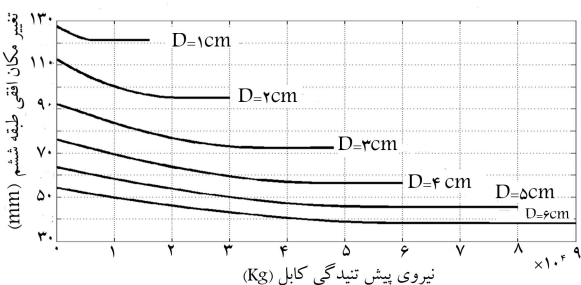
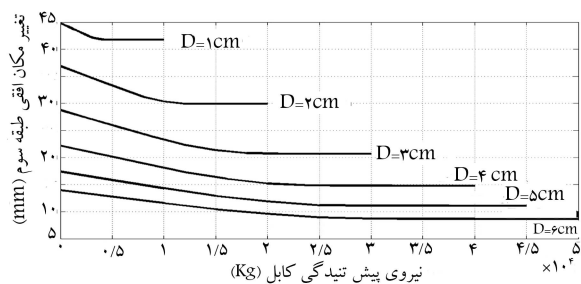


شکل ۴. عملکرد سیستم کابلی در برابر بارهای جانبی رفت و برگشتی.

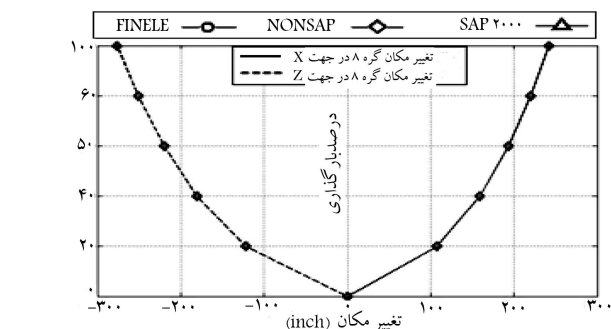


شکل ۵. نحوه‌ی اتصال کابل به اعضای قاب با استفاده از سوکت.

تغییر مکان جانبی قاب شده و در عوض تغییر نیروهای داخلی اعضای آن نسبت به حالت بدون پیش‌تندگی می‌شود. پس مقدار نیروی پیش‌تندگی باید بهینه شود. برای بررسی این مطلب دو ساختمان بتنی، سه و شش طبقه، که در هر جهت دارای پنج دهانه‌ی ۵ متری بوده و ارتفاع طبقات آن ۳ متر است، با سیستم پوششی دال بتنی، در نظر گرفته شدند. بارگذاری آنها مطابق ضوابط آیین‌نامه‌های ۵۱۹ و ۲۸۰۰ انجام شد.^[۱۱] یک قاب کناری از هر ساختمان، به‌عنوان نماینده انتخاب شده و مورد تحلیل قرار گرفت. طراحی این قاب‌ها با فرض قاب خمشی متوسط و مطابق آیین‌نامه‌ی ۲-۳۱۸-۰۲ ACI انجام شد.^[۱۳] با ثابت نگه داشتن مقاطع قاب‌های طراحی‌شده و همچنین نیروهای جانبی اعمالی در هر دو قاب سه و شش طبقه از کابل‌هایی با قطرهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، و ۶ سانتی‌متر و نیروهای پیش‌تندگی مختلف به‌صورت ضربدری در دهانه‌ی وسطی قاب استفاده کردیم. شکل ۹ نشان‌گر نتایج مربوط به تغییر مکان جانبی طبقه‌ی آخر قاب‌ها در مقابل مقادیر مختلف نیروهای پیش‌تندگی است. از این شکل می‌توان دریافت که افزایش نیروی پیش‌تندگی تا حد معینی موجب کاهش تغییر مکان جانبی قاب می‌شود، ولی بعد از آن دیگر این کاهش وجود ندارد یا میزان آن بسیار ناچیز است. شکل ۱۰ افزایش مداوم نیروی محوری ستون واقع در سمت راست دهانه‌ی مهاربندی شده‌ی قاب را بر اثر افزایش نیروی پیش‌تندگی نشان می‌دهد. پس می‌توان چنین گفت که نیروی پیش‌تندگی کابل‌ها در سیستم کابلی باید به‌اندازه‌ی باشد که علاوه بر ایجاد کاهش چشم‌گیر در تغییر مکان جانبی قاب، باعث افزایش زیاد نیروی محوری ستون‌ها نشود. به‌طور کلی در تعیین محدوده‌ی نیروی پیش‌تندگی کابل‌ها عواملی همچون قطر کابل، طول کابل، سختی قاب و مقدار نیروی جانبی مؤثرند. برای قاب‌های در نظر گرفته شده می‌توانیم با فرض کردن قطر کابل، محدوده‌ی مذکور را از نمودارهای شکل ۹ انتخاب کنیم. مثلاً برای قاب سه طبقه اگر از کابلی به قطر ۳ سانتی‌متر استفاده شود، بهتر است نیروی پیش‌تندگی کابل از ۲۰۰۰۰ کیلوگرم بزرگ‌تر نباشد. در مورد قاب شش طبقه با کابلی به قطر ۵ سانتی‌متر، نیروی پیش‌تندگی نزدیک به ۵۵۰۰۰ کیلوگرم مناسب است.



