

اثر متغیرهای هندسی در رفتار سیستم مهاربند کابلی با آرایش Y شکل

حسین توفیقی اسفهان (کارشناس ارشد)

مجید بوقیان* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۴)
دربی ۲ - ۳۱، شماره ۱/۳، ص. ۱۱۵-۱۲۲

در سیستم‌های مهاربند کابلی، پائین بودن شکل‌پذیری و همچنین عدم مشارکت هم‌زمان تمامی کابل‌ها در تأمین مقاومت سازه، از جمله چالش‌های پیش رو در این سیستم‌هاست. مطالعات صورت گرفته بر روی آرایش Y شکل در مهاربندهای کابلی نشان می‌دهد که این نوع آرایش می‌تواند بدون به‌کاربردن اتصالات ویژه، تمامی کابل‌ها را در بازه‌ی مشخصی از جابجایی‌ها تحت کشش نگه دارد و از بروز شل‌شدگی در کابل‌ها جلوگیری کند. همچنین این نوع سیستم مهاربندی می‌تواند باعث افزایش شکل‌پذیری و پایداری قاب شود. در این نوشتار به کمک برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB، نحوه‌ی عمل‌کردن این نوع آرایش در تحت کشش نگه‌داشتن هم‌زمان کابل‌ها و همچنین اثر متغیرهای هندسی در رفتار سیستم مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و ملاحظه شده است که با مقادیر مشخصی از متغیرهای هندسی، کابل‌ها همواره در کشش باقی می‌مانند و سختی لازم در برابر نیروی جانبی ایجاد می‌شود.

واژگان کلیدی: آرایش Y شکل کابلی، تحلیل غیرخطی، سختی جانبی، شل‌شدگی در کابل.

h.tofghi90@ms.tabrizu.ac.ir
barghian@tabrizu.ac.ir

۱. مقدمه

در طبقات بالا، استفاده از کابل به جای مقاطع فولادی برای عناصر دوخت پیشنهاد شده است.^[۵]

در پژوهش دیگری نیز با توجه به مکانیزم‌های شکست و شکل‌پذیری، بر روی پاسخ غیرخطی قاب خمشی مقاوم‌شده توسط مهاربندهای کششی (TBMRF) ضربدری شکل، سیستم‌های مهاربندی شده با عناصر کششی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند.^[۶] برخی پژوهشگران نیز با مطالعه بر روی سیستم مهاربندی کابلی استفاده شده در قاب بتنی و بررسی مسیر بهینه‌ی عبور کابل‌ها مشاهده کرده‌اند که این سیستم با کاهش مقادیر نیروی برشی و لنگر اعضای قاب، در اقتصاد طرح اثر مطلوبی دارد.^[۷] با محاسبه‌ی ضریب رفتار سیستم‌های مهاربند کابلی توسط برخی پژوهشگران،^[۸] و نیز مطالعه‌ی بر روی اثر استفاده از میراگرهای فنری به همراه کابل‌ها،^[۹] کارایی این نوع سیستم‌ها در تقویت سازه‌ها آشکار شده است. همچنین بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده بر روی مهاربندهای کابلی منجر به شناسایی بهتر رفتار این سیستم‌ها شده است.^[۱۱]

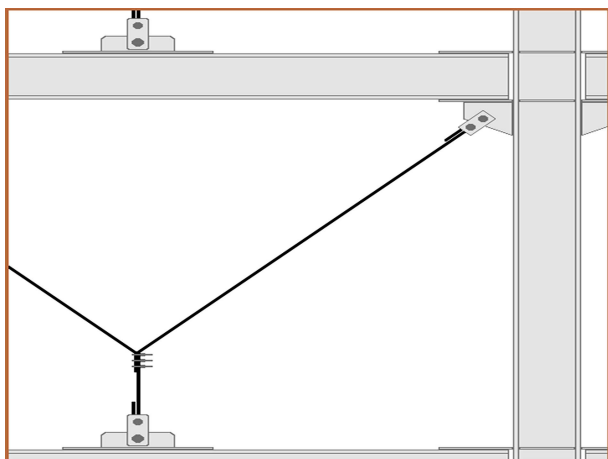
در مهاربندهای کابلی، دو چالش عمده در پیش روی این سیستم‌ها قرار دارد. چالش اول، پائین بودن میزان شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی در کابل‌ها به دلیل کوچک بودن ناحیه‌ی غیرارتجاعی در منحنی تنش - کرنش آن‌هاست،^[۱۲] که یکی از راهکارها جهت بهبود این امر استفاده از میراگرهاست. چالش دوم، عدم مشارکت هم‌زمان تمامی کابل‌های به‌کار برده شده در سیستم مهاربندی برای تأمین مقاومت جانبی سازه است. بدین صورت که هنگام بستن کابل‌ها به شکل ضربدری

افزودن سیستم‌های مهاربندی به قاب خمشی، همواره یکی از راهکارهای طراحان جهت افزایش مقاومت و سختی جانبی قاب خمشی بوده است، زیرا از آنجا که قاب خمشی با داشتن شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی بالا یکی از گزینه‌های مطلوب در ساخت سازه‌هاست،^[۱] اما در عین حال، بروز جابجایی‌های بزرگ در قاب خمشی هنگام رخ دادن زمین‌لرزه‌های شدید، استفاده از سیستم‌های مهاربندی را جهت مقابله با بروز آن در سازه ضروری می‌سازد. سیستم‌های مهاربندی نیز به نوبه‌ی خود می‌توانند در شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی سازه تأثیر نامطلوبی داشته باشند، که مهاربندهای برون‌محور جهت مقابله با این مسئله توسعه یافته‌اند.^[۲] همچنین مهاربندهای ضدکمانش برای عدم درگیر شدن سازه با پدیده‌ی پیچیده‌ی مانند کمانش غیرارتجاعی در مهاربندها معرفی شده‌اند.^[۳]

در سال‌های اخیر، استفاده از کابل‌ها در سیستم‌های مهاربندی مورد توجه مهندسان و پژوهشگران سازه قرار گرفته است. سیستم‌های کابلی بدون افزایش قابل توجه وزن سازه، سختی و مقاومت جانبی قاب خمشی را بهبود می‌بخشند. همچنین این سیستم‌ها در بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌های موجود نیز قابل استفاده هستند.^[۴] برای مثال، در مطالعه‌ی بر روی مهاربندهای همگرای V شکل معکوس به همراه عناصر دوخت و مشاهده‌ی وجود نیروی کششی قابل توجه در عناصر دوخت واقع

* نویسنده مسئول

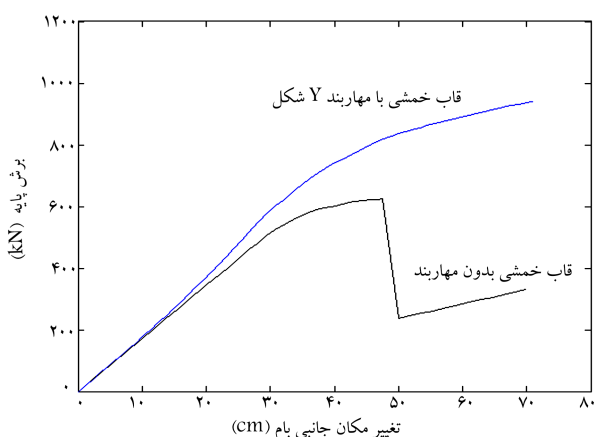
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۶/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۲/۹/۱۷، پذیرش ۱۳۹۲/۱۰/۱۷



شکل ۲. جزئیات اتصال کابل‌های سیستم Y شکل.

