بررسی دقت روش‌های ارزیابی لرزه‌ای سریع ساختمان‌های فولادی با سیستم مهاربندی همگرا (مطالعه‌ی موردی)

سید علی موسوی خلخالی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-گرایش سازه- دانشگاه صنعتی سهند تبریز
Seyyedamk@yahoo.com

مهدی پورشاء
استادیار دانشکده مهندسی عمران- دانشگاه صنعتی سهند تبریز
Poursha@sut.ac.ir

حسن افشین
دانشیار دانشکده مهندسی عمران- دانشگاه صنعتی سهند تبریز
Hafshin@sut.ac.ir

محمدرضا چناقلو
دانشیار دانشکده مهندسی عمران- دانشگاه صنعتی سهند تبریز
Mrchenaghlou@sut.ac.ir

کلیدواژه‌ها: *ارزیابی لرزه‌ای سریع، روش‌های ارزیابی سریع، ارزیابی لرزه‌ای کمّی، ساختمان‌های فولادی*

چکیده

جهت مقاوم‌سازی ساختمان‌های آسیب‌پذیر در برابر زلزله، در نخستین گام، ساختمان‌ها به لحاظ عملکرد لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در این راستا ابتدا یک ارزیابی لرزه‌ای سریع بر روی ساختمان‌های موجود انجام می‌شود، سپس در صورت نیاز، ساختمان به‌صورت تحلیلی نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با توجه به‌اینکه روش‌های ارزیابی سریع، روش‌هایی تقریبی هستند و ارزیابی ساختمان با روش‌های سریع با اطلاعات کم انجام می‌شود، بنابراین ممکن است نتایج حاصل از ارزیابی سریع با عملکرد لرزه‌ای واقعی ساختمان تفاوت قابل توجهی داشته باشد. ارزیابی کمّی (تحلیلی) ساختمان‌ها به‌دلیل اینکه با جزئیات و دقت بیشتری انجام می‌شود، نتایج حاصل از آن، از اطمینان قابل قبولی برخوردار است. در این مقاله به ارزیابی لرزه‌ای دو نمونه ساختمان فولادی با کاربری مسکونی و واقع در شهر تبریز با دو روش سریع و کمّی پرداخته شده است و نتایج حاصل از دو روش با یکدیگر مقایسه شده و میزان دقت روش سریع با استفاده از روش کمّی سنجیده شده است. روش‌های مورد استفاده در این مقاله برای ارزیابی سریع عبارت‌اند از: روش‌های ارائه‌شده در دستورالعمل‌های FEMA154، NRC، ارزیابی لرزه‌ای سریع ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۴) و همچنین روش آریای تکمیل‌شده. ارزیابی کمّی نیز بر اساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰) و با استفاده از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش ارزیابی سریع مطابق FEMA154 دارای دقت بیشتری برای ساختمان‌های فولادی با سیستم مهاربندی همگرا می‌باشد.

مقدمه

به‌منظور انجام هر عملیات بهسازی لرزه‌ای و مقاوم‌سازی، گام نخست، انجام ارزیابی صحیح، دقیق و کارآمد از آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان می‌باشد. در ارائه یک طرح مناسب مقاوم‌سازی، تشخیص نقاط ضعف سازه از اهمیت بالایی برخوردار است. تشخیص نقاط ضعف سازه، گاه با انجام مطالعات تحلیلی بر روی مدل سازه (ارزیابی کمّی) و گاه با ارزیابی چشمی (ارزیابی کیفی) از وضعیت ساختمان موجود، امکان‌پذیر است. به‌همین جهت مراجع موجود در زمینه ارزیابی و بهسازی لرزه‌ای در کنار پرداختن به اصول ارزیابی کمّی، جداول مختلفی را برای ارزیابی کیفی سازه ارائه داده‌اند (محمودزاده و همکاران،۱۳۸۹). Alam و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای را مورد

مقایسه قرار دادند (Alam et al., 2012). جاودانی در سال ۱۳۸۰ روش‌های ارزیابی کیفی و کمّی را برای آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های بنـایی مورد مقایسه قرار داد (جاودانی،۱۳۸۰). در این مقاله نیز به مقایسه نتایج ارزیابی لرزه‌ای سریع و کمّی ساختمان‌ها پرداخته شده است. با توجه بـه اینکه روش‌های سریع، روش‌هایی تقریبی هستند و ارزیابی ساختمان با روش‌های سریع با اطلاعات کم انجام می‌شود، بنابراین ممکن است نتایج حاصل از ارزیابی سریع با عملکرد لرزه‌ای واقعی ساختمان تفاوت قابل‌توجهی داشته باشد. ارزیابی کمّی ساختمان‌ها به‌دلیل اینکه با جزئیات و دقت بیشتری انجام می‌شود، نتایج حاصل از آن، از اطمینان قابل قبولی برخوردار است. بنابراین برای سنجش دقت روش‌های ارزیابی سریع، دو نمونـه سـاختمان مسکونی با سیستم سازه‌ای فولادی دارای مهاربند، مورد ارزیابی لرزه‌ای سریع و کمّی قرار گرفته و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها

ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های موجود درواقع یک نوع پیش‌بینی خسارت‌دیدگی آن‌هـا در مقابـل زلزلـه‌هـای احتمـالی اسـت (زهرایی و همکاران، ۱۳۸۳). به‌طور کلی می‌توان روش‌های تعیین آسیب‌پذیری لرزه‌ای را به دو گروه روش‌های کیفی وکمّی طبقه‌بندی نمود:

