مهندسی ساختمان و علوم مسکن، دوره چهاردهم، شماره ۳، شماره پیاپی ۲۸، پاییز ۱۴۰۰
فصلنامه علمی
مهندسی ساختمان و علوم مسکن behs.bhrc.ac.ir
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

تحلیل رفتار سازه‌ای سیستم مهاربند فولادی همگرای y شکل

سهیل مجیدزمانی*

استادیار، عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
* تهران، صندوق پستی ۱۶۹۶- ۱۳۱۴۵، majidzamani@bhrc.ac.ir

چکیده

سیستم‌های باربر جانبی مبتنی بر کاربرد مهاربندهای همگرا از رایج‌ترین انواع این سیستم‌ها محسوب می‌شوند. در میان انواع مهاربندی‌های همگرا برخی فرم‌ها مانند X و V شناخته شده‌تر و برخی مانند y کمتر رایج هستند. این در حالی است که مهاربند y شکل در چشمه‌هایی از قاب که دارای بازشو هستند، یک راه حل قابل استفاده است. کمبود اطلاعات مستند علمی و فنی در مورد مهاربند y شکل موجب کاربرد نادرست آن و بروز خسارات تحت اثر زلزله می‌گردد. در این تحقیق، با انجام دادن مطالعات نظری ویژگی‌های رفتاری این مهاربند مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که مهاربند y شکل در نوع متعارف آن کاملاً مستعد کمانش خارج از صفحه است. با تحلیل کمانش در داخل و خارج از صفحهٔ مهاربندی، ضریب طول بحرانی کمانش به دست آمده و به ازای قرارگیری نقطهٔ همگرایی در نقاط مختلف دهانه ارایه شده است. برای برآورده ساختن ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران مبنی بر عدم تحمل کل نیروی جانبی فقط به وسیلهٔ فشار یا کشش در اعضای مهاربندی، لازم است که مکان نقطه همگرایی برای مهاربند y شکل رعایت گردد. در انتها به کمک روش ضرایب تغییرمکان، سطح عملکرد لرزه‌ای قاب مهاربندی شده برآورد شده و مشخص گردیده است که این سیستم مهاربندی توانایی تأمین سطح عملکرد ایمنی جانی را در زلزله طرح دارد.

کلیدواژگان

مهاربندی، قاب فولادی، مهاربندی همگرا، مهاربندی y شکل

An Analysis on the Structural Behavior of the y-Shaped Concentric Steel Bracing

Sohail Majid Zamani*

Structural Engineering Department, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran
* P.O. Box 13145-1696, Tehran, Iran, majidzamani@bhrc.ac.ir

Abstract

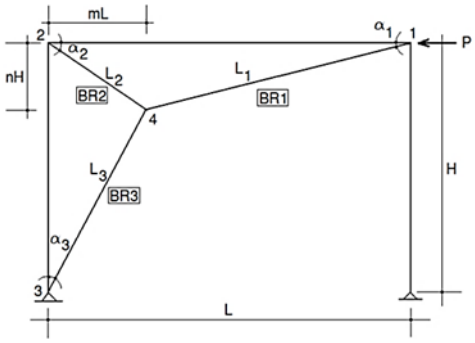
Lateral bearing systems utilizing concentric braces are considered to be the most common types of these systems. Among the types of concentric braces, some forms such as X and V are better known and some are less common such as y-shaped. Meanwhile, the y-shaped brace is a usable solution in frame spans that have openings. The lack of documented scientific and technical information about the y-shaped brace causes its incorrect use and the occurrence of damages under the effect of earthquakes. In this research, the behavioral characteristics of this brace have been investigated by conducting theoretical studies. It has been shown that the y-brace in its conventional form is quite susceptible to out-of-plane buckling. By analyzing the in-plane and out of plane buckling of bracing, the critical buckling length coefficient has been obtained and it is presented for the location of the convergence point in different locations of the span. In order to satisfy the requirements of Iran Standard 2800 which prohibits carrying the total lateral force only by compression or tension in the bracing members, it is necessary to observe the location of convergence point for the y-shaped bracing. Finally, with the help of displacement coefficients method, the level of seismic performance of the y-braced frame was estimated and it was determined that this bracing system has the ability to provide the life safety performance in design earthquake.

Keywords

Bracing, Steel Frame, Concentric Bracing, y-Shaped Bracing

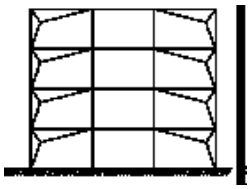
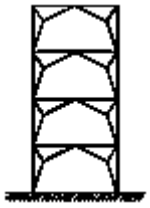
۱- مقدمه

مهاربندی همگرای y شکل در صنعت ساختمانی ایران به نام‌های مهاربندی "دروازه‌ای" یا "پرده‌ای" یا "خیمه‌ای" نیز شناخته می‌شود. این مهاربندی به‌طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. مهم‌ترین ویژگی این مهاربندی، کششی یا فشاری شدن همزمان هر سه مهاربند در یک دهانهٔ قاب است. زونتاگ، هِن و هارت در کتاب خود در باب طرح و اجرای سازه‌های فولادی، مزایای مهاربندی y شکل را در تأمین بازشوی در و پنجره در مقایسه با سایر مهاربندی‌های همگرا نشان می‌دهند.