جدول ۱. مقاطع مورد استفاده در مدل‌سازی قاب خمشی.

طبقات	تیرها	ستون‌های میانی	ستون‌های کناری
ششم	IPE ۱۸۰	HE۲۰۰B	HE۱۶۰B
پنجم	IPE ۲۴۰	HE۲۰۰B	HE۱۶۰B
چهارم	IPE ۲۷۰	HE۲۴۰B	HE۲۰۰B
سوم	IPE ۳۰۰	HE۲۴۰B	HE۲۰۰B
دوم	IPE ۳۰۰	HE۲۸۰B	HE۲۴۰B
اول	IPE ۳۰۰	HE۲۸۰B	HE۲۴۰B



شکل ۳. منحنی پوش‌آور مدل‌ها تحت بار جانبی یکنواخت.

مفاصل خمیری و انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی بر روی این دو مدل، منحنی پوش‌آور قاب‌ها تحت بارگذاری جانبی با توزیع یکنواخت متناسب با وزن طبقات به صورت نشان داده شده در شکل ۳ به دست آمده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، نمودار مدل مهاربندی شده با آرایش Y شکل، هنگامی که جابجایی تراز بام کمتر از ۱۰ سانتی‌متر است و اعضاء قاب وارد مرحله‌ی غیرارتجاعی نشده‌اند، بر نمودار قاب بدون مهاربند منطبق است و لذا سیستم مهاربند در جابجایی‌های کوچک در رفتار قاب خمشی اثرگذار نیست. با افزایش میزان جابجایی‌ها و ورود سازه به ناحیه‌ی غیرارتجاعی، سیستم Y شکل فعال می‌شود و مقاومت و پایداری قاب خمشی را افزایش می‌دهد.

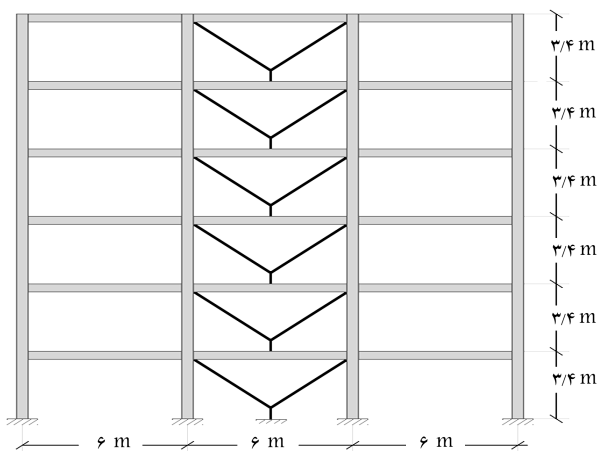
از طرف دیگر، بررسی‌ها نشان می‌دهد که سیستم مهاربند کابلی آرایش Y شکل

با شکل V، با اعمال بار جانبی به سازه، یکی از کابل‌ها دچار پدیده‌ی شل‌شدگی می‌شود و قادر به تحمل نیروی جانبی نخواهد بود. در مطالعه‌ی دیگری با طراحی اتصال متشکل از یک واشر مورب و یک گوه، که همانند میراگر عمل می‌کند، امکان افزایش میزان استهلاک انرژی در سیستم‌های مهاربند ضربه‌زنی با عناصر کششی فراهم شده است.^[۱۳]

برای درگیرکردن هم‌زمان تمامی کابل‌های مهاربندی و فعال نگه‌داشتن کل ظرفیت باربری سیستم، در پژوهش دیگری با معرفی نوعی اتصال دیسکی شکل جهت اتصال کابل‌ها به قاب، امکان تحت کشش قرارگرفتن دائمی کابل‌ها فراهم شده و جهت افزایش میزان استهلاک انرژی در سیستم نیز نوعی میراگر هیسترسیس به‌کار برده شده است.^[۱۴] برخی پژوهشگران نیز با عبوردادن کابل‌های ضربه‌زنی شکل از درون یک استوانه‌ی فلزی واقع در محل تقاطع کابل‌ها، باعث وابستگی حرکت کابل‌ها به یکدیگر و تحت کشش قرارگرفتن دائمی آن‌ها هنگام وارد شدن بار جانبی رفت و برگشتی به سازه شده‌اند.^[۱۵] در مطالعه‌ی دیگری نیز به جای استوانه از صفحه‌ی فولادی در مرکز صفحه‌ی قاب استفاده شده است، که در آن کابل‌ها به چهارگوشه‌ی آن متصل شده و با وارد شدن نیروی جانبی به قاب، تمامی کابل‌های سیستم مهاربندی در تأمین مقاومت جانبی مشارکت کرده‌اند.^[۱۶] همچنین در مطالعه‌ی نیز به کمک یک میراگر قرارگرفته در وسط صفحه‌ی قاب، که با کابل‌هایی به سازه متصل شده بود، ضمن افزایش میزان استهلاک انرژی از مشارکت توأم تمامی کابل‌ها در تأمین مقاومت جانبی سیستم استفاده شده است.^[۱۷]

۲. آرایش Y شکل

با مطالعات صورت‌گرفته بر روی آرایش Y شکل برای استفاده در مهاربند کابلی توسط نویسندگان این نوشتار،^[۱۸] مشخص شده است که این نوع آرایش می‌تواند باعث افزایش شکل‌پذیری و پایداری قاب خمشی در هنگام بروز جابجایی‌های بزرگ در سازه شود. به عنوان مثال، قاب خمشی فولادی دو بعدی نشان داده شده در شکل ۱، که مربوط به یک ساختمان مسکونی با بار مرده و زنده‌ی طبقات به ترتیب ۶ و ۲ کیلو نیوتن بر مترمربع، عرض بارگیری ۳ متر و دیوار پیرامونی به وزن ۶ کیلو نیوتن بر متر است، در دو مدل قاب خمشی بدون مهاربند و قاب خمشی با سیستم مهاربند کابلی با آرایش Y شکل، در نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ مدل شده است. نحوه‌ی اتصال کابل‌ها در شکل ۲ و نوع مقاطع قاب در جدول ۱ نشان داده شده است. با معرفی



شکل ۱. قاب خمشی مهاربندی شده با آرایش Y شکل کابلی.

