

A method for calculating expected seismic resilience and cost-time recovery curve of buildings

Ali Afzalifard¹, Kazem Shakeri^{2*}, Vahid Jahangiri³

1- Ph.D. students, Department of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Associate Professor, Department of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- Assistant Professor, Department of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

Seismic resilience of a structure is defined as the ability of the system to maintain its functionality and to quickly return the damaged system to the required functionality. In this approach, system performance is evaluated through a unique decision variable called "resilience" which includes a combination of several variables (economic losses, casualties, reconstruction time, etc.). In the present study, a method for calculating the expected seismic resistance of buildings is presented. In the proposed method, it is assumed that the amount of reduction in the performance of the system is proportional to the direct economic damage to the structural and non-structural elements. The recovery cost and time of the structural and non-structural elements are calculated using FEMA-P58 library data and the reconstruction time of the whole building is calculated based on the order of the proposed reconstruction operations in the REDi instruction. The proposed method is applied to 9-storey buildings with Per-Northridge and Post-Northridge steel moment frames and expected recovery cost, expected recovery time and the expected seismic resilience for the two buildings are compared. The total recovery time according to REDi method is very different from the total recovery time provided by FEMA P58 and should be seriously considered in calculating the cost-time curve and resilience of different systems. It is also observed that using Post-Northridge connections in comparison with Pre-Northridge connections, significantly reduces the recovery costs and time, and thus increases seismic resilience.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 June 2022

Revise Date: 05 September 2022

Accept Date: 11 September 2022

Keywords:

Seismic Resilience

FEMA P58

REDi

Recovery time

Recovery Cost

Expected

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.348087.2855>

*Corresponding author: Kazem Shakeri.

Email address: shakeri@uma.ac.ir

ارائه روشی جهت محاسبه تاب‌آوری لرزه‌ای و منحنی هزینه-زمان بازسازی موردانتظار در ساختمان‌ها

علی افضلی فرد^۱، کاظم شاکری^{۲*}، وحید جهانگیری^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

تاب‌آوری لرزه‌ای یک سازه به‌صورت توانایی سیستم در حفظ عملکرد و قابلیت بازگشت سریع سیستم آسیب‌دیده به عملکرد موردانتظار تعریف می‌شود. در این نگرش عملکرد سیستم از طریق یک متغیر تصمیم‌گیری منحصر به فرد تحت عنوان "تاب‌آوری" که شامل ترکیبی از چندین متغیر (خسارت‌های اقتصادی، تلفات جانی، زمان بازسازی و ...) می‌باشد ارزیابی می‌شود. در مطالعه حاضر، روشی جهت محاسبه منحنی هزینه-زمان بازسازی پس از وقوع آسیب و تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار سازه‌های ساختمانی ارائه شده است. در روش پیشنهادی میزان کاهش در عملکرد سازه متناسب با خسارت‌های اقتصادی مستقیم وارد به سازه و اجزای غیرسازه‌ای در نظر گرفته می‌شود. هزینه و زمان بازسازی المان‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای با استفاده از داده‌های کتابخانه‌ای FEMA-P58 استخراج شده و زمان بازسازی کل سازه براساس ترتیب انجام عملیات بازسازی پیشنهادی در دستورالعمل REDi محاسبه می‌شود. در این روش منحنی هزینه-زمان برای بازسازی المان‌های مختلف آسیب‌دیده و همچنین میزان پیشرفت بازسازی سیستم در بازه‌های زمانی مختلف (مسیر بازسازی) قابل محاسبه می‌باشد. شیوه پیشنهادی در نرم‌افزار متلب برنامه‌نویسی شده و بر روی یک ساختمان ۹ طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی در دو حالت با اتصالات *Per-Northridge* و *Post-Northridge* اعمال شده و هزینه بازسازی، زمان بازسازی و تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار در دو حالت باهم مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قابلیت محاسبه کمی و مقایسه تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌ها با سیستم‌های سازه‌ای مختلف را به‌طور موثری فراهم می‌سازد. زمان بازسازی کل محاسبه شده مطابق شیوه REDi، اختلافی در حدود ۵۰ الی ۸۰ درصد با زمان بازسازی کل ارائه شده توسط FEMA-P58 دارد و می‌بایست در محاسبه منحنی هزینه-زمان و تاب‌آوری سیستم‌های مختلف موردتوجه جدی قرارگیرد. همچنین مشاهده می‌شود استفاده از اتصالات *Post-Northridge* در مقایسه با اتصالات *Pre-Northridge* موجب کاهش ۳۷٪ در هزینه‌های بازسازی و ۲۲٪ در مدت‌زمان بازسازی شده و در نتیجه باعث افزایش تاب‌آوری لرزه‌ای سازه می‌شود

کلمات کلیدی: تاب‌آوری لرزه‌ای، FEMA-P58، REDi، زمان بازسازی، هزینه بازسازی، موردانتظار

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.348087.2855	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.348087.2855	۱۴۰۲/۰۴/۳۱	۱۴۰۱/۰۶/۲۰	۱۴۰۱/۰۶/۲۰	۱۴۰۱/۰۶/۱۴	۱۴۰۱/۰۴/۰۲
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				کاظم شاکری		
				shakeri@uma.ac.ir		

۱- مقدمه

در طول تاریخ جوامع بشری همواره در معرض آسیب‌های ناشی از بلایای طبیعی از قبیل سیل، طوفان، زلزله و غیره بوده‌اند. ریسک خسارت‌های اقتصادی ناشی از حوادث طبیعی و همچنین طولانی بودن روند بازسازی سازه‌های آسیب‌دیده در حوادث بزرگ موجب شده است محققین همواره در راستای کاهش تبعات اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی غیرمنتظره ناشی از این حوادث تلاش کنند. طوفان و سیل حدود ۷۰٪ این حوادث طبیعی را شامل می‌شوند در حالی که بیش‌ترین میزان کشته‌ها مربوط به زلزله می‌باشد. به‌عنوان مثال در سال ۲۰۱۱ زلزله به تنهایی منجر به کشته شدن جمعیتی بالغ بر ۲۹۷۸۲ نفر و خسارت مالی مستقیم ۳۶۶ میلیارد دلاری در سرتاسر جهان شده است [۱]. اثرات مخرب زلزله در چند دهه گذشته، از جمله مواردی که در لوما پریتا (۱۹۸۹)، نورث‌ریچ (۱۹۹۴)، نیوزلند (۲۰۱۱) و ژاپن (۲۰۱۱) اتفاق افتاد، ضرورت ارزیابی صحیح از رفتار سازه‌ها تحت اثر تحریک لرزه‌ای را نشان می‌دهد که منجر به تکامل آیین‌نامه‌ها و روش‌های طراحی لرزه‌ای در طول سالین گذشته گردیده است. امروزه نیز محققین به دنبال توسعه شیوه‌های طراحی پیشرفته‌ای هستند تا سازه‌ها ضمن برخورداری از ایمنی کافی در طول عمر خود بتوانند تحت اثر زلزله‌ها با سطوح خطر مختلف عملکرد موردنظر را حفظ نمایند و یا در صورت از دست دادن عملکرد خود، در کم‌ترین زمان، بازسازی شده و به بهره‌برداری مجدد برسند.

در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای رایج همانند آیین نامه ۲۸۰۰ ایران یا ASCE7-16 [۲] که براساس تحلیل الاستیک سازه‌ها پایه‌گذاری شده‌اند از نیروی زلزله کاهش یافته (بر مبنای ضریب رفتار سازه) استفاده شده و طراحی اعضای سازه‌ای براساس کنترل نیرویی صورت می‌گیرد. اگرچه با رعایت الزامات آیین‌نامه‌های طراحی رایج، حفظ سطح عملکرد ایمنی جانی و همچنین جلوگیری از فروریزش در اثر زلزله‌های بزرگ تامین می‌شود، با این حال یک ساختمان جدید که با حداقل معیارهای آیین‌نامه‌های ساختمانی ساخته شده است، هنوز می‌تواند خسارت‌های شدیدی را تجربه کند که آن را برای مدت طولانی غیرقابل استفاده نماید و حتی در برخی موارد، فرآیند بازسازی ممکن است بسیار پرهزینه باشد و تخریب به‌عنوان تنها گزینه باقی بماند. به‌طوری‌که پس از زلزله نورث‌ریچ در سال ۱۹۹۴ و زلزله کوبه ژاپن در سال ۱۹۹۵، بخش‌هایی از سازه‌ها آسیب جدی را تجربه کردند و نیاز به مقاوم‌سازی سازه‌های موجود در برابر زلزله‌های آتی موجب گردید تا ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها از طریق روش‌های دقیق‌تر و بر مبنای تحلیل غیرخطی سازه‌ها توسعه یافته و فلسفه مدرن طراحی براساس عملکرد (PBD) به وجود آید. گزارش‌هایی همانند FEMA-356 [۳] و ATC-40 [۴] براساس همین فلسفه طراحی براساس عملکرد برای ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها تهیه شدند. در این شیوه سازه به‌صورت غیر الاستیک مورد تحلیل قرار گرفته و تغییر مکان‌های واقعی تعیین می‌گردد و سطوح عملکردی گسسته برای سازه یعنی حد فروریزش^۱، ایمنی جانی^۲، قابلیت استفاده بی‌وقفه^۳ و خدمت رسانی بی‌وقفه^۴ تعریف شده است. یکی از معایب این شیوه، تعیین سطوح عملکرد ساختمان به‌صورت غیراحتمالاتی و متعین می‌باشد و از مقادیر عددی متعین برای مرزبندی بین سطوح عملکردی مختلف در المان‌ها استفاده می‌شود، به‌طوری‌که به‌عنوان مثال در صورتی که دوران یا جابه‌جایی ایجاد شده در یک المان از مقدار معین شده برای مرز یک سطح عملکرد بیش‌تر باشد، سطح عملکرد موردنظر تامین نشده و در صورتی که کمتر باشد سطح عملکرد موردنظر مورد پذیرش قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر تصمیم‌گیری در خصوص تامین یا عدم تامین شدن یک سطح عملکرد به صورت قطعی و غیراحتمالاتی می‌باشد. همچنین در این روش مهندسیین قادر نیستند ارتباط مشخصی بین پارامترهای نیاز لرزه‌ای و مقادیر سطوح عملکردی در مقیاس المان با سطح عملکرد در مقیاس کل سیستم به‌دست آورند. مشکل دیگر این می‌باشد که مفاهیمی همانند ایمنی جانی، قابلیت استفاده بی‌وقفه و ... برای کارفرمایان و یا شرکت‌های بیمه‌گر قابل درک نمی‌باشد. به‌منظور رفع این نقایص، نسل بعدی آیین‌نامه‌های طراحی براساس عملکرد به‌صورت احتمالاتی با لحاظ عدم قطعیت‌های مختلف در چارچوبی توسط مرکز تحقیقات مهندسی زلزله اقیانوس آرام PEER PBEE [۵] معرفی شده است. در سال ۲۰۱۲، شورای فناوری کاربردی^۵، طی پروژه ATC-58 [۶]، روش FEMA P-58 را به‌عنوان بخشی از نسل بعدی طراحی لرزه‌ای سازه‌ها مبتنی بر عملکرد منتشر کرد. در این روش، خسارت زلزله

¹ Collapse Prevention

² Life Safety

³ Immediate Occupancy

⁴ Operational

⁵ ATC

بر حسب احتمال فراگذشت از مقادیر مشخص معیار عملکردی مختلف (معروف به متغیرهای تصمیم⁶) اندازه گیری می شوند. بیان عملکرد به شیوهی FEMA P-58 با استفاده از متغیرهای تصمیم گیری مانند هزینه بازسازی، زمان بازسازی، تلفات جانی و اثرات زیست محیطی در مقایسه با سطوح عملکرد کیفی و گسسته مرسوم مانند ایمنی جانی یا حد فروریزش، از مزایای بسیاری برخوردار است. یکی از این مزایا، ایجاد ارتباطات بهتر بین تصمیم گیرندگان و مهندسان محاسب می باشد. علاوه بر این، در نظر گرفتن صریح عدم قطعیت های بالقوه و عملکرد اجزای غیرسازه ای از دیگر مزایای آن می باشد.

زمان بازسازی برای سازه های مهم از قبیل تاسیسات نظامی، بیمارستان ها، شرکت های تجاری، مراکز تجاری و ... به هنگام وقوع حادثه از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد و در سازه های حیاتی اهمیت زمان بازسازی برای رسیدن به امکان بهره برداری مجدد چه بسا از هزینه های بازسازی نیز بیش تر می باشد. هر دو پارامتر زمان و هزینه رابطه تنگاتنگی باهم دارند و کاهش خسارت وارد به سیستم تاثیر به سزایی در کاهش زمان بازسازی خواهد داشت و از طرف دیگر کاهش زمان بازسازی تاثیر عمده ای در کاهش خسارت های غیرمستقیم ناشی از تعطیلی کسب و کار و کاهش عملکرد مورد انتظار دارد. در سال های اخیر محققین مفهوم جدیدی به منظور ارزیابی عملکردی سازه ها با عنوان تاب آوری لرزه ای سازه ها مطرح کرده اند که ترکیب پارامترهای هزینه و زمان بازسازی را با هم دیگر در نظر می گیرد. این فلسفه به تدریج راه خود را به آیین نامه های طراحی مدرن باز کرده و زمینه یک جهش دیگر به سمت طراحی مبتنی بر تاب آوری (RBD⁷) را فراهم می کند. در این نگرش تاب آوری سازه به عنوان پارامتر ارزیابی عملکردی سازه در نظر گرفته می شود. هدف نهایی در این نگرش به حداقل رساندن آسیب وارده به سیستم و همچنین قابلیت بازسازی سریع سیستم می باشد تا بتواند ایمنی و قابلیت عملکرد خود را دوباره به دست آورد. با توجه به ماهیت احتمالاتی پارامترهای دخیل در تاب آوری و عدم قطعیت های موجود، در این مقاله روشی جهت محاسبه کمی تاب آوری لرزه ای مورد انتظار سازه های ساختمانی ارائه شده است.

۲- تاب آوری

در علم مهندسی، تاب آوری⁸ یک سیستم (از قبیل ساختمان، پل، شبکه تاسیسات زیربنایی، شبکه حمل و نقل و ...) به صورت تابعی تعریف می شود که توانایی سیستم در حفظ سطح مشخصی از عملکرد⁹ و بازیابی سریع عملکرد مورد نظر در اثر وقوع یک حادثه در طول یک دوره زمانی تعیین شده (که اصطلاحاً زمان کنترل¹⁰ (T_{LC}) یا دوره حیات¹¹ یا طول عمر¹² نامیده می شود) را نشان می دهد [7]. به عبارت دیگر یک سازه تاب آور به سازه ای اطلاق می شود که تحت یک حادثه، متحمل کمترین خسارت شده و در سریع ترین زمان به قابلیت بهره برداری دوباره بازگردد. تاب آوری یک پارامتر بدون بعد بوده و به صورت درصد بیان می شود. به عنوان مثال تاب آوری یک سازه که تحت زلزله هیچ آسیبی را متحمل نمی شود ۱۰۰٪ و برای سازه ای که نیاز به تخریب و ساخت دوباره داشته باشد صفر درصد تعریف می شود. در واقع عملکرد سیستم از طریق یک متغیر تصمیم گیری منحصر به فرد که شامل ترکیبی از چندین متغیر (خسارت های اقتصادی، تلفات جانی، زمان بازسازی و غیره) می باشد با عنوان "تاب آوری سیستم" ارزیابی می شود.

