

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای و بهینه‌سازی قاب‌های فولادی مجهز به میراگر ویسکوز بر مبنای طراحی مستقیم مبتنی بر تغییر مکان

حسین کبیری

دانشجوی دکتری مهندسی عمران - سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن

چکیده

روش‌های متعارف طراحی لرزه‌ای عمدتاً بر تأمین مقاومت سازه در برابر نیروهای ناشی از زلزله استوار هستند، در حالی که کنترل مستقیم تغییر شکل و دستیابی به سطح عملکرد هدف، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی خسارت لرزه‌ای دارد. در این پژوهش، یک چارچوب یکپارچه قاب‌های فولادی مجهز به میراگرهای ویسکوز ارائه و عملکرد آن با روش متداول (DDBD) برای طراحی مستقیم مبتنی بر تغییر مکان بدون میراگر مقایسه شده است. در چارچوب پیشنهادی، سهم میرایی ویسکوز میراگرها و DDBD و روش (FBD) طراحی مبتنی بر نیرو میرایی هیسترتیک معادل سازه به صورت هم‌زمان در فرآیند طراحی لحاظ شده و یک ضریب اصلاح ۰.۷۵ برای تبدیل مؤثر میرایی ویسکوز به میرایی هیسترتیک معادل در چارچوب پژوهش در نظر گرفته شده است. همچنین، فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از برای انتخاب هم‌زمان پارامترهای سازه و میراگرها به کار گرفته شده است. مطالعه موردی بر روی یک قاب فولادی NSGA-III الگوریتم هشت طبقه انجام شده و تحلیل‌های پوش‌آور، تاریخچه زمانی غیرخطی و تحلیل دینامیکی افزایشی برای ارزیابی عملکرد استفاده شده‌اند. حدود ۳۹ درصد کاهش در حداکثر دررفت بین‌طبقه‌ای، ۲۵ درصد کاهش FBD، نتایج نشان داد که سازه بهینه‌شده نسبت به سازه مرجع در برش پایه و ۴۶ درصد کاهش در شاخص آسیب‌پذیری دارد. همچنین سطح شتاب متناظر با رسیدن به حد ایمنی جانی حدود ۷۱ DDBD، درصد افزایش یافت و هزینه اولیه طرح بهینه‌شده حدود ۹۰.۵ درصد کمتر گزارش شد. این نتایج نشان می‌دهد که تلفیق میراگرهای ویسکوز و بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند راهکاری مؤثر برای کنترل تغییر شکل و بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی باشد و واژگان کلیدی: طراحی مستقیم مبتنی بر تغییر مکان، قاب فولادی، میراگر ویسکوز، طراحی مبتنی بر عملکرد، بهینه‌سازی تحلیل غیرخطی، NSGA-III، چندهدفه

۱. مقدمه

زلزله از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی مؤثر بر عملکرد ساختمان‌ها است و تجربه زلزله‌های شدید نشان داده است که تأمین مقاومت آیین‌نامه‌ای به تنهایی برای کنترل خسارت و تضمین سطح عملکرد مطلوب کافی نیست. در روش‌های متعارف نیرو-بنیاد، نیروی طراحی پارامتر اصلی تصمیم‌گیری است؛ در حالی که بسیاری از شاخص‌های آسیب و عملکرد، ارتباط مستقیم‌تری با تغییر شکل‌های سازه دارند. در این راستا، طراحی مبتنی بر عملکرد و به‌ویژه طراحی مستقیم مبتنی بر تغییر مکان، امکان تعریف صریح تغییر مکان هدف و کنترل پاسخ سازه بر مبنای آن را فراهم می‌کند.

از سوی دیگر، استفاده از سیستم‌های اتلاف انرژی غیرفعال، به‌ویژه میراگرهای ویسکوز، یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش پاسخ لرزه‌ای. تعیین میرایی معادل مناسب و انتخاب هم‌زمان مشخصات و توزیع میراگرها است. DDBD است. چالش اصلی در ترکیب این سیستم با

پایان‌نامه مبنا نشان می‌دهد که در چارچوب پیشنهادی، ترکیب میرایی هیسترتیک و ویسکوز با ضریب اصلاح ۰.۷۵ لحاظ شده و بهینه‌سازی چندهدفه برای انتخاب طرح مناسب به کار رفته است