شکل ۹. نمودارهای تغییر مکان جانبی طبقه‌ی آخر در برابر نیروی پیش‌تندگی برای قطرهای مختلف کابل.



شکل ۸. نتایج مثال با FINELE و NONSAP و SAP ۲۰۰۰.

در نظر گرفتن ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیروهای اعمالی، مدل‌های مختلفی تحلیل شدند. در مدل‌های ساخته‌شده با SAP ۲۰۰۰، یک باروزن کابل به‌صورت گرهی و بار دیگر به‌صورت بارگسترده روی عضو اعمال شد. پس از اطمینان در مورد صحت مدل‌سازی (با توجه به شکل ۸) برای مدل‌کردن سیستم کابلی ضربدری، لنگرهای خمشی در دو انتهای کابل‌ها و لنگر پیچشی در یک انتها آزادسازی شدند. اعضای کابلی به اعضای کوچک‌تر تقسیم شدند و اثر تغییر مکان‌های بزرگ در انجام تحلیل غیرخطی انتخاب شد تا انعطاف‌پذیری کابل‌ها منظور شود. به‌دلیل این که اعضای کابلی تنها با کشش کار می‌کنند حد بالای فشار در این اعضا برابر صفر اعمال شد.^[۱۴] برای مدل‌کردن سیستم با کابل یکپارچه، علاوه بر انجام مراحل فوق در مدل‌سازی اتصال لغزشی کابل، از قید محلی (Local) استفاده شد. بدین‌صورت که برای هر یک از اتصالات مورد نظر در یک طبقه، گره اتصال کابل به کف طبقه را قطع کرده و سپس اعضای تیری به هم و اعضای کابلی به هم متصل شدند. در این حالت، در محل اتصال هر دو گره یک مکان هندسی در فضا ایجاد می‌شود که کاملاً مجزای از هم عمل می‌کنند. در مرحله‌ی بعدی محورهای محلی هر دو گره به‌اندازه‌ی میانگین زوایای کابل با افق در طبقات بالا و پایین گره‌های مورد نظر، دوران داده شدند. با این کار یکی از محورهای محلی گره‌ها بر میانگین امتدادهای کابل در دو طبقه‌ی مجاور منطبق می‌شود. سپس با استفاده از قید «محلی» (Local) درجه‌ی آزادی دو گره را در امتداد عمود بر میانگین امتدادهای کابل، در دو طبقه‌ی مجاور، به هم بسته و سایر درجات آزادی، آزاد قرار داده شدند. در واقع با این کار به کابل اجازه داده می‌شود که در محل اتصال به تیر و در جهت میانگین امتدادهای کابل، آزادانه حرکت کند و در جهت عمود بر امتداد مذکور به‌دلیل مقید شدن با تیر، مانع از حرکت جانبی طبقه شود که این همان عملکرد مورد انتظار از اتصال لغزشی است. برای وارد کردن نیروی پیش‌تندگی کابل‌ها در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰، با توجه به این که اعمال مستقیم این نیرو امکان‌پذیر نبود، از روش کاهش درجه‌ی حرارت در اعضای کابلی استفاده شد که میزان کاهش با توجه به رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود.

$$\Delta T = -\frac{P}{EA\alpha} \quad (1)$$

که در آن، P نیروی پیش‌تندگی، A سطح مقطع کابل، E مدول کشسانی کابل، و α ضریب انبساط حرارتی کابل است.

