



بررسی عملکرد غیرخطی سیستم دوگانه متشکل از قاب سبک فولادی (LSF) و قاب خمشی فولادی

سعید کراماتی^۱، سیدشاکر هاشمی^{۲*}، محمد واقفی^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران - سازه، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

۲. استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

۳. دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

* بوشهر، صندوق پستی ۱۳۸۱۷-۷۵۱۶۹، sh.hashemi@pgu.ac.ir

چکیده

از آنجایی که در صنعت نوین ساختمان، سرعت و کیفیت دو عامل مهم در انتخاب نحوه اجرای سازه است، اجرای صنعتی ساختمان بسیار مورد توجه واقع شده است. در این میان ساختمان‌های قاب سبک فولادی (LSF) یکی از گزینه‌های پر کاربرد مهندسان بدین منظور می‌باشد. سیستم قاب سبک فولادی نه تنها به صورت مجزا امکان استفاده دارند بلکه آیین‌نامه‌های مختلف ترکیب آن با دیگر سیستم‌های مهار جانبی سازه را مجاز دانسته اند که این امر به بهبود عملکرد سازه کمک کرده و محدودیت‌های اجرایی را نیز کاهش داده است. تعبیه اتاق پله در سازه‌های ذکر شده به علت افزایش تعداد المان‌های به کار رفته، یکی از مواردی است که در زمینه اجرایی محدودیت‌هایی ایجاد می‌کند. به همین علت، اغلب از اتاق پله با اسکلت فلزی (فولاد گرم نورد شده) در این گونه سازه‌ها استفاده می‌گردد. این امر علاوه بر کمک به سهولت اجرای سازه LSF، امکان استفاده از سختی جانبی قاب خمشی فولادی به منظور تحمل بیشتر نیروی جانبی و بهبود عملکرد لرزه‌ای کل سازه را مهیا می‌سازد. در این پژوهش، عملکرد غیرخطی سازه‌های دوگانه قاب سبک فولادی به همراه اتاق پله فلزی که از قاب‌های خمشی فولادی تشکیل شده، مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج این پژوهش، در شرایطی که از قاب خمشی به عنوان سیستم مهار جانبی ترکیبی استفاده گردد، مقاومت سازه‌ی ترکیبی تا دو برابر افزایش می‌یابد و در حوزه شکل‌پذیری نیز افزایش چشمگیری از خود نشان می‌دهد. در این حالت ضریب رفتار تا ۳۰ درصد بیشتر می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این سیستم می‌تواند جایگاه مناسبی در اجرای اینگونه سازه‌ها داشته باشد.

کلیدواژگان

عملکرد غیرخطی، سازه‌ی سبک فولادی (LSF)، سازه‌ی ترکیبی، ضریب رفتار

Non-linear Performance of the Dual System Consisting of Lightweight Steel Frame (LSF) and Moment Resisting Steel Frame

Saeed Keramati¹, Seyed Shaker Hashemi^{2*}, Mohammad Vaghefi³

1- MS. in Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

2- Department of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

3- Department of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

*P.O. Box 75169-13817, Bushehr, Iran, sh.hashemi@pgu.ac.ir

Abstract

Lightweight Steel Frame (LSF) structures are made of cold formed steel and due to the high strength-to-weight ratio, they have been developed rapidly. They are becoming more acceptable in housing industry; especially in low rise residential buildings. Some advantages of these structures are lightness, being made of recyclable material and fast and easy installation. An important issue in the performance of these structures is their behavior in the presence of seismic loads. These structures have the ability to be combined with other lateral resistant systems like Moment Resisting Frame that operates as a dual system. LSF combined with steel frame as a dual system could reduce the construction limits like constructing stairs. In the present study, nonlinear performance of the structures has been investigated by using nonlinear static analysis. In order to achieve this, forty different 3D models of two, three, four and five story buildings have been evaluated. In other words, ten different steel-to-LSF stiffness ratios are investigated for each type. In this article, seismic parameters for each model have been determined and an optimal model is recommended for each type. Based on the results obtained in this research, in the two-story structure, Resistance is about twice and behavior factor has been increased 18%. In addition, in three-, four- and five-story buildings, this dual system has a good performance in strength and capacity and performance of ductility is increased. Moreover, structural response curves in four and five-story buildings would be more nonlinear.

Keywords

Lightweight steel frame, Non-linear performance, Dual system, Ductility analysis, Non-linear static analysis

۱- مقدمه

عدد 5.5 و با تخته گچی عدد 2 پیشنهاد داده شده است [8]. از طرفی آیین-نامه NEHRP2003(FEMA450) نیز عدد 4 را برای قاب مهاربندی شده با بادبند تسمه قطری و عدد 6.5 را برای دیوار برشی ارائه کرده است [9]. علاوه بر موارد ذکر شده در آیین نامه طراحی سازه‌های سرد نورد شده اشاره شده است که سیستم‌های LSF قابلیت ترکیب با سازه‌های دیگر را دارد [8,10].

از جمله محدودیت‌های ساختمان‌های LSF، اجرای سخت پله‌ها در قسمت‌های میانی سازه می‌باشد. برای حل این مشکل، طراحان و مهندسان در بسیاری از موارد اتاق پله را به صورت اسکلت فلزی متشکل از پروفیل‌های گرم نورد شده طراحی و اجرا می‌نمایند (شکل ۱).



