بررسی رفتاری سیستم‌های ثانویه و ارائه طیف طرح طبقه با توجه به رفتار غیرخطی سازه و اندرکنش سیستم اولیه (سازه) با سیستم ثانویه

محسن غفوری آشتیانی
استاد پژوهشکده مهندسی سازه ashtiany@iiees.ac.ir

مهرداد صادق‌زاده نظری

سیستم‌های ثانویه (اجزای غیرسازه‌ای) سیستم‌ها و اجزای مکانیکی، برقی و مخابراتی، معماری و محتویات ساختمانها هستند که به نوعی به سازه اصلی متصل هستند. این سیستم‌ها جزئی از سیستم سازه باربر اصلی در نظر گرفته نمی‌شوند، ولی می‌توانند تحت نیروهای لرزه‌ای بزرگی قرار گیرند. مخازن و چیلرها نمونه‌هایی از سیستم‌های ثانویه صنعتی موجود در تأسیسات یک سکوی نفتی هستند. لوله‌کشی‌های مواد سوختی در این گونه تأسیسات از نمونه‌های سیستم‌های ثانویه می‌باشند که باید به منظور کاهش خطر آتش‌سوزی پس از زلزله کارایی خود را حفظ کنند. تجهیزات و دستگاه‌های بیمارستانی از دیگر نمونه‌های سیستم‌های ثانویه با اهمیت هستند که حفظ کارایی آنها در هنگام و پس از زمین‌لرزه‌ها حیاتی است. این سیستم‌ها دارای سه ویژگی اصلی یعنی آسیب‌پذیری بالا، آسیب‌رسانی (صدمات جانی و صدمات اقتصادی) و قابلیت مختل کردن عملکرد ساختمانهای مهم هستند، و خسارات اقتصادی ناشی از آسیب‌دیدن آنها می‌تواند بسیار بیشتر از خسارات اقتصادی سازه‌ای باشد.

تاکنون تحقیقات انجام گرفته بر روی رفتار لرزه‌ای اجزای ثانویه نسبت به مطالعات صورت گرفته روی سیستم‌های سازه‌ای بسیار کمتر بوده و در عمل تأثیر بسزایی بر روند طراحی‌ها نداشته‌اند. تنها در مورد تأسیسات نیروگاهی که سرمایه‌گذاری‌های قابل توجه‌ای برای انجام آزمایش‌ها و تحلیل‌های مختلف در این بخش انجام گرفته است می‌توان شاهد اثرات مثبت مطالعات بود. علیرغم وجود روابط تحلیلی با دقت بالا برای محاسبه پاسخ سیستم‌های ثانویه، محقّقان همچنان در پی دستیابی به روابطی ساده و در عین حال قابل اطمینان برای اعمال در آیین‌نامه‌ها جهت استفاده طراحان هستند.

در گزارش حاضر، پس از شناسایی عوامل مختلف تأثیرگذار بر روی پاسخ سیستم‌های ثانویه بر اساس بررسی جامع مبانی نظری و روش‌های محاسبه نیروهای وارد بر این سیستم‌ها، تأثیر هریک از این عوامل بطور کمی از طریق مدلسازی‌ها و تحلیل‌های عددی تعیین شده است. برای این منظور، هفت ساختمان چند طبقه با تعداد طبقات ۴، ۶، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۵ از نوع قاب خمشی فولادی ویژه طراحی شده‌اند. از هر ساختمان یک قاب میانیِ معادل برای انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی انتخاب شده است. این قابها به صورت عددی مدلسازی و تحت اثر ۸ شتابنگاشت از زلزله‌های جهانی تحلیل شده‌اند. این انتخاب برای هر ساختمان به صورت منحصربفردی از یک بانک شتابنگاشتی مرجع ۷۰ تایی و به گونه‌ای انجام شده است که انتظار می‌رود پاسخ‌های لرزه‌ای غیرارتجاعی حاصل از آنها معادل با پاسخ‌های متناظر تحت اثر کل شتابنگاشت‌های بانک باشند. در تحلیل قابها، پاسخ هر طبقه ثبت شده است تا از این طریق بتوان به طیف‌های پاسخ متناظر در آن طبقه (Floor Response Spectra, FRS) دست

Analyzing the Seismic Behavior of Secondary Systems and Proposing Floor Design Response Spectra, Considering Primary Structure Inelastic Behavior and the Dynamic Interaction between Primary and Secondary Systems

Mohsen Ghafory-Ashtiany
Professor, Structural Engineering Research Center
ashtiany@iiees.ac.ir

Mehrdad Sadeghzadeh Nazari

Secondary Systems (Nonstructural Components) are the mechanical, electrical, telecommunications, and architectural systems as well as building contents connected to the main supporting structural framework. These systems are not considered as part of the load-bearing body of the main structure; yet, they may experience considerable seismic excitations. Tanks and chillers are examples of industrial secondary systems on an oil platform. Fuel piping in such facilities should remain operational in an earthquake to prevent fire. Hospital equipment and devices are other types of important secondary systems whose steady and continuous operation is critical during and after an earthquake event. The three major characteristics of these systems are their high vulnerability, their ability to cause damages (injuries and/or financial losses), and their ability to hamper the overall performance of important structures. Meanwhile, the economic losses due to damages to these systems can significantly surpass those caused by the main structure's damages.

In this report, following the identification of various parameters that affect the seismic responses of secondary systems based on a comprehensive study of related theoretical backgrounds and methodologies, the effect of each of the influential parameters is quantitatively determined through numerical modeling and analyses. For this purpose, seven multi-story Special steel moment-resisting buildings with 4, 6, 8, 12, 16, 20, and 25 floors have been designed. The frames have been numerically modeled and subjected to 8 Strong Ground Motions (SGMs) selected from worldwide earthquake events. For each analysis, the frame floor response has been monitored in order to obtain the corresponding Floor Response Spectra (FRS). The effects of the variations of secondary system dynamic characteristics like damping ratio and mass, as well as the primary structure damping ratio have been investigated. Moreover, the influence of the primary system material nonlinearity and its shear-type or

یافت. این روند برای طبقات مختلف تمامی ساختمانها انجام شده است. بدین ترتیب تأثیر تغییرات خصوصیات دینامیکی مختلف سیستم‌های اولیه و ثانویه از جمله نسبت جرم و میرایی مورد بررسی قرار گرفته است. به علاوه، نقش عواملی چون رفتار غیرارتجاعی سازه اولیه، رفتار واقعی یا برشی سیستم اولیه (صلبیت کف طبقات ساختمان)، و نیز اندرکنش دینامیکی سیستم‌های اولیه و ثانویه مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این، پاسخ‌های طیفی دقیق با مقادیر طیفی روش‌های ساده‌سازی شده در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای «یوروکد ۸» (Eurocode 8)، «آیین‌نامه بین المللی ساختمان» (International Building Code, IBC) و «آیین‌نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)» ایران مقایسه شده‌اند.

نتایج تحقیق حاکی از آن است که میرایی سیستم‌های اولیه و نیز ثانویه، نسبت جرم، اندرکنش دینامیکی سیستم‌های اولیه-ثانویه، رفتار غیرارتجاعی سازه اولیه، و میزان صلبیت کف طبقات از فاکتورهای اساسی هستند که عمدتاً در مطالعات و ضوابط آیین‌نامه‌ای نادیده گرفته می‌شوند، اما باید در تحلیل و طراحی لرزه‌ای سیستم‌های ثانویه به آنها توجه شود و در نظر گرفتن آنها کمک قابل توجه‌ای به افزایش دقت مطالعات خواهد کرد.

مقایسه طیف‌های طراحی لرزه‌ای پیشنهاد شده در روابط ساده‌سازی شده موجود در آیین‌نامه‌های «یوروکد ۸»، «آیین‌نامه بین‌المللی ساختمان» و «استاندارد ۲۸۰۰ ایران» با مقادیر حاصل از تحلیل‌های عددی در این تحقیق، برخی از کاستی‌های عمده این آیین‌نامه‌ها را آشکار ساخت. آیین‌نامه‌های مورد بررسی بر اساس فرض غالب بودن مود اول نوسانی سازه اصلی، که شکل آن را می‌توان با یک توزیع خطی تقریب زد، در پاسخ سیستم ثانویه استوارند و در نتیجه یک عبارت شامل توزیع خطی شتاب در ارتفاع سازه به روابط طراحی وارد شده است. اما این فرض تنها در مورد اجزای غیرسازه‌ای که دوره تناوبی نزدیک به دوره تناوب اصلی سازه اولیه داشته باشند، برقرار است. در نظر گرفتن اثر مودهای بالاتر در تحلیل باعث اصلاح و غیرخطی شدن نحوه توزیع شتاب طرح در ارتفاع سازه خواهد شد. به علاوه، حداکثر مقدار پاسخ‌های شتاب طیفی در هر طبقه، الزاماً در نواحی اطراف دوره تناوب اصلی سیستم اولیه به وقوع نمی‌پیوندند و در بسیاری از مواقع هم فرکانسی سیستم ثانویه با پریود نوسانی سایر مودهای سازه اولیه منجر به بروز پاسخ‌های شتاب شدیدتری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سیستم ثانویه، اجزای غیرسازه‌ای، رفتار غیرخطی (غیر-ارتجاعی)، اندرکنش دینامیکی، رفتار برشی، نسبت میرایی، صلبیت طبقه، نسبت جرم، آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای، طیف پاسخ طرح طبقه

combined-flexural-and-shear behavior have been studied as well as the dynamic interaction between the primary and the secondary systems. The exact spectral responses have also been compared to those proposed in three major seismic design codes: The *International Building Code (IBC)*, the *Eurocode 8*, and the *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (Standard No. 2800)*.

Results indicate that damping ratios of the primary and the secondary systems, secondary-to-primary-system mass ratio, dynamic interaction between the primary and the secondary systems, nonlinear behavior of the primary structure, and building floor rigidity are the key factors that should be considered in the seismic analysis and design of secondary systems. While taking them into account would significantly help improve the accuracy of decisions, they are often disregarded in studies and seismic design codes. Following, a summary of the outcomes of this research within the scope of the report assumptions will be presented.

Comparing the simplified seismic design spectral responses proposed in the *International Building Code (IBC)*, the *Eurocode 8*, and the *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings* to those obtained through numerical analyses in this research revealed some major shortcomings of these codes. The proposed codes provisions are based upon the dominance of the fundamental vibration mode of the primary structure, which can be approximated by a linear distribution, in secondary system responses. Based on this assumption, a term including a linear distribution of floor acceleration response along the building height is introduced to the design relations in these codes. However, such an assumption holds true only for secondary systems whose natural vibration periods are close enough to that of the primary structure. Considering the effect of higher vibration modes would change the floor design acceleration distribution along the building height into a modified nonlinear shape. In addition, not always does the fundamental vibration mode of the primary structure produce the highest spectral acceleration responses on every floor; in many cases, resonance of the secondary system with higher modes of the supporting structure could lead to stronger acceleration responses. Therefore, this research recommends that seismic design forces should be revised so as not to depend merely on the fundamental vibration period of the primary structure.

Keywords: Secondary system, Nonstructural component, Nonlinear (inelastic) behavior, Dynamic interaction, damping ratio, Floor flexibility, Seismic design code, Floor Design Response Spectra (FDRS)