۴. محدوده‌ی نیروی پیش‌تندگی کابل‌ها

یکی از مسائل موجود در مهاربندی کابلی سازه‌ها، تعیین محدوده‌ی نیروی پیش‌تندگی مورد نیاز برای کابل‌ها است. اعمال نیروی پیش‌تندگی در کابل‌ها باعث کاهش بیشتر

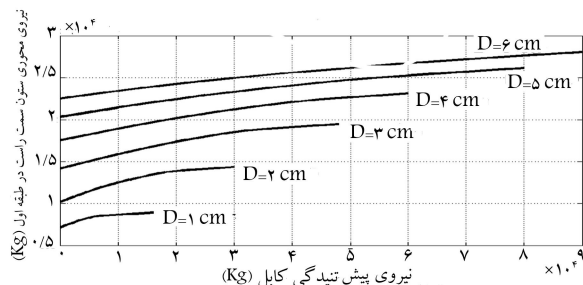
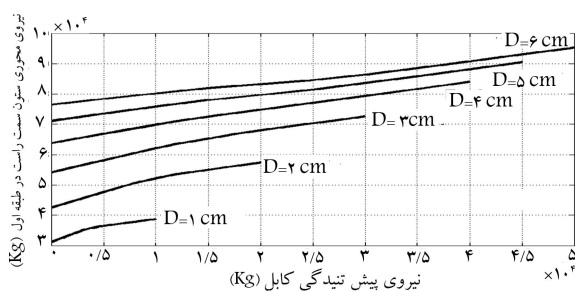
جدول ۲. تغییر مکان‌های جانبی نسبی در قاب سه طبقه برای مدل‌های مختلف ایجاد شده.

مدل	Δ۱	Δ۲	Δ۳	مدل	Δ۱	Δ۲	Δ۳
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a۱ b۱	۷,۴۸	۸,۶۴	۳,۹۸	a۴ b۶	۷,۲۷	۸,۹۵	۵,۷
a۲ b۲	۷,۳۶	۸,۵۹	۴,۱۲	a۴ b۷	۷,۳۸	۹,۳۹	۶,۶۶
a۲ b۳	۷,۳۳	۸,۵	۴,۲۴	a۵ b۳	۷,۲۶	۸,۹۳	۴,۵۲
a۳ b۲	۷,۲۹	۸,۶۸	۴,۱۹	a۵ b۴	۷,۱۹	۸,۷۷	۴,۶۸
a۳ b۳	۷,۲۵	۸,۵۶	۴,۲۹	a۵ b۵	۷,۱۸	۸,۷۷	۵,۰۷
a۳ b۴	۷,۲۴	۸,۵۳	۴,۵۳	a۵ b۶	۷,۲۳	۸,۹۸	۵,۷۲
a۴ b۵	۷,۲۷	۸,۶۶	۴,۹۹	a۵ b۷	۷,۳۲	۹,۳۸	۶,۶۶
a۴ b۳	۷,۲۲	۸,۶۸	۴,۳۹	a۵ b۸	۷,۴۳	۹,۹	۷,۸۱
a۴ b۴	۷,۱۹	۸,۵۹	۴,۵۹	a۵ b۹	۷,۵۶	۱۰,۴۴	۹,۱
a۴ b۵	۷,۲	۸,۶۸	۵,۰۱				

جدول ۳. تغییر مکان‌های جانبی نسبی در قاب شش طبقه برای مدل‌های مختلف ایجاد شده.

