

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سامانه‌های باربر جانبی در قاب‌های بتن آرمه بلندمرتبه تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی

سجاد محمدیان آبی^{۱*}، فرزاد رئیس زاده^۲، صمد سهرابی^۳

۱- دکتری تخصصی گروه سازه و زلزله، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران ۲- دکتری تخصصی، گروه مهندسی عمران، واحد بیضاء، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضاء، ایران ۳- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملایر، دانشگاه آزاد اسلامی، ملایر، ایران
(دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳، انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲)

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از سامانه‌های مقاوم باربر جانبی در ساختمان‌های بلندمرتبه به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. هدف این پژوهش، مقایسه عملکرد این سامانه‌ها به‌منظور کاهش تغییر مکان، افزایش جذب انرژی و کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای است. بدین منظور، ۱۲ قاب بتن‌آرمه ۱۰ طبقه با ارتفاع طبقات سه متر، به‌صورت منظم و دوبعدی در نرم‌افزار ETABS مدل‌سازی و تحلیل استاتیکی غیرخطی شدند. سامانه‌های موردبررسی شامل قاب خمشی (ویژه و متوسط)، سیستم دوگانه (ویژه و متوسط) و قاب ساختمانی ساده با دیوار برشی (ویژه و متوسط) بودند. قاب‌ها سه و پنج دهانه با طول پنج‌متر در نظر گرفته شدند. مقایسه بر اساس منحنی پوش‌اور و ظرفیت جذب انرژی انجام شد. نتایج نشان داد قاب خمشی ویژه با بیشترین شکل‌پذیری غیرالاستیک، بالاترین ظرفیت استهلاک انرژی (معیار ۱۰۰٪) را داراست؛ به‌طوری‌که حدود سه برابر سیستم دوگانه متوسط و ۲/۵ برابر قاب ساده با دیوار برشی متوسط ظرفیت دارد. این ویژگی، آن را ایمن‌ترین گزینه در جلوگیری از فروریزش نهایی می‌سازد. در مقابل، سیستم دوگانه ویژه با حفظ ۷۶/۶۷ درصد از ظرفیت جذب انرژی قاب خمشی ویژه و تأمین سختی کافی برای کنترل دررفت، توازن بهینه میان سختی و شکل‌پذیری ارائه داده و به‌عنوان کارآمدترین سیستم در مناطق با لرزه‌خیزی بالا پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه‌ها: قاب بتنی، بار جانبی، آنالیز استاتیکی غیرخطی، ساختمان بلندمرتبه، تغییر مکان نسبی.

Seismic Performance Evaluation of Lateral Load-Resisting Systems in High-Rise Reinforced Concrete Frames under Nonlinear Static Analysis

S. Mohammadian Abi^{1*}, F. Raeiszadeh², S. Sohrabi

SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received: ۲۰۲۴/۰۹/۱۲, Revised: ۲۰۲۴/۱۰/۲۰, Accepted: ۲۰۲۴/۱۱/۰۳, Published: ۲۰۲۴/۱۲/۰۲)

Abstract

In recent years, the construction of high-rise buildings using various lateral load-resisting systems has increased significantly. This study aims to evaluate and compare the seismic performance of reinforced concrete lateral load-resisting systems in tall buildings, focusing on minimizing lateral displacement, maximizing energy dissipation, and reducing seismic vulnerability. For this purpose, twelve ۱۰-story reinforced concrete frames with a uniform story height of ۳ meters were designed and analyzed using nonlinear static (pushover) analysis in ETABS. The considered systems include moment-resisting frames (special and intermediate), dual systems (special and intermediate), and ordinary moment frames combined with shear walls (special and intermediate). Each model consists of three- and five-bay frames with ۵-meter spans. The comparison was based on capacity curves and energy dissipation capability. Results indicate that the special moment-resisting frame exhibits the highest inelastic ductility and energy dissipation capacity (taken as ۱۰۰٪), approximately three times greater than the intermediate dual system and ۲.۵ times that of the ordinary frame with intermediate shear walls. This superior performance makes the special moment-resisting frame the safest option in preventing global collapse. Meanwhile, the special dual system provides an optimal balance between stiffness and ductility, maintaining ۷۶.۶۷٪ of the energy dissipation capacity of the special moment frame while effectively controlling story drift. Therefore, it is recommended as the most practical and efficient system for high-seismicity regions.

Keywords: Concrete Frame, Lateral Load, Nonlinear Static Analysis, Tall Building, Drift.

*Corresponding Author E-mail: Sajjad.mohammadian@srbiau.ac.ir

۱. مقدمه

با توجه به اینکه اکثر ساختمان های بتنی ساخته شده در کشور کوتاه مرتبه و میان مرتبه هستند، در سال های اخیر طراحی، اجرا و بهره برداری از ساختمان های بتن آرمه در ارتفاع های مختلف و با استفاده از سامانه های مقاوم برابر جانبی گوناگون، روند چشمگیری داشته است. لذا بررسی این نکته که آیا از همان سامانه های برابر جانبی که در ساختمان های کوتاه مرتبه و میان مرتبه استفاده شده، می توان در ساختمان های بلندمرتبه نیز بهره برد، لازم و ضروری است. با مطالعه عملکرد سامانه های ساختمان های بلند در برابر زلزله، درمی یابیم که رفتار و عملکرد آن ها متفاوت است. انتخاب بهترین سامانه ها در انواع ساختمان ها علاوه بر دستیابی به کاهش تغییر مکان یا جابجایی سازه ها، جذب انرژی بالا، کاهش آسیب پذیری ساختمان ها در برابر زلزله و افزایش مدت زمان بهره برداری از آن ها و در نهایت عملکرد قاب ها، حائز اهمیت است. از دیدگاه یک مهندس سازه، بهترین فرم سازه ای، انتخابی است که در آن اعضای اصلی، ترکیب های مختلف بارهای قائم و افقی را به صورت بهینه تحمل نماید [۱]. توجه فزاینده به کمبود مواد خام و نقصان شدید منابع انرژی موجب تمایل به سازه هایی سبک، کارا و ارزان قیمت شده است. کدخدا و همکاران [۱] در پژوهشی به حل مسئله بهینه سازی در انتخاب سامانه های سازه ای برای طراحی ساختمان های مسکونی بلندمرتبه پرداختند و سه مدل ساختمان مرتفع (۱۰، ۱۵ و ۲۵ طبقه) را با استفاده از الگوریتم ژنتیکی طراحی کردند تا بهترین سیستم سازه ای که هم ابعاد اقتصادی را تضمین کند و هم در میزان بتن و فولاد و هزینه صرفه جویی شود، انتخاب گردد. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که در ساختمان های ۱۰ طبقه، سیستم دوگانه بالاترین صرفه جویی را نسبت به سیستم قاب خمشی و دیوار برشی داشته و در ساختمان های ۱۵ و ۲۵ طبقه، بهترین سامانه ها به ترتیب اولویت شامل ۱- سیستم دوگانه، ۲- دیوار برشی و ۳- قاب خمشی هست. کاظمی و همکاران [۲] در مقاله ای به بررسی رفتار لرزه ای سازه های بلندمرتبه و روش های حل مشکل تأخیر برشی در این سازه ها و بررسی رفتار سیستم سازه قاب محیطی پرداختند و نتایج نشان داد که با افزایش تعداد طبقات، مشکل تأخیر برشی کاهش می یابد و از ۳۰ طبقه به بعد مقدار نسبت نیروی محوری ستون گوشه و میانی ثابت است. صفاری و همکاران [۳] نیز تحلیل تقریبی سازه های بلند مقاوم شده با قاب محیطی در برابر نیروهای جانبی انجام دادند و با در نظر گرفتن توابع تغییر شکل مجزا برای قاب بال و قاب جان و استفاده از اصل حداقل انرژی، توابعی برای تغییر مکان جانبی و عمودی ارائه کردند. آرامش و همکاران [۴] رفتار لرزه ای انواع سامانه های مقاوم سازه ای در ساختمان های بلندمرتبه ۲۰ طبقه با نسبت ابعادی ۲/۵ را در شش حالت موردبررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که سیستم لوله ای و شبکه قطری برای تأمین مقاومت