از نظر گرافیکی، تاب آوری یک سیستم معمولاً به صورت مساحت ناحیه هاشور خورده زیر تابع نرمال شده عملکرد سیستم یعنی Q(t) تعریف می شود (شکل ۱). Q(t) یک متغیر تصادفی بی بعد می باشد که به صورت تابعی براساس زمان از تکه های بهم پیوسته تشکیل شده است [7]. تاب آوری سیستم در برابر یک حادثه به صورت تابع رابطه ۱، مطابق شکل ۱ تعریف می شود:

$$R = \int_{T_0}^{T_0+T_{LC}} \frac{Q(t)}{T_{LC}} dt \quad (1)$$

⁶ Decision variable

⁷ Resilience Based Design

⁸ Resilience

⁹ Functionality or Performance

¹⁰ Control Time

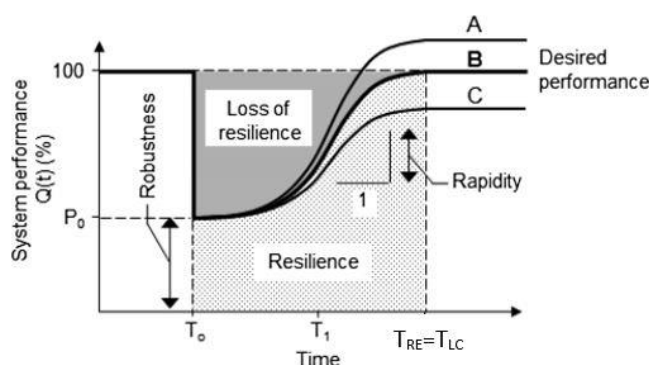
¹¹ Life Cycle

¹² Life Span

در رابطه فوق، T_{LC} زمان کنترل سیستم و T_0 زمان وقوع حادثه E می‌باشد. فرمول‌های مختلفی بر مبنای نوع سیستم مورد بررسی (سیستم شبکه حمل و نقل، سیستم تامین انرژی شهری، بیمارستان‌ها، پل‌ها و ...) برای محاسبه کمی تاب‌آوری توسط محققین مختلف ارائه شده است. به عنوان مثال در مطالعه سیمیلارو و همکارانش [۷]، $Q(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q(t) = [1 - L(I, T_{RE})][H(t - t_0) - H(t - (t_0 + T_{RE}))] \times f_{Rec}(t, t_0, T_{RE}) \quad (2)$$

که در آن T_{RE} زمان بازسازی لازم برای حادثه E ، تابع خسارت، $L(I, T_{RE})$ تابع بازسازی، $f_{Rec}(t, t_0, T_{RE})$ عبارتست از تابع Heavyside که یک تابع پله‌ای است که مقدار آن برای مقادیر منفی صفر و برای مقادیر مثبت یک می‌باشد و t_0 زمان وقوع حادثه E می‌باشد [۷]. در شکل ۱ زمان کنترل سیستم و زمان بازسازی برابر در نظر گرفته شده است.



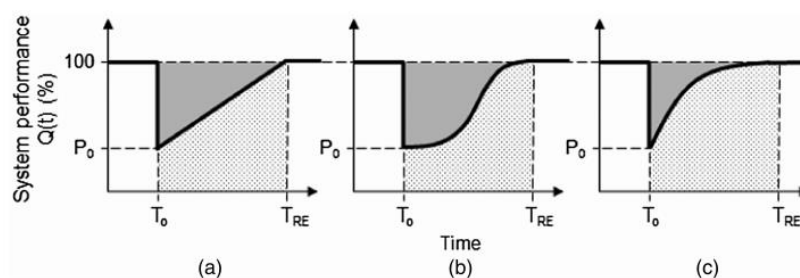
شکل ۱: منحنی تاب‌آوری یک سیستم تحت حادثه [۸]

زمان بازسازی T_{RE} ^{۱۳} طبق تعریف MCEER^{۱۴} عبارت است از زمان لازم برای بازگرداندن عملکرد یک سیستم به یک سطح قابل قبول، که می‌تواند کم‌تر، برابر و یا بیش‌تر از سطح عملکرد اصلی سیستم باشد. در تعریف جزئی‌تر، زمان بازسازی عبارت است از مدت‌زمان بین لحظه وقوع حادثه و تکمیل فرآیند تعمیر سیستم که شامل زمان لازم برای برنامه‌ریزی، تامین مالی و تکمیل عملیات تعمیر عناصر آسیب‌دیده می‌باشد [۹]. در واقع زمان بازسازی، یک متغیر تصادفی با عدم قطعیت زیاد می‌باشد که به عوامل مختلفی از قبیل شدت حادثه (زمین لرزه) در محل سیستم، زمان موردنیاز به‌منظور ارزیابی سازه آسیب‌دیده، تامین مالی پروژه، زمان بازسازی اعضای آسیب‌دیده و ... بستگی دارد.

توابع بازسازی مختلفی برای توصیف مسیر بازسازی یک سیستم می‌تواند انتخاب گردد که به آمادگی سیستم، منابع و امکانات موجود بستگی دارد. در اکثر مطالعات از توابع خطی، نمایی و مثلثاتی برای توصیف مسیر بازسازی یک سیستم پس از وقوع حادثه استفاده می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است [۸]. ساده‌ترین حالت، تابع بازسازی خطی است که در صورت نداشتن اطلاعات کافی در ارتباط با نحوه آمادگی سیستم برای پاسخ به وقوع حادثه و منابع موجود به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. تابع بازسازی نمایی هنگامی استفاده می‌شود که در ابتدای روند بازسازی امکان دسترسی و تخصیص امکانات و منابع مالی کافی توسط سیستم مدیریتی وجود داشته باشد، اما در ادامه سرعت بازسازی با نریک شدن به مراحل انتهایی کاهش پیدا کند. تابع بازسازی مثلثاتی زمانی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که در شروع بازسازی، سیستم با کمبود منابع مالی و محدودیت‌های مدیریتی مواجه باشد. به محض این‌که سیستم‌های اصلی تصمیم‌گیرنده، خود را سازماندهی کنند می‌توانند به سایر سیستم‌های دخیل در فرآیند بازسازی کمک کرده و موجب تسریع در روند بازسازی شوند [۸].

¹³ Recovery time or downtime

¹⁴ Multidisciplinary center for Earthquake Engineering Research (MCEER)



شکل ۲: مسیرهای مختلف بازسازی سازه [۸]

در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی در زمینه ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های مختلف و کمی‌سازی این پارامتر صورت گرفته است. سیمیلارو^{۱۵} و همکاران در سال ۲۰۱۰ چهارچوبی به‌منظور تحلیل کمی تاب‌آوری ارائه نمودند. در این مطالعه ابتدا به تشریح کامل تاب‌آوری و پارامترهای مختلف آن پرداخته شده است و تاب‌آوری دو سازه نمونه مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه خسارت‌های سازه با استفاده از HAZUS تعیین گردیده است. مقایسه تاب‌آوری سازه‌ها بر مبنای سطوح مختلف خطر لرزه‌ای و همچنین شیوه‌های مختلف مقاوم‌سازی نشان می‌دهد با افزایش خطر لرزه‌ای در تمامی موارد، تاب‌آوری لرزه‌ای سیستم کاهش می‌یابد. همچنین آنالیزهای صورت‌گرفته نشان‌دهنده بهبود نسبی تاب‌آوری با انجام مقاوم‌سازی لرزه‌ای در سازه می‌باشد [۷]. بونستروم^{۱۶} و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به‌منظور کمی‌سازی و بهبود تاب‌آوری مجموعه‌ای از ساختمان‌ها از روش قابلیت اعتماد مرتبه اول^{۱۷} استفاده کردند. ارزیابی صورت‌گرفته در این مطالعه شامل انجام مجموعه اقدامات مقاوم‌سازی پیش از زلزله و بازسازی پس از وقوع حادثه و یا ترکیبی از آن دو می‌باشد که به‌منظور اختصاص بهینه منابع برای ارتقاء تاب‌آوری سازه با در نظر گرفتن محدودیت منابع موردبررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات نشان می‌دهند که مقاوم‌سازی قبل از وقوع حادثه^{۱۸} معمولاً از نظر افزایش تاب‌آوری سازه اقتصادی‌تر از صرف هزینه‌های بازسازی پس از وقوع حادثه می‌باشد. هرچند بازسازی پس از وقوع حادثه به‌منظور رسیدن به سطوح تاب‌آوری بالا در هنگام وقوع زلزله‌هایی با دوره بازگشت زیاد، اقتصادی‌تر خواهد بود [۸]. در سال ۲۰۱۵ تریکا^{۱۹} و همکارانش به بررسی تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌های اداری با سیستم مهاربندی پرداختند. طرح‌های مقاوم‌سازی برای سازه‌های موجود که در دهه ۸۰ طراحی شده، ارائه شده و خسارت اقتصادی بر مبنای گزارش HAZUS تعیین گردیده است. در نهایت مقادیر تاب‌آوری برای سازه‌هایی با سیستم مهاربندی و کاربری اداری در سه ناحیه از کشور کانادا با هم مورد مقایسه قرار گرفته است [۱۰]. دومانسچی^{۲۰} و مارتینلی^{۲۱} در سال ۲۰۱۵ به ارائه شیوه‌ای به‌منظور کنترل پل‌های کابلی بنچمارک (الگو) بر مبنای تاب‌آوری لرزه‌ای پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شیوه‌های کنترل سازه می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش عواقب ناشی از زلزله‌های قوی در مناطق آسیب‌پذیر از نظر لرزه‌ای ایجاد کنند و تاب‌آوری سیستم را افزایش دهند [۱۱]. در سال ۲۰۱۵ هیوت و همکارانش به ارزیابی خسارت و زمان بازسازی سازه‌های بلند با سیستم قاب خمشی فولادی تحت اثر زلزله و همچنین استراتژی‌های افزایش تاب‌آوری لرزه‌ای این سازه‌ها پرداختند. بهسازی لرزه‌ای در بخش سازه‌ای توسط هسته الاستیک بادبندی شده در سرتاسر سازه و نیز اضافه کردن جداساز پایه^{۲۲} صورت گرفته است و در بخش غیرسازه‌ای نیز از المان‌هایی با خاصیت تاب‌آوری بالا در مقابل زلزله استفاده شده است. نتایج حاصل از آنالیزها نشان می‌دهد که خسارت اقتصادی وارد بر سازه اولیه در حدود ۳۴٪ هزینه جایگزینی کل سازه می‌باشد که استفاده از بهسازی لرزه‌ای در اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای می‌تواند این خسارت‌ها را تا حدود ۹۲٪ کاهش دهد. همچنین ملاحظه می‌شود بهبود عملکرد لرزه‌ای اعضای غیرسازه‌ای تأثیر قابل توجهی در کاهش خسارت وارد بر سیستم خواهند داشت [۱۲]. در سال ۲۰۱۶ ساتلی^{۲۳} و همکارانش به‌منظور ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای در مقیاس اجتماعی^{۲۴} به مطالعه بر روی توسعه و کاربرد یک چهارچوب

¹⁵ Cimellaro

¹⁶ Bonstrom

¹⁷ First-Order Reliability Approach

¹⁸ Prehazard Retrofit

¹⁹ Tirca

²⁰ Domaneschi

²¹ Martinelli

²² Base Isolation

²³ Sutley

به هم پیوسته از شاخص‌های اجتماعی-فرهنگی و شاخص‌های مهندسی پرداختند. در مطالعه آن‌ها ابتدا عملکرد سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد و در صورت عدم برآورد انتظارات افراد تصمیم‌گیرنده (بر مبنای تعداد تلفات و مجروحین، خسارت اقتصادی و زمان بازسازی)، طرح‌های مختلف مقاوم‌سازی، بر مبنای اهمیت پارامترها برای افراد تصمیم‌گیرنده توسط ضرایبی در تابع هدف وزن‌دهی شده و با اعمال محدودیت‌های موردنظر برای پارامترها، بهینه‌سازی انجام می‌شود و بهینه‌ترین طرح با استفاده از الگوریتم ژنتیک انتخاب می‌گردد [۱۳ و ۱۴]. در سال ۲۰۱۸ مسلم^{۲۵} و همکارانش به منظور طراحی پایدار و تاب‌آور ساختمان‌ها، روش مهندسی مبتنی بر عملکرد و تحلیل بر مبنای تصمیم‌گیری چند معیاره را مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق صورت گرفته، یک رویکرد یکپارچه طراحی جامع ساختمان (شامل مفاهیم تاب‌آوری و پایداری) برای انتخاب طرح بهینه براساس معیارهای متضاد چندگانه با استفاده از نظریه مطلوبیت چند شاخصه (MAUT^{۲۶}) ارائه شده است [۱۵]. در سال ۲۰۲۰ یکرنگنیا و همکارانش به ارزیابی ریسک در ساختمان‌های بنایی غیرمسلح محصور براساس شیوه FEMA-P58 پرداختند. در مطالعه آنها چند ساختمان مدرسه در تهران با سیستم مذکور به عنوان سازه نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد محصور کردن دیوارها منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد سازه و کاهش هزینه‌ها می‌شود [۱۶]. در سال ۲۰۲۰ انوار و همکارانش بر روی تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی مقاوم‌سازی شده مطالعه کردند. با توجه به این‌که در اکثر طرح‌های مقاوم‌سازی پیامدهای پس از وقوع حادثه در نظر گرفته نمی‌شود و هیچ ارزیابی از آن انجام نمی‌شود، آن‌ها شیوه‌ای جهت ارزیابی طرح‌های مقاوم‌سازی با در نظر گرفتن پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی پس از وقوع حادثه را ارائه کردند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که تاب‌آوری لرزه‌ای می‌تواند به‌عنوان یک شاخص عملکردی برای ارزیابی اثرات مستمر یک خطر (طراحی - مقاوم‌سازی و بازسازی) برای انتخاب طرح مناسب مقاوم‌سازی استفاده شود [۱۷]. در سال ۲۰۲۰ اقبالی و همکارانش عملکرد لرزه‌ای ۱۷ مدرسه در زلزله سرپل‌ذهاب را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها خسارت‌های ایجاد شده در اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای و همچنین روند بازسازی و تاب‌آوری سازه‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق ضرورت ارزیابی آسیب‌پذیری مراکز آموزشی و روند بازسازی آن‌ها به‌منظور به حداقل رساندن پیامدهای مخرب ایجاد شده در این سازه‌ها تحت تحریک لرزه‌ای را نشان می‌دهد [۱۸ و ۱۹]. در سال ۲۰۲۱ کلاتری و اقبالی مناطق ۱ و ۳ شهر زنجان را از نظر تاب‌آوری لرزه‌ای مورد مقایسه قرار دادند. در این مطالعه شاخص‌های تاب‌آوری به‌وسیله روش تحلیل سلسله مراتبی و تقسیم پرسش‌نامه در میان صاحب‌نظران و انجام تحلیل‌های آماری بر روی داده‌های مستخرج از این پرسش‌نامه‌ها مورد محاسبه قرار گرفته است [۲۰]. در سال ۲۰۲۲ حمیدیا و دلیلی یزدی به بررسی کمی تاب‌آوری لرزه‌ای در قاب‌های خمشی فولادی مجهز به میراگرهای لزج غیرخطی تحت زلزله ثانویه پرداختند. در این مطالعه برای قاب‌های آسیب‌دیده، میراگرهای لزج با درصدهای میرایی متفاوت تعبیه و شدت رکوردهای لرزه‌ای تا مرز فروریزش سازه‌ها افزایش داده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که وجود میراگر در سازه به هنگام وقوع زلزله ثانویه، به کاهش دریافت و جابه‌جایی در طبقات منجر می‌شود [۲۱]. در سال ۲۰۲۲ شادابفر و همکارانش به بررسی مدل‌های پیشنهادی، روش‌ها و ابزارهای محاسباتی مختلف ارائه شده برای برآورد تاب‌آوری سیستم‌های مختلف پرداختند. در مطالعه صورت گرفته شیوه‌ها و فرمول‌های پیشنهادی برای محاسبه تاب‌آوری سیستم‌های حمل‌ونقل، سیستم‌های انتقال انرژی و ... جمع‌بندی شده است. همچنین نرم‌افزارهای ارائه شده برای تعیین تاب‌آوری سیستم توسط محققین مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته است [۲۲].

