

# بهسازی لرزه‌های سازه‌های فولادی با جداساز LRB

تالیف

بابک پردل مراغه



نشر علم عمران

[www.elme-omran.com](http://www.elme-omran.com)

[Info@elme-omran.com](mailto:Info@elme-omran.com)

عضو:



انجمن کتاب‌های

این اثر مشمول قانون حمایت مولفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است، هر کس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر و مؤلف، نشر یا پخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

---

سرشناسه	: پردل مراغه، بابک، ۱۳۶۲ -
عنوان و نام پدیدآور	: بهسازی لرزه‌ای سازه‌های فولادی با جداساز LRB/ تالیف بابک پردل مراغه.
مشخصات نشر	: تهران: علم عمران، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری	: ۱۷۸ ص: مصور، جدول.
شابک	: ۲۰۰۰۰۰ ریال: 978-600-5176-36-0
موضوع	: ساختمانهای ضد زلزله. ساختمانهای فلزی- اثر زلزله. سازه‌های فولادی- اثر زلزله. ساختمانها
موضوع	: Earthquake resistant design, Building iron and steel, earthquake effects. Buildings
یاداشت	: کتابنامه: ص. [۱۶۹] - ۱۷۰.
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۶ ب۴پ/۴۴/۴۴ TA۶۵۸/۴۴
رده بندی دیویی	: ۶۹۳/۸۵۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۸۴۹۴۰۳

---



نشر علم عمران

---

بهسازی لرزه‌ای سازه‌های فولادی با جداساز LRB  
تالیف: بابک پردل مراغه

چاپ اول	تابستان ۱۳۹۶
چاپ	پرستش
تعداد و قطع صفحات	۱۷۸ صفحه و وزیری
شمارگان	۱۰۰۰
بهای کتاب	۲۰۰۰۰۰ ریال
شابک ۰-۳۶-۵۱۷۶-۶۰۰-۹۷۸	ISBN 978-600-5176-36-0

---

نشر علم عمران: تهران، یوسف آباد، خیابان جهان آرا، بین خیابانهای ۱۶ و ۱۸، پلاک ۳۳، طبقه دوم، واحد ۱۱  
تلفن: ۰۳۱-۸۱۳۵۳۹۳۰ دورنگار: ۸۱۳۵۳۹۳۲  
حقوق چاپ و نشر برای نشر علم عمران محفوظ است.

## مقدمه نویسنده

امروزه استفاده از جداگرهای لرزه‌ای در ساختمان‌های با اهمیت زیاد در دنیا رواج یافته است. مزایای کاربرد این سیستم‌ها در برابر کاهش آسیب‌های وارد بر سازه از سوی نیروهای زلزله باعث شد تا استفاده از این تکنولوژی در سازه‌های خاصی نظیر بیمارستان‌ها نیز در داخل کشور رواج یابد به همین منظور یادگیری دانش فنی این تکنولوژی بسیار با اهمیت بوده و کتاب حاضر نیز در این راستا نگارش شده است.

این کتاب حاوی پنج فصل می‌باشد. مطالب طوری ارائه شده‌اند که به نیازهای مهندسان جهت طراحی لرزه‌ای سازه فولادی مجهز به سازه لرزه‌ای پاسخ منطقی بدهد و برای دانشجویان رشته مهندسی عمران جذاب و چالش برانگیز باشد. نحوه ارائه مطالب هر فصل طوری صورت گرفته که خواننده با دنبال کردن آن پاسخی برای سوالات مرتبط با موضوع را خواهد یافت. در فصل پایانی یک پروژه اجرایی تحلیل و طراحی شده تا الگویی مناسب برای مهندسین عزیز به لحاظ بهره‌مندی در پروژه‌های خود گردد.

فصل اول اختصاص به بیان مسئله و ضرورت تدوین کتاب اختصاص دارد. در فصل دوم به بررسی و بازخوانی مفاهیم و فلسفه طراحی براساس عملکرد پرداخته شده و به دنبال آن در فصل سوم ضوابط آیین‌نامه‌ای و نحوه مدل سازی جداسازها ارائه شده است. تمام فصل چهارم اختصاص به روش ارزیابی مبتنی بر تحلیل استاتیکی غیرخطی دارد. در نهایت در فصل پنجم یک پروژه اجرایی تحلیل و طراحی شده است. امید است مطالب ارائه شده مفید واقع گردد و گامی به سمت تعالی کشور عزیزمان ایران بردارد. با توجه به گستردگی حجم مطالب این کتاب، طبیعتاً امکان وجود ایراداتی خواهد بود. در پایان از خوانندگان گرامی، متخصصان امر و اساتید بزرگوار خواهشمندیم پرسش‌ها، نظرات و پیشنهادات خود را در جهت اصلاح این کتاب به نشانی پست الکترونیکی [civil\\_babak2005@yahoo.com](mailto:civil_babak2005@yahoo.com) ارسال نموده تا در ویرایش بعدی در نظر گرفته شود.

بابک پردل مراغه

تابستان ۱۳۹۶



## فهرست مطالب

۱	<b>فصل اول. جداساز لرزه‌ای</b>
۱	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- تعریف مسئله
۲	۳-۱- هدف انجام از این مطالعه
۳	۴-۱- مروری مطالعات انجام شده در زمینه جداساز
۳	۱-۴-۱- مراکز تحقیقاتی فعال
۵	۲-۴-۱- تاریخچه
۷	۳-۴-۱- تحقیقات عددی انجام شده در مورد جداسازی‌های لاستیکی
۷	۱-۳-۴-۱- سازه‌های متکی بر جداگرهای ارتعاشی خطی
۱۰	۲-۳-۴-۱- سازه‌های متکی بر جداگرهای ارتعاشی غیرخطی هیسترتیک
۱۱	۵-۱- خلاصه کتاب
۱۵	<b>فصل دوم. نگرشی بر مبانی و مفاهیم بهسازی لرزه‌ای</b>
۱۵	۱-۲- مقدمه
۱۵	۱-۱-۲- نسل اول آیین‌نامه‌ها
۱۶	۲-۱-۲- نسل دوم آیین‌نامه‌ها
۱۷	۳-۱-۲- نسل سوم یا نسل جدید آیین‌نامه‌ها
۱۷	۲-۲- مبانی دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود
۱۸	۱-۲-۲- مفاهیم و فلسفه طراحی بر اساس عملکرد
۲۰	۲-۲-۲- نواقص روش طراحی لرزه‌ای آیین‌نامه‌های فعلی
۲۱	۳-۲-۲- اهداف و سطوح عملکرد
۲۱	۳-۲- مراحل بهسازی لرزه‌ای
۲۱	۱-۳-۲- بررسی ویژگی‌های ساختمان
۲۱	۲-۳-۲- انتخاب هدف بهسازی
۲۲	۳-۳-۲- جمع‌آوری اطلاعات وضعیت موجود ساختمان
۲۲	۴-۳-۲- نیاز یا عدم نیاز به بهسازی

۲۲	۲-۳-۵- ارائه طرح بهسازی و ارزیابی آن
۲۲	۲-۴- سطوح عملکرد ساختمان
۲۳	۲-۴-۱- سطوح عملکرد اجزاء سازه‌ای
۲۳	۲-۴-۱-۱- سطح عملکرد ۱- قابلیت استفاده بی‌وقفه
۲۳	۲-۴-۱-۲- سطح عملکرد ۲- خرابی محدود
۲۳	۲-۴-۱-۳- سطح عملکرد ۳- ایمنی جانی
۲۳	۲-۴-۱-۴- سطح عملکرد ۴- ایمنی جانی محدود
۲۳	۲-۴-۱-۵- سطح عملکرد ۵- آستانه فروریزش
۲۴	۲-۴-۱-۶- سطح عملکرد ۶- لحاظ نشده
۲۴	۲-۴-۲- سطح عملکرد اجزاء غیر سازه‌ای
۲۴	۲-۴-۲-۱- سطح عملکرد A - خدمت‌رسانی بی‌وقفه
۲۴	۲-۴-۲-۲- سطح عملکرد B - قابلیت استفاده بی‌وقفه
۲۴	۲-۴-۲-۳- سطح عملکرد C - ایمنی جانی
۲۴	۲-۴-۲-۴- سطح عملکرد D - ایمنی جانی محدود
۲۴	۲-۴-۲-۵- سطح عملکرد E - لحاظ نشده
۲۴	۲-۴-۳- سطوح عملکرد کل ساختمان
۲۴	۲-۴-۳-۱- سطح عملکرد خدمت‌رسانی بی‌وقفه (A-1)
۲۵	۲-۴-۳-۲- سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه (B-1)
۲۵	۲-۴-۳-۳- سطح عملکرد ایمنی جانی (C-3)
۲۵	۲-۴-۳-۴- سطح عملکرد آستانه فروریزش (E-5)
۲۶	۲-۴-۴- اهداف بهسازی
۲۶	۲-۴-۴-۱- بهسازی مینا
۲۶	۲-۴-۴-۲- بهسازی مطلوب
۲۶	۲-۴-۴-۳- بهسازی ویژه
۲۷	۲-۴-۴-۴- بهسازی محدود
۲۷	۲-۴-۴-۵- بهسازی موضعی
۲۷	۲-۵- ضریب آگاهی
۲۷	۲-۶- روش‌های تحلیل سازه
۲۹	۲-۶-۱- تفاوت روش‌های تحلیل خطی و غیرخطی
۲۹	۲-۶-۲- تفاوت روش استاتیکی خطی در دستورالعمل بهسازی با روش‌های آیین‌نامه‌های طراحی فعلی
۲۹	۲-۶-۳- روش تحلیل دینامیکی خطی
۲۹	۲-۶-۳-۱- فرضیات خاص در تحلیل دینامیکی خطی
۳۰	۲-۶-۳-۲- ملاحظات خاص تحلیلی
۳۱	۲-۶-۳-۳- توزیع بار جانبی
۳۲	۲-۶-۳-۴- تغییر مکان هدف
۳۴	۲-۷- معیارهای پذیرش

۳۴	۱-۷-۲- معیار پذیرش در روش های خطی
۳۴	۱-۱-۷-۲- برآورد نیروها و تغییر شکل های طراحی
۳۵	۲-۱-۷-۲- معیارهای پذیرش برای روش های خطی
۳۶	۲-۷-۲- روش غیرخطی
۳۶	۱-۲-۷-۲- برآورد نیروها و تغییر شکل های طراحی
۳۶	۲-۲-۷-۲- معیارهای پذیرش برای روش های غیرخطی
۳۶	۸-۲- مطالعات بهسازی قاب های فولادی مهاربندی شده
۳۶	۱-۸-۲- تعیین سختی اعضای قاب در روش استاتیکی غیرخطی
۳۸	۲-۸-۲- تعیین مقاومت اعضاء قاب
۳۸	۱-۲-۸-۲- روش استاتیکی و دینامیکی خطی
۳۹	۲-۲-۸-۲- روش استاتیکی غیرخطی
۳۹	۳-۸-۲- معیارهای پذیرش
۴۰	۱-۳-۸-۲- روش خطی
۴۲	۲-۳-۸-۲- روش های غیرخطی (معیارهای پذیرش)
۴۲	۹-۲- راهکارهای بهسازی لرزه ای
۴۲	۱-۹-۲- اصلاح موضعی اجزاء سازه ای با عملکرد نامناسب در زلزله
۴۷	۲-۹-۲- حذف یا کاهش بی نظمی در ساختمان های موجود
۴۷	۳-۹-۲- تأمین سختی لازم برای کل سازه
۴۸	۴-۹-۲- تأمین مقاومت لازم برای کل سازه
۴۸	۵-۹-۲- کاهش جرم ساختمان
۴۹	۶-۹-۲- به کارگیری سیستم های جداساز لرزه ای
۴۹	۷-۸-۲- به کارگیری سیستم های غیرفعال اتلاف انرژی
۵۰	۸-۹-۲- تغییر کاربری ساختمان