بدون به‌کاربردن اتصالات ویژه، تمامی کابل‌ها را در بازه‌ی مشخصی از جابجایی‌ها، تحت کشش نگه می‌دارد و از بروز شل‌شدگی جلوگیری می‌کند. در ادامه، نحوه‌ی عمل‌کردن این سیستم کابلی در تحت کشش نگه‌داشتن هم‌زمان کابل‌ها و همچنین تأثیر متغیرهای هندسی مختلف در رفتار سیستم مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

۳. تحلیل سیستم

با توجه به وجود محدودیت‌هایی در نرم‌افزارهای تجاری تحلیل سازه‌ها مانند SAP2000، که امکان انتخاب مشخصات هندسی مدل‌ها - برای مثال طول دهانه - به صورت یک متغیر و بررسی اثر تغییرات آن در رفتار مدل با دشواری‌هایی روبرو است، در این مطالعه از قابلیت‌های برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است، تا امکان بررسی اثر متغیرهای مختلف به آسانی فراهم شود. جهت تحلیل رفتار سیستم مهاربند کابلی با آرایش Y شکل، با انتخاب مدل اجزاء محدود معرفی شده در شکل ۴، با سه جزء کابلی، دستوراتی در نرم‌افزار MATLAB بر پایه‌ی تحلیل غیرخطی نموی - تکراری به روش نیوتن - رفسون نوشته شده است. با توجه به این موضوع که تغییرمکان جانبی سیستم، همان تغییرمکان نسبی گره‌ی ۱ نسبت به دو گره‌ی ۳ و ۴ است و همچنین نیروی برشی وارد بر این دو گره برابر با نیروی برشی وارد بر گره‌ی ۱ است، جهت ساده‌سازی مدل، نیروی برشی خارجی در گره‌ی ۱ تمرکز یافته و به جای ایجاد آزادی حرکت برای گره‌های ۳ و ۴، این آزادی حرکت به گره‌ی ۱ اختصاص داده شده است. از طرف دیگر، با صرف‌نظر کردن از تغییر طول محوری ستون‌ها و تیر مابین دو گره ۳ و ۴، از تکیه‌گاه مفصلی برای این دو گره در مدل‌سازی استفاده شده است. البته باید به این نکته هم توجه داشت که در این مدل‌سازی، با فرض وجود طبقات با کف صلب و اتصالات گیردار، از اثراتی مانند تغییر فاصله‌ی قائم طبقات تحت تأثیر دوران ستون‌ها نیز صرف‌نظر شده است. برای لحاظ‌کردن اثرات غیرخطی رفتار یک عضو کابلی با طول مستقیم، که از اثرات وزن آن بر روی شکل آن صرف‌نظر شده است، می‌توان از ماتریس سختی معرفی شده در رابطه ۱ استفاده کرد. بخش اول این رابطه، اثرات غیرخطی ناشی از جابجایی‌ها را لحاظ می‌کند و بخش دوم آن، اثرات غیرخطی ناشی از بار خارجی را وارد تحلیل می‌کند. مقادیر c و s که به ترتیب کسینوس و سینوس زاویه‌ی محور عضو با افق هستند، با ایجاد جابجایی در عضو تغییر خواهند یافت. در این رابطه، A سطح مقطع کابل، L طول اولیه‌ی کابل، L_e طول ثانویه‌ی کابل بعد از بارگذاری

$$K_c = \frac{AE_e}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix} + \frac{AE_e}{L} \frac{d}{L_e} \begin{bmatrix} 1-c^2 & -cs & c^2-1 & cs \\ -cs & 1-s^2 & cs & s^2-1 \\ c^2-1 & cs & 1-c^2 & -cs \\ cs & s^2-1 & -cs & 1-s^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

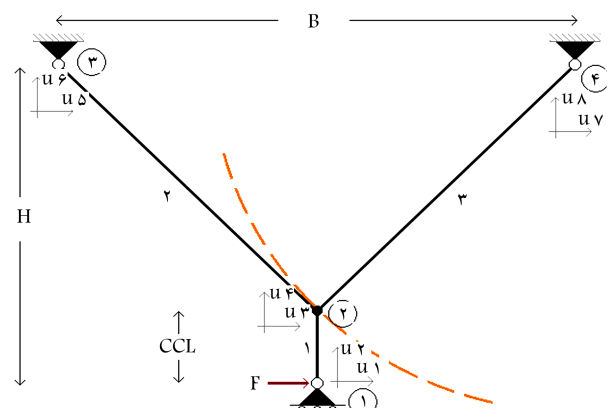
$$E_e = \frac{E}{\left[1 + \frac{(wL)^2 AE}{12T^3}\right]} \quad (2)$$

از آنجایی که کابل‌های فولادی رفتاری شکننده دارند، فقط اثرات غیرخطی ناشی از هندسه در برنامه‌نویسی لحاظ شده است. از طرف دیگر، با توجه به پایین بودن مقادیر قطر و طول کابل‌های استفاده‌شده در مدل‌سازی‌ها، که امکان صرف‌نظر کردن از اثرات وزن را فراهم می‌کند، می‌توان با توجه به رابطه ۲، ضریب ارتجاعی را برابر ضریب ارتجاعی خالص کابل و برابر مقدار ثابت ۱۹۶۵۰ کیلو نیوتن بر سانتی‌متر مربع قرار داد.

برنامه پس از دریافت مشخصات هندسی و نیروی خارجی نهایی وارد بر سیستم، فرآیند تحلیل را در دو لایه انجام می‌دهد. در لایه‌ی خارجی، نیروی جانبی به صورت گام به گام به سیستم کابلی اعمال و در لایه‌ی داخلی برای هر گام، ماتریس سختی سیستم تشکیل می‌شود، و نیز شرایط تکیه‌گاهی اعمال و تغییرمکان سختی اجزاء محاسبه می‌شود. براساس این تغییرمکان‌ها، مختصات گره‌ها و ماتریس سختی اجزاء سیستم اصلاح می‌شوند و پس از محاسبه‌ی نیروهای نامتعادل‌کننده، این روند دوباره تکرار می‌شود تا پاسخ‌ها هم‌گرا شوند. با ذخیره‌ی مقادیر تغییرمکان‌های هم‌گرا شده و همچنین نیروی داخلی اجزاء سیستم در هر گام نیروی خارجی، این امکان فراهم می‌شود تا نمودار نیرو - تغییرمکان جانبی سیستم، تغییرات سختی جانبی سیستم و همچنین تغییرات نیروی داخلی اجزاء سیستم ترسیم شوند.