ارزیابی کیفی در اغلب اوقات به‌صورت ارزیابی سریع با کمک فرم‌های مخصوص صورت می‌گیـرد. در فـرم‌هـا، بـا توجـه بـه هندسـه کلـی ساختمان و منظم و نامنظم بودن آن، وجود اطلاعاتی از قبیل دفترچه محاسبات و نقشه‌ها درباره وضعیت ساختمان تصمیم‌گیری می‌شـود. معمـولاً در فرم‌های ارزیابی کیفی، عواملی نظیر میزان خطر زلزله در ساختگاه ساختمان، شرایط خاک محل، تیپ و نوع سـاختمان و سـازه آن، انـواع بـی-نظمی‌های موجود در پلان و ارتفاع و اهمیت ساختمان و در برخی فرم‌ها اجزای غیرسازه‌ای مورد توجه قرار گرفته است و با کمک جدول‌هـایی، بـه هر مورد امتیازی داده می‌شود که درنهایت امتیاز ساختمان تعیین می‌شود. این امتیـاز، بـرای رده‌بنـدی سـاختمان مناسـب اسـت (محمـودزاده و همکاران، ۱۳۸۹).

چنانچه سازه‌ای در ارزیابی کیفی مشکوک باشد یا ساختمان از درجه اهمیت بالایی برخوردار باشد، باید از روش‌های ارزیابی کمّی اسـتفاده نمود. در روش‌های کمّی، ساختمان با دقت و جزئیات بیشتری مورد مطالعه قرار می‌گیرد و انجام آزمایش روی اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای ضروری است (محمودزاده و همکاران،۱۳۸۹). در این روش مدل‌سازی و تحلیل سازه انجام می‌شود. اصولاً این نوع ارزیابی بر اساس مطالعه مقاومت، سختی و ظرفیت تغییرشکل اجزاء ساختمان و بر اساس تحلیل‌های کامپیوتری انجام می‌شود و درنهایت ظرفیت‌های لـرزه‌ای سـاختمان مـورد مطالعـه، بـا ظرفیت لرزه‌ای که دستورالعمل‌های موجود برای ساختمان‌های جدید توصیه می‌کنند، مقایسه می‌شود. نتایج این تحلیل‌ها برای پی بـردن بـه ایـن واقعیت است که سازه‌ی موجود چه رفتاری دارد و در کدام‌یک از سه معیار مقاومت، سختی و ظرفیت شکل‌پذیری، دارای ضعف می‌باشد و اینکه چه عواملی و چگونه بر رفتار سازه تأثیر می‌گذارند (محسنی،۱۳۸۷).

روش‌های ارزیابی لرزه‌ای سریع ساختمان‌ها

روش‌های مختلفی برای ارزیابی لرزه‌ای سریع ساختمان‌ها در کشورهای مختلف جهان ارائه شده است. روش‌هایی که در ایـن مقالـه جهـت سنجش دقت ارزیابی آن‌ها انتخاب شده‌اند، روند ارزیابی تقریباً مشابهی دارند. روش‌های مورد نظـر عبـارت‌انـد از: روش دسـتورالعمل FEMA154، روش دستورالعمل NRC، روش آریای تکمیل‌شده، روش نشریه ۳۶۴. در ادامه شرح مختصری از این روش‌ها ارائه می‌شود.

روش دستورالعمل FEMA154

ارزیابی سریع چشمی ساختمان‌ها برای خطرات بالقوه‌ی لرزه‌ای در سال ۱۹۸۸ میلادی با انتشار گزارش FEMA154 (FEMA,2002) ایجاد شد. این کتاب دستی توسط آژانس مدیریت بحران فدرال آمریکا، برای مهندسین و متصدیان امر سـاختمان و افـراد آمـوزش‌دیـده و غیرمتخصـص نوشته شده است. در این روش کاربران با بازرسی ساختمان‌ها از پیاده‌رو، آن‌ها را به دو دسته طبقه‌بندی می‌کنند: ۱- ساختمان‌هایی که خطر آن‌ها برای ایمنی جانی قابل قبول باشد. ۲- ساختمان‌هایی که ممکن است از نظر لرزه‌ای خطرناک باشند و باید به‌وسیله افـراد متخصـص و بـاتجربـه بـا جزئیات بیشتری مورد ارزیابی قرار گیرند.

در این روش سه فرم جمع‌آوری اطلاعات برای مناطق با لرزه‌خیزی پایین، متوسط و بالا ارائه شده است. ارزیاب بـا توجـه بـه لـرزه‌خیـزی منطقه یکی از فرم‌ها را انتخاب کرده و اقدام به بازدید از ساختمان و تکمیل برگه‌ی ارزیابی می‌کند. پس از تکمیل برگه و جمع جبری نمرات پایه و اصلاح‌شده موجـود بر روی برگه، نمره‌ی نهایـی (S) ساختمان به‌دست می‌آید. ایـن نمره با حـداقل نمره‌ی قابل قبول پیشنهادشده (S=2) مقایسـه می‌شود که در صورت بیشتر شدن نمره نهایی ساختمان از حداقل نمره‌ی قابل قبول، ساختمان در گروه ۱ و در صورت کمتر شدن از آن در گروه ۲ از طبقه‌بندی بالا قرار می‌گیرد.