## فصل سوم. بررسی ضوابط آیین نامه ای و نحوه مدل سازی جداسازها

۵۱	۱-۳- مقدمه
۵۱	۱-۱-۳- مفهوم جداسازی لرزه ای
۵۴	۲-۳- خواص مکانیکی جداسازها
۵۴	۱-۲-۳- خواص مکانیکی نشیمن های الاستومری
۶۰	۲-۲-۳- خواص مکانیکی نشیمن هایی با هسته سربی
۶۱	۳-۲-۳- خواص مکانیکی سیستم های آونگ اصطکاکی
۶۳	۳-۳- ضوابط آیین نامه ها برای جداسازی لرزه ای
۶۳	۱-۳-۳- مقدمه
۶۴	۲-۳-۳- روش های طراحی
۶۵	۳-۳-۳- تحلیل استاتیکی
۶۶	۱-۳-۳-۳- ضریب ناحیه لرزه ای (Z)

- ۶۷ ۳-۳-۲- نوع نیم‌رخ خاک محل
- ۶۷ ۳-۳-۳- انواع چشمه‌های لرزه‌ای
- ۶۷ ۳-۳-۴- ضرایب نزدیکی چشمه
- ۶۹ ۳-۳-۵- ضریب پاسخ MCE
- ۶۹ ۳-۳-۶- ضرایب طیفی لرزه‌ای
- ۷۱ ۳-۳-۷- ضرایب میرایی
- ۷۱ ۳-۳-۸- دوره‌های تناوب ارتعاشی مؤثر سیستم
- ۷۲ ۳-۳-۹- تغییر مکان‌های کل طرح
- ۷۳ ۳-۳-۱۰- نیروهای طرح
- ۷۴ ۳-۳-۱۱- توزیع نیروی برشی در طبقات
- ۷۵ ۳-۳-۱۲- محدودیت‌های تغییر مکان جانبی
- ۷۵ ۳-۴- تحلیل دینامیکی
- ۷۶ ۳-۴-۱- تحلیل تاریخچه زمانی
- ۷۶ ۳-۴-۵- سایر ضوابط برای اجزای غیر سازه‌ای
- ۷۷ ۳-۴-۶- بازبینی طرح
- ۷۷ ۳-۴-۷- ضوابط طرح و آزمایش جداسازی
- ۷۸ ۳-۴-۸- روش گام‌به‌گام طراحی بر اساس ضوابط UBC-97
- ۸۲ ۳-۴-۴- طراحی سیستم جداساز لرزه‌ای بر اساس نشریه ۳۶۰
- ۸۳ ۳-۴-۱- مشخصات مکانیکی و نحوه‌ی مدل‌سازی سیستم‌های جداساز لرزه‌ای
- ۸۴ ۳-۴-۱-۱- مشخصات مکانیکی جداسازهای لرزه‌ای
- ۸۴ ۳-۴-۱-۲- مدل‌سازی جداسازها
- ۸۵ ۳-۴-۱-۳- مدل‌سازی سیستم جداساز و سازه‌ی فوقانی
- ۸۶ ۳-۴-۲- ضوابط کلی برای طراحی سیستم جداساز
- ۸۶ ۳-۴-۲-۱- پایداری سیستم جداساز
- ۸۶ ۳-۴-۲-۲- طبقه‌بندی ساختمان برحسب شکل
- ۸۶ ۳-۴-۲-۳- ضابطه‌ی حرکت زمین
- ۸۷ ۳-۴-۲-۴- انتخاب روش تحلیل
- ۸۸ ۳-۴-۳- روش‌های تحلیل خطی
- ۸۸ ۳-۴-۳-۱- مشخصات تغییر شکل سیستم جداساز
- ۸۸ ۳-۴-۳-۲- تغییر مکان طرح (یا تغییر مکان حداقل)
- ۸۸ ۳-۴-۳-۳- زمان تناوب مؤثر در تغییر مکان طرح
- ۸۸ ۳-۴-۳-۴- تغییر مکان حداکثر
- ۸۹ ۳-۴-۳-۵- زمان تناوب مؤثر در تغییر مکان حداکثر
- ۸۹ ۳-۴-۳-۶- تغییر مکان کل
- ۹۰ ۳-۴-۳-۷- حداقل نیروی جانبی
- ۹۰ ۳-۴-۳-۸- تحلیلی طیفی



۹۱	۳-۴-۳-۹- نیروها و تغییر شکل‌های طراحی
۹۱	۳-۴-۴-۴- روش‌های تحلیل غیرخطی
۹۱	۳-۴-۴-۱- روش استاتیکی غیرخطی
۹۲	۳-۴-۴-۲- روش دینامیکی غیرخطی
۹۲	۳-۴-۴-۳- نیروها و تغییر شکل‌های طراحی
۹۲	۳-۴-۵- جزئیات موردنیاز سیستم
۹۲	۳-۴-۵-۱- سیستم جداساز
۹۵	۳-۴-۵-۲- سیستم سازه‌ای
۹۵	۳-۴-۶- بازیابی طرح
۹۵	۳-۴-۷- مشخصات لازم برای طراحی و آزمایش سیستم جداساز
۹۶	۳-۴-۷-۱- آزمایش‌های لازم
۹۸	۳-۴-۷-۲- تعیین خصوصیات منحنی نیرو تغییر مکان
۹۸	۳-۴-۷-۳- کفایت سیستم
۹۹	۳-۴-۷-۴- مشخصات طراحی سیستم جداساز

#### فصل چهارم. روش ارزیابی مبتنی بر تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover)

۱۰۱	۴-۱- روش ارزیابی مبتنی بر تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover)
۱۰۲	۴-۲- نقاط ضعف آنالیز استاتیکی غیرخطی (Pushover)
۱۰۲	۴-۳- روش ضرایب تغییر مکان
۱۰۶	۴-۴- روش طیف طرفیت
۱۰۸	۴-۵- روند مدل‌سازی و تحلیل (Pushover) سازه در نرم‌افزار ETABS
۱۰۸	۴-۵-۱- مدل‌سازی و آنالیز اولیه
۱۰۹	۴-۵-۲- تعریف خصوصیات مفاصل خمیری
۱۰۹	۴-۵-۲-۱- تعداد مفصل‌هایی که باید تعریف شوند:
۱۰۹	۴-۵-۲-۲- نکات مهمی که باید در تعریف مفاصل باید در تیرها و ستون‌ها توجه داشت:
۱۰۹	۴-۵-۲-۳- تعریف مفاصل کنترل شونده توسط تغییر شکل در ETABS
۱۱۲	۴-۵-۲-۳- اختصاص مفاصل
۱۱۲	۴-۵-۲-۴- معرفی حالت‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی
۱۱۵	۴-۵-۲-۵- نکات کنترلی
۱۱۷	۴-۵-۲-۶- نکات مهمی که در تعریف حالت‌های رانشی باید در نظر گرفت:
۱۱۸	۴-۵-۳- اجرای تحلیل رانشی
۱۱۸	۴-۵-۴- نتایج تحلیل رانشی
۱۱۸	۴-۶- نمایش منحنی رانش

#### فصل پنجم. مدل‌سازی و مطالعات عددی

۱۲۱	۵-۱- مقدمه
۱۲۱	

- ۱۲۱- ۲-۵- تعریف مشخصات ساختمان
- ۱۲۴- ۱-۲-۵- مشخصات مصالح
- ۱۲۵- ۲-۲-۵- مقاطع تیر و ستون
- ۱۲۶- ۳-۵- بارگذاری ثقلی
- ۱۲۷- ۴-۵- بارگذاری لرزه‌ای
- ۱۳۱- ۵-۵- نکات لازم در ارزیابی عملکرد ساختمان‌ها بر اساس آیین‌نامه بهسازی لرزه‌ای
- ۱۳۲- ۱-۵-۵- هدف بهسازی
- ۱۳۲- ۲-۵-۵- طیف طرح
- ۱۳۲- ۳-۵-۵- اطلاعات وضعیت موجود ساختمان
- ۱۳۲- ۴-۵-۵- روش‌های تحلیل سازه
- ۱۳۲- ۵-۵-۵- مقاومت مصالح
- ۱۳۲- ۱-۵-۵-۵- کرانه پایین مقاومت مصالح
- ۱۳۳- ۲-۵-۵-۵- مقاومت مورد انتظار مصالح
- ۱۳۳- ۶-۵-۵- اثر هم‌زمانی مؤلفه‌های زلزله
- ۱۳۳- ۷-۵-۵- اثر  $P-\Delta$
- ۱۳۳- ۸-۵-۵- پیچش
- ۱۳۳- ۹-۵-۵- دیافراگم
- ۱۳۳- ۱۰-۵-۵- اعضای اصلی و غیر اصلی
- ۱۳۴- ۱۱-۵-۵- نوع توزیع بار جانبی سازه
- ۱۳۴- ۱۲-۵-۵- تغییر مکان هدف
- ۱۳۵- ۱۳-۵-۵- تعیین پارامترهای مدل‌سازی و معیارهای پذیرش مفصل‌ها در آنالیز غیرخطی استاتیکی
- ۱۳۸- ۱۴-۵-۴- کنترل معیار پذیرش برای روش‌های غیرخطی
- ۱۳۹- ۱۵-۵-۴- انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی و کنترل معیار پذیرش
- ۱۴۷- ۶-۵- مشخصات سیستم جداساز
- ۱۴۹- ۷-۵- روند تعیین مشخصات سیستم جداساز لاستیکی با هسته سربی (LRB)
- ۱۴۹- ۱-۷-۵- جداساز نوع اول با دوره تناوب  $2/5\text{sec}$  و میرایی ۱۵٪
- ۱۵۰- ۲-۷-۵- همچنین برای جداساز نوع دوم با میرایی ۲۵٪ داریم
- ۱۵۱- ۳-۷-۵- در جداساز نوع سوم با دوره تناوب  $2/5\text{sec}$  و میرایی ۲۸٪
- ۱۵۲- ۸-۵- تعیین تغییر مکان هدف در سیستم جداساز لرزه‌ای

## فصل اول

### جداساز لرزه‌ای

#### ۱-۱- مقدمه

کاهش خسارات جبران‌ناپذیر پدیده زلزله همواره هدف نهایی محققین و دانشمندان علم مهندسی بوده است. هم‌زمان با پیشرفت علوم کاربردی مخصوصاً علوم رایانه‌ای ایده‌ها و دیدگاه‌های مهندسی زلزله نیز ارتقاء قابل توجهی یافته است. امروز ترس و نگرانی از خطرات زلزله جای خود را به امید و اعتماد داده است. تفکر مقاوم‌سازی ساختمان‌ها به دلیل موفقیت چشمگیر در نجات انسان‌ها همچنان بی‌وقفه و با شکمیایی روزافزون در حال پیشروی است، به طوری که هم‌اکنون در سطح جهان تحقیقات وسیعی بر روی رفتار سیستم‌های موجود و ابزار و سیستم‌های جدید در حال انجام است. متأسفانه در کشورهای جهان سوم نتایج تحقیقات خیلی دیر به بخش صنعت منتقل می‌شود و بسیاری از ساخت‌وسازها هنوز با اطلاعات و دانش چند دهه قبل انجام می‌شود و تناسبی با دستاوردهای جدید علم مهندسی زلزله ندارد و این در حالی است که علم مهندسی زلزله در این مدت با تحولات و تغییرات قابل توجهی روبرو گردیده است [نیکنام، ۱۳۸۱].