۴. نحوه‌ی کشیدگی کابل مغلوب

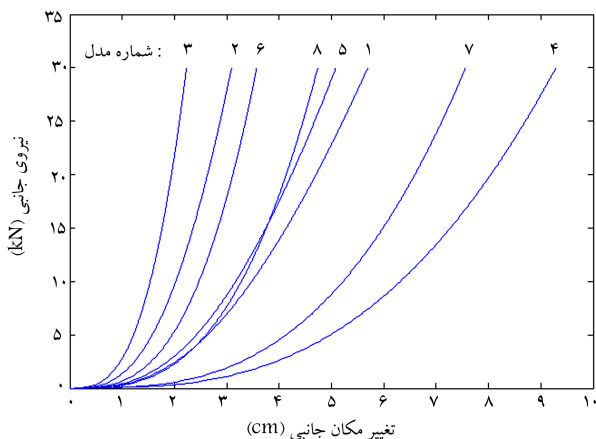
با توجه به جهت اعمال بار جانبی وارد بر سیستم، هر یک از کابل‌های ۲ و ۳ نشان داده‌شده در شکل ۴، می‌توانند مستعد بروز شل‌شدگی باشند. این کابل به‌عنوان کابل مغلوب معرفی شده است. اگر جهت بار اعمالی به صورت نشان داده‌شده در شکل مذکور باشد، کابل ۳ این عنوان را به خود اختصاص خواهد داد و کابل ۲ به‌عنوان کابل غالب عمل خواهد کرد. خط‌چین نشان داده‌شده در شکل ۴، کمان مرزی با مرکزیت گره ۴ و شعاع برابر طول اولیه‌ی کابل ۳ است. واضح است که اگر گره ۲ (گره مرکزی سیستم) هنگام بارگذاری جانبی سیستم، در ناحیه‌ی خارج از این کمان حرکت کند، کابل مغلوب (کابل ۳) نیز به همراه سایر کابل‌ها تحت کشش قرار خواهد گرفت. مکان هندسی این گره، در گام‌های مختلف تحلیل سیستم کابلی با ارتفاع ۳ و دهانه‌ی ۶ متر که با کابل‌های به قطر ۲ و کابل اتصال (کابل ۱) ۱۵ سانتی‌متری بسته شده‌اند، در شکل ۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۴. مدل اجزاء محدود آرایش Y شکل.

جدول ۲. مدل‌های بررسی شده در نمودار نیرو - تغییر مکان جانبی.

مدل								
۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۳۰	۳۰	۲۰	۲۰	۲۰	۱۰	۱۰	۱۰	CCL (cm)
۴	۲	۴	۲	۱	۴	۲	۱	Dc (cm)
۲	۲	۲	۰٫۵	۲	۲	۱	۱	B/H



شکل ۷. منحنی نیرو - تغییر مکان جانبی مدل‌ها.

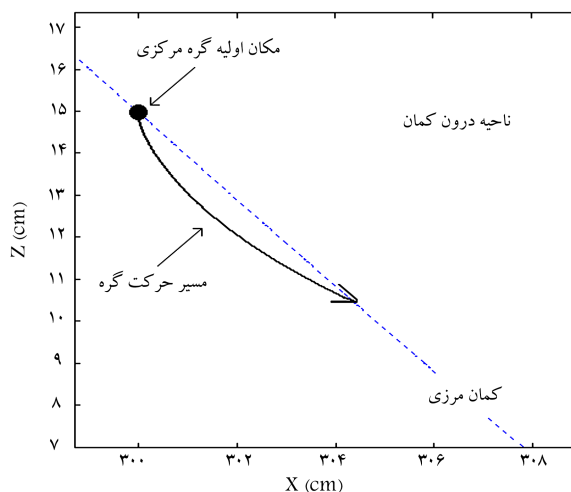
است. لذا طراحان به آسانی می‌توانند با انتخاب مقادیر مختلفی برای این متغیرها، رفتار سیستم را تنظیم کنند.

نمودار نیرو - تغییر مکان جانبی مدل‌های معرفی شده در جدول ۲، که هر کدام نقاط مشترک و یا متفاوتی نسبت به سایر مدل‌ها در مقادیر متغیرهای هندسی دارند، در شکل ۷ نمایش داده شده است. اثر تغییر مقادیر متغیرهای هندسی در تغییرات سختی جانبی سیستم به وضوح قابل مشاهده است. نکته‌ی جالب توجه در این نمودارها، شروع نمودار تمامی مدل‌ها از سختی صفر است. در واقع این امر یکی از ویژگی‌های سیستم کابلی با آرایش Y شکل است، که رفتاری سخت‌شونده از مقدار سختی صفر تا مقادیر بالایی از سختی جانبی است. ملاحظه می‌شود که بالاترین میزان سختی در مدل ۳ با کابل اتصال کوتاه‌تر و کابل‌های قطورتر رخ داده است. همچنین تغییرات سختی در مدل ۸ در سطوح مختلف نیروی جانبی نسبت به مدل‌های ۱ و ۵ قابل توجه است.

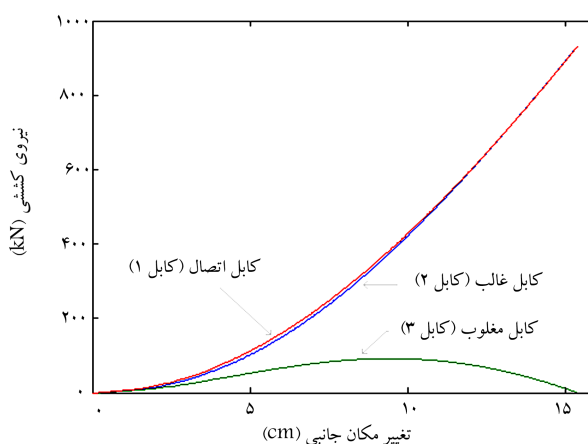
لذا جهت درک بهتر اثرات تغییر مقادیر متغیرهای هندسی در رفتار سیستم و نیز در بروز شل‌شدگی در کابل مغلوب، اثر هر یک از این متغیرها در محیط نرم‌افزار MATLAB به صورت متغیرهایی با تغییرات پیوسته در یک دامنه‌ی مشخص مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

۱.۵. طول کابل اتصال

عامل اصلی انعطاف‌پذیری سیستم کابلی با آرایش Y شکل، حضور کابل اتصال قائم در این سیستم و حرکت دورانی آن هنگام اعمال بار جانبی است، که این امر باعث می‌شود تا سیستم کابلی، محدوده‌ی از سختی صفر تا مقادیر بالایی از سختی جانبی را تجربه کند. این تغییرات سختی در مقابل نیروی جانبی، برای سه مدل ۳، ۶ و ۸ که نسبت دهانه به ارتفاع و قطر کابل‌های یکسان و مقادیر طول کابل اتصال متفاوتی دارند، در نمودارهای نشان داده شده در شکل ۸ قابل مشاهده است. از این نمودارها می‌توان استنباط کرد که در یک نیروی ثابت، تغییرات سختی سیستم، به



شکل ۵. مسیر حرکت گره مرکزی (گره ۲).

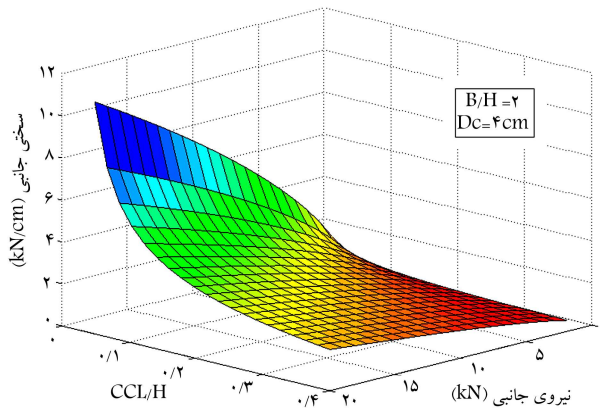


شکل ۶. نیروی کششی کابل‌ها.

