



پیشنهاد پژوهشی رساله دکتری رشته مهندسی عمران - گرایش زلزله

ارائه روابط آسیب پذیری و تاب آوری لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی
بتنی و فولادی میان مرتبه دارای دیوارهای غیرسازه‌ای سبک پنبلی

**Formulation of Seismic Vulnerability and Resilience Functions
for Mid-Rise RC and Steel Moment Frames with Lightweight
Non-Structural Panel Walls**

پژوهنده:

محمد مهدی شیخی

استاد راهنما:

دکتر حمید صفاری

شهریورماه ۱۴۰۴



SCAN ME

هیئت داوران محترم:



دکتر محمود رضا شیراوند



دکتر حمید بایسته



دکتر حمید زعفرانی



دکتر رضا کرمی محمدی

نام خداوند جان و

فهرست مطالب



۱. مقدمه و بیان مسئله

۲. مرور ادبیات فنی

۳. روش انجام پژوهش، فرض‌ها و گستره پژوهش، بیان نوآوری‌ها

۴. برنامه زمان‌بندی



۱. مقدمه و بیان مسئله

مقدمه و بیان مسئله

هدف کلی پژوهش

ارائه روابط آسیب‌پذیری و تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی بتنی و فولادی میان‌مرتبه دارای دیوارهای غیرسازه‌ای سبک پنلی

تمرکز پژوهش

مقایسه عملکرد لرزه‌ای سیستم قاب خمشی بتن‌آرمه و فولادی میان‌مرتبه در حضور دیوارهای سبک پنلی در سه حوزه لرزه‌ای: نزدیک، متوسط و دور

حیطه ارزیابی شاخص تاب‌آوری لرزه‌ای

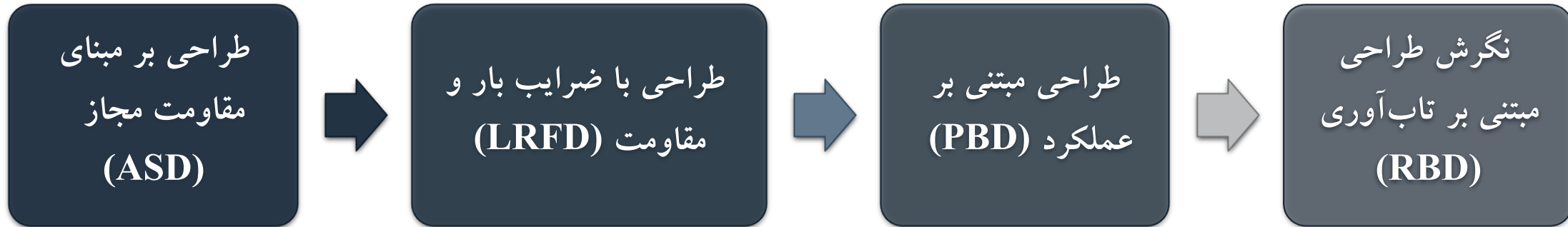
سازه‌های منفرد با رویکرد کمی

کاربرد نتایج

پایه‌ای برای تصمیم‌سازی‌های مهندسی و زمینه‌سازی ارتقای تاب‌آوری شهری



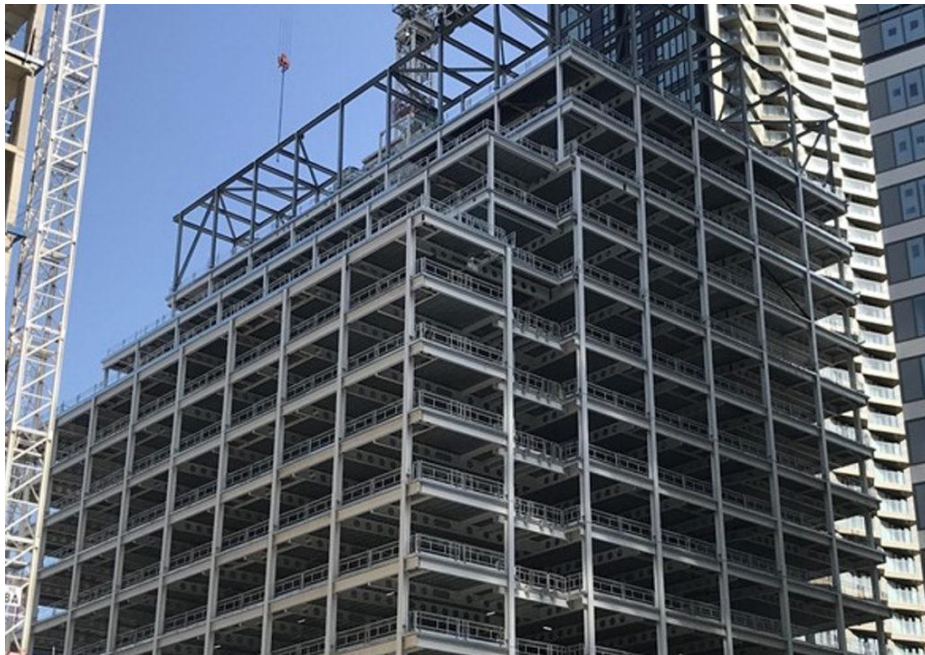
روند تکامل آیین نامه های طراحی



• طراحی مبتنی بر عملکرد بر کاهش خسارات مالی و جانی تمرکز دارد، اما فرآیند بازیابی عملکرد سازه را پوشش نمی دهد.

• نگرش مبتنی بر تاب آوری، نسل جدید طراحی لرزه ای است که نه تنها خسارت لرزه ای، بلکه زمان بازیابی عملکرد را نیز هدف قرار می دهد.





❓ دلیل بررسی عملکرد لرزه‌ای ساختمان قاب خمشی بتنی و فولادی میان مرتبه

- سهم قابل توجهی در ساخت و ساز شهری به این سیستم‌ها اختصاص دارد.
- عملکرد آن‌ها تحت زلزله‌ها، نقش مهمی در کاهش یا افزایش خسارات اقتصادی، جراحات و تلفات جانی ایفا می‌کند.

📢 ضرورت درک تفاوت های ذاتی در رفتار سازه‌ای سیستم های مختلف در شرایط لرزه‌ای متفاوت

- پاسخ متفاوت لرزه‌ای به واسطه تفاوت در ویژگی‌های ذاتی رفتاری: جرم، سختی، رفتار غیرخطی، ظرفیت شکل پذیری، الگوی خرابی و روند بازیابی عملکرد ساختمان‌ها
- شدت، مدت زمان و محتوی فرکانسی حرکت زمین

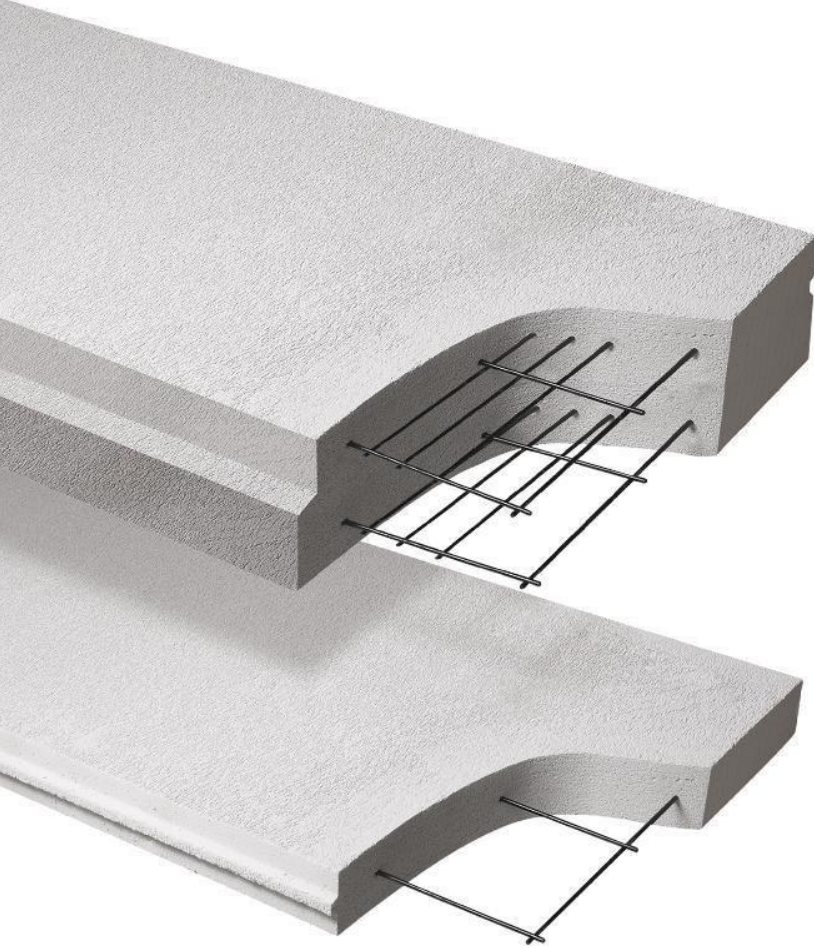


معرفی دیوارهای سبک هوادار اتوکلاو شده پنبلی

- بتن سبک اتوکلاو شده (به اختصار AAC)

Autoclaved Aerated Concrete

- نوعی بتن سبک متخلخل است که حاوی سلول‌های بسته حباب هوا
- مواد تشکیل دهنده‌ی آن شامل:



پودر آلومینیوم



سیلیس



سیمان، آهک

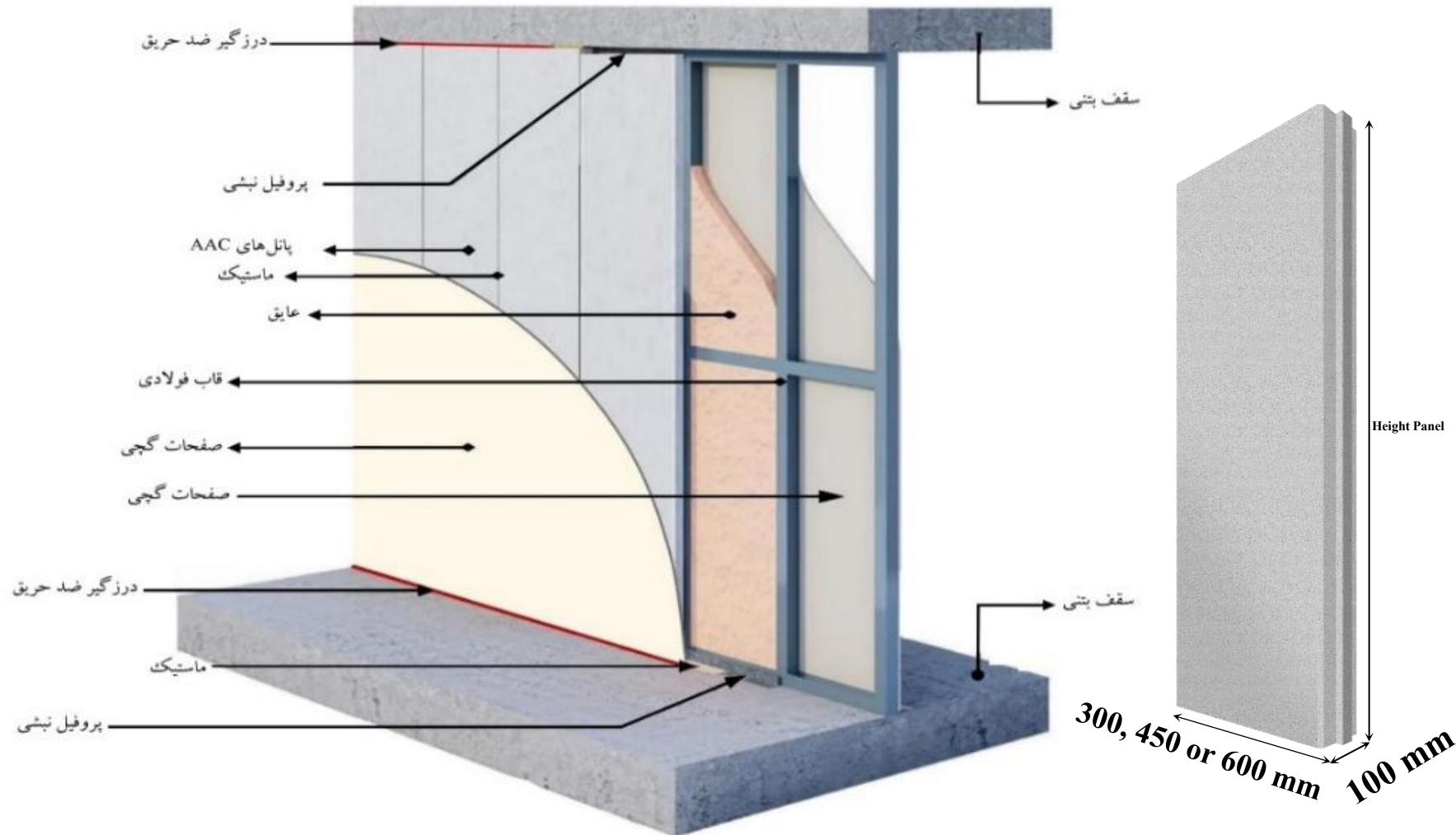


آب

- وزن مخصوص حدود ۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب



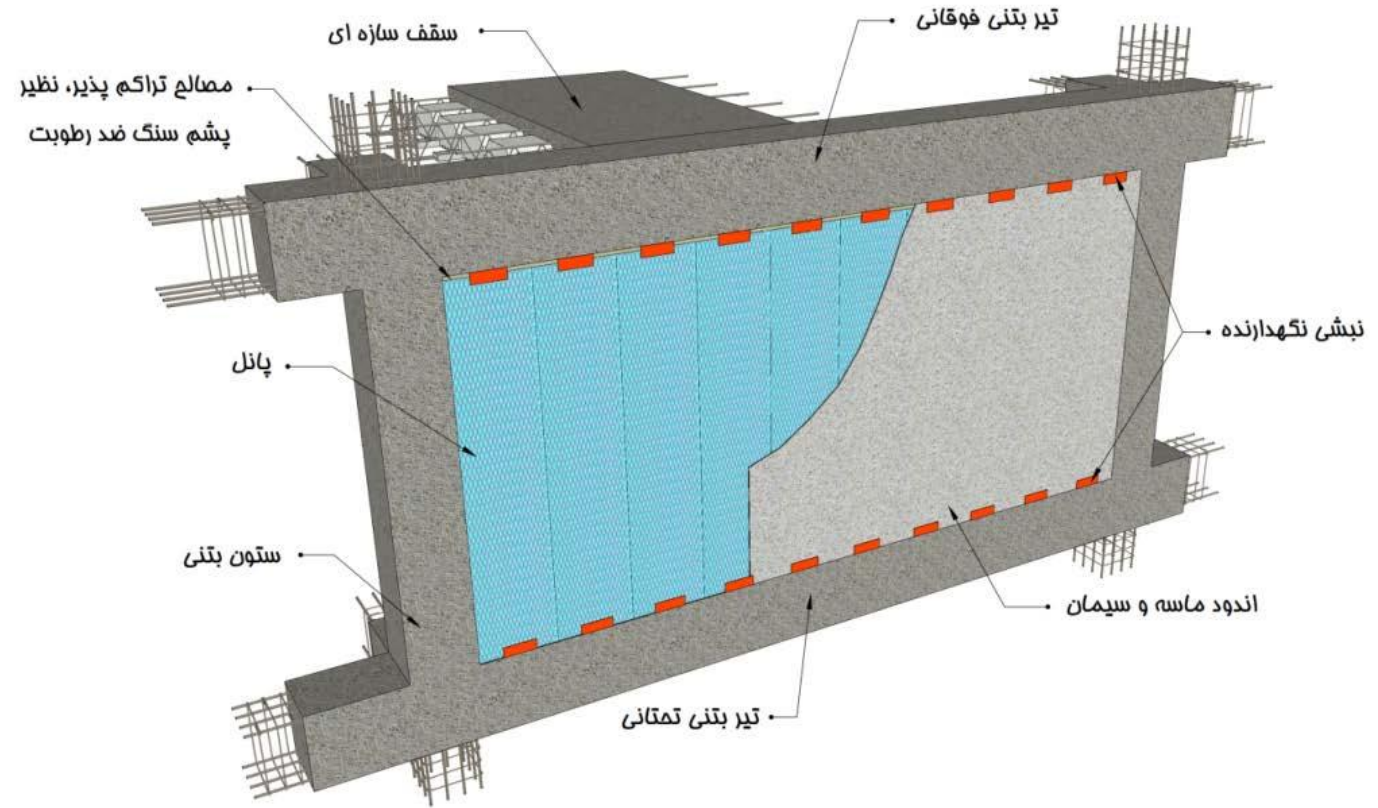
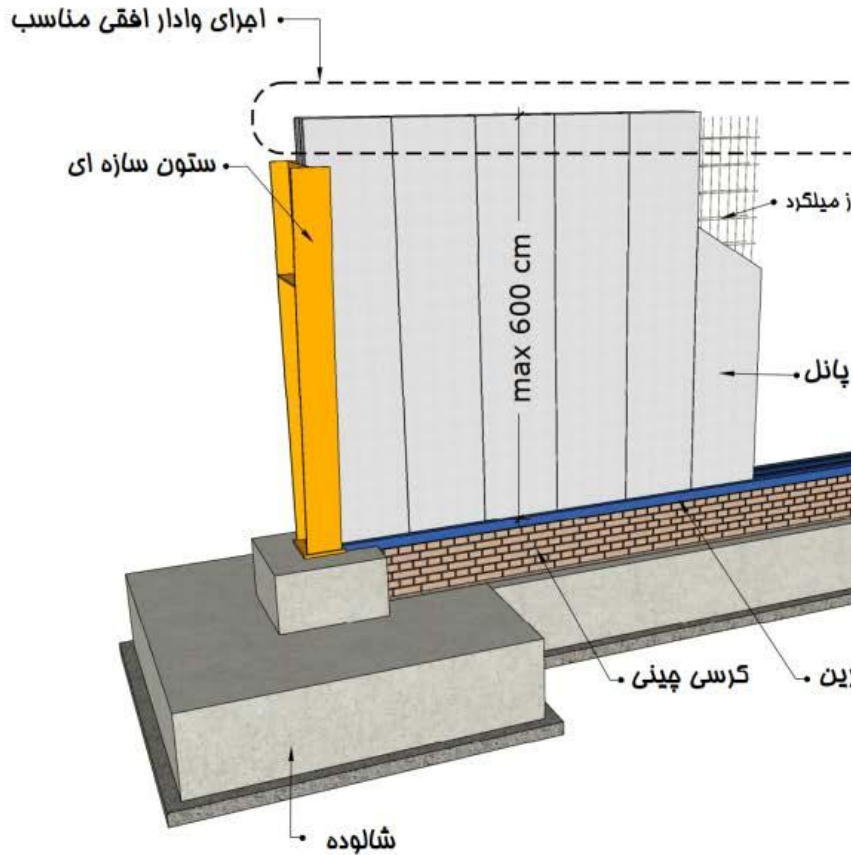
معرفی دیوارهای سبک هوادار اتوکلاو شده پنلی



دیوار پیش ساخته پنلی



معرفی دیوارهای سبک هوادار اتوکلاو شده پنلی



دیوارهای پیش ساخته پنلی (© ضابطه ۷۱۴ سازمان برنامه و بودجه کشور)



?



