

تأثیر پارامتر کیفیت ساخت بر عملکرد فروریزش در سازه‌های فولادی خمشی

احسان خجسته فر

استادیار دانشگاه ولیعصر (عج)، رفسنجان، ایران
e.khojastehfar@vru.ac.ir

سید بهرام بهشتی اول

دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
beheshti@kntu.ac.ir

محمد رضا ذوالفقاری

دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
mrzolfaghari@hotmail.com

کلید واژه‌ها: منحنی شکنندگی فروریزش، منابع عدم قطعیت، سیستم استنتاج فازی، روش سطح پاسخ، سازه‌های فولادی خمشی

چکیده

منابع مختلف عدم قطعیت، بر عملکرد لرزه‌ای و حاشیه ایمنی سازه‌ها در برابر حالت حدی فروریزش تأثیر گذار هستند. در این مقاله اثر پارامتر کیفیت ساخت بر منحنی شکنندگی فروریزش سازه‌های فولادی در نظر گرفته می‌شود. همچنین با ترکیب عدم قطعیت‌های موجود در این پارامتر با عدم قطعیت‌های دانش ناشی از پارامترهای مدلسازی سیستم سازه‌ای، منحنی شکنندگی فروریزش سازه تعیین می‌شود. پارامترهای مقاومت تیر، مقاومت ستون، شکل پذیری تیر و شکل پذیری ستون پارامترهای مدلسازی و با عدم قطعیت دانش در نظر گرفته شده‌اند. سطوح پاسخ درجه دوم به منظور تعیین مقادیر میانگین و انحراف استاندارد منحنی شکنندگی فروریزش در سطوح مختلف کیفیت ساخت به دست آمده است. روش استنتاج فازی به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از پارامتر کیفیت ساخت، استفاده شده است. در نهایت با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو، برای متغیرهای مدلسازی و اندیس کیفیت ساخت، ضرایب سطوح پاسخ تعیین می‌گردند و با تعیین مقادیر میانگین و انحراف استاندارد منحنی شکنندگی فروریزش نهایی به دست خواهد آمد. با لحاظ نمودن منابع مختلف عدم قطعیت، چنین نتیجه گیری شده است که برای سازه نمونه فولادی، احتمال فروریزش برای سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال به میزان ۵۳٪، افزایش داشته است.

مقدمه

در سالهای اخیر، به علت خسارتهای گسترده ایجاد شده در زلزله‌ها، توجه محققین به بررسی لرزه‌ای سازه‌های موجود با در نظر گرفتن منابع مختلف عدم قطعیت معطوف شده است. هدف از چهارچوب پیشنهادی توسط مرکز تحقیقات مهندسی زلزله پسیفیک (PEER¹) تعیین خطر پذیری زلزله‌ها (با عنوان متغیرهای تصمیم در قالب خسارت اقتصادی مستقیم و غیر مستقیم و تعداد تلفات جانی) و به صورت کاملاً احتمالی با در نظر گرفتن منابع مختلف عدم قطعیت و به منظور تسهیل در اتخاذ تصمیم منطقی در مدیریت خطرپذیری زلزله ارائه شده است (Deierlein 2004). در این روش، فراوانی متوسط سالیانه متغیر تصمیم گیری با ترکیب عدم قطعیت‌های ناشی از جنبشهای شدید زمین، پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها و آسیب ایجاد شده در سازه‌ها، تعیین می‌گردد.

آسیبهای ایجاد شده در سازه‌ها، که به صورت احتمالی در قالب منحنی شکنندگی بیان می‌گردند، جزء اصلی روابط ارائه شده توسط PEER را تشکیل می‌دهد. یکی از مهمترین حالت‌های آسیب که سهم زیادی در خسارتهای اقتصادی و جانی در زلزله‌ها دارد، حالت حدی فروریزش جانبی است. این حالت حدی به صورت ناپایداری جانبی و به علت تغییر مکانهای جانبی زیاد در سازه و اثرات P-، تعریف می‌گردد. به منظور

¹ Pacific Earthquake Engineering Research Center



تخمین صحیح ظرفیت فروریزش سازه، بایستی از مدل‌های تحلیلی با توانایی لحاظ نمودن زوال سختی و مقاومت در بارهای رفت و برگشتی استفاده نمود (Ibarra and Krawinkler 2005). پارامترهای موجود در مدل‌های فوق دارای عدم قطعیت هستند. طبق تحقیقات قبل نشان داده شده است که عدم قطعیت موجود در پارامترهای مدلسازی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر ظرفیت فروریزش سازه خواهد داشت (Krawinkler et al. 2009). همچنین بر مبنای گزارش‌های ارائه شده در زلزله‌ها بسیاری از خسارات ناشی از کیفیت ساخت پایین ساختمانها، که بعضا بر اساس آیین نامه‌های طراحی لرزه‌ای نیز طراحی شده‌اند، بوده است (Bam earthquake report. 2003).

عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها متأثر از چندین پارامتر مانند وجود طبقه نرم، طبقه ضعیف، هندسه و کیفیت ساخت است (Rajeev and Tesfamariam. 2012). تحقیقات مختلفی در زمینه لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های هر کدام از پارامترهای فوق و همچنین ترکیب این پارامترها در منحنی شکنندگی انجام شده است (Rajeev and Tesfamariam 2012, Kappos and Panagopoulos 2010, Dimova and Negro 2006). موارد فوق نشان دهنده اهمیت لحاظ نمودن منابع عدم قطعیت‌های مختلف و پارامترهای تاثیر گذار در تعیین منحنی شکنندگی فروریزش سازه‌ها هستند.

روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA²)، روشی مدون در تعیین منحنی شکنندگی فروریزش و دخیل نمودن عدم قطعیت‌های مختلف در این منحنی است. در تحقیقات مختلف از این روش به منظور دخیل نمودن عدم قطعیت ناشی از جنبشهای شدید زمین زلزله‌ها و عدم قطعیت‌های ناشی از پارامترهای مدلسازی استفاده شده است. در مقاله حاضر از روش منطق فازی به منظور ترکیب عدم قطعیت‌های پارامترهای مدلسازی و پارامتر کیفیت ساخت استفاده شده است. منطق فازی که بر اساس مجموعه‌های فازی ارائه شده است، به منظور تحلیل سازه‌ها، بررسی ایمنی سازه‌ها و تحلیل خطرپذیری سازه‌ها در برابر زلزله و به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های غیر تصادفی (ناشی از پارامترهای توصیفی) استفاده شده است.

تئوری استنتاج فازی بر مبنای قوانین

منطق فازی که توسط پروفسور زاده معرفی شده است، ابزاری به منظور تبدیل دانش توصیفی به استنتاج عددی است. در این منطق که بر مبنای روند تصمیم گیری انسانی در مواجهه با انواع عدم قطعیتها شکل گرفته است، دانش توصیفی (در قالب متغیرهای زبانی) و داده‌های عددی در یک مدل فازی استفاده می‌شود و از الگوریتم استنتاج تقریبی به منظور لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های پارامترهای مختلف و نتیجه گیری نهایی استفاده می‌شود (Zadeh 1994).

مقدار عددی متغیرهای توصیفی (که در این مقاله پارامتر کیفیت ساخت است)، با استفاده از یک تابع عضویت مشخص می‌شود. تابع عضویت نشان دهنده میزان عضویت مقادیر مختلف دامنه در مجموعه فازی در نظر گرفته شده است. فازی سازی متغیرهای توصیفی نسبت دادن توابع عضویت به متغیرهای زبانی است. استنتاج بر مبنای منطق فازی شامل دو بخش است. قوانین فازی که بر مبنای نظر متخصصین و یا بر مبنای داده‌های ورودی؛ خروجی تحلیلی تعیین می‌گردد و مکانیزم استنتاج که بر مبنای آن برای داده‌های ورودی غیر موجود در قوانین فازی، مقدار خروجی مسئله تخمین زده می‌شود. مهمترین مکانیزم‌های استنتاجی فازی با عناوین سیستم استنتاج ممدانی و سیستم استنتاج سوگنو نامیده می‌شوند. در سیستم ممدانی هر دو بخش متقدم و تالی قوانین فازی به صورت متغیرهای زبانی بیان می‌گردند. در حالیکه در سیستم سوگنو بخش متقدم با استفاده از متغیر زبانی و بخش تالی آن با استفاده از میانبایی خطی مقادیر ورودی تعیین می‌گردد. به منظور استفاده از سیستم استنتاج فازی جهت تخمین ضرایب ثابت در سطوح پاسخ مربوط به مقادیر میانگین و انحراف استاندارد منحنی شکنندگی فروریزش، در این مقاله از سیستم سوگنو استفاده شده است. در این سیستم استنتاجی قانون اگر- آنگاه i ام به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود.

$$R_i : IF \ \vartheta X_1 \text{ is } A_1 : \text{ AND } \ \vartheta X_2 \text{ is } A_2 : \text{ AND } \dots \text{ THEN } \ \vartheta Z_i \text{ N } aX_1 < bX_2 < \dots : \quad i \text{ N } 1, \dots, N \quad (1)$$

در این رابطه، X مقدار متغیر ورودی و A ، نشان دهنده مجموعه فازی مربوط به X است. a و b مقادیر ثابتی هستند که با استفاده از داده‌های ورودی، خروجی مسئله تعیین می‌شوند و N تعداد قوانین موجود در سیستم استنتاج است. در این سیستم استنتاجی به منظور تعیین مقدار عددی پارامتر خروجی از متوسط وزنی تمامی خروجی‌های موجود در قوانین استفاده می‌شود. (طبق رابطه (۲))