جانبی و سختی لازم در ساختمان های بلند مؤثرتر هستند و سهم برش جذب شده توسط سیستم لوله پیرامونی چشمگیرتر است. خیرالدین و همکاران [۵] در مقاله ای به مقایسه سامانه های لوله ای در ساختمان های ۴۰، ۶۰ و ۱۲۰ طبقه پرداختند و دریافتند که لنگی برش و تغییر مکان نسبی در سیستم لوله ای کمتر است، اما عملکرد لوله داخلی در سامانه های مختلف با افزایش ارتفاع متفاوت است. صدر نفیسی [۶] به بررسی نقش سامانه های مهاربندی EBF^۱ و KBF^۲ در مقاوم سازی سازه های فولادی پرداخت و توصیه هایی برای طراحی سیستم KBF در مناطق زلزله خیز ارائه کرد. رازانی و همکاران [۷] رفتار قاب های فولادی خمشی، دوگانه و خورجینی با طرح بهینه شده در محیط های خطی و غیرخطی تحت اثر زلزله را بررسی کردند و نتایج نشان داد که بهینه سازی در محیط غیرخطی باعث کاهش وزن قاب ها و افزایش مقاومت در برابر زلزله می شود. حسینی هاشمی و همکاران [۸] عملکرد قاب خمشی ویژه و معمولی را تحت آنالیز استاتیکی غیرخطی بررسی کردند و دریافتند که هر دو سیستم در ساختمان های کوتاه مرتبه رفتار متفاوتی دارند، اما تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده تقریباً برابر و شکل پذیری آن ها مشابه است. احمدی روحانی [۹] بهینه یابی موقعیت دیوارهای برشی در سازه های بلند را بررسی کرد و نشان داد که جایگذاری مناسب دیوار برشی می تواند تغییر مکان سازه و جذب نیروی جانبی را به طور قابل توجهی کاهش دهد.

میر قادری و همکاران [۱۰] به بررسی رفتار قاب های خمشی ویژه به صورت مختلط (RCS)^۳، فولادی و بتن آرمه در سه رده ارتفاعی (۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه) پرداختند که مطابق با آیین نامه ۲۲-ASCEY بارگذاری لرزه ای شدند و طراحی آن ها بر اساس آیین نامه های ۲۲-۳۶۰-AISC و ۱۹-۱۸-CI انجام گرفت. نتایج نشان داد که در ساختمان های ۵ طبقه، قاب فولادی نسبت حاشیه فروریزش اصلاح شده بیشتری نسبت به RCS و قاب بتن آرمه دارد. لاری و همکاران [۱۱] روش مبتنی بر سطح عملکرد برای بهسازی لرزه ای قاب های بتنی خمشی بلندمرتبه مجهز به دیوار برشی فولادی (SSW)^۴ ارائه کردند و دریافتند که این روش می تواند مقاومت و سختی جانبی را افزایش داده و بیشینه دررفت میان طبقه ای را بیش از ۶۰٪ کاهش دهد. مام عزیزی و همکاران [۱۲] استفاده از ستون های کامپوزیت CFST^۵ در سازه های بلندمرتبه را بررسی کردند و شاخصی برای شناسایی نواحی جداسازی بتن و کاهش سختی ستون ارائه دادند. نوری و همکاران [۱۳] رفتار قاب خمشی فلزی با اتصال گیردار کاهش یافته را در برابر خرابی پیش رونده تحلیل کردند و دریافتند که این نوع اتصال مقاومت بالاتری نسبت به سایر اتصالات

^۱ Eccentrically Braced Frame^۲ K-Braced Frame^۳ Reinforced Concrete-Steel Composite^۴ Steel Shear Wall^۵ Concrete-Filled Steel Tube

در این پژوهش، با استفاده از آنالیز استاتیکی غیرخطی، عملکرد سامانه‌های مقاوم باربر جانبی قاب‌های بتن‌آرمه در ساختمان‌های بلندمرتبه بررسی و مقایسه شد تا مشخص گردد انتخاب نوع سامانه‌های جانبی چه تأثیری بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلندمرتبه دارد و درنهایت بهترین سیستم از نظر رفتار لرزه‌ای شناسایی گردد. از منظر روش‌های نوین ارزیابی و پتانسیل، استفاده آتی از نتایج این تحقیق در به‌کارگیری متدهای داده محور می‌تواند برای آشکارسازی دقیق آسیب و تعیین میزان جدایش اجزای آسیب‌دیده در اعضای حیاتی سازه مورد استفاده قرار گیرد. مطالعه کنونی با ارائه منحنی‌های ظرفیت و جذب انرژی دقیق سامانه‌های باربر جانبی، درواقع داده‌های پایه (Baseline Data) را فراهم می‌آورد که سامانه‌های SHM^۱ (پایش سلامت سازه) و مدل‌های AI (هوش مصنوعی) آینده برای مقایسه وضعیت آسیب‌دیده با وضعیت سالم سازه به آن نیاز خواهند داشت. بنابراین، این پژوهش می‌تواند مستقیماً تحقیقات آتی در زمینه SHM و AI^۲ را پشتیبانی کرده و بستری برای توسعه مطالعات نوین با به‌کارگیری فن‌های پیشرفته فراهم نماید.

۲. بررسی عملکرد سامانه‌های مختلف سازه‌ای

پس از مراحل اولیه استفاده از فولاد در ساختمان‌های بلند به شکل مهاربند، فرم‌های سازه‌ای فولادی به‌موازات سازه‌های بتن‌آرمه تکامل یافت و به شکل‌های قاب صلب، دیوار برشی، قاب-دیوار، قاب محیطی، قاب محیطی مهاربندی و سازه‌های کمربندی معرفی شدند. همچنین فرم‌های خاص فولادی، مانند سازه‌های معلق و سازه‌های حجیم فضایی، ابداع گردیدند. سازه‌های بلند بتن‌آرمه تقریباً دو دهه پس از اولین ساختمان‌های بلند فولادی مطرح شدند. ساختمان‌های بتنی اولیه از نظر فرم سازه‌ای تحت تأثیر سازه‌های مشابه فولادی بودند و اسکلت آن‌ها شامل ستون‌ها و شاه‌تیرها بود؛ با این تفاوت که به علت صلب بودن قاب‌ها، بدون نیاز به مهاربند قطری، در برابر بارهای جانبی مقاومت می‌کردند. در مرحله بعد، با معرفی تاوله‌های تخت و قارچی و ترکیب آن‌ها در قاب‌های خمشی، تا اواخر دهه ۱۹۴۰ این نوع فرم سازه‌ای در ساختمان‌های بلند بتن‌آرمه متداول شد. با معرفی دیوارهای برشی مقاوم در برابر بارهای افقی، گامی مهم در تکامل فرم سازه‌های ساختمان‌های بلند بتن‌آرمه برداشته شد. این اولین گام از تحولات سریالی فرم‌های سازه‌ای بتنی بود که محدودیت ۲۰ تا ۲۵ طبقه مربوط به سیستم قاب‌های صلب و تاوله‌های تخت را از میان برداشت. ابداعات و اصلاحات در فرم‌های سازه‌ای، همراه با دستیابی به بتن‌های با مقاومت بالا، موجب شد که ساختمان‌های مرتفع بتنی تا صد طبقه قابل اجرا گردند.