دلیل بررسی ساختمان‌های قاب خمشی بتنی و فولادی میان مرتبه در حضور دیوارهای غیرسازه‌ای سبک پنلی

رشد روزافزون نیاز به ساخت و ساز:

- سریع
- مقرون به صرفه و بهینه
- سبک وزن و یکپارچه

ویژگی استفاده از دیوارهای سبک هوادار اتوکلاو شده پنلی:

- کاهش بار مرده ساختمان و کاهش جرم موثر لرزه‌ای
- سهولت در نصب و افزایش سرعت اجرا
- بهینه‌سازی عملکرد حرارتی، آکوستیکی و آتشپادی سازه

وزن سبک دیوارهای غیرسازه‌ای پنلی



کاهش بار مرده ساختمان



کاهش وزن موثر لرزه‌ای ساختمان



منجر به پاسخ لرزه‌ای متفاوت در
سیستم سازه‌ای

نمونه ساختمان های اجرا شده با دیوارهای سبک پنلی AAC



AAC: Autoclaved Aerated Concrete

نمونه ساختمان های اجرا شده با دیوارهای سبک پنلی AAC



ضرورت پژوهش

• نیاز به ساخت ساختمان‌های بهینه، سبک و یکپارچه با عملکرد لرزه‌ای مطلوب و تاب‌آور

• فقدان مطالعات پژوهشی در زمینه ارزیابی کمی آسیب‌پذیری و تاب‌آوری لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای با حضور اجزای غیرسازه‌ای سبک

• نیاز به مقایسه‌ی تحلیلی و داده محور میان عملکرد هر یک از این سیستم‌ها در شرایط بارگذاری یکسان و در حوزه‌های مختلف لرزه‌ای (نزدیک تا دور)

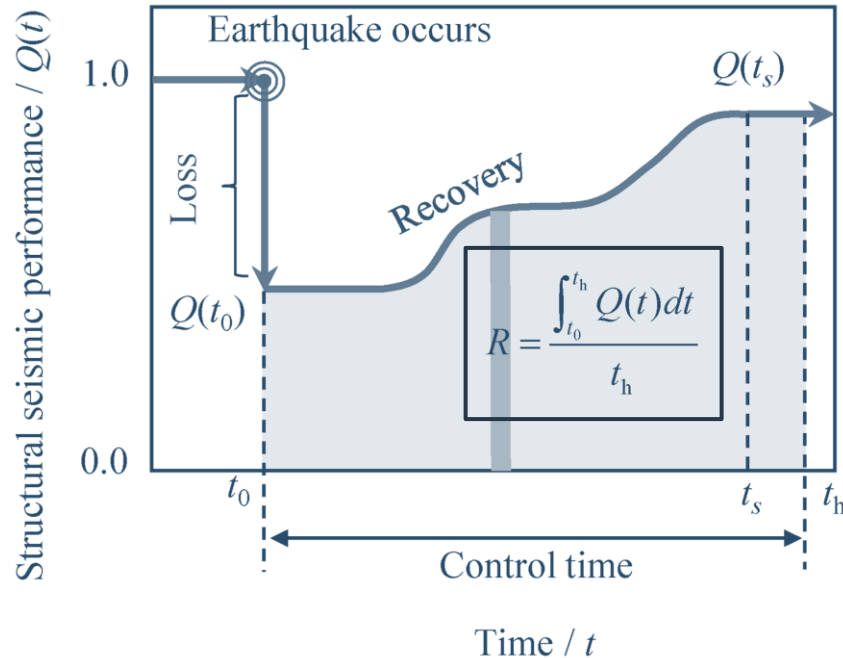
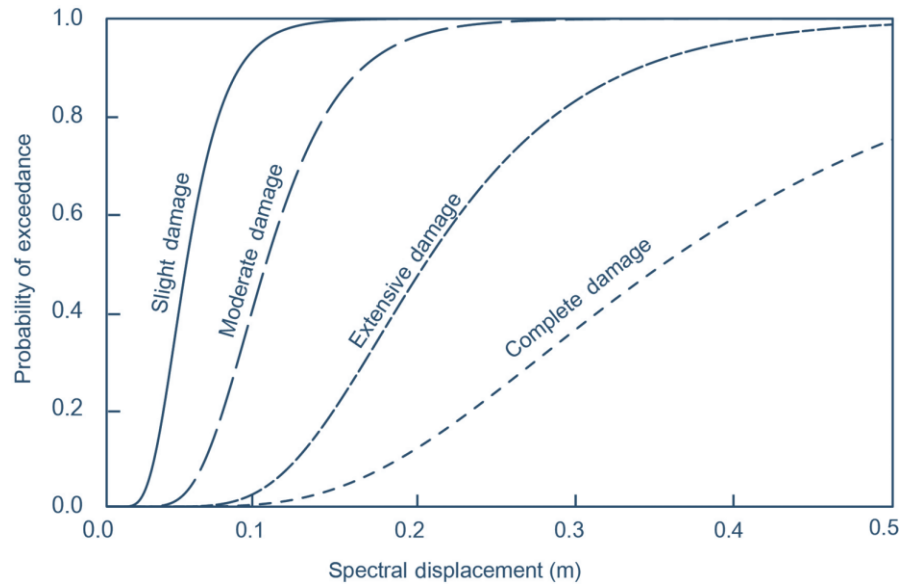




اهداف پژوهش

۱. استخراج و مقایسه منحنی‌های شکنندگی و پارامترهای آماری لاگ نرمال در سیستم قاب خمشی بتنی و فولادی میان مرتبه دارای دیوارهای سبک پنلی تحت زلزله‌های حوزه‌های مختلف و ارائه روابط برازشی آن‌ها

۲. ارزیابی و مقایسه شاخص‌های کمی تاب‌آوری لرزه‌ای به ازای هر شدت در سیستم قاب خمشی بتنی و فولادی میان مرتبه دارای دیوارهای سبک پنلی تحت زلزله‌های حوزه‌های مختلف



کاربرد پژوهش

• نتایج این پژوهش می تواند به عنوان مبنایی علمی و کاربردی در اختیار:

❖ جامعه علمی

❖ مهندسان طراح

❖ آیین نامه نویسان

❖ سیاست گذاران حوزه ساخت و ساز

• کمک به انتخاب بهینه سیستم های سازه ای با عملکرد لرزه ای مطلوب
• فراهم سازی زمینه برای تصمیم سازی آگاهانه و مبتنی بر داده در طراحی لرزه ای

• امکان تدوین سیاست های تشویقی و کلان جهت سوق دادن جامعه به سوی طرح های مقاوم و تاب آور شهری



سوال‌های اصلی پژوهش

به طور کمی و در شرایطی که دیوارهای غیرسازه‌ای سبک پنلی بدون مشارکت در سختی جانبی و صرفاً به صورت موثر در جرم لرزه‌ای لحاظ شوند:

(۱) **منحنی‌های شکنندگی** سیستم‌های قاب خمشی بتنی و فولادی میان‌مرتب با حضور دیوارهای سبک پنلی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک، متوسط و دور چگونه مقایسه و ارزیابی می‌شوند؟

(۲) **شاخص تاب‌آوری** سیستم‌های قاب خمشی بتنی و فولادی میان‌مرتب با حضور دیوارهای سبک پنلی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک، متوسط و دور چگونه مقایسه و ارزیابی می‌شوند؟

(۳) **در هریک از حوزه‌های لرزه‌ای، کدامیک از این سیستم‌ها از منظر آسیب‌پذیری و تاب‌آوری عملکرد مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد؟**





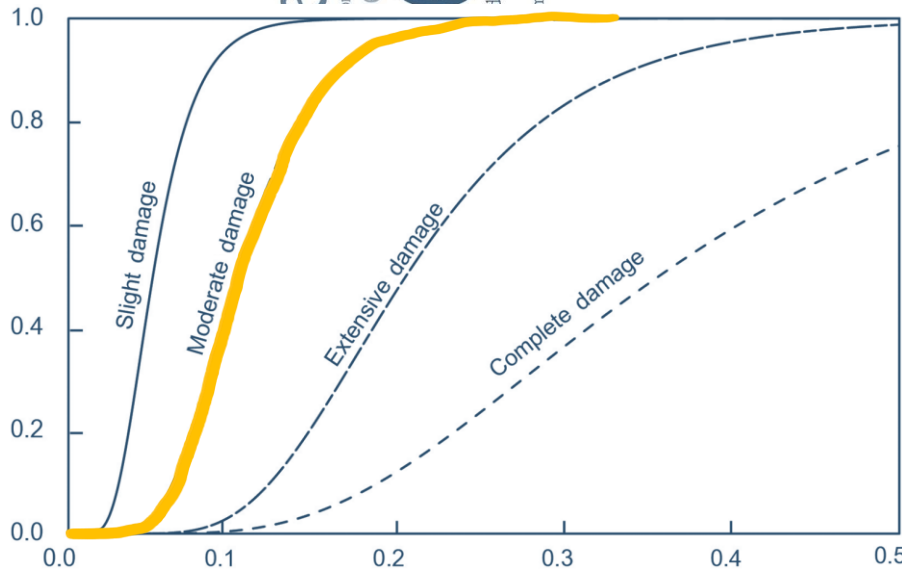
فرضیه پژوهش و نتایج مورد انتظار

در این شرایط انتظار می‌رود:

(۱) قاب‌های خمشی فولادی به دلیل رفتار شکل‌پذیرتر و جرم لرزه‌ای کمتر، منحنی شکنندگی مقاوم‌تری نسبت به قاب‌های بتنی نشان دهند به گونه‌ای که منحنی‌های شکنندگی آن به سمت مقادیر با شدت بالاتر منتقل شوند. (انتقال منحنی شکنندگی به سمت راست بیانگر آسیب‌پذیری کمتر)

(۲) در حوزه نزدیک، به دلیل شدت و شتاب بالاتر زلزله، وجود مؤلفه‌های ضربه‌ای و پالس سرعت، و نیز فرکانس‌های لرزه‌ای با باند محدودتر که به فرکانس طبیعی سازه‌های میان‌مرتبه نزدیک‌ترند؛ حضور این پالس‌ها در ورودی حرکت زمین احتمال رسیدن سازه به حالت‌های حدی آسیب در سطوح پایین‌تر را افزایش دهد. به گونه‌ای که موجب جابجایی منحنی‌های شکنندگی به سمت چپ و در نتیجه افزایش آسیب‌پذیری شود.

با این حال، انتظار می‌رود که در تمامی حوزه‌ها، سیستم قاب فولادی عملکرد نسبی بهتری داشته باشد؛



فرضیه پژوهش و نتایج مورد انتظار

در این شرایط انتظار می‌رود:

(۳) شاخص تاب‌آوری سیستم قاب فولادی در همه حوزه‌های لرزه‌ای نزدیک، متوسط و دور بیشتر از قاب بتنی باشد.

۴) کاهش شاخص تاب‌آوری در حوزه نزدیک به دلیل شدت بالای زلزله قابل توجه‌تر باشد. (افزایش خسارت لرزه‌ای بیشتر نسبت به سایر حوزه‌های لرزه‌ای)

۵) در حوزه‌های متوسط و دور، شاخص تاب‌آوری هر دو سیستم افزایش یابد اما همچنان قاب فولادی برتری نسبی داشته باشد.



۲. مرور ادبیات فنی



کلیات و مفاهیم پایه

الزامات دستیابی به تاب آوری لرزه‌ای

- درک دقیق و جامع از رفتار سازه‌ها در برابر زلزله
- تدوین و تدقیق معیارهای طراحی موثر

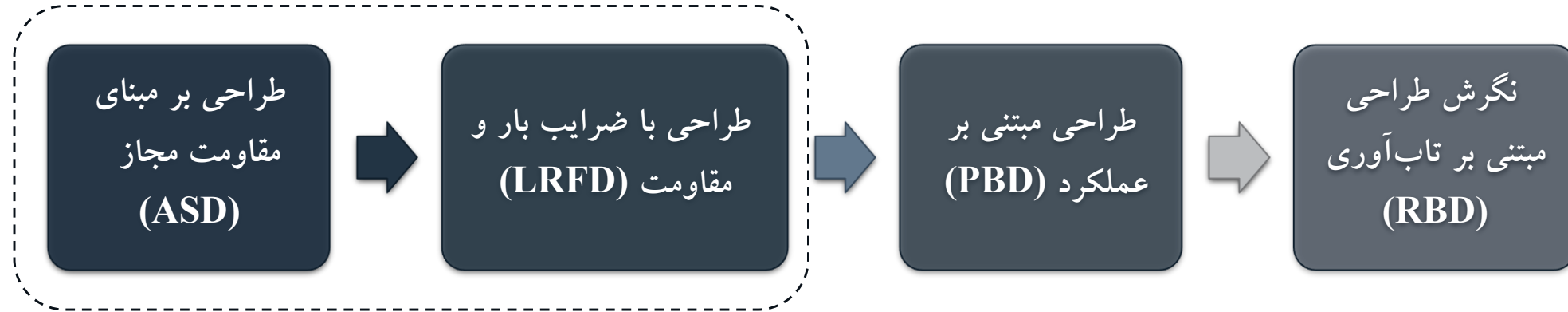
عوامل کلیدی مؤثر در رفتار لرزه‌ای سازه‌ها:

- ❖ یکپارچگی سازه‌ای
- ❖ ویژگی‌های مصالح
- ❖ مکانیزم‌های توزیع بار
- ❖ مکانیزم‌های رفتاری سیستم باربر لرزه‌ای





سیر تحول آیین نامه های طراحی



۱. نسل اول: طراحی بر اساس تنش مجاز (ASD)

- اعمال ضریب اطمینان برای باقی ماندن سازه در محدوده الاستیک
- جلوگیری از ورود به رفتار غیرخطی

ASD vs LRFD

$$F_{\max} \leq F_{all} = \frac{F_{lim}}{F.S.}$$

$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n$$

۲. نسل دوم: طراحی بر اساس ضرایب بار و مقاومت (LRFD)

- لحاظ جداگانه عدم قطعیت های بار و مقاومت

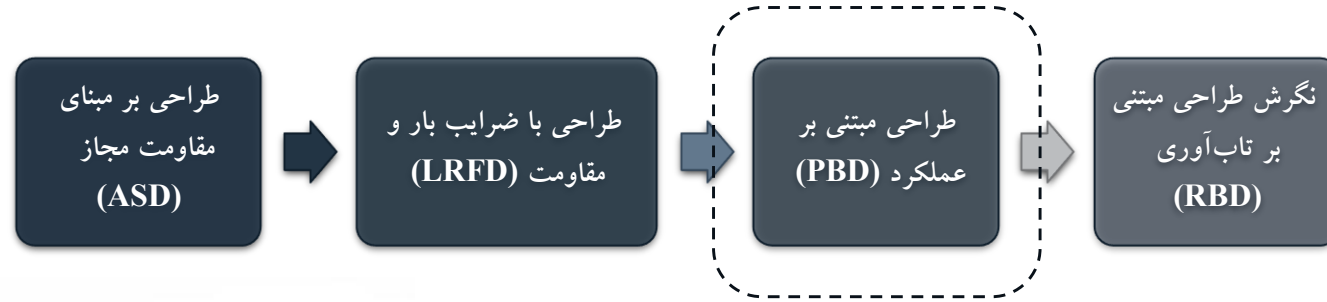
$$R_a \leq \frac{R_n}{\Omega}$$

$$R_u \leq \phi R_n$$

- استفاده از ضرایب ایمنی برای افزایش بار و کاهش مقاومت
- مبتنی بر روش های قابلیت اعتماد (Reliability-based)

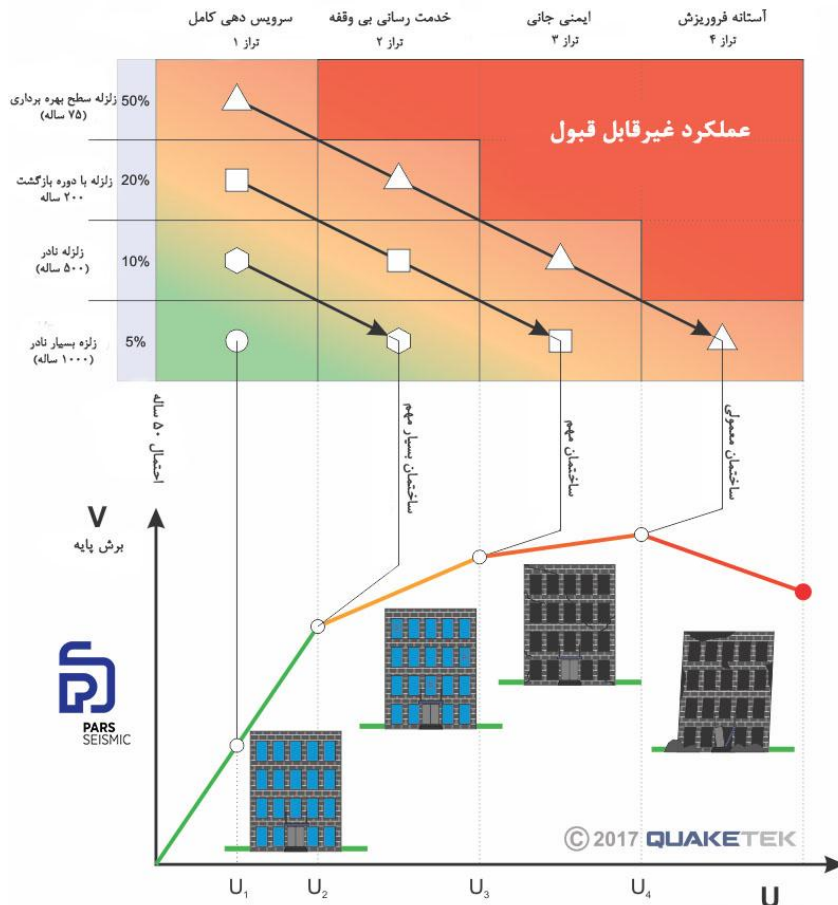


سیر تحول آیین نامه‌های طراحی



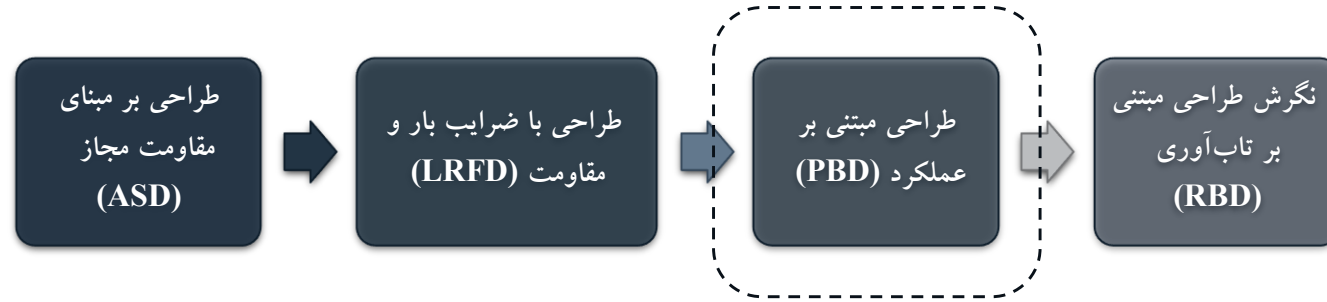
۳. نسل سوم: طراحی بر اساس عملکرد (PBD)

- گذار از طراحی مبتنی بر نیرو به طراحی مبتنی بر جابجایی
- تأکید بر ریسک، پیامدها و ارزیابی عملکرد واقعی سازه
- تعریف یک متغیر تصمیم برای ارزیابی عملکرد (خسارت مالی و جانی)





سیر تحول آیین نامه‌های طراحی



چهار مرحله اصلی تحلیل و طراحی عملکردی:

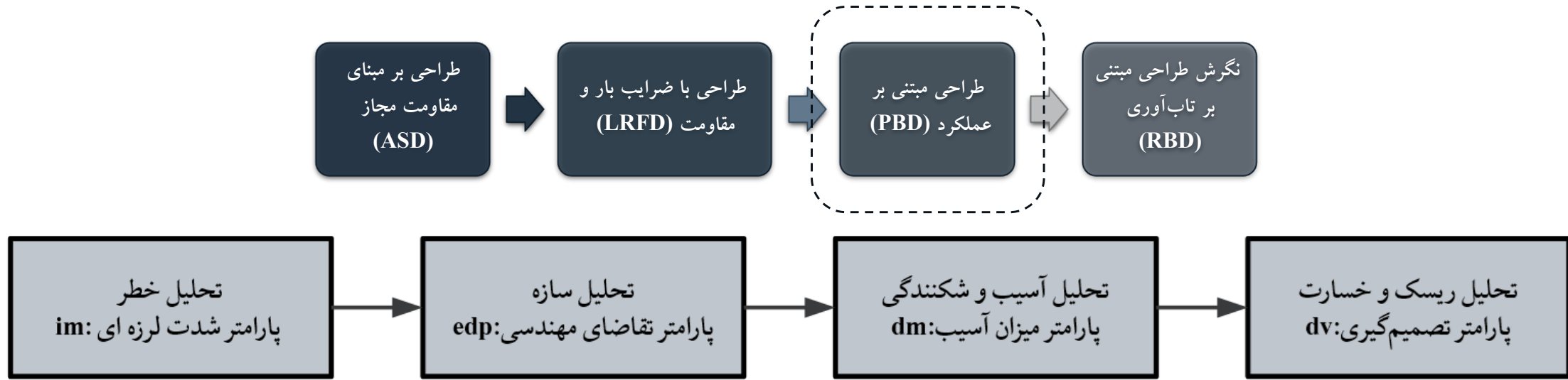
- تحلیل خطر لرزه‌ای
- تحلیل پاسخ سازه
- تحلیل آسیب‌پذیری و شکنندگی
- تحلیل ریسک و پیامدهای ناشی از زلزله

چارچوب ریاضی برای این روش :

مبتنی بر تئوری جمع احتمال کل (رابطه انتگرال سه‌گانه PEER)