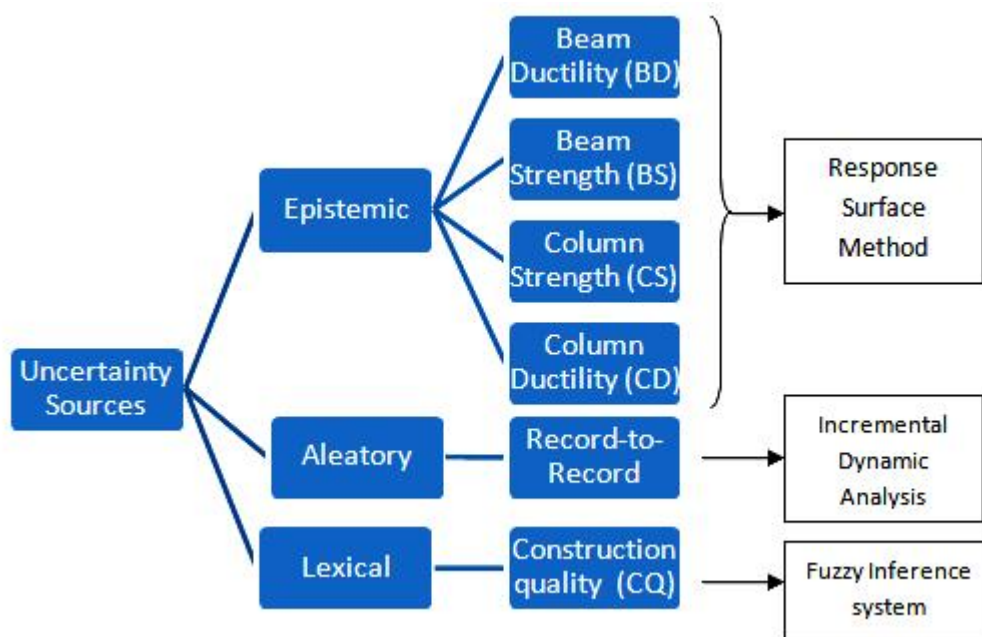
$$FinalOutput \text{ N } \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (2)$$

$$w_i \text{ N } MIN \ \vartheta F_1 \ \vartheta X_{1i} ; \vartheta F_2 \ \vartheta X_{2i} ; \dots : \quad (3)$$

که در روابط فوق، $F_1(X_1)$ و $F_2(X_2)$ به ترتیب نشان دهنده مقادیر توابع عضویت پارامترهای X_1 و X_2 هستند.

روش تحقیق

در این مقاله، اثر عدم قطعیت ناشی از پارامتر توصیفی کیفیت ساخت، عدم قطعیت دانش ناشی از پارامترهای مدلسازی سختی تیر (BS)، سختی ستون (CS)، شکل پذیری تیر (BD) و شکل پذیری ستون (CD) و عدم قطعیت تصادفی ناشی از جنبشهای شدید زمین در تعیین منحنی شکنندگی فروریزش در قاب نمونه فولادی خمشی در نظر گرفته شده است. به منظور دخیل نمودن عدم قطعیت تصادفی ناشی از جنبشهای شدید زمین، از تحلیل دینامیکی افزایشی قاب نمونه با استفاده از دسته رکوردهای پیشنهادی توسط Medina and Krawinkler, 2004، استفاده شده است. اثرات عدم قطعیتهای پارامترهای مدلسازی با استفاده از روش سطح پاسخ در منحنی شکنندگی فروریزش دخیل شده است. در این روش که در تحقیقات قبل (Liel et al. 2009) نیز استفاده شده است، مقادیر مختلفی برای پارامترهای مدلسازی در نظر گرفته شده است و تحلیل دینامیکی افزایشی قاب نمونه انجام شده است. با استفاده از مقادیر میانگین و انحراف استاندارد منحنی شکنندگی فروریزش به دست آمده از مرحله قبل، توابع تحلیلی درجه دوم به منظور تخمین مقادیر میانگین و انحراف استاندارد، میانبایی شده است. به منظور دخیل نمودن پارامتر کیفیت ساخت، سطوح پاسخ مربوط به مقادیر میانگین و انحراف استاندارد در سطوح مختلف کیفیت ساخت (کیفیت ساخت خوب، متوسط و ضعیف) سازه تعیین شده است. برای لحاظ نمودن عدم قطعیت ناشی از کیفیت ساخت، ضرایب ثابت سطوح کیفیت ساخت بر اساس منطق فازی بر مبنای سیستم استنتاج سوگنو تخمین زده می‌شوند. بخش نهایی این مقاله، استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو و تولید تعداد زیاد اندیس کیفیت ساخت، تعیین ضرایب ثابت توابع تحلیلی میانگین و انحراف استاندارد منحنی شکنندگی فروریزش و در نهایت تعیین منحنی شکنندگی فروریزش نهایی که در آن منابع مختلف عدم قطعیت لحاظ شده است، می‌باشد. منابع مختلف عدم قطعیتها و نحوه در نظر گرفتن آنها در شکل (1) نشان داده شده است.