دارد و جابجایی آن تا ۲۰٪ کمتر است. روشنی و همکاران [۱۴] آسیب‌پذیری سازه‌های دارای اسکلت قاب خمشی چندگانه را بر اساس رویکرد تاب‌آوری لرزه‌ای بررسی کردند و نشان دادند که قاب‌های محیطی دسته شده قابلیت پایداری دینامیکی بالایی در ساختمان‌های بلندمرتبه ایجاد می‌کنند.

محمدیان آبی و همکاران [۱۵] عملکرد سامانه‌های مقاوم سازه‌ای مختلف در قاب‌های کوتاه و میان‌مرتبه را مقایسه کردند و نشان دادند که در سازه‌های سه طبقه، قاب خمشی ویژه و دیوار برشی ویژه بهترین انتخاب هستند و در سازه‌های شش طبقه، قاب خمشی ویژه به همراه دیوار برشی ویژه بهترین عملکرد را دارد. ابطی و همکاران [۱۶] عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی لاغر (SSW) را با تحلیل عددی بررسی کردند و نشان دادند که این سیستم علاوه بر صرفه‌جویی حدود ۵۰٪ در مصرف فولاد، سختی و شکل‌پذیری بالایی دارد و در برابر تهدیدات طبیعی و انسانی عملکرد مناسبی ارائه می‌دهد. کچویی و همکاران [۱۷] اثر استفاده از جداساز لرزه‌ای بر رفتار سازه‌های بلندمرتبه بتنی را بررسی کردند و نشان دادند که نصب جداساز باعث کاهش شتاب، کاهش نیروهای پایه و افزایش شکل‌پذیری سازه می‌شود. امام‌زاده و همکاران [۱۸] تحلیل ریزش پیش‌رونده یک ساختمان مسکونی ۲۶ طبقه با سیستم دوگانه در تهران را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که حذف یک المان بحرانی ستون یا تیر مرکزی سبب افزایش بارگذاری جانبی و تحریک مدهای غیرخطی می‌شود، ولی طراحی با مسیرهای بار جایگزین و تقویت موضعی می‌تواند احتمال ریزش کلی را کاهش دهد. بهرامی و همکاران [۱۹] به مطالعه سازه‌های بتنی پیش‌ساخته پرداختند و نشان دادند که ساختمان‌های پیش‌ساخته بتنی با طراحی مناسب، ضمن کاهش زمان ساخت، رفتار مطلوبی در برابر بارهای دینامیکی دارند؛ با این حال، کنترل خسارت نیازمند جزئیات اتصال و تأمین طول مهار آرماتورها برای جلوگیری از جداشدگی و شکست‌های موضعی است.

با بررسی پژوهش‌های پیشین مشخص شد که مقایسه عملکرد سازه‌های مختلف در انواع ساختمان‌های فولادی و بتنی، با توجه به مؤلفه‌هایی مانند شکل‌پذیری و تغییر مکان نسبی، به‌منظور دستیابی به بهترین سیستم باربر جانبی، موردتوجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است. در برخی پژوهش‌های دیگر، رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی بلندمرتبه با در نظر گرفتن مؤلفه‌هایی مانند اقتصادی بودن، تغییر مکان نسبی، درصد جذب برش، نحوه عملکرد هسته داخلی و سیستم سازه‌ای پیرامونی بررسی شده است تا مؤثرترین سیستم مقاوم جانبی در سازه‌های بلند شناسایی شود. با این حال، تاکنون در هیچ‌یک از پژوهش‌های گذشته، مقایسه جامع سامانه‌های مختلف باربر جانبی در قاب‌های بتنی بلندمرتبه انجام نگرفته است.

^۱ Structural Health Monitoring

^۲ Artificial Intelligence

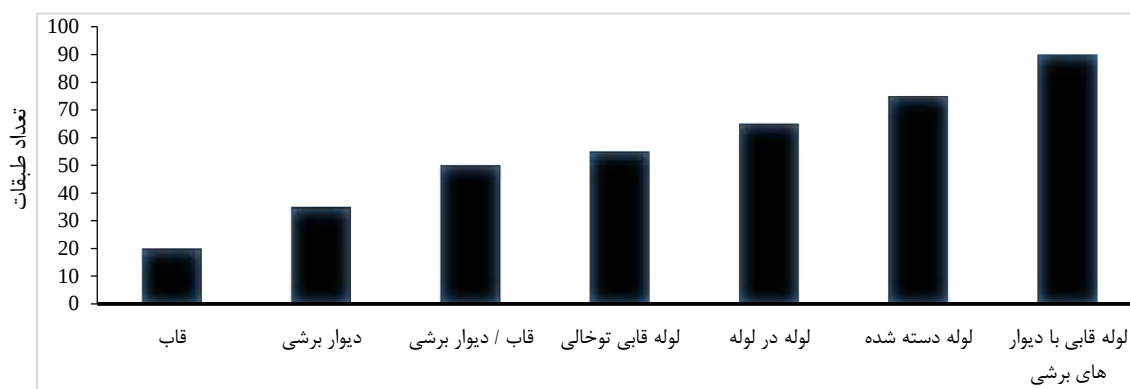
مدل قاب با استفاده از نرم‌افزار ETABS انجام شد. کلیه قاب‌ها به صورت منظم و دوبعدی مدل‌سازی شده‌اند. قاب‌ها در دو حالت ۳ و ۵ دهانه در نظر گرفته شده‌اند که هر دهانه طولی برابر با ۵ متر دارد. تمامی قاب‌ها در ۱۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفتند و ارتفاع هر طبقه ۳ متر در نظر گرفته شده است.

خاک از نوع ۳، میزان خطر لرزه‌خیزی زیاد و طبقه‌بندی ساختمان با اهمیت متوسط (ساختمان مسکونی) در نظر گرفته شد. نوع سامانه‌های جانبی شامل قاب خمشی (ویژه و متوسط)، سیستم دوگانه (متوسط و ویژه) و قاب ساختمانی ساده به همراه دیوار برشی (ویژه و متوسط) است که مطابق جداول (۱) و (۲) تیپ بندی شده‌اند. با توجه به شرایط سامانه‌های سازه‌ای در نظر گرفته شده، می‌توان از روش تحلیل استاتیکی معادل استفاده نمود.