در قرن گذشته بیش از هزار زلزله مخرب در هفتاد کشور جهان به وقوع پیوسته و جان ۱/۶ میلیون نفر را گرفته است. ۸۰٪ تلفات جانی ناشی از این زلزله در شش کشور چین، ایران، پرو، شوروی سابق، گواتمالا و ترکیه بوده است. از هر ۱۵۳ زلزله مخربی که در دنیا اتفاق افتاده ۱۷/۶ آن مربوط به ایران بوده (حدود سه برابر رقم مربوط به ژاپن، که برابر ۷/۱ است). همچنین در طول ۹۰ سال گذشته با وقوع ۸۷ زلزله با قدرت تخریب بالا بالغ بر ۱۵۰ هزار نفر از هم‌میهن‌انمان جان خود را از دست داده‌اند [حبیب، ۱۳۷۴].

ایران با ساختار ویژه زمین‌ساختی، وجود گسل‌های<sup>۱</sup> فعال و لرزه‌خیزی زیاد در زمره مناطق با خطر بالای جهان قرار دارد. گواهی تاریخ، اطلاعات مستند علمی و تجربه وقوع زلزله‌های مکرر (به‌ویژه در سال‌های اخیر) بیانگر این است که اکثر نقاط کشور و شهرهای مهم در معرض وقوع زلزله شدید قرار دارند که به علت توسعه ناسازگار با خطر زلزله، آسیب‌پذیر می‌باشند [غفوری آشتیانی، ۱۳۸۱].

کشور ما بخشی از کمربند کوه‌زایی آلپ - هیمالیا است که به‌عنوان آخرین و جوان‌ترین نواحی کوه‌زایی جهان شناخته می‌شود و فلات ایران از نظر وقوع زلزله یکی از فعال‌ترین مناطق جهان می‌باشد. شهرهایی نظیر سلماس

(۱۳۰۹)، درود (۱۳۲۲)، بوئین‌زهر (۱۳۴۱)، طبس (۱۳۵۷)، رودبار و منجیل (۱۳۶۹) و بم (۱۳۸۲) از جمله شهرهایی هستند که در این فاصله در اثر زلزله‌های مکرر، به نحو گسترده‌ای آسیب دیده‌اند [حبیب، ۱۳۷۴].

ساختار طبیعی کشور ما، زلزله را به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین و تهدیدکننده‌ترین عوامل انهدام حیات انسانی مطرح نموده است. از سوی دیگر عدم به‌کارگیری صحیح تکنیک‌های مقابله با زلزله کلیه نقاط شهری و روستایی کشور را درخطر آسیب‌پذیری شدید قرار داد است. وجود این مسئله مهم، هدف کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای را مطرح می‌نماید که خود به دو بخش شامل، ایمن‌سازی ساختمان‌ها و سیستم‌های تأسیساتی و ایمن‌سازی شهرها قابل تفکیک است. حیطه کاری اول، سازه‌های ساختمانی را عمدتاً به‌صورت منفرد در برمی‌گیرد و هدف اصلی آن کاهش آسیب‌های آنی ناشی از تخریب و یا اصولاً کاهش تخریب است. در این بخش تحقیق و تکمیل تکنیک‌های فنی و تخصصی در ساخت‌وسازها و اجرای آن باعث می‌شود تا هنگام وقوع زلزله حتی‌الامکان تخریبی صورت نگیرد، همچنین آتش‌سوزی‌ها، انفجارها و قطع سیستم‌های حیاتی شهری به وقوع نپیوندد که با تحقق آن مسئله حل و نتیجه موردنظر حاصل می‌گردد.

گرچه جلوگیری کامل از خسارات ناشی از زلزله شدید بسیار دشوار است، ولیکن با استفاده از توانایی‌های علمی و فناوری‌های کارآمد، سعی می‌گردد با کاهش خسارت، محیط‌زیست ایمنی در برابر زلزله ایجاد گردد.

## ۱-۲- تعریف مسئله

با جدا کردن سازه از زمین موجب تضعیف عمده انتقال حرکت زمین به سازه می‌شود. این روش نهایتاً منجر به کاهش قابل توجهی در تغییر مکان‌های نسبی و شتاب‌های ایجادشده در سازه می‌شود که دستیابی به این مزایا در طرح‌های لرزه‌ای معمول با تکیه بر ایجاد سیستم‌های مقاوم جانبی سخت‌تر، بسیار پرهزینه است. با کاربرد سیستم جداسازی لرزه‌ای علاوه بر امکان طراحی یک سازه مطمئن می‌توان به عملکرد اجزای غیر سازه‌ای و محتویات سازه نیز در موقع زلزله مطمئن بود.

## ۱-۳- هدف انجام از این مطالعه

با توجه به این مهم که کشور ما ایران بر روی یکی از نوارهای زلزله‌خیز جهان قرار دارد ایمنی و مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر زلزله از اهمیت بسزایی برخوردار است. تدوین دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، گامی مؤثر در جهت کاهش خسارت ناشی از زلزله در ساختمان‌های بهسازی شده خواهد بود. فلسفه و هدف بهسازی لرزه‌ای با استفاده از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای مستقیماً به هدف سازنده و انتظارات وی از عملکرد ساختمان بهسازی شده بستگی دارد. به همین دلیل اهداف بهسازی از پروژه‌ای به پروژه دیگر می‌تواند متفاوت باشد. در حال حاضر، انگیزه اصلی کارفرمایان در انتخاب سیستم‌های جداساز لرزه‌ای جهت بهسازی ساختمان‌های موجود را می‌توان به زیر تشریح کرد:

۱- حفظ محتویات لوازم مهم و ارزشمندی که بایستی از خسارات ناشی از ارتعاشات زلزله محافظت شوند (مانند آثار تاریخی و هنری)

۲- طرح اقتصادی برخی از ساختمان‌ها به‌قدری پیچیده‌اند که جداسازهای لرزه‌ای به‌عنوان یک روش اقتصادی برای بهسازی لرزه‌ای آن‌ها می‌توان در نظر گرفت.

تحقیق حاضر و تحقیقات مشابه با بهره‌گیری از این دستورالعمل و به‌منظور شناسایی و بررسی تأثیر جداسازهای لرزه‌ای بر رفتار سازه می‌تواند گامی مؤثر در کاربردی کردن این نوع سیستم در کشور گردد.

#### ۱-۴-۱- مروری مطالعات انجام‌شده در زمینه جداساز

مبانی نظری جداسازی لرزه‌ای کاملاً شناخته‌شده و فن‌آوری آن با انجام کارهای عملی زیاد در طول ربع قرن گذشته تأیید شده که مطالب مربوط به آن در بسیاری از گزارش‌های فنی، انتشارات بایگانی‌شده و مقالات موجود است. جداسازی به‌طور وسیعی در نواحی مستعد زلزله‌خیزی در جهان جهت محافظت سازه‌های مهم در برابر حرکات قوی زمین موردپذیرش قرار گرفته و نمونه‌های متعددی در ایالات‌متحده، ژاپن، تعداد کمتری در نیوزلند و ایتالیا مورد استفاده قرار گرفته، طرح‌هایی نیز با هزینه‌های پایین‌تر، جداسازی را برای ساختمان‌های معمولی میسر ساخته است و نمونه‌هایی از آن در کشورهای درحال توسعه نظیر چین، اندونزی و ارمنستان تکمیل شده‌اند.

#### ۱-۴-۱-۱- مراکز تحقیقاتی فعال

به خاطر مسئولیت سنگینی که امروزه بر دوش مهندسان زلزله قرار دارد نوآوری در مهندسی را باید به‌طور کامل مورد آزمایش قرارداد و از نظر تحلیلی تا در درجه‌ای که در گذشته معمول نبود ثابت کرد تا آن تکنولوژی بتواند عملیاتی و اجرایی گردد. قبل از تحقیق جداسازی لرزه‌ای سازه‌ها در ایالات‌متحده و همچنین بعد از آن، برنامه تحقیقاتی وسیعی روی این موضوع در تعدادی از دانشگاه‌های پیگیری می‌شد. بانی اغلب این کارهای تحقیقاتی بنیاد علوم ملی ایالات‌متحده<sup>۱</sup> به کمک سرمایه‌گذاری دپارتمان انرژی ایالات‌متحده<sup>۲</sup> و موسسه تحقیقات برق قدرت<sup>۳</sup> بود.

در مرکز تحقیقات زلزله<sup>۴</sup> در دانشگاه برکلی، دانشگاه ایالتی کالیفرنیا، تحقیقاتی شامل تعداد متعددی میز لرزان با توان شبیه‌سازی زلزله‌های بزرگ، انجام شد. در این سری آزمایشات، ساختمان‌ها در محدوده بین ۲۰ تن (معادل ساختمان ۳ طبقه) و تا ۶۰ تن (معادل ساختمان ۹ طبقه) که به ترتیب با مدل‌های واقعی جداساز از چندین نوع مختلف آزمایش شدند. به میزان آزمایش‌های میز لرزان که اغلب از جداکننده‌های کوچک به مقیاس ۱/۳ و ۱/۸ استفاده می‌شد، آزمایشات استاتیکی روی محدودی وسیعی از جداکننده‌ها با اندازه‌های نزدیک به ابعاد واقعی انجام شد. این آزمایش‌ها و نتایج آن‌ها در سری گزارش‌های مرکز تحقیقات زلزله (EERC) ارائه شده است.

ستادی نیز در دانشگاه بوفالو، دانشگاه ایالتی نیویورک<sup>۵</sup>، تحت نظارت مرکز ملی تحقیقات مهندسی زلزله<sup>۶</sup> (NCEER) از سال ۱۹۸۶ شکل گرفت. این ستاد نیز با شعار «مهندسی بهبودیافته، طرح‌ریزی قبل از زلزله و مدیریت بحران پس از زلزله» با تمرکز بر سیستم‌های مستهلک کننده انرژی از جمله جداسازی لرزه‌ای به‌عنوان یک تکنولوژی نو کارهای منسجم، هدایت شده و گران‌قدری را به سرانجام رسانده است که مجموع این تحقیقات در سری گزارش‌های تحت عنوان (MCEER)<sup>۷</sup> منتشر گردیده است.

1. U.S. National Science Foundaton (NFS)  
2. U.S. Department of Energy  
3. Electric Power Research Instiute  
4. Earthquake Engineering Research Centre (EERC)  
5. Buffalo University, State University of New York  
6. National Center Earthquake Engineering Research  
7. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research

ژاپن به علت واقع شدن در یکی از نواحی زلزله‌خیزی جهان همواره به‌عنوان کشوری پیشرو در توسعه و به‌کارگیری روش‌های بررسی کاهش خسارات زلزله مطرح بوده است. ساخت سازه‌های مقاوم در برابر زلزله در جهت کاهش خسارات وارده به سازه و تجهیزات داخلی و به‌کارگیری تکنولوژی‌های نو نیازمند انجام تحقیقات گسترده‌ای بوده. از این رو مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی متعددی به‌صرف هزینه‌های هنگفت در جهت تحقق این هدف گام‌های مؤثری برداشته‌اند، یکی از این مراکز فعال دانشگاه توهوکو<sup>۱</sup> در سندایی<sup>۲</sup> در شمال ژاپن می‌باشد که از کارهای ارزشمند این مرکز بررسی مقایسه‌ای در رابطه با خصوصیات دینامیکی و مفید بودن چهار نوع سیستم جداسازی ارتعاشی بر روی سازه‌ها با مقیاس واقعی بوده است. به این منظور دو ساختمان سه‌طبقه بتن آرمه (که یکی دارای جداساز بوده و دیگری فاقد سیستم جداسازی می‌باشد) در محوطه دانشگاه ساخته شده و نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بر روی آن سازه‌ها با سازه‌های واقعی دیگر که یکی در شمال شرقی ژاپن و دیگری<sup>۳</sup> واقع بودند مقایسه گردید.