۲. نوآوری و چارچوب پیشنهادی

نوآوری اصلی پژوهش در یکپارچه‌سازی فرآیند طراحی مستقیم مبتنی بر تغییرمکان با مدل میرایی ترکیبی و بهینه‌سازی چندهدفه است. در این چارچوب، طراحی اعضای سازه و پارامترهای میراگر به صورت مستقل از یکدیگر انتخاب نمی‌شوند، بلکه در یک فرآیند بهینه‌سازی مشترک بررسی می‌گردند. این موضوع امکان ایجاد تعادل میان کاهش تغییرمکان، کاهش نیرو و هزینه سازه و تأمین قیود عملکردی را به کار گرفته شده است. NSGA-III فراهم می‌کند. همچنین، برای مسئله دارای متغیرهای گسسته، پیوسته و باینری، الگوریتم یکی دیگر از یافته‌های مهم، نقش توزیع ارتفاعی ضرایب میرایی است. نتایج پایان‌نامه نشان داده است که توزیع کاهش ضرایب میرایی از طبقات پایین به بالا، با ضرایب بزرگ‌تر در طبقات پایین، نسبت به توزیع یکنواخت یا افزایشی عملکرد مناسب‌تری ایجاد کرده و به یکنواخت‌تر شدن تغییرمکان‌های نسبی و اتلاف انرژی مؤثرتر منجر شده است.

۳. روش تحقیق و مدل عددی

مطالعه موردی شامل یک قاب فولادی متوسط مرتبه هشت طبقه با پلان متقارن 5×5 دهانه 5 متری و ارتفاع ثابت 3.2 متر برای هر طبقه است. سازه در منطقه لرزه‌خیز تهران با خاک نوع 2 و سطح خطرپذیری زیاد در نظر گرفته شده است. برای مقایسه عملکرد، سه سناریو یکپارچه و میراگرهای DDBD بدون میراگر و سازه بهینه‌شده با DDBD سازه طراحی شده با FBD شامل سازه مرجع طراحی شده با روش ویسکوز بررسی شده‌اند.

مدل ST37 و فولاد BOX200 و ستون‌ها با مقطع $PG1(400 \times 200)$ انجام شده است. تیرها با مقطع ETABS v22 مدل‌سازی عددی در شده‌اند. اتصالات تیر و ستون صلب در نظر گرفته شده و رفتار غیرخطی مصالح با مدل دوخطی دارای سخت‌شوندگی 3 درصد لحاظ شده در محل‌های بهینه‌شده نصب شده‌اند $kN.S/m$ است. میراگرهای ویسکوز خطی با ضرایب میرایی 1000 تا 4000

برای ارزیابی پاسخ غیرخطی، تحلیل استاتیکی غیرخطی با الگوی بارگذاری مثلثی معکوس انجام شده است. تحلیل تاریخچه زمانی با مجموعه‌ای از رکوردهای مانجیل، بم، نورث‌ریچ و کوبه و مقیاس کردن آن‌ها براساس طیف طرح استاندارد 2800 ویرایش چهارم در دو سطح انجام شده است. علاوه بر آن، تحلیل دینامیکی افزایشی در 20 سطح شدت مختلف تا رسیدن به حالت حدی فروپاشی اجرا MCE و DBE شده است.

۴. فرمول‌بندی و بهینه‌سازی

در مدل پیشنهادی، رفتار میراگر ویسکوز به پاسخ سرعت وابسته است و برای ساده‌سازی مرحله اولیه طراحی مستقیم، رفتار خطی میراگر در نظر گرفته شده است. جرم طبقات به صورت متمرکز در تراز سقف‌ها مدل شده و بارهای مرده و زنده مطابق ضوابط بارگذاری ایران اعمال شده‌اند. قیود طراحی شامل کنترل تغییرمکان نسبی طبقات، محدودیت‌های نیرویی و تغییرمکانی میراگرها و کنترل نسبت‌های ابعادی اعضای فولادی است.

استفاده شده است. این الگوریتم برای حفظ تنوع NSGA-III مسئله بهینه‌سازی به صورت چندهدفه تعریف شده و برای حل آن از جواب‌ها و پوشش جبهه پارتو در مسائل چندهدفه به کار گرفته شده و جمعیت اولیه با استفاده از نتایج طراحی مستقیم تقریبی و تنوع‌بخشی تصادفی تولید شده است

۵. نتایج و بحث

شاخص عملکرد	FBD	بدون میراگر DDBD	بهینه‌شده +میراگر DDBD
میانگین حداکثر دررفت	۱٫۸٪	۱٫۵٪	۱٫۱٪
FBD تغییر نسبت به	—	کاهش	٪کاهش ۳۸٫۹
برش پایه	مرجع	—	٪کاهش حدود ۲۵
تعداد مفاصل پلاستیک	مرجع	—	٪کاهش حدود ۴۰
انرژی مستهلک‌شده توسط میراگر	—	—	٪حدود ۶۵
Life Safety شتاب متناظر با	مرجع	—	٪افزایش حدود ۷۱
شاخص آسیب‌پذیری	مرجع	—	٪کاهش حدود ۴۶
هزینه اولیه	مرجع	—	٪کاهش حدود ۹۰٫۵

