توسعه متدولوژی ارزیابی ریسک فروریزش لرزه‌ای ساختمانهای فولادی میان مرتبه

ساسان عشقی
دانشیار پژوهشکده مهندسی سازه eshghi@iiees.ac.ir

محمدمهدی مداح

ساخت و ساز شهری در ایران در طی سه دهه اخیر توسعه زیادی پیدا کرده و ریسک لرزه‌ای به میزان قابل توجهی افزوده شده است. فروریزش سازه‌ای دلیل اصلی تلفات جانی و خسارات مالی و افزایش ریسک لرزه‌ای در زلزله‌های شدید است. لذا فروریزش لرزه‌ای یکی از مهم‌ترین ذغدغه‌های مراکز مدیریت ریسک و کانونهای تصمیم‌گیری است. سازه‌های فولادی میان مرتبه بخش مهمی از ساختمانهای متداول در ایران را تشکیل می‌دهند. قابهای خمشی با شکل‌پذیری متوسط و قابهای مهاربندی ضربدری معمولی دو سیستم لرزه بر اصلی هستند که در سازه‌های فولادی میان مرتبه رایج هستند. لذا ارزیابی ریسک فروریزش لرزه‌ای این نوع از سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، یک متدولوژی به منظور ارزیابی ریسک فروریزش لرزه‌ای این ساختمانها توسعه داده می‌شود و دو پارامتر مهم مؤثر بر ریسک فروریزش آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تحلیل های دینامیکی افزایشی یکی از دقیق‌ترین و قابل اعتمادترین روش‌های تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها هستند که به صورت متداول در فرایند ارزیابی فروریزش مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرچند این روش نیاز به تعداد زیادی تحلیل دینامیکی غیرخطی دارد تا به سطح فروریزش برسد. این امر مستلزم یک فرایند زمان بر با هزینه محاسباتی بالا است. در متدولوژی ارزیابی فروریزش توسعه داده شده، یک روش تقریبی مبتنی بر پوش‌اور به منظور برآورد پتانسیل فروریزش توسعه داده می‌شود. در این فرایند، یک معیار تعیین سطح آستانه فروریزش برای تحلیل‌های پوش اور ارائه شده و از برنامه SPO2IDA برای تعیین پتانسیل فروریزش استفاده می‌شود. همچنین یک روش جدید پوش اور نیز به منظور تخمین پارامترهای تقاضای مهندسی (EDP) مبتنی بر جابه‌جایی قابهای خمشی متوسط در سطوح مختلف عملکردی پیشنهاد شده است. این روش، پوش اور مودال بهینه شده نامگذاری گردیده است. با استفاده از نتایج این روش در سطح آستانه فروریزش، رهیافتی نیز به منظور کاهش تعداد گام های مورد نیاز برای برآورد پتانسیل فروریزش در تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) ارائه گردیده است. علاوه بر موارد ذکر شده، تأثیر دال بتن آرمه در سقف عرشه فولادی و تأثیر میانقاب با مصالح بتن سبک اتوکلاو شده (AAC) بر ریسک فروریزش لرزه‌ای قابهای مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، تعدای قاب خمشی فولادی متوسط و قاب مهاربندی ضربدری معمولی طبق ضوابط لرزه‌ای ایران طراحی و به عنوان ساختمانهای نمونه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این ساختمانها روی خاک سخت و دور از گسل در شهرتهران واقع شده‌اند. همچنین تعدادی از ساختمانهای فولادی فروریخته در زلزله سرپل ذهاب نیز به عنوان ساختمان نمونه استفاده گردیده‌اند. این ساختمانها به صورت دو بعدی در نرم‌افزار OpenSEES مدل شده‌اند.