روش دستورالعمل NRC

دستورالعمل NRC (NRCC,1993) که در سال ۱۹۹۳ توسط انجمن تحقیقات ملی کانادا منتشر شد، برگرفته از سند ATC21 است که بـا

عنوان" ارزیابی چشمی سریع ساختمان‌ها برای خطرات لرزه‌ای بالقوه" توسط FEMA در سال ۱۹۸۸ میلادی منتشر گردید. در این روش یک فرم ارزیابی لرزه‌ای دوصفحه‌ای ارائه شده است که پس از بازدید از ساختمان و تکمیل فرم، دو شاخص سازه‌ای و غیرسازه‌ای تعیین شده و از مجموع آن‌ها شاخص اولویت لرزه‌ای که نمره نهایی (SPI) ساختمان محسوب می‌شود، به‌دست می‌آید. در این روش بر اساس مقدار به‌دست‌آمده برای نمره نهایی، ساختمان‌ها به‌لحاظ اولویت برای ارزیابی بیشتر، به سه گروه با اولویت پایین، متوسط و بالا و همچنین در سطحی بالاتر با عنوان ساختمان‌های خطرناک طبقه‌بندی می‌شوند.

روش آریای تکمیل‌شده

روش ارزیابی کیفی آریا توسط آریا (ARYA,1967) در سال ۱۹۶۷ میلادی پیشنهاد شده است. با توجه به‌اینکه این روش بر مبنای ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌های بنایی پایه‌گذاری شده است، در ارزیابی ساختمان‌های با اسکلت بتن مسلح و فولادی دارای محدودیت‌هایی است (از قبیل: ارتفاع ساختمان، مشخصات مصالح و ...)، ولی با توجه به‌اینکه این روش ارزیابی، قابلیت تغییر و سازگاری با شرایط ساخت‌وساز متفاوت را داراست، در سال ۱۳۸۳، توسط زهرایی و همکاران (زهرایی و همکاران، ۱۳۸۳) طی بررسی‌های کارشناسی، روش آریا به‌روش تکمیل‌شده اصلاح گردید که طی آن مجموعه‌ای از اصلاحات تکمیلی در بندهای کلی جدول آریا صورت گرفت. روش ارزیابی آسیب‌پذیری آریا، دارای جداول طبقه‌بندی‌شده شامل پارامترها و شاخص‌های اصلی آسیب‌پذیری و ضرایب خسارت است، به‌طوری‌که ضرایب خسارت برای شدت‌های مختلف زمین‌لرزه قابل محاسبه می‌باشد. در این روش، ضرایب خسارت بین (۰-۴) برحسب مقدار تأثیر شاخص در میزان خسارت به ساختمان برای سه شدت زمین‌لرزه ۷، ۸ و ۹ در مقیاس شدت MSK تعیین شده‌اند. در این روش میزان آسیب با نسبت خسارت ساختمان (LR) که از مجموع اثر ضرایب خسارت با استفاده از معادله‌ی نسبت خسارت به‌دست می‌آید، به‌صورت عددی بین (۰-۱) تعیین می‌شود و میزان خسارت وارده به ساختمان بر اساس مقدار نسبت خسارت حاصل مشخص می‌گردد. پس از تعیین نسبت خسارت، ساختمان‌ها به لحاظ میزان خسارت، در یکی از گروه‌های خسارت کم، متوسط، زیاد و احتمال ریزش ساختمان قرار می‌گیرد.

روش نشریه ۳۶۴

نشریه ۳۶۴ (معاونت برنامه‌ریزی،۱۳۸۷) در سال ۱۳۸۷ در راستای پروژه‌های مقاوم‌سازی و بهسازی ساختمان‌های مهم، تأسیسات زیربنایی و شریان‌های حیاتی کشور و لزوم توجه به امر اولویت‌بندی و ارزیابی سریع ساختمان‌های موجود جهت جلوگیری از ورود ساختمان‌هایی که ارزیابی لرزه‌ای آن‌ها توجیه فنی و اقتصادی ندارد، تدوین شد. فرآیند ارزیابی لرزه‌ای سریع ساختمان‌های موجود در این نشریه، در دو مرحله‌ی ارزیابی چشمی و ارزیابی کیفی صورت می‌گیرد. این ارزیابی علاوه بر معرفی یک شاخص کمّی تحت عنوان شاخص ارزیابی لرزه‌ای ساختمان، در قالب برگه‌های ازپیش‌تعیین‌شده اطلاعاتی کیفی از رفتار ساختمان ارائه می‌نماید. ارزیابی لرزه‌ای چشمی می‌تواند به‌صورت مستقل و فارغ از قسمت‌های دیگر این دستورالعمل به‌منظور شناسایی و اولویت‌بندی اولیه‌ی ساختمان‌ها در طرح‌های کاهش خطرپذیری یا اهداف دیگر استفاده گردد. ساختار کلی برگه‌ی ارزیابی سریع چشمی ارائه‌شده در نشریه ۳۶۴ برگرفته از فرم ارائه‌شده در دستورالعمل FEMA154 است. در این روش نیز ارزیاب اقدام به بازدید از ساختمان و تکمیل برگه‌ی ارزیابی می‌کند. از جمع جبری نمرات پایه و اصلاحی، شاخص ارزیابی لرزه‌ای (S) به‌دست می‌آید. پس از تعیین کرانه‌ی پایین شاخص ارزیابی لرزه‌ای (S_L)، کرانه‌ی بالای شاخص ارزیابی لرزه‌ای (S_U) و شاخص ارزیابی لرزه‌ای پایه (S_B)، طبقه‌بندی ساختمان‌ها انجام می‌گیرد. این نشریه ساختمان‌ها را در چهار گروه طبقه‌بندی می‌کند که جزئیات آن در جدولی در نشریه ۳۶۴ ارائه شده است.

دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰)

دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (معاونت برنامه‌ریزی،۱۳۹۲)، اولین بار توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور در سال ۱۳۸۱ منتشر شده است که در سال ۱۳۸۵ مورد بازنگری قرار گرفته است. این دستورالعمل آخرین بار در سال ۱۳۹۲ مورد تجدید نظر قرار گرفته و توسط معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور منتشر شده است. چارچوب پیش‌نویس اولیه دستورالعمل بر اساس گزارش‌های FEMA به‌خصوص FEMA273، FEMA274، FEMA356 و FEMA357 بوده است. در این دستورالعمل روال ارزیابی و بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها برای سطوح مختلف عملکرد ارائه شده است و در مورد بسیاری از اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای خاص ایران، معیارهای پذیرش و بهسازی مناسب عرضه شده است.

معرفی ساختمان‌های مورد مطالعه

برای بررسی میزان دقت روش‌های ارزیابی سریع آسیب‌پذیری لرزه‌ای، دو نمونه ساختمان مسکونی با سیستم سازه‌ای قاب ساده فولادی دارای مهاربند همگرا در شهر تبریز جهت مطالعه موردی انتخاب شده است که مشخصات آن‌ها در جداول ۱، ۲ و۳ ارائه شده است.

جدول۱: مشخصات ساختمان‌های مورد مطالعه

نام اختصاری	تعداد طبقات	نوع خاک	نوع سقف	تاریخ ساخت	محل ساخت
BR1	3	III	طاق‌ضربی	1371	تبریز
BR2	2	II	طاق‌ضربی	1374	تبریز

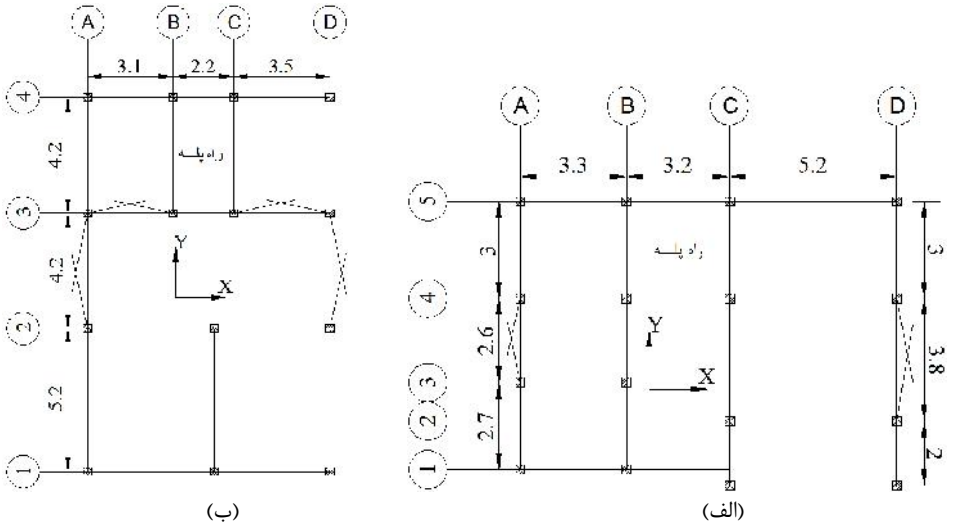
جدول۲: مشخصات مقاطع اعضا در ساختمان‌های مورد مطالعه

ساختمان	نام عضو	مقطع
BR1	ستون	INP140 و INP160
	مهاربند	2L60x60x6
BR2	ستون	Tube140x5.6
	مهاربند محور A و D	2L80x80x8
	مهاربند محور ۳	2L120x120x12

جدول۳: مشخصات مصالح مورد استفاده در ساختمان‌های مورد مطالعه

نام مشخصه پروفیل‌های فولادی	مقدار
مقاومت تسلیم مورد انتظار $\left(Kg/Cm^2\right)$	2450
کرانه‌ی پایین مقاومت تسلیم $\left(Kg/Cm^2\right)$	2250
مدول الاستیسته $\left(Kg/Cm^2\right)$	2.04×10^6
ضریب پواسون	0.3

در جدول ۲ ابعاد مقاطع بر حسب میلی‌متر هستند. نوع خاک در جدول ۱ بر اساس استاندارد۲۸۰۰ بوده و در سقف‌های هر دو ساختمان، تیرآهن‌ها به‌وسیله‌ی میلگردهای فولادی به‌صورت ضربدری به یکدیگر بسته شده‌اند. پلان سازه ساختمان‌های BR1 و BR2 در شکل۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ساختمان BR1 فقط در یک امتداد اصلی و ساختمان BR2 در هر دو امتداد اصلی متعامد دارای مهاربند است. مهاربندهای محور۳ از نوع قطری و سایر مهاربندها ضربدری می‌باشند. با توجه به عدم وجود سیستم باربر جانبی در یک امتداد ساختمان BR1، آسیب‌پذیر بودن لرزه‌ای ساختمان در بالاترین سطح، به‌عنوان نتیجه‌ی ارزیابی سریع و کمّی بدیهی است. با توجه به‌اینکه هدف مقاله، مقایسه نتایج ارزیابی سریع و کمّی ساختمان‌ها می‌باشد، در صورت درنظر گرفتن امتداد بدون سیستم باربر جانبی در ارزیابی آن، مقایسه مفیدی میان نتایج ارزیابی سریع و کمّی صورت نخواهد گرفت. بنابراین این ساختمان فقط در امتداد دارای مهاربند، مورد ارزیابی سریع و کمّی قرار می‌گیرد.