Fig. 1 Steel Staircases in LSF

شکل ۱ اتاق پله فولادی در سازه LSF

این امر باعث می‌شود از یک سو مشکل اجرای اتاق پله حل شود و از سوی دیگر با افزایش سختی جانبی و شکل‌پذیری اتاق پله، مقاومت کل سازه نیز بیشتر شود و در نتیجه سازه ترکیبی نیروی جانبی بیشتری را تحمل کند. این نکته می‌تواند در جهت کمک و بهینه‌سازی استفاده از این سیستم عمل کند. با توجه به اینکه در تحقیقات و آیین‌نامه‌های مختلف به این گونه سیستم ترکیبی اشاره‌ای نشده و به منظور مشخص شدن پارامترهای لرزه‌ای ضروری در این نوع سیستم و همچنین مقدار تغییرات به لحاظ شکل‌پذیری و مقاومت، در این تحقیق سازه‌های مختلفی با سیستم دوگانه مهار جانبی مورد ارزیابی لرزه‌ای قرار گرفته و عملکرد غیرخطی کلی سازه بررسی شده است. این کار با مدل‌سازی سازه‌های دو، سه، چهار و پنج طبقه به صورت سازه‌ی سرد نورد شده یا LSF با اتاق پله فولادی به صورت سه بعدی در نرم افزار SAP2000 صورت گرفته است. برای بررسی بهتر عملکرد غیرخطی، سازه‌ها با سختی متفاوتی مدل شده و بررسی شده‌اند. به منظور ارزیابی عددی نتایج حاصل از افزایش مقاومت، منحنی ظرفیت و برای تعیین شکل‌پذیری، ضریب رفتار آنها محاسبه شده است.

۲- منحنی ظرفیت و پارامترهای شکل‌پذیری

یکی از رویکردهای آیین‌نامه‌ها، استفاده از روش‌های دقیق و آسان تحلیل و طراحی است. لذا برای این منظور پارامترهایی محاسبه و معرفی شده‌اند که کار مهندسین طراح را آسان‌تر نمایند. این پارامترها بر پایه منحنی ظرفیت یا پاسخ کلی سازه استوار هستند. از جمله پارامترهایی که می‌توان به آنها اشاره

صنعت ساختمان سازی به منظور محافظت بهتر در برابر نیروهای لرزه‌ای، به سمت سبک‌سازی و ساخت صنعتی سازه‌ها، پیش رفته است. استفاده از روش سنتی ساخت و ساز در کشور ایران به دلیل زلزله خیز بودن روش نادرستی بوده و حاصل آن چیزی جز هدر رفتن منابع ملی نیست. در این بین سازه‌ی سبک فولادی (LSF^۱)، به عنوان یکی از بهترین راهکارهای صنعتی سازی و سبک سازی توسط مهندسین، به کار گرفته شده است. این سیستم نوین ساختمانی در کشورهای پیشرفته با استقبال گسترده مواجه شده و در بسیاری از موارد به علت مزایای گسترده آن، جایگزین سیستم‌های قدیمی ساختمانی شده‌است. سیستم LSF که از اعضای فولادی سرد نورد شده^۲ ساخته می‌شود، در بسیاری از کشورهای پیشرفته رواج یافته است و در احداث ساختمان‌های کوتاه مرتبه و میان مرتبه کاربرد زیادی دارد [1]. یکی از مهمترین مزایای استفاده از اینگونه سازه‌ها سبک بودن ساختمان است. کاهش وزن ساختمان، تاثیر مستقیمی در کم شدن نیروی موثر لرزه‌ای و برش پایه خواهد داشت. علاوه بر این نکته، می‌توان به اجرای سریع سازه، قابلیت بازیافت کامل، نسبت بالای مقاومت به وزن و تاثیر مثبت آن در توسعه‌ی پایدار به عنوان دیگر مزایای این سیستم نوین ساختمانی اشاره کرد [2].

در سال‌های اخیر با استقبال بیشتر از سازه‌های سرد نورد شده و LSF، تحقیقات متنوعی در این زمینه صورت گرفته است. Comeau و همکاران بررسی‌های خود را بر روی سازه‌های سبک فولادی چند طبقه ساخته شده در دو حوزه با شکل‌پذیری محدود و ساختمان‌های معمولی، انجام داده و با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی، شکل‌پذیری سازه‌ها را ارزیابی کرده و ضریب رفتار مناسبی ارائه کرده‌اند [3]. Gad و همکاران، به بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های دو بعدی و سه بعدی سرد نورد شده پرداختند. در این پژوهش سازه تحت آزمایش دینامیکی قرار گرفته و جزئیات متفاوتی چه به لحاظ اتصالات و چه از نظر پوشش و قسمت‌های غیرسازه‌ای ارزیابی شده‌است [4]. Boudreault و همکاران، به تشریح روش ارائه شده در آیین نامه مقررات ملی کانادا پرداخته و دو پارامتر اساسی استفاده شده در روش انرژی معادل الاستیک - پلاستیک^۳ یعنی ضریب شکل‌پذیری و ضریب مقاومت افزون را مورد بررسی قرار داده‌اند. برای ارزیابی عملکرد دیوارهای برشی در این سازه‌ها در برابر نیروهای شبه‌سازی زلزله، سازه‌های دو و سه طبقه بررسی شده است [5]. Tian و همکاران، مقاومت و سختی دیوارهای ساخته شده از فولاد سرد نورد شده را به صورت آزمایشگاهی و تحلیل تئوری مورد مطالعه قرار دادند. در مرحله اول، دیوارها را بدون مهاربند در نظر گرفته و در مراحل بعد مهاربند به صورت تسمه‌های قطری تک و دوپل و همچنین صفحات سیمانی فرض شده‌است [6]. همچنین، معیارهایی برای ضریب رفتار توسط Rogers و Al-Kharat پیشنهاد شده است که طبق آن برای دیوارهای سبک، متوسط و سنگین به ترتیب برابر با 3.65، 2.11 و 1.72 است [7]. در آیین‌نامه موجود در ایران نیز معیاری برای ضریب رفتار اشاره شده است که طبق آن، برای مهاربند با تسمه قطری عدد 4، برای دیوار برشی

¹ Light Steel Frame

² Cold Formed Steel (CFS)

³ Equivalent Energy Elastic-Plastic (EEEP)

یوانگ پیشنهاد کرده است که در روش تنش نهایی برای طراحی، ضریب رفتار از رابطه (4) محاسبه گردد [11].