نتایج و دستاوردهای این پژوهش شامل موارد ذیل می‌باشد:

Developing a Methodology for Seismic Collapse Probability Assessment of Midrise Steel Moment Resisting Frames

Sassan Eshghi
Associate Professor, Structural Engineering Research Center
eshghi@iiees.ac.ir

Mohammad Mahdi Maddah

The urban construction have been developed in three recent decades in Iran and the seismic risk is considerably increased. The structural collapse is the major reason of mortality, economic losses, and increasing the seismic risk in the severe earthquakes. Therefore, the collapse can be one of the most important problems of the seismic risk management centers and the decision makers. Mid-rise steel structures constitute a significant part of conventional buildings in Iran. Moment resisting frames with intermediate ductility (IMRFs), and ordinary concentrically braced frames (OCBFs) with X configuration are two principle seismic resisting systems which are widely used in the mid-rise steel structures. Therefore, the seismic collapse risk assessment of these types of structures has great importance. In this research, a methodology is developed for the seismic collapse risk assessment of these groups of structures. Also, the effects of two important analytical modeling parameters are investigated on their collapse risk.

Incremental dynamic analysis (IDA) is one of the most accurate and reliable methods of seismic structural analysis which has been widely used in the collapse assessment process. However, this method needs a significant number of nonlinear dynamic analysis to reach the collapse performance level, which conducts it to a time-consuming with high calculation cost method. In the proposed methodology, an approximate pushover-based method is developed in order to determine the collapse capacity of the structures. In this process, a collapse prevention (CP) criterion is proposed to be used in the pushover analysis, and the SPO2IDA program is utilized to determine the collapse capacity. Furthermore, a new modal pushover analysis is proposed to calculate the displacement-based responses of the IMRFs up to the CP performance level. This method is named optimized modal pushover analysis (OMPA). In this presented methodology, a novel approach is suggested to detect the collapse prevention (CP) performance level in the IDA process using the OMPA results. This approach is named pushover-based IDA (P-IDA). Moreover, this research investigates the effects of autoclaved aerated concrete (AAC) infill and

the composite action of the concrete slab and steel beams on the collapse risk parameters of the steel structures. In this study, a series of mid-rise IMRFs and OCBFS are designed according to Iranian seismic code and are used as case studies. These frames are located on the stiff soil and far from active faults in Tehran. Also, a series of collapsed steel buildings in the Sarpol-e Zahab earthquake is selected as case studies for implementation of the method. These framed are two-dimensionally modeled condition by the OpenSEES program.

The main results obtained from this study are presented below:

1) The proposed SPO2IDA-based methodology can evaluate the collapse capacity of the IMRFs and OCBFs by 4% to 7% and 8% to 10% errors, respectively. Also, the proposed methodology can predict the collapse risk of the mid-rise steel frames with high precision (about 5% to 8% errors) and reasonable speed.
2) The OMPA procedure can accurately estimate the displacement-based EDPs of the IMRFs in different performance level (about 4% to 6% disparity). Also, the results show that it is sufficient to consider only two modes in utilizing the suggested pushover method.
3) The suggested collapse prevention criterion can detect this performance level precisely. This criterion only depends on the MDoF structural characteristics and is related to occur severe failure in the structure.
4) The P-IDA approach is accurate enough to evaluate the collapse capacity of the IMRFs. This method can limit the required nonlinear dynamic analysis steps to 3 to 5, and can decrease the analysis time and calculation costs by simplify the IDA process.
5) The composite action of the concrete slab and the steel beams and panel zones increase the collapse risk of the steel IMRFs and must be considered in the analytical modeling.
6) The AAC infill walls increase the collapse risk of the IMRFs and should be considered in the collapse risk assessment process. However, the AAC infill decreases the collapse risk of the OCBFs.
7) The collapse assessment of two damaged buildings in Sarpol-e Zahab earthquake shows that the approximate collapse assessment methods could predict the collapse of these buildings before earthquake occurrence.

Some of the investigation results are presented in the following tables and figures.