شکل (1): منابع مختلف و روشهای در نظر گرفتن عدم قطعیتها

مطالعه موردی

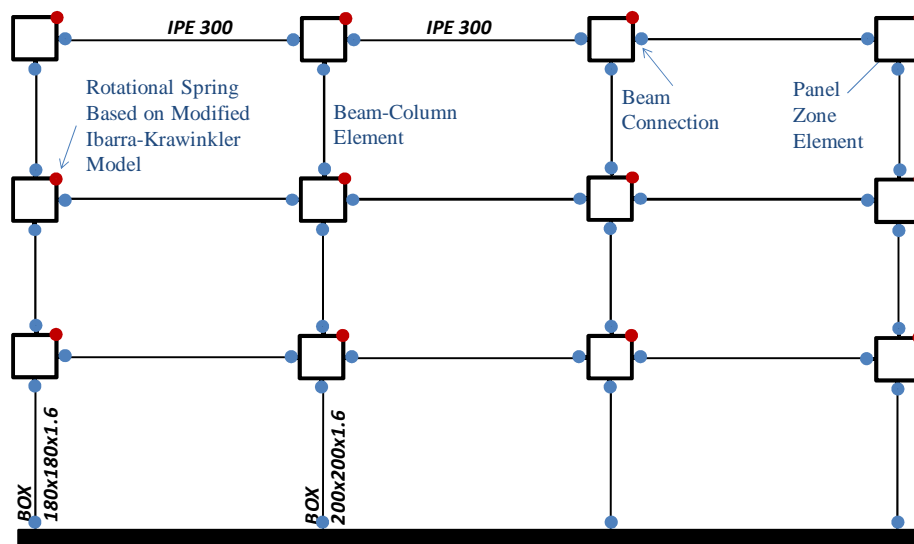
قاب فولادی نمونه سه طبقه، سه دهانه با سیستم قاب خمشی برای نشان کاربرد روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است. ارتفاع طبقات ۳/۲ متر و نوع خاک منطقه B در نظر گرفته شده است. بارهای ثقلی در نظر گرفته شده به منظور طراحی ساختمان طبق جدول (1) در نظر گرفته شده است. طراحی سازه نمونه بر اساس آیین نامه UBC97 انجام شده است. مقاطع طراحی شده برای تیرها به صورت IPE 300 و ستونها به صورت مقاطع قوطی شکل در نظر گرفته شده است. ستونها بیرونی به صورت BOX 180×180×16 و ستونهای درونی قاب نمونه BOX 200×200×16 لحاظ شده‌اند.



جدول (1): بارهای ثقلی فرضی در سازه نمونه

Dead load of regular story	500 kg/m ²
Partition load	100 kg/m ²
Live load of regular story	200 kg/m ²
Dead load of roof	520 kg/m ²
Live load of roof	150 kg/m ²
Perimeter wall load	580 kg/m

مدلسازی قاب نمونه فولادی به منظور تحلیل دینامیکی افزایشی در نرم افزار اجزای محدود OPENSEES انجام شده است. رفتار غیر خطی سازه با در نظر گرفتن فنرهای غیر خطی پیچشی در محل اتصالات تیر به ستون با مدل ممان-چرخش اصلاح شده ایبارا - کروینکلر در نظر گرفته شده است. مدل استفاده شده قابلیت لحاظ نمودن پارامترهای زوال سختی و مقاومت را در بارهای رفت و برگشتی را دارد که پارامتر مهمی در تعیین ظرفیت فروریزش سازه‌ها محسوب می‌شود. مدل تحلیلی سازه در نظر گرفته شده در شکل (۲) نشان داده شده است. منحنی پوش ممان - چرخش در مدل در نظر گرفته شده در شکل (۳) نشان داده شده است. در این مقاله پارامترهای چرخش قبل از نقطه اوج (p)، چرخش پس از نقطه اوج (p_c) و نرخ زوال سایکلک (ρ) به عنوان پارامترهای شکل پذیری و پارامتر نسبت ممان تسلیم به ممان اوج (M_c/M_y) به عنوان پارامتر نشان سختی لحاظ شده است. بر مبنای آزمایشات تجربی انجام شده در تحقیقات قبل توزیع احتمالی لوگ - نرمال برای پارامترهای ذکر شده در نظر گرفته شده است که نشان دهنده عدم قطعیت پارامترهای مدلسازی می‌باشد. مقادیر میانگین و انحراف استاندارد این پارامترها برای هر جزء در جدول (۲) نشان داده شده است (Lignos 2008)