شکل۱: پلان سازه ساختمان‌های مورد مطالعه: (الف) ساختمان BR1 (شکل سمت راست)؛ (ب) ساختمان BR2 (شکل سمت چپ)

ارزیابی سریع آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های مورد مطالعه

در هر یک از روش‌های ارزیابی سریع آسیب‌پذیری لرزه‌ای، سطوحی از آسیب‌پذیری پیش‌بینی شده است که ساختمان‌ها پس از ارزیابی، در یکی از این سطوح قرار می‌گیرند. سطوح یادشده در جدول۴ نشان داده شده‌اند. ساختمان‌های مورد مطالعه با استفاده از روش‌های ارزیابی سریع آسیب‌پذیری، مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج ارزیابی آن‌ها بر اساس جدول۴، در جداول ۵ و۶ آورده شده است.

در جداولی که در ادامه آورده شده است، جهت اختصار، FEMA، NRC، ARYA و 364 به‌ترتیب نمایانگر روش‌های FEMA154، NRC، آریای تکمیل‌شده و نشریه ۳۶۴ درنظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است به‌دلیل لرزه‌خیزی بسیار زیاد شهر تبریز و سابقه زلزله‌های ویرانگر در آن، نتایج مربوط به‌شدت ۹ در مقیاس MSK، به‌عنوان نتایج ارزیابی ساختمان‌های مورد مطالعه با روش آریای تکمیل‌شده، درنظر گرفته شده است. مقادیر پیشنهادی نشریه ۳۶۴ برای S_L، S_B و S_U به‌ترتیب برابر صفر، ۲ و ۳ است.

جدول ۴: سطوح آسیب‌پذیری پیش‌بینی‌شده در روش‌های ارزیابی سریع

روش ارزیابی	سطوح آسیب‌پذیری	محدوده آسیب‌پذیری	روش ارزیابی	سطوح آسیب‌پذیری	محدوده آسیب‌پذیری
NRC	اولویت برای ارزیابی بیشتر پایین	SPI<10	FEMA	ساختمان دارای ایمنی قابل قبول	S>2
	اولویت برای ارزیابی بیشتر متوسط	10<SPI<20			
	اولویت برای ارزیابی بیشتر بالا	SPI>20		ساختمان خطرناک به‌لحاظ لرزه‌ای	S<2
	ساختمان خطرناک	SPI>30			
364	آسیب‌پذیری کم	$S> S_U$	ARYA	احتمال ریزش ساختمان	LR ≥ 0.75
	آسیب‌پذیری متوسط	$S_B<S<S_U$		خسارت زیاد – بازسازی الزامی	0.5 ≤ LR < 0.75
	آسیب‌پذیری زیاد	$S_L<S<S_B$		خسارت متوسط – نیاز به تعمیر زیاد	0.25 ≤ LR < 0.5
	آسیب‌پذیری بسیار زیاد	$S<S_L$		خسارت کم – نیاز به تعمیر جزئی	LR<0.25

جدول ۵: نتایج ارزیابی ساختمان BR1 با روش‌های ارزیابی سریع

روش ارزیابی سریع	نمره ساختمان	نتیجه ارزیابی
FEMA 154	1.1	ساختمان خطرناک به‌لحاظ لرزه‌ای
NRC	18	اولویت برای ارزیابی بیشتر، متوسط
ARYA	0.5	خسارت زیاد- بازسازی الزامی
364	0.6	آسیب‌پذیری زیاد

جدول ۶: نتایج ارزیابی ساختمان BR2 با روش‌های ارزیابی سریع

روش ارزیابی سریع	نمره ساختمان	نتیجه ارزیابی
FEMA 154	1.3	ساختمان خطرناک به‌لحاظ لرزه‌ای
NRC	16	اولویت برای ارزیابی بیشتر، متوسط
ARYA	0.46	خسارت متوسط – نیاز به تعمیر زیاد
364	1.3	آسیب‌پذیری زیاد

ارزیابی کمّی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های مورد مطالعه

برای ارزیابی کمّی ساختمان‌های مورد نظر، روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) مورد استفاده قرار گرفته است و مدل‌سازی و تحلیل سازه‌ی آن‌ها در نرم‌افزار SAP2000 (Computers and Structures Inc, 2013) انجام شده است. پس از مدل‌سازی سه‌بعدی سازه‌ی هر دو ساختمان و تحلیل‌های مورد نیاز، کنترل‌های لازم بر اساس دستورالعمل بهسازی (معاونت برنامه‌ریزی، ۱۳۹۲) انجام شده است که در ادامه تشریح می‌شود.