در شکل (۱)، به طور اجمالی توصیه‌هایی در خصوص استفاده از فرم‌های سازه‌ای ساختمان‌های بلند ارائه شده است که نشان می‌دهد هر سیستم سازه‌ای برای حدود ارتفاعی مشخص یا نسبت‌های معینی از ارتفاع به عرض ساختمان مناسب است. لازم به ذکر است توصیه‌ی سامانه‌های سازه‌ای مختلف برای ارتفاعات گوناگون نباید به عنوان قاعده‌ای مطلق تلقی شود. ساختمان‌های کوتاه و متوسط ابتدا برای بارهای وزن طراحی می‌شوند و سپس قابلیت تحمل آن‌ها در مقابل بارهای جانبی کنترل می‌شود. اما ساختمان‌های بلند در مقابل بارهای جانبی خیلی حساس‌تر می‌باشند.

۳. فرضیات و مدل‌سازی

با توجه به فرضیه‌های در نظر گرفته شده، تحلیل و طراحی ۱۲



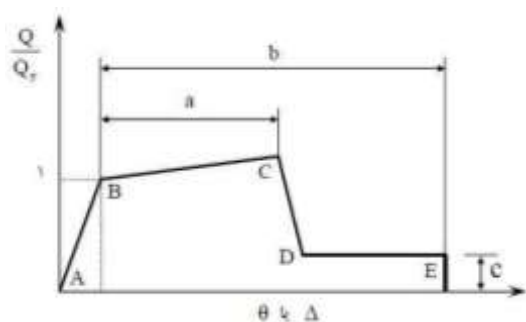
شکل ۱. مقایسه سامانه‌های سازه‌ای [۹].

جدول ۱. تیپ بندی مدل‌های قاب خمشی.

ردیف	نام مدل	تعداد دهانه	تعداد طبقه	نوع سیستم سازه‌ای
۱	FI۳۱۰	۳	۱۰	قاب خمشی متوسط
۲	FI۵۱۰	۵	۱۰	قاب خمشی متوسط
۳	FS۳۱۰	۳	۱۰	قاب خمشی ویژه
۴	FS۵۱۰	۵	۱۰	قاب خمشی ویژه

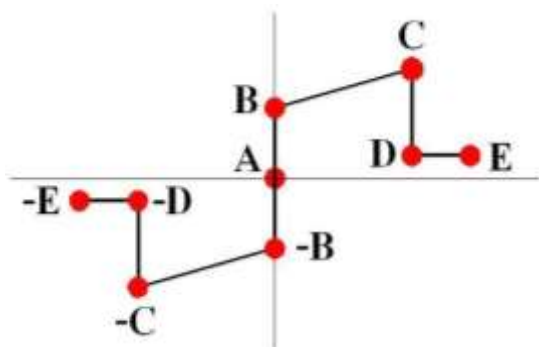
جدول ۲- تیپ بندی مدل‌های قاب خمشی به همراه دیوار برشی.

ردیف	نام مدل	تعداد دهانه	تعداد طبقه	محل قرارگیری دیوار برشی	نوع سیستم سازه‌ای
۱	FIWI۳۱۰	۳	۱۰	دهانه‌های ۱ و ۳	قاب خمشی متوسط و دیوار برشی متوسط
۲	FIWI۵۱۰	۵	۱۰	دهانه‌های ۱ و ۵	قاب خمشی متوسط و دیوار برشی متوسط
۳	FSWS۳۱۰	۳	۱۰	دهانه‌های ۱ و ۳	قاب خمشی ویژه و دیوار برشی ویژه
۴	FSWS۵۱۰	۵	۱۰	دهانه‌های ۱ و ۵	قاب خمشی ویژه و دیوار برشی ویژه
۵	FWI۳۱۰	۳	۱۰	دهانه‌های ۱ و ۳	قاب ساختمانی ساده و دیوار برشی متوسط
۶	FWI۵۱۰	۵	۱۰	دهانه‌های ۱ و ۵	قاب ساختمانی ساده و دیوار برشی متوسط
۷	FWS۳۱۰	۳	۱۰	دهانه‌های ۱ و ۳	قاب ساختمانی ساده و دیوار برشی ویژه
۸	FWS۵۳	۵	۱۰	دهانه‌های ۱ و ۵	قاب ساختمانی ساده و دیوار برشی ویژه
۹	FWS۵۶	۵	۱۰	دهانه‌های ۱ و ۵	قاب ساختمانی ساده و دیوار برشی ویژه
۱۰	FWS۵۱۰	۵	۱۰	دهانه‌های ۱ و ۵	قاب ساختمانی ساده و دیوار برشی ویژه



شکل ۲- منحنی نیرو-تغییر شکل تعمیم‌یافته [۲۳].

جهت معرفی رفتار پلاستیک مقاطع در نرم‌افزار، از تعریف و اختصاص مفصل پلاستیک خودکار موجود در برنامه استفاده شده است که پارامترهای مدل‌سازی و معیارهای پذیرش آن مطابق آخرین آیین‌نامه‌های روز دنیا است (شکل ۲). با استفاده از مفصل خودکار برنامه نیرو، لنگر، دوران و ظرفیت مقاطع، تمام پارامترهای مدل‌سازی و معیارهای پذیرش را برای تمامی اعضای دارای مفصل خودکار محاسبه می‌نماید. برای تیرها مفصل خودکار با حالت درجه آزادی لنگر خمشی حول محور قوی M^3 در فواصل نسبی $0/05$ و $0/95$ در طول تیر و برای ستون‌ها، مفصل خودکار با حالت اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی $P-M^2-M^3$ در فواصل نسبی $0/05$ و $0/95$ طول ستون اختصاص داده شد [۲۳].



شکل ۳- مدل رفتاری مفصل استفاده شده در نرم‌افزار [۲۳].

۴. صحت سنجی در برنامه ABAQUS

به‌منظور کنترل صحت نتایج و مدل‌سازی در ETABS، چند نمونه از مدل‌ها در نرم‌افزار ABAQUS [۲۴] مدل‌سازی شده و نتایج آن‌ها با نتایج حاصل از ETABS مقایسه می‌گردد. مدل‌سازی در ABAQUS بر پایه روش المان محدود انجام می‌شود. در این بخش، مدل‌های مذکور جهت انجام آنالیز به دو روش پوش‌آور و استاتیکی غیرخطی تحلیل شده و نتایج به‌دست‌آمده مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. برای مدل‌سازی تیرها از المان wire استفاده می‌شود. گرچه می‌توان از المان‌های solid یا shell نیز استفاده کرد، اما با توجه به اینکه wire دارای دو گره است، مدل‌سازی و جهت‌گیری تیرها و ستون‌ها باید با دقت انجام شود. این روش باعث کاهش قابل‌توجه هزینه محاسبات و آنالیز نرم‌افزار و افزایش دقت و صحت

۳-۱. فرضیات بارگذاری

برای مدل‌سازی و تحلیل و طراحی پروژه از نرم‌افزار Etabs.V ۲۳.۰۰ [۲۰] استفاده گردیده است. در این پژوهش میزان بار مرده طبقات به‌صورت گسترده و برابر 2500 kg/m^2 و بار زنده وارد بر طبقات به‌صورت گسترده و برابر 1000 kg/m^2 منظور گردیده است. همچنین بار زنده وارد بر بام به‌صورت گسترده و برابر 500 kg/m^2 و بار مرده وارد بر بام به‌صورت گسترده و برابر 1250 kg/m^2 منظور شده است [۲۱].