رسید، در حالی که سازه KN در تغییرمکان سقف ۰٫۲۵ متر به مقاومت نهایی FBD ۱۸۰۰ نتایج تحلیل پوش‌آور نشان داد که سازه مرجع را نشان داد. سازه مجهز به میراگرهای ویسکوز بهینه‌شده در همان KN بدون میراگر با تغییرمکان هدف ۰٫۳۵ متر مقاومت DDBD ۱۶۵۰ ارائه کرد. همچنین تعداد مفاصل پلاستیک در سازه بهینه‌شده حدود ۴۰ درصد کاهش یافت و KN تغییرمکان هدف، مقاومت ۱۹۵۰ میراگرها حدود ۶۵ درصد انرژی ورودی را مستهلک کردند

بدون میراگر ۱٫۵ درصد و سازه بهینه‌شده ۱٫۱ درصد DDBD در تحلیل دینامیکی، میانگین حداکثر دررفت سازه مرجع ۱٫۸ درصد، سازه سازه مرجع در برخی MCE به دست آمد؛ بنابراین کاهش حداکثر دررفت نسبت به سازه مرجع حدود ۳۸٫۹ درصد است. در سطح رکوردها به دررفت بیش از ۳٫۵ درصد رسید، در حالی که حداکثر دررفت سازه بهینه‌شده ۲٫۲ درصد گزارش شد. همچنین شتاب طبقات در سازه مجهز به میراگر به طور میانگین ۲۵ درصد کاهش یافت

در مقیاس عملکردی، روش پیشنهادی باعث افزایش حدود ۷۱ درصدی سطح شتاب متناظر با رسیدن به حد ایمنی جانی و کاهش حدود درصدی شاخص آسیب‌پذیری شد. از دیدگاه اقتصادی نیز هزینه اولیه طرح بهینه‌شده حدود ۹۰٫۵ درصد کمتر از سازه مرجع گزارش ۴۶ شده است. در ارزیابی چرخه عمر ۵۰ ساله، نسبت فایده به هزینه سیستم پیشنهادی ۳٫۲ در برابر ۱٫۸ برای سازه متعارف به دست آمده است

۶. نتیجه‌گیری

- عملکرد لرزه‌ای بهتری ایجاد کرد و کاهش حدود FBD و میراگرهای ویسکوز، در مطالعه موردی حاضر، نسبت به روش DDBD تلفیق (۱) درصدی دریافت بین‌طبقه‌ای و حدود ۲۵ درصدی برش پایه را به همراه داشت ۳۹.
- ترکیب میرایی هیسترتیک و ویسکوز در چارچوب پیشنهادی، با ضریب اصلاح ۰.۷۵، یکی از اجزای اصلی روش طراحی ارائه‌شده است (۲).
- توزیع ارتفاعی میراگرها نقش تعیین‌کننده‌ای در پاسخ سازه دارد و در این مطالعه، توزیع کاهشی ضرایب میرایی از پایین به بالا عملکرد (۳) مناسب‌تری نشان داده است.
- افزایش حدود ۷۱ درصدی سطح شتاب متناظر با حد ایمنی جانی و کاهش حدود ۴۶ درصدی شاخص آسیب‌پذیری، بیانگر بهبود قابل (۴) توجه شاخص‌های عملکردی سیستم پیشنهادی است.
- محدودیت‌های مطالعه شامل عدم بررسی اندرکنش خاک و سازه، رفتار سه‌بعدی و اثرات پی‌دست‌سازی است؛ بنابراین تعمیم نتایج به (۵) شرایط گسترده‌تر نیازمند مطالعات تکمیلی است.

۷. منابع

۱. AISC ۳۶۰-۱۶ (۲۰۱۶), Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.
۲. ASCE/SEI ۷-۱۶ (۲۰۱۶), Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.
۳. استاندارد ۲۸۰۰ ایران، ویرایش چهارم (۱۳۹۹)، استاندارد طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله.
۴. مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۹)، بارهای وارد بر ساختمان.
۵. مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۸)، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی.
۶. Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., & Kowalsky, M.J. (۲۰۰۷), Displacement-Based Seismic Design of Structures, IUSS Press.
۷. Symans, M.D., Charney, F.A., Whittaker, A.S., et al. (۲۰۰۸), Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments, Journal of Structural Engineering, ASCE.
۸. Chopra, A.K. (۲۰۱۷), Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, ۵th ed., Pearson.
۹. Marler, R.T. & Arora, J.S. (۲۰۰۴), Survey of Multi-objective Optimization Methods for Engineering, Structural and Multidisciplinary Optimization.
۱۰. FEMA P-۶۹۵ (۲۰۰۹), Quantification of Building Seismic Performance Factors.
۱۱. CSI Analysis Reference Manual (۲۰۲۲), ETABS/SAP۲۰۰۰, Computers and Structures, Inc.