سیر تحول آیین نامه‌های طراحی



شکل ۱: چارچوب کلی طراحی بر اساس عملکرد

$$\lambda(dv) = \int_{im} \int_{dm} \int_{edp} G(dv | dm) dG(dm | edp) dG(edp | im) d\lambda(im) \quad \text{رابطه (۱)}$$

im: معرف معیاری از پارامتر شدت زلزله

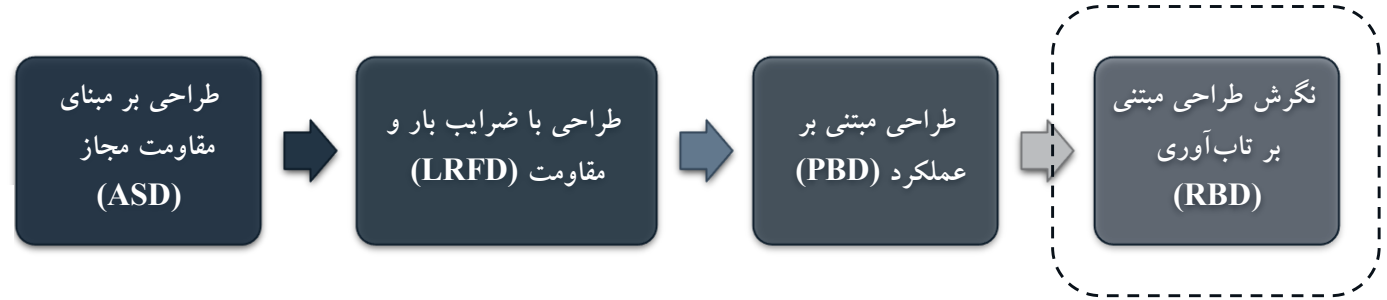
edp: معرف معیاری از پارامتر تقاضای مهندسی

dm: معرف معیاری از سطوح خرابی و میزان آسیب

dv: معرف معیار تصمیم‌گیری هم‌چون خسارت



سیر تحول آیین نامه‌های طراحی

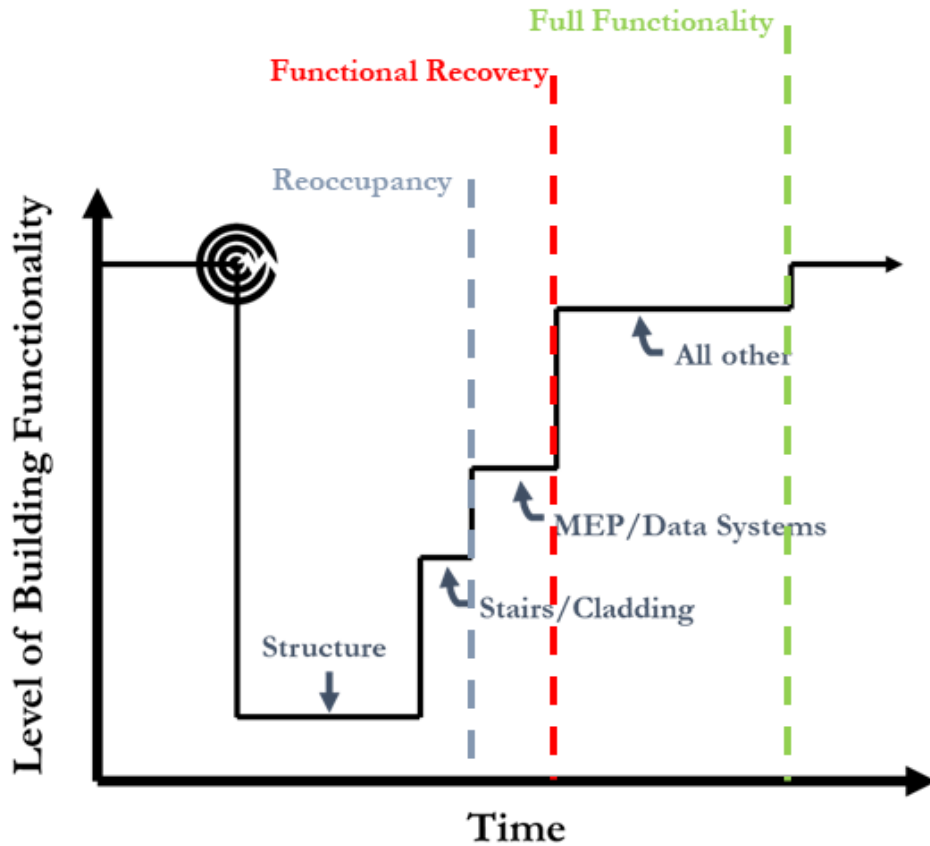


۴. نسل جدید: نگرش طراحی مبتنی بر تاب‌آوری (RBD)

- پاسخ به کاستی‌های طراحی عملکردی
- تمرکز بر فرآیند بازیابی عملکرد سیستم پس از زلزله

طراحی تاب‌آور:

- تأکید بر سرعت و کارآمدی بازیابی عملکرد علاوه بر تامین اهداف عملکردی
- کاهش مدت زمان توقف خدمات پس از بحران



نمودار بازیابی عملکرد

Version 1,
November 201

~1997... 2001 FEMA/ATC Start FEMA P-58

2012 REDI™ Rating System

2013 SP3

2014 USRC Building RA for Earthquake H

2015 NIST Special Publication 1190 Community Resilience Planning Guide for Buildings and Infrastructure Systems

2016 Seismic Performance Assessment of Functional Recovery Time

2018 FEMA P-58-1 / December 2018

2019-2020 Functional Recovery Task Committee Report

2020-2021 Recommended Options for Improving the Built Environment for Post-Earthquake Reoccupancy and Functional Recovery Time

2022 BSSC NEHRP Codification process begins

2022 ASCE 7-28 Minimum Design Loads and Associated Criteria

Nine years of vetting and adoption in SE industry to date

© HB Risk Group

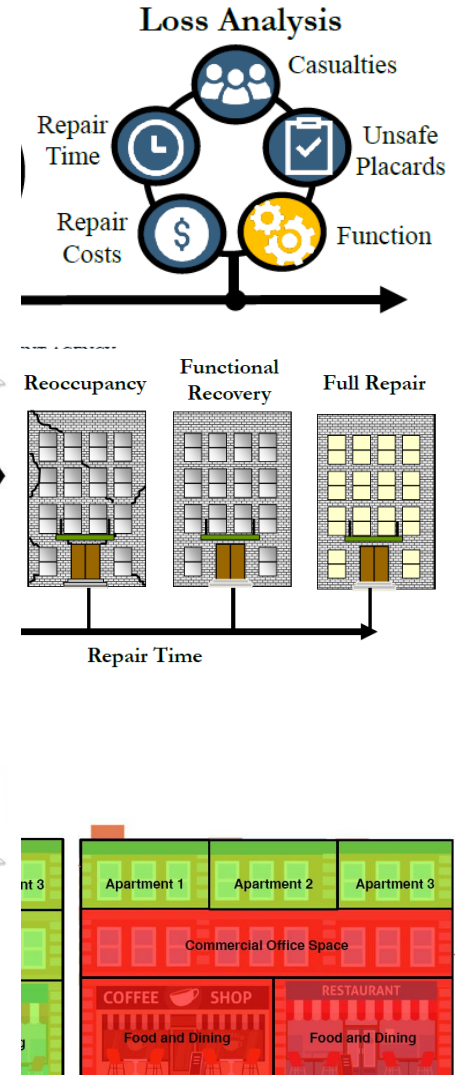
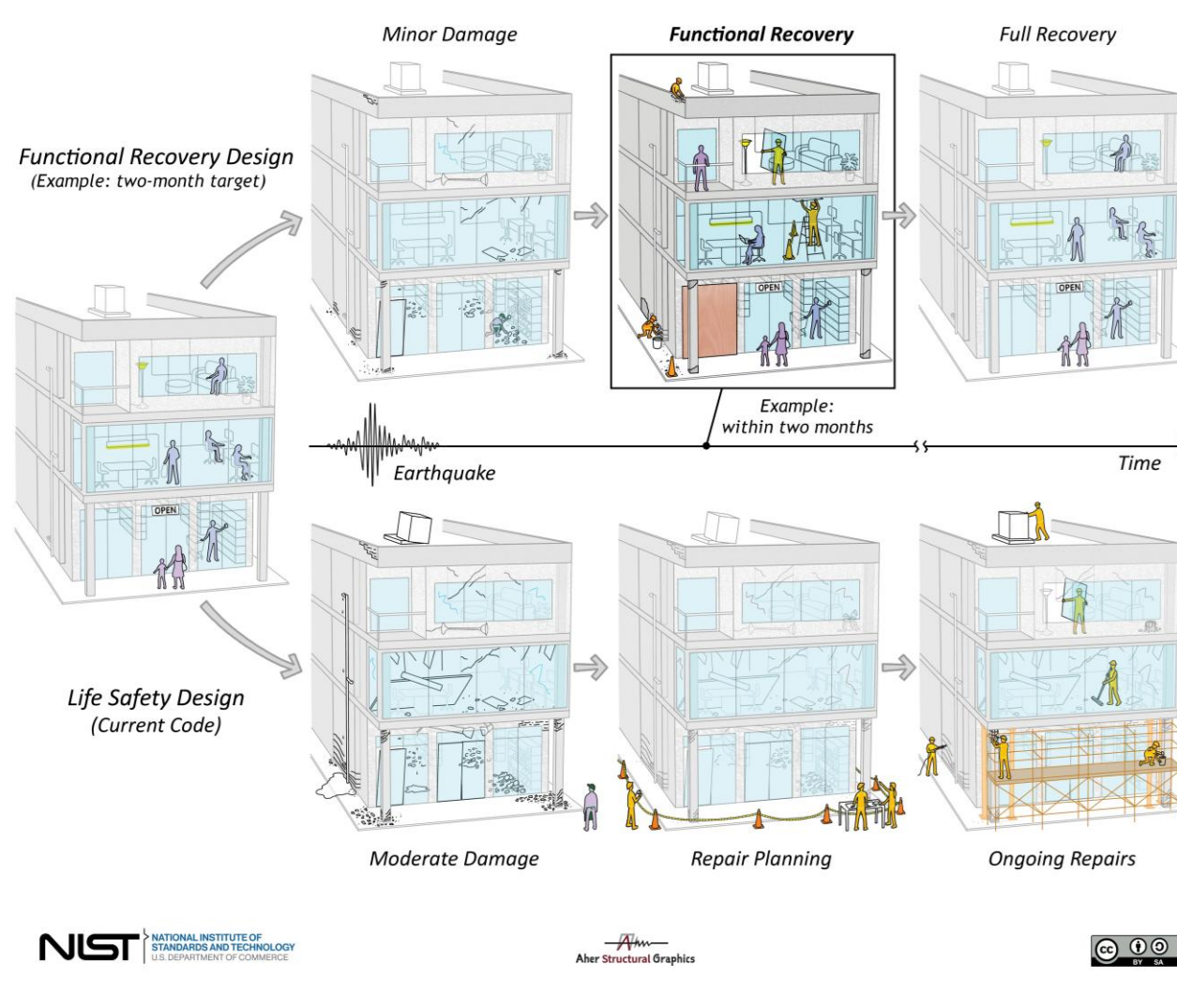
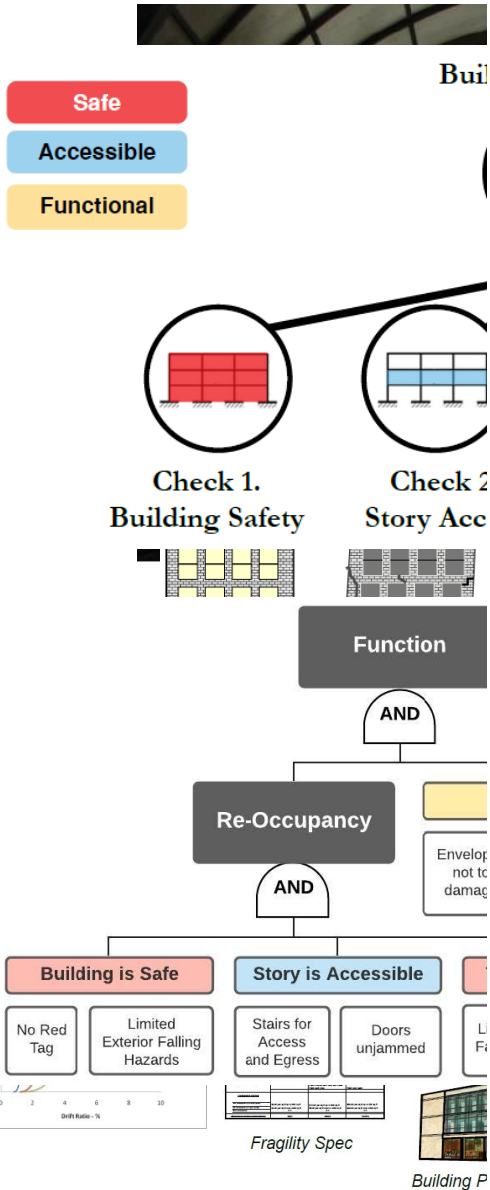
Seismic Force-Resisting System	R_{fr}			
	B	C	D	E
BEARING WALL SYSTEMS				
Special reinforced concrete shear walls	2	2	2	3
Reinforced concrete ductile coupled walls	2	2	2	3
Special reinforced masonry shear walls	2	2	2	3
Light-frame (wood) walls sheathed with wood structural panels rated for shear resistance	1.7	1.7	1.7	2.75

سیر تحول آیین نامه های طراحی



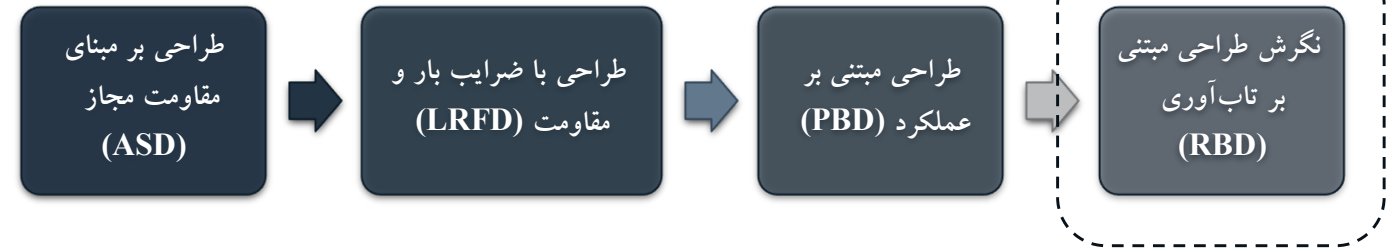
Scenario Illustrating Functional Recovery Performance Compared to Life Safety Design

ATC-138-3 / September 2021





سیر تحول آیین نامه‌های طراحی



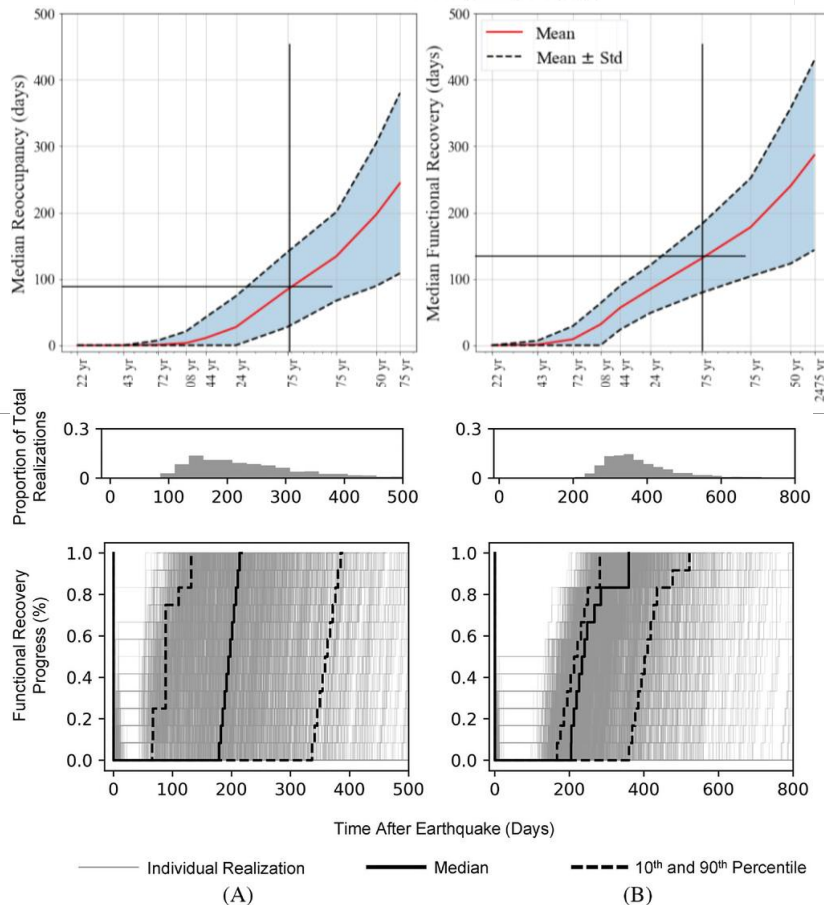
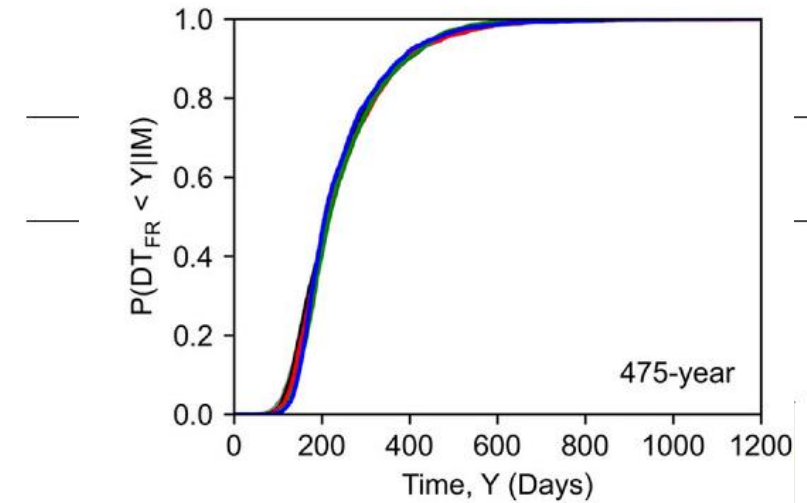
2 FUNCTIONAL RECOVERY OVERVIEW

Table 2.1. Recovery Times from the ATC-138 Functional Recovery (Beta) Methodology

Intensity	Return Period	PGA (g)	Sa(T ₁)*	Median			90 th Percentile		
				Re-Occ.	Func.	Full	Re-Occ.	Func.	Full
90% in 50 years	22 years	0.09	0.07	0d	0d	6d	0d	0d	9d
50% in 30 years	43 years	0.15	0.12	0d	0d	8d	1.3d	8d	3w
50% in 50 years	72 years	0.21	0.17	0d	5d	11d	6d	2.3w	7.4w
50% in 75 years	108 years	0.26	0.23	3d	6d	2.3w	8d	4.8w	2.8m
50% in 100 years	144 years	0.31	0.28	3d	7d	4.1w	13d	1.9m	3.3m
20% in 50 years	224 years	0.37	0.36	5d	11d	7.3w	5.9w	2.9m	4.2m
DE	267 years	0.41	0.40	6d	14d	2.1m	2.5m	3.5m	4.6m
10% in 50 years	475 years	0.51	0.53	11d	6.6w	2.9m	4.1m	4.8m	5.7m
MCE _R	623 years	0.56	0.60	2.4w	2.2m	3.3m	4.8m	5.6m	6.4m
5% in 50 years	975 years	0.66	0.72	2.3m	3.1m	4.1m	5.7m	7.6m	7.9m
2% in 50 years	2475 years	0.86	1.01	4.4m	5.7m	6.3m	19m	19m	19m

* Sa(T₁) is the spectral acceleration at T₁ where is the mean of T₁ in both directions

نمونه گزارش محاسبه مدت زمان بازیابی عملکرد بر اساس متدولوژی ATC-138





تعریف تاب آوری (Resilience)

• توانایی یک سیستم برای بازگشت به خدمت دهی پس از بحران

• تاب آوری رویکردی جامع شامل:

آمادگی پیش از وقوع، پاسخ حین حادثه و بازیابی پس از آن

• تمرکز تاب آوری لرزه ای بر:

❖ تحمل آسیب

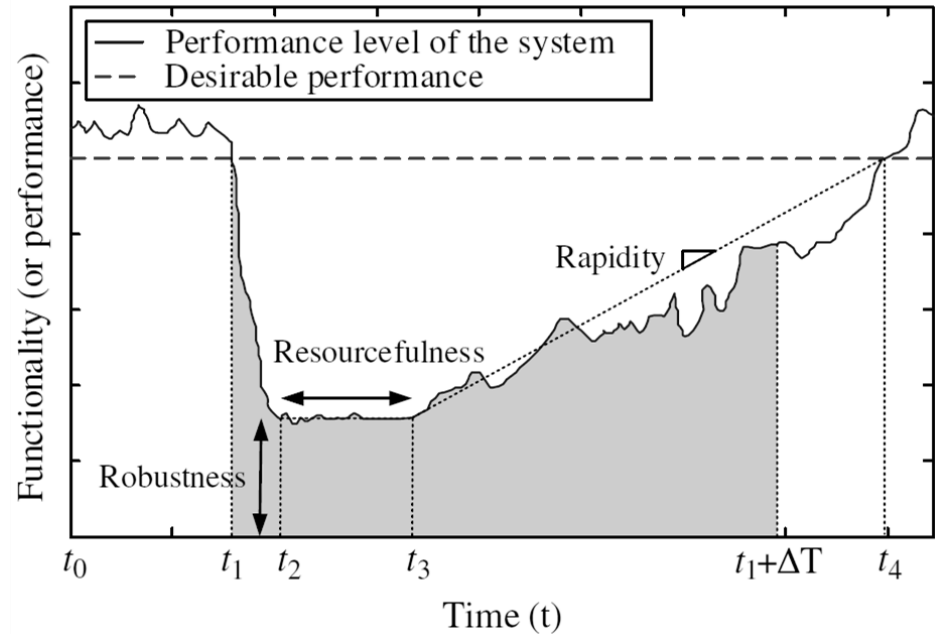
❖ حفظ عملکرد پس از زلزله

❖ بازیابی عملکرد در مدت زمان معین



مولفه‌های تاب‌آوری لرزه‌ای

مطابق با چارچوب مفهومی برونو* و همکاران (۲۰۰۳)،
تاب‌آوری از چهار مؤلفه کلیدی تشکیل می‌شود: (۴R)