۳-۲. فرضیات مشخصات سازه‌ای

مدل‌سازی با فرض بتنی بودن قاب‌ها و دیوارهای برشی و با اختصاص مقادیر زیر به‌عنوان مشخصه آن به نرم‌افزار انجام شده است. وزن واحد حجم بتن مسلح برابر 2500 kg/m^3 است. مدول الاستیسیته بتن برابر $10^9 \times 2/188 \text{ kg/m}^2$ در نظر گرفته شده است. F_y برابر $400 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$ و F_{yc} برابر $400 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$ در نظر گرفته شده است. مقاومت مشخصه بتن برابر $210 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$ منظور گردیده است [۲۲].

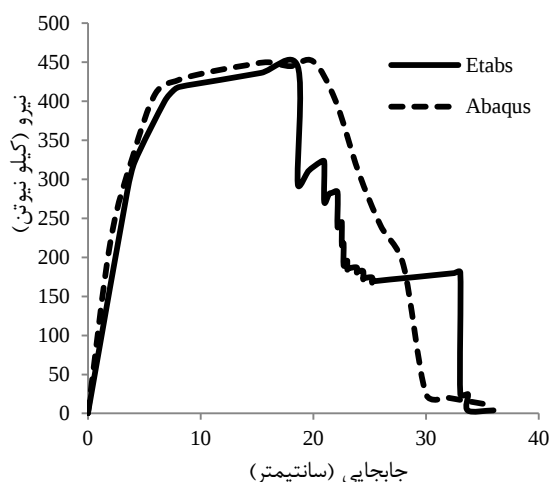
۳-۳. فرضیات تحلیل و محاسبه

در تحلیل و آنالیز مدل‌ها از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی بر مبنای توصیه‌های نشریه ۳۶۰ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، که برگرفته از آیین‌نامه‌های ۴۱-۱۷ ASCE/SEI و FEMA-۳۵۶ است، استفاده شده است. در این آیین‌نامه‌ها، یکی از روش‌های الگوی توزیع بار جانبی بر اساس شکل مودی معرفی شده که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، بار جانبی ناشی از زلزله به‌صورت استاتیکی و تدریجی و به شکل فزاینده به سازه اعمال می‌شود تا آنجا که تغییر مکان در یک نقطه خاص (نقطه کنترل) تحت اثر بار جانبی به مقدار مشخصی (تغییر مکان هدف) برسد یا سازه دچار فروریزش شود. در تحلیل استاتیکی غیرخطی، مرکز جرم بام به‌عنوان نقطه کنترل تغییر مکان سازه انتخاب می‌شود و مرکز جرم سقف خرپشته به‌عنوان نقطه کنترل لحاظ نمی‌گردد.

۳-۴. تعریف مفصل پلاستیک برای اعضای سازه

برای انجام تحلیل‌های غیرخطی لازم است که پیش از شروع تحلیل، نقش رفتار غیرخطی اعضا در پاسخ و عملکرد سازه تحت بارهای جانبی به‌درستی لحاظ شود. مراحل انجام این تحلیل و نتیجه‌گیری از آن به این صورت است که ابتدا مدل رفتار غیرخطی اعضا به نقاطی از المان‌ها که بیشترین جذب نیرو در آن‌ها محتمل است اختصاص داده می‌شود و سپس تحت یک تاریخچه شتاب در پایه سازه اعمال می‌گردد. در شکل (۲)، منحنی نیرو-تغییر مکان، رفتار غیرخطی اعضا نمایش داده شده است.

ایجاد آسیب و مفاصل پلاستیک در اتصالات اسکلت، نتایج اندکی متفاوت می‌شوند که درصد تفاوت قابل قبول است. با وجود تطابق نزدیک تا جابجایی حدود ۲ سانتی‌متر، اختلاف جزئی در ناحیه افت ظرفیت ممکن است ناشی از تقریب‌های مجاز در تعریف خواص مفصل پلاستیک (P-M) در ETABS بر اساس فرضیات سخت‌گیرانه‌تر (ASCE ۴۱) باشد. با این حال، از آنجایی که اختلاف نهایی در پارامترهای کلیدی مانند مساحت زیر منحنی بسیار ناچیز است، این مدل‌سازی برای مقایسه عملکرد نسبی سامانه‌ها کاملاً قابل اتکا است. روند نزولی و افت نهایی در هر دو حالت مشابه است که نشان‌دهنده تطابق قابل توجه نتایج است.



شکل ۶- مقایسه خروجی دو نرم‌افزار در مدل FI ۵۳

۵. نتایج و بحث

در این بخش، قصد داریم خروجی‌های مربوط به دریافت طبقات، توزیع مفصل پلاستیک و منحنی‌های پوش آور را بین سامانه‌های مختلف برابر جانی در ساختمان ده طبقه بتنی برای دو حالت سه و پنج دهانه مقایسه کنیم. هدف از این مقایسه، انتخاب بهترین سیستم با عملکرد برتر و همچنین معرفی سایر اولویت‌ها بر اساس عملکرد است.

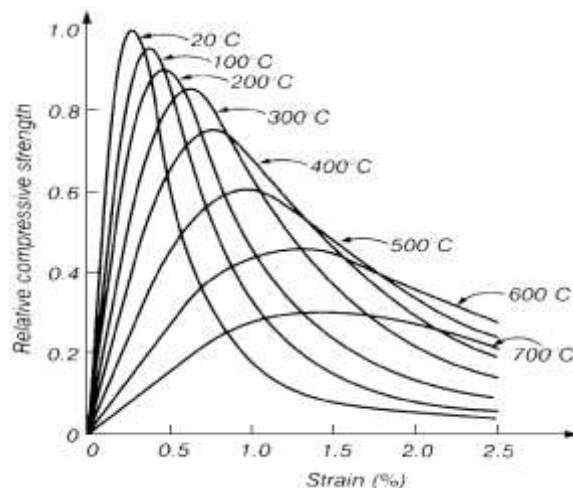
۵-۱. دریافت طبقات

در جدول (۳) به مقایسه تغییر مکان سامانه‌های مختلف برابر جانی در سازه بتنی ده طبقه ارائه شده است.

۵-۲. توزیع مفصل پلاستیک

شکل (۷) توزیع مفصل‌های پلاستیک در مرحله آخر پوش آور سازه را نشان می‌دهد و رنگ مفاصل بیانگر وضعیت آن‌ها است. به عنوان نمونه، چند مدل در ذیل ارائه شده است. رنگ سبز نشان‌دهنده سطح عملکرد IO (استفاده بی‌وقفه)، رنگ آبی نشان‌دهنده سطح عملکرد LS (ایمنی جانی) و رنگ قرمز نشان‌دهنده سطح عملکرد CP (آستانه فروریزش) است.

نتایج می‌شود. در مقابل، مدل‌سازی با المان solid به دلیل افزایش تعداد المان‌ها و گره‌ها و به تبع آن افزایش نیروهای گره‌ای و پیچیده شدن روابط حل معادلات، هزینه محاسبات را به شدت افزایش داده و دقت نتایج کاهش می‌یابد.