$$R = R_{\mu} \times \Omega \quad (4)$$

۳- مشخصات هندسی سازه مورد مطالعه

در این تحقیق، مدل‌های متنوعی از مصالح سرد نورد شده به صورت سه بعدی در نرم افزار SAP2000 مدل‌سازی شده است. در مرحله نخست مدلی که کاملاً از مصالح سرد نورد شده ساخته شده مورد ارزیابی قرار گرفته است و در مراحل بعدی، سازه LSF با اتاق پله فولادی ترکیب شده و عملکرد دوگانه این سیستم ارزیابی شده است. سازه‌های مدل شده در چهار نوع دو طبقه تا پنج طبقه بوده و در پلان یکسان می‌باشد. به منظور مقایسه و بررسی هرچه بهتر نتایج عددی، عملکرد سازه‌هایی با ده سختی متفاوت در هر نوع طبقاتی بررسی شده است. این امر با تغییر دادن اعضای فولادی اتاق پله میسر شده و سازه‌ها عملکرد متفاوتی از خود نشان داده‌اند. اتاق پله به صورت اسکلت فلزی با عملکرد قاب خمشی است. در جدول 1 سازه‌های مورد مطالعه در هر نوع معرفی شده‌است. برای مشخص شدن نحوه عملکرد، ساختمان‌ها تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی بررسی شده‌اند. این امر با کمک گرفتن از نرم‌افزار SAP2000 صورت گرفته و در نهایت منحنی ظرفیت کلی سازه به دست آمده است. نوع اتصال المان‌های اتاق پله به صورت قاب خمشی است و همه اعضای تیر و ستون‌ها در هر یک از مدل‌های مورد بررسی مقاطع یکسانی دارند. در شکل 3 پلان و در شکل 4 نمای جانبی مدل مورد مطالعه مشاهده می‌گردد. ارتفاع هر طبقه 300 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

به منظور اطمینان از توانایی تحمل نیروهای ثقلی و جانبی، ابتدا بارهای ثقلی و جانبی طبق آیین‌نامه به مدل اعمال شده و طراحی اولیه صورت گرفته است و در مرحله بعد به تحلیل بار افزون اقدام شده است. در این پژوهش وزن تقریبی دیوار خارجی 50 کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است. همچنین دیوار داخلی با دیتیل گچ برگ فرض شده و حدود 31 کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد و از آنجایی که وزن آن کمتر از 40 کیلوگرم بر متر مربع است، می‌توان به جای بار تیغه‌ها، از بار معادل گسترده یکنواخت 50 کیلوگرم بر متر مربع استفاده کرد.

برای بار سقف نیز بار مرده‌ی معادل با 330 کیلوگرم بر متر مربع لحاظ شده است.

طبق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان بار زنده برای اتاق‌ها 200 کیلوگرم بر متر مربع بوده و برای بام‌ها نیز 150 کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده‌است [13,14].

کرد، ضریب رفتار، ضریب شکل‌پذیری و دیگر پارامترهای موثر بر شکل‌پذیری سیستم سازه‌ای است که روش محاسبه آنها به شرح زیر خواهد بود:

ضریب شکل‌پذیری: از جمله اصلی‌ترین عوامل تاثیرگذار در ضریب رفتار، است. در واقع قابلیت سازه در تحمل تغییرشکل‌های الاستیک و پلاستیک بدون اینکه سازه دچار فرو ریزش شود، ضریب شکل‌پذیری سازه است. با ساده‌سازی منحنی ظرفیت سازه به نمودار دو خطی (شکل 2)، طبق رابطه (1) ضریب شکل‌پذیری از تقسیم حداکثر تغییر مکان جانبی Δ_{max} به تغییر مکان جانبی نسبی تسلیم Δ_y محاسبه می‌گردد [11].

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (1)$$

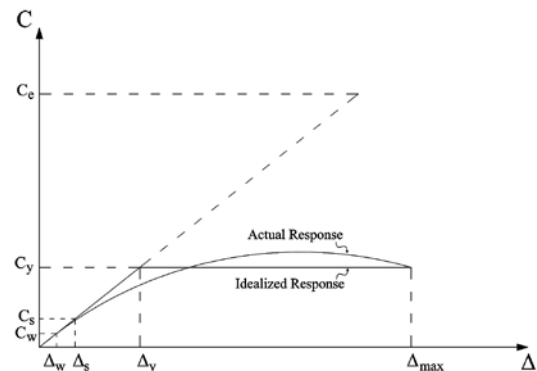


Fig. 2 General Structure Response

شکل ۲ رفتار کلی سازه [12]

سازه‌ها بر اثر وجود شکل‌پذیری، مقدار قابل توجهی از انرژی زلزله را مستهلک می‌کنند. میزان استهلاک انرژی، متناسب با ضریب شکل‌پذیری سازه است. برای تاثیر این پارامتر ضریبی به نام ضریب کاهش شکل‌پذیری (R_{μ}) معرفی شده است [12]. به خاطر این ظرفیت استهلاک انرژی، نیروی طراحی ارتجاعی را می‌توان به وسیله‌ی ضریب کاهش شکل‌پذیری (R_{μ}) به تراز مقاومت تسلیم کاهش داد. در این پژوهش این ضریب با استفاده از روش پیشنهادی نیومارک و حال محاسبه گردیده است [12]. نیومارک و حال پیشنهاد دادند که ضریب کاهش شکل‌پذیری از رابطه (2) به دست آید.

$$\begin{aligned} R_{\mu} &= 1 & T &\leq 0.03 \text{ sec} \\ R_{\mu} &= \sqrt{2\mu - 1} & 0.12 &\leq T \leq 0.5 \text{ sec} \\ R_{\mu} &= \mu & T &\geq 1.0 \text{ sec} \end{aligned} \quad (2)$$

که در رابطه (2)، T زمان تناوب سازه است.