کنترل صلبیت دیافراگم

برای کنترل صلبیت دیافراگم مطابق دستورالعمل بهسازی، یک تحلیل استاتیکی معادل برای ساختمان‌های فولادی انجام شده است و نیروی جانبی وارد بر طبقه از آن به‌دست آمده است. دیافراگم بام هر دو ساختمان که به‌لحاظ هندسی مشابه سایر طبقات ساختمان هستند، به‌صورت تیر عمیق بر روی تکیه‌گاه‌هایی با سختی متفاوت (تکیه‌گاه فنری) مدل شده و نیروی افقی وارد بر طبقه، متناسب با توزیع جرم در آن بر روی تیر اعمال شده است. برای ساخت مدل تحلیلی دیافراگم، طبق دستورالعمل بهسازی، از پیوست استاندارد ۲۸۰۰ (مرکز تحقیقات مسکن،۱۳۸۴) استفاده شده است. با توجه به کمتر شدن نسبت حداکثر تغییرشکل افقی دیافراگم (حداکثر تغییرشکل تیر عمیق) به متوسط تغییرمکان نسبی طبقه‌ی بام در هر دو ساختمان از عدد ۰/۵، مطابق ضوابط دستورالعمل بهسازی، دیافراگم هر دو ساختمان مورد مطالعه صلب فرض شده است.

کنترل درنظر گرفتن پیچش اتفاقی

برای کنترل نیاز یا عدم نیاز به درنظر گرفتن پیچش اتفاقی در تحلیل ساختمان‌ها، ابتدا یک تحلیل استاتیکی خطی بر اساس نشریه ۳۶۰ انجام شده است. سپس ضریب تغییرمکان η که در هر طبقه به‌صورت نسبت حداکثر تغییرمکان افقی به تغییرمکان متوسط آن طبقه محاسبه می‌گردد، برای هر طبقه تعیین شده است. مطابق این نشریه اگر تحت کل لنگر پیچشی (جمع لنگر پیچشی واقعی و اتفاقی)، ضریب تغییرمکان در تمام طبقات کوچک‌تر از ۱/۱ باشد و یا اثر لنگر پیچشی اتفاقی کوچک‌تر از ۲۵ درصد اثر لنگر پیچشی واقعی باشد، می‌توان از اثر پیچش اتفاقی صرف‌نظر کرد. پس از کنترل موارد یادشده، خروج از مرکزیت اتفاقی در تحلیل ساختمان BR1 درنظر گرفته شده است و از اعمال آن در تحلیل ساختمان BR2 صرف‌نظر شده است.

کنترل نامنظمی

نامنظمی در پلان و ارتفاع برای ساختمان‌های مورد نظر، بر اساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در طبقات هر دو ساختمان مورد مطالعه، حداکثر تغییرمکان نسبی در انتهای ساختمان، با احتساب پیچش تصادفی، بیشتر از ۲۰ درصد با متوسط تغییرمکان نسبی

دو انتهای ساختمان در آن طبقه اختلاف دارد. بنابراین هر دو ساختمان نامنظم درنظر گرفته شده‌اند. بنابراین در تحلیل ساختمان BR2 اثر همزمان مؤلفه‌های افقی زلزله (ترکیب ۳۰ درصد) مطابق دستورالعمل بهسازی درنظر گرفته شده است. در ساختمان BR1 به‌دلیل ارزیابی آن در یک امتداد و بی‌تأثیر بودن اعمال اثر یادشده، از اعمال آن صرف‌نظر شده است.

مدل رفتار غیرخطی اعضا

با توجه به‌اینکه مهاربندها و ستون‌های دهانه مهاربندی نقش اصلی در عملکرد ساختمان در برابر نیروهای جانبی وارد بر ساختمان دارند، بنابراین فقط به این اعضا مفصل پلاستیک اختصاص داده‌شده و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. کشش و فشار محوری در مهاربندها طبق دستورالعمل بهسازی با رفتار تغییرشکل‌کنترل و ستون‌های دهانه‌ی مهاربندی با رفتار نیروکنترل درنظر گرفته شده‌اند. بنابراین مقاومت مورد انتظار برای مهاربندها و کرانه‌ی پایین مقاومت برای ستون‌ها در کشش و فشار مطابق دستورالعمل بهسازی و مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان (مقررات ملی ساختمان،۱۳۹۲) محاسبه شده‌اند. برای اعضای تغییرشکل‌کنترل، رفتار غیرخطی مطابق منحنی نیرو- تغییرشکل ارائه‌شده برای اعضا در دستورالعمل بهسازی، اختصاص داده شده است.

محاسبه تغییرمکان هدف

تغییرشکل‌ها و نیروهای داخلی اعضا در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی، در تغییرمکان هدف برآورد شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای تعیین تغییرمکان هدف از روش ضرایب تغییرمکان ارائه‌شده در دستورالعمل بهسازی استفاده شده است. با توجه به‌اینکه تغییرمکان هدف با استفاده از منحنی ظرفیت به‌دست‌آمده از تحلیل غیرخطی سازه به‌دست می‌آید، ابتدا یک تحلیل استاتیکی غیرخطی اولیه با تغییرمکان هدف فرضی انجام شده است. سپس با استفاده از طیف ظرفیت به‌دست‌آمده، مطابق دستورالعمل بهسازی دوخطی‌سازی آن انجام شده و تغییرمکان هدف نهایی سازه تعیین شده است. تغییرمکان هدف به‌دست‌آمده برای ساختمان BR1 برابر ۱۲/۷ سانتی‌متر و برای ساختمان BR2 در هر دو امتداد سازه برابر ۵ سانتی‌متر به‌دست آمده است.

