



Seismic fragility assessment of RC moment resisting frame buildings designed for different editions of Iranian seismic design code

A. Kalantari¹, H. Roohbakhsh² & A.R. Thaerian³

1. Associate professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran
2. Ph.D. student of earthquake engineering, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran
3. M.Sc. student of earthquake engineering, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

Abstract

Background and objective: Developing fragility and vulnerability functions are important tools in seismic reliability assessment of buildings and are widely used in regional seismic risk studies. To date sufficient studies for developing analytical fragility functions for Iranian code-conforming buildings have not been carried out. Performing such studies are necessary to assess the adequacy of Iranian seismic design codes.

Method: In this paper, by designing 4, 8 and 15 storey concrete reinforced concrete buildings based on the latest three editions of Iranian Standard 2800, seismic fragility functions will be estimated for the 9 different design results. For this purpose, after designing the structures defined in accordance with the procedures in Iranian Standard 2800 and the National Building Code, Chapter 9, a nonlinear model of each case was developed in the OpenSEES finite element software. Nonlinear material properties as well as P-Δ effects were considered in the models. Twenty-two reference ground motion records were used to perform the incremental dynamic analyses. The relative performance criteria according to publication No. 361 of the Planning and Budget Organization of Iran were employed in the evaluation of the results of nonlinear analyses.

Findings: The results were applied in statistical analysis to estimate the seismic fragility functions and corresponding parameters.

Conclusion: The results show the trend of change in the seismic fragility for the frames with different height and conforming different editions of the Standard No. 2800.

Keywords: RC Moment Resisting Frames, Code Conforming Buildings, Incremental Dynamic Analysis, Seismic Fragility

► **Citation (APA 6th ed.):** Kalantari A, Roohbakhsh H, Thaerian A.R. (2020, Spring). Seismic fragility assessment of RC moment resisting frame buildings designed for different editions of Iranian seismic design code. *Disaster Prevention and Management Knowledge Quarterly (DPMK)*, 10(1), 49-58.

مطالعه روند شکنندگی لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی بتن آرمه طراحی شده با

ویرایش‌های مختلف استاندارد ۲۸۰۰ ایران

افشین کلانتری^۱، حامد روحبخش^۲ و امیررضا طاهریان^۳

۱. دانشیار پژوهشگاه سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). A.kalantari@iiees.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران. h.roohbakhsh@iiees.ac.ir

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران. Amir.reza.taherian@stu.iiees.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: منحنی‌های شکنندگی و آسیب‌پذیری لرزه‌ای ابزار مهمی در بررسی قابلیت اطمینان لرزه‌ای ساختمان‌ها می‌باشد و کاربرد گسترده‌ای در مطالعات ریسک لرزه‌ای شهرها دارد. تاکنون مطالعات جامعی در زمینه ارزیابی شکنندگی لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی سازگار با آیین‌نامه در ایران انجام نشده است. انجام چنین مطالعاتی برای ارزیابی کفایت آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها ضروری است.

روش: در این مقاله با طراحی ساختمان‌های بتن آرمه با سیستم باربر جانبی با ۴، ۸ و ۱۵ طبقه، بر اساس سه ویرایش آخر استاندارد ۲۸۰۰ ایران، توابع شکنندگی لرزه‌ای برای نتایج طراحی برای ۹ حالت مختلف ارائه خواهد شد. به این منظور پس از طراحی سازه‌های تعریف شده مطابق مبانی استاندارد ۲۸۰۰ ایران و مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان، یک قاب مینا از هر حالت در نرم‌افزار المان محدود OpenSEES مدل‌سازی شد. از ۲۲ شتاب‌نگاشت مرجع برای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی فزاینده استفاده شد. معیار بیشینه جابجایی نسبی طبقات برای دو حالت حدی ایمنی جانی و آستانه فروریزش، مطابق نشریه شماره ۳۶۱ سازمان برنامه و بودجه در ارزیابی تحلیل‌های غیرخطی فزاینده مورد استفاده قرار گرفت. یافته‌ها: با استفاده از تحلیل آماری نتایج تحلیل‌های غیرخطی فزاینده مقادیر شتاب میانه شکنندگی و انحراف معیار برای دو حالت حدی مورد نظر، برای هر کدام از مدل‌های مورد بررسی به دست آمد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان‌دهنده کاهش شکنندگی لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی بتنی طراحی شده با ویرایش‌های جدیدتر استاندارد ۲۸۰۰ می‌باشد. **کلیدواژه‌ها:** ساختمان‌های بتن آرمه قاب خمشی، ساختمان‌های سازگار با آیین‌نامه، تحلیل دینامیکی فزاینده، شکنندگی لرزه‌ای

◀ **استناد فارسی (شیوه APA، ویرایش ششم ۲۰۱۰):** کلانتری، افشین، روحبخش، حامد، طاهریان، امیررضا. (بهار، ۱۳۹۹). مطالعه روند شکنندگی لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی بتن آرمه طراحی شده با ویرایش‌های مختلف استاندارد ۲۸۰۰ ایران. *فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران*، ۱۰ (۱)، ۴۹-۵۸.

مقدمه

امروزه در اکثر کشورهای لرزه خیز، مطالعات ریسک لرزه‌ای با هدف تخمین خسارات و تلفات ناشی از زلزله برای کمک به مدیریت بحران و پاسخ سریع به سانحه انجام می‌شود. برای ارزیابی ریسک لرزه‌ای در کشور، نخست نیاز است که در کنار تحلیل خطر لرزه‌ای، اجزای در معرض زلزله و میزان آسیب‌پذیری آنها را بشناسیم. می‌توان گفت که ساختمان‌های شهری با توجه به فراوانی آنها در شهر و همچنین جمعیت انسانی سکونت یافته در آنها، مهم‌ترین اجزاء در معرض زلزله در شهرها به حساب می‌آیند. از این‌رو مطالعه گونه‌های مختلف ساختمانی موجود در ایران و ارزیابی آسیب‌پذیری هر کدام از آنها اهمیت بسیار بالایی در فرایند ارزیابی ریسک لرزه‌ای دارد. به دلیل وجود سازه‌های منطبق با ویرایش‌های مختلف آیین‌نامه‌ها، رفتار مورد انتظار سازه‌ها در برابر زلزله‌ها متفاوت خواهد بود. اطلاع از این رفتار برای برنامه‌ریزی مدیریت ریسک و بحران این مناطق مهم و اساسی است. با علم به تفاوت‌های موجود در میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌های مختلف با زمان اجرای مختلف، مطالعات پهنه‌بندی ریسک، شناخت مناطق آسیب‌پذیرتر و پیش‌بینی و اجرای برنامه‌های آمادگی در این مناطق با دقت و کیفیت بیشتری صورت خواهد پذیرفت. این مقاله با این رویکرد سعی دارد اطلاعات پایه مورد استفاده در این مطالعات را تدقیق نموده و به کیفیت مطالعات و برنامه‌های مدیریت ریسک و بحران بیفزاید.