سازه‌ها معمولاً مقاومت اضافه‌ای بین دو سطح تسلیم کلی سازه و سطح اولین تسلیم تحمل می‌کنند. به منظور تاثیر این مقدار ظرفیت اضافی، پارامتری با عنوان ضریب مقاومت افزون معرفی می‌گردد. طبق تعریف، این مقدار برابر است با نسبت حد تسلیم کلی سازه به هنگام تشکیل مکانیزم خرابی (C_y) به نیروی متناظر با تشکیل اولین مفصل (C_s) خمیری. این پارامتر از رابطه (3) محاسبه می‌شود.

$$\Omega = \frac{C_y}{C_s} \quad (3)$$

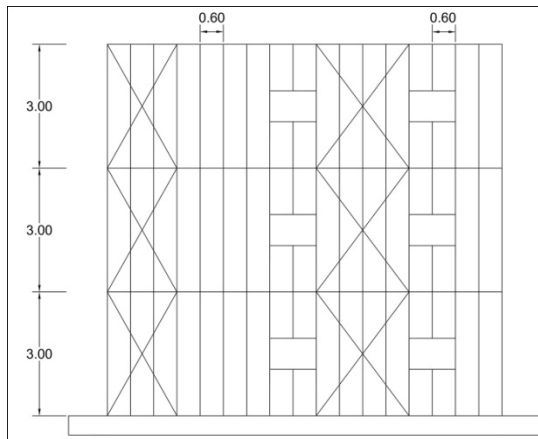


Fig. 4 Section of structure in 3-story building

شکل ۴ مقطع سازه سه طبقه

۴- تحلیل عددی

یکی از معیارهای شناخت سازه‌ها، منحنی ظرفیت آنها یا منحنی پاسخ سازه‌ها می‌باشد. برای استخراج منحنی ظرفیت کلی سازه و پارامترهای موثر لرزه‌ای، سازه‌های مطالعه شده در نرم افزار SAP2000 تحت بارگذاری جانبی قرار گرفته است. شبیه‌سازی توزیع بار جانبی بایستی به گونه‌ای باشد که تا جای ممکن به زلزله واقعی، شبیه باشد و اثر مشابهی به سازه اعمال شود [15]. با الگوی بارگذاری فرض شده برای تحلیل استاتیکی غیرخطی در این تحقیق، الگوی بار مثلثی و بار یکنواخت می‌باشد. مقاطع سرد نورد شده از نوع استاندارد معرفی شده با نام فولاد سازه‌ای رده 230 تیپ (ST230H) با مقاومت تسلیم 230 مگاپاسکال و مقاومت نهایی 310 مگاپاسکال و مقاطع فولاد گرم نورد شده از نوع فولاد ST37 با مقاومت تسلیم 240 مگاپاسکال و مقاومت نهایی 370 مگاپاسکال می‌باشد [8].

مفاصل پلاستیک معرفی شده به المان‌ها، مفاصل فایبر می‌باشد. به دلیل اینکه مفاصل فایبر برای اندرکنش به صورت اتوماتیک، تغییر در منحنی لنگر-دوران و کرنش محوری پلاستیک را محاسبه می‌کند، دقیق‌تر است و لذا این نوع مفصل مورد استفاده قرار گرفته است [16]. تعداد فایبرها بسته به دقت و اهمیت تحلیل انتخاب می‌گردد که در این پژوهش، تعداد تقسیم‌بندی فایبرها در مقطع عرضی هر المان، به صورت 5×5 بوده است. شکل ۵، تقسیم فایبر در یکی از مقاطع را نشان می‌دهد.

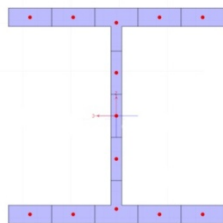


Fig. 5 Fibers in sections

شکل ۵ فایبرها در یکی از مقاطع

۵- بحث و بررسی نتایج

برای مشخص شدن عملکرد غیرخطی سازه‌های متشکل از سیستم دوگانه قاب سبک فولادی (LSF) و قاب خمشی فولادی که به صورت اتاق پله استفاده شده است، منحنی ظرفیت یا پاسخ کلی سازه‌های مذکور حاصل

جدول ۱ نام و مشخصات مدل‌ها (دوطبقه)

Table 1 Name of models (two-story)

مشخصات	نام سازه
LSF+IPE14**	S2MF1*
LSF+IPE16	S2MF2
LSF+IPE18	S2MF3
LSF+IPE20	S2MF4
LSF+IPB12	S2MF5
LSF+IPB14	S2MF6
LSF+IPB16	S2MF7
LSF+IPB18	S2MF8
LSF+IPB22	S2MF9
LSF+IPB24	S2MF10

*منظور از نام اختصاری S2MF1، سازه دو طبقه در سختی نوع اول است.

شایان ذکر است که مدل‌ها در انواع دو تا پنج طبقه مورد مطالعه قرار گرفته است.

** سازه ترکیبی LSF با اتاق پله فولادی با مقطع IPE14 به صورت اختصار LSF+IPE14 معرفی شده است.

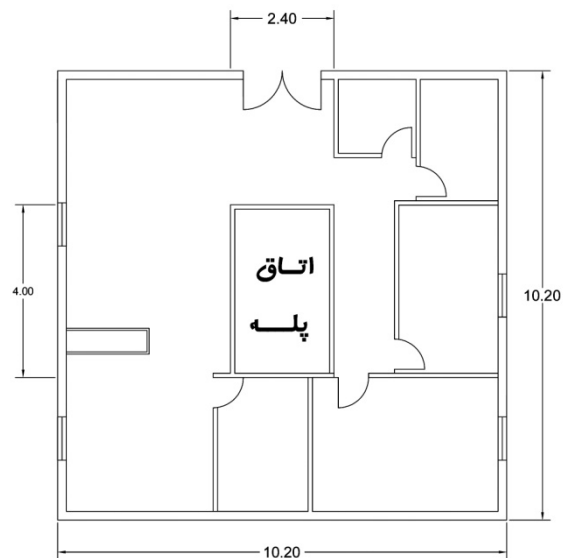


Fig. 3 Architectural plan of models

شکل ۳ پلان سازه

S2MF6 رخ داده است. نحوه محاسبه ضریب رفتار این سازه به صورت زیر است. طبق شکل 7، ضرایب شکل پذیری زیر به دست آمده است:

ضریب شکل پذیری (μ): 5.40، ضریب کاهش شکل پذیری (R_{μ}): 3.13، ضریب مقاومت افزون (Ω): 1.52 که طبق روابط معرفی شده در بخش دو، ضریب رفتاری برابر 4.72 حاصل می شود.