منحنی بازیابی عملکرد و مولفه‌های تاب‌آوری

۱. نیرومندی / تنومندی / پایداری / استحکام (Robustness)

حداقل ظرفیت عملکرد باقی مانده بلافاصله پس از وقوع
رویداد؛ توانایی مقاومت اولیه در برابر رویداد بدون فروپاشی
و افت عملکرد کامل

۲. افزونگی (Redundancy)

وجود مسیرها یا اجزای جایگزین در سیستم باربر لرزه‌ای



مولفه‌های تاب‌آوری لرزه‌ای

مطابق با چارچوب مفهومی برونو* و همکاران (۲۰۰۳)،
تاب‌آوری از چهار مؤلفه کلیدی تشکیل می‌شود: (۴R)

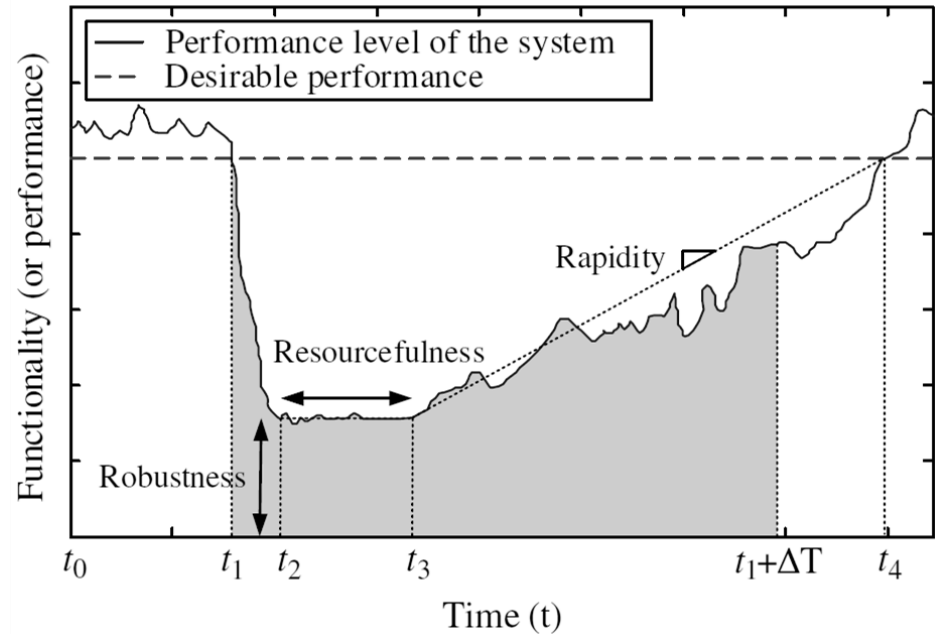
۳. منابع محوری / کاردانی (Resourcefulness)

ظرفیت برنامه‌ریزی و اولویت بندی، واکنش، مدیریت و بسیج
منابع در برابر بحران

۴. سرعت بازیابی / چابکی (Rapidity)

زمان موردنیاز برای بازگرداندن عملکرد سیستم به سطح
قابل قبول؛ شیب منحنی بازیابی عملکرد زمانی

این چهار مؤلفه کلیدی تاب‌آوری تحت عنوان ویژگی‌های ۴R
نیز شناخته می‌شوند و مولفه‌هایی مستقل از هم نیستند.



منحنی بازیابی عملکرد و مولفه‌های تاب‌آوری

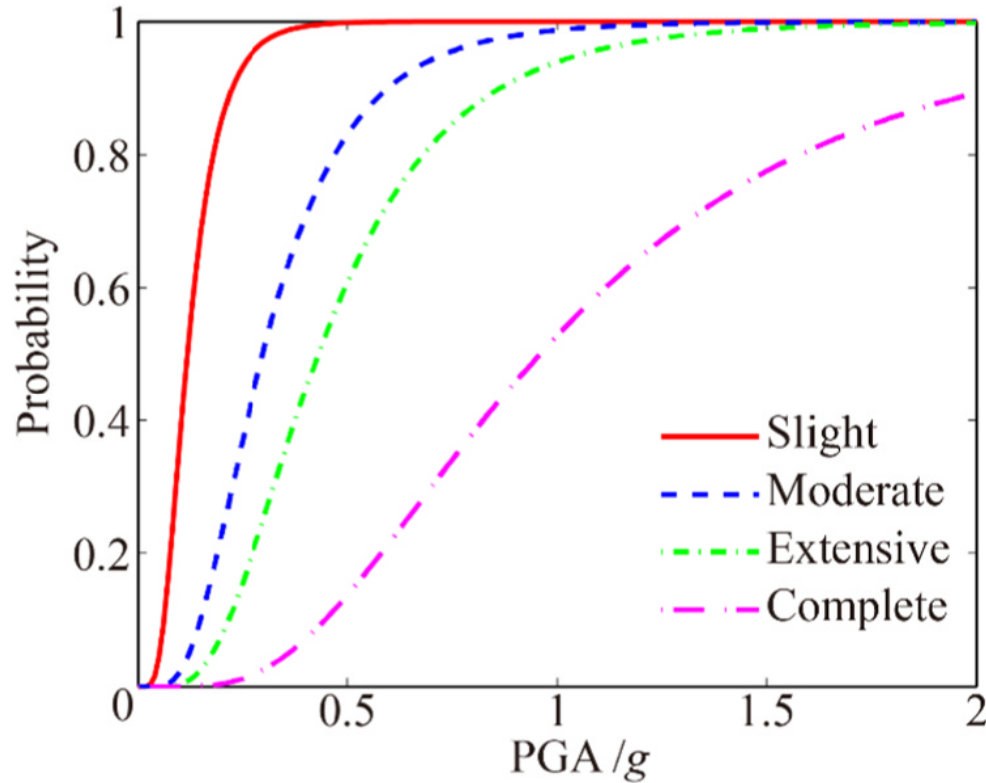


آسیب پذیری و تحلیل شکنندگی

یکی از مباحث پیش نیاز در ارزیابی تاب آوری لرزه‌ای، بررسی آسیب پذیری لرزه‌ای است.

• تحلیل شکنندگی به عنوان روشی کاربردی جهت بررسی آسیب پذیری سازه‌ها به شمار می‌رود؛ که با استفاده از آن می‌توان احتمال فراگذشت پاسخ سازه از یک سطح آسیب مشخص تحت زلزله با شدت معین را محاسبه کرد.

• منحنی‌های شکنندگی که اغلب با توزیع های آماری به داده‌های مشاهده شده برازش می‌شوند، ابزاری مفهومی برای بیان آسیب پذیری هستند.



شکل ۲: منحنی‌های شکنندگی در سطوح آسیب مختلف [۹]



انواع منحنی شکنندگی

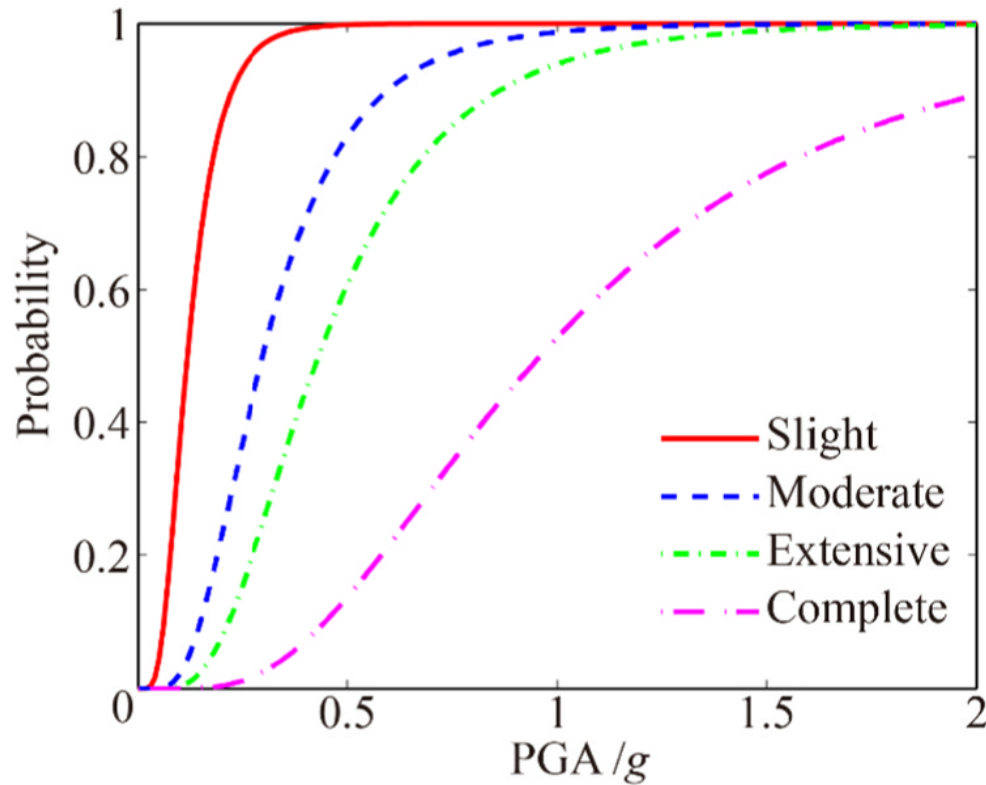
سیملارو* و همکاران (۲۰۰۶)، منحنی‌های شکنندگی را به دو دسته تجربی و تحلیلی تقسیم نمودند.

• منحنی‌های شکنندگی تجربی (Empirical):

بر اساس داده‌های میدانی حاصل از آسیب‌های واقعی ناشی از زلزله‌های گذشته به دست می‌آیند.

• منحنی‌های شکنندگی تحلیلی (Analytical):

از طریق تحلیل پاسخ سازه تحت تحریک‌های لرزه‌ای شبیه‌سازی شده تولید می‌گردند.



شکل ۲: منحنی‌های شکنندگی در سطوح آسیب مختلف [۹]

مدل های ریاضی برای منحنی شکنندگی

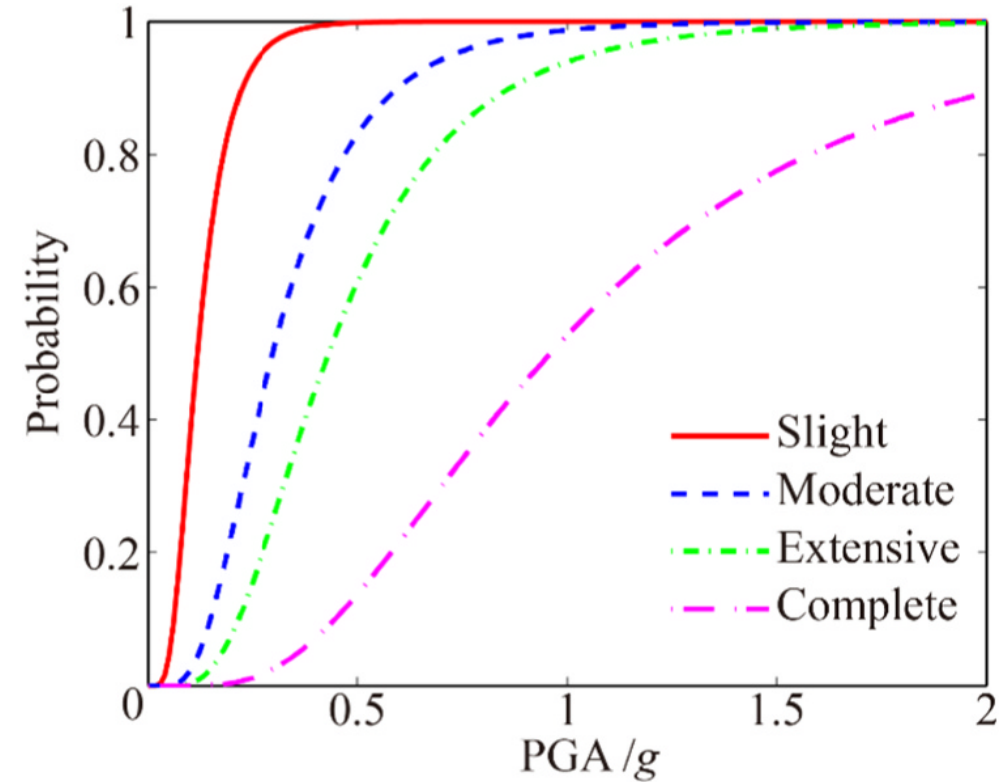
$$p(C|IM) = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{IM}{\theta} \right)}{\beta} \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

$p(C|IM)$: احتمال فروریزش سازه برای
مقدار معین از شاخص شدت IM

Φ : تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد

θ : مقدار میانه شاخص شدت IM

β : انحراف معیار یا میزان پراکندگی
شاخص شدت IM



شکل ۲: منحنی های شکنندگی در سطوح آسیب مختلف [۹]

مدل های ریاضی برای منحنی شکنندگی

$$P_R = \Phi \left(\frac{\ln m_{D|I} - \ln m_C}{\sqrt{\beta_{D|I}^2 + \beta_C^2}} \right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

Φ : تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد

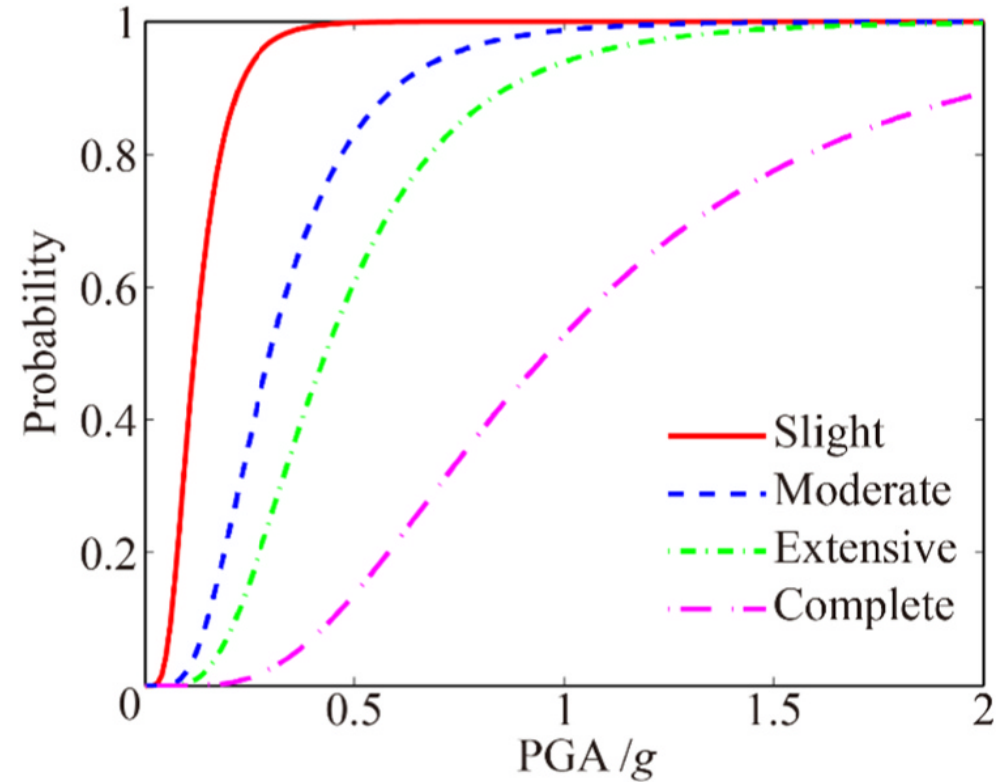
$\beta_{D|I}$: انحراف معیار لگاریتمی تقاضا

β_C : انحراف معیار لگاریتمی ظرفیت

$m_{D|I}$: میانگین لگاریتمی پارامتر تقاضا در

سطح IM مشخص

m_C : میانگین لگاریتمی ظرفیت



شکل ۲: منحنی های شکنندگی در سطوح آسیب مختلف [۹]



انواع سطوح تاب آوری

۱. تاب آوری در سطح اجزا:

- بازیابی اجزا سازه‌ای یا غیرسازه‌ای منفرد مانند تیرها، اتصالات یا تجهیزات

تاب آوری در سطح اجزا

۲. تاب آوری در سطح جامعه:

- شامل ظرفیت‌های اجتماعی، اقتصادی و زیرساختی وسیع‌تر

مانند شریان‌های حیاتی، پاسخ اضطراری و سیاست‌گذاری‌های عمومی

تاب آوری در سطح سیستم‌های سازه‌ای

تاب آوری در سطح جامعه

۳. تاب آوری در سطح سیستم‌های سازه‌ای:

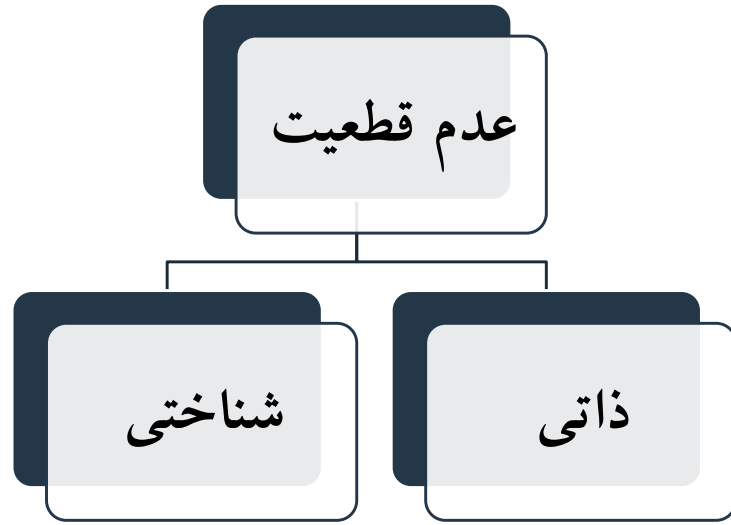
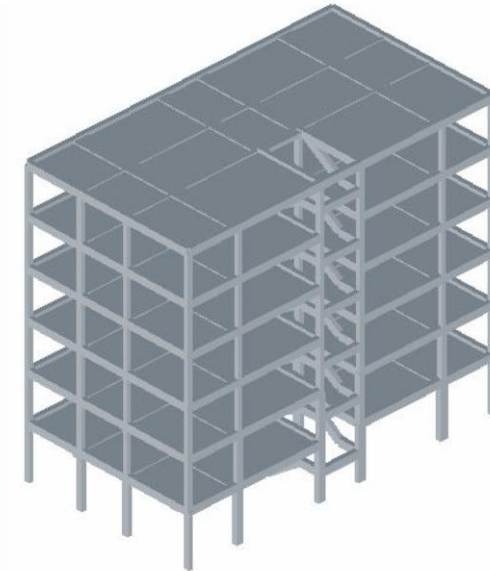
- میان این دو سطح از تاب آوری و تمرکز بر چگونگی پاسخ، آسیب‌پذیری و بازیابی عملکرد مجموعه‌های سازه‌ای یکپارچه نظیر ساختمان‌ها یا پل‌ها پس از زلزله



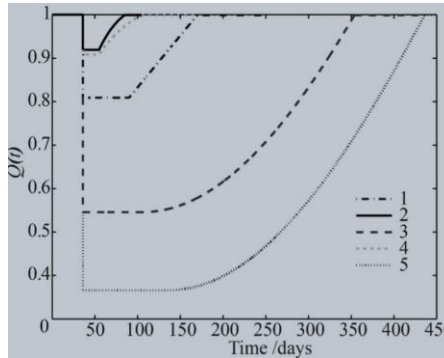
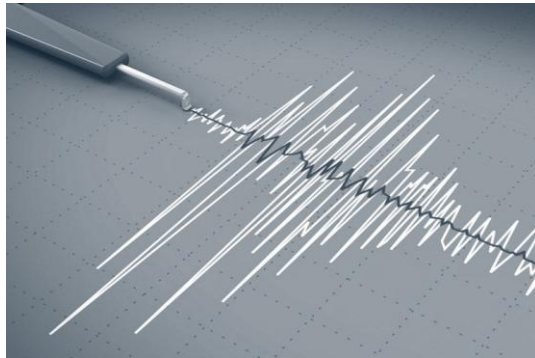
چالش‌ها در ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای

ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای ذاتا فرآیند پیچیده‌ای است:

- متغیرهای غیرقابل پیش‌بینی قابل توجه
- عوامل ناشناخته
- عدم قطعیت‌های ذاتی و شناختی*



ماهیت تصادفی مخاطرات لرزه‌ای (نظیر شدت و فرکانس حرکات زمین)
عدم قطعیت در مصالح و پیکربندی سازه
ساده‌سازی‌های در مدل‌سازی آسیب و بازیابی



* Aleatory & Epistemic



مروری بر برخی استانداردهای ارزیابی عملکرد و تاب‌آوری لرزه‌ای

ابزار مرتبط محدودیت‌ها / چالش‌ها ویژگی‌های کلیدی خروجی ارزیابی نام روش یا استاندارد سال / کشور