پیش از این مطالعات گسترده‌ای راجع به ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای در ایالات متحده آمریکا و اتحادیه اروپا انجام شده که بر اساس آنها به رویکردهایی مناسب در ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها دست یافته شده است. این گونه روال‌ها اغلب به توسعه‌ی توابعی برای بیان احتمال وقوع آسیب‌سازه بر مبنای شدت لرزه‌ای می‌انجامند. این توابع که به توابع شکنندگی لرزه‌ای شناخته می‌شوند، در این موضوعات مورد مطالعات فراوانی قرار گرفته است. روش‌ها و رویکردهای مورد توجه برای نیل به این شاخص در گزارش‌های فنی معتبر ارائه شده‌اند (سازمان مدیریت بحران آمریکا ۱۹۹۹، مونرو و همکاران ۲۰۰۶، لاگومارسینو و همکاران ۲۰۰۶).

توابع شکنندگی لرزه‌ای سازه‌ها به سه روش مبتنی بر قضاوت، تجربی و تحلیلی برآورد می‌گردند. همچنین امکان تدوین این توابع

به صورت ترکیبی از روش‌های یاد شده نیز وجود دارد (روزتو و النشای ۲۰۰۳). منشاء اطلاعات مورد استفاده در این روش‌ها بسته به روش، اغلب از نظرات کارشناسی، اطلاعات آسیب ثبت شده پس از زلزله‌ها و شبیه‌سازی عددی و تحلیلی از سازه‌ها یا ترکیبی از این موارد است.

روش

در روش‌های تحلیلی برای به دست آوردن توابع شکنندگی لرزه‌ای، میزان آسیب با افزایش سطح بار اعمالی به سازه برآورد می‌شود. ساکسنا و همکاران (۲۰۰۰) و روزتو و النشای (۲۰۰۳) به عنوان نمونه‌هایی به محاسبه توابع شکنندگی به این روش پرداخته‌اند. روش‌های مختلفی نیز برای مدل‌سازی و تحلیل سازه از مدل‌های ارتجاعی سیستم‌های معادل یک درجه آزاد (مسلّم و همکاران، ۱۹۹۷) تا روش‌های بارافزون و روش‌های تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی (سینگال و کیرمجدیان، ۱۹۹۷)، در این رویکرد مورد توجه محققان قرار گرفته است. در همین راستا، در مورد ساختمان‌های بتن‌آرمه نیز مطالعات قابل توجهی صورت گرفته که می‌توان از آن جمله به مطالعات گولت و همکاران (۲۰۰۷)، هسلتون (۲۰۰۷)، لیل (۲۰۰۸) و هسلتون و همکاران (۲۰۱۱) اشاره نمود. مدل‌های مورد استفاده از نظر مشخصات فنی و ابعادی، تأثیر قابل توجهی بر توابع یاد شده گذاشته و تفاوت‌های زیادی را بر تحلیل‌های مبتنی بر این توابع خواهد گذاشت (اشتراسر و همکاران، ۲۰۰۸). ویرایش‌های مختلف آیین‌نامه‌های طراحی، اغلب سازه‌های متفاوتی را به عنوان خروجی مطالعات طراحی نتیجه می‌دهند. در طی ۳۰ سال گذشته ۴ ویرایش از استاندارد ۲۸۰۰ ایران با موضوع آیین‌نامه محاسبات ساختمان‌ها در برابر زلزله تدوین شده است. در حالی که توجه و مطالعات زیادی در زمان تدوین هر یک از ویرایش‌ها صورت گرفته، تابحال برای سازه‌های متفاوت منتج از طراحی بر مبنای هر یک از این ویرایش‌ها، با نگاه احتمالاتی به منظور ارائه‌ی تأثیر این به روز رسانی‌ها بر کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها صورت نگرفته است. به بیان دیگر، در حالی که این سند فنی به طور مرتب و با توجه به شرایط فنی به روز رسانی شده است اما، مبنای قابلیت اطمینان

به منظور طراحی، مدل‌سازی کاملی به صورت سه بعدی از یک سازه با تعداد ۴ دهانه در هر امتداد صورت گرفته است. مبانی طراحی ساختمان‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌است.

جدول ۱: موضوع و مشخصات انتخابی مربوط در مدل‌سازی و طراحی

موضوع	مشخصات
ضوابط بارگذاری	ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران و مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان ایران
طراحی سازه	مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان ایران
شرایط نامنظمی	سازه منظم
لرزه‌خیزی ساختگاه	منطقه با خطر نسبی بسیار زیاد ($A=0.35$)
نوع خاک ساختگاه	خاک نوع دو ($V_{s30}=375-750$ m/s)
سیستم باربر جانبی	سیستم قاب خمشی بتن‌آرمه ویژه ($R=7/5$)
بار مرده طبقات	150 kg/cm^2
بار زنده	200 kg/cm^2

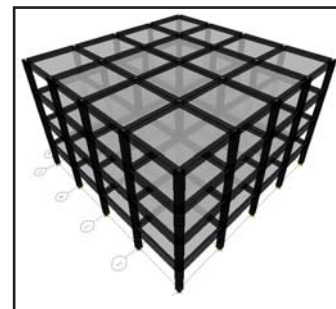
همان‌گونه که ذکر شد، برای برآورد نیروی جانبی ناشی از زلزله، بارگذاری لرزه‌ای مدل مورد نظر برای طراحی بر اساس سه ویرایش آخر از استاندارد شماره ۲۸۰۰ ایران انجام گرفت. ویرایش‌های دوم، سوم و چهارم از استاندارد شماره ۲۸۰۰ ایران به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۸، ۱۳۸۴ و ۱۳۹۴ منتشر و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در هر ویرایش از استاندارد مذکور تغییراتی در روال محاسبات ساختمان در برابر زلزله منظور گردیده است. در این مقاله به طور مشخص به تغییرات ناشی از نحوه محاسبه ضریب برش پایه و پارامترهای آن توجه گردیده است. خلاصه این تغییرات در جدول ۲ نمایش داده شده است.