مدل	Δ۱	Δ۲	Δ۳	Δ۴	Δ۵	Δ۶
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a°b°c°d°e°	۹,۱۱	۱۴,۰۲	۱۱,۷۹	۷,۲۸	۰,۲۳	-۷,۳۷
a۱b۲c۲d۳e۱	۸,۷	۱۳,۲۶	۱۰,۹۹	۶,۵۳	۰,۳۹	-۴,۶۲
a۲b۳c۴d۵e۸	۷,۸۸	۱۱,۸۳	۹,۵۱	۵,۶۵	۲,۷۳	۵,۲
a۳b۶c۸d۱°e۸	۷,۶۴	۱۱,۴۴	۹,۱۹	۵,۸۴	۳,۸۹	۵,۷۵
a۴b۸c۱°d۱۱e۸	۷,۴۴	۱۱,۱۷	۹,۲۱	۶,۴۸	۴,۸۹	۶,۱۵
a۵b۱°c۱۲d۱۲e۸	۷,۲۶	۱۰,۹۹	۹,۴۳	۷,۴۷	۶,۲۵	۶,۷۱
a۶b۱۲c۱۴d۱۳e۸	۷,۱	۱۰,۸۵	۹,۶۴	۸,۶۳	۸,۰۲	۷,۴۷
a۷b۱۴c۱۵d۱۳e۸	۶,۹۸	۱۰,۶۷	۹,۷۱	۹,۰۴	۸,۲	۷,۵۲
a۸b۱۶c۱۵d۱۵e۸	۶,۹۹	۱۰,۷۱	۱۰,۱۱	۱۰,۳۶	۱۲,۲۳	۹,۵۵
a۸b۱۶c۱۶d۱۲e۸	۶,۸۸	۱۰,۵۲	۹,۹۵	۹,۸۹	۷,۳۹	۷,۰۳
a۸b۱۶c۱۶d۱۴e۸	۶,۹۱	۱۰,۵۲	۹,۷۹	۹,۹۶	۱۰,۲۲	۸,۵
a۸b۱۶c۱۶d۱۵e۸	۶,۹۷	۱۰,۶۳	۹,۹۲	۱۰,۵۴	۱۲,۳۲	۹,۵۸
a۸b۱۶c۱۷d۱۴e۸	۶,۹	۱۰,۴۹	۹,۷۲	۱۰,۴۱	۱۰,۴۵	۸,۵۸
a۸b۱۶c۱۸d۱۴e۸	۶,۹۵	۱۰,۵۹	۹,۹۶	۱۱,۳	۱۰,۸۶	۸,۷۳
a۸b۱۶c۱۹d۱۴e۸	۷,۰۸	۱۰,۸۹	۱۰,۶۳	۱۲,۷۲	۱۱,۵	۸,۹۹
a۹b۱۸c۱۷d۱۳e۸	۶,۹۱	۱۰,۷۳	۱۰,۵	۱۰,۷۷	۸,۹۹	۷,۸
a۹b۱۸c۱۷d۱۴e۸	۶,۹۳	۱۰,۷۶	۱۰,۴۲	۱۰,۸۳	۱۰,۵۷	۸,۶۱
a۹b۱۸c۱۸d۱۴e۸	۶,۹۴	۱۰,۷۳	۱۰,۴۶	۱۱,۵۸	۱۰,۹۳	۸,۷۵
a۱°b۲°c۱۸d۱۴e۸	۷,۰۲	۱۱,۳۳	۱۱,۵۷	۱۲,۰۹	۱۱,۰۸	۸,۷۹

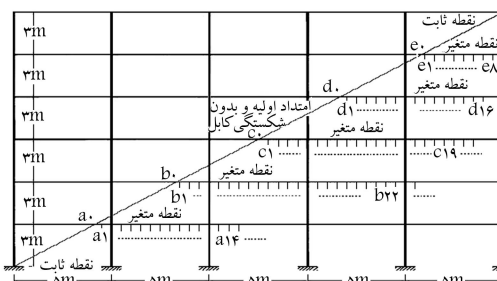
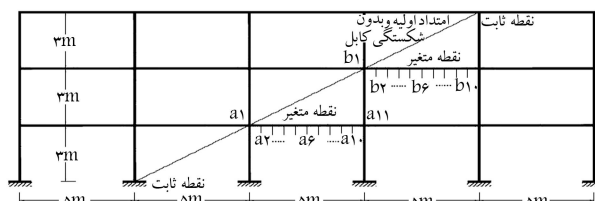
از قاب‌های سه و شش طبقه، تمامی نقاط ممکن برای اتصال کابل با گام‌های ۰/۵ متری مطابق شکل ۱۱ در نظر گرفته شدند. پس از تحلیل تمامی مدل‌های ایجاد شده، با توجه به تغییر مکان‌های جانبی نسبی طبقات مختلف قاب‌ها که قسمتی از آنها در جداول ۲ و ۳ آورده شده‌اند، حالت بهینه انتخاب شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت بهینه تغییر مکان جانبی نسبی طبقات پایین که از نظر تغییر مکانی بحرانی‌ترند، نسبت به حالت اولیه (کابل به صورت کاملاً مستقیم) کاهش بیشتری داشته و در عوض مقادیر طبقات فوقانی افزایش می‌یابد. فرم کلی کابل در حالت



شکل ۱۰. نمودارهای نیروی محوری ستون سمت راست دهانه‌ی مهاربندی شده در برابر نیروی پیش‌تندیگی برای قطرهای مختلف کابل.