در این سازه نسبت ضریب رفتار معرفی شده به ضریب رفتار آیین نامه ای 1.18 و همچنین نسبت مقاومت نسبت به سازه LSF نیز 2.48 است که در هر دو مورد عملکرد بهبود یافته است. در این سازه شرایط ترکیب به گونه ای است که نسبت سختی بخش فولادی یعنی اتاق پله حدود 5 درصد از بخش LSF بیشتر است.

لذا سازه ای با شرایط مشابه با نمونه S2MF6 می تواند به لحاظ شکل پذیری و مقاومت پاسخگوی نیاز یک سازه ترکیبی باشد.

جدول ۲ نسبت نیرو و ضریب رفتار در سازه های دو طبقه

Table 2 Force and behavior factor ratio in two-story structures

نام سازه	F_{Mod}/F_{LSF}	R_{Mod}	R_{Mod}/R
S2MF1	1.59	4.05	1.013
S2MF2	1.76	4.17	1.043
S2MF3	1.46	4.07	1.018
S2MF4	1.63	3.54	0.885
S2MF5	1.51	4.50	1.125
S2MF6	2.48	4.72	1.180
S2MF7	2.25	4.53	1.133
S2MF8	2.46	4.14	1.035
S2MF9	2.66	3.46	0.865
S2MF10	4.75	3.91	0.978

۵-۲- سازه سه طبقه

برای اینکه میزان تاثیر و نحوه عملکرد سازه های ترکیبی بهتر مشخص گردد، منحنی ظرفیت مدل های مختلفی از سازه های سه طبقه در شکل 8 مشاهده می شود. در این شکل مشخص است که مدل هایی که در آن از اتاق پله سنگین تری استفاده شده است، دارای ظرفیت جانبی به مراتب بیشتری است که این مقدار حتی تا چهار برابر نسبت به سازه LSF نیز می رسد. البته باید توجه داشت که سازه مناسب، سازه ای نیست که صرفاً نیروی بیشتری را تحمل کند؛ بلکه سازه بایستی در حوزه شکل پذیری نیز عملکرد قابل قبولی از خود نشان دهد و الزامات مورد نیاز را برآورده سازد. لذا نمی توان به سازه ای که بیشترین تحمل نیرو را دارد، عنوان مناسب ترین سازه را نسبت داد.

تحلیل پوش آور، به دست آمده است. علاوه بر معیار مقاومت و ظرفیت، سازه باید از نظر شکل پذیری نیز عملکرد قابل قبولی داشته باشد که نحوه عملکرد از طریق محاسبه پارامترهای شکل پذیری مشخص می گردد. از جمله مشخصه های لرزه ای هر سازه ضریب شکل پذیری، مقاومت افزون و ضریب رفتار است که با رسم نمودار دو خطی ساده شده، محاسبه می شود [11]. شایان ذکر است که در این تحقیق، پایان منحنی رفتار کلی سازه در تغییر مکان جانبی معادل 3% ارتفاع سازه در نظر گرفته شده است [17]. نتایج حاصل از نمودارها نشان می دهد که استفاده از اتاق پله فولادی به عنوان بخش ترکیبی برای سیستم مهار جانبی، با افزایش سختی سازه ترکیبی موجب بیشتر شدن تحمل سازه در برابر نیروهای جانبی می شود. این نکته می تواند دلیلی موجه برای استفاده از این نوع سیستم ترکیبی در سازه های سرد نورد شده باشد. در ادامه نتایج حاصل در چهار بخش بررسی خواهد شد.

۵-۱- سازه دو طبقه

در پژوهش حاضر، برای مقایسه ی ظرفیت جانبی منحنی پاسخ کلی سازه برای ده مدل با سختی مختلف که عملکرد متفاوتی در حوزه مقاومت و شکل پذیری دارد، در شکل ۶ رسم شده است. در شکل ۶، در مرحله نخست منحنی ظرفیت سازه LSF بدون ترکیب با بخش فولادی رسم شده است. در مراحل بعد با ترکیب بخش فولادی و تغییر دادن سختی آن، منحنی های ظرفیت دیگر سازه های ترکیبی رسم شده و به منظور مقایسه در یک نمودار آورده شده اند. طبق نمودار افزایش سختی بخش اتاق پله منجر به بیشتر شدن سختی کل سازه و در نتیجه افزایش ظرفیت سازه در تحمل نیروی جانبی خواهد بود. در ستون دوم جدول ۲ نسبت تحمل بیشترین بار جانبی هر یک از مدل ها به نسبت این مقدار در سازه LSF آورده شده است. با توجه به مقادیر این ستون، میزان افزایش ظرفیت بار جانبی قابل توجه است. علاوه بر این، به دلیل اینکه هر سازه بایستی به لحاظ شکل پذیری نیز عملکرد مناسبی داشته باشد، از این رو با استفاده از نمودارهای دو خطی به محاسبه پارامترهای شکل پذیری سازه یعنی ضریب شکل پذیری (μ)، ضریب کاهش شکل پذیری (R_{μ})، ضریب مقاومت افزون (Ω) و در نهایت ضریب رفتار (R) پرداخته شده است. نسبت ضریب رفتار هر مدل ضریب رفتار آیین نامه ای است که عدد 4 می باشد. برای نمونه نحوه محاسبه ضریب رفتار مدل S2MF6 که به عنوان مدل پیشنهادی ذکر شده است، در ادامه نشان داده می شود. طبق جدول 2 و مشاهده ضریب رفتار و ظرفیت سازه، افزایش ظرفیت جانبی سازه به معنی شکل پذیری بیشتر سازه نیست و در بعضی از مدل ها، عکس این مطلب به وقوع پیوسته است. لذا سازه ای مناسب است که هم به لحاظ شکل پذیری و هم از نظر مقاومت عملکرد مناسبی داشته باشد که این امر در سازه مدل