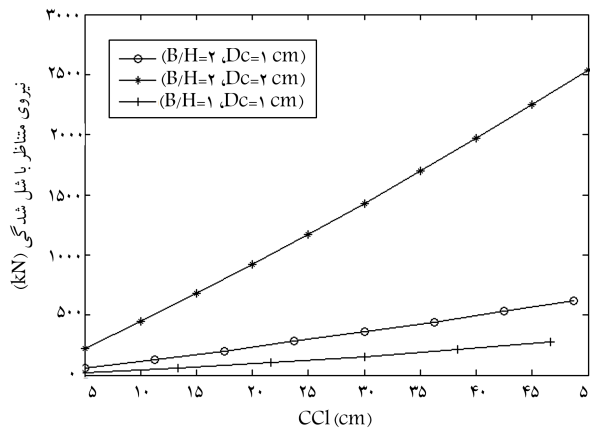
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، این گره در ناحیه‌ی خارج از کمان مرزی کابل مغلوب حرکت می‌کند، اما با افزایش میزان بار، به مرز شل‌شدگی نزدیک و وارد آن می‌شود. لذا همان‌گونه که در شکل ۶ و در نمودارهای مربوط به نیروی محوری کابل‌ها نیز مشاهده می‌شود، در آرایش Y شکل بدون استفاده از ابزار ویژه، در محدوده‌ی مشخصی از تغییر مکان جانبی سیستم، تمامی کابل‌ها به صورت هم‌زمان تحت کشش قرار می‌گیرند.

۵. اثر متغیرهای هندسی

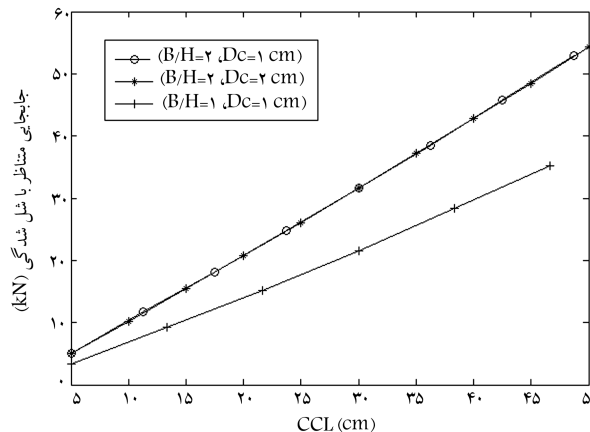
جهت مطالعه‌ی تأثیر متغیرهای هندسی سیستم کابلی با آرایش Y شکل در رفتار آن، مدل‌هایی با مشخصات معرفی شده در جدول ۲ توسط برنامه‌ی نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB، تحت تحلیل غیرخطی قرار گرفتند. این مدل‌ها که همگی ارتفاع (H) ثابت و برابر ۳ متر داشتند، تفاوت‌هایی در سه متغیر طول کابل اتصال (CCL)، نسبت دهانه به ارتفاع (B/H) و اندازه‌ی قطر کابل‌ها (Dc) داشتند. علت انتخاب این سه متغیر هندسی، وجود آزادی عمل بیشتر در تغییر مقادیر آن‌ها بوده است. بدین صورت که اندازه‌ی قطر کابل‌ها (Dc) و طول کابل اتصال (CCL) هیچ وابستگی به هندسه‌ی سازه‌ی مهاربندی شده نداشته و نسبت دهانه به ارتفاع (B/H) نیز در سازه‌های با ارتفاع طبقات و طول دهانه‌های مختلف قابل تغییر بوده



شکل ۱۰. تغییرات سختی در برابر تغییر CCL/H و نیروی جانبی.

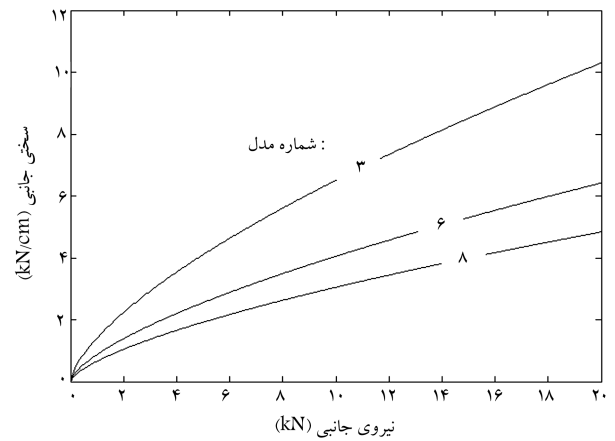


شکل ۱۱. نیروی متناظر با شل شدگی در برابر تغییرات CCL.

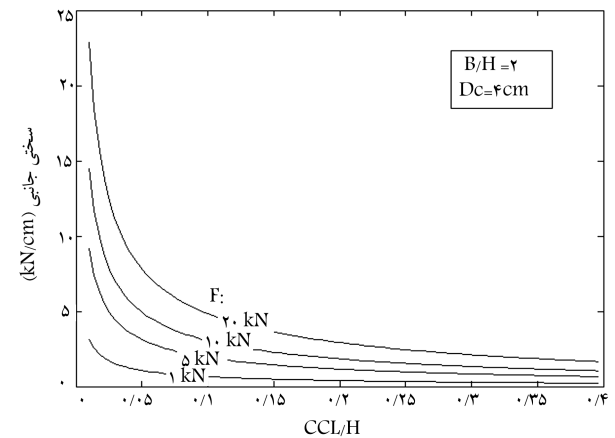


شکل ۱۲. جابجایی متناظر با شل شدگی در برابر تغییرات CCL.

به دست آمده از تحلیل‌های مختلف، برای نیروی متناظر با شل شدگی در شکل ۱۱ و برای جابجایی متناظر با شل شدگی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، افزایش طول کابل اتصال در هر سه حالت باعث افزایش نیرو و جابجایی متناظر با شل شدگی شده است. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش قطر کابل‌ها باعث افزایش نیروی متناظر با شل شدگی در سیستم شده است، ولی در میزان جابجایی متناظر با شل شدگی سیستم تأثیرگذار نبوده است و نمودار مربوط به دو مدل با قطر کابل‌های مختلف، بر هم منطبق هستند.



شکل ۸. تغییرات سختی در برابر تغییر نیروی جانبی.