شکل ۱ مهاربندی y شکل

جدول ۱ ضریب رفتار q، برای مهاربندی‌های همگرا در Eurocode 8

	Ductility Class	
Frame with concentric bracings	H	M
Diagonal bracings		
 Dissipative zones (tension diagonals only)	4	4
V-bracings		
 Dissipative zones (tension and compression diagonals)	2.5	2

فخریاسری و پوروشسب در تشریح سازه‌های صنعتی فولادی، مهاربند y شکل را به نام مهاربند پرده‌ای معرفی و بیان می‌کنند که این مهاربند در فشار کارایی ندارد و لازم است به صورت یک جفت متقارن در کنار یکدیگر و در هر جهت پلان سازه استفاده شود [2]. مهاربند پرده‌ای در آیین نامه Eurocode 8 جزء مهاربندهای همگرا محسوب شده است [3]. در جدول ۱ که برگرفته از این آیین‌نامه است، استفاده از مهاربندی y شکل به صورت تک و جفت متقارن در یک دهانه قاب نشان داده شده است و ضریب رفتار آن، q، ارایه شده است.

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد موسی موسی‌پور در دانشگاه صنعتی شریف به طور نظری به سه مبحث زیر پرداخته است [4]:

۱. رفتار الاستیک خطی قاب‌های ساده با مهاربندی دروازه‌ای
۲. پایداری قاب‌های ساده با مهاربندی دروازه‌ای
۳. عملکرد غیرخطی مهاربندهای دروازه‌ای و شکل‌پذیری آنها

در موضوع اول با فرض یک چشمه از قاب مهاربندی شده با مهاربندهای دروازه‌ای متقارن و فرض اتصالات کاملا مفصلی، تغییرات سختی جانبی قاب به ازای تغییرات محل همگرایی اعضای مهاربندی بررسی شده است. همچنین، تأثیر نسبت ارتفاع قاب به طول دهانه بر سختی جانبی قاب نیز مورد بحث قرار گرفته است. بر اساس بررسی پارامترهای سختی جانبی قاب دروازه‌ای، محل مناسب نقطه همگرایی سه عضو مهاربندی به‌دست آمده است.

در بحث پایداری ارتجاعی قاب با مهاربند دروازه‌ای، اتصالات اعضای قاب و مهاربندها در داخل صفحه قاب، مفصلی فرض شده است. در جهت خارج از صفحه، فقط اتصال اعضای مهاربندی به یکدیگر در نقطه همگرایی از نوع لنگرگیر فرض شده است. به ازای تغییرات محل نقطه همگرایی اعضای مهاربندی، تغییرات ممان اینرسی اعضای مهاربندی و تغییرات نسبت ارتفاع قاب به طول دهانه، تغییرات نیروی کمانش قاب بررسی شده است. در نتیجه این بررسی، موقعیت نقطه همگرایی برای حصول حداکثر نیروی کمانش به‌دست آمده است. همچنین، ضریب طول کمانش خارج از صفحه به ازای تغییرات نقطه همگرایی محاسبه شده است.

صفاری و یزدی امکان کمانش خارج از صفحه مهاربند y شکل را با استفاده از روابط شیب و افت بررسی کرده‌اند [5]. در مقالهٔ ایشان رفتار قاب و مصالح الاستیک فرض شده است و با فرض عملکرد خرپایی اعضای مهاربندی، نیروی داخلی اعضا به صورت پارامتریک محاسبه شده است. سپس، با درنظرگرفتن عملکرد سه‌بعدی قاب و با استفاده از روابط شیب و افت و اعمال شرایط سازگاری و معادلات تعادل، معادله مشخصه حاکم بر کمانش سیستم به‌دست آمده است و نمودارهایی جهت تعیین بار کمانش سیستم و ضریب طول مؤثر اعضا ارایه شده است.

کاظمی و عرفانی نیز در مقاله‌ای رفتار الاستیک مهاربند y شکل را مورد بررسی قرار داده‌اند [6]. در این مقاله، پس از ارزیابی مختصر محاسن و معایب این نوع مهاربند با بررسی‌هایی نشان داده شده است که با حرکت کردن گره میانی به سمت گوشه قاب و افزایش خروج از مرکزیت این نقطه، سختی قاب کمتر خواهد شد و به تبع آن، پریود ارتعاش طبیعی سازه افزایش می‌یابد، که در پی آن جابه‌جایی سیستم تحت بار ثابت افزایش می‌یابد.

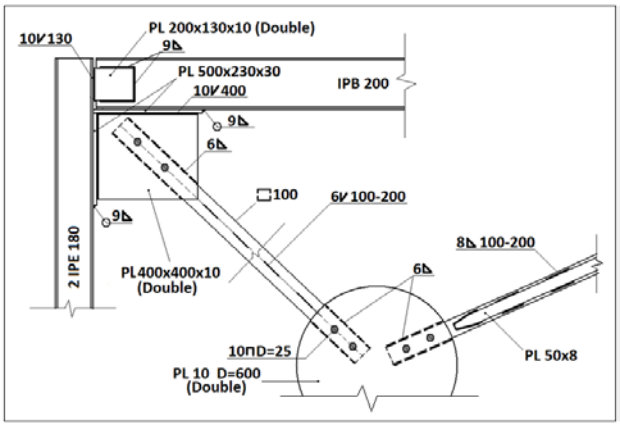
در مراجع فوق به کمک تحلیل ارتجاعی سازه‌های خرپا و قاب به بررسی خواص مهاربند y شکل پرداخته شده است و مطلبی مبنی بر مطالعات دقیق‌تر شامل مدل‌سازی اجزای محدود غیرخطی و یا آزمایش‌های تجربی بر روی این مهاربند ارایه نشده است. همچنین، به کمانش غیرخطی خارج از صفحه و بار معادل آن پرداخته نشده است. ولی از نتایج مطالعات در مجموع چنین بر می‌آید که درنظرگرفتن رفتار الاستیک برای مهاربندی صحیح نیست، زیرا بارکمانش محاسبه شده حدوداً برابر با بار تسلیم اعضای مهاربندی است. در بیشتر موارد، استفاده از مهاربند به صورت جفت متقارن توصیه شده است. دلیل این امر عدم تقارن رفتار مهاربندی در کشش و فشار است.