Hazus Earthquake Model Technical Manual

Hazus 6.1

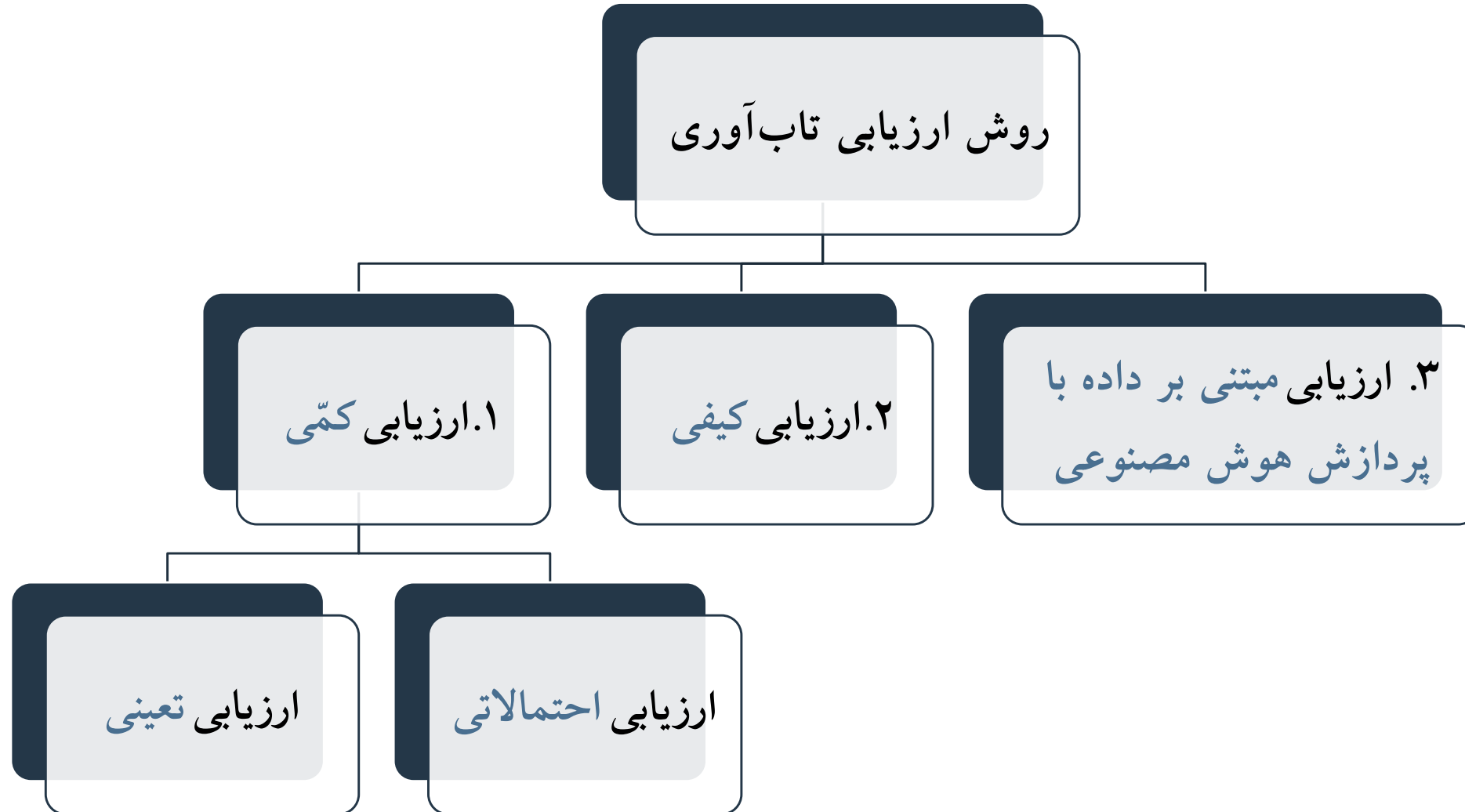
July 2024



PACT	نیازمند مدل‌سازی دقیق، تحلیل غیرخطی و مونت‌کارلو؛ تمرکز بر پیامدهای بلافاصله پس از زلزله؛ نادیده گرفتن عوامل اجتماعی-اقتصادی و دوره بازیابی عملکرد؛ نیاز به داده‌های دقیق شکنندگی اجزا	تحلیل جز به جز اجزا، برآورد احتمالاتی خسارات، لحاظ عدم قطعیت‌های آماری، برچسب‌گذاری ایمنی	هزینه تعمیر، زمان بازیابی، خسارت لرزه‌ای
REDi	—	سیستم رتبه‌بندی و راهبرد جامع بازیابی؛ لحاظ تاخیرات ناشی از بازرسی، طراحی، سازماندهی و اجرا	زمان بازیابی با لحاظ اثرات تاخیرات زمانی
—	—	مدل رتبه‌بندی با پنج ستاره	تاب‌آوری کلی و رتبه بندی ساختمان
—	—	رتبه‌بندی سه ستاره‌ای؛ پایین‌ترین رتبه به عنوان درجه نهایی تاب‌آوری	هزینه تعمیر، زمان بازیابی، خسارت لرزه‌ای
HAZUS	—	برآوردی از پیامدهای یک سناریوی زلزله یا یک رخداد لرزه‌ای احتمالاتی در مقیاس شهری و منطقه‌ای	خسارت لرزه‌ای، هزینه تعمیر تلفات انسانی، زمان بازیابی عملکرد

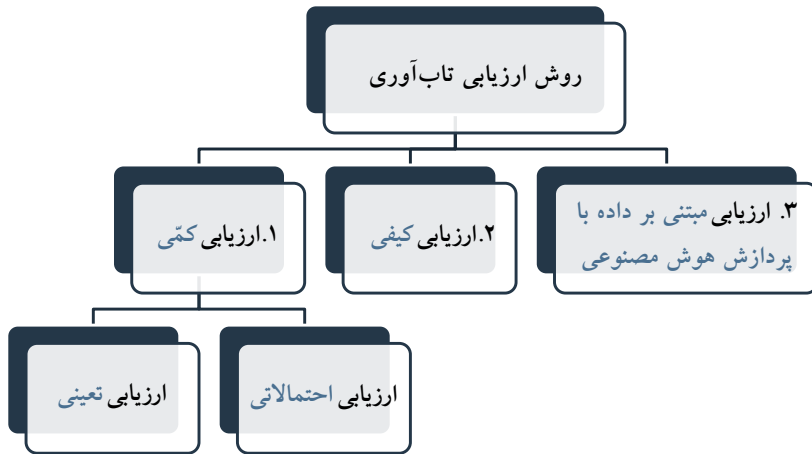


انواع روش های کلی ارزیابی تاب آوری





انواع روش های کلی ارزیابی تاب آوری



۱. روش های ارزیابی کمی :

۱.۱ روش ارزیابی تعینی

- فرم صریح و مشخص از تابع عملکرد زمانی

۲.۱ روش ارزیابی احتمالاتی

- افت عملکرد و بازیابی سیستم در قالب سناریوهای مبتنی بر احتمالات و تحلیل شکنندگی

۲. روش های ارزیابی کیفی :

- کاربرد به صورت مستقل و یا در ترکیب با رویکردهای کمی

- ارزیابی تاب آوری سیستم های پیچیده و شهری (عوامل چندگانه)



انواع روش های کلی ارزیابی تاب آوری

۳. روش های پیشرفته مبتنی بر داده با پردازش هوش مصنوعی:

• روش های پایش سلامت سازه پیشرفته و در لحظه

(اینترنت اشیا + مدل مجازی = مدل دوقلوی دیجیتال)

• مدلسازی های تحلیلی پیشرفته و سریع (مدل های جایگزین)

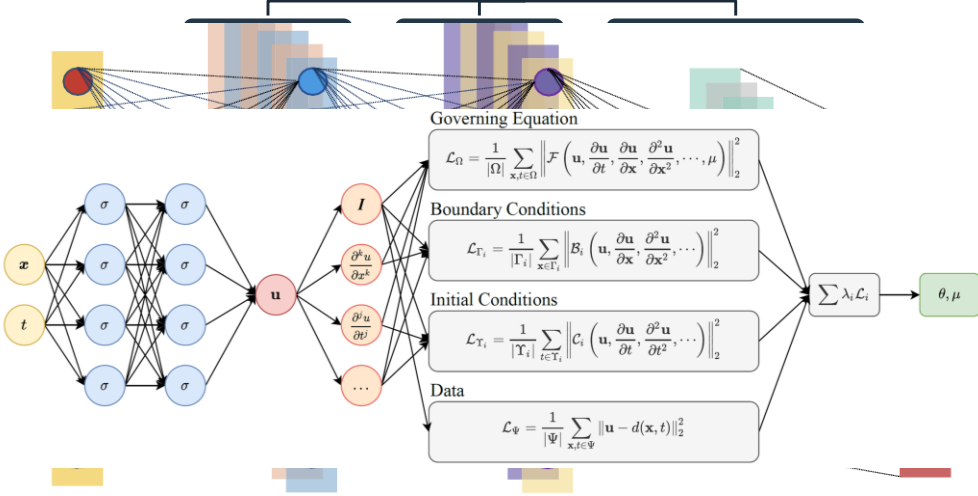
• الگوریتم های محاسباتی و بهینه سازی با قابلیت پردازش داده

توسط ابزار هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

• روش های تجربی و آزمایشگاهی

تلفیق:

روش ارزیابی تاب آوری



■ الگوریتم شبکه های عصبی پیچشی (CNNs)

■ الگوریتم تقویت شدید گرادیان (XGBoost)

■ شبکه های عصبی مطلع از قوانین فیزیکی (PINNs)

Virtual Model

Internet of Things (IoT)

Digital Twin (DT)

Surrogate Model

Convolutional Neural Networks

Extreme Gradient Boosting

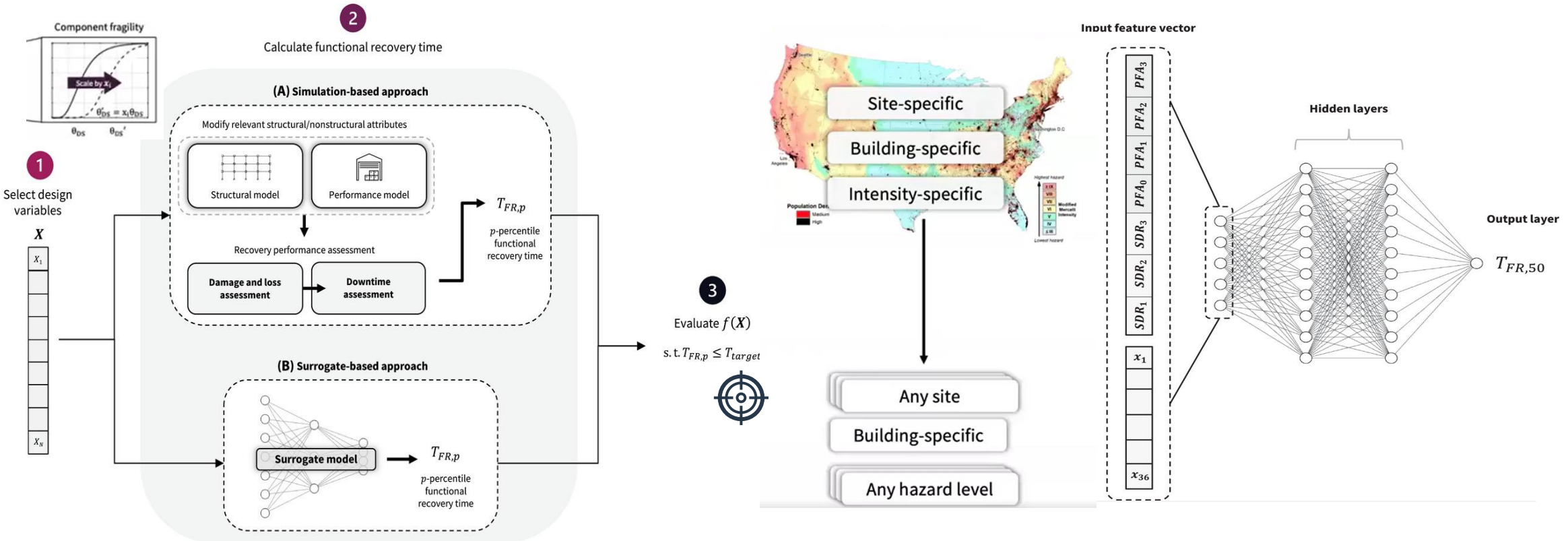
Physics-informed Neural Networks

این روش امکان تحلیل چندبعدی و جامع تری از رفتار سازه ها در برابر زلزله را در مدت زمان کوتاه تر با هزینه محاسباتی کمتر فراهم می سازد.

انواع روش های کلی ارزیابی تاب آوری

۳. روش های پیشرفته مبتنی بر داده با پردازش هوش مصنوعی:

□ کاربرد روش مدل جایگزین در کمینه سازی زمان بازگشت و دستیابی به زمان بازگشت مورد هدف



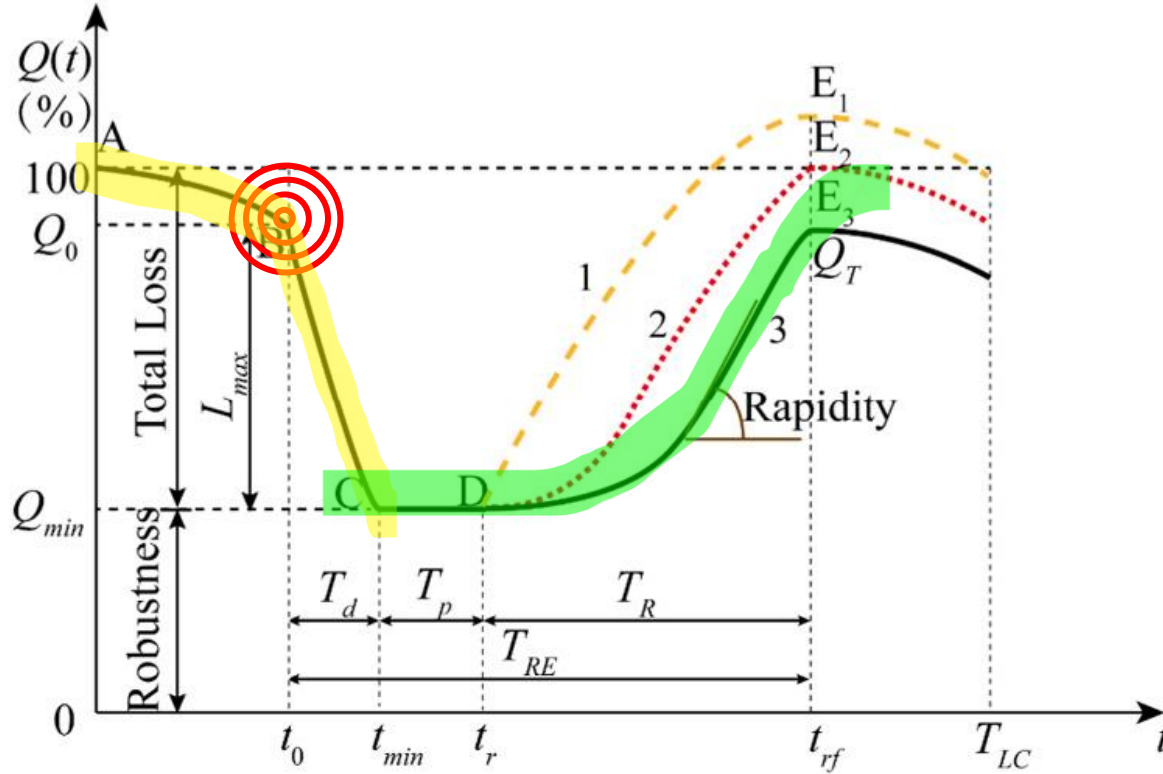
کاربرد مدل جایگزین در طراحی مبتنی بر تاب آوری و بازگشت پذیری عملکرد

فرایند ارزیابی تاب‌آوری به روش کمی

نمودار عملکرد زمانی * شامل دو فاز کلی:

۱. فاز افت عملکرد (بخش ABC): پیش و حین وقوع

۲. فاز بازیابی عملکرد (بخش CDE): پس از وقوع



شکل ۴: نمودار عملکرد زمانی [۹]

t_{min} : زمان رسیدن عملکرد به مقدار ظرفیت حداقل

t_r : زمان آغاز بازیابی

t_{rf} : زمان پایان فرایند بازیابی

T_d : بازه زمانی افت عملکرد پس از وقوع رویداد

T_p : مدت زمان آمادگی برای بازیابی

T_R : مدت زمان فرایند بازیابی تا رسیدن به سطح عملکرد نهایی

T_{RE} : مجموع سه بازه زمانی افت عملکرد، آمادگی برای بازیابی و بازیابی

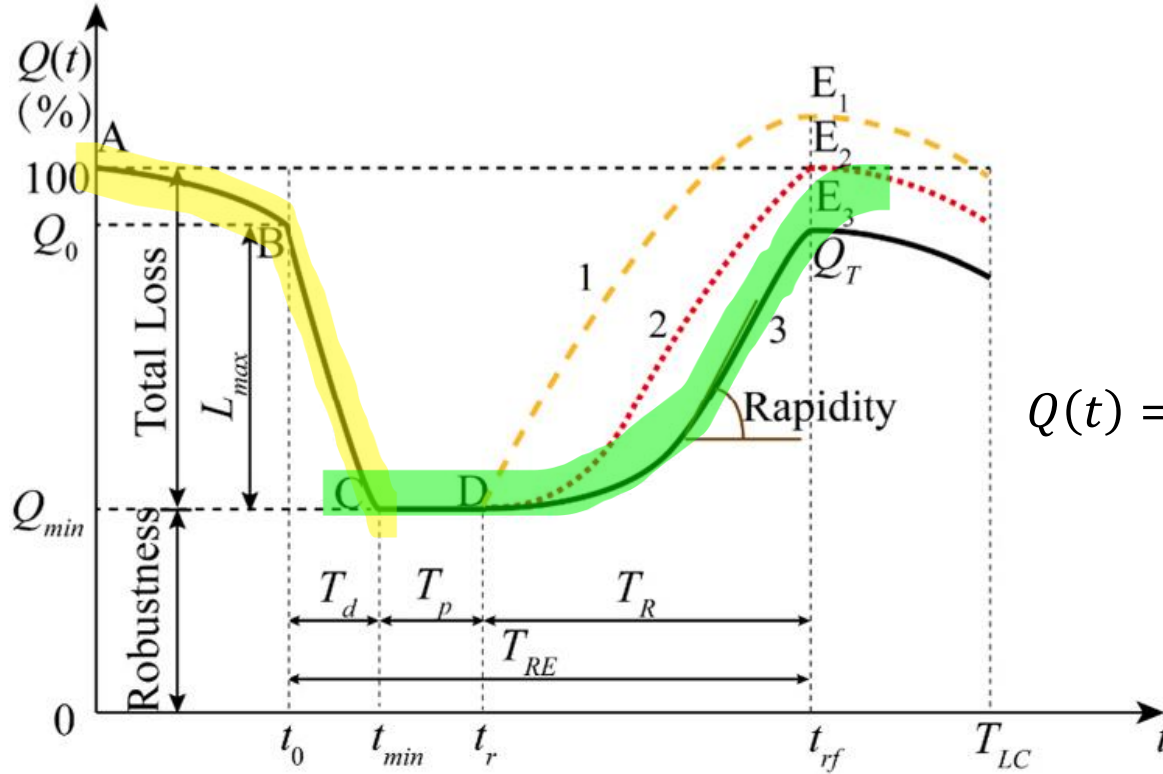
L_{max} : بیشینه افت عملکرد ناشی از وقوع رویداد (بیانگر خسارت کل)

فرایند ارزیابی تاب آوری به روش کمی

نمودار عملکرد زمانی * شامل دو فاز کلی:

۱. فاز افت عملکرد (بخش ABC): پیش و حین وقوع

۲. فاز بازیابی عملکرد (بخش CDE): پس از وقوع



$$Q(t) = H(t_{\min} - t)Q_d(t) + H(t - t_{\min})Q_r(t) \quad \text{رابطه (۴)}$$

$Q_d(t)$: تابع کاهش عملکرد در فاز افت عملکرد

$Q_r(t)$: تابع بازیابی عملکرد در فاز بازیابی

$H(.)$: تابع پله‌ای هویساید

شکل ۴: نمودار عملکرد زمانی [۹]