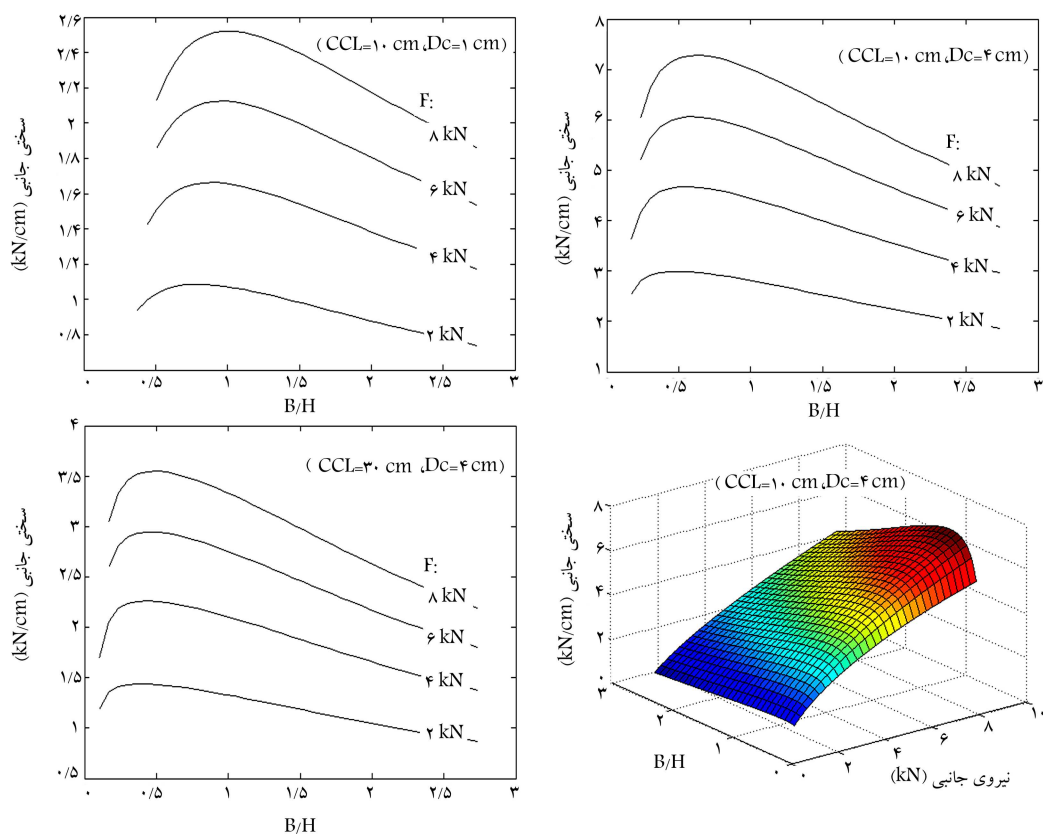


شکل ۹. تغییرات سختی در برابر تغییر CCL/H.

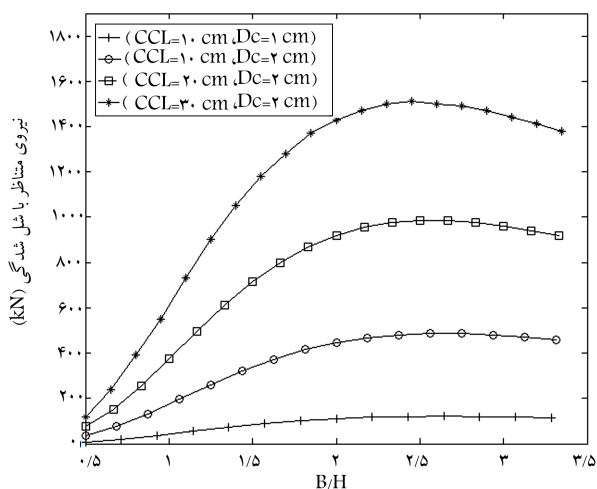
مقدار نسبت طول کابل اتصال به ارتفاع سیستم (CCL/H) در مدل‌ها حساس‌تر است. زیرا از آنجایی که میزان افزایش CCL در این سه مدل یکسان است، ولی میزان نسبت افزایش CCL/H در بین دو مدل ۳ و ۶ بیشتر است، که این امر در فاصله‌ی بین دو نمودار نیز مشخص است.

با توجه به این موضوع، اگر منحنی تغییرات سختی سیستم در مقابل تغییرات نسبت طول کابل اتصال به ارتفاع سیستم (CCL/H) برای مدلی با نسبت دهانه به ارتفاع ۲ و کابل‌های به قطر ۴ سانتی‌متر ترسیم شود، سختی سیستم با افزایش طول کابل اتصال به سرعت کاهش می‌یابد (شکل ۹). بیشترین سختی نیز در مقادیر کمتر از ۰/۰۵ رخ می‌دهد، که البته این مقدار با افزایش میزان بار جانبی به سمت عدد ۰/۱ حرکت می‌کند. با رسم تابع دو متغیره‌ی سختی، با متغیرهای CCL/H و نیروی جانبی در شکل ۱۰، سطوحی از سختی جانبی ثابت آشکار می‌شود، به گونه‌ی که با افزایش میزان نیروی جانبی به همراه افزایش میزان CCL/H، سیستمی با سختی ثابت در دسترس خواهد بود.

موضوع دیگر، مسئله‌ی شل شدگی در کابل مغلوب است. چنانچه در بخش ۴ نیز مشاهده شده است، کابل مغلوب پس از تحمل نیروی کششی در محدوده‌ی مشخصی از جابجایی سیستم، دچار شل شدگی می‌شود. جهت بررسی تأثیر تغییرات طول کابل اتصال در بروز شل شدگی در این کابل، تحلیل‌های متعددی روی مدل‌هایی با مقادیر مختلف نسبت دهانه به ارتفاع و قطر کابل‌ها، با فرض CCL متغیر انجام و نیروی تغییر مکان جانبی متناظر با شل شدگی در کابل مغلوب محاسبه شده است. نتایج



شکل ۱۳. منحنی‌های مربوط به تغییرات سختی سیستم در مقابل تغییر نسبت دهانه به ارتفاع.



شکل ۱۴. نیروی متناظر با شل‌شدگی در برابر تغییرات B/H.

شل‌شدگی، به سمت مقادیر کمتر از ۲/۵ هنگام افزایش طول کابل اتصال در بین مدل‌های با قطر کابل یکسان است. عدم تأثیرگذاری تغییر قطر کابل‌ها در جابجایی متناظر با شل‌شدگی، چنانچه در شکل ۱۲ نیز مشاهده شده بود، در این بخش و در نمودارهای شکل ۱۵ نیز قابل مشاهده است. به گونه‌ای که منحنی‌های جابجایی متناظر با شل‌شدگی، در مدل‌هایی که طول کابل اتصال یکسان دارند، ولی قطر کابل‌های به‌کاررفته در آن‌ها متفاوت است، بر هم منطبق است.