در پروژهٔ "مقایسهٔ نظری و تجربی رفتار فرم‌های مختلف مهاربندی همگرا" که طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۴ در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام شد، مجموعه‌ای از ده مدل قاب یک دهانه و یک طبقه دارای مهاربندی y شکل با مقیاس واقعی مورد بررسی آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی اجزای محدود قرار گرفت [7].

۲- محاسبهٔ بار کمانش مهاربندی y- شکل

برای طراحی مهاربندها در فشار لازم است که بار کمانش آنها محاسبه شود. بر اساس متون فنی و مطابق با رویهٔ آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌ای، بار کمانش تابع طول مؤثر عضو فشاری است.

برای محاسبهٔ ضریب طول مؤثر کمانش مهاربندی y شکل، دو حالت کمانش در داخل صفحهٔ قاب و کمانش خارج از صفحهٔ قاب قابل تشخیص است. در شکل ۱ هندسهٔ عمومی مهاربندی y شکل دیده می‌شود. در مهاربندی y شکل هر سه مهاربند به‌طور هم‌زمان در فشار قرار می‌گیرند و نمی‌توان مشابه مهاربند ضربدری از اثر مثبت مهاربند کششی در جلوگیری از کمانش مهاربند فشاری بهره برد. بنابراین، در صورت کاربرد ورق‌های اتصال تکی، وقوع کمانش خارج از صفحه با توجه به انعطاف‌پذیری خمشی ورق در مقایسه با صلبیت آن در صفحهٔ قاب، حتمی است. در صورت کاربرد اتصالات گیردار در انتهای مهاربندها، امکان وقوع کمانش داخل و یا خارج از صفحهٔ قاب با توجه به نسبت لاغری مهاربندها وجود دارد.



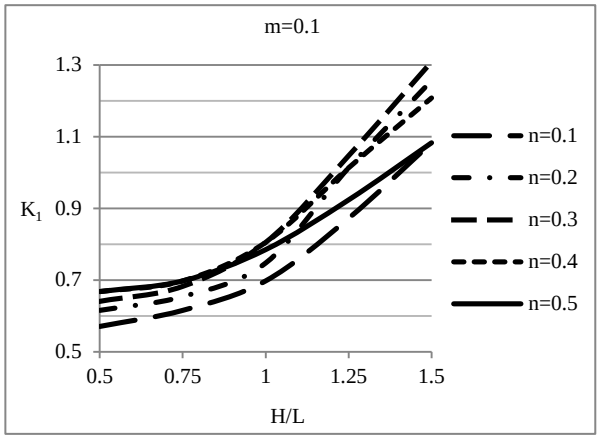
شکل ۲ جزییات اتصال مهاربندی y شکل

در این بررسی، از ورق‌های اتصال دوتایی برای تأمین گیرداری در انتهای مهاربندها استفاده می‌شود تا امکان پدید آمدن کمانش غیرارتجاعی در صفحهٔ قاب و مطالعهٔ ویژگی‌های آن فراهم شود (شکل ۲). از طرف دیگر، در صورت وقوع کمانش خارج از صفحه، حضور اتصالات گیردار باعث افزایش لنگر خمشی در دو انتهای مهاربند علاوه بر وسط دهانهٔ آن می‌شود. این روند در نهایت موجب شکل‌گیری حداقل دو و حداکثر سه مفصل خمیری در مهاربند می‌شود. در حالی‌که با اتصالات تک‌ورقی، حداکثر یک مفصل خمیری عمده در مهاربند و دو مفصل خمیری فرعی در ورق‌های اتصال پدید می‌آیند. به این ترتیب، کاربرد ورق‌های اتصال دوتایی می‌تواند از نظر استهلاک انرژی نسبت به کاربرد ورق تکی، برتری داشته باشد.

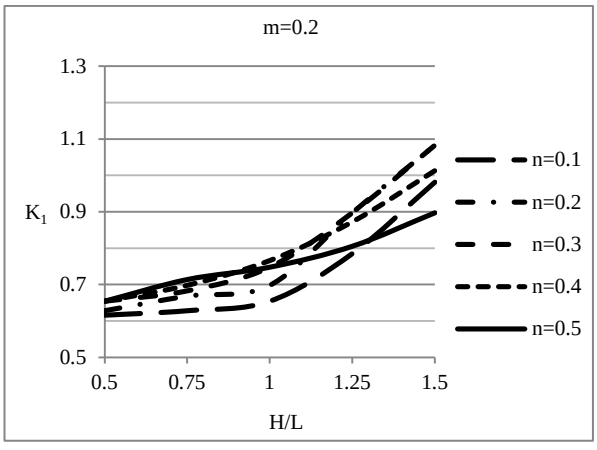
۲-۱- ضریب طول بحرانی کمانش برون صفحه‌ای مهاربندی y- شکل

فرض می‌شود که مهاربندها عمدتا تحت تأثیر نیروها و تغییرشکل‌های محوری قرار دارند. مفاصل بین مهاربندها توانایی انتقال لنگر خمشی را ندارند و قاب مهاربندی شده عملا مشابه یک خرپا رفتار می‌کند. توزیع نیروهای محوری در این خرپا بر اساس هندسهٔ اولیهٔ قاب صورت می‌گیرد. طول مهاربندها و بزرگی نیروهای محوری از ویژگی‌های پایه‌ای قاب مهاربندی شده یعنی طول دهانه، ارتفاع قاب و موقعیت نقطهٔ همگرایی که با متغیرهای m و n در شکل ۲ نشان داده شده‌اند، قابل محاسبه است.