نقطه کنترل و حالات بارگذاری

با توجه به فرض صلب بودن دیافراگم در ساختمان‌های مورد مطالعه، مطابق دستورالعمل بهسازی، نقطه‌ی کنترل برای هر دو ساختمان در مرکز جرم بام درنظر گرفته شده است. همچنین مطابق دستورالعمل، سازه تحت بارگذاری ترکیب‌بارهای ثقلی و جانبی قرار گرفته و به هنگام رسیدن نقطه‌ی کنترل به تغییرمکان هدف، سازه مورد ارزیابی قرار گرفته است. ترکیب‌بارها به این صورت درنظر گرفته شده‌اند که دو نوع توزیع بار جانبی شکل مود اول نوسان سازه و یکنواخت متناسب با وزن طبقات، در دو جهت خلاف یکدیگر، در ادامه‌ی حد پایین و بالای اثرات بارهای ثقلی بر سازه وارد می‌شوند.

نتایج تحلیل و ارزیابی سازه

پس از تحلیل سازه برای ساختمان‌های مورد مطالعه، تغییرشکل ایجادشده در اعضای تغییرشکل‌کنترل و نیروی محوری واردشده بر اعضای نیروکنترل، تحت ترکیب‌بار بحرانی به هنگام رسیدن تغییرمکان نقطه کنترل به تغییرمکان هدف، بر اساس معیارهای پذیرش ارائه‌شده در دستورالعمل بهسازی، کنترل شده‌اند که نتایج آن در جداول ۷ و ۸ آورده شده است. با توجه به‌اینکه بیشترین اثرات بارهای جانبی و ثقلی در طبقه اول ساختمان‌ها ایجاد می‌شود و مشخصات اعضا در طبقات ساختمان‌های مورد مطالعه یکسان هستند، طبقه اول هر دو ساختمان، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در جداول ۷ و ۸ منظور از عبارت "تأمین نمی‌کند" این است که عضو، هیچ سطح عملکردی حتی سطح عملکرد آستانه فروریزش را نیز تأمین نمی‌کند.

جدول۷: کنترل سطح عملکرد مهاربندها و نسبت نیرو به ظرفیت ستون‌ها در طبقه‌ی اول ساختمان BR1

طول دهانه مهاربندی(m)	عضو	نوع نیرو	سطح عملکرد
2.6	1	فشاری	تأمین نمی‌کند
		کششی	ایمنی جانی
	2	فشاری	تأمین نمی‌کند
		کششی	ایمنی جانی
3.8	1	فشاری	تأمین نمی‌کند
		کششی	ایمنی جانی
	2	فشاری	تأمین نمی‌کند
		کششی	ایمنی جانی

ستون	نوع نیرو	نیروی وارده(kg)	مقاومت(kg)	نسبت نیرو به ظرفیت
A3	فشاری	98073	64166	1.53
	کششی	46270	81900	0.56
A4	فشاری	98897	64166	1.54
	کششی	45615	81900	0.56
D2	فشاری	89014	64166	1.39
	کششی	29136	81900	0.36
D4	فشاری	92128	85109	1.08
	کششی	26022	102600	0.25

جدول۸: کنترل سطح عملکرد مهاربندها و نسبت نیرو به ظرفیت ستون‌ها در طبقه اول ساختمان BR2

دهانه	طول دهانه مهاربندی(m)	عضو	نوع نیرو	سطح عملکرد
3A-3B	3.1	1	فشاری	تأمین نمی‌کند
			کششی	قابلیت استفاده بی‌وقفه
3C-3D	3.5	1	فشاری	تأمین نمی‌کند
			کششی	قابلیت استفاده بی‌وقفه
A2-A3	4.2	1	فشاری	ایمنی جانی
			کششی	قابلیت استفاده بی‌وقفه
		2	فشاری	ایمنی جانی
			کششی	قابلیت استفاده بی‌وقفه
D2-D3	4.2	1	فشاری	تأمین نمی‌کند
			کششی	ایمنی جانی
		2	فشاری	تأمین نمی‌کند
			کششی	ایمنی جانی

ستون	نوع نیرو	نیروی وارده(kg)	مقاومت(kg)	نسبت نیرو به ظرفیت
A2	فشاری	40949	52813	0.78
	کششی	0	66600	0.00
D2	فشاری	93882	52813	1.78
	کششی	10444	66600	0.16
A3	فشاری	22726	52813	0.43
	کششی	0	66600	0.00
B3	فشاری	164314	52813	3.11
	کششی	0	66600	0.00
C3	فشاری	156590	52813	2.96
	کششی	0	66600	0.00
D3	فشاری	97453	52813	1.85
	کششی	50749	66600	0.76

همان‌طور که در جدول ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود، در طبقه اول ساختمان‌های BR1 و BR2 به‌جز مهاربند دهانه A2-A3 در ساختمان BR2 سایر اعضای مهاربندی در فشار، هیچ‌یک از سطوح عملکردی را تأمین نمی‌کنند. همچنین ستون‌های دهانه‌های مهاربندی طبقه اول در ساختمان BR1 و BR2، به‌غیر از ستون‌های A2 و A3 در ساختمان BR2، مقاومت کافی برای تحمل نیروی فشاری ایجادشده را ندارند. درنتیجه بر اساس توضیحات فوق می‌توان برای هر دو ساختمان مورد مطالعه بالاترین سطح آسیب‌پذیری را تحت بارهای لرزه‌ای درنظر گرفت.