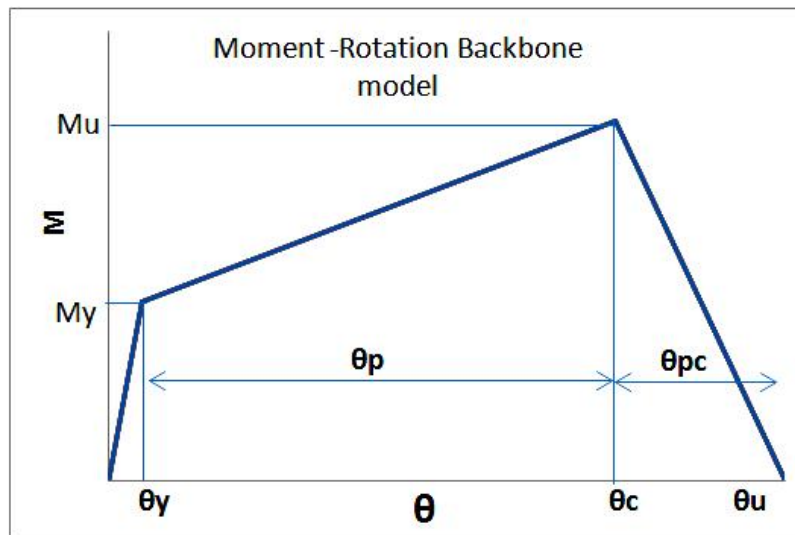


شکل (۲): مدل تحلیلی سازه نمونه

جدول (۲): مقادیر میانگین و انحراف استاندارد پارامترهای مدلسازی (Lignos 2008)

Component	Median p (rad)	p (rad)	Median p_c (rad)	p_c (rad)	Median		Median M_c/M_y	M_c/M_y
Beam	0.025	0.43	0.16	0.41	1.00	0.43	1.11	0.05
Column	0.011	0.57	0.07	0.92	0.4	0.96	1.11	0.05

به منظور کاهش حجم محاسبات، تعداد متغیرهای وابسته با در نظر گرفتن همبستگی کامل بین متغیرهای تعریف شده در هر المان و بین المانهای موجود در سازه، کاهش یافته‌اند. بر این اساس چهار متغیر اساسی شامل سختی تیرها (BS) (شامل مقدار پارامتر M_c/M_y برای تیرها)، سختی ستونها (CS) (شامل پارامتر M_c/M_y برای ستونها)، شکل پذیری تیرها (BD) (شامل پارامترهای p ، p_c برای تیرها) و شکل پذیری ستونها (CD) (شامل پارامترهای p_c برای ستونها) در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن توزیع احتمالی لوگ - نرمال استاندارد برای متغیرهای در نظر گرفته شده، احتمال مربوط به هر کدام از متغیرها به احتمال مربوط به اجزای تشکیل دهنده آن متغیر نگاشته می‌شود.



شکل (۳): منحنی پوش ممان - چرخش

تأثیر پارامتر کیفیت ساخت با استفاده از سیستم استنتاج فازی

مقادیر میانگین و انحراف استانداردهای پارامترهای مدلسازی سازه، متأثر از کیفیت ساخت ساختمان می‌باشند. کیفیت ساخت پایین سبب مقادیر میانگین کمتر و پراکندگی بیشتر در پارامترهای مدلسازی می‌گردند (Li and Ellingwood 2008). سه سطح از کیفیت ساخت در این مقاله لحاظ شده است و توزیعهای احتمالی مربوط به پارامترهای مدلسازی بر حسب کیفیت ساخت در نظر گرفته شده تغییر می‌کنند. برای سطح کیفیت ساخت خوب مقادیر میانگین و انحراف استاندارد پارامترهای مدلسازی نسبت به مقادیر به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی بدون تغییر در نظر گرفته شده‌اند. برای کیفیت ساخت متوسط، مقادیر میانگین و انحراف استاندارد نسبت به حالت کیفیت ساخت خوب به ترتیب ۲۵٪ کاهش و ۲۵٪ افزایش داشته‌اند. برای کیفیت ساخت ضعیف مقادیر میانگین و انحراف استاندارد پارامترهای مدلسازی نسبت به حالت کیفیت ساخت خوب به ترتیب ۴۰٪ کاهش و ۴۰٪ افزایش در نظر گرفته شده است. الگوی در نظر گرفته شده به منظور لحاظ نمودن اثر کیفیت ساخت در تحقیقات قبلی نیز استفاده شده است (Rajeev and Tesfamariam 2012). مقادیر میانگین و انحراف استاندارد پارامترهای مدلسازی در سطوح مختلف کیفیت ساخت در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

تابع عضویت مثلثی برای نشان دادن پارامتر فازی کیفیت ساخت در نظر گرفته شده است.

منحنی شکنندگی فروریزش

ظرفیت فروریزش سازه بر مبنای روش شدت زلزله (IM-Based Method) به صورت شدتی از زلزله تعریف می‌گردد که سازه مورد مطالعه تحت زلزله با آن شدت، دچار ناپایداری دینامیکی گردد. به بیانی دیگر IMcollapse نشان دهنده شدت لرزه‌ای آخرین نقطه‌ای روی منحنی IDA است که تحلیل دینامیکی سازه همگرا شده است. به ازای هر منحنی IDA یک نقطه نماینده شدت لرزه‌ای متناظر با فروریزش خواهد بود و منحنی احتمالی برازش شده بر نقاط فوق در منحنی‌های IDA منحنی شکنندگی فروریزش خواهد بود. با استفاده از این روش رابطه منحنی شکنندگی فروریزش در معادله (۴) نشان داده شده است.