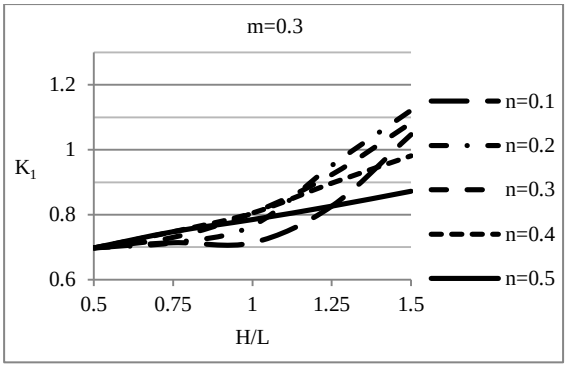
برای بررسی تغییرات ضریب طول مؤثر در محدودهٔ کاربردی مهاربندی y شکل، نسبت ارتفاع به دهانهٔ قاب، H/L، بین ۰/۵ تا ۱/۵ و هر یک از ضرایب m و n بین ۰/۱ تا ۰/۵ تغییر داده شدند و ضرایب طول مؤثر از روابط شیب - افت اعضای مهاربندی با درنظرگرفتن توابع پایداری محاسبه گردید. در این محاسبات، ممان اینرسی مقطع مهاربندها یکسان فرض شده است. محاسبه مقادیر ویژه کمانش فاقد فرمول بسته است و از طریق محاسبات تکراری در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. شکل‌های ۳ تا ۷ تغییرات ضریب طول مؤثر K_1 را برای مهاربند BR1 در کمانش خارج از صفحهٔ قاب نشان می‌دهند.



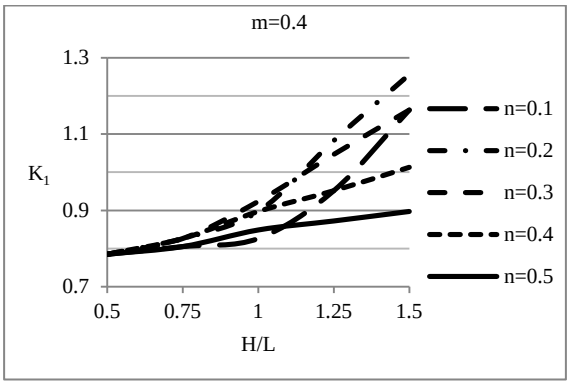
شکل ۳ ضریب طول مؤثر K1 برای مهاربند BR1 در کمانش خارج از صفحه (m =۰/۱)



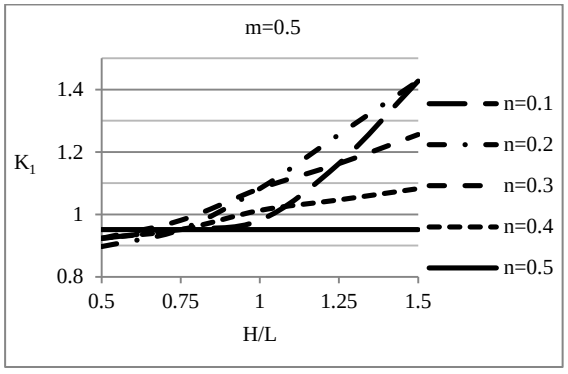
شکل ۴ ضریب طول مؤثر K1 برای مهاربند BR1 در کمانش خارج از صفحه (m =۰/۲)



شکل ۵ ضریب طول مؤثر K1 برای مهاربند BR1 در کمانش خارج از صفحه (m =۰/۳)



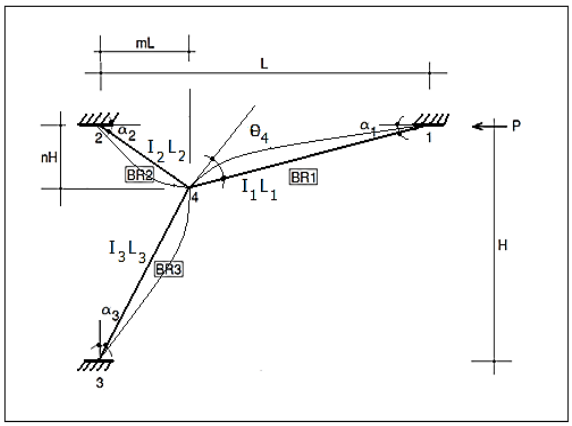
شکل ۶ ضریب طول مؤثر K1 برای مهاربند BR1 در کمانش خارج از صفحه (m =۰/۴)



شکل ۷ ضریب طول مؤثر K1 برای مهاربند BR1 در کمانش خارج از صفحه (m =۰/۵)

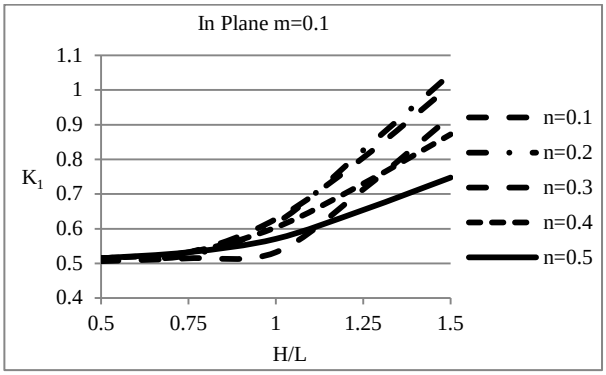
۲-۲- ضریب طول بحرانی کمانش درون صفحه‌ای مهاربندی y شکل