ساختمان‌های طراحی شده بر مبنای این استاندارد در ویرایش‌های مختلف تا به حال مورد توجه قرار نگرفته است. این مقاله به ارائه‌ی مبانی شکنندگی لرزه‌ای مورد نیاز برای محاسبه قابلیت اطمینان ساختمان‌های بتن‌آرمه طراحی شده بر مبنای ویرایش‌های مختلف استاندارد ۲۸۰۰ ایران می‌پردازد. نتایج مطالعه روند تغییرات ایجاد شده در شکنندگی، آسیب‌پذیری لرزه‌ای و ریسک سازه‌های طراحی شده بر اساس این استاندارد در مناطق با لرزه‌خیزی بسیار زیاد را نمایش می‌دهد و اثرات تغییر ارتفاع سازه بر پارامتر شکنندگی لرزه‌ای به عنوان عامل تعیین‌کننده در این موضوعات را نمایش خواهد داد.

یافته‌ها

سازه‌های مورد نظر - مبانی طراحی

همان‌گونه که ذکر شد، اثر ارتفاع در این مطالعه با بررسی رفتار سه ساختمان با ارتفاع ۴، ۸ و ۱۵ طبقه مورد مطالعه قرار گرفته است. یک نمونه از مدل ۳ بعدی اولیه سازه ۴ طبقه در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: یک نمونه از مدل ۳ بعدی اولیه سازه ۴ طبقه

جدول ۲: پارامتر ضریب بازتاب مطابق با سه ویرایش اخیر استاندارد شماره ۲۸۰۰ ایران

ویرایش ۲	ویرایش ۳	ویرایش ۴
$B = 2.5 \left(\frac{T_0}{T} \right)^{2/3}$	$B = \begin{cases} 1 + s \left(\frac{T}{T_0} \right) & 0 \leq T \leq T_0 \\ 1 + s & T_0 \leq T \leq T_s \\ (s + 1) \left(\frac{T_s}{T} \right)^{2/3} & T \geq T_s \end{cases}$	$B = B_1 N$ $B_1 = \begin{cases} S_0 + (S - S_0 + 1) \left(\frac{T}{T_0} \right) & 0 < T < T_0 \\ S + 1 & T_0 < T < T_s \\ (S + 1) \left(\frac{T_s}{T} \right) & T > T_s \end{cases}$

نوع دو و منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد در نظر گرفته شده است. پارامترهای طراحی مدل‌های نمونه در جدول ۳ نمایش داده شده است.

که در آن T دوره تناوب مود اصلی ارتعاش سازه است، T_s و T_0 پارامترهای مربوط به خاک بستر بوده و N ضریب اصلاح طیف است. در طراحی سازه‌های مورد نظر، در ساختگاه با خاک

جدول ۳: پارامترهای طراحی مدل‌های نمونه مورد استفاده در پژوهش

ضریب برش پایه	ضریب رفتار	ضریب اهمیت	شتاب طیفی (g)	دوره تناوب تجربی (ثانیه)	ویرایش	
۰/۱۴	۷/۵	۱/۲	۰/۸۸	۰/۵۰	ویرایش ۴	طبقه ۴
۰/۱۱	۱۰	۱/۲	۰/۸۸	۰/۵۰	ویرایش ۳	
۰/۰۳	۱۰	۱	۰/۳۱	۰/۴۸	ویرایش ۲	
۰/۰۸	۷/۵	۱/۲	۰/۵۱	۰/۹۴	ویرایش ۴	طبقه ۸
۰/۰۷	۱۰	۱/۲	۰/۵۷	۰/۹۴	ویرایش ۳	
۰/۰۲	۱۰	۱	۰/۲۰	۰/۸۱	ویرایش ۲	
۰/۰۵	۷/۵	۱/۲	۰/۳۲	۱/۶۷	ویرایش ۴	طبقه ۱۵
۰/۰۵	۱۰	۱/۲	۰/۳۹	۱/۶۷	ویرایش ۳	
۰/۰۲	۱۰	۱	۰/۱۶	۱/۳	ویرایش ۲	

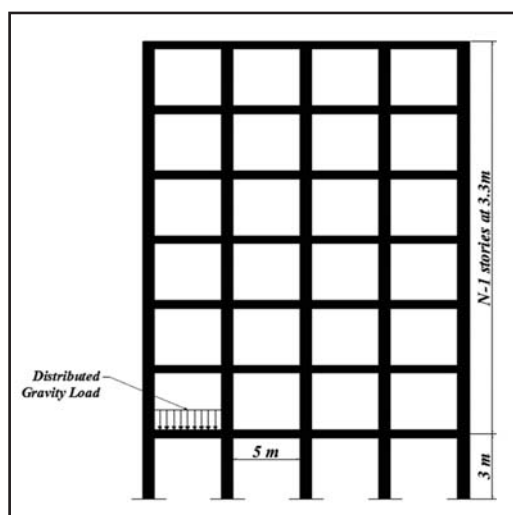
شکل نتایج مقاطع تیر، ستون و دیوار در هر یک از سه قاب در ترازهای مختلف ارتفاعی برای سازه طراحی شده در جدول ۴ معرفی شده‌اند. در مدل‌سازی نرم‌افزار OpenSEES مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس نتایج طراحی، مشخصات مقاطع یک قاب از هر مدل در جدول ۳ نمایش داده شده است. نام هر قاب با یک عدد سه رقمی شامل دو رقم اول معرف تعداد طبقه و عدد ۴ به عنوان ویرایش ۴ استاندارد شماره ۲۸۰۰ ایران نمایش داده شده است.

مدل‌های عددی

به منظور مطالعه عددی مورد نظر، سه قاب چهار دهانه به ترتیب ۴، ۸ و ۱۵ طبقه در نظر گرفته شد. شکل ۲ الگوی قاب دو بعدی N طبقه مورد استفاده در این مطالعه را نمایش می‌دهد.

جدول ۴: مشخصات مقاطع تیر و ستون در قاب‌های ۰۴۴، ۰۸۴ و ۱۵۴

		ستون			تیر		
قاب	طبقه	مقطع	آرماتور طولی (بالا و پایین)	آرماتور عرضی	مقطع	آرماتور طولی (بالا و پایین)	آرماتور عرضی
044	Story 1-2	45×45	16φ22	Φ10@12.5	35×35	4φ20	Φ10@12.5
	Story 3-4	35×35	8φ22	Φ10@12.5	35×35	4φ20	Φ10@12.5
084	Story 1-2	50×50	12φ22	Φ10@15	35×35	3φ16	Φ10@15
	Story 3-5	40×40	8φ20	Φ10@15	35×35	3φ16	Φ10@15
	Story 6-8	35×35	8φ18	Φ10@15	35×35	3φ16	Φ10@15
154	Story 1-3	60×60	20φ24	Φ10@15	45×45	4φ20	Φ10@15
	Story 4-9	50×50	12φ22	Φ10@15	45×45	4φ20	Φ10@15
	Story 10-15	40×40	12φ20	Φ10@15	45×45	4φ20	Φ10@15