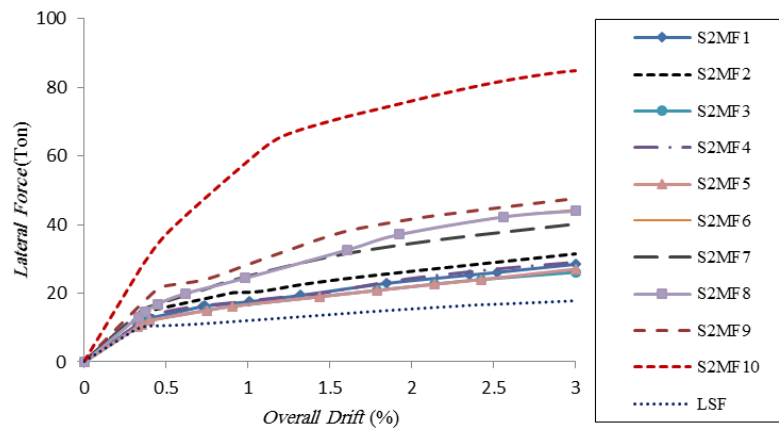


Fig. 6 Capacity curve of two-story models

افزایش ظرفیت سازه کمک قابل توجهی کرده است. جدول 3 نشان می‌دهد که کمک گرفتن از سیستم مهار جانبی قاب خمشی در قاب سبک فولادی تا بیش از چهار برابر نیز به افزایش ظرفیت آن کمک می‌کند. هرچند توصیه نمی‌شود از سیستمی که این تفاوت فاحش را رقم می‌زند استفاده گردد؛ زیرا در این حالت شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد سیستم مورد استفاده در سازه S3MF6 نه تنها از نظر مقاومت، بلکه به لحاظ شکل‌پذیری نیز مناسب است. در این سیستم ظرفیت سازه دو برابر شده و شکل‌پذیری 20 درصد افزایش یافته است. این سیستم به گونه‌ای است که بخش فولادی حدود 10 درصد از بخش سبک فولادی نرم‌تر می‌باشد. لذا می‌توان انتظار داشت استفاده از این قبیل سیستم ترکیبی در سازه‌های سه طبقه به عملکرد مطلوب کل سازه خواهد انجامید.

جدول 3 نسبت نیرو و ضریب رفتار در سازه‌های سه طبقه

Table 3 Force and behavior factor ratio in three-story structures

نام سازه	F_{Mod}/F_{LSF}	R_{Mod}	R_{Mod}/R
S3MF1	1.46	4.57	1.188
S3MF2	1.70	4.88	1.220
S3MF3	1.62	4.82	1.205
S3MF4	2.17	4.54	1.135
S3MF5	1.62	4.24	1.060
S3MF6	2.00	4.78	1.200
S3MF7	2.06	4.36	1.090
S3MF8	2.77	3.59	0.898
S3MF9	4.07	3.36	0.840
S3MF10	4.93	2.28	0.560

شکل 6 منحنی ظرفیت سازه‌های دو طبقه مدل شده

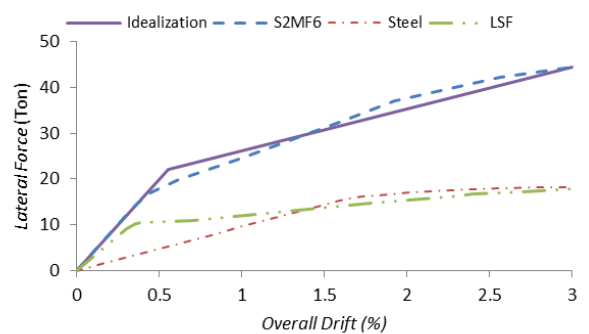


Fig. 7 Capacity Curve and Idealized Diagram of S2MF6

شکل 7 منحنی ظرفیت و نمودار دو خطی سازه S2MF6

طبق شکل 8، سازه با نام S3MF10 نیروی بسیار زیادی را تحمل کرده است. این مقدار نیروی زیاد به علت استفاده از پروفیل‌های سنگین موجود در اتاق پله با اسکلت فولادی است. علاوه بر این سختی نسبی سازه مذکور نسبت به سازه قاب سبک فولادی بسیار بیشتر است. این امر می‌تواند از نظر اجرایی مشکلاتی را ایجاد کند.

یکی از این مشکلات ضربه زدن بخش سخت سازه به بخش نرم است که موجب خسارت به بخش نرم خواهد شد. لذا نباید سختی دو بخش ترکیبی اختلاف زیادی نسبت به هم داشته باشند.

در جدول 3 پارامترهای عددی حاصل از تحلیل نتایج و نمودارهای ظرفیت سازه‌های سه طبقه مشاهده می‌شود. در این نوع سازه نیز به کارگیری سیستم ترکیبی، در بسیاری از موارد منجر به افزایش شکل‌پذیری شده است. همچنین در تمام موارد استفاده شده، استفاده از قاب خمشی فولادی به

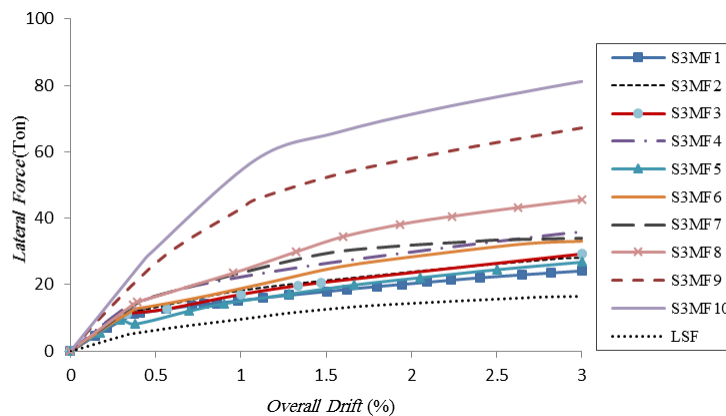


Fig. 8 Capacity curve of three-story Models

شکل ۸ منحنی ظرفیت سازه‌های سه طبقه مدل شده

مناسب توصیه می‌شود. در این مدل نیز مانند مدل چهار طبقه نسبت سختی بخش فولادی حدود 10% کمتر از بخش LSF است.