شکل ۴- منحنی تنش-کرنش بتن [۴]



شکل ۵- منحنی تنش-کرنش فولاد [۸]

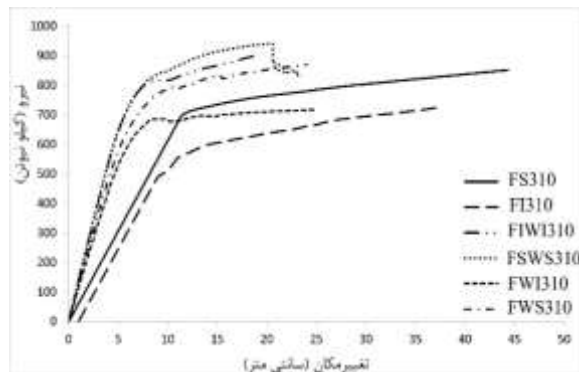
با اختصاص خصوصیات مکانیکی مصالح در نرم‌افزار مدل‌سازی صورت می‌گیرد. در شکل‌های (۴) و (۵) منحنی تنش-کرنش مصالح بتن و فولاد نشان داده شده است. اعمال بارگذاری به صورت اعمال نیروهای برش طبقات بر مدل است که به صورت خطی افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار برابر برش پایه تحلیل ادامه یافته تا اولین آسیب دیدگی در سازه رخ دهد.

شایان ذکر است که تحلیل پوش آور در ETABS بر اساس متدهای استاندارد آیین‌نامه‌ای مانند FEMA ۳۵۶ انجام شده و صحت نتایج غیرخطی آن با مدل‌سازی اجزای محدود و تحلیل دقیق در نرم‌افزار ABAQUS تأیید گردیده است. این صحت‌سنجی نشان می‌دهد که نتایج غیرخطی ETABS برای مقایسه عملکرد سامانه‌های مختلف، کاملاً قابل اعتماد است.

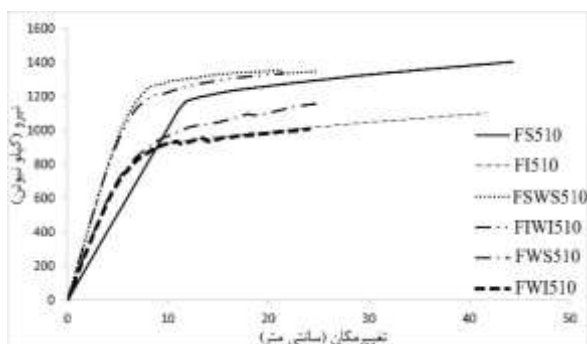
همان گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، در محدوده الاستیک، دو نمودار تطابق بسیار خوبی نشان می‌دهند، اما پس از

۳-۵. مقایسه منحنی پوشاک

در شکل‌های (۹و۸) به مقایسه منحنی پوشاک و سامانه‌های مختلف باربر جانبی برای سازه‌های ده طبقه‌ی بتنی برای دو حالت سه و پنج دهانه پرداخته شده است.



شکل ۸- مقایسه منحنی پوشاک و مدل ده طبقه، سه دهانه.



شکل ۹- مقایسه منحنی پوشاک و مدل ده طبقه، پنج دهانه.

جدول ۴- مقایسه‌ی درصدی جذب انرژی در قاب‌ها با سامانه‌های مختلف.

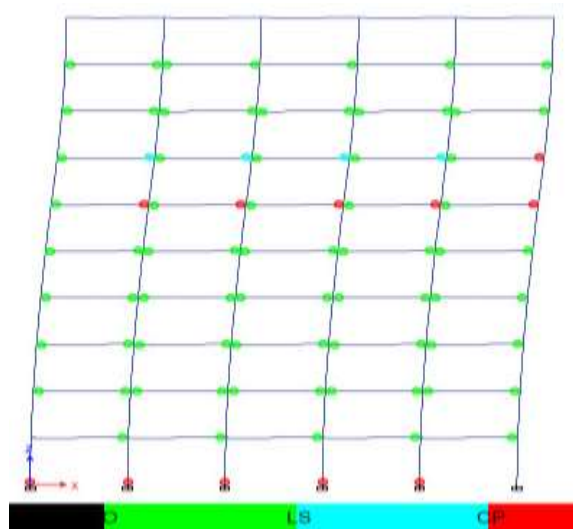
علامت اختصاری	متوسط درصد جذب انرژی زلزله در قاب‌های ۵و۳ دهانه (نسبت به قاب خمشی ویژه)
FS	۱۰۰.۰۰٪
FI	۸۶.۶۷٪
FSWS	۷۶.۶۷٪
FWS	۶۰.۰۰٪
FWI	۴۳.۳۳٪
FIWI	۳۳.۳۳٪

با در نظر گرفتن نمودارها و جدول (۴) می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

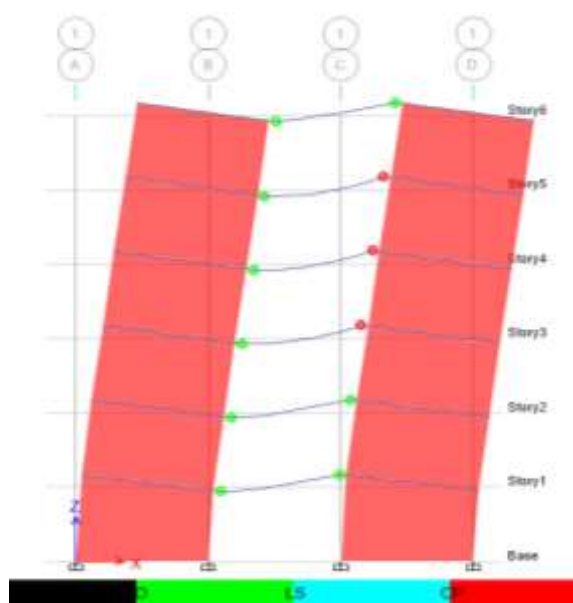
قاب خمشی ویژه (FS) با ۱۰۰٪ جذب انرژی، عملکرد مورد انتظار آیین‌نامه را تأیید می‌کند. این ظرفیت بسیار بالا ناشی از شکل‌پذیری غیر الاستیک حداکثری و جزئیات ویژه‌ی آرماتور گذاری است که امکان تشکیل مفاصل پلاستیک متعدد و پایدار را فراهم می‌سازد. قاب‌های خمشی (FS و FI) به دلیل سختی اولیه‌ی کمتر، بیشترین مقدار دررفت نسبی ($\Delta_m \sim 0.004$) را

جدول ۳- مقایسه دررفت طبقات - مقدار مجاز ۶ cm.

ردیف	سامانه‌های سازه‌ای	Δ_m	کنترل
۱	FI۳۱۰	۰.۰۰۳۸۰۹۵۲۴	Ok
۲	FI۵۱۰	۰.۰۰۳۸۰۹۱۱۸	Ok
۳	FS۳۱۰	۰.۰۰۴۰۸۱۶۳۳	Ok
۴	FS۵۱۰	۰.۰۰۴۰۸۱۶۳۳	Ok
۵	FIWI۳۱۰	۰.۰۰۱۹۰۴۷۶۲	Ok
۶	FIWI۵۱۰	۰.۰۰۱۶۸۸۳۱۲	Ok
۷	FSWS۳۱۰	۰.۰۰۲۶۷۸۵۷	Ok
۸	FSWS۵۱۰	۰.۰۰۲۲۶۱۹۰	Ok
۹	FWI۳۱۰	۰.۰۰۲۸۵۷۱۴۳	Ok
۱۰	FWI۵۱۰	۰.۰۰۲۸۵۲۱۳	Ok
۱۱	FWS۳۱۰	۰.۰۰۳۵۱۱۹۰۵	Ok
۱۲	FWS۵۱۰	۰.۰۰۳۳۹۲۸۵۷	Ok



الف



ب

شکل ۷- الف) توزیع مفصل پلاستیک در مدل FS۵۱۰ (ب) توزیع مفصل پلاستیک مدل FIWI۳۶.