فرض می‌شود که قاب مهاربندی شده مشابه یک خرپای مسطح معین رفتار می‌کند و مهاربندها عمدتا تحت تأثیر نیروهای محوری قرار دارند. توزیع نیروهای محوری در این خرپا بر اساس هندسهٔ اولیهٔ قاب صورت می‌گیرد. طول مهاربندها و بزرگی نیروهای محوری از ویژگی‌های پایه‌ای قاب مهاربندی شده یعنی طول دهانه، ارتفاع قاب و موقعیت نقطهٔ همگرایی که با متغیرهای m و n در شکل ۲ نشان داده شده‌اند، قابل محاسبه است. تغییرشکل اعضای قاب فقط درون صفحهٔ قاب امکان‌پذیر است. ممان اینرسی سطح مقطع مهاربندها در حدود یک دهم ممان اینرسی سطح مقطع تیرها و ستون‌ها فرض می‌شود. به این ترتیب، مهاربندها عملا توانایی ایجاد چرخش در گره‌های قاب یعنی محل اتصال تیر و ستون و مهاربند را ندارند و این گره‌ها در تحلیل فاقد چرخش فرض می‌شوند. تنها گره‌ای که آزادی چرخش دارد، نقطهٔ همگرایی مهاربندهاست. به این ترتیب فرض می‌شود که اعضای مهاربندی y شکل به صورت تیر- ستون‌هایی با یک انتهای گیردار در گوشهٔ قاب، عمل می‌کنند. با این فرضیات ساده‌کننده، تغییرشکل قاب براثر چرخش نقطهٔ همگرایی که شکل مد کمانش محتمل را نشان می‌دهد، در شکل ۸ دیده می‌شود.

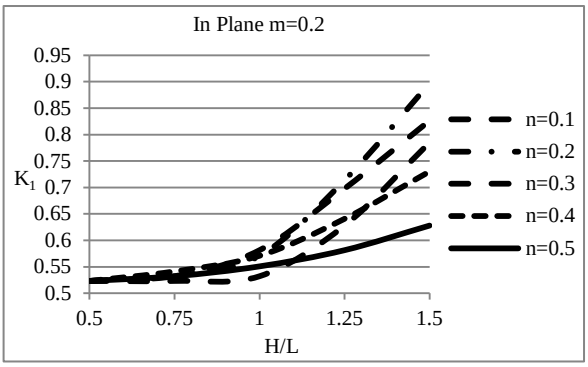


شکل ۸ مد کمانش قاب مهاربندی شده در داخل صفحهٔ قاب

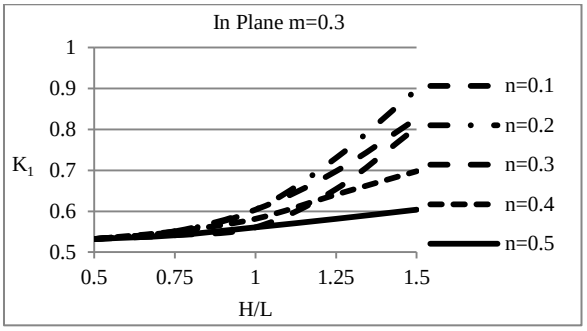
برای بررسی تغییرات ضریب طول مؤثر در محدودهٔ کاربردی مهاربندی y شکل، نسبت ارتفاع به دهانهٔ قاب، H/L، بین ۰/۵ تا ۱/۵ و هر یک از ضرایب m و n بین ۰/۱ تا ۰/۵ تغییر داده شدند و ضرایب طول مؤثر محاسبه گردیدند. در این محاسبات، ممان اینرسی مقطع مهاربندها یکسان فرض شده است. شکل‌های ۹ تا ۱۳ تغییرات ضریب طول مؤثر K_1 را نشان می‌دهند.



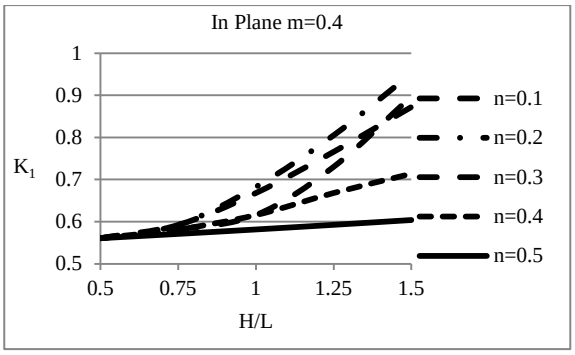
شکل ۹ ضریب طول مؤثر K1 برای مهاربند BR1 (m =۰/۱) در کمانش درون صفحه



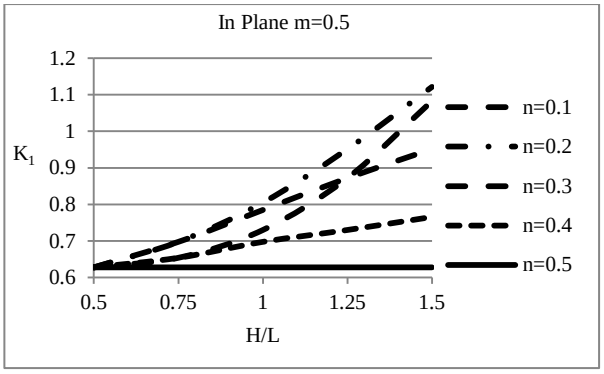
شکل ۱۰ ضریب طول مؤثر K1 برای مهاربند BR1 (m =۰/۲) در کمانش درون صفحه