شکل ۲: الگوی قاب دو بعدی N طبقه مورد استفاده در این مطالعه

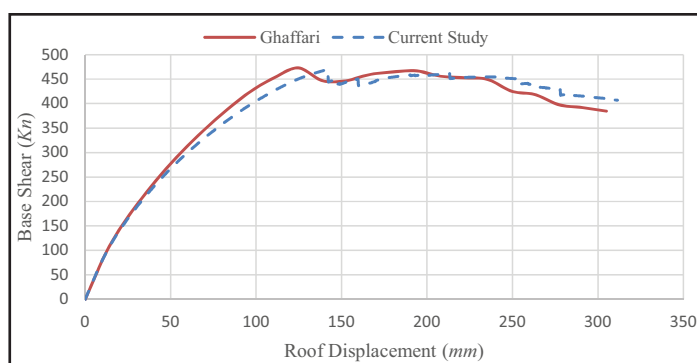
رفتار بتن محصور، مدل رفتاری ارائه شده توسط مندر و همکاران (۱۹۸۸) به کار رفت. بر اساس این مدل، رفتار بتن محصور به شرایط محصورشدگی مقطع بستگی دارد. مدول الاستیسیته بتن E_c ، برای بتن با وزن متعارف با استفاده از رابطه محاسبه شد. در این رابطه مقاومت فشاری بتن بر حسب MPa است.

صحت سنجی مدل

در این پژوهش برای صحت سنجی مدل قاب خمشی بتنی از یکی از قاب‌های پایان‌نامه غفاری (۱۳۹۱) استفاده شده است. قاب انتخاب شده، قاب شماره ۱ در پایان‌نامه غفاری می‌باشد که یک قاب دو بعدی چهار طبقه بتنی با ارتفاع طبقات ۳/۳ متر و پهنای دهانه ۵ متر می‌باشد. مقاطع تیر و ستون این قاب به صورت یکسان و به ابعاد ۴۰۰×۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد. مقایسه نتایج تحلیل بار افزون برای قاب ۴ طبقه (ویرایش ۳) مورد استفاده در این پژوهش و پژوهش غفاری (۱۳۹۱) در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: مقایسه نتایج تحلیل بار افزون با نتایج غفاری (۱۳۹۱)

خطا (%)	غفاری	پژوهش حاضر	جابجایی بام (mm)
۲/۱۲	۳۰۴/۹۲	۳۱۱/۳۹	
۵/۸۱	۳۸۴/۵۹	۴۰۶/۹۳	برش پایه (KN)



شکل ۳: مقایسه منحنی ظرفیت سازه در مدل مورد استفاده در پژوهش موجود با نتایج غفاری (۱۳۹۱)

انتخاب شتاب نگاشت‌های لرزه‌ای و معیار شدت لرزه‌ای

در این پژوهش برای توسعه منحنی‌های شکنندگی تحلیلی از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده استفاده شده است (وامواتسیکوس و کرنل ۲۰۰۱). در این روش تعداد قابل قبولی شتاب نگاشت بر

نرم‌افزار OpenSEES برای مدل‌سازی قاب‌های بتن‌آرمه خمشی و سپس تحلیل‌های مورد نظر به کار گرفته شد. مدل المان محدود سازه در نرم‌افزار ایجاد گردید و برای تعریف مشخصات مقطع از المان‌های فایبر استفاده شد. رفتار خمشی اعضای تیر و ستون به صورت پلاستیسیته توزیع شده در نظر گرفته شد. میرایی کلی سازه برای تحلیل‌ها با مدل رایلی و به میزان ۵٪ منظور گردید و اثر $P-\Delta$ در تحلیل‌ها در نظر گرفته شد. المان‌تیر-ستون غیرخطی^۱ برای اعضا در نظر گرفته شد. روابط حاکم بر این المان بر مبنای نیرویی و با پلاستیسیته توزیع شده است. هر المان به ۵ قسمت انتگرال‌گیری داخلی تقسیم شد. از اندرکنش خاک و سازه صرف‌نظر شده پای ستون‌ها، در محل پایه بدون امکان دوران و جابجایی و به صورت گیردار در نظر گرفته شد. مشخصات مصالح به شرح زیر برای تعریف مشخصات بتن پوشش و هسته و همچنین آرماتورها استفاده شد.

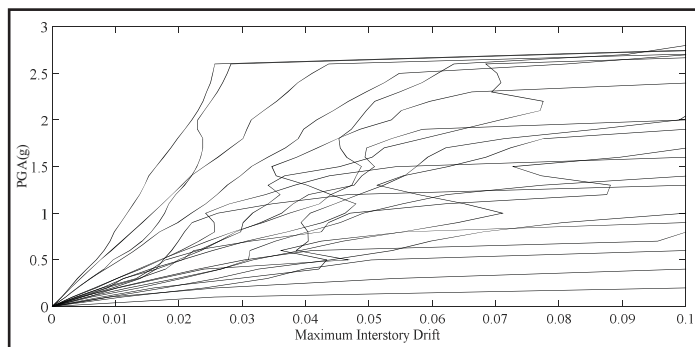
مشخصات مصالح

در این مطالعه برای مدل‌سازی بتن محصور هسته از مدل رفتاری پوپویوچ (۱۹۷۳) با در نظر گرفتن زوال چرخه‌ای سختی اولیه مصالح، بر اساس مطالعه کارسان و جیرسا (۱۹۶۹) استفاده شد.

بتن محصور هسته و نامحصور پوشش با استفاده از مصالح Concrete04 مدل شدند. این نوع مصالح از مقاومت کششی بتن صرف‌نظر می‌کند. آرماتورهای طولی با رفتار تنش-کرنش دوخطی و با در نظر گرفتن سخت‌شدگی کرنشی توسط مصالح Steel02 مدل شدند. امکان در نظر گرفتن گسیختگی فولاد در این مصالح وجود ندارد. در این مطالعه در نظر گرفتن آسیب‌های ناشی از وقوع دامنه‌های کرنش زیاد و همچنین حفظ آسیب‌ها طی چرخه‌های ناشی از رویداد اول مهم است. بنابراین از مصالح MinMax در کنار مصالح Steel02 استفاده شد تا گسیختگی مصالح فولاد و عدم بازگشت آن به چرخه‌های بار در ادامه بارگذاری در نظر گرفته شود. مقاومت تسلیم فولاد ۴۰۰ MPa و شیب بخش سخت‌شدگی کرنشی برابر ۰/۰۱ شیب اولیه فرض شد. برای بتن نامحصور پوشش، مقاومت فشاری ۲۸ MPa و کرنش ۰/۰۰۲ تحت تنش حداکثر و کرنش ۰/۰۰۵ در تسلیم منظور گردید. برای شبیه‌سازی

1. nonlinear beam-column elements

جابه‌جایی نسبی بین طبقات در مقابل بیشینه شتاب زمین (PGA) برای هر یک از شتاب نگاشت‌های مورد استفاده رسم شده است.