جدول ۴ نسبت نیرو و ضریب رفتار در سازه‌های چهار طبقه

Table 4 Force and behavior factor ratio in four-story structures

نام سازه	F_{Mod}/F_{LSF}	R_{Mod}	R_{Mod}/R
S3MF1	1.46	4.57	1.188
S3MF2	1.70	4.88	1.220
S3MF3	1.62	4.82	1.205
S3MF4	2.17	4.54	1.135
S3MF5	1.62	4.24	1.060
S3MF6	2.00	4.78	1.200
S3MF7	2.06	4.36	1.090
S3MF8	2.77	3.59	0.898
S3MF9	4.07	3.36	0.840
S3MF10	4.93	2.28	0.560

۵-۳- سازه چهار طبقه

سازه‌های آنالیز شده چهار طبقه بیش از پیش به ناحیه غیرخطی وارد شده‌اند و عملکرد غیرخطی بهتری داشته‌اند. در سازه‌های چهار طبقه با افزایش ارتفاع مقدار خمیری شدن المان بیشتر شده و بخش بیشتری از ناحیه به ناحیه غیرخطی اختصاص پیدا کرده است. شکل ۹ نشان‌دهنده عملکرد غیرخطی سازه‌ها می‌باشد.

با توجه به نتایج این نمودار برخی سازه‌ها، ظرفیت بسیار بیشتری نسبت به سازه LSF دارند. سازه S4MF9 و S4MF10 از این قبیل هستند. در سازه S4MF9 و S4MF10 به علت افزایش قابل ملاحظه ظرفیت و سختی قاب خمشی به کار رفته، احتمال آسیب رسیدن به بخش ضعیف‌تر یعنی LSF، وجود دارد. بنابراین این مدل نمی‌تواند مدل مناسبی جهت استفاده در سیستم ترکیبی باشد. در جدول ۴ مقادیر محاسبه شده وجود دارد.

در جدول ۴ سازه S4MF6، به دلیل اینکه هم از نظر شکل پذیری و هم به لحاظ مقاومت تاثیر مثبتی در سازه ترکیبی داشته است، به عنوان گزینه

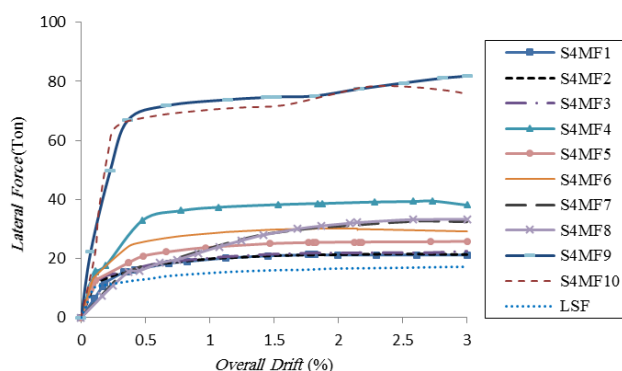


Fig. 9 Capacity curve of four-story Models

شکل ۹ منحنی ظرفیت سازه‌های چهار طبقه مدل شده

۵-۴- سازه پنج طبقه

ظرفیت جانبی تامین کرده‌اند. اما با توجه به جدول 5، سازه S5MF6 ضریب رفتار بیشتری دارد. لذا این سازه که از نظر سختی نیز مانند مدل‌های پیشنهادی سه و چهار طبقه است، به عنوان مدل بهینه توصیه می‌گردد.

۶- نتیجه‌گیری

با بررسی چهل مدل به وسیله تحلیل پوش‌آور، به منظور استفاده‌ی سیستم ترکیبی قاب سبک فولادی (LSF) و قاب خمشی فولادی نتایج زیر حاصل شده است:

1- ترکیب اسکلت فولادی با قاب خمشی در سازه قاب فولادی سبک می‌تواند منجر به افزایش ظرفیت جانبی کل سازه‌ی ترکیبی شود و هرچه اعضای قاب خمشی فولادی سنگین‌تر باشد، میزان افزایش ظرفیت جانبی نیز بیشتر می‌گردد. علاوه بر این، استفاده از قاب خمشی به عنوان سیستم جانبی ترکیبی، شکل‌پذیری کلی سازه را نیز بهبود می‌بخشد.

2- در شرایط بهینه پیشنهاد شده در تیپ دو طبقه، ضریب رفتار حدود 18 درصد بیشتر از ضریب رفتار سازه LSF با مهاربند قطری خواهد شد و همچنین سازه توانایی تحمل بار جانبی با حدود دو برابر بار حالت قبل از ترکیب را خواهد داشت.

3- با افزایش ارتفاع، سازه ترکیبی عملکرد غیرخطی بهتری از خود نشان می‌دهد. این عملکرد در سازه‌های چهار و پنج طبقه مشهود است.

4- در سازه‌های سه، چهار و پنج طبقه، زمانی سازه توصیه می‌شود که بخش فولادی حدود 10% سختی کمتری نسبت به بخش سبک داشته باشد تا سازه عملکرد مناسبی از خود نشان دهد.

5- در سازه‌ی سه طبقه پیشنهاد شده، ضریب رفتار حدود 20% افزایش می‌یابد و ظرفیت سازه نیز دو برابر می‌شود. برای سازه چهار طبقه این مقادیر به ترتیب 64% و دو برابر و برای سازه پنج طبقه 33% و دو برابر خواهد بود.