شکل ۱۱ ضریب طول مؤثر K1 برای مهاربند BR1 (m =۰/۳) در کمانش درون صفحه



شکل ۱۲ ضریب طول مؤثر K1 برای مهاربند BR1 (m =۰/۴) در کمانش درون صفحه



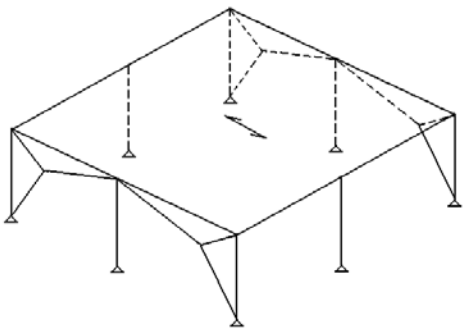
شکل ۱۳ ضریب طول مؤثر K1 برای مهاربند BR1 (m =۰/۵) در کمانش درون صفحه

۲-۳- مد کمانش برون صفحه‌ای مهاربند صلب – ورق نرم

در نمونه‌های مهاربندی y شکل دارای اتصال تک ورقی، مهاربندها فقط نیروی محوری فشاری ارتجاعی را تحمل می‌کنند و خمش غیرارتجاعی در ورق‌های اتصال متمرکز می‌گردد. این نحوهٔ عملکرد استفاده از ضرایب طول کمانش پیش‌گفته را غیرممکن می‌سازد. در این حالت، هر چند که محاسبهٔ نیروی فشاری مهاربندها در لحظهٔ کمانش با تحلیل ویژه‌ای امکان‌پذیر است، اما توصیه می‌شود که برای سهولت محاسبات و تأمین ضریب ایمنی بزرگتر، فقط از مقاومت کششی مهاربندها استفاده شود.

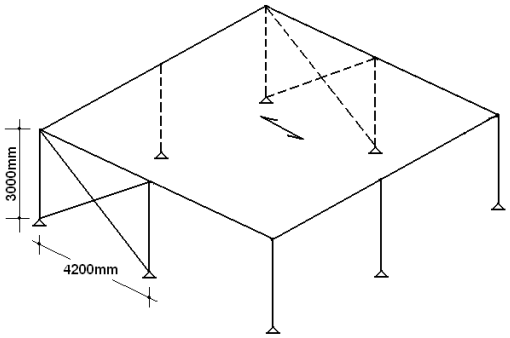
۳- بررسی عملکرد لرزه‌ای

به منظور بررسی توان باربری لرزه‌ای مهاربند همگرای y شکل، از روش " تعیین نقطه عملکرد با استفاده از ضرایب " براساس مندرجات آیین‌نامه FEMA356 استفاده می‌کنیم [8]. در این بررسی، یک ساختمان یک طبقه با اهمیت متوسط با پلان تقریبا مربع شکل دارای مهاربندی در امتداد دو محور در یک جهت پلان مانند شکل ۱۴ در نظر گرفته شده است.



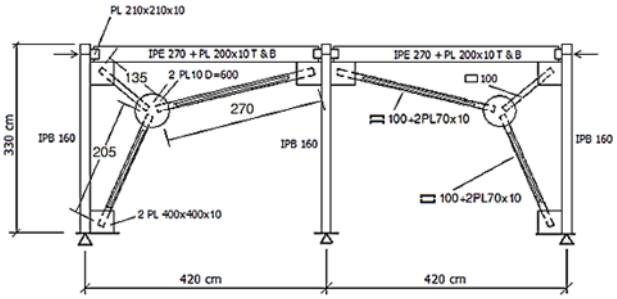
شکل ۱۴ نمای سه بعدی ساختمان مورد مطالعه با مهاربند y شکل

همین ساختمان با مهاربندهای X به عنوان مبنای مقایسه مورد بررسی قرار گرفته است. نمای ساختمان با مهاربند ضربدری در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵ نمای سه بعدی ساختمان مورد مطالعه با مهاربند X

مهاربندی y شکل نیز برای تحمل همین وزن طراحی می‌شود. مقطع مهاربندها برای حصول کمانش داخل صفحه قاب دارای فرم]] متشکل از دو ناودانی U100 هستند و اتصال این مهاربندها به قاب به وسیله ورق‌های اتصال دوتایی فرض شده است. فاصله نقطه همگرایی از گوشه قاب برای حصول مقاومت مورد نیاز، تنظیم شده است (شکل ۱۶).



شکل ۱۶ هندسه قاب ساده با مهاربندی y شکل

برای تشخیص بروز کمانش داخل یا خارج از صفحه قاب، مقادیر لاغری همه مهاربندها در هر دو جهت اصلی مقطع آنها محاسبه شده است. بر این اساس، لاغری مهاربند بلند در کمانش داخل صفحه قاب برابر با ۸۰ به دست آمده است که بیشترین مقدار در میان همه مهاربندها در هر دو جهت اصلی است. بنابراین، کمانش داخل صفحه در مهاربند بلند تعیین‌کننده مقاومت جانبی قاب مهاربندی شده است.

مقاومت فشاری مهاربندها با فرض کمانش داخل صفحه و ضریب طول مؤثر ۰/۶۵ برای آنها محاسبه شده است. مقاومت جانبی مهاربند y شکل دو دهانه مساوی دو برابر مقاومت دهانه فشاری در نظر گرفته شده است.