از سال ۱۹۶۷ گروهی از محققین در نیوزلند در قالب مرکز تحقیقاتی به نام موسسه تحقیقات علوم و صنایع نیوزلند (DSIR)<sup>۴</sup> به مسئله جداسازی ارتعاشی و دیگر زمینه‌های مهندسی زلزله علاقه‌مند شدند. شروع تحقیق بر روی جداسازهای لرزه‌ای با تبادل نظر با گروهی که در آزمایشگاه بر روی خواص مواد و رفتار فلزات هنگام تغییر شکل پلاستیک تحقیق می‌کردند آغاز گردید. این گروه تعدادی جداساز را که بر اساس تغییر شکل پلاستیک سرب عمل می‌کرد ارائه نمود. از آن جمله میراگرهای سربی-تزیقی و یا جداسازی‌های سربی-لاستیکی می‌باشد که در نیوزلند به کار گرفته شد. یکی از کارهای ارزشمند این مرکز بررسی عملکرد هفت نوع مختلف جداسازهای لرزه‌ای و انجام مطالعه مقایسه‌ای بوده است. در این مطالعه ۸۱ پارامتر مختلف جداسازها و سازه‌ها که برای درک مفهوم و همچنین ساده‌سازی محاسبات مربوط به طراحی سازه‌های جداسازی شده مهم می‌باشد در نظر گرفته شده است. نتایج این تحقیق در قالب دستورالعمل‌های طراحی و کتاب‌های مربوطه توسط این مرکز و محققان آن ارائه شده است.

فعال‌ترین مرکز مطالعه جداسازی پایه در اروپا کشور ایتالیا<sup>۵</sup> و تحت نظر گروه ملی جداسازی لرزه‌ای (GLIS)<sup>۶</sup> می‌باشد. GLIS دارای طیف گسترده‌ای از اعضا شامل محققین و مجریان بوده و کارگاه‌های آموزشی متعددی برگزار نموده است. بعلاوه این مرکز به ارائه ضوابط طراحی برای سیستم‌های جداسازی می‌پردازد. در چین مرکز تحقیقات دانشگاه تیانجین<sup>۷</sup> با انجام آزمایش‌های متعددی، نوع خاص جداسازهای لرزه‌ای تحت عنوان سازه‌های لغزشی را مورد مطالعه قرارداد که باعث ساخت سازه‌هایی با استفاده از این نوع جداسازها در چین شده است.

همچنین کارگاه‌های آموزشی<sup>۸</sup> بین‌المللی در خصوص این موضوع مانند کارگاه آموزشی ۱۹۸۷ ژاپن- نیوزلند<sup>۹</sup>، کارگاه آموزشی ۱۹۸۹ اسیسی<sup>۱۰</sup>، کارگاه آموزشی ۱۹۹۰ ژاپن- ایالات متحده<sup>۱۱</sup>، کارگاه آموزشی ۱۹۹۲

---

1. Tohoku  
 2. Sendai  
 3. Tokyo  
 4. Department of Scientific and Industrial Research  
 5. Italy  
 6. Gruppo de Lavero Isolamento Sismics  
 7. Tianjin  
 8. Workshops  
 9. Nz-Japan  
 10. Assisi  
 11. US- Japan

توکیو برگزار شده است و در برنامه اجلاس‌های بین‌المللی، منطقه‌ای و ملی مهندسی زلزله (نظیر نهمین و دهمین کنفرانس جهانی مهندسی زلزله سال ۱۹۹۸ توکیو و ۱۹۹۲ مادرید، اجلاس‌های پاسینیفیک<sup>۱</sup> ۱۹۸۷ و ۱۹۹۱، چهارمین کنفرانس ایالات متحده در سال ۱۹۹۰) نیز این موضوع مطرح و موارد کاربردهای خاص آن بحث و بررسی و مورد تبادل نظر قرار گرفته است.

در ایران نیز مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (BHRC)<sup>۲</sup> که باهدف حل مشکلات اجرایی حال و آینده و اندیشه و کوشش در جهت یافتن راه‌حل‌های مناسب برای مسائل اساسی ساخت‌وساز کشور شکل گرفته است با همکاری دانشگاه امیرکبیر (پلی‌تکنیک) مطالعاتی را در زمینه اجرایی شدن جداسازی لغزشی برای سازه‌های بنایی در سال ۱۳۷۴ انجام داده‌اند که نتیجه این مطالعات در غالب کتابی منتشر گردید. این مرکز همچنین مطالعات هدفمندی را بر روی دیگر سیستم‌های جداسازی جهت ارائه استانداردهای طراحی بومی جداسازهای لرزه‌ای در دستور کار دارد.

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES)<sup>۳</sup> نیز با جمع‌آوری مجموعه کاملی از نشریات، مقالات و گزارش‌های تحقیقاتی از سراسر جهان، امکان دسترسی به منابع فنی علمی و تحقیقاتی در زمینه جداسازی لرزه‌ای برای محققان علاقه‌مند به این موضوع را در اختیار دارد.

#### ۱-۴-۲- تاریخچه

تاریخچه ایزولاسیون قدمتی دیرینه دارد و شاید بتوان از معابد ۵ طبقه چوبی پاگوواس که بیش از ۱۲۰۰ سال پیش در ژاپن بر اساس ایجاد استهلاک به‌واسطه اصطکاک در اتصالات ساخته شده‌اند به‌عنوان نخستین اقدامات در این زمینه ولیکن با طراحی بسیار ساده و ابتدایی نام برد. پیشنهاد اولیه یک فلسفه طراحی مقاوم لرزه‌ای که بعدها به جداسازی پایه یا جداسازی لرزه‌ای معروف شد توسط یک پزشک ارائه گردید.

در آگوست سال ۱۹۰۹ پزشکی به نام ج.ا. کلانتارینتز در یکی از شهرهای شمالی انگلستان به نام اسکار بورو نامه‌ای به رئیس مؤسسه زلزله‌شناسی شیلی در سانتیاگو نوشت و در آن روش نوینی را برای ساختن بناهای مقاوم در برابر زلزله معرفی کرد. مطابق نظر وی «ساختمان‌هایی که به این صورت ساخته شوند می‌توانند با ایمنی کامل در مناطق لرزه‌خیز به کار گرفته شوند چراکه به دلیل وجود مرزهای آزاد روغن‌کاری شده، شدت زمین‌لرزه اهمیت خود را از دست می‌دهد». کلانتارینتز در نامه‌ای دیگر که برای اداره ثبت اختراعات فرستاد، ادعا کرد که ساختمان‌هایی که بر روی «دزدهای آزاد» و لایه‌ای از ماسه نرم، میکا یا تالک<sup>۴</sup> (سیلیکات منیزیم طبیعی) ساخته شوند، به هنگام وقوع زلزله، لغزیده و سبب کاهش نیروهای لرزه‌ای وارد به سازه می‌شوند.

دکتر کلانتارینتز در نامه خود چنین اظهار نمود «من استفاده از گوی‌های غلتان را مهروموم‌ها پیش از آنکه در ژاپن انجام شود، ۲۵ سال پیش وقتی که هنوز هیچ سندی ارائه نشده بود ابداع نموده‌ام»

1. Pacific Conferences  
2. Building and Housing Research Center  
3. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.  
4. Talc

چنین به نظر می‌رسد که منبع آغازین این حرکت بدون تردید به آقای جان میلن<sup>۱</sup> برمی‌گردد که در سال‌های ۱۸۷۵ تا ۱۸۹۵ استاد مهندسی معدن در توکیو بود. در طول این دوره میلن به پدیده زلزله بسیار علاقه‌مند شد. او تعدادی لرزه‌نگار را اختراع و تکمیل نمود. میلن به کشفیات و تحقیقات بی‌سابقه‌ای در لرزه‌شناسی ادامه داد به طوری که او را اغلب به‌عنوان پدر لرزه‌شناسی مدرن می‌شناسند. او همچنین روش‌هایی در طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله منتشر نمود که هنوز هم با ارزش است. در آن هنگام در دانشگاه توکیو او یک نمونه از ساختن جداسازی شده را به کمک گوی‌هایی ساخت، بدین شکل که صفحات چدنی با لبه‌هایی شبیه به نعلبکی بر روی سر شمع‌ها قرار می‌گرفتند و گوی‌ها بر روی این صفحه قرارداد می‌شد، سپس ساختمان توسط یک صفحه فولادی شکل مقعر که بر روی گوی‌ها قرار می‌گرفت به آن متصل می‌گردید.

ساختمان تحت تحریکات زلزله مورد آزمایش و اندازه‌گیری قرار گرفت و در سال ۱۸۸۵ او این تجربه را طی گزارشی به انجمن علوم پیشرفته بریتانیا ارائه نمود. از آنجایی که او از عملکرد ساختمانش در برابر نیروهای باد کاملاً راضی نبود لذا سیستم جداساز را تغییر داد و طی گزارشی در سال ۱۸۸۶ طرح جدیدش را به انجمن ارائه کرد. اولین گوی‌ها دارای قطر ۱۰ اینچ بودند و توپ‌ها به قطر ۸ و ۱۰ اینچ نیز به ترتیب آزمایش شدند. در نهایت هریک از پایه‌های ساختمان بر روی ساچمه‌های چدنی به قطر ۰/۲۵ اینچ (۰/۶ سانتیمتر) تثبیت شدند. طراحی نهایی به نحو مشهودی تحت بارهای زلزله دارای عکس‌العمل موفقیت‌آمیزی بودند.

اما احتمالاً اولین کسی که مفهوم قرار دادن سازه بر روی یک جداساز انعطاف‌پذیر را به‌طور اجرایی در ساختمان‌سازی به کاربرد آقای فرانک لوید رایت<sup>۲</sup> بود که در طراحی هتل امپریال توکیو در سال ۱۹۲۱ استفاده نمود. منطقه‌ای که بنا بود هتل در آن احداث گردد از یک‌لایه ۲/۵ متری خاک نسبتاً مناسب تشکیل شده بود که در زیر آن یک لایه خاک بسیار نرم قرار داشت. به نظر آقای رایت این لایه می‌توانست به‌عنوان یک بالشتک انعطاف‌پذیر برای کاهش ضربات بزرگ استفاده شود. بنابراین وی ساختمان را توسط تعداد زیادی شمع تنها به لایه فوقانی متصل نمود. در سال ۱۹۲۴ این سازه تحت اثر زلزله شدید قرار گرفت و با وجود اینکه ساختمان دارای ملحقات غیر سازه‌ای و تزئینی زیادی بوده و قاعداً می‌بایست دچار خسارت‌های زیادی می‌شد ولی ساختمان به نحو بسیار مطلوبی عمل نمود و خسارات وارده به آن فوق‌العاده ناچیز بود.

بعد از زلزله بزرگ کانتو<sup>۳</sup> در سال ۱۹۲۳ انواع اختراعات برای سیستم‌های ایزولاسیون لرزه‌ای در ژاپن توسعه یافت به‌عنوان مثال می‌توان از سیستم ستون دابل ناکومورا<sup>۴</sup> در سال ۱۹۲۷ و یا سیستم تکیه‌گاه غلتکی اوکا<sup>۵</sup> در سال ۱۹۲۸ نام برد. سیستم پیشنهادی اوکا در سال ۱۹۳۴ در ساختمان باک فودو به کار رفت.

در سال ۱۹۲۹ رابرت ولادیلان دمووناک<sup>۶</sup> از ولینگتون<sup>۷</sup> نیوزلند در ارتباط با یک صفحه که بین کف ساختمان و پایه صلب آن قرار می‌گیرد بحث می‌کند این صفحه ترکیبی از موادی است که شوک‌های وارده به سازه را حذف و یا به حداقل می‌رساند.