$$P(\text{Collapse} | IM) = N(im_i) \cdot N(P(im_i | IM_{\text{Collapse}})) \cdot F_{IM_{\text{Collapse}}}(im_i) \quad (4)$$

در تحقیقات گذشته نشان داده شده است که توزیع احتمالی لوگ - نرمال تابع بهینه برای بیان منحنی شکنندگی فروریزش است (Krawinkler et al. 2009). با استفاده از توزیع احتمالی لوگ - نرمال برای توزیع تجمعی احتمال، رابطه (۴) به صورت معادله (۵) به دست خواهد آمد.

$$P(\text{Collapse} | IM) = N W \frac{LN(im_i) > LN(y_c)}{S_c} \quad (5)$$

که در این معادله نشان دهنده تابع توزیع گوسی، y_c مقدار میانگین و S_c پراکندگی تابع احتمالی فروریزش است.

جدول (۳): مقادیر میانگین و انحراف استاندارد پارامترهای مدلسازی در سطوح مختلف کیفیت ساخت

Meta Variable	Parameter	Construction Quality	Median	SD
Beam Ductility (BD)	p	GOOD	0.025	0.43
		AVERAGE	0.01875	0.5375
		POOR	0.015	0.60
	pc	GOOD	0.16	0.41
		AVERAGE	0.12	0.5125
		POOR	0.096	0.5766
		GOOD	1	0.43
		AVERAGE	0.75	0.5375
		POOR	0.6	0.6047
Column Ductility (CD)	p	GOOD	0.011	0.57
		AVERAGE	0.00825	0.7125
		POOR	0.0066	0.8016
	pc	GOOD	0.07	0.92
		AVERAGE	0.053	1.15
		POOR	0.042	1.2938
		GOOD	0.4	0.96
		AVERAGE	0.3	1.2
		POOR	0.24	1.35
Beam Strength (BS)	M_c/M_y	GOOD	1.11	0.05
		AVERAGE	0.8325	0.0625
		POOR	0.666	0.0703
Column Strength (CS)	M_c/M_y	GOOD	1.11	0.05
		AVERAGE	0.8325	0.0625
		POOR	0.666	0.0703

استفاده از توابع با معادله مشخص برای بیان مقادیر میانگین و انحراف استاندارد منحنی شکنندگی فروریزش در قالب سطوح پاسخ و بر حسب پارامترهای مدلسازی سازه، امکان استفاده از روش مونت کارلو بر مبنای سطوح پاسخ؛ که به مراتب تلاش محاسباتی کمتری نسبت به روش مونت کارلو معمولی خواهد داشت، را فراهم می‌کند. در این روش ابتدا توابع مشخصی با استفاده از داده‌های محدود به دست آمده از تحلیل دینامیکی افزایشی سازه نمونه با پارامترهای مدلسازی در نظر گرفته شده میانمایی می‌گردد. در ادامه با تعیین ضرایب ثابت توابع تحلیلی مقادیر میانگین و انحراف استاندارد منحنی شکنندگی فروریزش به جای تحلیل زمانبر دینامیکی افزایشی از توابع تحلیلی به دست می‌آیند. در این مقاله از سطوح پاسخ درجه دوم برای پیش بینی میانگین و انحراف استاندارد منحنی شکنندگی فروریزش استفاده شده است (معادلات (۶) و (۷)). برای تعیین ضرایب ثابت در این توابع تعداد ۶۴ شبیه سازی برای پارامترهای مدلسازی صورت گرفته و برای هر کدام از شبیه‌سازی‌ها منحنی شکنندگی فروریزش سازه با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی تعیین شده است.

$$\sim_c N C_0 < C_1 \vartheta_{CD} < C_2 \vartheta_{BD} < C_3 \vartheta_{CS} < C_4 \vartheta_{BS} < C_5 \vartheta_{CD} \vartheta_{BD} < C_6 \vartheta_{CD} \vartheta_{CS} < C_7 \vartheta_{CD} \vartheta_{BS} < C_8 \vartheta_{BD} \vartheta_{CS} < C_9 \vartheta_{BD} \vartheta_{BS} < C_{10} \vartheta_{CS} \vartheta_{BS} < C_{11} \vartheta_{CD}^2 < C_{12} \vartheta_{BD}^2 < C_{13} \vartheta_{CS}^2 < C_{14} \vartheta_{BS}^2 \quad (۶)$$

$$\dagger_c N C'_0 < C'_1 \vartheta_{CD} < C'_2 \vartheta_{BD} < C'_3 \vartheta_{CS} < C'_4 \vartheta_{BS} < C'_5 \vartheta_{CD} \vartheta_{BD} < C'_6 \vartheta_{CD} \vartheta_{CS} < C'_7 \vartheta_{CD} \vartheta_{BS} < C'_8 \vartheta_{BD} \vartheta_{CS} < C'_9 \vartheta_{BD} \vartheta_{BS} < C'_{10} \vartheta_{CS} \vartheta_{BS} < C'_{11} \vartheta_{CD}^2 < C'_{12} \vartheta_{BD}^2 < C'_{13} \vartheta_{CS}^2 < C'_{14} \vartheta_{BS}^2 \quad (۷)$$

به منظور در نظر گرفتن اثر کیفیت ساخت، مقادیر ضرایب ثابت موجود در معادلات برای هر سه سطح کیفیت ساخت تعیین شده است. عدم قطعیت مربوط به پارامتر توصیفی کیفیت ساخت با استفاده از سیستم استنتاج سوگنو و با استفاده از داده‌های به دست آمده از مرحله قبل به صورت قوانین فازی زیر در نظر گرفته شده است.