شکل ۴: منحنی‌های حاصل از تحلیل دینامیکی فزاینده بر روی قاب ۸ طبقه (ویرایش ۲)

شکندگی لرزه‌ای

شکندگی لرزه‌ای یا fr ، معیاری برای بیان شرایط آسیب‌پذیری و عملکرد لرزه‌ای یک سازه به روش احتمالاتی است. این معیار با انتخاب یک شاخص عملکرد بر اساس یکی از پارامترهای تقاضای مهندسی (EDP) مانند جابه‌جایی نسبی طبقه، مقدار کرنش یا مانند آنها، احتمال فراگذشت این شاخص از مقدار حدی (LS) تعریف شده برای سطوح عملکرد مختلف را به ازای مقادیر شدت لرزه‌ای (IM) مبنا بیان می‌کند. به بیان ریاضی:

$$fr = P(EDP > LS | IM)$$

بر اساس مشاهدات موجود، با توجه به ماهیت عوامل دارای عدم قطعیت در رویداد زلزله و رفتار سازه، مقدار شکندگی لرزه‌ای به کمک توابع توزیع احتمال نرمال یا لوگ-نرمال قابل توصیف است. بر این اساس، اطلاعات حاصل از مشاهدات یا محاسبات آماری به روش‌های تحلیلی یا تجربی می‌تواند تابع شکندگی لرزه‌ای را به صورت زیر، بر اساس پارامترهای میانگین شدت لرزه‌ای و انحراف معیار داده‌ها به صورت زیر توصیف نمود [۱۰]:

$$fr(x) = \Phi\left(\frac{\ln(\frac{x}{\mu})}{\beta}\right)$$

در این رابطه Φ تابع توزیع تجمعی لوگ-نرمال، μ میانگین و β انحراف معیار لگاریتمی توزیع و x پارامتر شدت لرزه‌ای هستند.

معیار شکست (حالت حدی)

معیارهای پذیرش مورد نظر در این مطالعه بر اساس حالات حدی ارائه شده در نشریه شماره ۳۶۱ سازمان برنامه و بودجه انتخاب شده

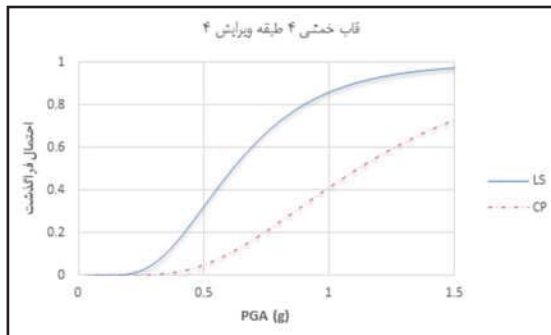
حسب یک معیار شدت لرزه‌ای (مانند PGA) مقیاس می‌شود و شدت آن با یک مقدار مشخص افزایش می‌یابد و در هر سطح تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی سازه انجام می‌شود تا زمانیکه پاسخ سازه به حد تعیین شده برای فروریزش برسد. با استفاده از این روش می‌توان عملکرد سازه را در صورت رخداد زلزله با یک شدت مشخص به صورت احتمالاتی تعیین کرد.

برای این منظور از ۲۲ شتاب نگاشت حوزه دور ارائه شده توسط FEMA P-695 (۲۰۰۹) استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۶ آمده است. برای مقیاس کردن شتاب نگاشت‌ها از معیار شدت لرزه‌ای بیشینه شتاب زمین (PGA) استفاده شده است.

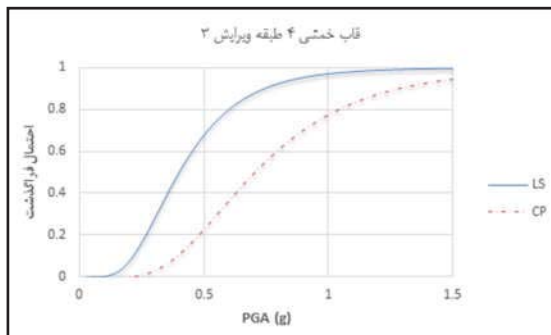
جدول ۶: مشخصات نگاشت زلزله‌های مورد استفاده در این مطالعه

شماره	نام رویداد	سال	بزرگا	فاصله	PGA (g)
1	Northridge	1994	6.7	13.3	0.52
2	Northridge	1994	6.7	26.5	0.48
3	Duzce, Turkey	1999	7.1	41.3	0.82
4	Hector Mine	1999	7.1	26.5	0.34
5	Imperial Valley	1979	6.5	33.7	0.35
6	Imperial Valley	1979	6.5	29.4	0.38
7	Kobe, Japan	1995	6.9	8.7	0.51
8	Kobe, Japan	1995	6.9	46	0.24
9	Kocaeli, Turkey	1999	7.5	98.2	0.36
10	Kocaeli, Turkey	1999	7.5	53.7	0.22
11	Landers	1992	7.3	86	0.24
12	Landers	1992	7.3	82.1	0.42
13	Loma Prieta	1989	6.9	9.8	0.53
14	Loma Prieta	1989	6.9	31.4	0.56
15	Manjil, Iran	1990	7.4	40.4	0.51
16	Superstition Hills	1987	6.5	35.8	0.36
17	Superstition Hills	1987	6.5	11.2	0.45
18	Cape Mendocino	1992	7.0	22.7	0.55
19	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.6	32	0.44
20	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.6	77.5	0.51
21	San Fernando	1971	6.6	39.5	0.21
22	Friuli, Italy	1976	6.5	20.2	0.35

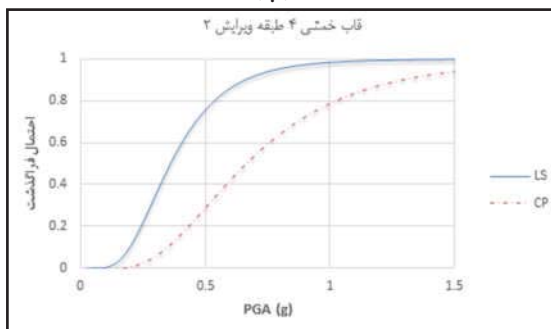
نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده با استفاده از شتاب نگاشت‌های مورد استفاده برای قاب ۸ طبقه طراحی شده بر مبنای ویرایش ۲ استاندارد ۲۸۰۰ در شکل ۴ آمده است. در این شکل مقادیر بیشینه