۵. بهینه‌سازی فرم کابل در سیستم با کابل یک‌پارچه

با توجه به نحوه‌ی عملکرد سیستم یکپارچه ابتدا باید حالت بهینه‌ی سیستم کابلی انتخاب شود. تغییر دادن فرم کابل مهار و به عبارت دیگر تغییر دادن نقاط عبور کابل از کف طبقات موجب تغییر سختی جانبی کابل در هر طبقه می‌شود. در این مرحله با ثابت نگه داشتن مقاطع طراحی شده‌ی اعضا و همچنین نیروهای جانبی اعمالی، در قاب سه طبقه از کابلی به قطر ۳ سانتی‌متر و نیروی پیش‌تندیگی ۱۸۰۰۰ کیلوگرم استفاده شد به طوری که سیستم کابلی ۳ دهانه از ۵ دهانه‌ی قاب را پوشش دهد. در قاب شش طبقه نیز از کابلی به قطر ۵ سانتی‌متر و نیروی پیش‌تندیگی ۵۰۰۰۰ کیلوگرم، با پوشش هر ۵ دهانه استفاده شد. برای بهینه‌سازی فرم کابل، در هر یک



شکل ۱۱. موقعیت استفاده از سیستم با کابل یکپارچه در قاب‌های سه و شش طبقه و نقاط اتصال ممکن.

مشخص شود. لازم به ذکر است که نتایج سیستم ضربداری مربوط به حالتی است که برای قاب سه طبقه از کابل‌هایی به قطر ۳ سانتی‌متر با نیروی پیش‌تنیدگی ۱۸۰۰۰ کیلوگرم، و برای قاب شش طبقه از کابل‌هایی به قطر ۵ سانتی‌متر و نیروی پیش‌تنیدگی ۵۰۰۰۰ کیلوگرم در دهانه‌ی وسطی قاب استفاده شده است. نتایج سیستم با کابل یکپارچه نیز مربوط به حالت بهینه‌ی است که در بخش قبلی حاصل شد. تغییر مکان‌های جانبی نسبی طبقات مختلف برای قاب‌ها در شکل ۱۳ آورده شده است. اولین مطلبی که از دقت در نمودارهای شکل ۱۳ استنباط می‌شود کاهش قابل ملاحظه‌ی تغییر مکان جانبی نسبی طبقات مختلف در صورت استفاده از سیستم‌های کابلی است که علاوه بر کاهش محسوس لنگر در ستون‌های قاب، از اثرات نامطلوب پدیده‌ی $P - \Delta$ نیز می‌کاهد. این نتایج نشان می‌دهند که کابل‌های پیش‌تنیده حتی با سطح مقطع‌های کوچک، تأثیر زیادی در افزایش سختی جانبی قاب‌ها دارند.

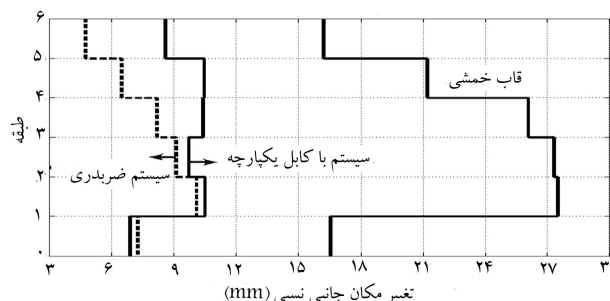
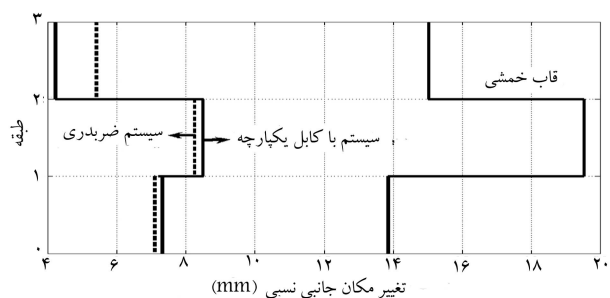
برای رعایت محدودیت مربوط به تغییر مکان‌های جانبی نسبی طبقات طبق آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ باید پس از طراحی قاب‌های خمشی برای نیروهای داخلی اعضای آن، ابعاد مقاطع آنها بزرگ‌تر انتخاب می‌شدند، ولی به جای این کار سیستم قاب خمشی همراه با کابل برای کنترل این محدودیت در نظر گرفته شد. بنابراین مقادیر مربوط به قاب خمشی در بیشتر طبقات، خارج از محدوده‌ی آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ هستند. این محدوده برای قاب‌های سه و شش طبقه با توجه به زمان تناوب آنها برابر $0.25h$ و 0.7 یا 75 میلی‌متر است. مثلاً برای مقادیر بیشینه‌ی بی‌که در طبقه‌ی دوم قاب خمشی رخ داده است داریم:

$$0.7 \times R \times \Delta = 0.7 \times 7 \times 19,52 = 95,65$$

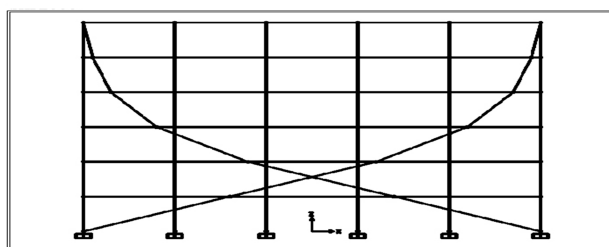
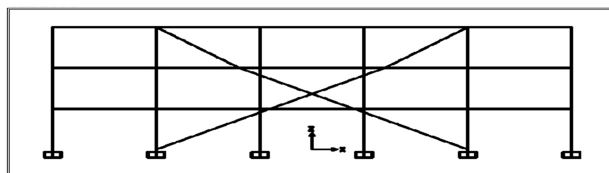
صدق نمی‌کند $95,65 > 75$

$$0.7 \times R \times \Delta = 0.7 \times 7 \times 27,751 = 134,78$$

صدق نمی‌کند $134,78 > 75$



شکل ۱۳. نمودارهای تغییر مکان جانبی نسبی طبقات در قاب‌ها برای قاب خمشی و سیستم‌های کابلی.



شکل ۱۲. فرم کلی کابل در حالات بهینه برای قاب‌های سه و شش طبقه.

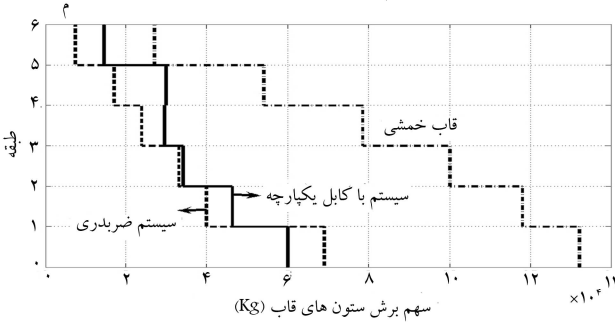
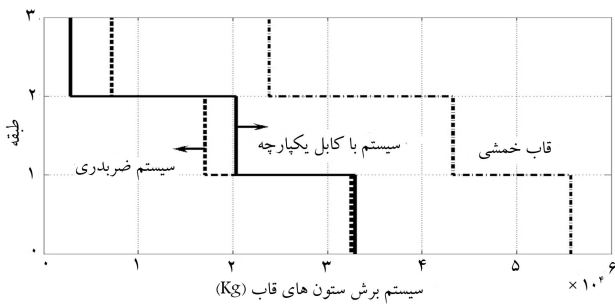
جدول ۴. مختصات نقاط اتصال کابل به کف طبقات در حالت بهینه و طول کابل در هر طبقه.

طبقه	(x, z) در قاب سه طبقه	طول کابل (متر)	(x, z) در قاب شش طبقه	طول کابل (متر)
پی	(-۷,۵ و ۰)	...	(-۱۲,۵ و ۰)	...
اول	(-۲ و ۳)	۶,۲۶۵	(-۴,۵ و ۳)	۸,۵۴۴
دوم	(۳,۵ و ۶)	۶,۲۶۵	(۳,۵ و ۶)	۸,۵۴۴
سوم	(۷,۵ و ۹)	۵	(۸,۵ و ۹)	۵,۸۳۱
چهارم	...	...	(۱۱ و ۱۲)	۳,۹۰۵۱
پنجم	...	...	(۱۲ و ۱۵)	۳,۱۶۲۳
ششم	...	...	(۱۲,۵ و ۱۸)	۳,۰۴۱۴

بهینه برای هر دو قاب در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مختصات نقاط اتصال کابل به کف طبقات مختلف با توجه به شکل ۱۲ برای کابل مهار سمت راست در جدول ۴ آورده شده است. در مورد کابل مهار بعدی مختصات مربوطه در جهت x، گزینه‌ی مختصات کابل سمت راست است. نکته‌ی قابل ذکر در مورد بهینه‌سازی فرم کابل این است که در طبقات پایینی قاب خمشی که دارای تغییر مکان جانبی نسبی بزرگ‌تری بودند، زاویه‌ی کابل با افق در سیستم کابلی کوچک‌تر است. بنابراین می‌توان گفت که زاویه‌ی کابل با افق در طبقه‌ی پایین کم‌ترین مقدار را دارد و با حرکت به سمت طبقات بالاتر این زاویه افزایش می‌یابد. اما این مطلب در مورد طبقه‌ی اول صدق نمی‌کند؛ این طبقه به دلیل اتصال به زمین دارای سختی زیادی بوده و تغییر مکان جانبی نسبی آن در سیستم قاب خمشی، کوچک‌تر از چندین طبقه‌ی روی آن است. پس همان‌طور که در شکل ۱۲ و جدول ۴ می‌بینیم، حالت بهینه موقعی رخ می‌دهد که کابل از طبقه‌ی اول بدون شکستگی عبور کند، یعنی زوایای کابل با افق در طبقات اول و دوم برابر باشند.