---

1. Jahn Milne  
2. Frank Lloyd Wright  
3. Contoo  
4. Nacamura  
5. Ohka  
6. Robert Wladilas Demontalk  
7. Wellington



در سال ۱۹۳۹ آقای مارتل<sup>۱</sup> فرضیه‌ای به نام ایده طبقه اول انعطاف‌پذیر<sup>۲</sup> را پیشنهاد نمود. در این روش سختی ستون‌های طبقه اول بسیار کم‌تر از سختی ستون‌های طبقات فوقانی در نظر گرفته می‌شود و لذا تحت اثر زلزله بیشتر تغییر مکان‌ها در طبقه اول متمرکز می‌گردید.

برای اینکه این روش در کاهش شتاب طبقات مؤثر باشد باید ستون‌های طبقه اول تغییر شکل‌های زیادی را تحمل کنند. جابجایی زیاد در طبقه اول و وجود وزن طبقات بالایی باعث افزایش شدید اثر  $P-\Delta$  شده که نهایتاً به ناپایداری سازه می‌انجامد. در این روش فرض می‌گردد که ستون‌های طبقه اول در محدوده الاستیک عمل کرده و لذا استهلاک سازه بسیار پایین است.

از سال ۱۹۲۰ به بعد نمونه‌های دیگری نیز از عملکرد مناسب ساختمان‌ها در برابر زلزله مشاهده شده است. به‌عنوان مثال در زلزله ۱۹۲۳ لانگ بیچ<sup>۳</sup> مشاهده شده که برخی از ساختمان‌های آجری غیرمسلح به سبب لغزش بر روی شبکه تیرهای تراز کف، تنها به میزان جزئی آسیب دیده‌اند.

همچنین در زلزله ۱۹۳۰ دبری<sup>۴</sup> در آسام و بی‌هار<sup>۵</sup> نیال در سال ۱۹۳۴ مشاهده شد که ساختمان‌هایی که به دلیل کافی نبودن اتصال سازه به پی آزادی حرکتی در تکیه‌گاه یافته‌اند دچار خرابی کمتری شده‌اند. این اتفاق بعدها در زلزله ۱۹۷۶ شان<sup>۶</sup> چین نیز مشاهده گردید. این مشاهدات موجب ارائه متدی جدید در ایزولاسیون لرزه‌ای یعنی استفاده از تکیه‌گاه‌های لغزشی<sup>۷</sup> در جهان گردید.

#### ۱-۴-۳- تحقیقات عددی انجام‌شده در مورد جداسازی‌های لاستیکی

مطالعات عددی<sup>۸</sup> بسیاری در زمینه تحلیل سازه‌های جداسازی شده انجام گرفت است که می‌توان آن‌ها را به دودسته کلی تقسیم کرد:

الف) سازه‌های متکی بر جداگرهای ارتعاشی خطی.

ب) سازه‌های متکی بر جداگرهای ارتعاشی غیرخطی هیسترتیک.

که در زیر به بررسی تاریخچه این دو نوع می‌پردازیم:

#### ۱-۴-۳-۱ - سازه‌های متکی بر جداگرهای ارتعاشی خطی

سازه جداسازی شده معمولاً روی پایه‌هایی قرار می‌گیرد که به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای، در مقابل بارهای افقی، انعطاف‌پذیر است. فرض می‌شود که سیستم جداگر، در قسمت پی سازه قرار گرفته و در حرکات موجی رو سازه نقشی ندارد. به‌عنوان اولین تقریب فرض می‌شود که سازه صلب بوده و در جهت جانبی با تغییر مکان ثابت در تمام ارتفاع تغییر شکل می‌دهد، این تغییر مکان مربوط به اولین مورد ارتعاشی سیستم جداسازی شده، می‌باشد. بعضی از

1. Martel  
2. Flexible First Story  
3. Long Beach  
4. Dhubri  
5. Bihar  
6. Tang Shan  
7. Sliding Bearings  
8. Numeical study

سیستم‌های جداسازی شده که در عمل استفاده می‌شوند از نوع خطی می‌باشند. سیستم جداگر خطی دارای سختی برشی<sup>۱</sup>  $K_b$  و ضریب میرایی وابسته به سرعت<sup>۲</sup>  $C_b$  می‌باشد.

**Tsai, Kelly [Tsai, et al.1988]** رفتار غیر کلاسیک مودهای<sup>۳</sup> سازه جداسازی را بررسی کردند. البته به‌منظور ساده‌سازی عبارت و مشتقات، آن‌ها فقط مود اول سازه را در نظر گرفته‌اند و برای سازه با جداساز دو مود در نظر گرفته شده است. آن‌ها در این مورد نیز رفتار سازه را برحسب شکل‌های مودی با پایه ثابت نشان داده‌اند. این مقاله درصد مقایسه رفتار سازه جداسازی شده پنج طبقه تحت شتاب زلزله‌های ال سنترو<sup>۴</sup> و پارک فیلد<sup>۵</sup> که به‌صورت مودی محاسبه گردیده، می‌باشد.

**Tsai, Kelly [Tsai, et al.1989]** مجدداً رفتار یک سازه را بر روی جداسازهای خطی که به‌صورت جرم و فنر در پایه و میراگر مدل شده است نسبت به شکل‌های مودی در سیستم مشابه با پایه ثابت بررسی کرده‌اند. آن‌ها فرض کرده‌اند که سیستم جداساز دارای میرایی کلاسیک است که حتی اگر رو سازه نیز دارای میرایی کلاسیک باشد، یک حالت کلی نیست. آن‌ها عبارات مستقیمی برای زمان تناوب‌ها و شکل‌های مودی اولین مود سازه جداسازی شده ارائه کرده‌اند. عبارت عمومی آن‌ها برای فرکانس‌های مودهای بالاتر به‌صورت تکراری است، اما یک عبارت تقریبی مستقیم نیز برای حالتی که مودهایی با پایه ثابت دارای فرکانس‌های کاملاً جدا هستند تعیین نموده‌اند.

**Miranda و همکاران در سال ۱۹۹۴ [Miranda, et al. 1994]** یک مدل ریاضی برای پاسخ‌های سازه‌های جداسازی شده خطی ارائه دادند که در آن بنا به تأثیر غالب مود اول سازه جداسازی شده و تأثیر کم مودهای کلاسیک بالاتر سازه جداسازی شده، سازه چندطبقه تبدیل به یک سازه دو درجه آزادی می‌شود. آن‌ها در این مقاله روابط ریاضی حاکم بر این مدل را نیز ارائه داده‌اند که در آن جداگر لرزه‌ای به‌عنوان یک درجه آزادی و سازه قرار گرفته بر روی آن نیز به‌عنوان درجه آزادی دیگر در نظر گرفته می‌شود.

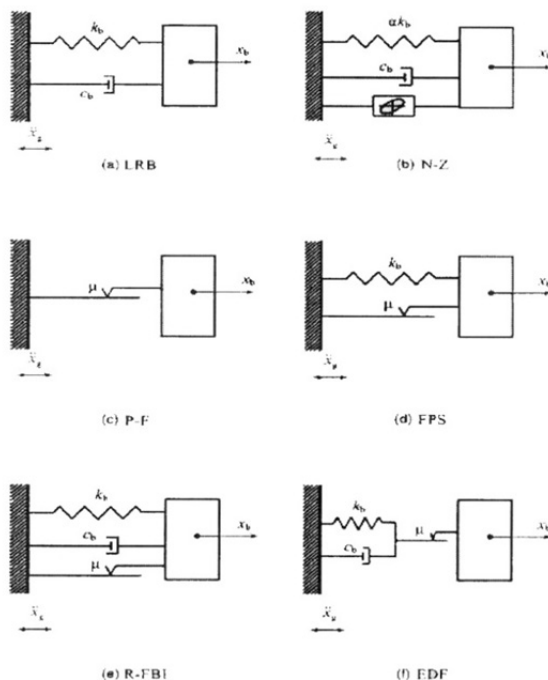
**Jangid, Vasant [Vasant, et al.2003]** نیز پاسخ لرزه‌ای سازه جداسازی شده که در پایه با سازه مجاور خود در مدت زلزله برخورد می‌کند، بررسی کردند. آن‌ها در مقاله تأثیر شش نوع ایزوله گر لرزه‌ای را در دو حالت سازه بدون برخورد با سازه مجاور در پایه و در حالت برخورد با سازه مجاور خود در پایه مورد بررسی قرار دادند. شش نوع جداگر لرزه‌ای عبارت‌اند از:

الف) تکیه‌گاه‌های لاستیکی لایه‌لایه<sup>۶</sup>

ب) تکیه‌گاه‌های سربی-لاستیکی سیستم نیوزلند<sup>۷</sup>

پ) سیستم‌های اصطکاکی خالص<sup>۸</sup>

- 
1. Shear stiffness
  2. Velocity
  3. El – Classical Mode
  4. El Centro
  5. Fild park
  6. Laminated Rubber Bearings
  7. Lead-Rubber Bearings
  8. Pure Friction System



شکل ۱-۱ - دیگرام شماتیک سیستم‌های LRB,NZ, P-F,FPS, R-FBI,EDF [Vasant,2003]

- (ج) سیستم‌های اصطکاکی پاندولی<sup>۱</sup>  
 (چ) جداسازهای اصطکاکی - ارتجاعی<sup>۲</sup>  
 (ح) سیستم EDF<sup>۳</sup>

آن‌ها در این مقاله تأثیر فاصله بین سازه جداسازی شده و سازه مجاور را بر پاسخ جابجایی پایه و شتاب طبقه آخر سازه بررسی کردند.

آن‌ها سازه جداسازی شده را به وسیله دو مود مشخص ساختند، یکی مود مشابه جسم صلب جداساز و دیگری مود دوم سازه و با فرض میرایی کلاسیک برای تجهیزات که با یک سیستم فنر-میراگر-جرم تنها نشان داده شده است.

زمین‌لرزه با استفاده از آزمایش‌های میز لرزان<sup>۴</sup> که بر اساس تئوری قرار داشت بررسی کردند. فرکانس ضربه‌ای

1. Fiction Pendulum System  
 2. Resilient-Friction Base Isolator  
 3. Electric de France System  
 4. Shaking Table

تانک‌های مایعات می‌تواند به فرکانس مود اصلی که اغلب تعیین‌کننده پاسخ سازه‌ی جداسازی شده است، نزدیک باشد. هماهنگ شدن فرکانس‌های طبیعی اغلب تجهیزات دیگر با فرکانس اصلی سازه جداسازی شده، نامحتمل است. فشار وارد بر دیواره‌های منبع‌های آب شامل یک مؤلفه ضربه‌ای<sup>۱</sup> و یک مؤلفه همرفتی<sup>۲</sup> خواهد بود. فشار<sup>۳</sup> ضربه‌ای، ناشی از شتاب دیواره منبع در مقابل سیال است. مؤلفه انتقالی ناشی از امواجی است که سبب تغییرات تراز سطح آزاد سیال شود.

#### ۱-۴-۳-۲- سازه‌های متکی بر جداگرهای ارتعاشی غیرخطی هیسترتیک

سیستم‌های غیرخطی با در نظر گرفتن این فرض که تقریباً تمام آن‌ها را می‌توان به صورت سیستم‌های دوخطی در نظر گرفت، یعنی می‌توان آن‌ها را توسط حلقه‌های هیسترسیس نیرو- تغییر مکان به صورت متوازی اضلاع فرض نمود، ساده‌تر می‌گردد.

Lee [Lee, et al. 1980] رفتار لرزه‌ای سازه‌های نامتعادل پیچشی با و یا بدون جداسازی دوخطی را با استفاده از تحلیل تاریخیچه زمانی<sup>۴</sup> مورد بررسی قرارداد. این بررسی نشان می‌دهد که با نصب سازه بر روی جداسازی دوخطی می‌توان کاهش قابل توجهی در رفتارهای پیچشی و دیگر پاسخ‌ها به دست آورد. مشابه جداسازی خطی، مؤثرترین حالت در سیستم با جداسازی دوخطی نیز در صورتی است که مرکز سختی آن بر مرکز جرم سازه منطبق باشد.