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۵: منحنی شکنندگی لرزه‌ای قاب ساختمان ۴ طبقه طراحی شده به ترتیب بر مبنای ویرایش‌های (الف) چهارم (ب) سوم و (پ) دوم از استاندارد شماره ۲۸۰۰ ایران

مطابق نتایج حاصل از منحنی‌های نمایش داده شده در شکل ۵، احتمال رویداد حدی ایمنی جانی در قاب ۸ طبقه طراحی شده بر مبنای ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ در صورت رخداد زلزله طرح با بیشینه شتاب ۰/۳۵ (به عنوان شتاب مبنای طرح در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بسیار زیاد) برابر است با حدود ۰/۱۱. این مقدار در قاب طراحی شده بر مبنای ویرایش سوم، ۰/۴ و ویرایش دوم برابر با ۰/۵ به دست آمده است.

این نتایج برای حالت حدی آستانه‌ی فروریزش برای این قاب برای ویرایش‌های چهارم، سوم و دوم به ترتیب برابر با ۰/۰۰۹، ۰/۰۶ و ۰/۱۰ است.

است. در این نشریات مقدار بیشینه جابه‌جایی نسبی بین طبقات برای دو حالت حدی ایمنی جانی و آستانه فروریزش به ترتیب با ۲٪ و ۴٪ برابر است. بر این اساس، در بررسی نتایج تحلیل‌های غیرخطی فزاینده و مقدار بیشینه جابه‌جایی نسبی بین طبقات به عنوان پارامتر تقاضای مهندسی تعریف و فراگذشت آن از دو معیار یاد شده به عنوان شکست تعریف شده است.

نتایج تحلیل‌های شکنندگی

در ادامه مقادیر شکنندگی لرزه‌ای برای قاب‌های مورد نظر برآورد شد. به شکل ساده در این مطالعه مراحل زیر در برآورد شکنندگی لرزه‌ای و تابع مربوط به آن پی گرفته شد:

- پس از تعریف سازه‌های مورد نظر و شاخص‌های ارزیابی عملکرد، مدل سازه با در نظر گرفتن رفتار غیرارتجاعی در نرم‌افزار OpenSEES ایجاد شد.

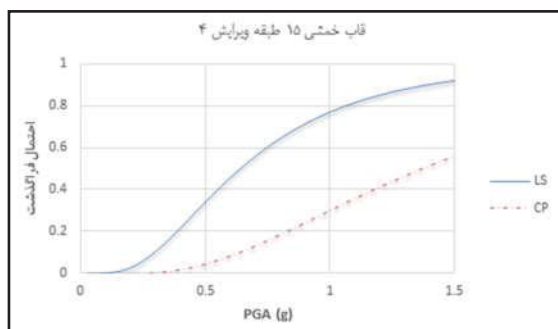
- با انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر، تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده انجام شد.

- در این مطالعه با توجه به ماهیت رفتار لرزه‌ای سازه و تأثیر شتاب در آن، بیشینه شتاب زمین (PGA) به عنوان معیار شد لرزه‌ای (IM) تعیین شد.

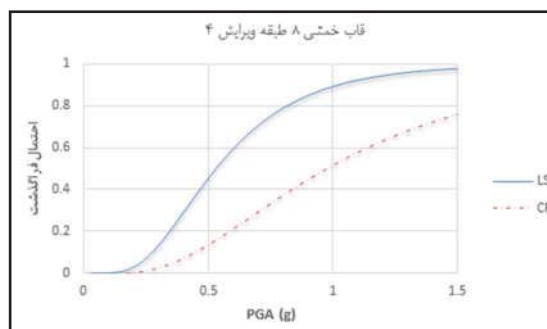
- بیشینه شتاب زمین مربوط به رویداد حالت حدی (به عنوان مثال LS) برای هر نگاشت به دست آمد. (۲۰ مقدار به ازای ۲۰ نگاشت در هر حالت حدی)

- سپس مقدار میانگین μ و انحراف معیار β برای مقادیر بیشینه شتاب زمین به دست آمده در مرحله قبل محاسبه شد.

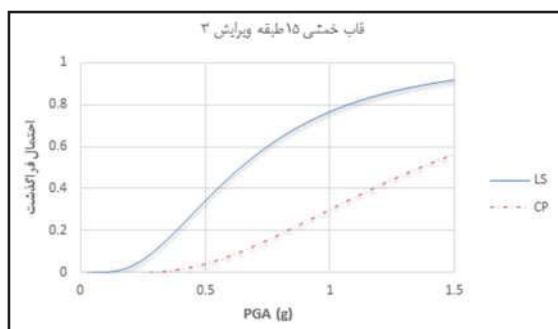
- تابع Φ طبق تعریف ارائه شده برای هر حالت برآورد گردید. نتایج حاصل از این محاسبات در شکل‌های ۳ تا ۵ به ترتیب برای قاب‌های ۴، ۸ و ۱۵ طبقه ارائه شده است. هر شکل دارای سه نمودار بوده که نتایج را برای (الف) ویرایش ۴، (ب) ویرایش ۳ و (پ) ویرایش ۲ از استاندارد ۲۸۰۰ ایران ارائه نموده است. در هر نمودار مقادیر شکنندگی به ازای دو معیار عملکرد ایمنی جانی و آستانه‌ی فروریزش ترسیم شده است. مقادیر معیار جابه‌جایی نسبی متناظر با هر یک از سطوح یاد شده در بخش قبل معرفی شده‌اند.