* برتری شکل‌پذیری نهایی (ایمنی): سیستم قاب خمشی ویژه (FS) به‌وضوح بهترین عملکرد را از نظر ظرفیت جذب انرژی و شکل‌پذیری نهایی نشان داد و بیشترین مساحت زیر منحنی پوش‌آور را دارا است. ظرفیت استهلاک انرژی این سیستم تقریباً سه برابر سیستم دوگانه‌ی متوسط (FIWI) و $2/5$ برابر سیستم قاب ساده با دیوار برشی متوسط (FWI) است. این نتیجه تأییدی بر کفایت جزئیات ویژه‌ی آرماتور گذاری مندرج در آیین‌نامه‌ی ACI 318 در تأمین شکل‌پذیری موردنیاز برای دستیابی به هدف جلوگیری از فروپاشی نهایی (CP) در سازه‌های بلندمرتبه است.

* برتری کنترل دررفت (سختی): سامانه‌های مجهز به دیوار برشی از سختی جانبی بسیار بالایی برخوردارند. در این میان، سیستم دوگانه‌ی متوسط (FIWI) با ثبت کمترین مقدار بیشینه‌ی دررفت نسبی ($\Delta_{max} \approx 0.0019$)، بهترین عملکرد را در کنترل تغییر مکان جانبی و کاهش آسیب‌های غیر سازه‌ای، مطابق با اهداف سطح عملکرد IO و LS، نشان داد. این مقدار نسبت به قاب‌های خمشی خالص (FS) و (FI) با $\Delta_{max} \approx 0.00408$ ، کاهش درفتی بیش از ۵۳ درصد را نشان می‌دهد.

* بهترین توازن مهندسی: سیستم دوگانه‌ی ویژه (FSWS) به‌عنوان یک راه‌حل عملی، توانست با دستیابی به $76/67\%$ درصد ظرفیت جذب انرژی (رتبه‌ی ۳) و مقدار بیشینه‌ی دررفت نسبی $\Delta_{max} \approx 0.00268$ (رتبه‌ی ۲ در کنترل دررفت)، بهترین توازن میان سختی و شکل‌پذیری را برای مهندسی لرزه‌ای مبتنی بر عملکرد (PBD) فراهم کند.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم قاب خمشی ویژه به همراه دیوار برشی ویژه (سیستم دوگانه‌ی ویژه) به‌عنوان عملی‌ترین و کارآمدترین نوع سیستم دوگانه در مناطق با لرزه‌خیزی بالا می‌تواند گزینه‌ی مناسب‌تری از نظر عملکرد لرزه‌ای باشد، زیرا به‌صورت هم‌زمان اهداف سطح ایمنی جانی را برآورده می‌سازد.

۷. مراجع‌ها

- [۱] Katkhoda, A. M.; Knaa, R. "Optimization in The Selection of Structural Systems for the Design of Reinforced Concrete High-Rise Buildings in Resisting Seismic Forces"; Energy Pro. ۲۰۱۲, ۱۹, ۲۶۹-۲۷۵. doi:10.1016/j.egypro.2012.05.206
- [۲] Kazemi Niakrani, H.; Khoshnoodian, F. "Seismic Behavior of Tall Structures and Methods for Solving the Problem of Shear Delay in These Structures"; 5th Nat'l Civil Eng. Congress, ۲۰۱۰. (In Persian)
- [۳] Saffari, H.; Rahgozar, R.; Mahjoub, R. "Approximate Analysis of Tall Structures Resistant to he Peripheral Frame Against Lateral Forces"; First Conf. on Structural Safety & Retrofit, ۲۰۱۰. (In Persian)
- [۴] Aramesh, S. "Study of Seismic Behavior of Various Structural Systems in High-Rise Reinforced Concrete Buildings"; First Nat'l Conf. on Concrete Industry, ۲۰۱۲. (In Persian)

تجربه می‌کنند. هرچند این مقدار معمولاً در محدوده‌ی مجاز قرار دارد، اما نشان‌دهنده‌ی ریسک بالاتر آسیب‌های غیر سازه‌ای و نیاز به هزینه‌های بیشتر برای تعمیر و بازسازی است. در مقابل، سیستم دوگانه‌ی متوسط (FIWI) با کمترین مقدار دررفت ($\Delta_{max} \approx 0.0019$)، بهترین عملکرد را در کنترل تغییر مکان جانبی نشان می‌دهد. این رفتار برای سطح سرویس‌دهی و کاهش آسیب‌های غیر سازه‌ای ایدئال ارزیابی می‌شود. با این حال، سیستم قاب FIWI با تنها $33/33\%$ درصد جذب انرژی، ضعیف‌ترین عملکرد را از نظر ظرفیت استهلاک انرژی دارد. اگرچه از نظر کنترل دررفت در محدوده‌ی مجاز قرار می‌گیرد، اما به دلیل جذب انرژی کمتر نسبت به سایر سامانه‌ها، استفاده از این نوع سامانه‌ها در سازه‌های بلند ممکن است منجر به بروز مکانیسمی شود که خطر فروریزش آن را، در صورت وقوع شکست ترد، افزایش می‌دهد.

با در نظر گرفتن دو معیار دررفت و میزان جذب انرژی زلزله به نظر می‌رسد سیستم دوگانه FSWS یک توازن نسبی را برقرار کند. این سیستم با $76/67\%$ جذب انرژی (رتبه ۳) و تقریباً دومین کنترل‌کننده دررفت قوی ($\Delta_{max} \approx 0.00268$)، بهینه‌ترین ترکیب از نظر مهندسی لرزه مبتنی بر عملکرد را ارائه می‌دهد. FSWS سختی کافی برای کنترل دررفت و شکل‌پذیری کافی برای جذب انرژی قابل‌توجه را فراهم کرده است.

۶. نتیجه‌گیری

از آنجاکه سازه‌های بتن‌آرمه بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و استاندارد ۲۸۰۰ طراحی می‌شوند، کنترل‌های لازم از نظر مقاومت و دررفت در محدوده‌ی آیین‌نامه‌ها انجام گرفته و نحوه‌ی توزیع مفصل‌ها نیز در انتخاب سیستم به‌طور کلی لحاظ شده است. با توجه به این که یکی از روش‌های مقایسه، میزان جذب انرژی سازه‌ها است، انتخاب بهترین سازه بر اساس منحنی پوش‌آور و ظرفیت سازه‌ها صورت می‌گیرد. در این پژوهش، به مقایسه‌ی عملکرد سامانه‌های مقاوم جانبی در ساختمان‌های بلندمرتبه به‌منظور کاهش تغییر مکان، افزایش جذب انرژی و کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای پرداخته شده است. بدین منظور، ۱۲ قاب بتن‌آرمه‌ی ۱۰ طبقه با ارتفاع طبقات سه متر، به‌صورت منظم و دوبعدی در نرم‌افزار ETABS مدل‌سازی و تحلیل استاتیکی غیرخطی شدند. سامانه‌های موردبررسی شامل قاب خمشی (ویژه و متوسط)، سیستم دوگانه (ویژه و متوسط) و قاب ساختمانی ساده با دیوار برشی (ویژه و متوسط) بودند. قاب‌ها با سه و پنج دهانه، هر یک به طول پنج متر، در نظر گرفته شدند و مقایسه‌ها بر اساس منحنی پوش‌آور و ظرفیت جذب انرژی انجام شد. با توجه به سازه‌های موردبررسی، ابعاد و فرضیات تحقیق، نتایج زیر حاصل گردید.