Tsai, Kelly [Tsai, et al. 1985] یک آزمایش با میز لرزان انجام دادند و پاسخ ملحقات متصل شده به طبقه‌ی بالای یک ساختمان اسکلت فلزی پنج طبقه، که بر روی سیستم جداسازی شامل تکیه‌گاه لاستیکی لایه‌ای با و بدون هسته سربی که به منظور ایجاد میرایی هیسترسیس قرارداد می‌شود بررسی نمودند. یکی از نوسانگرها دارای فرکانس طبیعی نزدیک به کوچک‌ترین مود سازه با پایه ثابت بود، درحالی‌که دومین و سومین نوسانگر هماهنگ با فرکانس‌های مود دوم و سوم سازه جداسازی شده، تنظیم شده بود.

Carr, Andronon [Andriono, et al. 1991] مطالعه‌ای اصولی در ارتباط با نیروهای جانبی سازه‌هایی با جداسازی غیرخطی انجام دادند. آن‌ها دریافتند که ضریب غیرخطی بودن ML که به صورت نسبت حلقه هیسترسیس R تعریف شده است، زمان تناوب اصلی سازه جداسازی نشده و میزان رفتار قاب در رو سازه، سه عاملی هستند که اثر اصلی را بر شکل توزیع برش می‌گذارند.

Ahmadi, Fna [Fan, et al. 1990] طیف پاسخ استاندارد کف و طیف فوریه حرکات کف که به طور تجربی توسط کلی و تساوی به دست آمده بود و برای نشان دادن باندهای فرکانسی که در حرکات کف برای راندن ملحقات انرژی وجود دارد را به دست آوردند. آن‌ها اختلاف بیشتری در سیستم‌های جداسازی مختلف را با مقایسه طیف پاسخ کف در تزارهای مختلف سازه نشان دادند.

Ssin, Chi [Chi, et al. 1999] در مقاله‌ای یک سازه چهار طبقه که دارای تقارن در دو جهت  $x$  و  $y$  بود را مورد بررسی قراردادند. آن‌ها در این تحقیق یک سیستم جداسازی شده را به صورت سه‌بعدی مدل کرده و آن را به سیستم کنترل متفاوت مجهز نمودند. سیستم‌های کنترل عبارت‌اند بودند از:

1. Shock Component
2. Translational Component
3. Pressure
4. Time History

الف) کنترل LQC<sup>۱</sup>ب) کنترل RS<sup>۲</sup>ج) کنترل AS<sup>۳</sup>

آن‌ها نشان دادند که در سیستم‌های نیمه فعال (SA) جابجایی طبقه آخر سازه به میزان قابل توجهی کم می‌شود. Cheng [Cheng, et al. 2002] رفتار مکانیکی تکیه‌گاه‌های لاستیکی لایه با پارامترهای مختلف طراحی را طی چند مثال مورد بررسی قرارداد. او از تئوری هرنینگ<sup>۴</sup>، برای به دست آوردن ماتریس سختی و نیروهای وارد بر گره‌های ایزوله گر استفاده کرد. وی بیشتر کمانش در ایزوله گرهای استوانه‌ای شکل و مخروطی شکل را در دو حالت ایزوله گر دوسرگیردار و ایزوله گر یکسر گیردار مفصل مورد بررسی قرارداد.

Jangid, Vasant [Vasant, et al 2004] نیز تأثیر خصوصیات مختلف ایزوله گر غیرخطی را بر پاسخ سازه بررسی کردند. آن‌ها برای این درس یک سازه پنج طبقه که بر جداساز لرزه‌ای قرار داشت را مورد بررسی قراردادند. آن‌ها این سیستم را برای دو حالت ایزوله گر با سختی دوخطی و ایزوله گر با سختی مؤثر مورد بررسی قراردادند.

حالت ایزوله گر با سختی دوخطی نیز برای دو مقدار جابجایی جاری‌شدگی پایه بررسی شد که مقادیر آن برابر ۲/۵ و ۱۰<sup>-۴</sup> سانتی‌متر بود. حالتی که جابجایی جاری‌شدگی پایه برابر ۲/۵ سانتی‌متر بود جابجایی طبقه آخر و جابجایی ایزوله گر کمتر از حالت جابجایی جاری‌شدگی برابر ۱۰<sup>-۴</sup> سانتی‌متر به دست آمد.

سختی مؤثر نیز با توجه به حداکثر و حداقل مقدار جابه‌جایی و نیروی ایجادشده در ایزوله گر در هر حلقه<sup>۵</sup> به دست می‌آید و سپس به وسیله آن می‌تواند زمان تناوب و میرایی ایزوله گر و در نهایت تاریخچه زمانی جابه‌جایی سازه و ایزوله گر را به دست آورد.

## ۱-۵- خلاصه کتاب

کتاب حاضر تحت عنوان «بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود فلزی با جداساز لغزشی» به بررسی بهبود سطح عملکرد سازه با استفاده از جداساز لغزشی می‌پردازد. در این کتاب یک ساختمان موجود شش طبقه با کاربری تجاری، مسکونی که تغییر کاربری داده و تبدیل به کلینیک شده را مورد بررسی قرارداد و به منظور انجام آن، سازه مورد نظر به صورت سه بعدی در نرم‌افزار ETABS مدل‌سازی شده است.

کتاب حاضر در پنج فصل تنظیم گردیده که عبارت‌اند از:

در فصل اول تعریف مسئله و ضرورت تدوین ارائه‌شده و در فصل دوم مروری نسبتاً کامل بر مفاهیم بهسازی لرزه‌ای صورت پذیرفته است. در فصل سوم بررسی ضوابط آیین‌نامه‌ای و نحوه مدل‌سازی جداسازها مورد مطالعه قرار گرفته است. در فصل چهارم سازه فوق‌الذکر مدل‌سازی شده و مطالعات عددی بر روی آن صورت پذیرفته که این مطالعات در دو بخش شامل:

---

1. LQC Control
2. Risk Sensitive Control
3. Semi Active Control
4. Haring's Theory
5. Loop

- ۱- مدل سه‌بعدی جهت آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه
- ۲- مدل بهسازی شده توسط جداساز لغزشی که مجهز به سیستم بازگرداننده می‌باشد.  
در فصل پنجم خلاصه نتایج حاصل ارائه شده است.

## فصل دوم

### نگرشی بر مبانی و مفاهیم بهسازی لرزه‌ای

#### ۱-۲-۱ - مقدمه

روند تکمیل آیین‌نامه‌های طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله به‌طورکلی آیین‌نامه‌ها از لحاظ جنبه‌های بررسی عملکردی به سه دسته آیین‌نامه‌های نسل اول، آیین‌نامه‌های نسل دوم و آیین‌نامه‌های نسل جدید قابل تقسیم هستند که ذیلاً به بیان ویژگی و تفاوت‌های فلسفی این سه دسته می‌پردازیم.

#### ۱-۲-۱-۱ - نسل اول آیین‌نامه‌ها

آنچه در تدوین نسل اول آیین‌نامه‌ها مطرح شد، رسیدن به این مقصود بود که با طراحی بر اساس این ضوابط، ساختمان‌ها در برابر زلزله‌های شدید مقاومت نمایند و تلفات جانی به حداقل برسد؛ به عبارت دیگر اقدامی که صورت گرفت آن بود که برای ساختمان‌ها، یک زلزله خاص تعریف شده و استقامت ساختمان‌ها و تلفات جانی حداقل به‌عنوان دو خواسته یا شرط حاکم بر ضوابط تعیین گردید.

حدود ۸۰ سال پیش اولین آیین‌نامه‌های طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله تدوین گشتند [۳۳]. در این آیین‌نامه‌ها زلزله به‌صورت نیروی جانبی اضافی منظور گردید که در هنگام طراحی ساختمان باید علاوه بر بارهای ثقلی، بر ساختمان اعمال شود. نیروی فوق به‌صورت درصدی از وزن ساختمان بود.

در پی رخداد زلزله مسینا<sup>۱</sup> در کشور ایتالیا که در سال ۱۹۰۹ میلادی رخ داد و ۱۶۰۰۰۰ نفر را به کام مرگ کشید، کمیت‌های از متخصصان و مهندسان ایتالیایی برای بررسی خسارت‌های مالی و جانی زلزله یادشده تشکیل شد. این کمیته توصیه کرد که برای طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله باید نیرویی معادل یک دوازدهم بارهای ثقلی اعمال شده به ساختمان ( $W/12$ )، به‌عنوان نیروی جانبی در نظر گرفته شود، از طرفی دیگر برای طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله استفاده از روش اعمال بار جانبی به ساختمان در کشور ژاپن هم موردقبول واقع شد، اگرچه متخصصان ژاپنی دارای دو نوع فکر متفاوت بودند، تفکر اول اینکه ساختمان‌ها باید انعطاف‌پذیر باشند و تفکر دیگر اینکه

ساختمان‌هایی را مقاوم در برابر زلزله می‌دانست که از سختی و صلبیت کافی برخوردار باشد. در مزایا و معایب هر یک از دو نگرش همچنان اختلاف نظر وجود داشت تا اینکه در سال ۱۹۲۳ زلزله مهیب توکیو اتفاق افتاد و در پی آن ضریب یک‌دهم بار ثقلی (0.1W) برای بار جانبی و محدودیت ۳۳ متر برای ارتفاع در نظر گرفته شد. در ایالت کالیفرنیا آمریکا ضوابط مربوط به اعمال بار جانبی تا سال ۱۹۳۳ که مصادف با زلزله لانگ بیچ<sup>۱</sup> بود به تأخیر افتاد. زلزله لانگ بیچ در ساعت ۱۷:۵۵ بعدازظهر اتفاق افتاد و در اثر آن بسیاری از ساختمان‌ها و از جمله مدارس ویران گردیدند (شکل ۱-۱). این زلزله زنگ خطر را به صدا درآورد، و این سؤال مطرح شد که اگر زلزله قبل از تعطیل مدارس یعنی چند ساعت جلوتر اتفاق می‌افتاد چه حادثه ناگواری می‌توانست رخ دهد؟ این رخداد سبب شکل‌گیری ایده انتظار عملکرد متفاوت برای انواع ساختمان‌ها در هنگام وقوع زلزله در ذهن مهندسان شد. بر همین مبنا در ویرایش بعدی آیین‌نامه آمریکا UBC.1935 ضریب زلزله برای مدارس از ۸٪ به ۱۰٪ افزایش یافت.



شکل ۱-۲- تصویر مدرسه ویران‌شده در اثر زمین‌لرزه لانگ بیچ

در اولین روابط ارائه‌شده طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله برای کلیه ساختمان‌ها صرف‌نظر از نوع کاربری آن‌ها از نیروی زلزله یکسانی استفاده گردید.

## ۲-۱-۲- نسل دوم آیین‌نامه‌ها

در نسل دوم آیین‌نامه‌ها، همانند نسل اول تمرکز بر پیش‌بینی میزان نیروی ناشی از زلزله بود تا بتوانند با تعیین آن مقدار جابه‌جایی نسبی ساختمان را به حداقل برسانند، بحث حول این موضوع بود که با حفظ ایستایی ساختمان در زلزله‌های شدید، تلفات جانی به حداقل برسد، فقط یک موضوع به آن اضافه شد و آن اینکه بناهای ضروری و دارای کاربری خاص، پس از وقوع زلزله شدید، بدون آسیب عمده سازه‌ای قابل‌استفاده باقی بمانند.