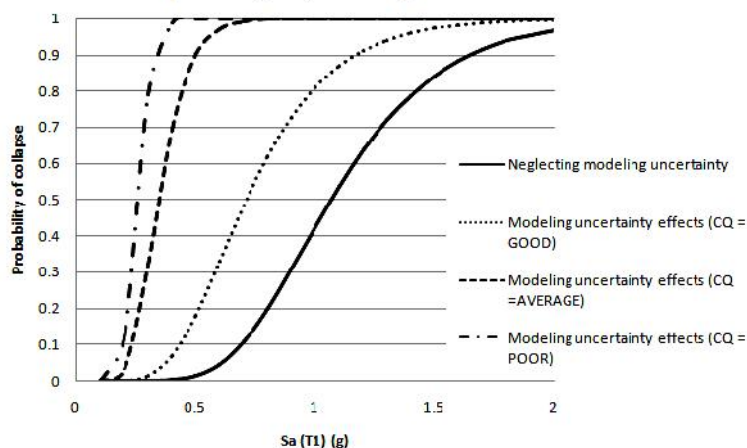
$$\begin{aligned}
 & \text{IF } \%CQ \text{ N GOOD: THEN } \%C_0 \text{ N } 0.04306; \text{ AND } \%C_1 \text{ N } 0.5494; \dots \text{ AND } \%C_{14} \text{ N } > 0.00471; \\
 & \text{IF } \%CQ \text{ N AVERAGE: THEN } \%C_0 \text{ N } > 1.11162; \text{ AND } \%C_1 \text{ N } > 0.06718; \dots \text{ AND } \%C_{14} \text{ N } > 0.00408; \\
 & \text{IF } \%CQ \text{ N POOR: THEN } \%C_0 \text{ N } > 1.356426; \text{ AND } \%C_1 \text{ N } > 0.02635; \dots \text{ AND } \%C_{14} \text{ N } > 5.25E > 18; \\
 & \text{IF } \%CQ \text{ N GOOD: THEN } \%C'_0 \text{ N } 0.3332; \text{ AND } \%C'_1 \text{ N } 0.02; \dots \text{ AND } \%C'_{14} \text{ N } > 0.002; \\
 & \text{IF } \%CQ \text{ N AVERAGE: THEN } \%C'_0 \text{ N } 0.2598; \text{ AND } \%C'_1 \text{ N } 0.02; \dots \text{ AND } \%C'_{14} \text{ N } > 0.00056; \\
 & \text{IF } \%CQ \text{ N POOR: THEN } \%C'_0 \text{ N } 0.2015; \text{ AND } \%C'_1 \text{ N } 0.0095; \dots \text{ AND } \%C'_{14} \text{ N } 1.56E > 17;
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

با در نظر گرفتن قوانین فازی فوق، ضرایب ثابت مربوط به توابع سطوح پاسخ در سیستم استنتاج فازی سوگنو و با وارد نمودن اندیس کیفیت ساخت قابل تعیین خواهد بود.

شبیه سازی مونت کارلو و تعیین منحنی شکنندگی فروریزش نهایی

برای تعیین منحنی شکنندگی فروریزش نهایی با در نظر گرفتن منابع مختلف عدم قطعیت‌های تصادفی (ناشی از جنبشهای شدید زمین) ناشی از پارامترهای مدلسازی و توصیفی (ناشی از کیفیت ساخت)، از شبیه سازی مونت کارلو استفاده شده است. در اولین قدم تعداد ۱۰۰ مقدار برای پارامتر اندیس کیفیت ساخت به صورت توزیع یکنواخت انتخاب شده است. ضرایب سطوح پاسخ تعیین کننده مقادیر میانگین و انحراف استاندارد منحنی شکنندگی فروریزش با استفاده از سیستم استنتاج فازی تعیین می‌گردند. در مرحله دوم، شبیه سازی پارامترهای مدلسازی صورت می‌گیرد. شبیه سازی این پارامترها با تولید اعداد تصادفی و با استفاده از توزیع لوگ - نرمال استاندارد برای هر کدام از پارامترهای مدلسازی صورت گرفته است. برای هر کدام از مقادیر شبیه سازی شده برای اندیس کیفیت ساخت و پارامترهای مدلسازی میانگین و انحراف استاندارد منحنی شکنندگی فروریزش با استفاده از سطوح پاسخ تعیین شده‌اند. مقدار میانگین احتمال فروریزش در بازه‌های مختلف شدت نشان‌دهنده احتمال نهایی فروریزش سازه خواهد بود. منحنی‌های شکنندگی فروریزش برای سازه نمونه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مدلسازی و کیفیت ساخت و بدون در نظر گرفتن این عدم قطعیتها در شکل (۴) با هم مقایسه شده‌اند. همچنین با توجه به اینکه شتاب طیفی منطبق بر پیروود مود اول ارتعاشی سازه نمونه در طیف طراحی آیین نامه ۲۸۰۰ ایران (منطبق بر سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال) برابر ۰/۵۳ برابر شتاب ثقل می‌باشد مقادیر احتمال فروریزش سازه در سطوح مختلف کیفیت ساخت در جدول (۴) با هم مقایسه شده‌اند.