۲.۵. نسبت دهانه به ارتفاع

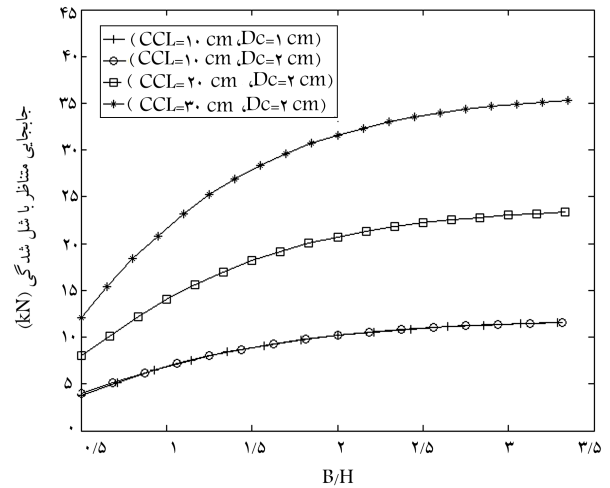
برای مدل‌هایی با مقادیر مختلف طول کابل اتصال و قطر کابل‌ها که نسبت دهانه به ارتفاع (B/H) متغیری دارند، تغییرات سختی سیستم نسبت به تغییر مقدار B/H از نتایج حاصل از تحلیل‌ها استخراج شده است (شکل ۱۳). ملاحظه می‌شود که در این منحنی‌ها برای هر سه مدل در مقادیر مختلف نیروی جانبی، یک نقطه‌ی بیشینه برای سختی جانبی وجود دارد. این نقطه‌ی بیشینه در بیشتر حالات بین مقادیر نسبت دهانه به ارتفاع ۰/۵ تا ۱ قرار گرفته و با دور شدن از این محدوده، سختی سیستم کاهش یافته است. با مقایسه‌ی منحنی‌های بین دو مدل با قطر کابل‌های یکسان و مقادیر CCL متفاوت مشاهده می‌شود که افزایش طول کابل اتصال باعث حرکت نقاط بیشینه‌ی منحنی‌ها به سمت مقدار ۰/۵ و نیز افزایش قطر کابل‌ها باعث حرکت این نقطه به سمت عدد ۰/۵ شده است.

موضوع دیگر، اثر افزایش نیروی جانبی در نقطه‌ی بیشینه‌ی نمودارها در هر یک از مدل‌هاست. به گونه‌ای که با افزایش نیروی جانبی، میزان B/H متناظر با نقطه‌ی بیشینه افزایش یافته است. این مسئله و همچنین سطوح سختی ثابت، در نمودار سه بعدی ترسیم‌شده در شکل ۱۳ قابل مشاهده است.

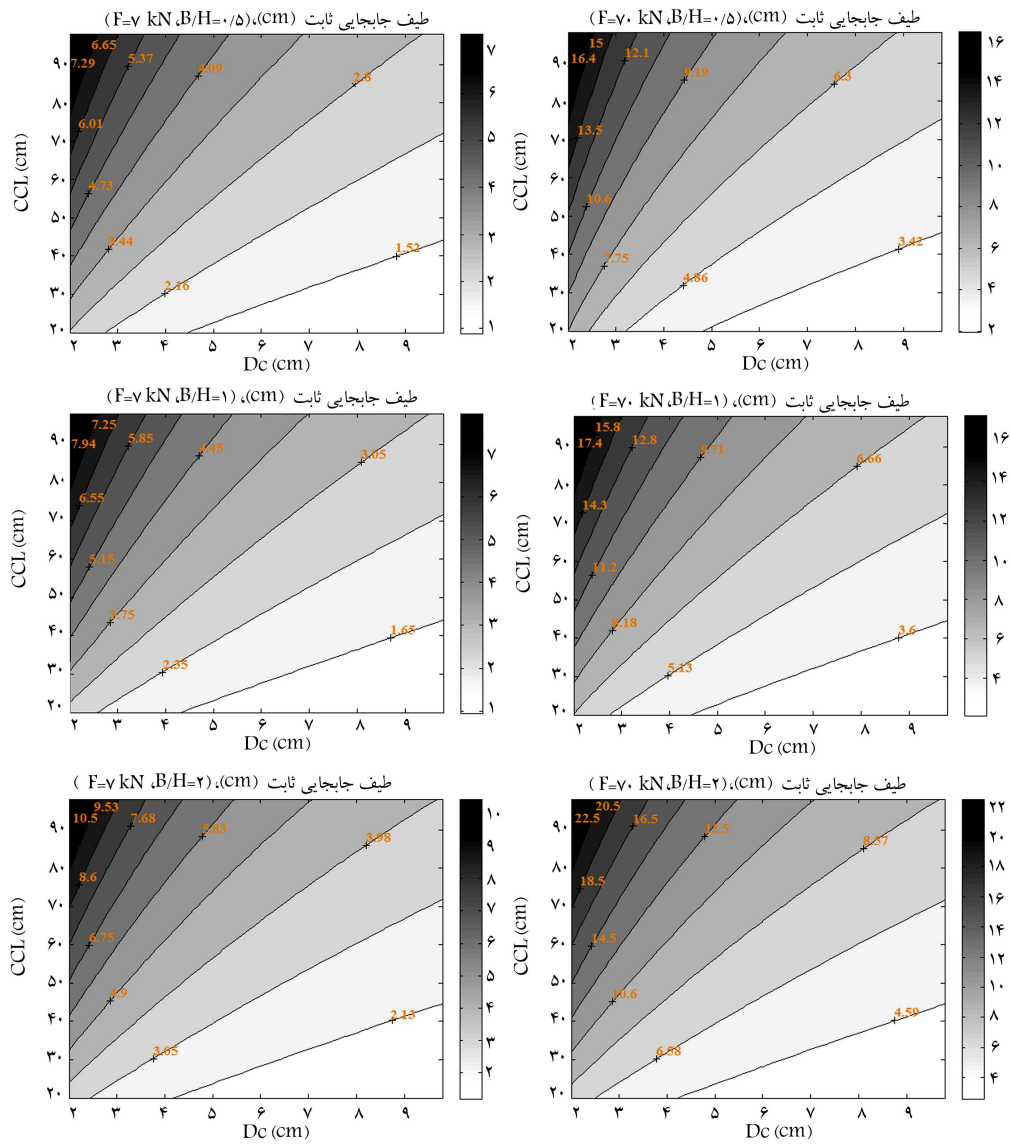
تغییرات نیروی متناظر با شل‌شدگی کابل مغلوب هنگامی که B/H به‌عنوان یک متغیر تعریف می‌شود، برای مدل‌هایی با طول کابل اتصال و قطر کابل‌های مختلف در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این نمودارها یک نقطه‌ی بیشینه در حوالی مقدار ۲/۵ مشاهده می‌شود، که اگر نسبت B/H در این محدوده باشد، سیستم بیشترین نیروی جانبی را بدون بروز شل‌شدگی در کابل مغلوب تحمل خواهد کرد. نکته‌ی قابل مشاهده در این نمودارها، ۵۲ حرکت نقطه‌ی بیشینه‌ی نیروی متناظر با

۳.۵. متغیرهای طراحی

در طراحی ساختمان‌ها، مقادیر دهانه‌ها و همچنین ارتفاع طبقات براساس نقشه‌ها و ملزومات معماری تعیین می‌شود. همچنین نیروی جانبی وارد بر طبقات نیز با توجه به ویژگی‌های ساختمان و محیط قابل محاسبه هستند. با توجه به این موضوع، در طراحی سیستم کابلی با آرایش Y شکل، طول کابل اتصال و قطر کابل‌ها فقط متغیرهای هندسی فعال در سیستم هستند. به‌عنوان نمونه، مدل‌هایی با نسبت دهانه به ارتفاع ۱/۵، ۲ و ۳ در محدوده‌ی مشخصی از تغییرات طول کابل اتصال (CCL) و قطر کابل‌ها (Dc)، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از این بررسی‌ها در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در این نمودارها، برای مقادیر B/H و نیروی جانبی مشخص، میزان جابجایی سیستم در فضای دو متغیره با تغییرات CCL و Dc به صورت خطوط تراز ترسیم شده‌اند. ملاحظه می‌شود برای تأمین یک مقدار جابجایی ثابت در یک سیستم مشخص باید با افزایش طول کابل اتصال، اندازه‌ی قطر کابل‌ها نیز افزایش یابند.