اهمیت عملکرد متفاوت ساختمان‌ها در برابر زلزله با توجه به نوع کاربری آن‌ها در دهه ۷۰ با معرفی ضریب اهمیت در محاسبه نیروهای زلزله وارد گردید. این ضریب برای دسته‌های متفاوت از کاربری ساختمان‌ها و با توجه به نوع اهمیت آن‌ها متغیر بود. در ایران نیز پس از زلزله بندرعباس در سال ۱۳۵۵ و همچنین زلزله طبرس در سال ۱۳۵۷ نیاز شدیدی برای تدوین ضوابط جدید در محاسبه و طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله احساس گردید. بدین منظور فصل هشتم استاندارد ۵۱۹ برای محاسبه نیروهای حاصل از زلزله پیشنهاد گردید. در این استاندارد نیز با معرفی ضریب اهمیت در محاسبه نیروهای حاصل از زلزله انتظار می‌رفت که ساختمان‌ها با کاربری متفاوت سطح عملکرد متفاوتی را در مقابل زلزله از خود نشان دهند. به طوری که ضریب اهمیت ساختمان‌هایی که پس از وقوع زلزله می‌بایستی برای خدمات اضطراری دایر باقی بمانند نظیر بیمارستان‌ها، درمانگاه‌ها، مراکز آتش‌نشانی و غیره برابر  $\frac{1}{25}$  منظور شد. اماکن عمومی مانند مساجد، تکایا و هر ساختمانی که اساساً برای اجتماع ۳۰۰ نفر با بیشتر (در یک سالن) مورد استفاده قرار می‌گیرند برابر  $\frac{1}{15}$  و در مورد سایر ساختمان‌ها برابر ۱ انتخاب گردید.

اگرچه ضریب اهمیت باهدف تغییر سطح عملکرد ساختمان‌ها با کاربری‌های متفاوت معرفی شده است. اما به‌جای تأمین سطح عملکرد بالاتر در ساختمان، نقش تأمین ضریب اطمینان بالاتر را برای حفظ ایمنی جانی در ساختمان‌های بااهمیت زیاد بازی می‌کند. به عبارت دیگر با اعمال ضریب اهمیت بر مقدار برش پایه اضافه می‌گردد تا بدین وسیله ساختمان از مقاومت بالاتر برخوردار شده و در سطح قوی‌تری از لرزش زمین وارد محدوده رفتار غیر ارتجاعی خود شود.

### ۲-۱-۳- نسل سوم یا نسل جدید آیین‌نامه‌ها

ساختمان‌ها باید در برابر هر سطح خطری عملکرد مورد انتظار را از خود نشان دهند یا به عبارت دیگر ساختمان سختی، مقاومت و شکل‌پذیری لازم را برای تأمین سطح عملکرد انتخابی را داشته باشد. در حال حاضر با توجه به افزایش دانش مهندسی زلزله، تجربیات زلزله‌های گذشته، آگاهی از رفتار غیرخطی اعضا و در دسترس بودن نرم‌افزارهایی که بتوانند رفتار غیرخطی سازه‌ها را مدل نمایند می‌توان ادعا نمود که ابزار لازم برای کنترل سازه در هر سطح عملکردی فراهم گردیده است.

در خلال ۱۰ سال گذشته آیین‌نامه‌های ATC40, FEMA-273, FEMA-356 و FEMA-360 فلسفه طراحی بر اساس عملکرد را در بهسازی ساختمان‌های موجود مورد استفاده قرار دادند و همچنین آیین‌نامه‌های VISION2000, FEMA-360 نیز همین فلسفه را برای طراحی ساختمان‌های جدید به کاربرد و در ایران نیز از همین فلسفه برای ارزیابی لرزه‌ای و بهسازی ساختمان‌های موجود برای هر سطح عملکردی استفاده شده است. در کشور ژاپن نیز در سال ۲۰۰۰ فلسفه طراحی بر اساس عملکرد در قانون استاندارد ساختمان این کشور برای طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های جدید مورد استفاده قرار گرفت.

### ۲-۲- مبنای دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود

این دستورالعمل به منظور ایجاد ابزار عملی برای ارزیابی و بهسازی ساختمان‌های موجود تدوین شده است. بنابراین انتظار می‌رود ساختمان‌هایی که بر اساس دستورالعمل بهسازی می‌شوند در هنگام وقوع زلزله عملکردی مطابق سطح

موردنظر داشته باشند. اما به‌هرحال انطباق مشخصات سازه و طرح بهسازی با این دستورالعمل نمی‌تواند متضمن سطح عملکرد موردنظر باشد زیرا این دستورالعمل با استفاده از دانش مهندسی روز تدوین شده است و دانش مهندسی نیز به‌طور مستمر با افزایش اطلاعات و تجربیات حاصل از وقوع زلزله‌ها در حال پیشرفت است به همین جهت می‌توان انتظار داشت که به‌تدریج با دقت بیشتری بتوان به سطح عملکرد موردنظر رسید. روش‌های ارائه شده در این دستورالعمل برای بهسازی ساختمان‌های موجود است. استفاده از آیین‌نامه‌های طرح ساختمان در برابر زلزله برای طرح بهسازی مناسب نمی‌باشد زیرا آیین‌نامه‌های جدید طراحی ساختمان به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که طراح را به طرح ساختمان منظم و شکل‌پذیر همراه با مصالح مرغوب تشویق می‌کند. اما ساختمان‌های موجود دارای این مشخصات نیستند و نمی‌توان آن‌ها را با ضوابط آیین‌نامه‌های جدید طراحی منطبق نمود به همین جهت لازم است طرح بهسازی آن‌ها با توجه به مشخصات واقعی ساختمان، نقاط ضعف و با استفاده از تمام ظرفیت اجزاء ساختمان انجام شود.

این دستورالعمل برای طرح بهسازی تمام ساختمان‌ها مستقل از میزان اهمیت، نوع بهره‌برداری و تاریخچه ساختمان قابل استفاده است. اما در مورد ساختمان‌های خاص مانند آثار تاریخی و... لازم است ضوابط و سیاست‌های کشور نیز مدنظر قرارداد شود. برای بهسازی اجزای سازه‌ای (تیرها، ستون‌ها و...) و اجزاء غیر سازه‌ای (دیوارهای داخلی، سقف کاذب، تجهیزات مکانیکی و برقی و...) این دستورالعمل قابل استفاده است. اما با توجه به جمیع جوانب می‌توان با احتیاط از آن برای بهسازی سازه‌های غیر ساختمانی مانند پایه‌های خطوط لوله، دکل‌های انتقال نیرو و منابع هوایی آب و غیره استفاده کرد [۳۱].

علاوه بر روش‌های افزایش ظرفیت باربری و تغییر شکل اجزای در این دستورالعمل راه‌کارهای کاهش آثار زلزله نیز مانند کاستن بی‌نظمی و جرم ساختمان، جداسازی لرزه‌ای و سیستم‌های جذب انرژی ارائه شده است. طراحی ساختمان‌های جدید و ارزیابی ساختمان‌هایی که فقط تحت بار ثقلی و باد قرار دارند در محدوده کاربرد این دستورالعمل نمی‌باشند.

سطوح عملکرد در این دستورالعمل برحسب میزان ترک‌خوردگی یا خرابی اجزای سازه‌ای و غیره سازه‌ای تعریف می‌شوند تا انتخاب سطح عملکرد مناسب توسط طراح یا صاحب ساختمان ساده شود. اما باید توجه داشت که روش‌های ترمیم ساختمان‌های آسیب‌دیده خارج از محدوده کاربرد این دستورالعمل می‌باشد لذا نباید خرابی‌ها و ترک‌خوردگی‌های ناشی از زلزله را شاخص عملکرد ساختمان آسیب‌دیده موجود در نظر گرفت.

## ۲-۱- مفاهیم و فلسفه طراحی بر اساس عملکرد

بعد از چند زلزله مخرب در دهه گذشته، این نتیجه حاصل شد که استانداردهای طراحی لرزه‌ای حاضر باید به‌صورت بنیادی اصلاح شوند تا بتوانند پاسخ‌های ساختمان‌ها را پیشگویی کنند. بر اساس این نیازها مهندسی زلزله بر اساس عملکرد توسعه پیدا کرد.

هدف طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد این است که مهندسان را قادر می‌سازد تا سازه‌هایی طراحی کنند که عملکردشان قابل پیش‌بینی باشد. البته مفهوم طراحی بر اساس عملکرد چیز جدید نیست و آیین‌نامه‌های ساختمانی همیشه به این منظور شکل می‌گیرند که یک سطح مشخص از عملکرد را تحت یک بارگذاری طراحی ارائه نمایند.

در حال حاضر فلسفه کلی طراحی لرزه‌ای برای سازه‌های معمول که در آیین‌نامه‌های طرح لرزه‌ای دنیا به آن اشاره می‌شود به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

الف) سازه، زمین‌لرزه‌های کوچک و خفیف را بدون خسارت سازه‌ای و غیر سازه‌ای پشت سر بگذارد.  
ب) سازه، زمین‌لرزه‌های متوسط را بدون خسارت سازه‌ای ولی با خسارت جزئی در اعضای غیر سازه‌ای پشت سر بگذارد.

ج) سازه، زمین‌لرزه‌های شدید و نادر را بدون فروریزش پشت سر بگذارد.  
با این حال، تعریف عملکرد برای ساختمان‌ها در این آیین‌نامه‌ها کاملاً مبهم و غیردقیق است، زیرا اهداف عملکردی مثل توانایی تعمیر سازه، محدود کردن خسارات و تغییر مکان‌های جانبی به حدود دلخواه، به صورت دقیق در آیین‌نامه‌ها اشاره نشده است و از طرفی دلایلی باعث شده‌اند که آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای متحول شوند این دلایل عبارت‌اند از:

۱- افزایش دانش مهندسان درباره چگونگی وقوع زمین‌لرزه‌ها و حرکت‌های زمین و خصوصیات پاسخ لرزه‌ای سازه.

۲- نواقص روش‌های طرح آیین‌نامه‌ای موجود که نه یک روش طراحی کارآمدی و قوی برای ارزیابی عملکرد سازه طرح شده در اختیار طراح قرار می‌دهند و نه کارفرما را برای انتخاب یک سطح عملکرد مناسب برای سازه و تصمیم‌گیری درباره هزینه آن در برابر سطوح مختلف تحریک لرزه‌ای یاری می‌کنند.

در زلزله‌های اخیر مانند لوماپریتا (۱۹۸۹)، نورث ریچ (۱۹۹۴) و هیگو-کوبه (۱۹۹۵) خسارت زیاد اقتصادی ناشی از این زلزله‌ها، منجر به مباحث و دستورالعمل‌هایی برای طراحی بر اساس عملکرد گردید.

روش‌های طراحی در اکثر آیین‌نامه‌های فعلی بر اساس معیار مقاومت می‌باشد. در حالی که تحقیقات و رفتار ساختمان‌ها در زلزله‌های اخیر نشان دادند که مقاومت نمی‌تواند معیار مناسبی باشد و افزایش مقاومت لزوماً به معنای افزایش ایمنی نمی‌باشد. بنابراین در آیین‌نامه‌های جدید به جای معیار مقاومت از معیار رفتار، برای طراحی استفاده می‌کنند. توسعه اصول طراحی بر اساس رفتار در دهه ۱۹۷۰ تأکیدی بر درک این مطلب بود که نحوه توزیع مقاومت در یک ساختمان مهم‌تر از مقدار خاص برش پایه طراحی است، همچنین مشخص شد که یک قاب ساختمانی تحت اثر زلزله زمانی که مفاصل پلاستیک در تیرها تشکیل شود بهتر از حالتی که مفاصل در ستون‌ها تشکیل شود عمل خواهد کرد (مکانیسم تیر ضعیف- ستون قوی).