Collapse fragility curves, Effects of CQ levels



نتیجه گیری

در این مقاله، منحنی شکنندگی فروریزش قاب نمونه فولادی با لحاظ نمودن منابع مختلف عدم قطعیت شامل عدم قطعیت جنبشهای شدید زمین ناشی از زلزله، عدم قطعیت‌های پارامترهای مدلسازی و عدم قطعیت ناشی از پارامتر کیفیت ساخت تعیین شده است. به منظور دخیل نمودن عدم قطعیت ناشی از جنبشهای شدید زمین از تحلیل دینامیکی افزایشی، به منظور دخیل نمودن عدم قطعیت پارامترهای مدلسازی از روش سطح پاسخ و به منظور دخیل نمودن عدم قطعیت ناشی از کیفیت ساخت سازه از سیستم استنتاج فازی استفاده شده است. در نهایت با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو، منحنی شکنندگی فروریزش نهایی سازه و با دخیل نمودن عدم قطعیت‌های اشاره شده، تعیین شده است.



جدول (۴): احتمال فروریزش سازه در سطوح مختلف کیفیت ساخت

	Hazard Level	10%/50 years
Probability of Collapse	Neglecting modeling and CQ uncertainties	2%
	Considering Interaction of modeling and CQ uncertainties	55%
	Considering modeling uncertainty for Good CQ	18%
	Considering modeling uncertainty for Average CQ	89%
	Considering modeling uncertainty for Poor CQ	100%

در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های پارامترهای مدلسازی و کیفیت ساخت و ترکیب این عدم قطعیتها با تغییرات ناشی از جنبشهای شدید زمین، سبب تغییر در هر دو پارامتر میانگین و انحراف استاندارد منحنی شکنندگی می‌گردد. این اثرات سبب کاهش میانگین منحنی شکنندگی و سبب افزایش در انحراف استاندارد منحنی شکنندگی می‌گردد. با مقایسه مقادیر احتمال فروریزش در سطوح مختلف کیفیت ساخت چنین نتیجه‌گیری می‌شود که احتمال فروریزش به میزان ۵۳٪ نسبت به حالتی که عدم قطعیت‌های ناشی از پارامترهای مدلسازی و کیفیت ساخت لحاظ نگردد، افزایش داشته است. این مسئله نشان دهنده اهمیت لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های پارامترهای مدلسازی و کیفیت ساخت در تدوین منحنی شکنندگی فروریزش سازه و مدیریت ریسک زلزله می‌باشد.

مراجع

- Bam earthquake report (2003) Iranian structural engineering organization, province of Kerman.
- Deierlein GG (2004) Overview of a comprehensive framework for earthquake performance assessment. In *Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation, Proceedings of an International Workshop*, pp. 15-26
- Dimova SL and Negro P (2006) Assessment of seismic fragility of structures with consideration of the quality of construction. *Earthquake spectra*, 22(4), 909-936
- Ibarra LF and Krawinkler H (2005) Global collapse of frame structures under seismic excitations. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*
- Kappos AJ and Panagopoulos G (2010) Fragility curves for reinforced concrete buildings in Greece. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2), 39-53
- Krawinkler H, Zareian F, Lignos DG and Ibarra LF (2009) Prediction of collapse of structures under earthquake excitations. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2009), Rhodes, Greece, paper no. 449* (pp. 22-24)
- Li Q and Ellingwood BR (2008) Damage inspection and vulnerability analysis of existing buildings with steel moment-resisting frames. *Engineering Structures*, 30(2), 338-351
- Liel AB, Haselton CB, Deierlein GG and Baker JW (2009) Incorporating modeling uncertainties in the assessment of seismic collapse risk of buildings. *Structural Safety*, 31(2), 197-211
- Lignos D (2008) Sideway collapse of deteriorating structural systems under seismic excitations, PhD dissertation, Department of Civil Engineering, Stanford University
- Medina RA and Krawinkler H (2004) Seismic demands for nondeteriorating frame structures and their dependence on ground motions (Doctoral dissertation, Pacific Earthquake Engineering Research Center)
- Rajeev Pand Tesfamariam S (2012) Seismic fragilities for reinforced concrete buildings with consideration of irregularities. *Structural Safety*, 39, 1-13
- Zadeh LA (1994) Fuzzy logic, neural networks, and soft computing. *Communications of the ACM*, 37(3), 77-84