Keywords: Seismic collapse probability assessment, Mid-rise steel moment resisting frames, Intermediate ductility, Collapse prevention level, Incremental Dynamic Analysis (IDA), OpenSEES

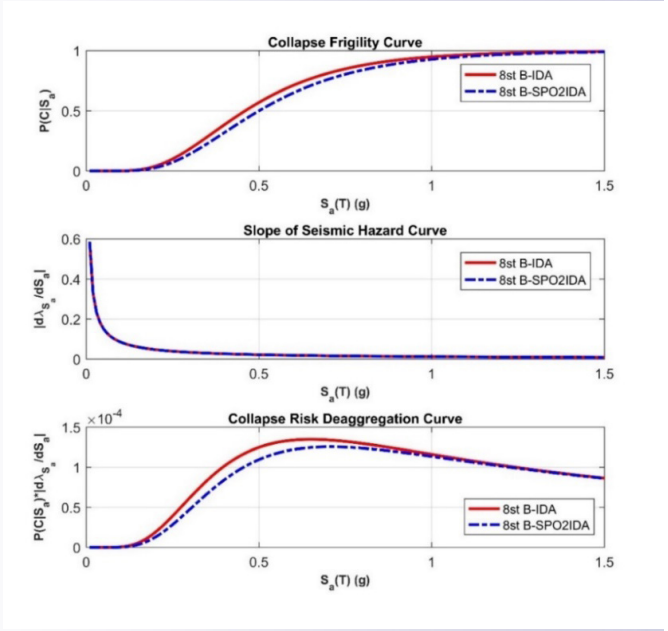
۱) متدولوژی پیشنهادی مبتنی بر SPO2IDA می‌تواند پتانسیل فروریزش قابهای خمشی و مهاربندی را به ترتیب با دقت ۴٪ تا۷٪ و ۸٪ تا ۱۰٪ ارائه کند. این روش می‌تواند ریسک فروریزش را با دقت مناسب ۵٪ تا ۸٪ تخمین بزند.
۲) معیار تعیین سطح آستانه فروریزش پیشنهادی می‌تواند این سطح را با دقت بالایی تخمین بزند. این معیار تنها به مشخصات سازه چنددرجه آزاد و وقوع خرابی شدید در سازه مرتبط است.
۳) روش پوش اور مدال بهینه شده می‌تواند پاسخ‌های مبتنی بر جابه‌جایی قابهای خمشی متوسط را با دقت ۴٪ تا ۶٪ برآورد کند. همچنین نتایج نشان داد که در نظرگرفتن دو مد نیز در تحلیل پوش‌اور پیشنهادی کفایت می‌کند.
۴) روش IDA مبتنی بر پوش اور پتانسیل فروریزش قابهای خمشی را با دقت خوبی تخمین می‌زند. این روش تعداد گامهای تحلیل IDA در فرایند ارزیابی فروریزش را به ۳ تا ۵ گام محدود کرده و زمان و هزینه محاسباتی را کاهش می‌دهد.
۵) عملکرد کامپوزیت دال بتن آرمه سقف‌های عرشه فولادی با تیرها و چشمه‌های اتصال در قابهای خمشی سبب افزایش ریسک فروریزش لرزه‌ای شده و باید در مدل نرم‌افزاری در نظرگرفته شوند.
۶) میانقاب AAC در قابهای خمشی ریسک فروریزش لرزه‌ای قابهای خمشی را افزایش می‌دهد و باید در فرایند ارزیابی فروریزش درنظرگرفته شوند. هرچند وجود این میانقاب‌ها ریسک فروریزش قابهای مهاربندی ضربدری را کاهش می‌دهد.
۷) ارزیابی فروریزش دو ساختمان فروریخته در زلزله ۱۳۹۶ سرپل ذهاب نشان می‌دهد روش‌های تقریبی ارزیابی فروریزش می‌توانستند فروریزش این ساختمانها را قبل از وقوع زلزله پیش‌بینی کنند.

تعدادی از نتایج تحقیقات صورت گرفته در اشکال و نمودارهای ذیل ارائه گردیده‌اند.