در اثر وقوع زلزله‌های شدید، خسارت قابل‌ملاحظه‌ای به علت رفتار غیر الاستیک سازه‌ها به آن‌ها وارد می‌شود، زیرا با توجه به منحنی نیرو- تغییر مکان، سازه در اثر وقوع زلزله‌های شدید، پس از گذر از محدوده الاستیک وارد محدوده غیر الاستیک می‌شود و در این ناحیه تغییرات مقاومت ناچیز بوده و تغییر شکل‌های خمیری که ارتباط نزدیک‌تری با خسارت دارند حاکم می‌شوند. لذا در روش طراحی بر اساس عملکرد، عملکرد غیرخطی اجزای سازه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد و تغییر مکان به جای نیرو به عنوان مناسب‌ترین شاخص رفتار مطرح می‌شود. به همین علت می‌توان رفتار واقعی‌تری از سازه، نسبت به قبل، در صورت وقوع یک زمین‌لرزه مشخص به دست آورد.

### ۲-۲-۲- نواقص روش طراحی لرزه‌ای آیین‌نامه‌های فعلی

هدف اصلی طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد، دخیل کردن کارفرما در انتخاب میزان خطرپذیری در طرح موردنظر، در سطوح مختلف زمین‌لرزه است و این هدف مستلزم معلوم بودن نحوه عملکرد سازه در سطوح مختلف زمین‌لرزه‌ها است. برای رسیدن به این اهداف باید نواقصی را که در روش‌های فعلی وجود دارند شناخته و به رفع آن‌ها پرداخت.

در زیر به برخی از نواقص روش‌های طراحی موجود اشاره می‌شود:

(۱) رفتار سازه تحت زلزله به صورت غیر الاستیک می‌باشد. یعنی سازه تحت کل نیروی زلزله از حالت الاستیک خارج شده و وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. اما به خاطر طراحی الاستیک، در آیین‌نامه‌ها از ضریب کاهش نیروی زلزله  $R$  که ضریب رفتار نامیده می‌شود، استفاده و کل برش را به عدد  $R$  تقسیم می‌کرده و سازه را برای  $1/R$  نیروی زلزله طراحی می‌کنند. با این فرض که سازه رفتار غیرخطی خواهد داشت و در این روش به رفتار غیرخطی تک‌تک اعضا توجه نمی‌شود.

اعمال ضریب کاهش  $R$  از جهات دیگر نیز ایراد دارد:

(الف) در روش طراحی فعلی، عموماً از سختی اولیه سازه و اجزای آن برای تحلیل و همچنین برآورد تقاضای لرزه‌ای استفاده می‌شود ولی از آن طرف با کاهش سطح نیروهای الاستیک به وسیله ضریب کاهش نیرو و اعمال نیروهای به دست آمده بر سازه، تغییر مکان‌هایی حاصل می‌شود که هیچ‌گونه ارتباط منطقی با تغییر شکل‌های غیر الاستیک سازه ندارد.

(ب) رفتار غیر الاستیک، سطح نیروهای مربوط به مود اول را کاهش می‌دهد، درحالی‌که اثر آن بر مودهای بالاتر نسبتاً کم است. بنابراین در روش طراحی بر اساس نیرو که یک ضریب کاهش نیروی ثابت برای همه مودها بکار می‌برد، احتمالاً مودهای بالاتر را بیش از حد دست پایین برآورد می‌کند.

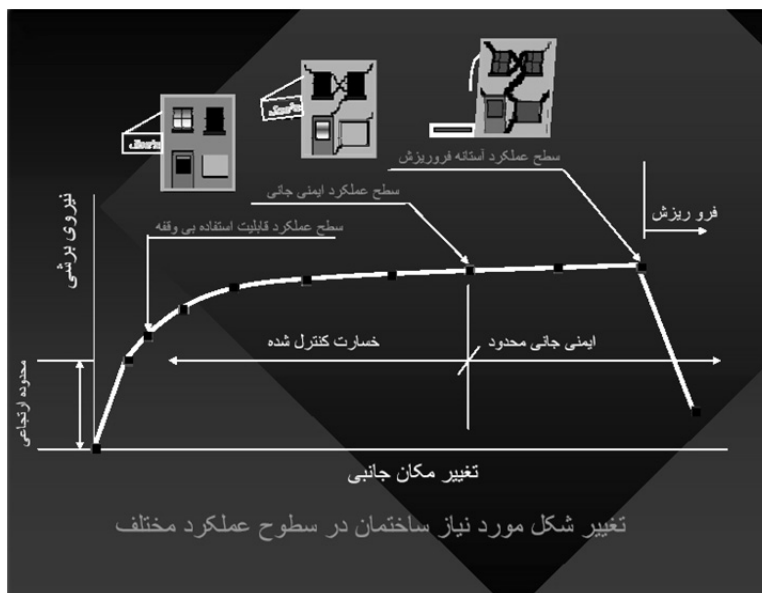
(ج) کاربرد ضرایب کاهش نیرو یا شکل‌پذیری برای طراحی، ریسک غیریکناختی را نتیجه می‌دهد، زیرا شکل‌پذیری یک شاخص ضعیف برای پتانسیل خسارت است. بنابراین دو ساختمان متفاوت طراحی شده با یک آیین‌نامه و با یک ضریب کاهش نیرو (شکل‌پذیری) ممکن است تحت یک زلزله داده شده، سطوح مختلفی از خسارت را تجربه کنند.

(۲) آیین‌نامه‌های فعلی سازه را بر اساس مقاومت طراحی می‌کنند اما این واقعیت وجود دارد که افزایش مقاومت ممکن است ایمنی را بالا نبرد و لزوماً خسارت را هم کاهش نمی‌دهد. توسعه اصول طرح ظرفیت، تأکیدی بر این واقعیت بود که نحوه توزیع مقاومت در یک ساختمان بسیار مهم‌تر از مقدار کل برش پایه است.

(۳) روش‌های آیین‌نامه‌های فعلی برای اغلب ساختمان‌ها بر اساس کاربرد طیف طرح الاستیک خطی است که فقط برای یک سطح عملکرد یعنی سطح عملکرد ایمنی جانی مربوط به زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله به کار می‌رود و پس از زلزله‌های اخیر نظیر نورث ریج و زلزله کوبه، معلوم شد که طراحی تک سطحی، همه اهداف فلسفه عمومی طراحی لرزه‌ای را برآورده نخواهد کرد و بر همین اساس در طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد، تأکید فراوانی بر طراحی چند سطحی دارد.

### ۳-۲-۲- اهداف و سطوح عملکرد

هدف طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد این است که مهندسین را قادر می‌سازد تا سازه‌هایی با عملکرد قابل پیش‌بینی در برابر زمین‌لرزه‌ها را طراحی کنند. لذا طراحی بر اساس عملکرد مستلزم تعریف سطوح چندگانه عملکرد هدف می‌باشد، که انتظار می‌رود سازه تحت اثر زلزله با شدت مشخص به این سطوح برسد یا حداقل از آن تجاوز نکند. انتخاب عملکرد رفتاری (هدف عملکرد) یک سازه با توجه به کاربری ساختمان، اهمیت ساختمان، ارزش ساختمان، ملاحظات اقتصادی، شامل هزینه‌های مربوط تعمیر ساختمان و ایجاد وقفه در بهره‌برداری آن، انجام می‌شود شکل (۲-۲).



شکل ۲-۲- تغییر شکل مورد نیاز ساختمان در سطوح عملکرد مختلف

### ۳-۲-۳- مراحل بهسازی لرزه‌ای

مراحل بهسازی لرزه‌ای به ترتیبی که معمولاً در طراحی دنبال می‌شود در این بخش ارائه خواهد شد.

#### ۳-۲-۳-۱- بررسی ویژگی‌های ساختمان

ویژگی‌های ساختمان شامل مشخصات اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای آن، میزان خطر زلزله در محل ساختمان، نتایج اولیه ارزیابی مقاومت لرزه‌ای، تاریخچه بهره‌برداری گذشته و آینده ساختمان، ملاحظات خاص اقتصادی، اجتماعی و مقررات و قوانین حاکم، قبل از اقدام به هرگونه بهسازی باید با هماهنگی کارفرما مورد بررسی قرار گیرد.

#### ۳-۲-۳-۲- انتخاب هدف بهسازی

طراحی بر مبنای سطوح عملکرد روش جدیدی است که هنوز بسیاری با آن آشنا نیستند. به همین جهت لازم است

برای انتخاب هدف بهسازی طراح آشنایی کامل با سطوح مختلف عملکرد ساختمان داشته باشد و همچنین کارفرما را با این مبانی آشنا کند.

انتخاب سطوح عملکرد به‌عنوان مبنایی برای طرح بهسازی می‌باشد هرچند با استفاده از دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای سعی شده است سطح عملکرد موردنظر تأمین گردد اما به دلایل متعدد از جمله:

- عدم اطلاع دقیق از هندسه سازه
- عدم اطلاع صحیح از ابعاد اجزاء سازه
- عدم شناخت دقیق مصالح بکار رفته
- اطلاعات ناقص از منطقه احداث ساختمان
- غیرقابل پیش‌بینی بودن زلزله
- مدل‌سازی و تحلیل به روش‌های ساده‌شده (ساده‌سازی)
- رسیدن به سطح عملکرد موردنظر تضمین نمی‌گردد.

### ۲-۳-۳- جمع‌آوری اطلاعات وضعیت موجود ساختمان

اطلاعات موجود و در دسترس از ساختمان شامل نقشه‌های چون ساخت و سایر مدارک فنی باید برای بهره‌گیری در مراحل بعدی، جمع‌آوری و دسته‌بندی شود.

### ۲-۳-۴- نیاز یا عدم نیاز به بهسازی

ساختمان‌هایی که با توجه به درجه اهمیت آن‌ها بر اساس آخرین ویرایش استاندارد ۲۸۰۰ ایران طراحی لرزه‌ای و اجرا شده‌اند نیازی به ارزیابی و بهسازی لرزه‌ای بر اساس این دستورالعمل ندارد، مگر آنکه درجه اهمیت فعلی آن‌ها بیش از مقدار مفروض در طراحی اولین آن‌ها بوده و یا سطح خطر مدنظر با سطح خطر موجود در طراحی اولین با استاندارد ۲۸۰۰ ایران متفاوت باشد. ساختمان‌هایی که بر طبق شرایط فوق مشمول این دستورالعمل نباشند باید دارای کلیه اطلاعات ساختمان لازم (اعم از دفترچه محاسبات، نقشه‌های اجرایی و...) باشند.

### ۲-۳-۵- ارائه طرح بهسازی و ارزیابی آن

#### ۲-۴- سطوح عملکرد ساختمان

سطوح عملکرد ساختمان بر مبنای عملکرد اجزای سازه‌ای و غیره سازه‌ای در مقابل سطوح خطر مختلف تعریف می‌شود. در واقع، سطح عملکرد به‌نوعی تابعی از میزان جابه‌جایی سازه است و هر قدر جابه‌جایی سازه بیشتر شود، سطح عملکرد سازه تنزل می‌یابد. به‌طور کلی در زلزله‌های خفیف جابه‌جایی سازه کوچک بوده و اجزای سازه‌ای دچار خرابی نمی‌شوند و سازه قابلیت استفاده به‌وقفه را دارد. با افزایش شدت زلزله و به‌تبع آن زیاد شدن جابه‌جایی سازه، سطح عملکرد را کاهش داده و خرابی‌های سازه‌ای گسترش می‌یابد تا آنجا که در سطح ایمنی جانی، سازه به‌طور قابل ملاحظه‌ای دچار آسیب می‌شود اما میزان آن در حدی نیست که منجر به خسارت جانی شود. در آستانه