مقایسه نتایج روش‌های ارزیابی سریع و کمّی

با توجه به‌اینکه ساختمان‌های مورد مطالعه بر اساس ارزیابی کمّی (تحلیلی)، بسیار آسیب‌پذیر ارزیابی شده‌اند، از بین روش‌های ارزیابی سریع، روشی که بیشترین آسیب‌پذیری را نتیجه داده باشد دارای دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها در ارزیابی ساختمان‌ها است. به‌عبارت دیگر روشی که ساختمان‌ها را در بالاترین سطح آسیب‌پذیری خود قرار داده باشد، دارای دقت کافی برای ارزیابی سریع ساختمان‌ها است. همان‌طور که در جداول ۵ و ۶ ملاحظه می‌شود، درمجموع نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی ساختمان‌های مورد مطالعه با روش‌های NRC و آریای تکمیل‌شده، از اطمینان کافی برخوردار نیستند و ساختمان‌های مورد نظر را در سطوح بالایی از آسیب‌پذیری قرار نداده‌اند. توجه به این نکته نیز می‌تواند مهم باشد که نمره به‌دست‌آمده از ارزیابی ساختمان BR1 با روش آریای تکمیل‌شده، در مرز ورود آن به سطح خسارت زیاد قرار دارد. روش نشریه ۳۶۴ با اینکه سطح آسیب‌پذیری بالایی را برای ساختمان‌های مورد مطالعه نتیجه داده است، ولی آن‌ها را در اولویت اول برای ادامه مطالعات بهسازی قرار نداده است. روش FEMA154 طبق ماهیت خود در ارزیابی ساختمان‌ها که آنها را در دو سطح آسیب‌پذیری طبقه‌بندی می‌کند و برای کلیه ساختمان‌های قرارگرفته در گروه ساختمان‌های خطرناک، اولویت یکسانی برای ارزیابی بیشتر آن‌ها درنظر گرفته است و همچنین با توجه به اینکه هر دو ساختمان مورد مطالعه را در سطح خطرناک به‌لحاظ لرزه‌ای قرار داده است، از اطمینان بیشتری برای ارزیابی ساختمان‌ها برخوردار بوده و نتایج آن در ارزیابی ساختمان‌های مورد مطالعه، سازگاری بیشتری با نتایج ارزیابی کمّی آن‌ها دارد. لازم به ذکر است، نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق، بر اساس مطالعه‌ی موردی دو ساختمان فولادی است و برای نیل به نتایج دقیق‌تر و جامع، نیاز به مطالعات موردی بیشتر شامل سیستم‌های سازه‌ای مختلف است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به‌منظور بررسی دقت روش‌های ارزیابی سریع، دو ساختمان فولادی با سیستم مهاربندی همگرا، با روش‌های ارزیابی سریع و کمّی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل از دو روش با یکدیگر مقایسه شد. نتیجه بررسی به شرح زیر می‌باشد:

۱- روش ارزیابی FEMA154 با توجه به طبقه‌بندی ساختمان‌ها در دو سطح آسیب‌پذیری، به‌طور طبیعی از اطمینان و دقت بیشتری برای ارزیابی لرزه‌ای سریع ساختمان‌های فولادی با سیستم مهاربندی برخوردار است. این موضوع را می‌توان به‌دلیل قرار گرفتن کلیه ساختمان‌های با آسیب‌پذیری متفاوت، در اولویت یکسان مطالعات بهسازی درنظر گرفت.

۲- روش نشریه ۳۶۴ نسبت به روش‌های NRC و آریای تکمیل‌شده، در ارزیابی ساختمان‌های فولادی دارای دقت بیشتری می‌باشد.

منابع

آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله- استاندارد ۲۸۰۰ (۱۳۸۴)، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

جاودانی ج (۱۳۸۰) مقایسه روش‌های کیفی و کمّی ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

دستورالعمل ارزیابی لرزه‌ای سریع ساختمان‌های موجود (۱۳۸۷)، نشریه شماره۳۶۴، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور

دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (۱۳۹۲)، تجدید نظر اول، نشریه شماره۳۶۰، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور

زهرایی س م، وطنی اسکویی ا، ارشاد ل (۱۳۸۳) بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های شهر قزوین، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران

طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی (۱۳۹۲)، ویرایش چهارم، مبحث دهم، مقررات ملی ساختمان

محسنی ص (۱۳۸۷) مقایسه روش‌های ارزیابی کیفی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و انتخاب روش مناسب ضمن برآورد آسیب‌پذیری کمی چند ساختمان شهر بندرعباس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران

محمودزاده ا، پیراسته س، بهنام‌فر ف، تاجیک ت، تاجمیر ریاحی ا (۱۳۸۹) ارزیابی سریع آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی با معرفی روش جدید شاخص-سازان، انتشارات علم‌آفرین، اصفهان

Alam N, Shahria Alam M and Tesfamariam S (2012) Building' Seismic Vulnerability Assessment Methods:A Comparative Study, *Journal of Natural Hazards*, 62: 405–424

Arya AS (1967) Design and Construction of Masonary Building in Seismic Areas, Bulletin, Indian Society of Earthquake Technology

Computers and Structures Inc (2013)SAP2000 V16.0.0, Structural Analysis Program, CSI, Berkeley

FEMA154 (2002) Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards, A Handbook, Edition 2, Federal Emergency Management Agency, Washington, D

NRCC 36943 (1993) Manual for Screening of Buildings for Seismic Investigation, Institute for Research in construction, National Research Council Canada, Ottawa