۶. مقایسه‌ی قاب خمشی با سیستم‌های کابلی

در این بخش با توجه به اهمیت سختی سیستم‌های مقاوم در برابر زلزله، بین قاب خمشی و سیستم‌های کابلی مقایسه‌ی انجام می‌شود تا میزان و نحوه‌ی تأثیر سیستم‌ها



شکل ۱۴. سهم ستون‌های قاب از برش طبقه برای طبقات مختلف در سیستم قاب خمشی و سیستم‌های کابلی.

آزاد آن دانست. این امر در نتایج قاب سه طبقه به دلیل وجود فقط یک طبقه میانی مشهودتر است.

وجود کابل مهار با نیروی کششی بالا، باعث خنثی شدن قسمت قابل توجهی از برش طبقات توسط مؤلفه افقی کشش کابل می‌شود و کاهش قابل ملاحظه‌ای در نیروی برشی ستون‌های قاب ایجاد می‌کند. میزان این کاهش از روی نتایج ارائه شده در شکل ۱۴ به خوبی مشهود است. لازم به ذکر است که با توجه به کاهش چشمگیر نیروهای برشی و لنگرهای خمشی اعضای قاب، میزان میلگرد مورد نیاز اعضا نیز به شدت کاهش می‌یابد که در مقایسه با سطح مقطع و وزن کم کابل اضافه شده، طرح بسیار اقتصادی‌تر می‌شود.

۷. نتیجه‌گیری

سیستم‌های کابلی باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای تغییر مکان‌های جانبی نسبی طبقات و نیروهای برشی و لنگرهای خمشی اعضای قاب می‌شود و نیز سختی جانبی قاب را، حتی با سطح مقطع کوچک کابل، به شدت افزایش می‌دهند. بهینه‌سازی فرم کابل در سیستم یکپارچه باعث می‌شود که بیشترین درصدهای کاهش در تغییر مکان‌های جانبی نسبی، مربوط به طبقاتی باشد که در سیستم قاب خمشی دارای بیشترین مقادیر بودند و به این طریق یکنواختی در نتایج تغییر مکانی ایجاد می‌شود. برای دست‌یابی به فرم بهینه‌ی کابل لازم است که زوایای امتداد آن با افق در طبقات اول و دوم با هم برابر باشند و برای طبقات بالاتر به تدریج کاهش یابند. بهتر است مقدار نیروی پیش‌تندگی کابل‌ها برای سیستم‌های کابلی مورد استفاده در یک قاب مشخص از حد معینی بزرگ‌تر نباشد. چون در غیر این صورت بدون ایجاد کاهش در مقادیر تغییر مکان‌های قاب، نیروهای محوری ستون‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به تمامی مطالب گفته شده و نیز با در نظر داشتن مزایای ذکر شده برای سیستم‌های کابلی، می‌توان آن را جایگزین مناسبی برای سایر سیستم‌های مقاوم‌سازی دانست.

حال با فرض ثابت ماندن ضریب رفتار برای سیستم با کابل یکپارچه خواهیم داشت:

قاب سه طبقه و سیستم با کابل یکپارچه
 صدق نمی‌کند $\rightarrow 75 < 41,65 = 0,7 \times 7 \times 8,50 = 0,7 \times R \times \Delta$

قاب شش طبقه و سیستم با کابل یکپارچه
 صدق می‌کند $\rightarrow 75 < 51,40 = 0,7 \times 7 \times 10,49 = 0,7 \times R \times \Delta$

با توجه به انتخاب بزرگ‌ترین مقادیر تغییر مکان در هر دو قاب، ملاحظه می‌شود که تغییر مکان‌های جانبی نسبی کلیه طبقات در صورت استفاده از سیستم کابلی در محدوده‌ی مجاز آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ قرار گرفته‌اند. با دقت در نمودارهای شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که نتایج مربوط به سیستم ضربدری در بیشتر طبقات کم‌تر از سیستم با کابل یکپارچه است. البته باید توجه داشت که اجرای سیستم ضربدری مشکل‌تر از سیستم با کابل یکپارچه است، زیرا در این سیستم کابل‌ها یکپارچه نبوده و به اتصالات بیشتری نیاز دارند و در صورت استفاده از میراگرها نیز تعداد آنها در سیستم ضربدری بیشتر است و هزینه را بالاتر می‌برد. در ضمن اختلاف نتایج دو سیستم برای طبقه‌ی دوم که از نظر تغییر مکانی بحرانی‌ترین طبقه است، خیلی ناچیز است. بنابراین استفاده از سیستم کابلی یکپارچه راحت‌تر و اقتصادی‌تر خواهد بود.