همان‌طوری که مشاهده می‌شود در روش‌های ارائه شده جهت محاسبه کمی تاب‌آوری، هزینه و زمان بازسازی، دو پارامتر بسیار مهم و با عدم قطعیت زیاد در تعیین تاب‌آوری یک ساختمان می‌باشند. زمان بازسازی کل که توسط HAZUS یا گزارش FEMA-P58 بر مبنای شدت آسیب وارده به المان‌های مختلف ارائه می‌شود، نیازمند اعمال تصحیح‌های مختلف به‌منظور محاسبه زمان بازسازی کل سیستم می‌باشد که در بخش‌های بعدی شرح داده خواهد شد. همچنین مسیر بازسازی ساختمان (منحنی هزینه-زمان بازسازی) در اکثر مطالعات صورت گرفته به صورت یک تابع فرضی (عموماً خطی) در نظر گرفته شده است. تعیین مسیر بازسازی واقعی سیستم بر مبنای هزینه و زمان موردنیاز برای بازسازی المان‌های مختلف آسیب‌دیده برای سطوح مختلف تحریک لرزه‌ای، به کارفرما و شرکت‌های سرمایه‌گذاری و بیمه‌ای این امکان را می‌دهد تا روند بازسازی سیستم (منحنی هزینه-زمان بازسازی در طول فرآیند بازسازی) پس از وقوع حادثه احتمالی را مورد

²⁴ community-level seismic resiliency

²⁵ Mosalam

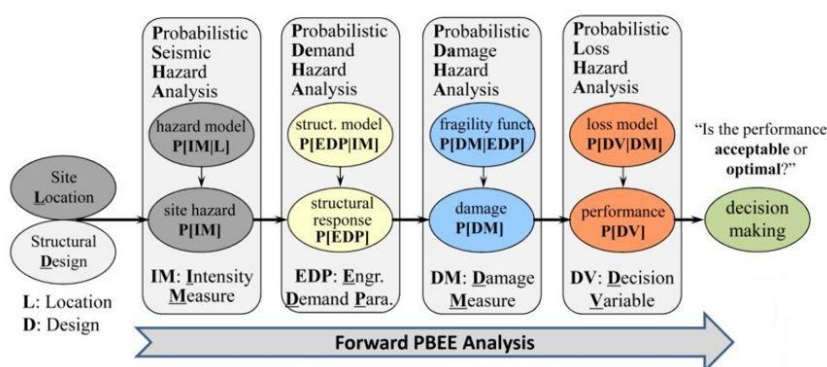
²⁶ Multiattribute Utility Theory

بررسی قرار دهند و طرح‌های ارائه شده برای سازه را بر مبنای هزینه اولیه ساخت یا هزینه مقاوم‌سازی یا هزینه‌های بازسازی آتی مورد مقایسه قرار دهند و بهترین طرح را بر مبنای درصد ریسک مورد قبول خود انتخاب نمایند. همچنین در مرحله پس از وقوع آسیب، می‌بایست تمهیدات لازم برای تامین بودجه براساس برنامه زمان‌بندی فرآیند بازسازی با لحاظ اولویت بازسازی در گروه‌های مختلف عملکردی فراهم شود.

در این مطالعه شیوه‌ای جهت محاسبه تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار (با احتمال فراگذشت ۵۰ درصد) برای سازه‌های ساختمانی ارائه شده است که در آن از حل انتگرال سه‌گانه روش PEER PBEE [۵] جهت تعیین هزینه و زمان بازسازی موردانتظار استفاده می‌شود، به طوری که در تعیین مسیر بازسازی موردانتظار یعنی منحنی هزینه-زمان موردانتظار (متوسط) در طول فرآیند بازسازی، عدم قطعیت‌های موجود در تحلیل سازه، آسیب‌های وارده و رکوردهای زلزله ورودی لحاظ می‌گردد. در این شیوه با داشتن مسیر بازسازی، تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار سازه محاسبه می‌گردد و نیازی به استفاده از تابع‌های فرضی برای تقریب مسیر بازسازی نمی‌باشد. در این تحقیق برای تعیین زمان و هزینه بازسازی المان‌های آسیب‌دیده از داده‌های کتابخانه‌ای گزارش FEMA-P58 استفاده شده است. همچنین به منظور تصحیح زمان بازسازی کل سیستم از شیوه پیشنهادی در گزارش REDi استفاده شده است که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته خواهد شد.

۳- دستورالعمل FEMA-P58

روند تعیین پارامتر خسارت در گزارش FEMA-P58 بر مبنای آنالیز احتمالاتی روش PEER PBEE^{۲۷} [۵] می‌باشد. در روش PEER PBEE عدم قطعیت در ۴ پارامتر تحریک لرزه‌ای^{۲۸}، آنالیز سازه^{۲۹}، آسیب وارده^{۳۰} و نهایتاً در پارامترهای تصمیم‌گیری و خسارت وارده^{۳۱} که در اکثر موارد شامل زمان بازسازی، خسارت وارده و تلفات جانی است در نظر گرفته شده است (شکل ۳) [۵]. شیوه‌های مختلفی برای آنالیز ریسک، تعیین آسیب وارده به سازه [۲۳] و پارامترهای تصمیم‌گیری وجود دارد.



$$P(DV^n) = \sum_m \sum_i \sum_k P(DV^n | DM_k) p(DM_k | EDP^i) p(EDP^i | IM_m) p(IM_m)$$

Loss Damage Structural Hazard

شکل ۳: شیوه ارزیابی احتمالاتی سازه بر مبنای شیوه PEER PBEE [۲۴]

در شیوه احتمالاتی PEER PBEE، میانگین فرکانس سالیانه پارامترهای تصمیم‌گیری و خسارت وارده^{۳۲} از طریق انتگرال‌گیری سه‌گانه بر روی تابع احتمال شرطی مطابق رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$\lambda(DV) = \iiint G(DV | DM) \times dG(DM | EDP) \times dG(EDP | IM) d\lambda(IM) \quad (3)$$

²⁷ PEER performance-based earthquake engineering methodology

²⁸ Seismic Hazard Analysis

²⁹ Structural Analysis

³⁰ Damage Analysis

³¹ Loss Analysis

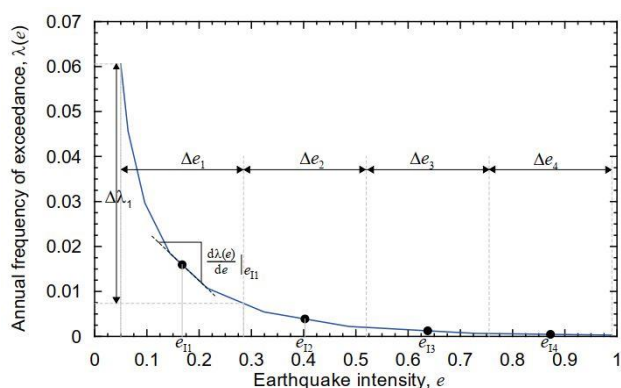
³² Loss Analysis

در این رابطه λ میانگین فرکانس سالیانه (MAF^{۳۳})، G تابع احتمال شرطی، DV متغیر تصمیم‌گیری، DM میزان آسیب، EDP پارامتر نیاز مهندسی و IM پارامتر شدت لرزه‌ای می‌باشد. آنالیزهای تحریک لرزه‌ای، نیاز لرزه‌ای، آسیب آورده و نهایتاً تابع تصمیم‌گیری خسارت را می‌توان با استفاده از اصل برهم نهی با یکدیگر جمع نمود:

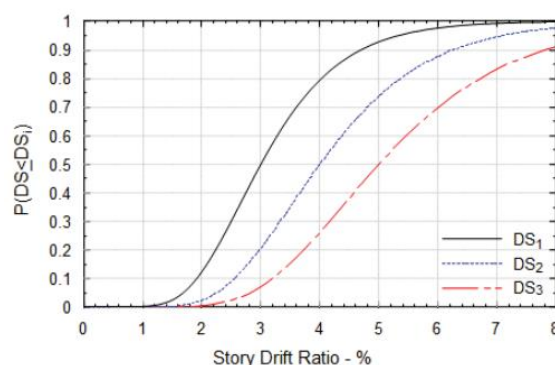
$$P(DV^n) = \sum_m \sum_i \sum_k P(DV^n | DM_k) \times p(DM_k | EDP^i) \times p(EDP^i | IM_m) p(IM_m) \quad (۴)$$

در فرمول فوق n نشان‌دهنده متغیر تصمیم‌گیری IM ، m تعداد بازه‌های شدت لرزه‌ای (سناریو) در منحنی تحلیل خطر، i پارامتر نیاز مهندسی در المان m و در نهایت k نشان‌دهنده سطح خرابی DM_k در المان موردنظر می‌باشد. مطابق رابطه فوق $p(IM_m)$ احتمال مربوط به شدت لرزه‌ای IM_m ، $p(EDP^i | IM_m)$ احتمال نیاز لرزه‌ای EDP^i (دریفت، شتاب، سرعت و ... در گره یا عضو موردنظر) در اثر تحریک لرزه‌ای IM_m ، $p(DM_k | EDP^i)$ احتمال وقوع میزان آسیب یا سطح آسیب^{۳۴} در اثر نیاز لرزه‌ای EDP^i و نهایتاً $p(DV | DM_k)$ احتمال پارامتر تصمیم‌گیری DV در اثر آسیب DM_k وارده می‌باشد [۵].

مطابق شیوه پیشنهادی در FEMA-P58 [۶] عدم قطعیت در تحریک لرزه‌ای بر مبنای تحلیل خطر محل سازه از طریق انتخاب حداقل ۱۱ رکورد مقیاس شده (در صورت استفاده از رکوردهایی با شکل طیف شبه شتاب مشابه با طیف طراحی هدف به حداقل ۷ رکورد قابل کاهش می‌باشد) برای هر بازه شدت لرزه‌ای که یک سناریو خوانده می‌شود در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴-الف). عدم قطعیت در نیاز لرزه‌ای بر مبنای شیوه مونت کارلو به صورت ایجاد N تعداد نمونه پاسخ برای طبقات مختلف با استفاده از میانگین و انحراف معیار پاسخ مربوط به ۱۱ رکورد و عدم قطعیت در آسیب وارده به المان‌های مختلف بر مبنای منحنی احتمالاتی سطوح خرابی مختلف بر مبنای نیاز لرزه‌ای متناظر (دریفت، شتاب یا سرعت) (شکل ۴-ب) که در مجموعه داده‌های کتابخانه‌ای FEMA-P58 برای المان‌های مختلف ارائه گردیده است در نظر گرفته می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۴: (الف) مثالی از عدم قطعیت لرزه‌ای (ب) مثالی از توابع احتمالاتی آسیب [۶]

در روش FEMA-P58 عملکرد لرزه‌ای یک سازه بر مبنای احتمال خسارت ایجاد شده در سازه و عواقب ناشی از آن در اثر تحریک لرزه‌ای با استفاده از ۴ پارامتر تصمیم‌گیری ارائه می‌شود: (۱) هزینه بازسازی^{۳۵}: هزینه‌های ضروری به منظور بازگرداندن یک سازه به شرایط قبل از وقوع زلزله بر حسب دلار و یا در حالت فروریزش و عدم امکان بازسازی برابر هزینه جایگزینی سازه با یک سازه جدید مشابه می‌باشد. (۲) زمان بازسازی^{۳۶}: زمان موردنیاز که برای تعمیر یک سازه آسیب‌دیده به منظور بازگرداندن سازه به شرایط قبل از وقوع زلزله

³³ Mean Annual Frequency

³⁴ Damage Measure or Damage State

³⁵ Repair Cost

³⁶ Repair Time

می باشد. (۳) تلفات^{۳۷}: عبارتست از خسارت‌های جانی که به صورت از دست دادن جان افراد و یا آسیب جدی که نیازمند بستری شدن باشد تعریف می شود. (۴) برچسب غیرایمن بودن^{۳۸}: رتبه بازررسی ایمنی سازه پس از زلزله که نشان می دهد یک سازه و یا قسمتی از آن دچار آسیب شده است بدین معنی که ورود به آن قسمت، استفاده و یا سکونت در آن، خطرات فوری برای ایمنی در پی خواهد داشت. FEMA-P58 توابع احتمالاتی مربوط به هر ۴ پارامتر تصمیم گیری را بر مبنای سطح آسیبی^{۳۹} ایجاد شده در المان موردنظر در پایگاه داده خود ارائه نموده است. نهایتاً مقدار به دست آمده برای هر پارامتر تصمیم گیری (هزینه بازسازی، زمان بازسازی و ...) برای اعضای مختلف در هر طبقه باهمدیگر جمع می شود. پارامتر تصمیم گیری نهایی برای کل سازه برای هزینه بازسازی و تلفات جانی از مجموع همان پارامتر برای طبقات مختلف به دست می آید. برای زمان بازسازی کل سازه، دو حالت در نظر گرفته می شود: (۱) حالت سری: زمان بازسازی مربوط به طبقات مختلف باهم جمع می شود، (ب) حالت موازی: بازسازی در تمام طبقات به موازات هم در نظر گرفته شده و زمان بازسازی کل سازه برابر با بزرگترین زمان بازسازی به دست آمده در بین تمامی طبقات می باشد.

۴- تصحیح زمان بازسازی کل مطابق دستورالعمل REDi

در FEMA-P58 زمان و هزینه موردنیاز برای بازسازی گروه‌های عملکردی مختلف از اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای مانند اتصالات سازه‌ای، پارتیشن‌ها، نماها، سیستم لوله‌کشی، سقف‌های کاذب و ... براساس طبقه و جهت قرارگیری که تحت نیاز لرزه‌ای یکسان در سازه قرار می گیرند ارائه می شود. در شیوه FEMA-P58 نحوه محاسبه زمان بازسازی مربوط به هر طبقه و کل سازه دارای اشکالاتی می باشد. در شیوه FEMA-P58 جهت محاسبه زمان بازسازی مربوط به هر طبقه، امکان هم‌زمان بودن بازسازی گروه‌های عملکردی مختلف در یک طبقه و ترتیب بازسازی در نظر نمی شود و زمان بازسازی همه گروه‌های عملکردی باهم جمع می شود. همچنین حداکثر تعداد کارگری که به منظور بازسازی هر گروه عملکردی (پارتیشن داخلی، موتورخانه، نما و ...) به کار گرفته می شود تفکیک نشده است و حداکثر کارگر برای همه گروه‌های عملکردی بر حسب مترمربع از سازه محاسبه شده و برابر در نظر گرفته می شود درحالی که ممکن است انجام بازسازی گروه عملکردی موردنظر با آن تعداد کارگر به طور هم‌زمان در عمل ممکن نباشد. در محاسبه زمان بازسازی کل سازه نیز امکان و عدم امکان بازسازی هم‌زمان گروه‌های مختلف عملکردی در طبقات مختلف از همدیگر تفکیک نشده است.

با توجه به اشکالاتی که در برآورد زمان بازسازی کل سازه که توسط FEMA-P58 ارائه می شود وجود دارد، به منظور تصحیح زمان کل از دستورالعمل REDi [۲۵] استفاده می شود. دستورالعمل REDi یک روش تصحیح زمان بازسازی کل سازه با در نظر گرفتن زمان تعمیرات مربوط به خسارت‌های مستقیم و عوامل بازدارنده پیشنهاد می کند. مطابق دستورالعمل ارائه شده در REDi گروه‌های عملکردی به دو دسته کلی اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای دسته بندی می شوند. روند اصلاح زمان بازسازی به صورت زیر می باشد (شکل ۵):

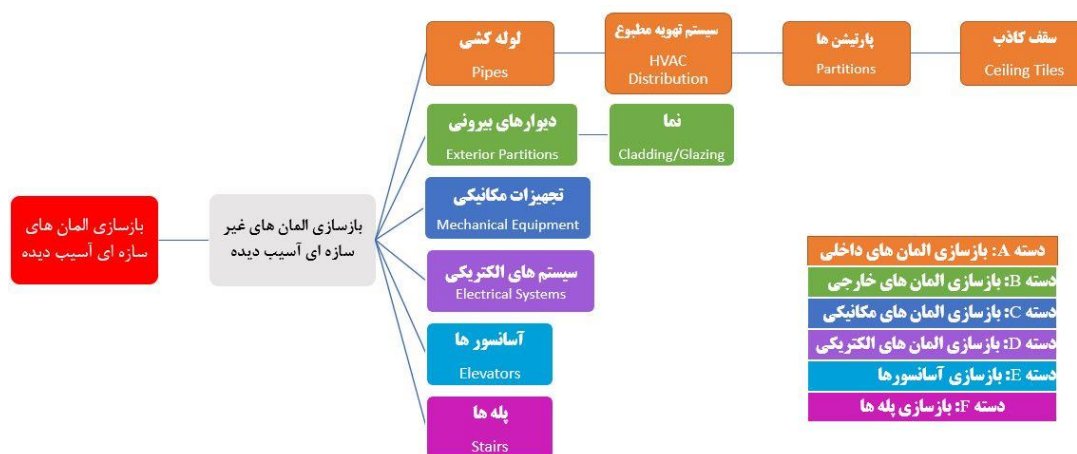
۱- بازسازی اعضای سازه‌ای: روند بازسازی از بازسازی اعضای سازه‌ای شروع می شود و تا زمانی که آسیب وارد شده در اعضای سازه‌ای تمام طبقات رفع نگردد بازسازی اعضای غیرسازه‌ای شروع نخواهد شد. زیرا استحکام ساختمان ابتدا می بایست برای ایمنی ساکنین و افراد درگیر در روند بازسازی تضمین شود. به دلیل این که در استحکام بنا طبقات پایینی در اولویت قرار دارند، روند بازسازی اعضای سازه‌ای از پایین ترین طبقه شروع شده و پس از تکمیل بازسازی هر طبقه، بازسازی طبقه بالاتر شروع خواهد شد.

۲- بازسازی اعضای غیرسازه‌ای: پس از تکمیل بازسازی اعضای سازه‌ای، بازسازی اعضای غیرسازه‌ای شروع می شود. گروه‌های عملکردی اعضای غیرسازه‌ای در دسته‌های بازسازی A تا F مطابق شکل ۵ قرار می گیرند. این دسته‌های بازسازی می توانند به موازات هم تعمیر شوند به شرط این که مجموع تعداد کارگرهایی که عملیات بازسازی را به طور هم‌زمان در کل سازه انجام می دهند نمی بایست از مقدار مشخصی که براساس سطح زیربنای سازه تعیین می گردد فراتر رود. همچنین حداکثر تعداد کارگرهایی که در هر دسته، کار تعمیرات را انجام می دهند براساس نوع بازسازی می بایست از یک مقدار تعیین شده فراتر نرود تا امکان انجام بازسازی گروه عملکردی در عمل ممکن باشد. تعمیر المان‌های موجود در هر دسته نیز می بایست به ترتیب از چپ به راست انجام شود.

³⁷ Casualties

³⁸ Unsafe Placarding or Red Tag

³⁹ Damage State

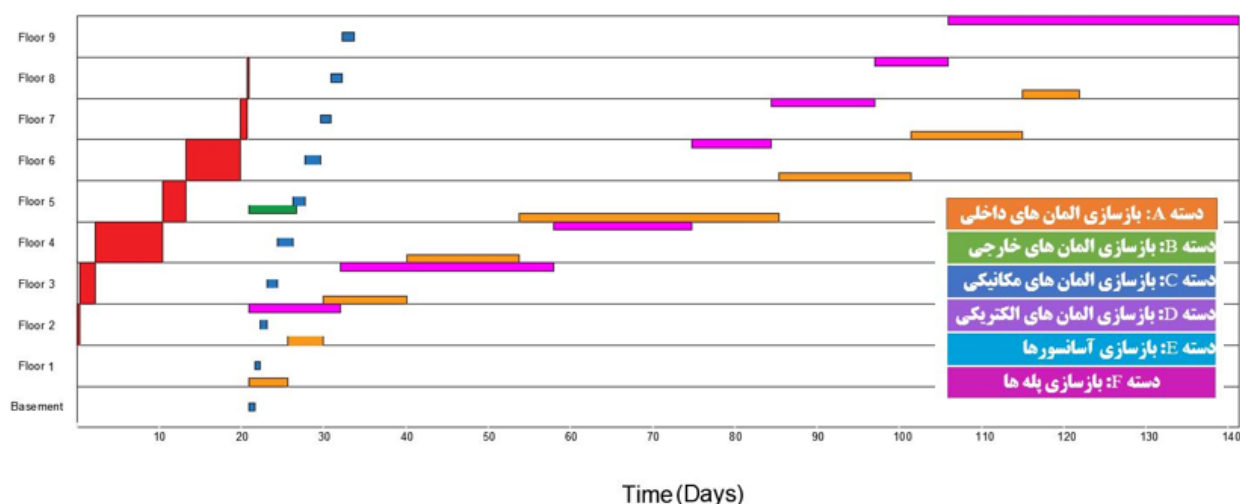


شکل ۵: توالی انجام تعمیرات در سطح هر طبقه بر مبنای REDi [۲۵]

۵- روش پیشنهادی برای محاسبه تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار

در این مطالعه شیوه‌ای جهت ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار سازه‌های ساختمانی بر مبنای آنالیز احتمالاتی انتگرال سه‌گانه روش PEER PBEE ارائه شده است. در روش پیشنهادی به‌منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مختلف در تحریک لرزه‌ای، نیاز لرزه‌ای و آسیب وارده از شیوه FEMA-P58 استفاده شده است. در شیوه پیشنهادی، برای هر سطح خطر، ۱۱ رکورد مطابق پیشنهاد FEMA-P58 به‌منظور تعیین نیازهای لرزه‌ای سازه براساس منطقه جغرافیایی که سازه در آن واقع شده است انتخاب می‌شوند و رکوردها به آن سطح خطر مقیاس می‌شوند. در ادامه سازه تحت آنالیز تاریخیچه زمانی قرار گرفته و نیازهای لرزه‌ای برای هر رکورد به تفکیک طبقات مختلف استخراج می‌شود. با استفاده از شیوه مونت کارلو، بر مبنای میانگین و انحراف معیار نیاز لرزه‌ای حاصل از ۱۱ رکورد، ۱۰۰۰ نمونه پاسخ^{۴۰} برای سازه تولید شده و برای هر نمونه، زمان و هزینه بازسازی در المان‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای از داده‌های کتابخانه‌ای FEMA-P58 استخراج می‌شود. در ادامه هزینه بازسازی موردانتظار (میانگین هزینه‌های متناظر با ۱۰۰۰ نمونه) محاسبه شده و زمان بازسازی متناظر با آن تعیین می‌گردد. سپس کدی در نرم‌افزار متلب نوشته شده و زمان بازسازی استخراج شده مطابق دستورالعمل REDi تصحیح می‌شود. برنامه زمانی تعمیرات دسته‌های مختلف در طول مدت بازسازی براساس الویت و هم‌زمانی در طبقات مختلف تعیین شده و هزینه بازسازی در طول روند بازسازی به تفکیک دسته‌ها و طبقات محاسبه می‌گردد که نمونه‌ای از آن در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶، ابتدا اعضای سازه‌ای از طبقه پایین به بالا تعمیر شده است (رنگ قرمز). سپس بازسازی دسته‌های A تا F به‌طور هم‌زمان باهم از طبقه اول شروع شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود هنگامی که بازسازی هر دسته در یک طبقه به اتمام می‌رسد می‌توان بازسازی همان دسته در طبقه فوقانی را شروع نمود.

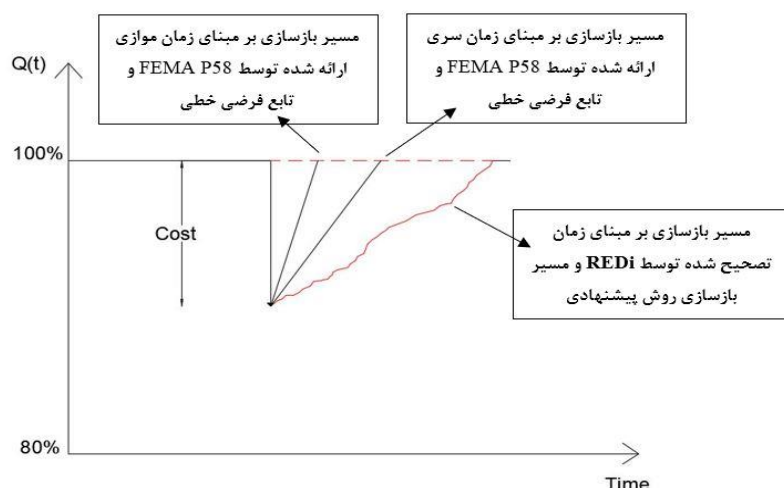
⁴⁰ Realization



شکل ۶: برنامه زمانی بازسازی سازه نمونه

با توجه به این که مفهوم تاب‌آوری پارامتر کامل‌تری برای متغیر تصمیم‌گیری و ارزیابی سازه می‌باشد، می‌تواند ترکیب هر دو پارامتر هزینه و زمان بازسازی را به صورت یک‌جا در نظر بگیرد. در ادامه کد دیگری در نرم‌افزار متلب نوشته شده و براساس هزینه بازسازی موردانتظار و زمان بازسازی تصحیح شده مربوط به آن، مسیر دقیق روند بازسازی سازه به صورت روزانه تعیین گردیده و تاب‌آوری موردانتظار کل سازه محاسبه می‌شود. در روش پیشنهادی فرض می‌شود کاهش عملکرد سیستم برابر خسارت‌های اقتصادی مستقیم در اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای باشد. در این مطالعه به منظور محاسبه تاب‌آوری، زمان کنترل در بازه‌های زمانی مختلف پس از وقوع حادثه در نظر گرفته شده است تا تغییرات تاب‌آوری موردانتظار سازه در دوره‌های زمانی مختلف محاسبه شود. در شیوه پیشنهادی زمان بازسازی به صورت روزانه در نظر گرفته شده و مقدار پیشرفت پروسه بازسازی برای هر دسته به تفکیک طبقات و هزینه بازسازی مربوط به هر دسته به صورت روزانه تعیین گردیده است. باتوجه به در دست بودن هزینه روزانه بازسازی برای کل سازه، مسیر بازسازی سازه قابل محاسبه خواهد بود و نیازی به در نظر گرفتن تابع فرضی برای مسیر بازسازی نخواهد بود.

در شکل ۷ مسیر بازسازی (منحنی هزینه-زمان بازسازی) مورد استفاده در محاسبه تاب‌آوری لرزه‌ای مطابق روش پیشنهادی و تفاوت آن با روش متداول محاسبه تاب‌آوری بر مبنای داده‌های FEMA-P58 در دو حالت سری و موازی برای سازه مورد مطالعه در بخش بعدی به صورت گرافیکی نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود برآورد زمان بازسازی کل سازه در روش پیشنهادی با توجه به لحاظ محدودیت‌های اجرایی منجر به مدت زمان بازسازی کل بیش‌تری نسبت به زمان بازسازی ارائه شده توسط FEMA-P58 می‌شود که در مطالعه موردی بخش بعدی به تفصیل بررسی خواهد شد. با توجه به این که دستورالعمل FEMA-P58 در خصوص ترتیب انجام عملیات بازسازی و امکان و یا عدم امکان انجام عملیات بازسازی به طور هم‌زمان در دسته‌های مختلف مسکوت مانده است و صرفاً زمان بازسازی کل سازه را در دو حالت غیرمعقول یعنی: ۱- زمان بازسازی موازی (بازسازی در تمام طبقات به طور هم‌زمان فرض می‌شود در حالی که در داخل یک طبقه امکان هم‌زمانی بازسازی در دسته‌های مختلف لحاظ نمی‌شود) ۲- زمان بازسازی سری (بازسازی در تمامی دسته‌ها و در یک طبقه به صورت سری بدون امکان هم‌زمانی) محاسبه می‌شود در نتیجه مسیر بازسازی (منحنی هزینه-زمان) ساختمان، در طول روند بازسازی مورد توجه نمی‌باشد و عموماً یک تابع فرضی برای مسیر بازسازی سیستم در نظر گرفته شود که در گراف شکل ۷ بصورت تابع خطی در نظر گرفته شده است. در حالی که در شیوه پیشنهادی به دلیل توجه به ترتیب و الویت بازسازی المان‌های آسیب دیده در دسته‌ها و طبقات مختلف بر اساس محدودیت‌های اجرایی لحاظ شده در REDi، محاسبه هزینه و زمان بازسازی در طول پروسه بازسازی به طور واقع-بینانه‌تری امکانپذیر بوده و نیازی به استفاده از توابع فرضی جهت تخمین مسیر بازسازی نمی‌باشد. همچنین مطابق شیوه پیشنهادی هزینه‌های موردنیاز برای بازسازی دسته‌های مختلف در بازه‌های زمانی دلخواه ده روزه، ماهانه و ... قابل محاسبه می‌باشد که می‌تواند در برنامه‌ریزی روند تخصیص بودجه لازم برای بازسازی سازه در بازه‌های زمانی مختلف بسیار موثر باشد.



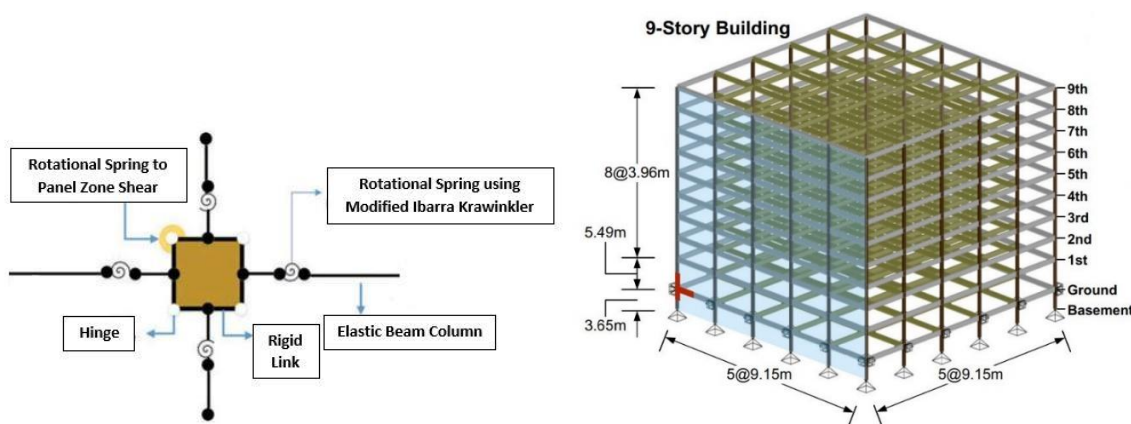
شکل ۷: مقایسه مسیرهای بازسازی جهت محاسبه تاب آوری در حالات مختلف.

در ادامه شیوه پیشنهادی به عنوان نمونه بر روی یک ساختمان قاب خمشی فولادی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج به دست آمده از داده‌های حاصل از FEMA-P58 [۶] مورد مقایسه قرار گرفته است.

۶- مثال عددی

در این تحقیق به منظور نشان دادن روند انجام شیوه پیشنهادی، یک سازه ۹ طبقه اداری با سیستم قاب خمشی فولادی از گزارش مطالعاتی SAC برای منطقه لس‌آنجلس با اتصالات Pre-Northridge و اتصالات باز طراحی شده Post-Northridge به عنوان سازه‌های مطالعاتی انتخاب شده است. به منظور انجام تحلیل غیرخطی سازه از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. در این پژوهش به منظور مدل‌سازی رفتار غیرخطی تیرها و ستون‌ها از فنرهای غیرخطی متمرکز در دو انتهای المان استفاده شده است. برای خصوصیات فنر مدل‌سازی شده با در نظر گرفتن زوال سختی و مقاومت از روابط ایبرا-کراوینکلر اصلاح شده [۲۶ و ۲۷] استفاده شده است. همچنین به منظور مدل‌سازی چشمه اتصال (Panel Zone) از مدل گوپتا-کراوینکلر استفاده شده است [۲۸]. شکل سه بعدی ساختمان و نحوه مدل‌سازی اتصالات در شکل ۸ نشان داده شده است. در این مثال سازه تحت اثر یک سطح خطر مشخص یعنی سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال (طیف طرح ASCE07-10) مورد آنالیز قرار گرفته است. بنابراین انتگرال سه گانه رابطه ۵، به انتگرال دو گانه رابطه ۶ کاهش می‌یابد:

$$\lambda(DV) = \iint G(DV | DM) \times dG(DM | EDP) \times dG(EDP | IM_{ASCE07}) \quad (6)$$



شکل ۸: نمای سه بعدی از ساختمان ۹ طبقه SAC [۲۹] و نحوه مدل‌سازی فنرهای متمرکز و چشمه اتصال [۳۰]

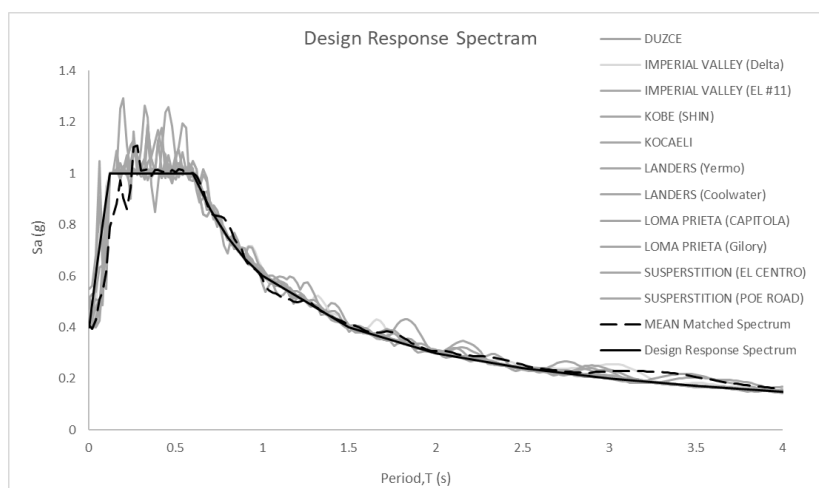
با توجه به حساسیت نتایج پاسخ تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه ها به رکورد های ورودی، انتخاب و مقیاس رکوردهای زلزله از اهمیت به سزایی برخوردار می باشد و روش های مختلفی جهت انتخاب و مقیاس کردن رکوردها پیشنهاد شده است [۳۱، ۳۲ و ۳۳]. در این تحقیق جهت انجام تحلیل های تاریخچه زمانی از رکوردهای پیشنهادی FEMA695 [۳۴] استفاده شده و مطابق شیوه ارائه شده در گزارش FEMA-P58 مقیاس شده است. هدف از انتخاب زمین لرزه و مقیاس کردن آن به دست آوردن مجموعه ای از تحریک های لرزه ای با محتوای فرکانسی مختلف به منظور تخمین غیرمستقیم میانگین پاسخ سازه با استفاده از آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی می باشد. طبق این روش در مرحله اول طیف پاسخ هدف برای سازه با استفاده از طیف طراحی آیین نامه بارگذاری آمریکا ASCE07-16 [۲] برای ساختگاه از نوع D و منطقه لس آنجلس به دست آمده است (جدول ۱). در مرحله دوم ۱۱ رکورد مطابق پیشنهاد FEMA-P58 از گزارش FEMA695 برای ساختگاه مورد نظر انتخاب شده است. رکوردهای زلزله به گونه ای انتخاب می شوند که به صورت متوسط در بازه پریودی T_{min} تا T_{max} با طیف هدف منطبق باشد و رکوردهایی که انطباق مناسبی ندارند کنار گذاشته می شوند. برای ساختمان هایی که مودهای پاسخ انتقالی در هر یک از جهات x و y قابل شناسایی می باشد، T_{max} به صورت دو برابر بزرگ ترین مقدار پریود مود اصلی (T_1) در راستای X و Y (T_1^X و T_1^Y) انتخاب می شود. T_{min} به صورت مقدار کوچک تر $0.2T_1^X$ و $0.2T_1^Y$ انتخاب می شود. مقیاس بزرگی^{۴۱} رکورد با نسبت $S_a(\bar{T})$ که از طیف پاسخ هدف به دست آمده به $S_{a-gm}(\bar{T})$ که از طیف جفت رکورد مورد نظر به دست آمده صورت می گیرد. \bar{T} میانگین پریودهای T_1^X و T_1^Y می باشد. طیف طراحی هدف و رکوردهای مقیاس شده در شکل ۹ نمایش داده شده است.

$$S_{gm}(T) = \sqrt{S_x(T) \times S_y(T)} \quad (7)$$

جدول ۱: رکوردهای انتخابی از FEMA P695 [۳۴]

شماره	زلزله	سال	بزرگا	نوع گسل	مشخصات ایستگاه	
					ایستگاه ثبت رکورد زلزله	رده بندی خاک (NEHRP)
۱	Duzce	۱۹۹۹	۷/۱	Strike-slip	Bolu	D
۲	Imperial Valley	۱۹۷۹	۶/۵	Strike-slip	Delta	D
۳	Imperial Valley	۱۹۷۹	۶/۵	Strike-slip	El Centro Array #11	D
۴	Kobe	۱۹۹۵	۶/۹	Strike-slip	Shin-Osaka	D
۵	Kocaeli	۱۹۹۹	۷/۵	Strike-slip	Duzce	D
۶	Landers	۱۹۹۲	۷/۳	Strike-slip	Yermo Fire Station	D
۷	Landers	۱۹۹۲	۷/۳	Strike-slip	Coolwater	D
۸	Loma Prieta	۱۹۸۹	۶/۹	Strike-slip	Capitola	D
۹	Loma Prieta	۱۹۸۹	۶/۹	Strike-slip	Gilroy Array #3	D
۱۰	Superstition Hills	۱۹۹۷	۶/۵	Strike-slip	El Centro Imp. Co	D
۱۱	Superstition Hills	۱۹۹۷	۶/۵	Strike-slip	Poe Road (temp)	D

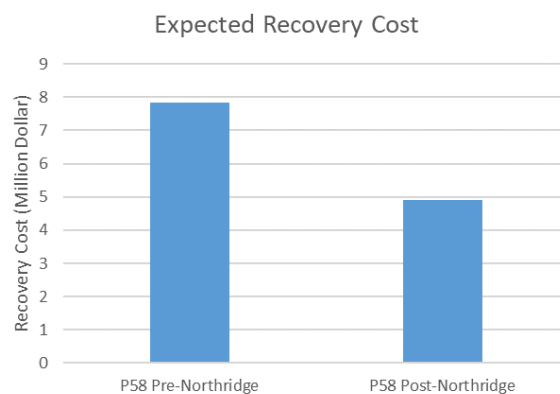
⁴¹ Amplitude-scale



شکل ۹: طیف طراحی هدف و رکوردهای مقیاس شده

۶-۱ هزینه بازسازی مورد انتظار

سازه قاب خمشی ۹ طبقه موردنظر در هر دو حالت با اتصالات Pre-Northridge و Post-Northridge تحت اثر ۱۱ رکورد مقیاس شده مورد آنالیز قرار گرفته و با ساخت مدل عملکردی در نرم افزار PACT، مقادیر هزینه بازسازی بر مبنای گزارش FEMA-P58 برای کلیه المان‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای محاسبه شده است. هزینه بازسازی موردانتظار برابر با میانگین هزینه‌های حاصل از نمونه‌ها (Realization) های مختلف در نظر گرفته شده است. برای سازه موردنظر هزینه جایگزینی سازه برابر ۷۴ میلیون دلار برآورد شده است. هزینه بازسازی موردانتظار برای حالت Pre-Northridge برابر ۷/۸۳ میلیون دلار و برای حالت Post-Northridge برابر ۴/۹ میلیون دلار به دست می‌آید (شکل ۱۰). همان طوری که مشاهده می‌شود استفاده از اتصالات باز طراحی شده در Post-Northridge در سازه ۹ طبقه گروه SAC باعث کاهش حدود ۳۷ درصدی هزینه‌های بازسازی می‌شود.

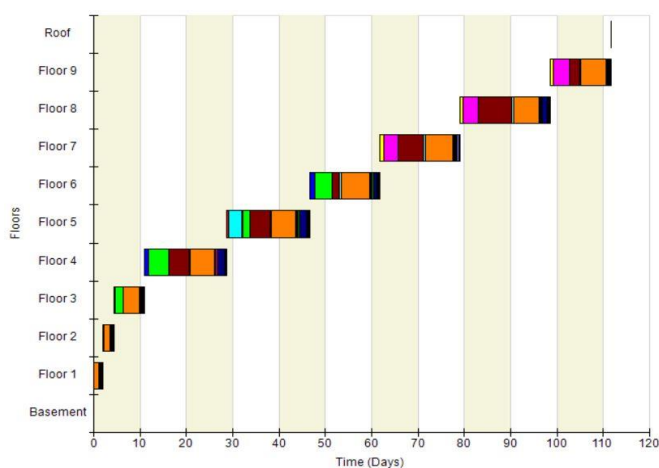


شکل ۱۰: هزینه بازسازی موردانتظار

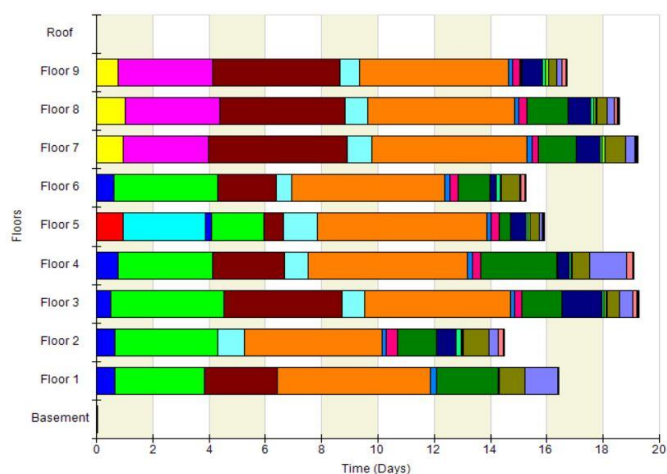
۶-۲ روند اصلاح زمان بازسازی کل

در ادامه با داشتن هزینه و زمان بازسازی کلیه المان‌های آسیب‌دیده، زمان بازسازی کل سازه با استفاده از دستورالعمل REDi تصحیح می‌شود و با زمان بازسازی کل ارائه شده توسط FEMA-P58 مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. شکل ۱۱ و ۱۲ زمان بازسازی موردانتظار حاصل از نرم افزار PACT مطابق با روش FEMA-P58 را نشان می‌دهد. زمان بازسازی کل سازه مطابق گزارش FEMA-P58 در دو حالت سری و موازی ارائه می‌شود. به عبارت دیگر در این شیوه فرض می‌شود که بازسازی گروه‌های مختلف عملکردی به صورت هم‌زمان

در تمامی طبقات انجام می‌شود (حالت موازی) و یا بازسازی در گروه‌های عملکردی هر طبقه پس از اتمام بازسازی طبقه پایین شروع شود (حالت سری). همچنین در این شیوه امکان هم‌زمانی بازسازی گروه‌های عملکردی غیروابسته در یک طبقه (گروه‌های عملکردی که می‌تواند هم‌زمان در یک طبقه مورد بازسازی قرار گیرند) در نظر گرفته نشده است و زمان مورد نیاز برای بازسازی گروه‌های عملکردی در هر طبقه به صورت سری با همدیگر جمع شده است. به عنوان مثال بازسازی پارتیشن‌های داخلی و نمای ساختمان و موتورخانه می‌تواند به طور هم‌زمان صورت بگیرند در حالی که در شیوه FEMA-P58 زمان مربوط به این گروه‌های عملکردی در هر طبقه با همدیگر جمع شده و به صورت پشت پشت سرهم در نظر گرفته شده است. یکی از ایرادات دیگر در زمان ارائه شده توسط FEMA-P58 این می‌باشد که حداکثر تعداد کارگری که می‌تواند بر روی یک گروه عملکردی آسیب‌دیده مانند پارتیشن داخلی، سیستم تهویه یا سیستم روشنایی و ... کار کنند از هم تفکیک نشده است و تعداد کل کارگر-روز مورد نیاز برای بازسازی تمامی گروه‌های عملکردی در هر طبقه با هم جمع شده و به تعداد حداکثر کارگری که براساس مترافز طبقه می‌تواند هم‌زمان کار کنند (در این تحقیق ۴۵ نفر برای هر طبقه) تقسیم می‌شود. به عبارت دیگر در شیوه FEMA-P58 تعداد کارگری که می‌تواند برای تعمیر دیوارهای داخلی یک طبقه به طور هم‌زمان به کار گرفته شوند با حداکثر تعداد کارگرهایی که برای تعمیر سیستم تهویه یک طبقه به طور هم‌زمان به کار گرفته شوند برابر در نظر گرفته شده است، در حالی که با توجه به ماهیت بازسازی گروه‌های عملکردی، حداکثر تعداد کارگرها برای هر گروه عملکردی برابر نبوده و نیاز به تفکیک دارند.

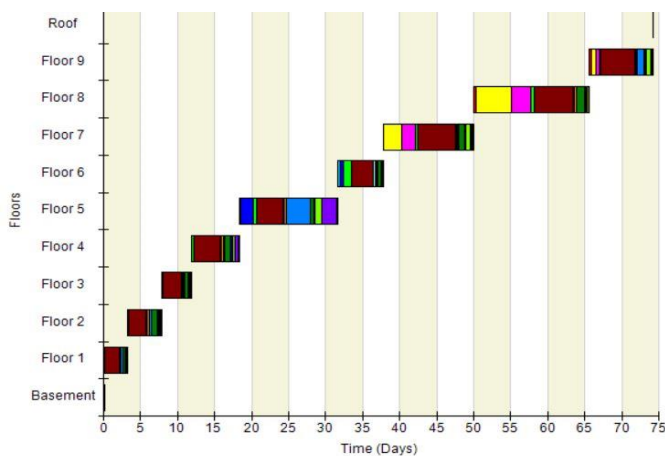


(ب)

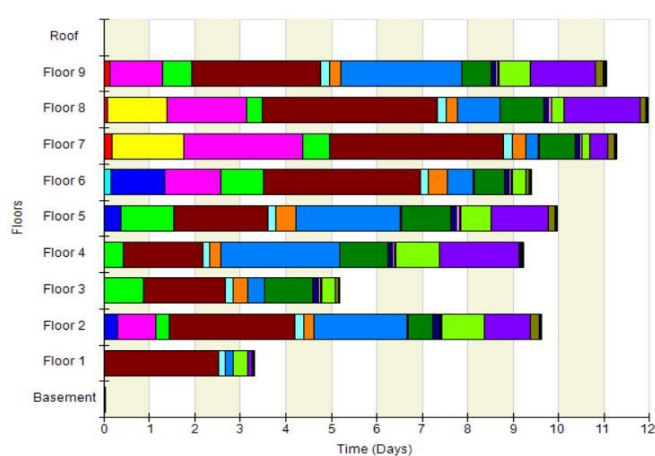


(الف)

شکل ۱۱: زمان بازسازی مورد انتظار ارائه شده توسط FEMA-P58 برای حالت (الف) سری، (ب) موازی برای سازه Pre-Northridge



(ب)



(الف)

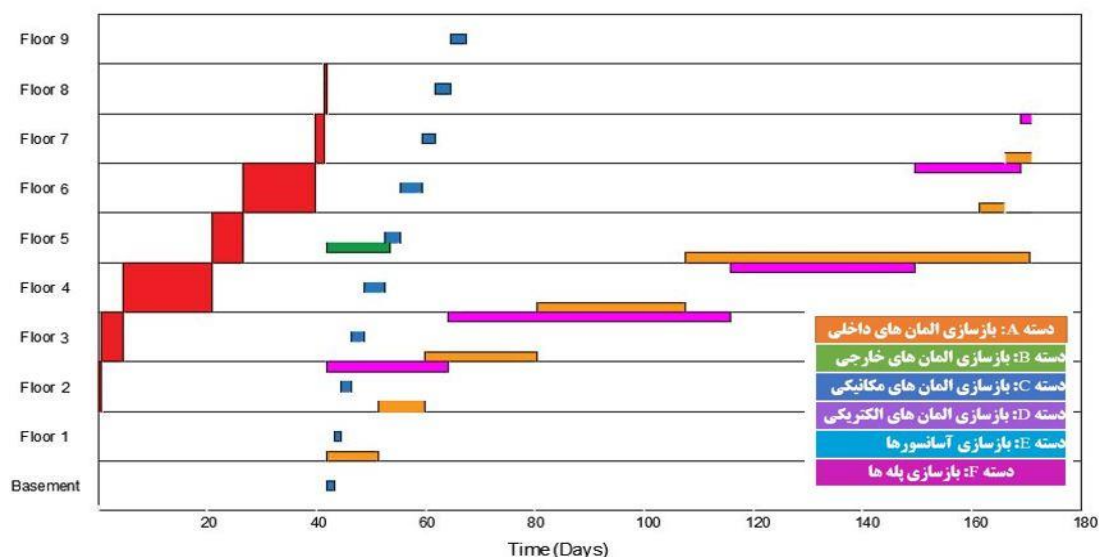
شکل ۱۲: زمان بازسازی مورد انتظار ارائه شده توسط FEMA-P58 برای حالت (الف) موازی، (ب) سری برای سازه Post-Northridge

دستورالعمل REDi برای هر یک از دسته‌های بازسازی (شامل یک یا چند گروه عملکردی)، حداکثر تعداد کارگر در هر طبقه بر حسب حجم کار (مترائز طبقه یا تعداد واحد کار) (ستون ۴ از جدول ۲) و همچنین یک مقدار حداکثر دیگر برای هر دسته براساس تعداد طبقات ساختمان (ستون ۶ از جدول ۲) ارائه می‌دهد. هر کدام از این مقادیر کوچک‌تر باشد محدودکننده خواهد بود (ستون ۷ از جدول ۲). برای سازه این تحقیق تعداد کارگرهایی که می‌توانند برای هر دسته به کار گرفته شوند در جدول ۲ ارائه شده است.

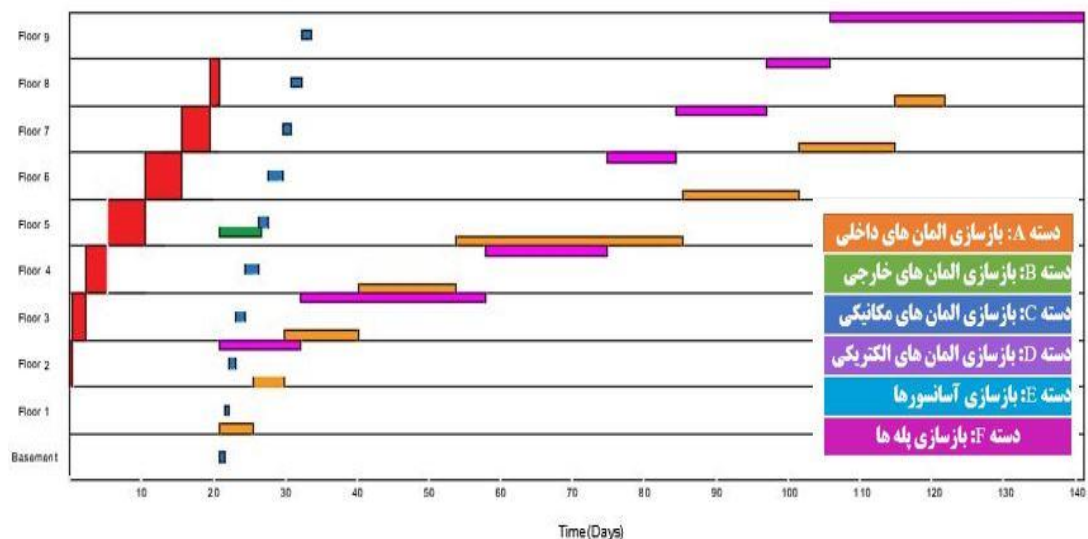
همچنین این دستورالعمل حداکثر تعداد کارگرانی که می‌توانند به‌طور هم‌زمان در کل ساختمان در تمامی دسته‌ها مشغول بازسازی باشند را ارائه کرده است که برای ساختمان این تحقیق ۷۵ نفر می‌باشد. به عبارت دیگر دسته‌های مختلف به شرطی می‌توانند به موازات هم به بازسازی بپردازند که مجموع کل کارگرهای حاضر در پروژه از ۷۵ نفر فراتر نرود. همان‌طوری که مشاهده می‌شود مجموع کارگرها برای بخش سازه‌ای برابر ۴۵ نفر و برای بخش غیرسازه‌ای برابر ۷۴ نفر می‌باشد که هر دو بخش کم‌تر از ۷۵ نفر می‌باشد. در صورتی که مجموع کل کارگرهایی که به‌طور هم‌زمان روند بازسازی دسته‌ها را انجام می‌دهند از ۷۵ نفر فراتر رود، می‌بایست روند بازسازی برخی دسته‌ها با تاخیر (غیرهم‌زمان) صورت گیرد. در این تحقیق مطابق با شیوه پیشنهادی REDi، برنامه زمانی بازسازی کل مربوط به نمونه متناظر با هزینه بازسازی موردانتظار اصلاح می‌شود. زمان بازسازی اصلاح شده برای حالت Pre-Northridge و Post-Northridge در طبقات مختلف در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۲: حداکثر تعداد کارگر مربوط به هر دسته

دسته بازسازی	گروه عملکردی	واحد	حداکثر تعداد کارگر براساس حجم کار	حداکثر تعداد کارگر براساس کل تعداد طبقات	حداکثر تعداد کارگر	
Structural	---	Per Square Foot per Floor	1Worker/500sf	45	45	
A	Pipes/Sprinklers HVAC Partitions Ceilings	Per Square Foot per Floor	1Worker/1000sf	23	30	23
B	Exterior Partitions Cladding/Glazing	Per Square Foot per Floor	1Worker/1000sf	23	30	23
C	Mechanical Equipment	Per Damaged Unit	3	9	18	9
D	Electrical Systems	Per Damaged Unit	3	15	18	15
E	Elevator	Per Damaged Unit	2	2	12	2
F	Stairs	Per Damaged Unit	2	2	12	2



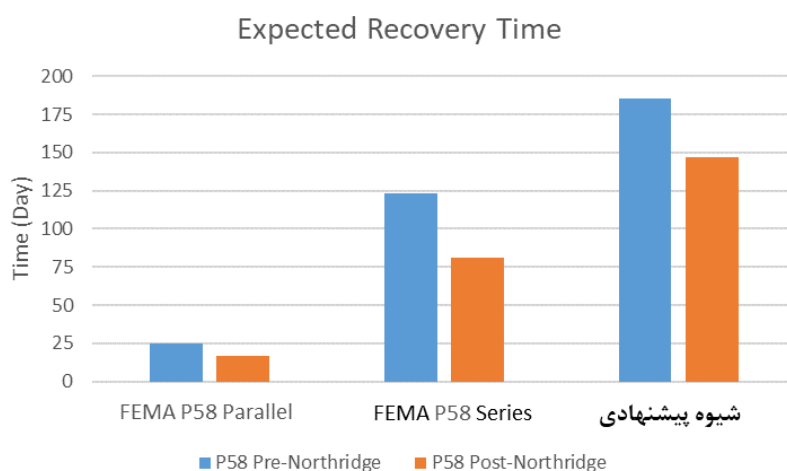
شکل ۱۳: زمان بازسازی اصلاح شده مطابق با REDi برای سازه Pre-Northridge



شکل ۱۴: زمان بازسازی اصلاح شده مطابق با REDi برای سازه Post-Northridge

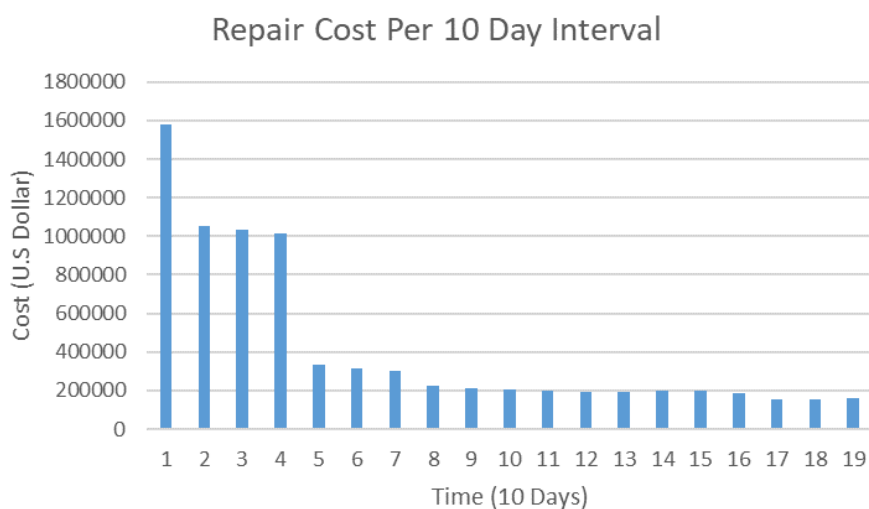
در شکل ۱۵ زمان بازسازی کل مورد انتظار در حالت Pre-Northridge و Post-Northridge بر مبنای روش FEMA-P58 در دو حالت موازی و سری و اصلاح شده مطابق با روش REDi ارائه شده و با هم مورد مقایسه قرار گرفته است. جهت محاسبه زمان بازسازی مورد انتظار اصلاح شده مطابق با روش REDi، داده های زمانی مربوط به المان های مختلف در Realization متناظر با میانه هزینه ها استخراج شده و مطابق دستورالعمل REDi دسته بندی شده و زمان مربوط به هر دسته تعیین می شود. سپس زمان کل بازسازی مورد انتظار با اعمال شرایط هم زمانی بازسازی در دسته های مختلف تعیین می شود. کمترین زمان بازسازی کل برای حالت موازی FEMA-P58 به دست می آید ولی امکان بازسازی تمام المان های آسیب دیده به طور هم زمان در تمام طبقات در عمل امکان پذیر نمی باشد. زمان بازسازی کل ارائه شده توسط FEMA-P58 در حالت سری با فرض انجام بازسازی یک طبقه پس از اتمام بازسازی طبقه پایین ارائه می شود. FEMA-P58 در محاسبه زمان بازسازی کل تنها حداکثر تعداد کارگر در مترمربع از ساختمان را به عنوان ماکزیمم کارگری که می توانند در ساختمان حضور داشته باشند را در نظر می گیرد که در این تحقیق برابر ۰,۰۰۲ انتخاب شده است که با توجه به مترژ هر طبقه تعداد ۴۵ کارگر در هر طبقه می توانند مشغول به کار باشند ولی هیچ تفکیکی در بازسازی دسته های مختلف و هم زمانی آن ها در طبقات مختلف را

در نظر نمی‌گیرد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که زمان بازسازی کل موردانتظار براساس داده‌های FEMA-P58 در حالت سری برای حالت Pre-Northridge و Post-Northridge به ترتیب برابر ۱۲۳ و ۸۱ روز یا کم‌تر خواهد بود، در حالی که این مقدار برای زمان بازسازی تصحیح شده توسط REDi به ترتیب برابر ۱۸۵ و ۱۴۷ روز یا کم‌تر خواهد بود که به ترتیب اختلافی در حدود ۵۰٪ و ۸۰٪ در محاسبه زمان بازسازی موردانتظار توسط دو روش را نشان می‌دهد. یکی از دلایل این اختلاف در محاسبه زمان بازسازی کل این می‌باشد که مطابق دستورالعمل REDi ابتدا می‌بایست تعمیر اعضای سازه‌ای در طبقات صورت گیرد تا روند بازسازی اعضای غیرسازه‌ای شروع شود در حالی که در زمان ارائه شده در FEMA-P58 بازسازی تمام المان‌ها باهم انجام می‌شود. دلیل دیگر این می‌باشد که در زمان ارائه شده توسط FEMA-P58 تمامی ۴۵ نفر می‌توانند روی یک گروه عملکردی آسیب‌دیده مانند تعمیر تاسیسات الکتریکی در یک طبقه کار کنند در حالی که طبق شیوه REDi محدودیتی برای حداکثر تعداد کارگری که می‌توانند روی یک گروه آسیب‌دیده در عمل کار کنند بر حسب نوع دسته آسیب‌دیده در نظر گرفته شده است. در نظر گرفتن مجموعه اقداماتی که قبل از شروع عملیات تعمیر سازه می‌بایست انجام شود، نظیر بازرسی سازه پس از وقوع زلزله، باز طراحی و تهیه نقشه‌های بازسازی، قرارداد با پیمانکار، تامین اعتبار، تجهیز کارگاه و ... که با عنوان فاکتورهای مانع (impeding factor) نام برده می‌شوند موجب می‌شود زمان‌های محاسبه شده واقعی تر باشند. با توجه به یکسان بودن زمان مربوط به فاکتورهای مانع در هر دو روش، در این تحقیق به دلیل مقایسه زمان بازسازی تعمیرات فیزیکی مربوط به سازه و اجزای غیرسازه‌ای از این قسمت صرف نظر شده است. همچنین همان طوری که انتظار می‌رفت زمان بازسازی کل موردانتظار تصحیح شده توسط REDi در حالت Post-Northridge در حدود ۲۶٪ نسبت به حالت Pre-Northridge کاهش داشته است.

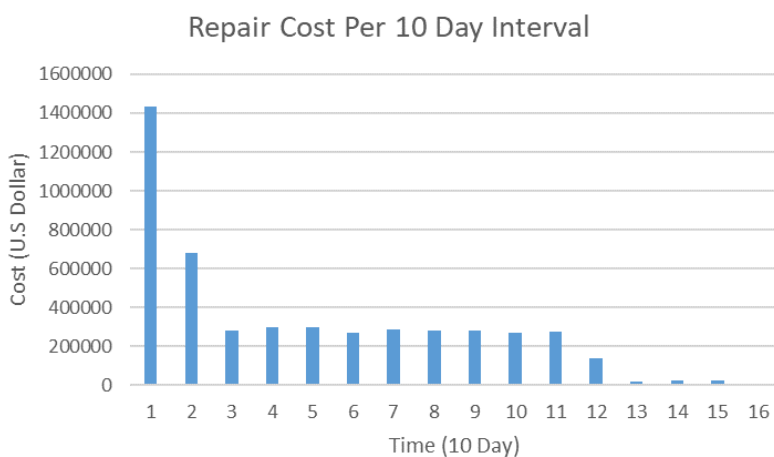


شکل ۱۵: مقایسه زمان بازسازی موردانتظار کل در حالت‌های مختلف

در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ هزینه بازسازی موردانتظار لازم در بازه‌های زمانی ۱۰ روزه به ترتیب برای حالت Pre-Northridge و Post-Northridge نشان داده شده است. در واقع در این نمودارها متوسط منابع مالی موردنیاز در طول روند بازسازی برای رسیدن به حداقل زمان بازسازی ممکن با در نظر گرفتن امکان پذیر بودن عملیات بازسازی براساس محدودیت‌های تعریف شده در REDi برای هم‌زمانی بازسازی در طبقات و دسته‌های مختلف عملکردی ارائه می‌شود. به عبارت دیگر در صورت تامین مالی به محض شروع عملیات اجرایی، با تامین هزینه بازسازی داده شده در بازه‌های زمانی ۱۰ روزه، سازه موردنظر در حداقل زمان ممکن بازسازی شده و دوباره قابلیت بهره‌برداری خود را به دست می‌آورد. همان طوری که مشاهده می‌شود هزینه‌های موردنیاز برای بازسازی در ابتدای پروژه دارای بیش‌ترین مقدار بوده و با گذشت زمان و پیشرفت روند بازسازی کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع این است که بازسازی اعضای سازه‌ای که هزینه بالایی را شامل می‌شود در ابتدای روند بازسازی انجام می‌شود و همچنین با پیشرفت روند بازسازی به مرور کار بازسازی برخی از دسته‌ها به اتمام می‌رسد.

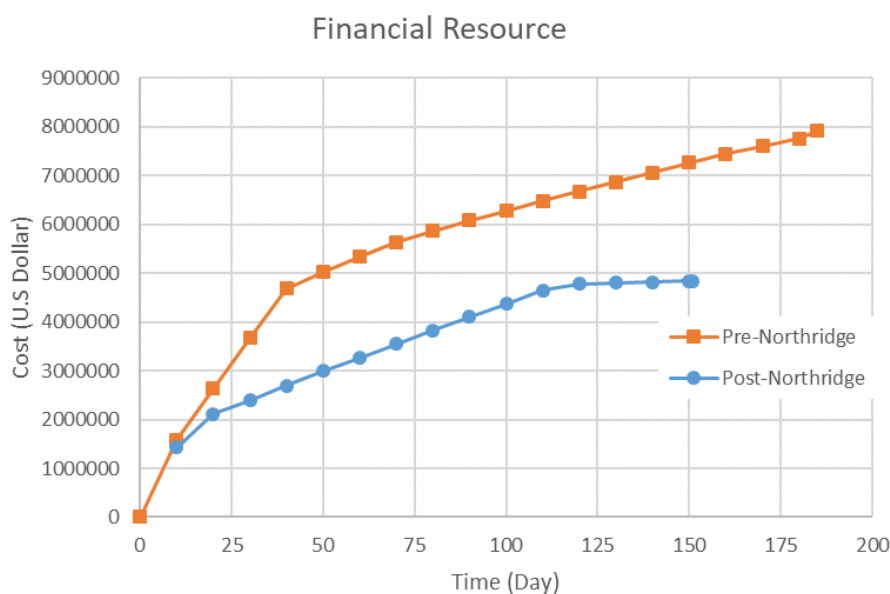


شکل ۱۶: هزینه بازسازی موردنیاز در بازه‌های زمانی ۱۰ روز برای حالت Pre-Northridge



شکل ۱۷: هزینه بازسازی موردنیاز در بازه‌های زمانی ۱۰ روز برای حالت Post-Northridge

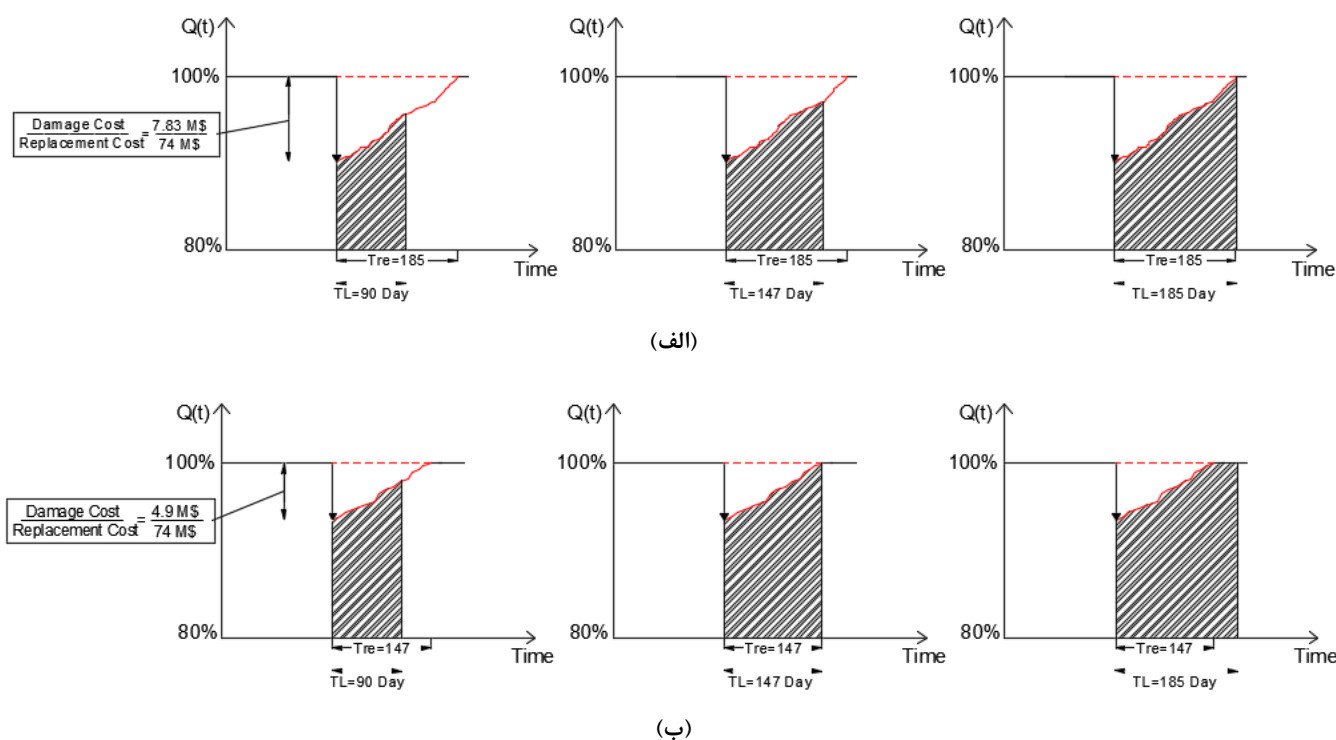
در شکل ۱۸ متوسط بودجه لازم برای بازسازی المان‌های مختلف در طول روند بازسازی (به صورت تجمعی) برای سازه مورد مطالعه در دو حالت Pre-Northridge و Post-Northridge ارائه شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود به دلیل این که هزینه‌های بازسازی اعضای سازه‌ای در حالت Pre-Northridge بیش‌تر از حالت Post-Northridge می‌باشد، مدت زمان بازسازی آن نیز طولانی‌تر می‌باشد. با اتمام بازسازی اعضای سازه‌ای و شروع بازسازی اعضای غیرسازه‌ای، شیب منحنی در هر دو نمودار کاهش می‌یابد.



شکل ۱۸: هزینه بازسازی موردانتظار موردنیاز در طول روند بازسازی برای حالت Pre-Northridge و Post-Northridge

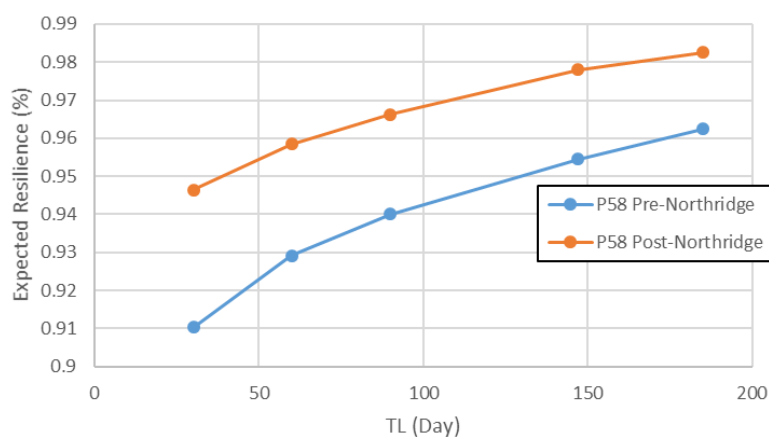
۳-۶ محاسبه تاب آوری لرزه‌ای موردانتظار

با داشتن زمان بازسازی متناظر با هزینه بازسازی موردانتظار برای المان‌های مختلف و تعیین زمان بازسازی کل مطابق دستورالعمل REDi، مسیر بازسازی سازه قابل محاسبه خواهد بود (شکل ۱۹). با داشتن هزینه بازسازی موردانتظار (میانگین هزینه بازسازی) و اصلاح زمان بازسازی متناظر براساس دستورالعمل REDi و همچنین در دست بودن مسیر بازسازی، تاب آوری لرزه‌ای موردانتظار سازه در دو حالت Pre-Northridge و Post-Northridge به دست می‌آید. زمان بازسازی کل مطابق دستورالعمل REDi برای حالت Pre-Northridge برابر ۱۸۵ روز و برای Post-Northridge برابر ۱۴۷ روز به دست می‌آید. به منظور ارزیابی تاب آوری سازه می‌بایست ابتدا زمان کنترل تاب آوری تعیین گردد. به عبارت دیگر دوره‌های زمانی که پس از وقوع حادثه به منظور بازسازی سازه برای طراح و کارفرما حائز اهمیت می‌باشد تعیین شده و تاب آوری لرزه‌ای سازه در این زمان کنترل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بسیاری از سازه‌های مهم طراح و کارفرما انتظار دارند تاب آوری سازه در یک دوره زمانی کوتاه چند ماهه پس از وقوع حادثه دارای تاب آوری قابل قبولی باشد تا از بازسازی سازه در کوتاه‌ترین زمان اطمینان حاصل نماید. شکل ۱۹ منحنی بازسازی سازه برای هر دو حالت Pre-Northridge و Post-Northridge برای زمان کنترل ۹۰، ۱۴۷ و ۱۸۵ روزه را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود با توجه به این‌که سازه با اتصالات بازطراحی شده Post-Northridge دارای هزینه بازسازی موردانتظار و زمان بازسازی کم‌تری نسبت به حالت Pre-Northridge می‌باشد، روند بازسازی سریع‌تری داشته و در نتیجه سطح زیر منحنی تابع عملکرد سازه بیش‌تر بوده و در زمان‌های کنترل یکسان تاب آوری لرزه‌ای بالاتری را خواهد داشت.



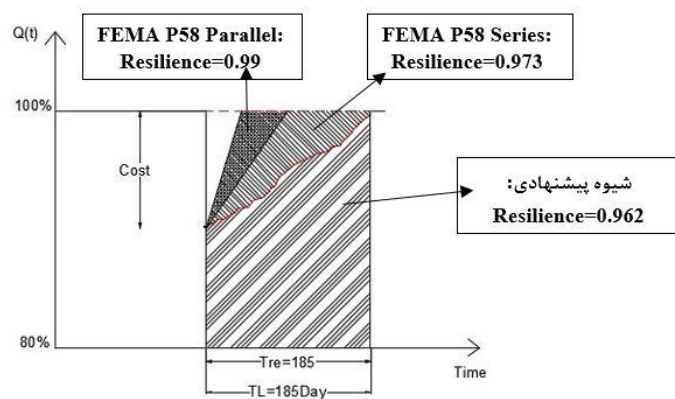
شکل ۱۹: تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار برای زمان‌های کنترل مختلف در حالت (الف) Pre-Northridge و (ب) Post-Northridge

در شکل ۲۰ تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار برای سازه مورد مطالعه با اتصالات Pre-Northridge و Post-Northridge برای بازه‌های مختلف از زمان کنترل (TL) ارائه شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود با اصلاح اتصالات در حالت Post-Northridge، هزینه بازسازی موردانتظار و زمان بازسازی کاهش یافته و در نتیجه تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار سازه نیز افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش زمان کنترل تاب‌آوری (۳۰ روزه، ۹۰ روزه، ۶۰ روزه و ...)، تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار سازه افزایش می‌یابد زیرا فرصت زمانی بیشتری برای بازسازی سازه وجود دارد. بنابراین همان‌طوری که در بخش‌های قبلی توضیح داده شده است یکی از پارامترهایی که در ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای سازه حائز اهمیت می‌باشد انتخاب زمان کنترل می‌باشد. با افزایش زمان کنترل، اختلاف تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار به دست آمده در دو حالت نیز کاهش می‌یابد.