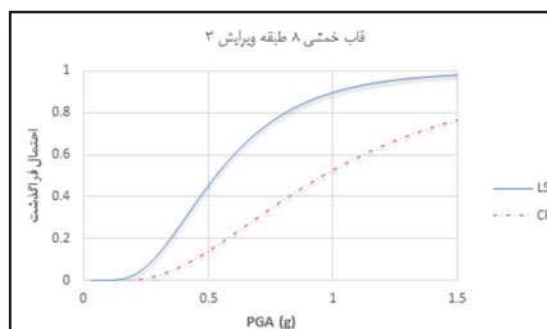
(الف)



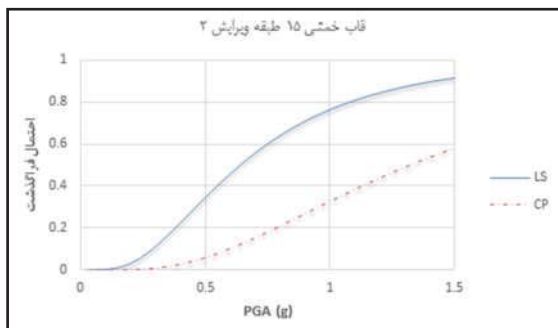
(الف)



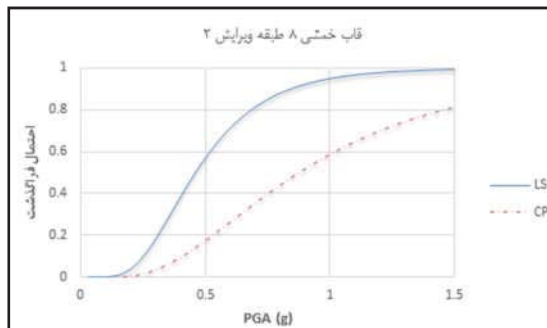
(ب)



(ب)



(پ)



(پ)

شکل ۷: منحنی شکنندگی لرزه‌ای قاب ساختمان ۱۵ طبقه طراحی شده به ترتیب بر مبنای ویرایش الف (چهارم ب) سوم و پ) دوم از استاندارد شماره ۲۸۰۰ ایران

شکل ۶: منحنی شکنندگی لرزه‌ای قاب ساختمان ۸ طبقه طراحی شده به ترتیب بر مبنای ویرایش الف (چهارم ب) سوم و پ) دوم از استاندارد شماره ۲۸۰۰ ایران

نتایج تحلیل‌های شکنندگی برای قاب ۱۵ طبقه در شکل ۷، احتمال رویداد حدی ایمنی جانی در حالت طراحی شده بر مبنای ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ در بیشینه شتاب ۰/۳۵ (به عنوان شتاب مبنای طرح در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بسیار زیاد) را برابر با حدود ۰/۱۵ نشان می‌دهد. این مقدار در قاب طراحی شده بر مبنای ویرایش سوم، ۰/۱۷ و ویرایش دوم برابر با ۰/۱۷ به دست آمده است.

این نتایج برای حالت حدی آستانه‌ی فروریزش برای این قاب برای ویرایش‌های چهارم، سوم و دوم به ترتیب برابر با ۰/۰۹، ۰/۰۱ و ۰/۱۵ است.

نتایج حاصل از تحلیل‌های شکنندگی لرزه‌ای برای قاب ۸ طبقه در شکل ۶، احتمال رویداد حدی ایمنی جانی در قاب ۸ طبقه طراحی شده بر مبنای ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ در بیشینه شتاب ۰/۳۵ (به عنوان شتاب مبنای طرح در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بسیار زیاد) را برابر با حدود ۰/۲۱ نشان می‌دهد. این مقدار در قاب طراحی شده بر مبنای ویرایش سوم، ۰/۲ و ویرایش دوم برابر با ۰/۳ به دست آمده است. این نتایج برای حالت حدی آستانه‌ی فروریزش برای این قاب برای ویرایش‌های چهارم، سوم و دوم به ترتیب برابر با ۰/۴۵، ۰/۰۶ و ۰/۰۵ است.

۴ طبقه، ۸ طبقه و ۱۵ طبقه برای پهنه لرزه‌خیزی خیلی زیاد و خاک نوع ۲ طراحی شدند. سپس یک قاب از هر یک از مدل‌های نمونه در نرم افزار اجزای محدود اپنسیس به صورت دو بعدی مدلسازی شده است. در ادامه با استفاده از ۲۲ شتاب نگاشت حوزه دور ارائه شده توسط دستورالعمل FEMA P-695 بر روی هر یک از مدل‌ها، تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده صورت گرفته و مطابق حالات حدی ارائه شده توسط نشریه ۳۶۱ برای دو سطح عملکرد ایمنی جانی و آستانه فروریزش منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای، در هر حالت به دست آمده است. در ادامه خلاصه‌ای از مهم ترین نتایج این پژوهش ارائه شده است:

۱- با استفاده از نتایج به دست آمده می‌توان گفت به صورت کلی، قابلیت اعتماد لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی بتنی طراحی شده بر مبنای ویرایش‌های جدیدتر استاندارد ۲۸۰۰ افزایش یافته است. به عنوان مثال، برای قاب خمشی ۴ طبقه شتاب میانه سطح عملکرد آستانه فروریزش از مقدار $0.66g$ در ویرایش ۲ به $1.11g$ در ویرایش ۴ افزایش یافته است. همچنین برای سطح عملکرد ایمنی جانی مقدار شتاب میانه از $0.36g$ در ویرایش ۲ به $0.61g$ ویرایش ۴ افزایش یافته است.

۲- طبق نتایج به دست آمده در این پژوهش، قابلیت اعتماد لرزه‌ای ساختمان‌های مورد مطالعه با ارتفاع، افزایش نسبی داشته است. به عنوان مثال، برای ساختمان‌های طراحی شده با ویرایش ۴، شتاب میانه متناظر با سطح عملکرد آستانه فروریزش از $1.11g$ برای ساختمان ۴ طبقه به $1.36g$ برای ساختمان ۱۵ طبقه افزایش یافته است. برای سطح عملکرد ایمنی جانی مقدار این افزایش ناچیز می‌باشد.

۳- مطابق نتایج به دست آمده، در صورت رخداد زلزله، طرح با بیشینه شتاب زمین برابر با $0.35g$ ، احتمال فراگذشت از سطح عملکرد آستانه فروریزش در اغلب موارد بسیار اندک می‌باشد (کمتر از ۵ درصد)، گرچه مقدار این احتمال برای مدل‌های طراحی شده با ویرایش‌های قدیمی‌تر آیین نامه افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، مقدار این احتمال برای ساختمان ۴ طبقه از ۱ درصد در ویرایش ۴ به ۱۱ درصد در

مقادیر شتاب میانه و انحراف معیار محاسبه شده برای هر یک از سطوح عملکردی مدل‌های مورد مطالعه، در جدول ۷ گردآوری شده است.