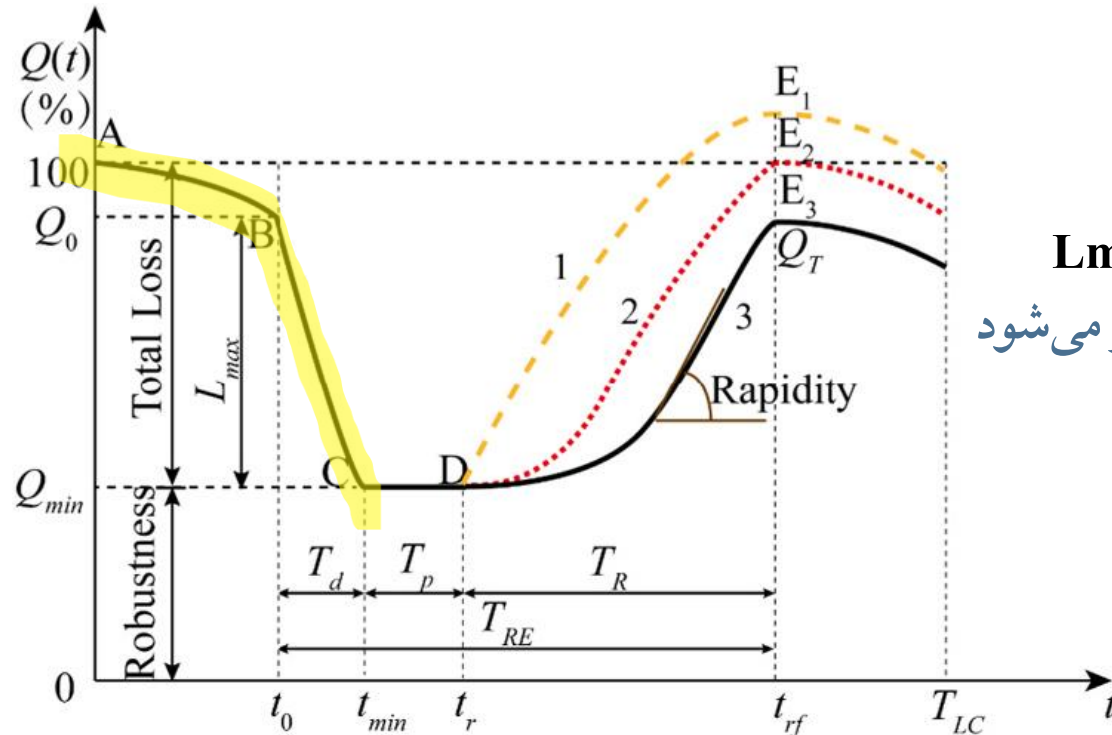
$$H(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۵)}$$

فرایند ارزیابی تاب‌آوری به روش کمی

نمودار عملکرد زمانی شامل دو فاز کلی:

- عملکرد سیستم پیش از وقوع رویداد (بخش AB)
- افت تدریجی به واسطه عوامل محیطی: خوردگی، فرسایش
- عملکرد سیستم حین وقوع رویداد (بخش BC)
- حداقل ظرفیت باقی مانده عملکرد بلافاصله پس از وقوع رویداد (نیرومندی C)

۱. فاز افت عملکرد (بخش ABC)



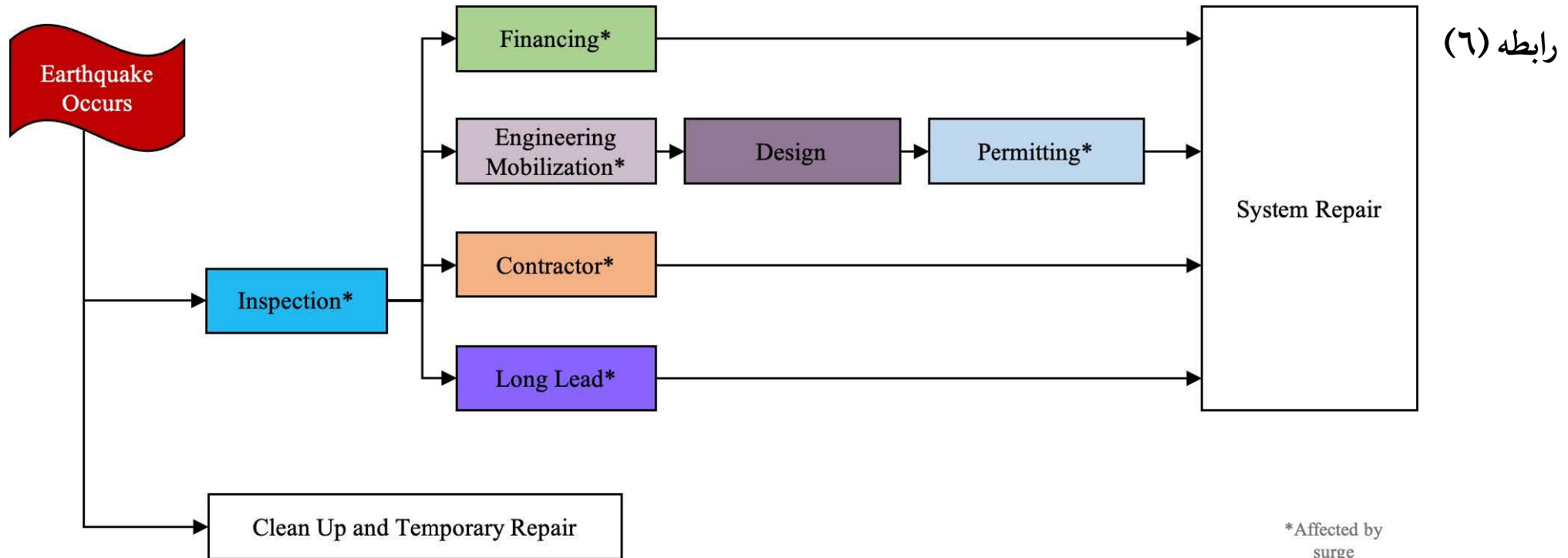
- مدل کاهش عملکرد $Q_d(t)$ تابعی از Q_0 ، T_d و L_{max}
- در حالت ساده سازی شده عموماً از $Q_d(t)$ صرف نظر می‌شود

شکل ۴: نمودار عملکرد زمانی [۹]

فرایند ارزیابی تاب‌آوری به روش کمی

نمودار عملکرد زمانی شامل دو فاز کلی:

- ۲. فاز ارزیابی عملکرد (بخش CDE)
- مرحله کسب آمادگی جهت شروع فرایند ارزیابی (بخش CD)
- مرحله فرایند ارزیابی عملکرد (بخش DE)

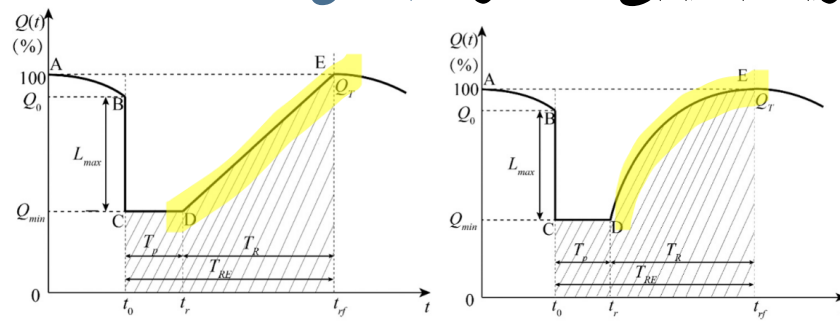




فرایند ارزیابی تاب آوری به روش کمی

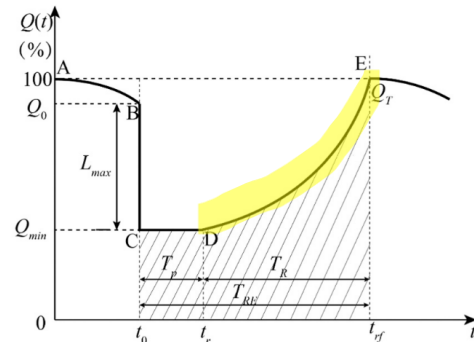
نمودار عملکرد زمانی شامل دو فاز کلی:

- ۲. فاز بازیابی عملکرد (بخش CDE)
- مرحله کسب آمادگی جهت شروع فرایند بازیابی (بخش CD)
- مرحله فرایند بازیابی عملکرد (بخش DE)



(a) Linear model

(b) Negative-exponential model



(c) Trigonometric model

$$Q_r(t) = \begin{cases} Q_0 - L_{\max} & t_{\min} < t \leq t_r \\ f(L_T, Q_T) & t_r < t \leq t_{rf} \end{cases} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$Q_r(t) = \begin{cases} Q_0 - L_{\max} & t_0 < t \leq t_r \\ a_1 + \frac{b_1(t - t_r)}{T_R} & t_r < t \leq t_{rf} \end{cases} \quad \text{رابطه (۷)}$$

تابع خطی

$$Q_r(t) = \begin{cases} Q_0 - L_{\max} & t_0 < t \leq t_r \\ a_2 - b_2(e^{-(t-t_r)/T_R} - 1) & t_r < t \leq t_{rf} \end{cases} \quad \text{تابع نمایی}$$

$$Q_r(t) = \begin{cases} Q_0 - L_{\max} & t_0 < t \leq t_r \\ a_3 - \cos\left[\frac{\pi b_3(t - t_r)}{T_R}\right] & t_r < t \leq t_{rf} \end{cases} \quad \text{تابع مثلثاتی}$$

شکل ۵: مدل‌های عملکردی ساده سازی شده [۹]



فرایند ارزیابی تاب‌آوری به روش کمی

شاخص تاب‌آوری لرزه‌ای:

• سطح زیر نمودار عملکرد در یک بازه زمانی مشخص

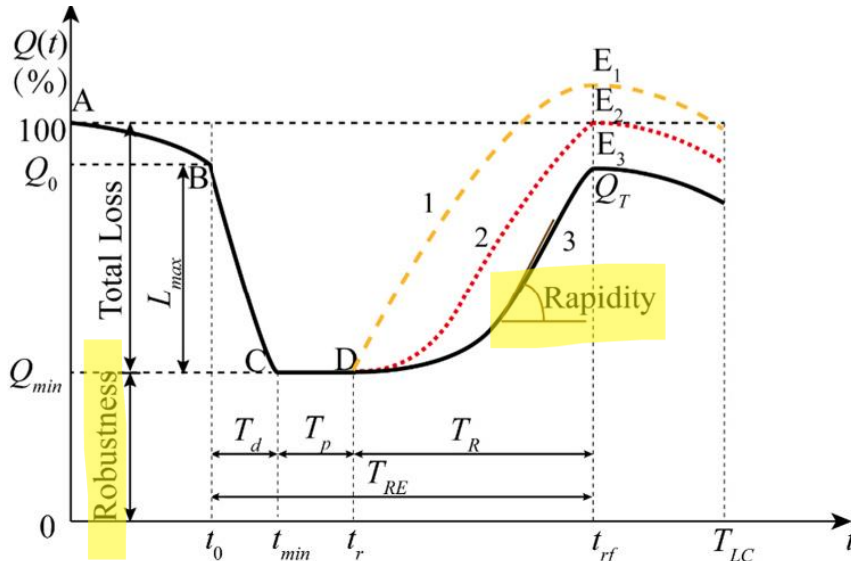
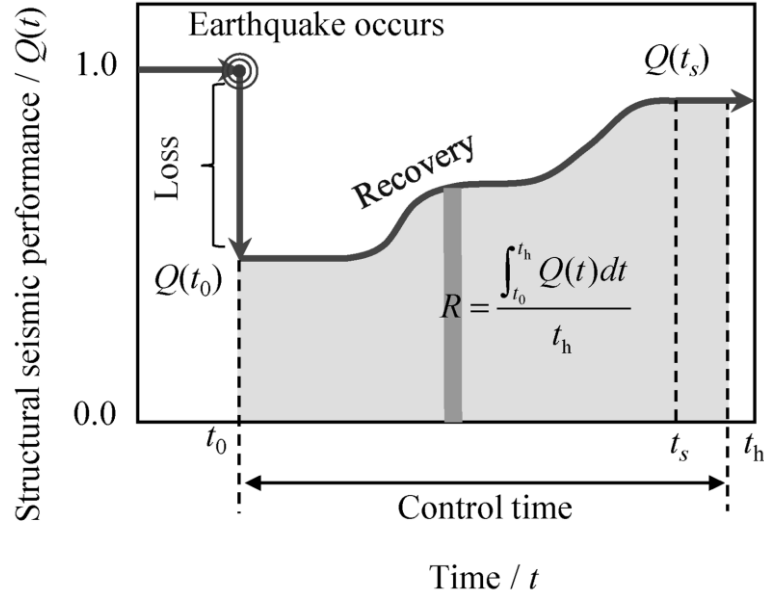
$$R = \int_{t_0}^{t_0+T_{LC}} \frac{Q(t)}{T_{LC}} dt \quad \text{رابطه (۸)}$$

• سیملار و همکاران، کمی‌سازی مولفه‌های نیرومندی و سرعت بازیابی را مطابق روابط (۹) و (۱۰) تعریف کرده‌اند:

شاخص نیرومندی تاب‌آوری

$$R_1 = 1 - \tilde{L}(\mu_L, \lambda\sigma_L) \quad \text{رابطه (۹)}$$

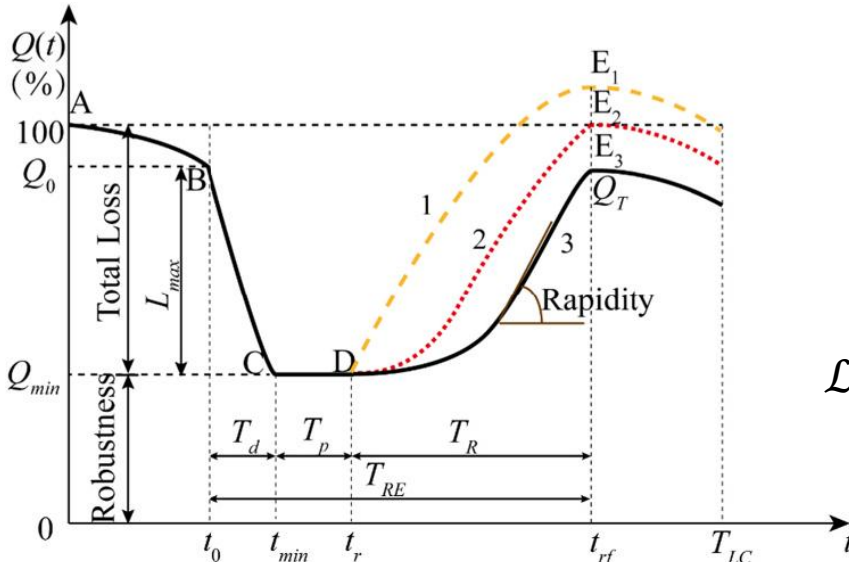
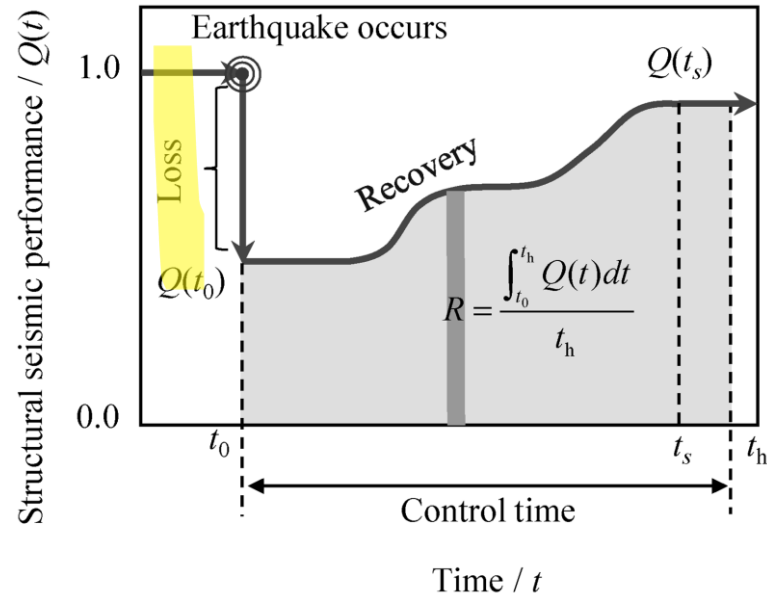
$$R_2 = \frac{d}{dt} Q(t) \quad \text{رابطه (۱۰) سرعت بازیابی}$$



شکل ۴: نمودار عملکرد زمانی [۹]



فرایند ارزیابی تاب‌آوری به روش کمی



شکل ۴: نمودار عملکرد زمانی [۹]

L خسارت لرزه ای لرزه‌ای:

L_E • خسارت اقتصادی

L_C • خسارت اجتماعی

L_{En} • خسارت محیط زیستی

• و ...

خسارت لرزه ای کل

$$L = \alpha_E L_E + \alpha_C L_C + \alpha_{En} L_{En} + \dots$$

رابطه (۱۱)

توابع خسارت اقتصادی:

$$\mathcal{L}_{DE}(J) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{C_{1,i}}{C_2} \prod_{j=1}^{t_i} \frac{1 + \beta_j}{1 + \tilde{d}_j} \right) P_i \left(\bigcup_{j=1}^m \mathbb{R}_j \geq r_{l,j} | J \right) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\mathcal{L}_{DE} = C_d = \sum_{i=1}^d C_i P(DS_i) \quad \text{رابطه (۱۳)}$$



فرایند ارزیابی تاب آوری به روش کمی

خسارت اقتصادی L_E

$$\text{رابطه (۱۳)} \quad \mathcal{L}_{DE} = C_d = \sum_{i=1}^d C_i P(DS_i)$$

i : نشان دهنده سطح خرابی ساختمان (جزئی، متوسط، گسترده و کامل)

d : تعداد حالت های خرابی

C_i : نسبت کل خسارت اقتصادی مربوط به وضعیت خرابی i ام

(نسبت هزینه تعمیر به جایگزینی در هر سطح خرابی)

$P(DS_i)$: احتمال وقوع یک وضعیت خرابی مشخص

$$P(DS_i) = \begin{cases} 1 - P_R(DS_1) & i = 0 \\ \frac{P_R(DS_i) - P_R(DS_{i+1})}{P_R(DS_i)} & 1 \leq i < d \\ P_R(DS_i) & i = d \end{cases}$$

پارامتر شدت لرزه ای

Table 5-1 Specific Building Types

#	Label	Description	Height			
			Range		Typical	
			Name	Stories	Stories	Feet
1	W1	Wood, Light Frame ($\leq 5,000$ sq. ft.)		1 - 2	1	14
2	W2	Wood, Commercial & Industrial ($> 5,000$ sq. ft.)		All	2	24
3	S1L	Steel Moment Frame	Low-Rise	1 - 3	2	24
4	S1M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
5	S1H		High-Rise	8+	13	156
6	S2L	Steel Braced Frame	Low-Rise	1 - 3	2	24
7	S2M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
8	S2H		High-Rise	8+	13	156
9	S3	Steel Light Frame		All	1	15
10	S4L	Steel Frame with Cast-in-Place Concrete Shear Walls	Low-Rise	1 - 3	2	24
11	S4M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
12	S4H		High-Rise	8+	13	156
13	S5L	Steel Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1 - 3	2	24
14	S5M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
15	S5H		High-Rise	8+	13	156
16	C1L	Concrete Moment Frame	Low-Rise	1 - 3	2	20

Table 11-2 Structural Repair Cost Ratios (in % of building replacement cost)

No.	Label	Occupancy Class	Structural Damage State			
			Slight	Moderate	Extensive	Complete
1	RES1	Single-family Dwelling	0.5	2.3	11.7	23.4
2	RES2	Mobile Home	0.4	2.4	7.3	24.4
3-8	RES3A-F	Multi-family Dwelling	0.3	1.4	6.9	13.8
9	RES4	Temporary Lodging	0.2	1.4	6.8	13.6
10	RES5	Institutional Dormitory	0.4	1.9	9.4	18.8
11	RES6	Nursing Home	0.4	1.8	9.2	18.4
12	COM1	Retail Trade	0.6	2.9	14.7	29.4
13	COM2	Wholesale Trade	0.6	3.2	16.2	32.4
14	COM3	Personal and Repair Services	0.3	1.6	8.1	16.2
15	COM4	Professional /Technical/	0.4	1.9	9.6	19.2



مروری بر پیشینه تحقیق

۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۱۰	۲۰۲۰
برونو	برونو و رینهورن	سیملارو و همکاران	سیملارو و همکاران	رنجبر و نادرپور
مفهوم تاب‌آوری لرزه‌ای نخستین بار توسط برونو و همکاران (۲۰۰۳) مطرح شد.	برونو و رینهورن (۲۰۰۴) این مفهوم را توسعه دادند و از آن برای ارزیابی تاب‌آوری مراکز درمانی حیاتی استفاده کردند.	سیملارو و همکاران (۲۰۰۵) چارچوبی برای ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای بیمارستان‌ها ارائه دادند. این چارچوب، عوامل کلیدی نظیر تابع خسارت شامل خسارت‌های مستقیم و غیرمستقیم و منحنی‌های شکنندگی به منظور برآورد آسیب‌های سازه‌ای را لحاظ می‌کرد.	سیملارو و همکاران (۲۰۱۰) این چارچوب را توسعه دادند و عدم قطعیت‌هایی از جمله میزان خسارت، زمان بازیابی، پارامترهای شدت زمین‌لرزه و پاسخ سازه‌ای را نیز در نظر گرفتند. نتایج حاکی از آن بود که راهبرد بازیابی کامل، علی‌رغم هزینه اقتصادی بالا، بیشترین میزان تاب‌آوری و عملکرد مطلوب را فراهم می‌سازد.	رنجبر و نادرپور (۲۰۲۰) تاب‌آوری لرزه‌ای یک ساختمان حیاتی از نوع بیمارستان را با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی و استخراج منحنی‌های آسیب‌پذیری مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که منحنی‌های آسیب‌پذیری می‌توانند ابزار مؤثری برای برآورد شاخص تاب‌آوری لرزه‌ای باشند و دقت قابل قبولی در تحلیل عملکرد سازه‌های حیاتی تحت زلزله ارائه دهند.
Bruneau	Bruneau and Reinhorn	Cimellaro	Cimellaro	



مروری بر پیشینه تحقیق

۲۰۲۰

گونزالس و همکاران

گونزالس و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای تاب‌آوری مدارس در کشور مکزیک را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که ساختمان‌های یک‌طبقه تاب‌آوری بیشتری نسبت به ساختمان‌های دوطبقه دارند؛ چرا که در مدارس با ارتفاع بیشتر، خسارات سازه‌ای و غیرسازه‌ای و در نتیجه تلفات جانی بیشتر است.