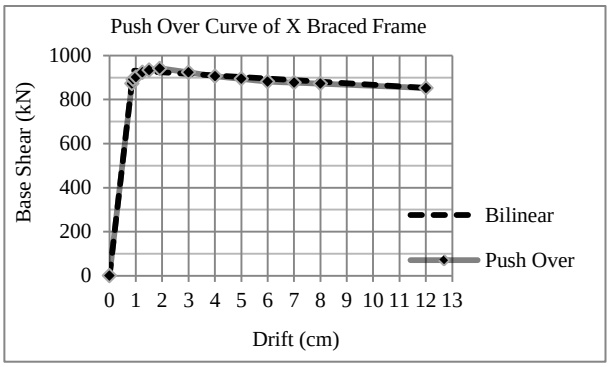
همچنین، سختی ارتجاعی نیز با درنظرگرفتن هندسه قاب و مشخصات مقاطع محاسبه شده است که در جدول ۲ ارایه می‌شود.

جدول ۲ مقاومت و سختی قاب مهاربندی شده

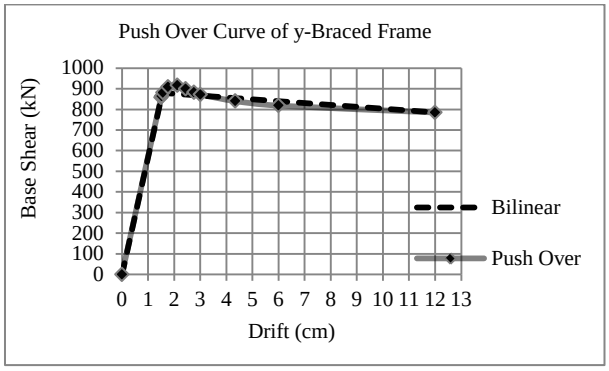
مهاربندی	یک دهانه مهاربندی			دو دهانه مهاربندی متقارن	
	K_e (kN/m)	V_D^+ (kN)	V_D^-	K_e	$2\ V_D^-$
y	16745	339	249	33490	498
X	90650	801	576	-------	-------

مقطع مهاربندهای X به طور دلخواه در نظر گرفته شده و دارای فرم [] متشکل از دو ناودانی U100 است. اتصال این مهاربندها به قاب به وسیله ورق‌های اتصال تکی فرض شده است. اتصالات تیر و ستون از نوع ساده هستند و یک قاب ساختمانی ساده را شکل می‌دهند. مقاومت جانبی مهاربندی با فرض وجود نیروی محوری مساوی با مقاومت مهاربند فشاری در همه مهاربندها محاسبه می‌شود. با فرض استقرار ساختمان در منطقه‌ای با خطر زلزله خیلی زیاد روی زمین نوع II و ضریب شتاب مبنای طرح برابر ۰/۳۵، وزن قابل تحمل به وسیله سیستم مهاربندی ضربدری برابر با ۵۴۰ تن برآورد می‌شود.

به این ترتیب، هر دو مهاربندی بر اساس تحلیل‌های اولیه برای تحمل وزن مؤثر یکسان طراحی شده‌اند، هرچند مصرف مصالح در مهاربندی y شکل ۱۴٪ بیش از وزن مصالح در مهاربندی X است. این تحلیل‌ها خطی و ارتجاعی هستند و رفتار غیرخطی و غیرارتجاعی مهاربندها را نشان نمی‌دهند. برای بررسی این اثرها در پاسخ سازه، تحلیل غیرارتجاعی تحت بار افزون با درنظرگرفتن تغییرشکل‌های بزرگ روی مدل قاب انجام شده است. منحنی دو خطی بار - تغییرمکان ناشی از تحلیل فوق در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۷ منحنی بار- تغییرمکان قاب با مهاربندی X تحت بار افزون



شکل ۱۸ منحنی بار- تغییرمکان قاب با مهاربندی y تحت بار افزون

در روش ضرایب تغییرمکان از رابطه عمومی زیر برای برآورد تغییرمکان جانبی هدف سازه استفاده می‌شود (فرمول ۱):

(۱)

$$\delta_t = C_0 * C_1 * C_2 * C_3 * S_a * (T^2/4\pi^2)g$$

که در آن:

C_0 : ضریب اصلاح برآورد تغییرمکان سازه چند درجه از سازه یک درجه معادل

C_1 : ضریب اصلاح برآورد تغییرمکان غیرخطی از تحلیل سازه خطی

C_2 : ضریب اصلاح برای تأثیر افت سختی و مقاومت در چرخه‌های بارگذاری

C_3 : ضریب اصلاح برای تأثیر P-Δ

با در اختیار داشتن مقادیر جرم، سختی و منحنی بار- تغییرمکان هر دو نوع مهاربندی مورد بحث، روش تعیین تغییرمکان هدف قابل انجام دادن است.

مهاربندی X :

T=0.35 sec
R=2.57
C_0=1
C_1=1.26 Life Safety
C_1=1.32 Collapse Prevention
C_2=1.1 Life Safety
C_2=1.2 Collapse Prevention
C_3=1.1

(LS) δ_t =1*1.26*1.1*1.1*0.875*$(0.35^2/4\pi^2)$g = 4.1 cm
(CP) δ_t =1*1.32*1.2*1.1*1.5*0.875*$(0.35^2/4\pi^2)$g = 7.0 cm

جدول ۳ شکل‌پذیری مهاربند ضربدری X

مهاربند X	رده عملکرد	δ_t	Δ_T یا Δ_C	ΔL_T یا ΔL_C	Plastic Ductility (PD)	مجاز (PD)
مهاربند کششی	LS	3.2	0.76	2.6	4.3	7
	CP	5.3	0.76	4.2	7.8	9
مهاربند فشاری	LS	3.2	0.61	2.6	3.9	4
	CP	5.3	0.61	4.2	7.7	6

مطابق جدول ۳، مهاربندهای X شرایط شکل‌پذیری پلاستیک در سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) را برآورده می‌نمایند.