جدول ۵ و ۶ نشان‌گر نتایج سیستم با کابل یکپارچه به صورت عددی، و نیز درصدهای کاهش تغییر مکان جانبی نسبی طبقات مختلف نسبت به سیستم قاب خمشی هستند. با توجه به جدول ۶ که نتایج قاب شش طبقه را نشان می‌دهد، درمی‌یابیم که تغییر مکان‌های جانبی نسبی طبقات دوم و سوم که در سیستم قاب خمشی بیشترین مقادیر را داشتند، در سیستم کابلی دارای بیشترین درصد کاهش هستند. در ضمن، نتایج سایر طبقات نیز با مقادیر این دو طبقه دارای یکنواختی هستند که نتیجه‌ی بسیار خوبی است. البته یکنواختی تغییر مکان‌های جانبی نسبی برای طبقات اول و آخر در مقایسه با سایر طبقات کم‌تر است که دلیل آن را می‌توان در سختی زیاد طبقه‌ی اول به دلیل اتصال به زمین و نرمی طبقه‌ی آخر به دلیل انتهای جدول ۵. تغییر مکان‌های جانبی نسبی و درصدهای کاهش آن به دلیل استفاده از سیستم کابلی در قاب سه طبقه.

طبقه	Δ mm قاب خمشی	سیستم یکپارچه Δ mm	Δ درصد کاهش
اول	۱۳,۸۶	۷,۳۳	۴۷,۱۱
دوم	۱۹,۵۲	۸,۵۰	۵۶,۴۵
سوم	۱۵,۰۴	۴,۲۴	۷۱,۸۱

جدول ۶. تغییر مکان‌های جانبی نسبی و درصدهای کاهش آن به دلیل استفاده از سیستم کابلی در قاب شش طبقه.

طبقه	Δ mm قاب خمشی	سیستم یکپارچه Δ mm	Δ درصد کاهش
اول	۱۶,۵۶	۶,۹۰	۵۸,۳۳
دوم	۲۷,۵۱	۱۰,۴۹	۶۱,۸۷
سوم	۲۷,۳۱	۹,۷۲	۶۴,۴۱
چهارم	۲۶,۰۸	۱۰,۴۱	۶۰,۰۸
پنجم	۲۱,۲۱	۱۰,۴۵	۵۰,۷۳
ششم	۱۶,۲۱	۸,۵۸	۴۷,۰۷

منابع

1. Mir Mohammad Hoseini, S.M. and Arefpour, B. "Tehran seismic geotechnical engineering", International seismic and earthquake engineering research center, Tehran, (1378).
2. Hajji Kazem, H. "Analyzing and designing of tall structures", Publications of Ferdosi university of Mashhad, (1375).
3. Sabouri, S. "Resistant systems against lateral loads: An introduction to steel shear walls", Tehran, Angizeh publications, (1380).
4. Maheri, M.R.; Kousari, R. and Razazan M., "Pushover tests on steel X-braced and knee-braced RC frames", *Engineering Structures*, **25**(13), pp. 1697-1705, (June 2003).
5. WWW.Jarret structures.com
6. British Standard, "Specification for wire ropes, encavers and general engineering purposes BS 302", (1987).
7. Deutsches Institute fur Norm Standards, "Steel wire rope slings for lifting purposes Din 3088", (1989).
8. UMIST , "Finite element package , FINELE" ,(1996).
9. User's Manual for CEL/NONSAP, "A nonlinear structural analysis program", (1974).
10. Computers and Structures Inc., Berkeley, California, "SAP 2000 basic analysis reference manual", Ver. 9, (2004).
11. Building and Housing Ministry, "Code of the least applied load to buildings and technical structures", Managing publications, (1379).
12. Building and Housing research center, "Code of practice for seismic resistant design of buildings, standard 2800-84 (3rd edition), (1385).
13. American Concrete Institute, "Building code requirement for reinforced concrete, ACI 318-02", (2002).