González

۲۰۲۰

شیونگ و همکاران

شیونگ و همکاران (۲۰۲۰) روشی برای ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شهر پکن پیشنهاد دادند. در این مطالعه از تحلیل دینامیکی غیرخطی و روش FEMA-P58 برای تولید منحنی‌های شکنندگی و بررسی عملکرد باقی‌مانده ساختمان‌ها پس از وقوع زمین‌لرزه استفاده شد.

Xiong

۲۰۲۰

مطلق و همکاران

مطلق و همکاران (۲۰۲۰) تاب‌آوری لرزه‌ای مدارس بتن‌آرمه را با در نظر گرفتن تاثیر خوردگی کربناته مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که خوردگی موجب کاهش چشمگیر تاب‌آوری سازه می‌شود.

۲۰۱۹

صمدیان و همکاران

صمدیان و همکاران (۲۰۱۹) تاب‌آوری لرزه‌ای یک مدرسه بتن‌آرمه را با استفاده از منحنی‌های آسیب‌پذیری بررسی کردند و به این نتیجه دست یافتند که ارزیابی عملکرد بر پایه منحنی‌های آسیب‌پذیری نسبت به منحنی‌های شکنندگی، نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

۲۰۱۷

برتون و همکاران

برتون و همکاران (۲۰۱۷) چارچوبی برای ارزیابی تاب‌آوری ساختمان‌های منطقه‌ای پیشنهاد دادند. این پژوهش، راهبردهای تعمیر برای هر یک از حالت‌های حدی سازه شامل فروریزش، تخریب کامل، آسیب غیرقابل تعمیر و از دست رفتن عملکرد را تعریف کرد و از تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی غیرخطی برای ارزیابی آسیب‌ها و استخراج منحنی‌های شکنندگی استفاده شد.

Burton



مروری بر پیشینه تحقیق

۲۰۲۳

ایسا و همکاران

ایسا و همکاران (۲۰۲۳) یک چارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری ماشین برای پشتیبانی از طراحی بر اساس بازیابی عملکرد ارائه کردند. آن‌ها با هدف کاهش هزینه‌های محاسباتی شبیه‌سازی زمان توقف و امکان بررسی فضای طراحی گسترده‌تر، از مدل‌های جایگزین برای برآورد سریع عملکرد بازیابی استفاده نمودند.

در مطالعه موردی یک ساختمان اداری، نتایج نشان داد که برای دستیابی به زمان بازیابی هدف ۲۱ روز، ارتقاء اجزای غیرسازه‌ای ضروری است. یافته‌های آن‌ها نشان دادند که کارایی نسبی هر راهبرد طراحی مبتنی بر بازیابی به معیارهای طراحی انتخابی کاربر وابسته است.

Issa

۲۰۲۳

بلوئز و همکاران

بلوئز و همکاران (۲۰۲۳) عملکرد زمانی ساختمان‌های دیوار برشی بتن‌آرمه را در محدوده ۸ تا ۲۴ طبقه واقع در مرکز شهر سیاتل ارزیابی کردند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی زمان توقف و تحلیل‌های سناریو محور، شدت محور و ریسک محور، احتمال دستیابی به بازیابی عملکردی در بازه‌های زمانی مختلف را بررسی نمودند؛ نتایج آن‌ها نشان داد که ساختمان‌های طراحی‌شده بر اساس آیین‌نامه‌های جدید نیز در معرض ریسک بالای زمان‌های توقف طولانی مدت قرار دارند و این ضرورت گنجاندن الزامات مبتنی بر بازیابی در نسل آینده آیین‌نامه‌های ساختمانی را برجسته می‌کند.

Blowes



مروری بر پیشینه تحقیق

۲۰۲۰

سرداری و همکاران

سرداری و همکاران (۲۰۲۰) یک دبیرستان فولادی را قبل و پس از اجرای بهسازی لرزه‌ای مورد تحلیل قرار دادند؛

نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که بهسازی منجر به کاهش محسوس در از دست رفتن عملکرد شده و در نتیجه، تاب‌آوری کلی ساختمان افزایش یافته است.

۲۰۲۴

کوه‌فلاح و همکاران

کوه‌فلاح و همکاران (۲۰۲۴) تاب‌آوری لرزه‌ای یک ساختمان فولادی با کاربری مدرسه را با در نظر گرفتن تاثیر توالی زلزله‌های اصلی و پس‌لرزه و بر اساس روش FEMA P-58 مورد ارزیابی قرار دادند؛

نتایج نشان داد که افزایش خسارت ناشی از زلزله اصلی باعث افزایش هزینه و زمان تعمیرات شده و در نتیجه شاخص تاب‌آوری ساختمان کاهش می‌یابد.

۲۰۲۴

صدیقی و هارماندار

صدیقی و هارماندار (۲۰۲۴) تاب‌آوری لرزه‌ای یک ساختمان مدرسه در منطقه میلان ترکیه را با استفاده از تحلیل پوش‌آور، منحنی‌های شکنندگی، آسیب‌پذیری و بازیابی مورد مطالعه قرار دادند. تحلیل خسارت در این پژوهش بر اساس دستورالعمل HAZUS انجام شد و نتایج نشان داد که انتخاب مدل‌ها و پارامترهای تحلیلی مختلف تاثیر قابل توجهی بر شکل منحنی تاب‌آوری دارد.

Sedighi and Harmandar



مروری بر پیشینه تحقیق

۲۰۲۱

شاداب‌فر و همکاران

شاداب‌فر و همکاران (۲۰۲۱) با هدف ارتقای درک طراحی مبتنی بر تاب‌آوری، مروری جامع بر سیر تحول فلسفه‌های طراحی ارائه دادند؛ این مرور، روش‌ها و ابزارهایی برای مدل‌سازی منحنی بازیابی، تحلیل عملکرد زمانی سیستم، و پیوند تحلیل خطر و بازیابی را پوشش داد و بر اهمیت تلفیق تحلیل خطر، خسارت و بازیابی در یک چارچوب یکپارچه تاکید کرد.

۲۰۲۴

هارله و همکاران

هارله و همکاران (۲۰۲۴) مفاهیم کلیدی تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌ها و سیستم‌ها و شریان‌های حیاتی را مورد بررسی قرار دادند.

Harle

۲۰۲۵

اتکارش و همکاران

اتکارش و همکاران (۲۰۲۵) روش‌های پیشرفته ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای را مورد بررسی قرار دادند.

نتایج نشان داد که ترکیب مدل‌های عملکردی و تحلیل احتمالاتی همراه با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی-اجتماعی می‌تواند دقت ارزیابی تاب‌آوری را افزایش دهد و در پیش‌بینی آسیب و روند بازیابی سازه‌ها موثر باشد.

Utkarsh



مروری بر پیشینه تحقیق

۲۰۲۵

سُلگی و همکاران

سُلگی و همکاران (۲۰۲۵)
تاب آوری لرزه‌ای یک ساختمان فولادی سه طبقه مجهز به جداساز اصطکاکی را با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی و منحنی‌های شکنندگی ارزیابی کردند؛

نتایج آن‌ها نشان داد استفاده از جداساز باعث کاهش آسیب‌های لرزه‌ای و بهبود شاخص تاب آوری سازه می‌شود.

۲۰۲۵

احمد و لی

احمد و لی (۲۰۲۵)
تاب آوری لرزه‌ای یک ساختمان بتن آرمه را با تمرکز بر مقاوم‌سازی ستون‌های طبقه همکف و با در نظر گرفتن خسارات مستقیم و غیرمستقیم ارزیابی کردند.

نتایج نشان داد لحاظ کردن خسارات غیرسازه‌ای و غیرمستقیم نقش مؤثری در بهبود دقت برآورد شاخص تاب آوری دارد.

Ahmed and Li

۲۰۲۴

جیا و ژان

جیا و ژان (۲۰۲۴) یک چارچوب کمی برای ارزیابی تاب آوری لرزه‌ای ساختمان‌های منفرد ارائه کردند که با در نظر گرفتن هم‌زمان خسارات اقتصادی، اجتماعی زیست‌محیطی و مدل‌سازی دقیق فرایند بازیابی، دقت ارزیابی تاب آوری را افزایش می‌دهد. آن‌ها با معرفی مدل ترکیبی عملکرد زمانی، توانستند عدم قطعیت ارزیابی را کاهش داده و شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تری از روند بازیابی ارائه دهند.

Jia and Zhan

۲۰۲۲

کاستیلو و همکاران

کاستیلو و همکاران (۲۰۲۲) شاخص تاب آوری لرزه‌ای ساختمان‌های منفرد را با تمرکز بر سه معیار مختلف عملکردی شامل هزینه‌های تعمیر، سطح اشغال و ارزش دارایی مورد بررسی قرار دادند. این ارزیابی‌ها بر مبنای روش‌های مبتنی بر عملکرد و مطابق با دستورالعمل FEMA P-58 انجام شد. نتایج نشان داد که در میان رویکردهای مختلف، استفاده از معیار سطح اشغال با لحاظ احتمال فروریزش شکل بهتری از تاب آوری لرزه‌ای ساختمان‌ها ارائه می‌دهد و می‌تواند شاخص تاب آوری را با دقت و معناداری بیشتری بازنمایی کند.

Castillo



برخی روش‌های تحلیلی در زمینه ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای

جدول ۱: مرور برخی روش‌های نظری در زمینه ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای [۱۲]

نویسنده	توضیحات	روش نظری
برونو و همکاران [۱۰]	عملکرد سیستم در طول زمان پس از یک رویداد لرزه‌ای	منحنی تاب‌آوری
سیملارو و همکاران [۱۱]	مقدار عددی که زمان بازیابی، میزان نیرومندی و افت عملکرد را در یک شاخص تلفیق می‌کند	شاخص تاب‌آوری
میلر و همکاران [۲۶]	ارزیابی عملکرد سازه با در نظر گرفتن خسارات مستقیم و غیرمستقیم	شاخص تاب‌آوری لرزه‌ای
کاتر و همکاران [۲۷]	امتیازدهی ترکیبی در ابعاد فیزیکی، اجتماعی، اقتصادی و نهادی	سیستم ارزیابی شاخص‌ها
ویشواناس و بانرجی [۲۸]	ادغام شکنندگی وابسته به زمان، خسارت‌ها و مدل‌سازی بازیابی برای برآورد کاهش تاب‌آوری در طول زمان در پل‌های در حال زوال*	رویکرد چرخه عمر در تاب‌آوری*
فورچلینی و میتولیس [۲۹]	در نظر گرفتن خوردگی و کاهش کیفیت مصالح در مدل‌های خسارت و بازیابی برای ترسیم نمایه‌ای واقع‌گرایانه از تاب‌آوری زیرساخت‌های در معرض سال‌خوردگی	مدل‌سازی تاب‌آوری با لحاظ زوال

* Life-Cycle Resilience

* Deterioration



برخی روش‌های کاربردی و مهندسی در زمینه ارتقا تاب‌آوری لرزه‌ای

جدول ۲: مرور روش‌های کاربردی و مهندسی در زمینه تاب‌آوری لرزه‌ای [۱۲]

نویسنده	توضیحات	روش کاربردی
نعیم و کلی [۳۰]	جداسازی سازه از زمین برای کاهش نیروهای لرزه‌ای وارده	سیستم‌های جداسازی پایه
ماکریس و بلک [۳۱]	جذب انرژی زلزله و محدودسازی آسیب به سازه	ابزارهای استهلاک انرژی
یاو و همکاران [۱۹]	پایش لحظه‌ای برای شناسایی آسیب و برآورد زمان بازیابی	ارزیابی مبتنی بر پایش سلامت سازه
نی چوینه و همکاران [۳۲]	پیکربندی بدون گره و یکپارچه بطوریکه تکیه‌گاه و گره‌ها را حذف کرده و موجب کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای و نیاز به تعمیر و نگهداری می‌شود	طراحی پل‌های یکپارچه

* Life-Cycle Resilience

* Deterioration



مروری بر پیشینه تحقیق

جدول ۳: جدول مروری در زمینه تاب‌آوری لرزه‌ای سیستم‌ها [۱]

نویسنده	روش شناسی	یافته کلیدی	مزایا	محدودیت ها
هانگ [۳۳]	شبیه‌سازی پاسخ لرزه‌ای ستون‌های بتن‌آرمه با سطوح خرابی مختلف؛ بررسی مکانیزم‌های زوال در چارچوب تاب‌آوری	مدل اجزای محدود غیرخطی، به‌خوبی پاسخ ستون پل تحت خوردگی را شبیه‌سازی می‌کند؛ خوردگی، تاب‌آوری را به‌شدت کاهش می‌دهد	دقت بالا در شبیه‌سازی عملکرد ستون‌های قدیمی؛ ارزیابی جامع زوال	پیچیدگی مدل‌سازی؛ محدود به سیستم پل
رنجبر و نادرپور [۱۶]	روش ارزیابی تاب‌آوری بر مبنای منحنی‌های شکنندگی و آسیب‌پذیری؛ مطالعه موردی بیمارستان	منحنی‌های آسیب‌پذیری ابزار موثری در ارزیابی دقیق تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌های حیاتی هستند	ارزیابی دقیق تاب‌آوری؛ قابل استخراج مستقیم از منحنی شکنندگی	وابسته به دقت منحنی‌های شکنندگی؛ محدود به بیمارستان‌ها
جی [۳۴]	روش احتمالاتی برای ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای سیستم‌های پیچیده؛ مطالعه موردی پست برق ۲۲۰ کیلوولت در چین	پیشنهاد روش ارزیابی عملکردی؛ راهبرد اولویت‌بندی عملکرد، تاب‌آوری سیستم را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد	ارزیابی پویای تاب‌آوری؛ در نظر گرفتن راهبردهای بازایی	روش نسبتاً جدید؛ محدود به سیستم پست برق
سنگکی و همکاران [۳۵]	مدل‌های احتمالاتی سازگار با روش‌های قابلیت اعتماد، اعتبارسنجی شده با استفاده از HAZUS و پیاده‌سازی در نرم‌افزار Rt	منحنی تاب‌آوری بهبودیافته برای یک ساختمان قاب خمشی بتن‌آرمه معمولی	روش معتبر، امکان ادغام با نرم‌افزارهای موجود	محدود به ساختمان‌های قاب خمشی بتن‌آرمه
مختاری و نادرپور [۳۶]	به‌کارگیری روش پیشنهادی برای ساختمان‌های بیمارستانی با و بدون جداساز پایه، مطالعه پارامتریک	ارزیابی تاب‌آوری بیمارستان تحت سناریوهای خطر لرزه‌ای و شناسایی نیاز به بهبود عملکرد	ارزیابی کمی تاب‌آوری، پشتیبانی از برنامه‌ریزی اضطراری	کاربرد محدود برای ساختمان‌های بیمارستانی، نیاز به اعتبارسنجی بیشتر



مروری بر پیشینه تحقیق

جدول ۳: جدول مروری در زمینه تاب‌آوری لرزه‌ای سیستم‌ها [۱]

نویسنده	روش‌شناسی	یافته کلیدی	مزایا	محدودیت‌ها
یو و همکاران [۳۷]	کاربرد چارچوب پیشنهادی درخصوص مطالعه موردی بیمارستان، ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای و ارائه راهکارهای مقاوم‌سازی	زمان بازیابی بیمارستان پس از زلزله و لزوم اقدامات بهبود عملکرد	ارزیابی کمی تاب‌آوری، پشتیبانی از برنامه‌ریزی اضطراری	محدود به ساختمان‌های بیمارستانی، کاربرد در سایر سازه‌ها بررسی نشده است
ون و همکاران [۳۸]	معرفی عامل افت و کاهش تاب‌آوری و در نظر گرفتن آستانه جایگزینی	تمرکز عامل افت تاب‌آوری بر زمان بازیابی و هزینه تعمیر، اثر آستانه‌ها و پس‌لرزه‌ها نیز مورد توجه قرار گرفت	کاربرد مهندسی مستقیم، تمرکز بر فرآیند بازیابی	پیچیدگی عوامل مؤثر بر افت تاب‌آوری، نیاز به اعتبارسنجی بیشتر
حسن و همکاران [۳۹]	ارزیابی معیارهای ASCE41 و بررسی برآورد نادرست ظرفیت و تاب‌آوری سازه	استانداردمعیار احتمال فروپاشی را بیش از حد و تاب‌آوری و ظرفیت سازه را کمتر از واقعیت تخمین می‌زند	برجسته‌سازی کاستی‌های معیارهای مدل‌سازی موجود	محدود به ارزیابی معیار ASCE 41-17
هو و همکاران [۴۰]	به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک در طراحی پل و پیش‌بینی تاب‌آوری	شناسایی طرح‌های بهینه برای پل‌ها، پیش‌بینی تاب‌آوری از طریق مدل سطح پاسخ	مدل پیش‌بینی تاب‌آوری لرزه‌ای، بهینه‌سازی طرح‌های سازه‌ای	محدود به سازه‌های پل کاربرد در سایر سازه‌ها بررسی نشده است
کاستیلو و همکاران [۲۴]	ادغام ارزیابی‌های FEMA P-58 در چارچوب REDi به‌منظور ارزیابی تاب‌آوری ساختمان‌ها	زمان‌های خارج‌ازسرویس بودن ناشی از تأخیرها در محاسبه تاب‌آوری لحاظ شد و رویکرد مبتنی بر سطح اشغال ترجیح داده شد	ادغام روش‌های ارزیابی و ارائه روشی معنادار برای ارزیابی تاب‌آوری	محدود به ساختمان‌هایی که با REDi و FEMA58 ارزیابی شده‌اند



مروری بر پیشینه تحقیق

جدول ۴: مرور برخی مطالعات اخیر در زمینه تاب‌آوری لرزه‌ای

نویسندگان	سال انتشار	موضوع مورد بررسی	روش تحقیق / رویکرد	نتایج و یافته‌ها
کوه‌فلاح و همکاران [۵]	۲۰۲۴	تاثیر توالی زلزله‌های اصلی و پس‌لرزه بر تاب‌آوری	روش FEMA P-58، تحلیل توالی زلزله‌های اصلی و پس‌لرزه	افزایش خسارت زلزله اصلی منجر به افزایش هزینه و زمان تعمیرات و کاهش شاخص تاب‌آوری شد.
جیا و ژان [۹]	۲۰۲۴	چارچوب کمی ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌های منفرد با در نظر گرفتن خسارات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی	مدل ترکیبی عملکرد زمانی، شبیه‌سازی فرآیند بازیابی	کاهش عدم قطعیت ارزیابی و شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تر روند بازیابی با مدل ترکیبی عملکرد زمانی
صدیقی و هارماندار [۵]	۲۰۲۵	تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان مدرسه از طریق تحلیل خسارت و بررسی بازیابی با مدل‌های مختلف تحلیلی	تحلیل پوش‌آور غیرخطی، منحنی‌های شکنندگی، دستورالعمل HAZUS	انتخاب مدل تحلیلی تاثیر قابل توجهی بر شکل منحنی تاب‌آوری داشته است.
احمد و لی [۸]	۲۰۲۵	ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان بتن‌آرمه با مقاوم‌سازی ستون‌ها و بررسی نقش خسارات غیرسازه‌ای و غیرمستقیم در بهبود دقت شاخص تاب‌آوری	تحلیل خسارات مستقیم و غیرمستقیم، تمرکز بر مقاوم‌سازی ستون طبقه همکف	لحاظ خسارات غیرسازه‌ای و غیرمستقیم، دقت برآورد شاخص تاب‌آوری را بهبود داده است.
سُلگی و همکاران [۲۵]	۲۰۲۵	تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان فولادی مجهز به جداساز اصطکاکی	تحلیل دینامیکی افزایشی و استخراج منحنی‌های شکنندگی	جداساز اصطکاکی باعث کاهش آسیب و افزایش شاخص تاب‌آوری سازه شده است.