مهاربندی y :

T=0.43 sec
R=2.63
C_0=1
C_1=1.1
C_2=1.1 Life Safety
C_2=1.2 Collapse Prevention
C_3=1.08

(LS) δ_t =1* 1.1*1.1*1.08* 0.875*$(0.43^2/4\pi^2)$g = 5.25 cm
(CP) δ_t =1*1.1*1.2*1.08*1.5*0.875*$(0.43^2/4\pi^2)$g=8.75 cm

جدول ۴ شکل‌پذیری مهاربند y شکل

مهاربند y	رده عملکرد	δ_t	Δ_T یا Δ_C	ΔL_T یا ΔL_C	Plastic Ductility (PD)	مجاز (PD)
مهاربند بلند کششی	LS	5.25	0.52	2.0	3.85	7
	CP	8.75	0.52	3.4	6.5	9
مهاربند بلند فشاری	LS	5.25	0.41	2.3	4.6	5
	CP	8.75	0.41	3.675	8.0	7

مهاربندهای متوسط و کوتاه در مهاربندی y شکل مورد بحث، بحرانی نیستند. مهاربند بلند مطابق جدول فوق شرایط شکل‌پذیری پلاستیک را در سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) ارضا نموده است.

هر دو نوع مهاربندی X و y به نحو مشابهی شرایط عملکرد لرزه‌ای را برآورده می‌نمایند. این امر نشان‌دهنده کفایت روش طراحی قاب‌های مهاربندی‌شده و نیز توانایی این سیستم‌های مهاربندی برای تحمل تغییرشکل‌های لرزه‌ای در سطح عملکرد ایمنی جانی است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم مهاربند فولادی y شکل در قاب‌های یک طبقه به‌صورت تحلیلی مطالعه و با مهاربند ضربدری مقایسه شد. هر دو نمونه سیستم مهاربندی مورد مطالعه تحت بارگذاری جانبی افزاینده قرار گرفتند و نمودار بار - تغییرمکان آنها استخراج شد. مشاهدات و نتیجه‌گیری‌های مربوط به رفتار سازه‌ای به قرار زیر است:

- مهاربند همگرای y شکل باید به‌صورت متقارن یعنی شامل تعداد مساوی از دهانه‌های فشاری و کششی در هر قاب به‌کار رود. در صورت طراحی مهاربندهای هر دهانهٔ قاب به‌طور متقارن، این شرط همواره برقرار خواهد بود.
- در مهاربند y شکل با جزییات رایج در صنعت ساختمانی ایران، شامل: مقاطع ناودانی دوتایی فاصله‌دار و اتصالات تک ورقی، مهاربندهای فشاری دارای نیروی محوری قابل‌توجهی نیستند و عملا مهاربندهای کششی تحمل بار جانبی را به عهده دارند. توصیه می‌شود در مهاربندی y شکل با این جزییات، فقط مقاومت مهاربندهای کششی در محاسبه مقاومت جانبی درنظرگرفته شود.
- مقاومت فشاری مهاربند y شکل با اتصالات گیردار باید بر اساس روش محاسبهٔ مقاومت عناصر فشاری در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان به‌دست آید. برای حالت اتصالات گیردار، ضرایب طول مؤثر کمانش در این مقاله ارایه شده است.
- استفاده از اتصالات گیردار در برابر خمش مهاربند در کمانش خارج از صفحه، باعث افزایش ظرفیت باربری جانبی، سختی ارتجاعی و استهلاک انرژی قاب مهاربندی شده می‌شود.
- نمونه‌های قاب یک طبقه با مهاربندی y شکل مورد مطالعه در این تحقیق در صورت کاربرد به عنوان سیستم قاب سادهٔ فولادی به علاوهٔ مهاربندی همگرای معمولی مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [10]، دارای عملکرد قابل‌قبول در سطح ایمنی جانی در برابر زلزلهٔ طرح در مناطق با خطر زلزلهٔ خیلی زیاد بر روی خاک نوع II مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ [9] هستند.

۵- مراجع

1. S. Sontag, W. Henn, F. Hart, *Multi Story Buildings in Steel*, 2nd Edition, Collins, London, 1985.
۲. س. فخریاسری، ر. پوروشسب، *طرح و محاسبه سالن‌های صنعتی سبک و سنگین*، انتشارات دهخدا، تهران، ۱۳۸۰.
3. Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 3, BSI, London, 2004.
۴. م. موسی‌پور، بررسی عملکرد بادبندهای دروازه‌ای در برابر زلزله، پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۰.
۵. ح. صفاری، ح. ع. مسلمان یزدی، تعیین بار کمانش سیستم مهاربند دروازه‌ای، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۳.
۶. م. ت. کاظمی، س. عرفانی، طراحی بادبندهای دروازه‌ای برای زلزله، سومین همایش نقد و بررسی آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۸۱.
۷. مقایسه نظری و تجربی رفتار فرم‌های مختلف مهاربندی‌های همگرا، نشریه گ-۵۱۸، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۸۸.
8. FEMA 356, Prestandard and Commentary For the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, USA.
۹. استاندارد ۲۸۰۰ ایران، آیین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
۱۰. مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان.