

# طراحی و اجرای جداسازی لرزه‌ای

کاربرد در ساختمان، پل و سایر سازه‌ها  
به همراه مدلسازی در *Etabs* و *Sap2000*

I.R.Skinner P.E.Tsopelas G.H.Mcverry  
James M.Kelly TrevorE.Kelly A.M.Reinhorn  
M.E Constantinou Dimitros A. Konstantidis

مهندس علیرضا صالحین  
مهندس حسن محمدی

## فهرست

### فصل اول

مقدمه

۵

### فصل دوم

۱۱	..... هولمز جداسازی لرزه ای سازه ها
۲۱	..... ۲-۲ اصول جداساز
۴۹	..... ۳-۲ اجرا در ساختمان
۷۰	..... ۴-۲ اجرا در پل
۷۶	..... ۵-۲ ورودی لرزه ای
۹۰	..... ۶-۲ تاثیر جداسازی بر ساختمان ها
۱۳۶	..... ۷-۲ موقعیت و انواع جداساز
۱۵۴	..... ۸-۲ خواص مهندسی جداسازها
۱۸۵	..... ۹-۲ طراحی سیستم و فرمولبندی
۲۱۳	..... ۱۰-۲ ارزیابی کارآیی (مفاهیم و روش ها)
۲۲۷	..... ۱۱-۲ طراحی اتصالات
۲۳۷	..... ۱۲-۲ طراحی سازه
۲۴۷	..... ۱۳-۲ مثال طراحی ساختمان + مثال اضافه
۲۶۸	..... ۱۴-۲ مثال طراحی پل + مثال اضافه
۲۸۹	..... ۱۵-۲ مثال طراحی تجهیزات صنعتی

### فصل سوم

۲۹۷	..... مطالعه رفتار مکانیکی جداسازها تحت بارگذاری های مختلف
۲۹۷	..... ۲-۳ رفتار تحت فشار
۳۲۶	..... ۳-۳ تحت خمش
۳۴۵	..... ۴-۳ رفتار توام فشار و خمش
۳۶۷	..... ۵-۳ رفتار کمانشی
۳۹۸	..... ۶-۳ رفتار کمانش صفحه ستون
۴۱۵	..... ۷-۳ اثر انعطاف پذیری ورق روی بار کمانش
۴۴۵	..... ۸-۳ استفاده از قیود اصطکاکی در نشیمنگاه های لاستیکی مهار نشده
۴۶۲	..... ۹-۳ اثر اصطکاک روی باربرهای لاستیکی مهار نشده

### فصل چهارم

۴۸۵	۱-۴ مطالعات امکان سنجی
۴۹۵	۲-۴ مقاوم سازی سازه ها
۵۱۱	۳-۴ جدا سازی کف طبقات
۵۳۵	۴-۴ جداسازی ماشین آلات صنعتی
۵۴۷	۵-۴ جداسازهای مقاوم در برابر برکنش
۵۷۱	۶-۴ سیستم های هایبرید
۵۸۷	۷-۴ فرمولهای جدا سازی
۵۹۳	۸-۴ اثرات ضربه به سازه ها
۶۰۹	۹-۴ مدلسازی نرم افزاری SAP2000 و ETABS

### فصل پنجم

۶۲۱	۵- دیتیل های اجرایی و عکسهای رنگی و جزئیات مکانیکی و معماری و دیتیل های اجرایی پل و ساختمان
-----	---

### فصل ششم

۶۸۱	بخش آیین نامه ها
۶۸۱	۱-۶ AASHTO2010
۷۳۳	۲-۶ UBC
۷۶۳	۳-۶ ASCE

### فصل هفتم

۷۸۹	Dictionary
-----	------------

### فصل هشتم

۸۱۵	مراجع
-----	-------

### فصل نهم

۸۱۹	معرفی نامه ها
-----	---------------

## مقدمه

با حمد و سپاس بی پایان از درگاه ایزد منان، اثر دیگری را نیز تحت عنوان "راهنمای جامع جداسازی لرزه ای" به اتمام رسانیدیم. در راه خلق، ترجمه و جمع آوری این اثر زحمات و فشارهای زیادی به اینجانب وارد گردید که متأسفانه اکثر آنها بواسطه کم لطفی همکاران و دست اندرکاران این علم بوده، تا پیدا کردن مطالب علمی مربوطه. همیشه علاقه داشتم در یکی از کتب خویش مقدمه استاد بزرگوار جعفر شهری را در رابطه با ارزش مقدمه بیاورم: "مقدمه سخنی است که هر چه کم باشد باز زیاد است و هر چه زیاد باشد باز کم، زیاد از آن جهت که کسی به آن توجه نمی نماید و کم از آن سبب که اصل کتاب و نشان دهنده مضامین و راهنمای خواننده و لب لباب مطالب آن می باشد.

هر صفحه مقدمه به اندازه کتابی زحمت فکر و مذاقله تحمیل می نماید که به نظر برخی چیزی است زائد که نگارنده حیف وقت نموده کاغذ سیاه کرده است، در حالی که از نظر نویسنده لازم که در چه مقوله سخن گفته، از نوشتن چه مقصود و هدف داشته، چه چیزی را می خواسته به ثبوت برساند.

به همین قرار کتاب را گرفته پشت جلدش را نگاه کرده به ورق زدن و پس و پیش کردن اوراق وسط و آخرش می پردازد، چنانچه گویی چیزی یا کسی را به تفحص و تفتیش برآمده یا مدخل خانه و مکانی را جستجو می کنند، غافل از آنکه آنچه می جویند در مقدمه که راه دخول آن به حساب می آید می باشد.

از مقدمه شخصیت نویسنده، روحیات و خلیقات، وزن و پایه، مقدار و اطلاع، سبک نوشته، مضمون مطالب و چگونگی و کلیات او معلوم می گردد. مقدمه معرفی نامه ای است که گوینده ناشناس را وسیله معارفه گردیده شنونده را با افکار و ذوقیات و کم و کیف او آشنا می سازد، همچنانکه نوشته روی شیشه دوا نشان دهنده محتوی آن و نیات درون، از بیان زبان و احوال بدن از صحت و سقم، شادی و حزن، آرامش و تشویش از سیما ظاهر می شود.

همچنین در رابطه با مضامین کتاب از کل و جزء و زیرنویس و حواشی آن، باید توجه نمود چنانچه ضرورت نوشتنشان نبود نویسنده سر و مغز خود به زیر چکش و پتک نگارش آن نینداخته، راحت و رفاه خود تباه و به همین گونه که فشار کار و تقدیرنامه روزگار دیدگان خود این نگارنده سیاه کرده است چشم جهان بین سیاه نمی نمود!

پس نبوده، مگر بر هر صفحه و سطر و جمله و کلمه و بلکه حرف و حروف آن نظر و سخنی

داشته که افکندش موجب نقصان مطلب می شده است و بسا بر جا نهادنش لزوم از سر خوانی و بلکه دوباره خوانی بیاورد."

این کتاب چه به لحاظ تئوری و چه به لحاظ عملی کاملترین کتاب در دنیا (در نوع خودش) می باشد. سعی بر آن بوده که مطالب تئوری با مضامین طراحی و مباحث اجرایی در هم آمیخته شود تا برای تمامی مهندسان قابل استفاده باشد.

توصیه می گردد که پیش از مطالعه این کتاب از لغتنامه تخصصی آن که در انتهای کتاب آورده شده استفاده نماید. همچنین برای ایجاد آمادگی و درک بیشتر مطالب این کتاب از DVD این کتاب استفاده نموده که شامل مطالب زیر می باشد :

۱- قسمت اسناد : شامل دیتیل های اجرایی پل ، رکود های زلزله ، مدل سازی SAP و کتب مفید.

۲- قسمت فیلم : فیلم های آزمایشات ASTM ، فیلم های میراگرها ، مجموعه سخنرانی PEER & NEES و Trevor Kelly در رابطه با جداسازی لرزه ای ، فیلم های جداسازی لرزه ای ساختمان نوساز و مقاوم سازی و کلیپ های کوتاه در رابطه با مدل سازی و اجرا جداساز لرزه ای.

۳- قسمت عکس : مجموعه عکس های تکمیلی برای عکس های موجود در کتاب.

۴- قسمت نرم افزار : در دو بخش نرم افزار های General و Professional می باشد. در بخش General نرم افزارهای مورد نیاز شما پیش از استفاده از DVD قرار داده است و در بخش Professional مجموعه ۱۱ نرم افزار به همراه آموزش و فایل های مربوطه آورده شده است.

۵- قسمت استانداردها:

در رابطه با علم جداسازی لرزه ای ، در دنیا هر روز پیشرفت ها و تحقیقات جدید انجام شده و محصولات جدیدی تولید می گردد ، بنابراین گردآوری کلیه مطالب حول این موضوع در یک کتاب ، امری مشکل و ناشدنی می باشد ، اما در حد توان سعی بر تحقیق و جمع آوری تکنولوژی روز بوده است. البته مطالب زیادی نیز وجود داشت که در صورت اضافه نمودن آنها به این کتاب ، صفحات کتاب بالای ۱۰۰۰ صفحه رفته و کتاب دیگر قابلیت چاپ شدن را نخواهد داشت. بنابراین اگر کوتاهی یا نقصانی در این کتاب ملاحظه نمودید ، پیشاپیش از حضورتان عذر خواهی می کنم. لطفاً با ارسال نظرات خویش به ایمیل [info@avistabook.com](mailto:info@avistabook.com) ما را در مورد نظرات خویش با خبر سازید.

این کتاب از چندین کتاب و مجموعه تالیفی تشکیل شده که از شامل بخش های زیر می باشد :

۱- ترجمه کامل کتاب "Base Isolation of Structures Design Guidelines" از شرکت مهندسی مشاور Holmes سال ۲۰۰۱.

۲- ترجمه کتاب "Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation" فصل ۲ تا ۹ از انتشارات Wiley سال ۲۰۱۱.

۳- ترجمه کامل کتاب "AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design" سال ۲۰۱۰.

۴- نکات آیین نامه های : ASCE 7-10 , UBC 97 , IBC 2012.

۵- مجموعه مثال های تکمیلی در رابطه با طراحی ساختمان و پل با جداساز.

۶- قسمت های تالیفی- گردآوری شده سیستم های دوگانه (Hybrid) ، اثرات ضربه زدن سازه ها (Pounding) ، مقاوم سازی سازه ها با سیستم های جداساز ، سیستم های جداسازی کف طبقات ، طراحی با SAP2000 و ETABS، سیستم های مقاوم در برابر برکنش ، مطالب تکمیلی بخش پی ماشین آلات و قسمت های مهم گزارش های MCEER و NCEER دانشگاه بوفالو.

۷- مجموعه دیتیل های اجرایی جداسازها در پل و ساختمان به همراه جزییات معماری ، مکانیکی و سازه ای.

۸- مجموعه عکس های اجرایی مقاوم سازی و ساخت ساختمان ها و پل ها.

۹- سایر موارد مانند مطالعات اقتصادی ، چک لیست طراحی و ...

در این کتاب تلاش بر آن بوده که تمامی سیستم های جداسازی به تفصیل توضیح داده شده و جداسازهای سربی لاستیکی ، لاستیکی با میرایی بالا و لغزنده ها (LRB ،HDRB و Slider) به خصوص مورد بحث و بررسی قرار گیرند. البته کتاب "راهنمای طراحی میراگر غیر فعال در برابر زلزله" (ترجمه و گردآوری شده توسط اینجانب) نیز مکمل مباحث این کتاب بوده که مطالعه آن توصیه می گردد.

کتاب شرکت هلمز شامل نکات بسیاری در رابطه با تحلیل ، طراحی و اجرای این سیستم ها می باشد. در واقع گردآوری این کتاب در سال ۲۰۱۱ بر اساس کتاب هلمز بوده و پس از انتشار کتاب رفتار مکانیکی جداسازهای پروفیسور کلی در همان سال ، آن کتاب نیز به ترجمه اضافه گردید. مباحث بسیار مهمی چون سیستم های دوگانه آورده شده است. در ترجمه این کتاب بسیار مدیون کتب ارزشمند مرکز تحقیقاتی MCEER (یا NCEER قدیم) دانشگاه بوفالو آمریکا بوده ام. از دیگر نقاط ضعف دیگر کتاب های موجود در این زمینه ، کاربردی نبودن آنها در طراحی و اجرا می باشد ، چرا که مهندسین نمی توانند با خواندن یک کتاب تئوری و یا تحقیقاتی به طراحی و اجراء این سیستم بپردازند. تمامی سعی اینجانب بر آن بوده است که این کتاب را با زبانی ساده نگارش یافته ، به طوری که برای مهندسین طراح ، مجری و محققین قابل استفاده باشد. البته طرح مباحثی چون کاربرد سیستم های جداسازی در پل ها و سازه های خاص در غالب این کتاب نمی گنجد. در هر حال ، انشاء ... که مخاطبان گرانقدر نقصان و کاستی های این کتاب را به بزرگواری خویش می بخشند. البته در DVD همراه این کتاب ، چند برابر مطالب این کتاب آورده شده است و احتمالاً به اکثر سوالات شما عزیزان پاسخگو خواهد بود. این اطمینان به شما داده می شود که چنین کتاب به این جامعه و کاملاً در رابطه با جداسازی لرزه ای در هیچ جای دنیا (حتی در ژاپن و آمریکا) و به هیچ زبانی گرد آوری نشده است. این امر افتخار اینجانب است که این اثر را به جامعه مهندسی ایران تقدیم نمایم.

پیش از انتخاب هر سیستمی باید دیدی کامل و خالی از جانب داری به آن داشت. بنابراین تمامی تلاش اینجانب بر آن بوده که نقاط قوت و ضعف این سیستم را با هم منعکس نموده و برای نقاط ضعف آن راه حلی ارائه گردید. سیستم جداسازی لرزه ای روشی بسیار مفید و کارا می باشد و علت گسترش روز به روز آن را نیز می توان در همین امر جست و جو نمود.

ضمن خلق این اثر دوستانم در داخل و خارج از ایران برای رسانیدن مطالب مورد نیازم زحمات زیادی را کشیدند ، البته عده از مهندسين داخل کشور نیز زمانی که دست همکاری به ایشان دراز نمودم ، از همکاری دست باز زدند.انشاء... متوجه خواهند شد که بهتر بود برای خلق این اثر همکاری می نمودند ، ولی بدون کمک ایشان هم خدا را شکر این اثر به اتمام رسید ، به راستی که اینترنت بزرگترین حلال مشکلات علمی می باشد. شرکت رایبسون نیز مطالب مفیدی را در اختیار اینجانب قرار دادند که از ایشان هم بابت این مطالب کمال تشکر را دارم. پروفیسور Soong و Constantinou از دانشگاه بوفالو آمریکا به اینجانب لطف داشته و به طور مجانی مجوز ترجمه تمامی مطالب برداشته شده از MCEER و NCEER را به این انتشارات اهدا نمودند، از ایشان هم بابت زحماتشان سپاسگزارم. از دوستان عزیز و مهندسان گرانقدر ، مهندس راضی و محمدی که در ترجمه بخش هایی از این کتاب ما را یاری نمودند ، کمال تشکر را دارم.همچنین کمال تشکر و قدر دانی را از مهندس عزیز و بزرگوار ، جناب مهندس پور صدر دارم که در این کتاب (به همه لحاظ) به بنده کمک زیادی نمودند. در صورت نیاز به افزودن مطلبی به این کتاب ،این امر از طریق وب سایت همیار این کتاب ([www.AvistaBook.com](http://www.AvistaBook.com)) انجام خواهد شد.

علیرضا صالحین ۱۳۹۲

تقدیم پدر بزرگوارم، جناب کاپیتان محسن صالحین

هر چه تشکر کنم ، هر چه تلاش کنم  
نخواهم توانست گوشه ای از زحمات بی دریغ شما را جبران نمایم.  
همیشه از صمیم قلب دوست دارم.



## کلیات

بیشتر مهندسان سازه حداقل شناختی از سیستم جداساز دارند، یعنی می دانند که این سیستم متشکل از فنر متصل شده در زیر سازه برای محافظت از آن در برابر زلزله است، ولی معمولاً از جزئیات جداسازهای پایه اطلاعات کامل ندارند. برخی مهندسان نیز درباره ی این سیستم اطلاعات کافی دارند و ادعاهای بحث برانگیز آنان از مروج ها و تناقض آن ها با تولیدکننده های این تجهیزات گاه مشکل ساز است. بنابراین اگر سیستمی را از میان گزینه های موجود انتخاب کنیم، باید به پرسش های زیادی پاسخ دهیم، از جمله این که: چگونه سیستم را طراحی کنیم؟ چگونه آن را به سازه متصل کنیم؟ چگونه کارایی آن را ارزیابی کنیم؟ چگونه آن را آزمایش و تولید کنیم؟ و از همه مهم تر، چه میزان باید هزینه کنیم؟

این کتاب می کوشد با تبیین جزئیات کامل پاسخ گوی این پرسش ها برای مهندسان سازه باشد. با داشتن قدری دانش قبلی در باره ی جداسازی پایه، مهندسان به کمک این کتاب می توانند تشخیص دهند چه سیستمی با داشتن طراحی و جزئیات و اسناد و مدارک سازه ای برای پروژه ی ایشان مناسب تر است.

در این جا تأکید بیشتر روی طراحی است. اصول و ریاضیات جداسازی پایه در دو کتاب زیر در خصوص دینامیک سازه، توضیح داده شده است:

Design of base isolated structures; written by Kelly & Naeim

Base isolation of structures; written by Robinson Skinner & McVerry

کتاب حاضر اطلاعات لازم درباره ی شناخت پاسخ تأثیر دینامیکی را برای مهندسان سازه فراهم می آورد، ولی دستورالعمل های حل معادلات غیرخطی حرکت حاکم بر پاسخ سیستم را در اختیار شما قرار نمی دهد. البته نرم افزارهای رایانه ای در این بخش کمک شایانی به ما خواهند کرد.

# فصل اول

## بخش ۱

### هولمز، جداسازی لرزه‌ای سازه‌ها

#### ۱-۱- مفهوم جداسازی (لرزه‌ای) پایه

عبارت جداسازی پایه از لغت جداساز در مفهوم خویش به معنای فعل جداساختن است و پایه به معنای جزئی از پشتیبانی کننده از قسمت انتهایی سازه یا پی است (برگرفته از Oxford Dictionary).

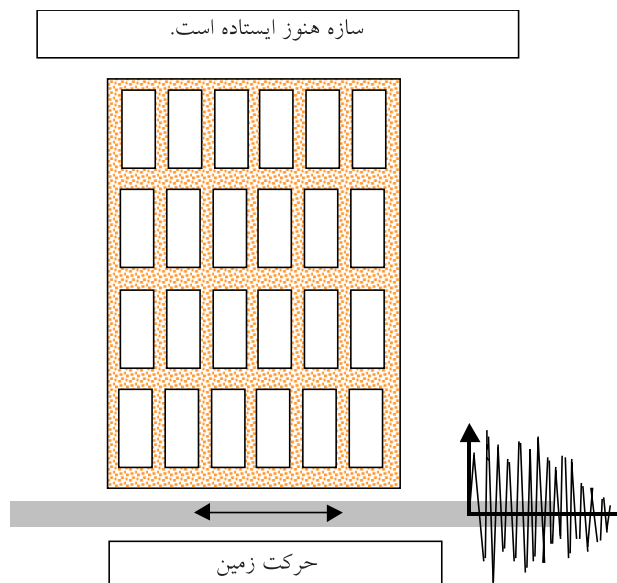
همان‌طور که از مفهوم لغوی آن برمی‌آید، سازه (اعم از ساختمان، پل یا جزئی از یک تجهیزات) از پی خود جدا می‌شود. اصطلاح جداسازی این روزها معمولاً جایگزین جداسازی لرزه‌ای شده که در واقع منعکس‌کننده‌ی بعضی از حالات جداسازی در محل‌های بالای پایه است (برای مثال در پل‌ها روسازه باید از ستون‌های زیر سازه جدا شود. به عبارت دیگر، عبارت جداساز لرزه‌ای در سازه‌های مواجه‌شده با لرزه یا زلزله دقیق‌تر است).

به طور منطقی، جداسازی سازه از زمین برای جلوگیری از صدمات زلزله امری بسیار بخردانه است. در یک زلزله زمین حرکت می‌کند و این حرکت بیشترین خسارت‌ها را به سازه وارد می‌آورد. تنها راه استوار باقی ماندن سازه تحت بارهای ثقلی همان باقی ماندن روی زمین است. جداسازی با این واقعیت همخوانی ندارد که چگونه سازه‌ای از زمین جدا بماند و هنوز تحمل بارهای ثقلی را داشته باشد.

بنابراین مطالب بیان‌شده در این‌جا مربوط به سیستم‌های ایده‌آل نیست، بلکه درباره‌ی سیستم‌های عملی جداسازی‌شده و سیستم‌هایی است که به دلیل مواجه شدن با نیرو و آثار مخرب زلزله جداسازی شده‌اند.

زمانی که ما یک مفهوم نو را توضیح می‌دهیم، مقایسه‌ی آن با مفاهیم موجود قبلی مفید

است. جداسازی لرزه ای برداشتی نوین از مفهوم کاهش تقاضای لرزه ای بر سازه است.



شکل ۱-۱: جداساز پایه

یک بوکسور را در نظر بگیرید، همان طور که می تواند با تمام نیرو ضربه بزند، هم می تواند ضربه ای را که به سمت او می آید پذیرا باشد و هم می تواند با جا خالی دادن نیروی ضربه را خنثی کند. یک سازه نیز مانند یک بوکسور هم می تواند با همه ی توان تمام نیروی زلزله را جذب کند و هم می تواند درصدی از آن نیرو را جذب کند.

سیستم تعلیق اتومبیل نیز مثال دیگری از همین دست است. یک ماشین بدون سیستم تعلیق، تمام شکها و ضربه ها را از هر گودال و دست انداز جاده به طور مستقیم به سرنشینان وارد می کند. سیستم تعلیق فنرها و میراگرهایی دارد که نیروهای وارد شده بر سرنشینان را اصلاح می کند به صورتی که سرنشینان حرکت و تکان اندکی احساس می کنند و آن را به صورت حرکت خودرو روی جاده ای با ناهمواری کم تصور می کنند. همان طور که بعداً خواهیم دید، مقایسه ی فنر و میراگر به عنوان گردآورنده های اصلی از هر سیستم جداساز، مقایسه ی مناسبی است.

مبحث جداسازی پایه در گروه اتلاف انرژی غیرفعال جای می گیرد و شامل میرایی درون سازه ای نیز می شود. میرایی درون سازه ای از تجهیزاتی تشکیل شده است که در درون

سازه با اضافه کردن میرایی به اتلاف انرژی می‌پردازد، ولی جلوی تغییر مکان پایه را در ساختمان نمی‌گیرد. این تکنیک برای کاهش تقاضای زلزله در کتاب دیگری از همین گردآورنده موجود است. مدل دیگری از کاهش تقاضای زلزله کنترل فعال است که در واقع جداساز و (یا) تجهیزات اتلاف انرژی با استفاده از نیروی برق برای مهیا کردن کارایی بهینه به کار گرفته می‌شوند.

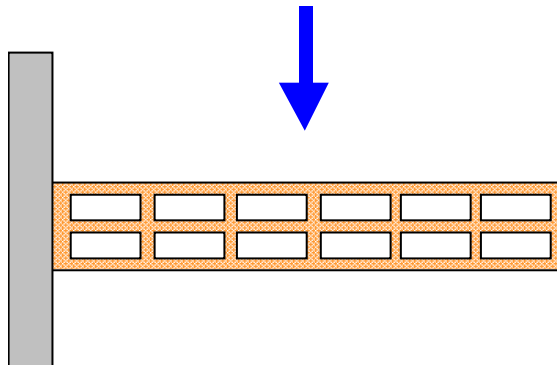
## ۱-۲- هدف از جداسازی پایه

بسیاری از مناطق دنیا در معرض زلزله قرار گرفته‌اند و جامعه از مهندسان سازه انتظار طراحی ساختمان‌هایی را دارند که هنگام زلزله در آن‌ها زنده بمانند. همان‌طور که هنگام طراحی ساختمان با بارهای زیادی مانند بار باد مواجهیم، هدف اصلی برآوردن رابطه‌ی زیر است:

ظرفیت < تقاضا

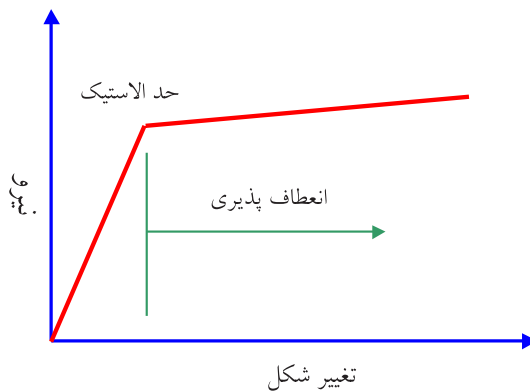
می‌دانیم که زلزله اتفاق می‌افتد و غیر قابل کنترل است. بنابراین باید قبول داشته باشیم که حتماً ظرفیت از تقاضا بیشتر باشد. زلزله بر اثر جرم خود ساختمان و شتاب زمین باعث وارد شدن نیرو به ساختمان می‌شود. به محض افزایش شتاب زمین، برای جلوگیری از صدمات سازه‌ای ظرفیت نیز باید افزایش یابد، که البته افزایش ظرفیت ساختمان تا بی‌نهایت امری عقلانی نیست. در بعضی نقاط که بسیار زلزله‌خیزند، گاهی شتاب زلزله برابر شتاب گرانش زمین یا حتی دو برابر آن می‌شود. مجسم کردن مقاومت مورد نیاز برای این سطح بار کار آسانی نیست.

مقاومت در برابر  $1g$  به معنای وارد شدن باری معادل برابر جرم ساختمان به صورت جانبی به ساختمان است که می‌تواند به سادگی باعث واژگون شدن ساختمان شود.



شکل ۱-۲: طراحی سازه برای بار زلزله‌ای برابر با  $1g$

طراحی برای چنین سطحی از مقاومت کاری آسان و ارزان نیست. بنابراین اکثر آیین نامه‌ها اجازه‌ی استفاده از شکل پذیری را برای کسب ظرفیت می‌دهند. شکل پذیری در واقع مفهوم این واقعیت است که ما به المان‌های سازه‌ای اجازه می‌دهیم طبق یک منوال کنترل شده و بیش از حد الاستیک خویش تغییر شکل دهند. در ماورای این حد، المان‌های سازه‌ای نرم شده و تغییر مکان‌های ناشی از افزایش مقدار کمی از نیروها افزایش می‌یابند. زمانی که این بار از سازه باربرداری شود، سازه وارد حد پلاستیک می‌شود و تغییر شکل‌ها ماندگار خواهد شد. این تغییرات قابل تامل‌اند، به ویژه زمانی که بتن به مرز الاستیک در کشش برسد که در واقع یک ترک تشکیل می‌شود یا زمانی که یک شاه‌تیر فولادی تسلیم شود. برای بیشتر مصالح سازه‌ای، انعطاف پذیری برابر صدمات سازه‌ای است. مفهوم صدمه در این جا ناکارآمد شدن سازه است. انعطاف پذیری به طور کلی باعث صدمات ظاهری به سازه می‌شود و ظرفیت سازه را برای باربری بیشتر کاهش خواهد داد.



شکل ۱-۳: انعطاف پذیری

در واقع فلسفه‌ی طراحی روی مسئله‌ی مقاومت تمرکز دارد و به دو گزینه ختم می‌شود:

۱- ادامه دهید تا بر مقاومت الاستیک بیفزایید، که البته برای ما گران تمام می‌شود و در ضمن ساختمان را به شتاب‌های بیشتر در کف‌ها منتهی می‌کند. کاهش صدمات سازه‌ای با مقاوم‌سازی بیشتر ممکن است باعث صدمه‌ی بیشتر به سازه شود و آن را به سازه‌ای با مقاومت کمتر تبدیل کند.

۲- حد الاستیک را محدود و روی شکل پذیری کار کنید. این رهیافت صدمات وارد شده به سازه را هضم می‌کند، گرچه ممکن است قابل تعمیر نباشد.

جداسازی پایه رهیافت مخالفی را پیش رو می‌آورد و در واقع پیشنهاد کاهش تقاضا را به

جای افزایش ظرفیت مطرح می‌کند. ما نمی‌توانیم به خودی خود جلوی زلزله را بگیریم، ولی می‌توانیم تقاضای آن را کاهش دهیم که این کار بر سازه تأثیرگذار است و در حقیقت از انتقال حرکات از پی به روسازه جلوگیری می‌کند. بنابراین، دلیل اصلی استفاده از جداساز کاهش اثرات زلزله است. به طور طبیعی همراه بهره‌مندی از جداساز متقبل هزینه‌هایی هم می‌شویم، پس استفاده از این سیستم باید توجیه داشته باشد و البته رغبت استفاده از این سیستم نیز باید بیشتر از مقاوم‌تر کردن سازه باشد.

### ۱-۳- تاریخچه‌ی مختصر جداسازی پایه

با این‌که اولین عملیات ثبت‌شده در زمینه‌ی جداساز پایه به سال ۱۸۰۰ بازمی‌گردد، اولین مورد جداساز سازه‌ای را می‌توان در اوایل سال‌های ۱۹۰۰ (Tokyo Imperial Hotel) یافت که در واقع سیستم جداساز پایه قبل از سال ۱۹۷۰ به حساب می‌آید. جداسازی در پل‌ها از قبل از ۱۹۷۰ نیز مرسوم بوده است، زیرا پل‌ها نسبت به ساختمان‌ها نمونه‌های بهتری هستند و در آن زیرسازه و روسازه به کمک باربرها از یکدیگر جدا می‌شوند.

اولین کاربرد در زمینه‌ی پل‌ها را می‌توان افزودن اتلاف انرژی به دلیل ازدیاد انعطاف‌پذیری دانست. باربرهای سربی-لاستیکی (LRB) در سال ۱۹۷۰ ابداع شدند و به افزایش انعطاف‌پذیری و میرایی در یک واحد منفرد منتهی شدند. این سیستم دارای میرایی ذاتی است، ولی به اندازه‌ی کافی صلب نیست تا در مقابل بارهای سرویس مانند باد مقاومت کند.

در اوایل سال‌های دهه‌ی ۱۹۸۰ پیشرفت‌هایی در تکنولوژی لاستیک به دست آمد که در نتیجه‌ی آن‌ها قطعات لاستیکی جدیدی به نام «لاستیک با میرایی بالا» یا HDRB پدید آمدند. این قطعات، باربرهایی را تولید می‌کنند که در کرنش‌های برشی پایین، سختی بالایی دارند ولی در کرنش‌های بالا از سختی پایین برخوردارند. در باربرداری، این باربرها یک حلقه پسماند (هیستریستیک) تشکیل می‌دهند که دارای مقادیر زیادی از میرایی است. اولین کاربرد عملی این روش در ساختمان و پل را در آمریکا در اوایل سال‌های ۱۹۸۰ با هر دو سیستم باربر LRB و HDRB مشاهده می‌کنیم.

بعضی پروژه‌های اخیر از سیستم باربرهای لغزنده همراه با باربرهای LRB یا HDRB برای پشتیبانی از اعضای سبک مثل راه‌پله استفاده کردند. باربرهای لغزنده به تنهایی در سیستم جداساز استفاده نمی‌شوند، زیرا با وجود درجات بالای میرایی، دارای نیروی بازگرداننده نیستند و در نتیجه سازه روی باربرهای لغزنده پس از زلزله به یک سمت منحرف می‌شود و احتمالاً بر اثر پس‌شک‌های زلزله باز هم تغییر جهت خواهد داد.

توسعه‌ی سیستم پاندول اصطکاک‌ی FPS باربرهای لغزشی را به شکل سطوح کروی درمی‌آورد که در واقع بر این عیب بزرگ سیستم باربرهای لغزشی فائق آمده است. هنگامی که باربر به طور عرضی حرکت کند به طور عمودی بلند می‌شود که این امر یک نیروی بازگرداننده را فراهم می‌سازد.

با این‌که سیستم‌های دیگر مانند غلتک‌ها، کابل‌ها و غیره نیز در عرصه‌ی رقابت حضور دارند، بازار اصلی هنوز برای پخش مدل‌های مختلف جداساز پایه مثل LRB، باربرهای HDRB، باربرهای لغزنده‌ی صاف و FPS آمادگی دارد.

## ارزیابی سیستم جداساز

ارزیابی سازه‌هایی که از پایه جداسازی شده‌اند، معمولاً نیاز به یک تحلیل دینامیکی به صورت طیف پاسخ یا تاریخچه‌ی زمانی دارد که البته گاهی هر دو را به کار می‌بریم. برای ساختمان‌ها، نرم‌افزار ETABS را می‌توان برای هر دو مدل تحلیل به کار گرفت که یک سازه‌ی الاستیک خطی به وجود می‌آورد. اگر سازه برای ETABS مناسب نباشد، می‌توان از SAP برای اهداف غیرخطی مشابه با ETABS سود جست. هم‌چنین این نرم‌افزار برای مدل‌سازی‌های کلی اجزای محدود مناسب‌تر است. اگر به مدل‌سازی غیرخطی سیستم‌های سازه‌ای نیاز باشد می‌توان از نرم‌افزار ANSR-L استفاده کرد. این نرم‌افزار برای اهداف کلی و مناسب برای سازه‌ها و ساختمان‌هاست. مثلاً برای آزمودن تعداد زیادی از گزینه‌ها برای پارامترهای سیستم جداساز، نرم‌افزار 3D-BASIS یک نرم‌افزار با هدف ویژه برای تحلیل ساختمان‌های جداسازی شده است. این نرم‌افزار از مدل سازه‌ای توسعه‌یافته برای ETABS به عنوان یک المان فوقانی استفاده می‌کند (مترادف روسازه).

## ۱-۵- تولیدکنندگان سیستم‌های جداساز پایه

در بازار تولید این محصولات، رقابت زیادی میان تولیدکنندگان وجود دارد تا هر شرکت تولیدکننده خود را به لیست تولیدکنندگان وارد کند. در جدول ۱-۱ می‌توانید شرکت‌هایی را ببینید که در پروژه‌هایمان از محصولات آن‌ها استفاده کردیم. این شرکت‌ها در پروژه‌های اصلی به کمک مهندسان آمده و درجه‌ی برنامه‌ی HITECH را کسب کرده‌اند. HITECH یک برنامه‌ی اجراشده در آمریکاست که در مرکز نوآوری‌های مرکز اتوبان برای ارزیابی کیفیت سیستم‌های اتلاف انرژی و جداساز برای استفاده در پل‌ها به کار برده شده است.

همان‌طور که در پل‌ها به طور گسترده نشیمن گاه‌ها و باربرها برای مقاصد غیرجداسازانه به کار می‌روند، تعداد زیادی از تولیدکنندگان باربرهای الاستومری در سرتاسر دنیا وجود دارند.

این تولیدکنندگان به تهیه‌ی سیستم‌های جداساز مثل باربرهای سربی-لاستیکی و لاستیکی با میرایی بالا علاقه دارند. به هر حال، باربرهای استاندارد پل برای اجرای سطوح پایین کرنشی (حدود ۲۵٪) طراحی می‌شوند، ولی در مناطق با لرزه‌خیزی بالا این میزان کرنش تا ۲۵۰٪ نیز می‌رسد که برای تولیدکنندگان رسیدن به این سطح مشکل است. در این زمینه تولید محصولات باکیفیت مشکل است و سازنده نیاز به تجهیزاتی مثل پاکیزه‌کننده دارد تا از آلوده‌نبودن محصولات تولیدی در ضمن فرایند تولید و بسته‌بندی اطمینان حاصل کند. سازندگانی که نام آن‌ها در جدول زیر نیست، برای اطمینان باید نمونه‌های خود را تحت آزمایش‌های کارایی جداسازهای لرزه‌ای قرار دهند.

شرکت	محصول
Bridgestone (Japan) BTR Andre (UK) Scougal Rubber Corporation (US)	لاستیک با میرایی بالا
Robinson Seismic (NZ)	لاستیک سربی
Earthquake Protection Systems, Inc (US)	سیستم پاندول اصطکاکی
Dynamic Isolation Systems, Inc (US) Skellerup Industries (NZ) Seismic Energy Products (US)	لاستیک سربی - لاستیک با میرایی بالا
Hercules Engineering (Australia)	باربرهای لغزنده
R J Watson, Inc (US) FIP-Energy Absorption Systems (US)	باربرهای لغزنده
Taylor Devices, Inc. (US) Enidine, Inc. (US)	میراگرهای ویسکوز

جدول ۱-۱: تولیدکنندگان سیستم‌های جداساز

### ۱-۶- دوام سیستم‌های جداساز پایه

بسیاری از سیستم‌های جداساز پایه از مصالحی استفاده می‌کنند که به طور سنتی در مهندسی سازه استفاده نمی‌شده‌اند، مثل لاستیک‌های طبیعی یا مصنوعی یا (polytetrafluoroethylene) PTFE در واقع در باربرهای لغزشی به کار می‌رود که معمولاً آن را تفلون [TEFLON]، یعنی به نام همان مارک تجاری DoPont برای PTFE می‌نامند). مهندسان سازه به دلیل استفاده از سیستم جداساز این‌طور می‌اندیشند که این عضو به اندازه‌ی سایر اعضای سازه‌ای باید



عمر کند و تخمین این سن در حدود پنجاه سال یا بیشتر است.

لاستیک طبیعی به عنوان یک ماده‌ی مهندسی از سال ۱۸۴۰ مورد استفاده قرار گرفته و بعضی از این اعضا پس از گذشت نزدیک به صد سال هنوز هم در حال سرویس‌دهی هستند، بدون این‌که در زمان تولیدشان، تولیدکننده ذره‌ای از علم محافظت‌الاستومرها در برابر فرسایش بدانند.

باربرهای الاستومری (به صورت لایه‌لایه‌های فولاد و لاستیک) در حدود پنجاه سال در پل‌سازی به کار گرفته شده و در این مدت استحکام و مناسب بودن آن‌ها به اثبات رسیده است. آزمایش برشی روی باربرهای پل با عمر ۳۷ سال، افزایش سختی ۷٪ را نشان داده و هم‌چنین اکسیداسیون تغییرمکان‌ها را در سطح از ۲۰ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر رسانده است. از آن‌جا که باربرهای قدیمی پس از ۳۷ سال چنین نتایجی داشته‌اند، می‌توان از جداسازهای ساخت امروز انتظار عمر پنجاه‌ساله را داشت.

بعضی از باربرهای پل‌های قدیمی از اتصالات سرد استفاده کرده‌اند (مثل چسب‌زدن لایه‌ها به جای لایه‌های پختن لاستیک با هم در حرارت زیاد) که در نتیجه‌ی آن دچار گسیختگی‌های زودرس شدند و به اعتبار جداسازهای پایه خدشه وارد کردند (هنوز هم جداسازهای بی کیفیت چینی از همین روش چسب‌زدن استفاده می‌کنند). فقط به دلیل اقتصادی بودن، تولید تمامی الاستومرها فقط و فقط با سیستم ولکانش انجام شده است که در آن صفحات فولاد، سندبلاست و چربی‌زدایی شده و در قالب با لایه‌های لاستیک قرار گرفته و تحت فشار و حرارت عمل آمده‌اند. این کار برای جداسازهای معمولی تا ۲۴ ساعت و برای جداسازهای بزرگ بیش از ۲۴ ساعت طول می‌کشد.

بعضی از باربرهای پل‌ها از لاستیک‌های مصنوعی (معمولاً نئوپلن) تولید می‌شوند. گزارش‌ها حاکی از آن‌اند که نئوپلن‌ها معمولاً در سال‌خوردگی بیش از لاستیک‌های طبیعی روند سخت‌تر شدن را پشت سر می‌گذارند و به نظر نمی‌آید که به این دلیل این ماده در جداساز پایه مورد استفاده قرار گرفته باشد. پس اگر تولیدکننده پیشنهاد استفاده از لاستیک‌های مصنوعی را به شما داد حتماً کلیه‌ی مدارک مربوط به تأثیر سن بر خواص آن‌ها را از او بخواهید.

PTFE در سال ۱۹۳۸ اختراع شد و از سال ۱۹۴۰ به طور گسترده در کلیه‌ی زمینه‌ها شروع به کار کرد. این ماده از دستاوردهای مهم بشر به حساب می‌آید و در برابر خوردگی بسیار مقاوم است، به طوری که حتی فرایندهای حکاکی و چسباندن آن‌ها نیز دشوار خواهند بود. با چنین خواصی این ماده تقریباً فناپذیر است. در امور جداسازی پایه، ورق‌های

PTFE روی یک سطح فولاد ضدزنگ تحت فشار و سرعت زیاد به عمل می‌آیند به طوری که حتی PTFE ورق‌ورق‌شده روی سطح فولاد رسوب می‌کند. با ازکارافتادن باربرها، الزامات از بین نمی‌روند که این امر پس از سفری ۱۰ تا ۲۰ کیلومتری اتفاق می‌افتد. برای ساختمان‌ها این امر مهم نیست، زیرا لغزش هنگام زلزله اتفاق می‌افتد و کل مسافت قابل تحمل برای باربر در عمر خویش تنها چند متر در برابر کیلومتر است. برای پل‌ها PTFE معمولاً با گریس سیلیکونی روغن‌کاری می‌شود که همراه این محصول است.