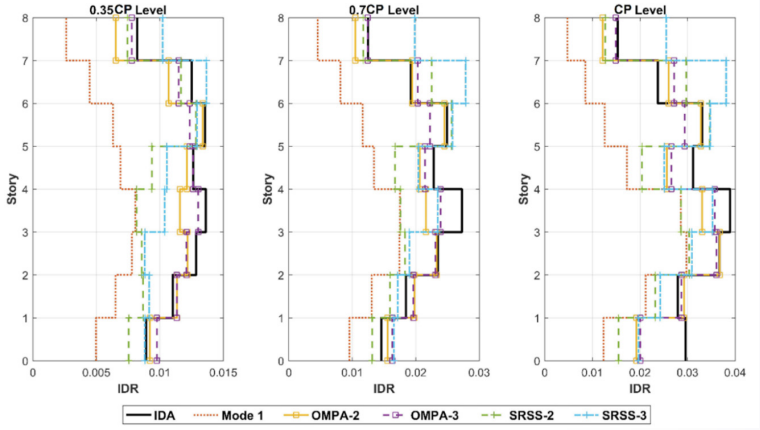
واژه‌های کلیدی: ارزیابی ریسک فروریزش لرزه‌ای، ساختمانهای فولادی میان مرتبه، سطح آستانه فروریزش(CP)، تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)، نرم‌افزار OpenSEES، زلزله۱۳۹۶سرپل‌ذهاب

جدول (۱): ریسک فروریزش قابهای خمشی ۵، ۸ و ۱۱ طبقه حاصل از متدولوژی در مقایسه با روش IDA

		T_1 (s)	S_c (g)	λ_c	$R(t)_{50}$	t_R	Error%
5st M	IDA	1.20	0.81	0.00014	0.67%	74.36	0.8%
	SPO2IDA	1.20	0.80	0.00014	0.68%	73.79	
8st M	IDA	1.75	0.48	0.00016	0.81%	61.80	6.8%
	SPO2IDA	1.75	0.54	0.00015	0.75%	66.33	
11st M	IDA	2.02	0.47	0.00015	0.76%	65.88	5.0%
	SPO2IDA	2.02	0.51	0.00014	0.72%	69.36	
					Average Error		4.2%



شکل (۱): مثالی از فرایند تعیین ریسک فروریزش برای قاب مهاربندی ۸ طبقه مورد مطالعه



شکل (۲): پروفیل دریفت طبقات قاب خمشی ۸ طبقه

جدول (۲): ریسک فروریزش قابهای مهاربندی ۵ و ۸ طبقه حاصل از متدولوژی در مقایسه با روش IDA

		T_1 (s)	S_c (g)	IDR_M	λ_c	$R(t)_{50}$	t_R
5st B	IDA	0.46	1.29	0.009	0.00010	0.49%	103
	SPO2IDA		1.16	0.012	0.00011	0.56%	90
8st B	IDA	0.94	0.46	0.012	0.00021	1.04%	48
	SPO2IDA		0.50	0.013	0.00020	0.99%	50

جدول (۳) مقادیر خطا در برآورد پروفیل دریفت و جابه‌جایی طبقات قابهای خمشی در مقایسه با تحلیل IDA

EDP	Level	Mode 1	SRSS-2	SRSS-3	OMPA-2	OMPA-3
Interstory Drift Profile	0.35 CP	18.4%	9.0%	9.5%	2.9%	2.0%
	0.70 CP	16.8%	11.7%	15.2%	5.0%	4.3%
	CP	17.1%	15.3%	18.8%	5.7%	5.0%
	Total Error	17.4%	12.0%	14.5%	4.5%	3.8%
Story Displacement Profile	0.35 CP	16.6%	9.5%	11.4%	4.5%	4.0%
	0.70 CP	15.3%	13.5%	18.9%	5.8%	5.6%
	CP	15.5%	17.0%	22.7%	7.2%	6.4%
	Total Error	15.8%	13.3%	17.7%	5.8%	5.3%