شکل ۱۵. جابجایی متناظر با شل‌شدگی در برابر تغییرات B/H.



شکل ۱۶. منحنی‌های جابجایی ثابت سیستم برای مقادیر مختلفی از طول کابل اتصال و قطر کابل‌ها.

و همچنین رفتاری سخت دارند، از میزان سختی جانبی صفر تا مقادیر بالایی از سختی، طول کابل اتصال نقش مهمی در تنظیم میزان سختی سیستم دارد. بیشترین سختی سیستم زمانی حاصل خواهد شد که طول کابل اتصال کمتر از ۵٪ ارتفاع سیستم باشد. اثر نسبت دهانه به ارتفاع نیز در سختی سیستم قابل توجه است. به گونه‌ی که بیشترین سختی جانبی در محدوده‌ی بین ۰/۵ تا ۱ برای نسبت دهانه به ارتفاع تأمین می‌شود و برای مقادیر کمتر یا بیشتر از این محدوده سخت جانبی کاهش می‌یابد.

به تأخیر انداختن بروز شل‌شدگی در کابل مغلوب و استفاده از کل ظرفیت سیستم، با افزایش طول کابل اتصال امکان‌پذیر است. نسبت دهانه به ارتفاع در محدوده‌ی ۲/۵ نیز بیشترین تأخیر را در بروز شل‌شدگی به‌وجود می‌آورد. برای یک سیستم با مقادیر دهانه، ارتفاع و بار جانبی مشخص، جهت تأمین یک میزان جابجایی هدف مشخص می‌توان با افزایش هم‌زمان طول کابل اتصال و قطر کابل‌ها، ضمن به تأخیر انداختن شل‌شدگی در کابل مغلوب، جابجایی موردنظر را نیز حفظ کرد.

چنانچه در بخش‌های قبل مشاهده شده است، افزایش طول کابل اتصال و همچنین افزایش قطر کابل‌ها باعث به تأخیر افتادن شل‌شدگی در کابل مغلوب شده است. همچنین برای یک جابجایی هدف مشخص می‌توان حالت‌های مختلفی از ترکیب اندازه‌ی طول کابل اتصال را با اندازه‌ی قطر کابل‌ها به‌کار برد. لذا در سیستم‌های با کابل اتصال بلندتر، که با توجه به منحنی‌های شکل ۱۶ و براساس میزان جابجایی موردنظر، کابل‌هایی با قطر مناسب‌تر دارند، عملکرد مطلوب‌تری در برابر شل‌شدگی کابل مغلوب خواهند داشت.

۶. نتیجه‌گیری

در سیستم کابلی با آرایش Y شکل که در محدوده‌ی مشخصی از جابجایی‌ها، تمامی کابل‌های حاضر در سیستم را به‌صورت هم‌زمان تحت کشش نگه می‌دارد

منابع (References)

1. Bruneau, M., Uang, C.M. and Whittaker, A., *Ductile Design of Steel Structures*, McGraw Hill, New York, NY (1998).
2. Di Sarno, L. and Elnashai, A.S. "Bracing systems for seismic retrofitting of steel frames", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(2), pp. 452-465 (2009).
3. Mahin, S., Uriz, P., Aiken, I., Field, C. and Ko, E. "Seismic performance of buckling restrained braced frame systems", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, No. 1681 (1-6 August 2004).
4. Hou, X. and Tagawa, H. "Wire-rope bracing system with elasto-plastic dampers for seismic response reduction of steel frames", 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China (12-17 October 2008).
5. Razavi, M. and Sheidaii, M.R. "Seismic performance of cable zipper-braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, **74**, pp. 49-57 (2012).
6. Lotfollahi, M. and Alinia, M.M. "Effect of tension bracing on the collapse mechanism of steel moment frames", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(10-11), pp. 2027-2039 (2009).
7. Barghian, M. and Maghsodpour, S. "Concrete structure rehabilitation using cable systems and optimization of the cable system form and pre-tensioning force range", *Sharif Journal of Science & Technology*, **44**, pp. 117-124 (October-November 2008).
8. Ketabfroosh Badri, R. "Determining the behaviour factor of steel 2D frame with cable as bracing", M.Sc. Dissertation, Civil Engineering Dept., Tabriz University (2007).
9. Allahyari, A. "Using cable system in 3D concrete structures as bracing and determining behaviour factor", M.Sc. Dissertation, Civil Engineering Dept., Tabriz University (2009).
10. Barghian, M. and Esmaeli Aghdam, Y. "Using a damper and pre-tensioned cables with different arrangements and optimized paths for a lateral resistance system", *Sharif Journal of Science & Technology*, **27-2**(2), pp. 85-92 (June-July 2011).
11. Khalse Dehgan, M. "Investigation of elasto-plastic behavior of steel frames with cable bracing", M.Sc. Dissertation, Civil Engineering Dept., Tabriz University (2010).
12. Gimsing, N.J. and Christos, T.G., *Cable Supported Bridges: Concept and Design*, Second Edition, John Wiley and Sons (2000).
13. Tamai, H. and Takamatsu, T. "Cyclic loading tests on a non-compression brace considering performance-based seismic design", *Journal of Constructional Steel Research*, **61**(9), pp. 1301-1317 (2005).
14. Phocas, M.C. and Pocanschi, A. "Steel frames with bracing mechanism and hysteretic dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **32**(5), pp. 811-825 (2003).
15. Hou, X. and Tagawa, H. "Displacement-restraint bracing for seismic retrofit of steel moment frames", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(5), pp. 1096-1104 (2009).
16. Najafi, M. "Investigation of cable suitable arrangement as a bracing in 2-D steel frame", M.Sc. Dissertation, Ahar Islamic Azad University (2011).
17. Kurata, M. "Strategies for rapid seismic hazard mitigation in sustainable infrastructure systems", PhD Dissertation, Academic Faculty, School of Civil and Environmental Georgia Institute of Technology (2009).
18. Tofighi Esfahlan, S.H. "Arrangement of Y-shaped cable in steel frames with cable bracing", M.Sc. Dissertation, Civil Engineering Dept., Tabriz University (2013).