- [۱۵] Mohammadian Abi, S.; Sohrabi, S. "Comparing the Performance of Different Structural Resisting Systems in Low and Intermediate Concrete Frames"; *New Approaches Civ. Eng.* ۲۰۲۱, ۵, ۲۳-۳۷. doi:۱۰.۳۰۴۶۹/jnace.۲۰۲۱.۱۴۷۸۲۵
- [۱۶] Abtahi, S. E.; Hosseini Lavasani, S. H. "Numerical Investigation of Seismic Performance of Unstiffened Slender Steel Shear Walls with Passive Defense Approach"; *Sci. Q. J. Passive Def.* ۲۰۲۲, ۱۳. doi:۱۰.۳۰۱۰۰۱.۲۰۰۸۶۸۴۹.۱۴۰۱.۱۳.۱.۱.۴ (In Persian).
- [۱۷] Kachooee, A. "Investigating the Effect of Using a Seismic Isolation System to Improve the Behavior of Concrete Buildings with a Very High Degree of Importance and with a Double Side Bearing Resistant System"; *Sci. J. Passive Def.* ۲۰۲۴, ۱۵, ۶۱-۷۲. doi:۲۰.۱۰۰۱.۲۰۰۸۶۸۴۹.۱۴۰۳.۱۵.۱.۶.۳ (In Persian).
- [۱۸] Emamzadeh, S. S.; Arbab Noush Abadi, A. "Progressive Collapse Analysis of Dual System 'Special Moment Steel Frame with Special Concrete Shear Wall'"; *Sci. J. Passive Def.* ۲۰۲۰, ۱۱, ۶۷-۸۷. doi:۲۰.۱۰۰۱.۲۰۰۸۶۸۴۹.۱۳۹۹.۱۱.۳.۶.۹ (In Persian).
- [۱۹] [ahrami, S.; Pouri Rahim, A. A. "Technical Investigation of Prefabricated Concrete Defense Headquarters Resistant to Explosion Loads"; *Sci. J. Passive Def.* ۲۰۲۳, ۱۴, ۴۵-۵۸, doi:۲۰.۱۰۰۱.۲۰۰۸۶۸۴۹.۱۴۰۲.۱۴.۳.۲.۶ (In Persian).
- [۲۰] <http://peer.berkeley.edu/nga/search.html>
- [۲۱] Topic Six National Building Regulations, Loads on Buildings, Fourth Edition, ۲۰۱۳. (In Persian)
- [۲۲] Iran Concrete Regulations (ABA), Deputy of Technical Affairs, Office of Technical Affairs, Development of Criteria and Reduction of Earthquake Risk, ۷th Edition, ۲۰۰۴. (In Persian)
- [۲۳] Management and Planning Organization, Office of Technical Affairs and Development of Criteria and Reduction of Earthquake Risk, "Instructions for Seismic Improvement of Existing Buildings No. ۳۶۰, ۲۰۰۶. (In Persian).
- [۲۴] Dassault Systèmes, Abaqus ۲۰۲۰ Documentation, Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp, ۲۰۲۰.
- [۵] Khairuddin, A.; Jamshidi, H. "Comparison of pipe systems in tall reinforced concrete buildings"; ۵th Nat'l Civil Eng. Congress, ۲۰۱۰. (In Persian)
- [۶] Sadr Nafisi, S., "The Role of Different Restraint Systems in the Reinforcement of Steel"; First Nat'l Conf. on Concrete Industry, ۲۰۱۲. (In Persian)
- [۷] Razani, R.; Jafari Maud, G. "Investigation of The Behavior of Flexural, Double and Sash Steel Frames with Optimized Design in Linear and Nonlinear Environments Under Earthquake"; ۱st Conf. on Structural Safety & Retrofit. (In Persian)
- [۸] Hosseini Hashemi, B.; Parvari, A. "Comparison of The Performance of Special Bending Frame Structure with Ordinary Steel Bending Frame Structure Designed With The Third Edition of Standard ۲۸۰۰"; ۵th Nat'l Civil Eng. Congress, ۲۰۱۰. (In Persian)
- [۹] Ahmadi Rouhani, M. "Optimizing the Position of Shear Walls in Tall Structures"; Master Thesis, Azad University, Kerman Branch, ۲۰۱۵. (In Persian)
- [۱۰] Mirghaderi, R.; Ghezljeh, J.; Kavei, S. "Analogy of The Seismic Behavior of Composite Frames (Concrete Columns and Steel Beams) With Steel and Reinforced Concrete Frames in Low-Rise, Mid-Rise, and High-Rise Buildings"; *J. Struct. Constr. Eng.* ۲۰۲۴, ۱۱, ۵-۲۵. doi:۱۰.۲۲۰۶۵/jsce.۲۰۲۴.۴۱۳۹۴۱.۳۲۰۸. (In Persian)
- [۱۱] Lari, S.; Mahboubi Niazmandi, M.; Hatami Dezdarani, V.; Gholipour, S. "A Practical Performance Level-Based Design Method for Seismic Retrofitting of High-Rise Flexural Concrete Structures Equipped with Steel Shear Walls"; *J. Struct. Constr. Eng.* ۲۰۲۴, ۱۲, ۶۸-۹۲. Doi: ۱۰.۲۲۰۶۵/jsce.۲۰۲۴.۴۶۵۵۲۲.۳۴۵۳ (In Persian)
- [۱۲] Mamazizi, A.; Khanahmadi, M.; Nobakht Vakili, K. "Debonding Damage Detection and Assessment in a CFST Composite Column Using Modal Dynamic Data"; *Sharif J. Civ. Eng.* ۲۰۲۲, ۳۸, ۵۲-۶۳. doi:۱۰.۲۴۲۰۰/j۳۰.۲۰۲۲.۵۹۹۰۳.۳۰۷۵. (In Persian)
- [۱۳] Nouri, G.; Rastegar, A.; yoosef Pooravandari, A. "Progressive Collapse Resistance of Steel Framed Buildings with Different Connections"; *Sharif J. Civ. Eng.* ۲۰۲۰, ۳۵, ۹۳-۱۰۰. doi:۱۰.۲۴۲۰۰/j۳۰.۲۰۱۸.۵۶۱۳.۲۲۷۳. (In Persian)
- [۱۴] Roshani, M.; Meshkat-Dini, A.; Massumi, A. "Evaluation of the Robustness of Tall Buildings with Bundled Tube Resistant Skeleton using Fragility Curves"; *Amirkabir J. Civil Eng.* ۲۰۲۳, ۵۵, ۶۱۱۳۷-۱۱۵۸. doi:۱۰.۲۲۰۶۰/ceej.۲۰۲۳.۲۱۱۵۵.۷۶۳۴. (In Persian)