جدول ۷: پارامترهای اصلی توابع شکنندگی قاب‌های ۴، ۸ و ۱۵ طبقه مبتنی بر سه ویرایش اخیر استاندارد ۲۸۰۰ ایران برای دو سطح عملکرد ایمنی جانی و آستانه‌ی فروریزش

تعداد طبقات	ویرایش ۲۸۰۰	ایمنی جانی		آستانه فروریزش	
		شتاب میانه (g)	انحراف معیار	شتاب میانه (g)	انحراف معیار
۴ طبقه	۴	۰.۶۱	۰.۴۵	۱.۱۱	۰.۴۹
	۳	۰.۴۰	۰.۴۸	۰.۷۰	۰.۴۶
	۲	۰.۳۶	۰.۴۷	۰.۶۶	۰.۵۱
۸ طبقه	۴	۰.۵۳	۰.۵۱	۰.۹۷	۰.۶۱
	۳	۰.۵۰	۰.۵۳	۰.۹۵	۰.۶۱
	۲	۰.۴۶	۰.۴۷	۰.۸۷	۰.۶۰
۱۵ طبقه	۴	۰.۶۴	۰.۶۰	۱.۳۶	۰.۶۰
	۳	۰.۶۴	۰.۶۱	۱.۳۵	۰.۵۹
	۲	۰.۶۴	۰.۶۲	۱.۳۲	۰.۶۲

این نتایج نشان می‌دهد شتاب میانه مربوط به سطوح عملکرد مختلف با افزایش ارتفاع ساختمان، افزایش نسبی داشته است. همچنین این پارامتر در اغلب موارد در ویرایش‌های جدیدتر نیز با افزایش مشاهده می‌شود. محدوده شتاب میانگین برای سه سازه مدل شده در سطح ایمنی جانی بین $0.53g$ تا $0.66g$ و برای سطح آستانه‌ی فروریزش بین $0.97g$ تا $1.36g$ محاسبه شده است.

نتیجه گیری

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های سازگار با آیین‌نامه‌های ایران، سؤال بسیار مهمی است که در سال‌های اخیر مطالعات متعددی با این هدف انجام شده است. در این پژوهش با استفاده از ارائه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای به روش تحلیلی برای ساختمان‌های قاب خمشی بتنی طراحی شده با استفاده از سه ویرایش آخر استاندارد ۲۸۰۰، عملکرد لرزه‌ای این ساختمان‌ها بررسی شده است. برای این منظور ابتدا با استفاده از ویرایشات استاندارد ۲۸۰۰ و ویرایش چهارم مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، ساختمان‌های قاب خمشی بتنی

of New York at Buffalo, National Center for Earthquake Engineering, 1997. <https://ubir.buffalo.edu/xmlui/handle/10477/594>

Strasser FO, Bommer JJ, Sesetyan K, Erdik M, C, agnan Z, Irizarry J, Goula X, Lucantoni A, Sabetta F, Bal IE, Crowley H, Lindholm C. A comparative study of European earthquake loss estimation tools for a scenario in Istanbul. *Journal of Earthquake Engineering* 2008; 12(1):246–256. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13632460802014188>

Porter, K., 2019. A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk. University of Colorado Boulder, 126 pp., <http://spot.colorado.edu/~porterka/Porter-beginners-guide.pdf>.

Vamvatsikos D, Cornell CA. Incremental dynamic analysis. *Earthq Eng Struct Dyn*. 2002;31(3):491-514. <http://www.academia.edu/download/33888816/IDA-paper.pdf>

Goulet CA, Haselton CB, Mitrani-Reiser J, Beck JL, Deierlein GG, Porter KA, et al. Evaluation of the seismic performance of a code-conforming reinforced concrete frame building – from seismic hazard to collapse safety and economic losses. *Earthquake Eng Struct Dynam* 2007;36:1973–97. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.694>

Haselton CB. Assessing seismic collapse safety of modern reinforced concrete moment frame buildings. PhD Dissertation. Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University; 2007. <https://searchworks.stanford.edu/view/ny266sf1883>

Liel AB. Assessing the collapse risk of California's existing reinforced concrete frame structures: metrics for seismic safety decisions. PhD Dissertation. Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University; 2008. https://stacks.stanford.edu/file/druid:zb577jt6355/TR166_Liel.pdf

Haselton C, Liel A, Deierlein G, Dean B, Chou J. Seismic collapse safety of reinforced concrete buildings. I: Assessment of ductile moment frames. *J Struct Eng* 2011;137:481–91. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0000318>

Quantification of Building Seismic Performance Factors, FEMA P695 / June 2009. https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1716-25045-9655/fema_p695.pdf

Mander J.B., Priestley M.J.N., and Park R. (1988). "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", *ASCE Journal of Structural Engineering*, V. 114, No. 8, pp. 1804-1826. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9445%281988%29114%3A8%281804%29>

Popovics, S. (1973). "A numerical approach to the complete stress strain curve for concrete." *Cement and concrete research*, 3(5), 583-599. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884673900963>

Karsan, I. D., and Jirsa, J. O. (1969). "Behavior of concrete under compressive loading." *Journal of Structural Division ASCE*, 95(ST12). <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0016489>

ویرایش ۲ رسیده است. برای مدل ۴ طبقه در صورت رخداد زلزله، طرح احتمال فراگذشت از سطح عملکرد ایمنی جانی از ۱۱ درصد برای ویرایش ۴ تا ۴۸ درصد برای ویرایش ۲ متغیر است.

تشکر و قدردانی

مطالعه انجام شده در این مقاله در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و با حمایت بنیاد ملی حمایت از پژوهشگران و فناوران و تحت گرنت پژوهشی به شماره ۹۶۰۰۵۵۲۵ انجام شده است.

منابع

تفسیر دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (ویرایش اول) نشریه شماره ۳۶۱

آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) مبحث نهم مقررات ملی ساختمان

FEMA. HAZUS Earthquake Loss Estimation Methodology: User's Manual. Federal Emergency Management Agency: Washington, DC, U.S.A., 1999. https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1820-25045-1705/hzmh2_1_aebm_um.pdf

Mouroux P, Le Brun B. Presentation of RISK-UE project. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2006; 4:319–321. <http://www.eaee.boun.edu.tr/BEE/BEEV4N4.htm>

Lagomarsino S, Giovinazzi S. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2006; 4:415–443. <http://www.eaee.boun.edu.tr/BEE/BEEV4N4.htm>

Rossetto T, Elnashai A. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Engineering Structures* 2003; 25:1241–1263. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029603000609>

Saxena V, Deodatis G, Shinozuka M, Feng M. Development of fragility curves for multi-span reinforced concrete bridges. *Proceedings of International Conference on Monte Carlo Simulation, Monte-Carlo, Monaco, 2000*. <https://scholar.google.com/scholar?cluster=13103820268087884927&hl=en&oi=scholar>

Rossetto T, Elnashai A. A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures. *Engineering Structures* 2005; 27:397–409. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029604003499>

Mosalam K, Ayala G, White R, Roth C. Seismic fragility of LRC frames with and without masonry infill walls. *Journal of Earthquake Engineering* 1997; 1:693–719. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/13632469708962384>

Singhal A, Kiremidjian A. A method for earthquake motion damage relationships with application to reinforced concrete frames. *Research Report NCEER-97-0008*, State University