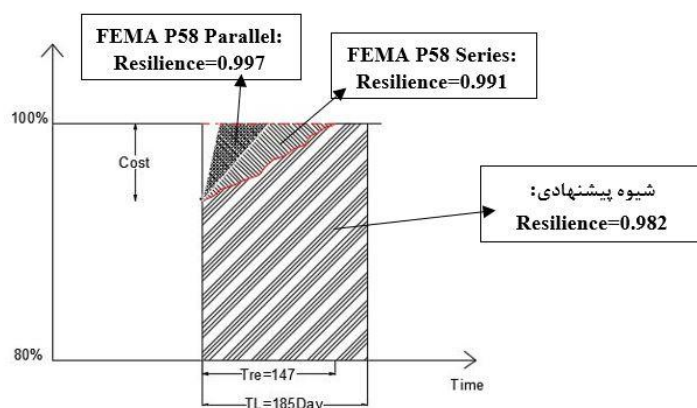


شکل ۲۰: مقایسه تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار در حالت Post-Northridge و Pre-Northridge برای زمان‌های کنترل مختلف

در شکل ۲۱ تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار سازه مورد مطالعه با اتصالات Pre-Northridge و Post-Northridge بر مبنای زمان بازسازی به‌دست آمده از داده‌های FEMA-P58 در دو حالت موازی و سری و اصلاح شده مطابق با REDI به‌صورت گرافیکی ارائه شده است. در محاسبه تاب‌آوری، زمان کنترل برابر ۱۸۵ روز انتخاب شده است که برابر با زمان بازسازی موردانتظار اصلاح شده مطابق با REDI برای سازه با اتصالات Pre-Northridge می‌باشد.



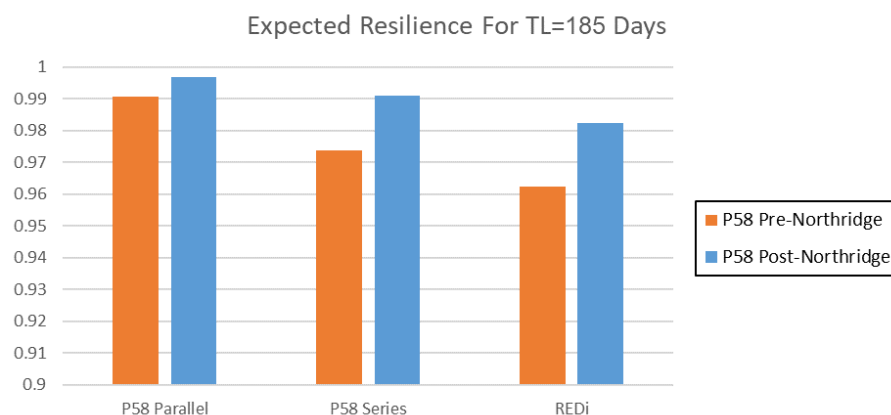
(الف)



(ب)

شکل ۲۱: تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار در حالت (الف) Pre-Northridge (ب) Post-Northridge برای TL=185 day

در شکل ۲۲ نتایج تاب‌آوری حاصل با هم مقایسه شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود در هر دو حالت Pre-Northridge و Post-Northridge، تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار به‌دست آمده با شیوه پیشنهادی نسبت به تاب‌آوری محاسبه از داده‌های FEMA-P58 کاهش می‌یابد. با توجه به هزینه‌های اقتصادی غیر مستقیم همانند خسارت ناشی از تعطیلی بنگاه اقتصادی، اجاره بها و غیره، تغییر جزئی در برآورد تاب‌آوری لرزه‌ای سازه می‌تواند ارزیابی ریسک پروژه را تحت تاثیر قرار دهد.



شکل ۲۲: مقایسه تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار در حالت Post-Northridge و Pre-Northridge برای TL=185 day

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق شیوه‌ای جهت تعیین کمی تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار برای سازه‌های ساختمانی بر مبنای شیوه احتمالاتی PEER PBEE توسعه داده شده است. همچنین روشی جهت محاسبه منحنی هزینه-زمان بازسازی پس از وقوع آسیب موردانتظار ارائه شده است. در مورد خصوصیات شیوه ارائه شده در این مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اصلاح زمان بازسازی کل ارائه شده توسط FEMA-P58 با در نظر گرفتن امکان هم‌زمانی و ترتیب بازسازی المان‌های مختلف آسیب‌دیده مطابق دستورالعمل REDi.
- ارائه هزینه کل و زمان کل بازسازی موردانتظار با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های لرزه‌ای، نیاز لرزه‌ای و سطح آسیب وارده.
- تعیین منحنی زمان-هزینه برای المان‌های مختلف آسیب‌دیده و محاسبه مسیر بازسازی سیستم (منحنی زمان-هزینه بازسازی) به جای استفاده از تابع فرضی برای منحنی بازگشت سیستم به عملکرد موردانتظار.
- امکان تعیین مسیر بازسازی بر مبنای منابع بودجه اختصاص داده شده در طول روند بازسازی.
- ارائه هزینه لازم جهت بازسازی سیستم در بازه‌های زمانی دلخواه در طول روند بازسازی (به صورت هفتگی، ماهانه و ...).
- ارائه تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار سیستم با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی مختلف برای زمان کنترل سیستم.

شیوه پیشنهادی بر روی سازه ۹ طبقه از گروه ساختمانی SAC در دو حالت Pre-Northridge و Post-Northridge، مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده شد اصلاح زمان بازسازی کل بر مبنای شیوه REDi با لحاظ محدودیت‌های اجرایی، موجب افزایش قابل توجه زمان بازسازی کل در مقایسه با مقادیر به‌دست آمده بر مبنای FEMA-P58 خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قابلیت محاسبه کمی و مقایسه تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌ها با سیستم‌های سازه‌ای مختلف را به‌طور موثری فراهم می‌سازد. با توجه به لحاظ محدودیت‌های اجرایی در انتخاب تعداد کارگران و رعایت اولویت‌بندی در بازسازی المان‌های آسیب‌دیده، مشاهده می‌شود زمان بازسازی محاسبه شده بر مبنای روند اصلاحی REDi در مقایسه با زمان بازسازی کل ارائه شده توسط FEMA-P58 در هر دو حالت Pre-Northridge و Post-Northridge، به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که نشان از اهمیت اصلاح زمان بازسازی در محاسبه تاب‌آوری لرزه‌ای به روش پیشنهادی دارد، به‌طوری‌که زمان بازسازی کل موردانتظار براساس داده‌های FEMA-P58 در حالت سری برای حالت Pre-Northridge و Post-Northridge به ترتیب برابر ۱۲۳ و ۸۱ روز یا کم‌تر خواهد بود، درحالی‌که این مقدار برای زمان بازسازی تصحیح شده توسط REDi به ترتیب برابر ۱۸۵ و ۱۴۷ روز یا کم‌تر خواهد بود که به ترتیب اختلافی در حدود ۵۰٪ و ۸۰٪ در محاسبه زمان بازسازی موردانتظار توسط دو روش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود استفاده از اتصالات Post-Northridge در مقایسه با اتصالات Pre-Northridge موجب کاهش

۲۲٪ در مدت زمان بازسازی مطابق روش REDi می‌شود. همچنین نتایج حاصل نشان می‌دهد که هزینه بازسازی موردانتظار برای حالت Pre-Northridge برابر ۷/۸۳ میلیون دلار و برای حالت Post-Northridge برابر ۴/۹ میلیون دلار به دست می‌آید. در نتیجه استفاده از اتصالات باز طراحی شده در مدل Post-Northridge باعث کاهش حدود ۳۷ درصدی در هزینه‌های بازسازی شده است. محاسبه تاب‌آوری لرزه‌ای موردانتظار سیستم مطابق شیوه پیشنهادی به دلیل اصلاح زمان بازسازی و ارائه مسیر بازسازی واقعی، دارای ارزیابی دقیق‌تری می‌باشد. نتایج ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای سازه مورد مطالعه مطابق شیوه پیشنهادی و داده‌های حاصل از FEMA-P58 نشان می‌دهد که تاب‌آوری لرزه‌ای محاسبه شده برای سازه مورد نظر مطابق شیوه پیشنهادی در مقایسه با تاب‌آوری لرزه‌ای محاسبه شده بر اساس زمان اصلاح نشده FEMA-P58 با فرض زمان کنترل یکسان کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] Ayyub, B. M. (2015). "Practical resilience metrics for planning, design, and decision making". ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 1(3), 04015008.
- [2] ASCE 07-16. (2016). "Minimum design loads for buildings and other structures". ASCE/Structural Engineering Institute (SEI) 7-16, Reston, VA.
- [3] FEMA-356. (2000). *Pre-standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. American Society of Civil Engineers
- [4] ATC-40. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Reinforced Concrete Buildings*. Applied Technology Council
- [5] Günay, Selim, and Khalid M. Mosalam. (2013). "PEER performance-based earthquake engineering methodology, revisited". Journal of Earthquake Engineering 17, no. 6: 829-858.
- [6] FEMA-P58. (2012). "Seismic performance assessment of buildings". Federal Emergency Management Agency. Rep. FEMA P-58, Washington, DC.
- [7] Cimellaro, Gian Paolo, Andrei M. Reinhorn, and Michel Bruneau. (2010). "Framework for analytical quantification of disaster resilience". Engineering Structures 32.11: 3639-3649.
- [8] Bonstrom, Holly, and Ross B. Corotis. (2014). "First-order reliability approach to quantify and improve building portfolio resilience". Journal of Structural Engineering 142.8: C4014001.
- [9] Cimellaro, Gian Paolo. (2016). "Urban resilience for emergency response and recovery". Springer International Publishing, Switzerland.
- [10] Tirca, L., Serban, O., Lin, L., Wang, M., & Lin, N. (2015). "Improving the seismic resilience of existing braced-frame office buildings". Journal of Structural Engineering 142.8: C4015003.
- [11] Domaneschi, Marco, and L. Martinelli. (2015). "Earthquake-resilience-based control solutions for the extended benchmark cable-stayed bridge". Journal of Structural Engineering 142.8: C4015009.
- [12] Hutt, Molina C., Almufti, I., Willford, M., & Deierlein, G. (2015). "Seismic loss and downtime assessment of existing tall steel-framed buildings and strategies for increased resilience". Journal of Structural Engineering 142.8: C4015005.
- [13] Sutley, Elaina J., John W. van de Lindt, and Lori Peek. (2016). "Community-Level Framework for Seismic Resilience. I: Coupling Socioeconomic Characteristics and Engineering Building Systems". Natural Hazards Review 18.3: 04016014.
- [14] Sutley, Elaina J., John W. van de Lindt, and Lori Peek. (2016). "Community-Level Framework for Seismic Resilience. II: Multiobjective Optimization and Illustrative Examples". Natural Hazards Review 18.3: 04016015.
- [15] Mosalam, Khalid M., et al. (2018) "Performance-based engineering and multi-criteria decision analysis for sustainable and resilient building design." Structural Safety 74 1-13.
- [16] Yekrangnia, Mohammad, et al. (2021). "Risk assessment of confined unreinforced masonry buildings based on FEMA P-58 methodology: a case study—school buildings in Tehran." Bulletin of Earthquake Engineering 19.2: 1079-1120.
- [17] Anwar, Ghazanfar Ali, and You Dong. (2020). "Seismic resilience of retrofitted RC buildings". Earthquake Engineering and Engineering Vibration 19.3: 561-571.
- [18] Eghbali, M., Samadian, D., Ghafory-Ashtiany, M., & Dehkordi, M. R. (2020). "Recovery and reconstruction of schools after M 7.3 Ezgeleh-Sarpole-Zahab earthquake; part II: Recovery process and resiliency calculation". Soil Dynamics and Earthquake Engineering 139: 106327.
- [19] Samadian, D., Eghbali, M., Dehkordi, M. R., & Ghafory-Ashtiany, M. (2020). "Recovery and reconstruction of schools after M 7.3 Ezgeleh-Sarpole-Zahab earthquake of Nov. 2017; part I: Structural and nonstructural damages after the earthquake". Soil Dynamics and Earthquake Engineering 139: 106305.
- [۲۰] کلانتری، مهسبما، اقبالی، صمدیان و دلپاز. (۲۰۲۱). "ارزیابی کمی شاخص تاب‌آوری لرزه‌ای شهری (مطالعه موردی: مناطق ۱ و ۳ شهر زنجان)". جغرافیا و مخاطرات محیط. 10(3).

- [۲۱] حمیدیا و دلیلی یزدی. (۲۰۲۲). "بررسی کمی تاب‌آوری لرزه‌ای در قاب‌های خمشی فولادی مجهز به میراگرهای لزج غیرخطی تحت زلزله ثانویه". مهندسی عمران.
- [22] Shadabfar, M., Mahsuli, M., Zhang, Y., Xue, Y., Ayyub, B. M., Huang, H., & Medina, R. A. (2022). "Resilience-Based Design of Infrastructure: Review of Models, Methodologies, and Computational Tools". ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering 8.1: 03121004.
- [23] Daneshvar, M. H., Saffarian, M., Jahangir, H., & Sarmadi, H. (2022). "Damage identification of structural systems by modal strain energy and an optimization-based iterative regularization method". Engineering with Computers, 1-21.
- [24] Li, Yong, Joel P. Conte, and Philip E. Gill. (2019). "Probabilistic performance-based optimum seismic design framework: illustration and validation". Computer Modeling in Engineering & Sciences 120.3: 517-543.
- [25] Almufti, I., and Willford, M. (2013). "Resilience-based earthquake design initiative (REDi) for the next generation of buildings". (http://publications.arup.com/Publications/R/REDi_Rating_System.aspx)
- [26] Lignos, Dimitrios G., and Helmut Krawinkler. (2011). "Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading". Journal of Structural Engineering 137.11: 1291-1302.
- [27] Lignos, D. G., Hartloper, A. R., Elkady, A. and Deierlein, G. G. (2019). "Proposed updates to the ASCE 41 nonlinear modeling parameters for wide-flange steel columns in support of performance-based seismic engineering". Journal of Structural Engineering 145.9: 04019083.
- [28] Sepasdar, R., Mo R. Banan, and Ma R. Banan. (2019). "A Numerical Investigation on the Effect of Panel Zones on Cyclic Lateral Capacity of Steel Moment Frames." Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering : 1-10.
- [29] Memari, Mehrdad, and Hussam Mahmoud. (2018). "Multi-resolution analysis of the SAC steel frames with RBS connections under fire". Fire Safety Journal 98: 90-108.
- [30] Karimi Ghaleh Jough, Foad, and Serhan Şensoy. (2020). "Steel Moment-Resisting Frame Reliability via the Interval Analysis by FCM-PSO Approach considering Various Uncertainties". Journal of Earthquake Engineering 24.1: 109-128.
- [31] Shakeri, K., Khansoltani, E., & Pessiki, S. (2018). "Ground motion scaling for seismic response analysis by considering inelastic response and contribution of the higher modes". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 110, 70-85.
- [۳۲] شاکری، کاظم و خان سلطانی. (۲۰۱۹). "مقیاس کردن رکوردهای زلزله براساس مشخصه‌های رفتار غیرخطی سازه‌ها". مهندسی عمران، ۳۴(۴، ۱)، ۵۵-۶۸.
- [33] Zhang, R., Wang, D., Chen, X., & Li, H. (2022). "Weighted and unweighted scaling methods for ground motion selection in time-history analysis of structures". Journal of Earthquake Engineering, 26(6), 3148-3183.
- [34] FEMA P695. (2009). "Quantification of Building Seismic Performance Factors, FEMA P-695". prepared by Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.