مروری بر پیشینه تحقیق

جدول ۵: فهرست نرم افزارهای موجود برای تحلیل خطر، ریسک و تاب آوری [۲]

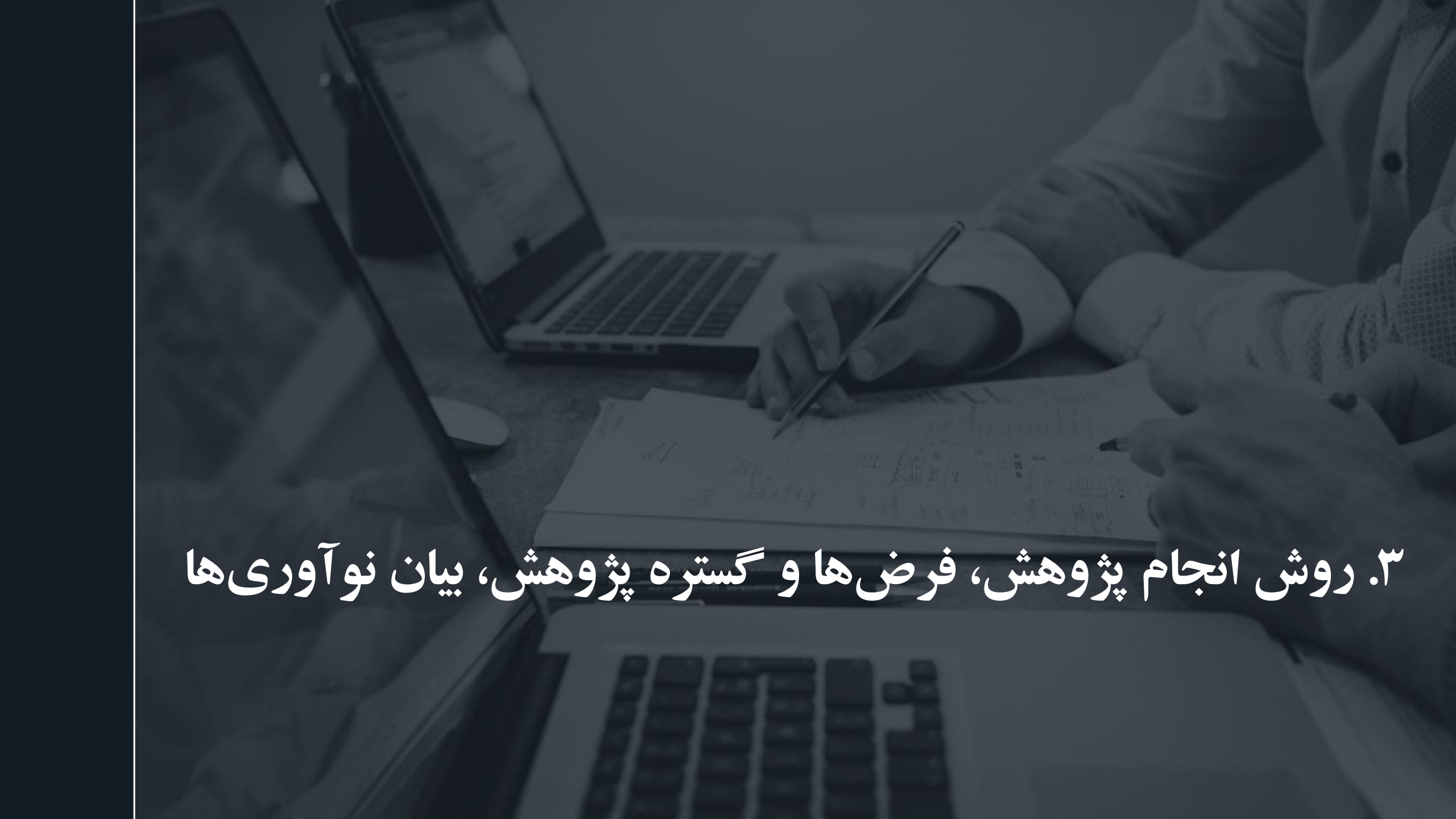
نام نرم افزار	تحلیل تاب آوری	خسارت اقتصادی	تلفات انسانی	ناحیه جغرافیایی	آسیب پذیری	خطر	متن باز
CAPRA نسخه 2.0.0	خیر	بله	بله	جهانی	بله	بله	بله
COSSAN نسخه X	خیر	بله	بله	جهانی	بله	بله	بله
DBELA	خیر	بله	خیر	جهانی	بله	بله	بله
Delft-3D نسخه 2021	خیر	خیر	خیر	جهانی	—	بله	بله
E-CAT	خیر	بله	خیر	آمریکای شمالی	بله	بله	بله
ELER نسخه 3.1	خیر	بله	بله	اروپا	بله	بله	ندارد
EPEDAT	خیر	بله	بله	آمریکای شمالی	بله	بله	خیر
EQRM نسخه 2.2svn1183	خیر	بله	بله	استرالیا	بله	بله	خیر
EQSIM	خیر	بله	بله	استرالیا	بله	بله	خیر
Ergo-EQ نسخه 4.0 Beta 2	بله	بله	بله	جهانی	بله	بله	بله
GIRAFFE	خیر	خیر	خیر	جهانی	بله	بله	بله
HAZUS نسخه 4.2	بله	بله	بله	جهانی	بله	بله	بله
InaSAFE نسخه 4.3.0	خیر	بله	بله	آسیای جنوب شرقی	بله	بله	خیر
IN-CORE	بله	بله	بله	جهانی	بله	بله	بله



مروری بر پیشینه تحقیق

جدول ۵: فهرست نرم افزارهای موجود برای تحلیل خطر، ریسک و تاب آوری [۲]

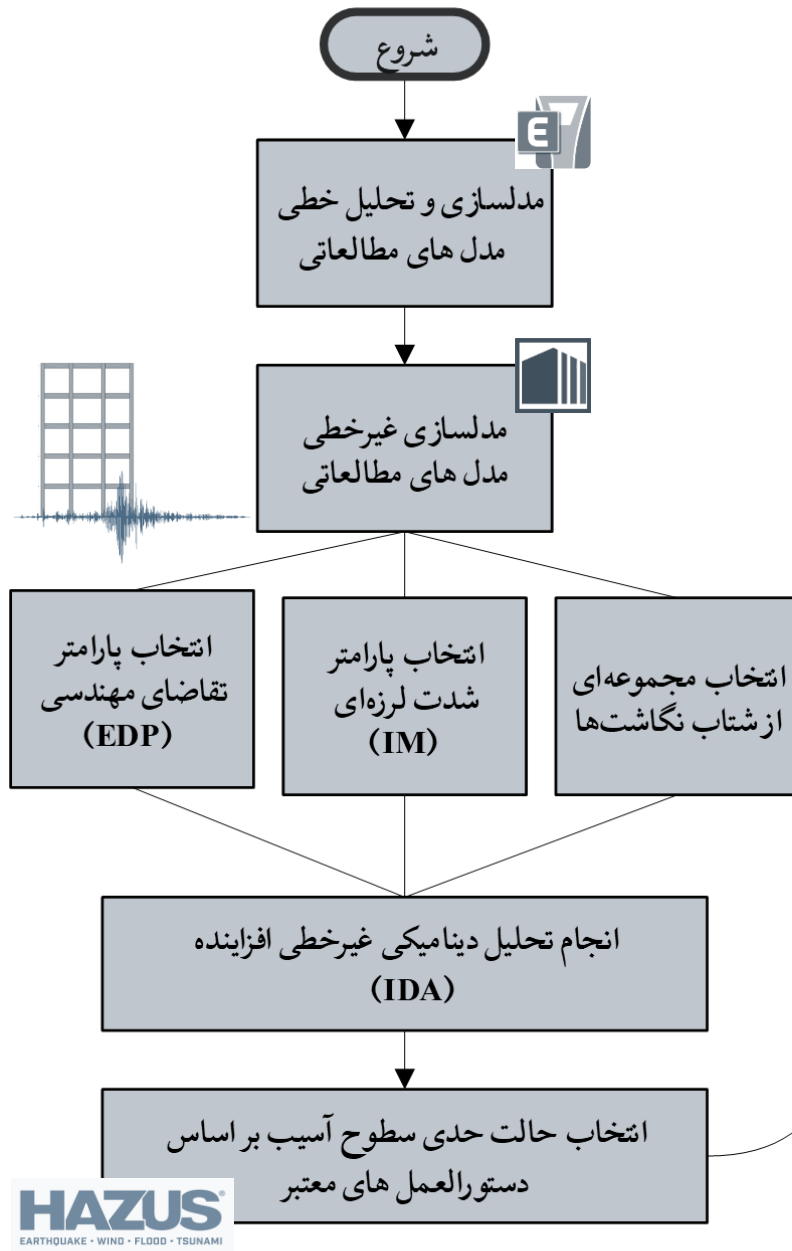
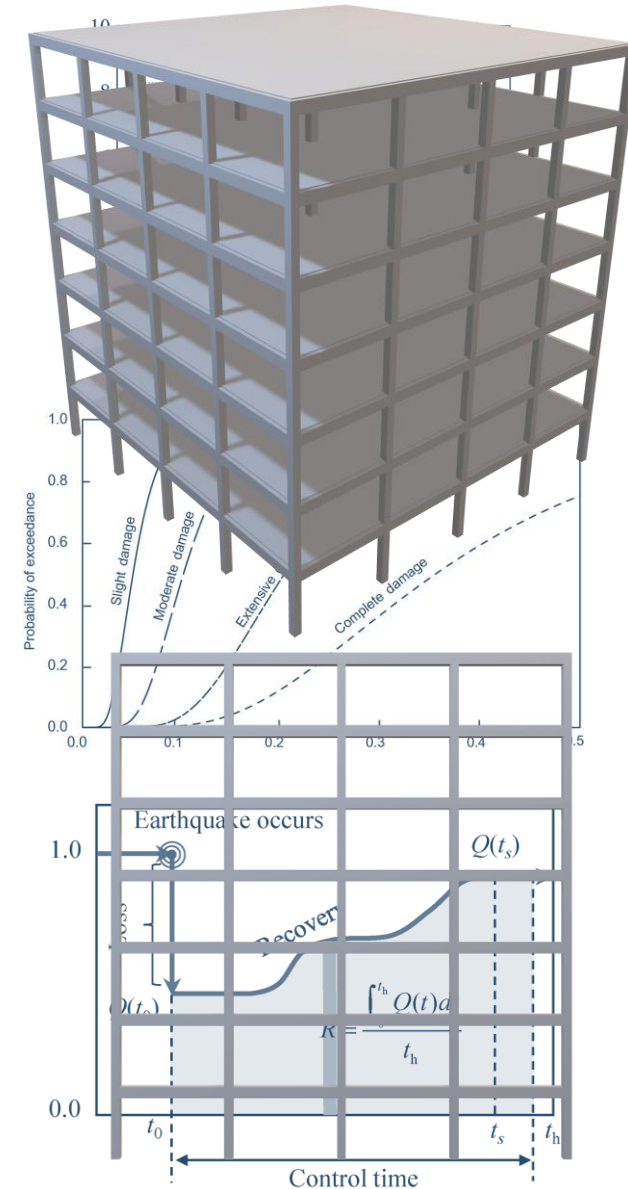
نام نرم افزار	تحلیل تاب آوری	خسارت اقتصادی	تلفات انسانی	ناحیه جغرافیایی	آسیب پذیری	خطر	متن باز
Kalypso نسخه 20.03.0	خیر	خیر	خیر	آلمان	بله	بله	بله
LNECloss	خیر	بله	بله	اروپا	بله	بله	خیر
MAEViz نسخه 3.1.1 Build12	خیر	بله	بله	ایالات متحده	بله	بله	بله
NoFDP IDSS نسخه 1.10b	خیر	خیر	خیر	جهانی	بله	بله	بله
OOFIMS	خیر	بله	بله	جهانی	بله	بله	—
OpenQuake نسخه 0.4.6	خیر	بله	بله	—	—	بله	بله
PAGER	خیر	بله	بله	جهانی	بله	—	ندارد
QLARM	خیر	بله	بله	جهانی	بله	بله	—
RADIUS	خیر	خیر	بله	جهانی	بله	بله	بله
REDARS نسخه 2	خیر	خیر	خیر	جهانی	بله	بله	بله
RiskScape نسخه 0.2.82	خیر	بله	بله	نیوزیلند	بله	بله	بله
Rt	خیر	خیر	خیر	جهانی	بله	بله	بله
Rtx نسخه 2.2.1	بله	بله	بله	جهانی	بله	بله	بله
SELENA نسخه 6.0	خیر	خیر	خیر	جهانی	بله	بله	بله
SP-BELA	خیر	بله	خیر	اروپا	بله	بله	خیر
TCRM نسخه 1.0.2	خیر	بله	بله	استرالیا	—	بله	بله

A grayscale photograph of a person's hands writing on a document with a pen. In the background, a laptop and a tablet are visible on a desk. The image is dimly lit and has a dark, moody atmosphere.

۳. روش انجام پژوهش، فرض‌ها و گستره پژوهش، بیان نوآوری‌ها



روش تحقیق



شکل ۶: فلوچارت روش تحقیق پیشنهادی



خلاصه کلی مراحل روش تحقیق پیشنهادی

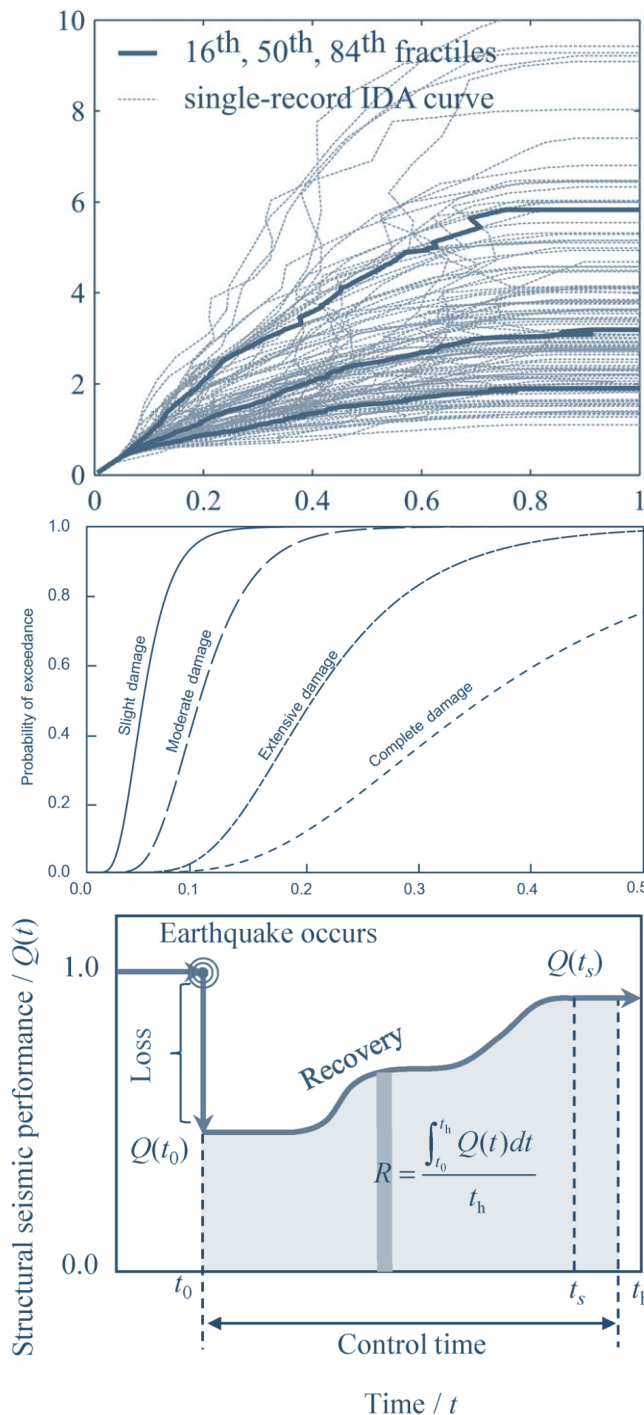
۱. مدلسازی، تناسب بندی و طراحی اولیه سازه‌های مطالعاتی

۲. انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی افزاینده تحت شتاب‌نگاشت‌های حوزه‌های مختلف لرزه‌ای بر روی سازه‌های مطالعاتی

۳. ترسیم منحنی‌های شکنندگی در سطوح آسیب مختلف و ارائه رابطه برازشی آن‌ها

۴. ارزیابی شاخص تاب‌آوری لرزه‌ای برای سازه‌های مطالعاتی

۵. مقایسه نتایج

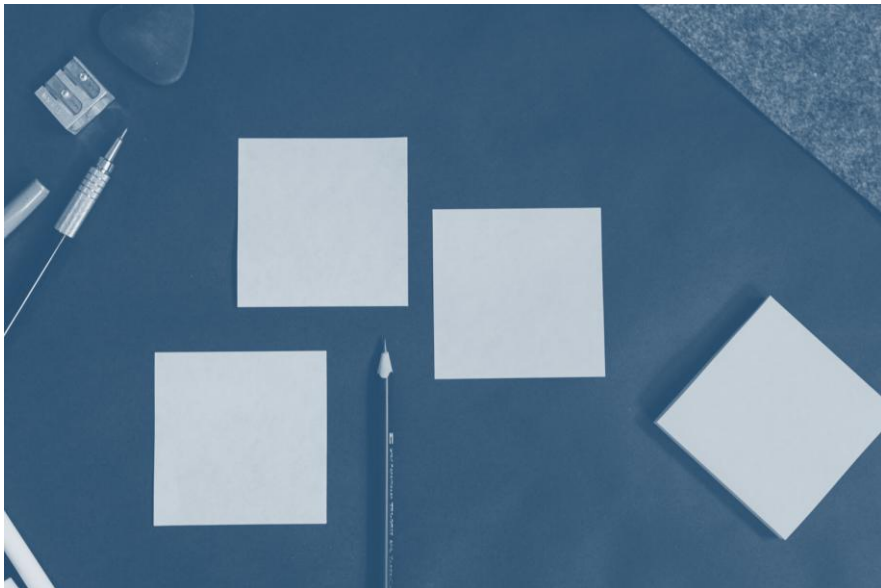




فرض‌ها و گستره پژوهش

فرض‌ها و دامنه مطالعاتی پژوهش شامل موارد زیر است:

- نوع سیستم‌های سازه‌ای: دو سازه میان‌مرتبه با سیستم قاب خمشی بتنی و فولادی
- نوع دیوارهای غیرسازه‌ای: دیوارهای غیرسازه‌ای سبک پنبلی از نوع AAC و بدون مشارکت در سختی جانبی و اثرات اندرکنشی با قاب
- تعداد و نوع شتاب‌نگاشت‌ها: تعداد ۲۰ شتاب‌نگاشت برای هر حوزه لرزه‌ای مطابق با شرایط ساختگاه
- تفکیک حوزه‌های لرزه‌ای بر اساس فاصله: حوزه نزدیک ۰ تا ۲۰ کیلومتر، حوزه متوسط ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر و حوزه دور بیش از ۵۰ کیلومتر
- پارامتر شدت لرزه‌ای: بر مبنای بیشینه شتاب حرکت زمین (PGA)
- پارامتر تقاضای مهندسی: بر اساس بیشینه تغییر مکان جانبی نسبی میان طبقه‌ای





نوآوری‌های پژوهش

۱. مقایسه و ارزیابی هم‌زمان آسیب‌پذیری و تاب‌آوری لرزه‌ای در دو سیستم مختلف سازه‌ای دارای دیوارهای غیرسازه‌ای سبک در حوزه‌های مختلف لرزه‌ای (حوزه نزدیک، متوسط و دور)

۲. ارائه روابط آسیب‌پذیری در سطوح آسیب معین بر اساس منحنی‌های شکنندگی: ارائه فرمول منحنی شکنندگی جهت تخمین احتمال فراگذشت از سطوح آسیب در هریک از مدل‌های مطالعاتی

۳. ارائه روابط شاخص تاب‌آوری در بازه پارامتر شدت مورد مطالعه: ارائه فرمول منحنی شاخص تاب‌آوری برای هر یک از سازه‌های مطالعاتی در بازه پارامتر شدت مورد مطالعه



۴. برنامه زمان بندی

برنامه زمان بندی

جدول زمان بندی پیش بینی شده برای انجام پژوهش به شرح زیر است:

شماره	فعالیت	سال ۱۴۰۴						سال ۱۴۰۵											
		مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
۱	مطالعات تکمیلی و گردآوری داده‌های اولیه																		
۲	کسب مهارت‌های نرم افزاری لازم																		
۳	مدلسازی، تناسب بندی و طراحی اولیه سازه‌های مطالعاتی																		
۴	مدلسازی غیرخطی مدل‌های مطالعاتی و صحت سنجی																		
۵	انتخاب مجموعه شتاب نگاشت‌ها																		
۶	انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزایشده																		
۷	جمع‌آوری نتایج و انجام محاسبات احتمالاتی																		
۸	بررسی و تفسیر نتایج																		
۹	تدوین مقالات و ارسال آن‌ها																		
۱۰	تدوین فصول رساله و انجام اصلاحات مقالات																		
۱۱	خواندن رساله توسط استاد راهنما طی فرایند انتشار مقالات																		
۱۲	انجام اصلاحات اولیه رساله																		
۱۳	درخواست دفاع و ارسال رساله به داوران جهت بررسی																		
۱۴	دفاع نهایی و انجام اصلاحات نهایی رساله																		

سیاس از توجه شما
....



www.linkedin.com/in/msheikhi98



www.msheikhi.ir