با توجه به آیین‌نامه سازه‌های سرد نورد شده ایران، ارتفاع سازه به 15 متر محدود شده است. لذا سازه پنج طبقه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. سازه‌های ترکیبی با ده نسبت سختی متفاوت مطالعه شده و تحت آنالیز پوش‌آور، منحنی پاسخ کلی آن به‌دست آمده است. شکل 10 نشان‌دهنده منحنی ظرفیت سازه‌ها می‌باشد. بررسی نمودارها باعث استخراج دو نتیجه کلی می‌گردد.

به عنوان نتیجه اول می‌توان بیان کرد که طبق الگوی به دست آمده از نمودارهای تیپ‌های پیشین، با سنگین‌تر شدن المان‌های اسکلت اتاق پله فلزی، ظرفیت سازه‌ی ترکیبی افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد و علاوه بر این در حوزه‌ی شکل‌پذیری نیز عملکرد سازه را بهبود می‌بخشد.

نتیجه دوم اینکه با افزایش تعداد طبقات و ارتفاع کلی، اعضا به ناحیه‌ی غیرخطی وارد شده و بیشتر از گذشته به مرحله‌ی خمیری می‌رسند.

جدول 5 نسبت نیرو و ضریب رفتار در سازه‌های پنج طبقه

Table 5. Force and behavior factor ratio in five-story structures

نام سازه	F_{Mod}/F_{LSF}	R_{Mod}	R_{Mod}/R
S5MF1	1.28	7.94	1.985
S5MF2	1.18	8.34	2.085
S5MF3	1.51	6.68	1.670
S5MF4	1.71	4.23	1.058
S5MF5	1.79	5.14	1.285
S5MF6	1.90	5.32	1.330
S5MF7	1.91	4.99	1.248
S5MF8	2.60	3.84	0.960
S5MF9	3.70	4.61	1.153
S5MF10	4.37	5.32	1.330

با توجه به نمودار شکل 10، سازه S5MF6 و S5MF7 از نظر ظرفیت، شرایط مشابهی دارند و نسبت به دیگر سازه‌ها شرایط بهتری را از نظر افزایش

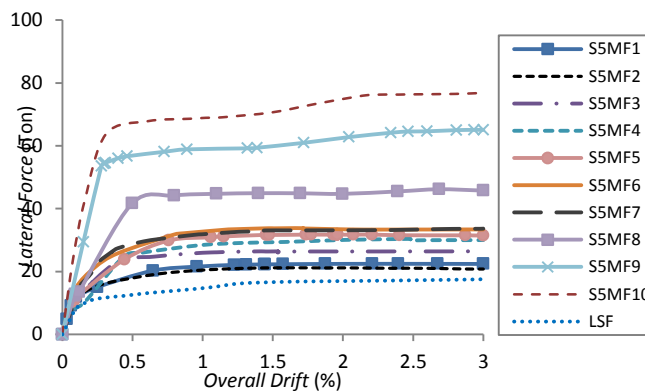


Fig. 10 Capacity curve of five-story Models

شکل 10 منحنی ظرفیت سازه‌های پنج طبقه مدل شده

۷- مراجع

- [9] FEMA-450. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures- Part 1 Provisions. USA: *Building Seismic Safety Council*, 2003.
- [10] Ti 809-07. Technical instructions: *Design of cold-formed load bearing steel systems and masonry veneer/steel stud walls*. Washington (DC, USA): US Army Corps of Engineers. Engineering and Construction Division. Directorate of Military Program, 2006.
- [11] Uang CM., Establishing R (or R_w) and Cd factor for building seismic provision, *Journal of Structure Engineering*, 117(1), pp. 19-28, 1991.
- [12] Newmark, N. M, Hall, W. J, Earthquake spectra and design., *Earthquake Engineering Research Institute*, Berkeley, CA, 1982.
- [13] Tavoosi-Tafreshi Sh, Tabrizi O.R, *Light Weight Steel Frame Structural System*, Tehran: Jahan Jam-e- jam, 2010. (in Persian فارسی)
- [14] Ministry of Housing and Urban Development. *Iranian National Building Code: part 6 (Loads)*. Third Edition, 2006. (in Persian فارسی)
- [15] Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings No. 360, *Management and Planning Organization*. Tehran, 2007. (in Persian فارسی)
- [16] Taghinejad R, *Seismic design and rehabilitation of structures based on performance level*. Tehran: Nashr-e- Ketab Daneshgahi, pp. 93-94, 2008. (in Persian فارسی)
- [17] Tasnimi A, Masoumi A, Calculate of Response Modification Factor of Concrete Frame, *Building and Housing Research Center*, Tehran, pp. 75-76, 2006. (in Persian فارسی)
- [1] Vosughifar h, Tork Sh, Taremi m, Investigating the application of LSF system in effective design of structures in comparison with conventional systems, *International Conference on Earthquake & lightweight construction*, Kerman, Iran, April, 2010. (in Persian فارسی)
- [2] Mirghaderi R, Bagheri-Sabbagh A, *Design of Cold Formed Steel*. Tehran: Elm o Adab, 2008 (in Persian فارسی)
- [3] Comeau,G; Velchev,K; Rogers, C.A, Development of seismic force modification factors for cold-formed steel strap braced wall. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol 37, pp. 236-249, 2010.
- [4] Gad, E.F., Duffield, C.F., Hutchinson, D.L., Mansell, D.S., Strak, G, Lateral performance of cold-formed steel-framed domestic structures. *Journal of engineering structures*, Vol 21, pp. 83-95, 1999.
- [5] Boudreault, F.A., Blais, C., Rogers, C.A, Seismic force modification factor for light-gauge steel frame/wood structural panel shear walls. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol 34, pp. 56-65, 2007.
- [6] Tian, Y.S., Wang, J, Lu, T.J., Racking strength and stiffness of cold-formed steel wall frames., *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 60, pp. 1069-1093, 2004.
- [7] Al-Kharat, M, Rogers, C.A, Inelastic performance of cold-formed steel strap braced walls., *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 63, pp. 460-474, 2007.
- [8] Iranian Building Codes and Standards, Cold formed Light Steel Structures Design and Construction Code, *Building and Housing Research Center*, Tehran, 2011 (in Persian فارسی)