## بخش ۲

### اصول جداسازی پایه

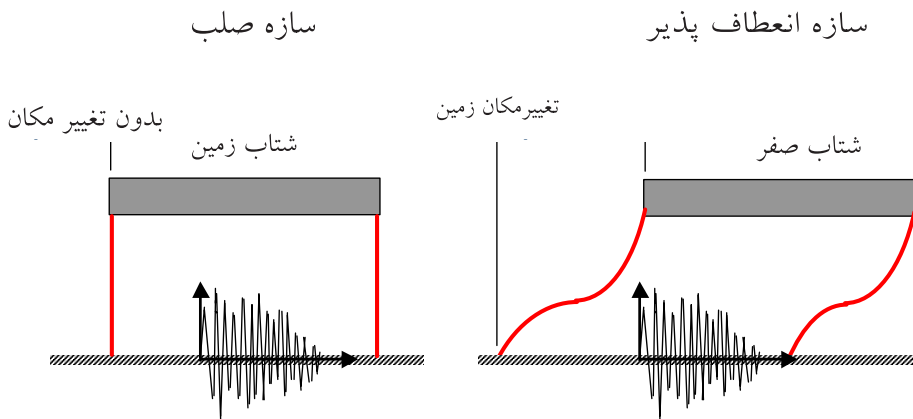
#### ۲-۱- انعطاف، اثر انتقال پریود

#### ۲-۱-۱- اصول

اصل پایه‌ای جداسازی پایه اصلاح پاسخ ساختمان است که در واقع زمین زیر سازه بتواند بدون انتقال حرکات به ساختمان حرکت کند. در یک سیستم ایده‌آل، این جداسازی کامل است. در دنیای واقعی، اتصالاتی بین زمین و سازه مورد نیازند.

ساختمانی که کاملاً صلب باشد، دارای پریود صفر است. زمانی که زمین حرکت کند شتاب وارد شده به سازه برابر شتاب زمین است و بین سازه و زمین تغییر مکان نسبی صفر برقرار خواهد بود و سازه و زمین به یک میزان حرکت خواهند کرد.

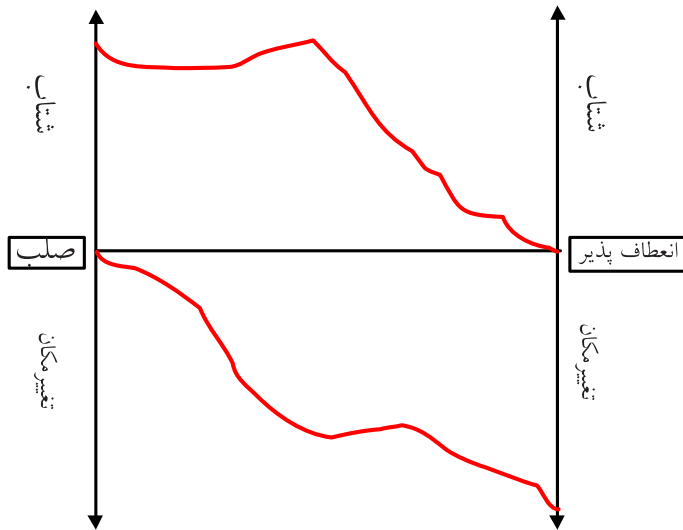
ساختمانی که به طور کامل منعطف است، دارای پریود صفر است و حرکت زمین در زیر چنین سازه‌ای شتاب صفر به خود می‌گیرد و تغییر مکان بین این دو، برابر تغییر مکان زمین خواهد بود و در واقع سازه حرکتی نخواهد کرد (مانند ژله‌ی بسیار نرم تحت شتاب زیاد).



شکل ۲-۱: انتقال حرکات زمین

پاسخ تمام سازه‌ها، چه صلب و چه منعطف، به حرکات زمین مطابق شکل ۲-۲ بین دو حداکثر خواهد بود. برای پریودهای بین صفر و بی‌نهایت، بیشترین شتاب‌ها و تغییر مکان‌ها نسبت به زمین تابعی از زلزله خواهد بود.

برای بیشتر زلزله‌ها دامنه‌ای از پریودها وجود دارد که در آنجا شتاب وارد شده به سازه بیشتر از ماکزیمم شتاب زمین خواهد شد. تغییر مکان‌های نسبی معمولاً به حداکثر شتاب زمین نمی‌رسند (که همان تغییر مکان پریود بی‌نهایت است)، ولی استثنائاتی در این مورد وجود دارد که به طور مشخص می‌توان به سایت‌هایی با خاک نرم و هم‌چنین سایت‌های نزدیک گسل‌های زلزله‌زا می‌توان اشاره کرد.



شکل ۲-۲: شتاب و تغییر مکان سازه

## ۲-۱-۲- مشخصات زلزله

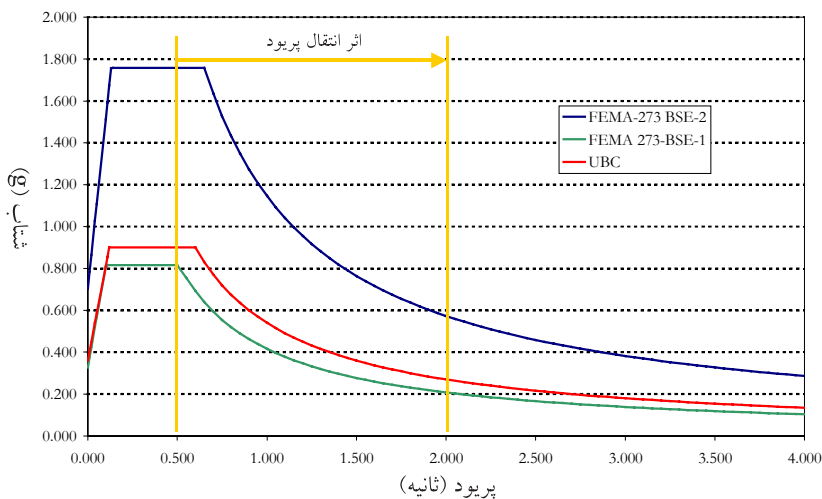
کاهش پاسخ شتاب، زمانی که پریود طولانی شود، نتیجه‌ای از مشخصات حرکات زلزله است. با این‌که ما به طور کلی برای طراحی سازه از شتاب‌ها یا تغییر مکان‌های زلزله استفاده می‌کنیم، این سرعت است که بهترین دید را از تأثیر جداسازی به ما می‌دهد. انرژی ورودی از زلزله با مربع سرعت نسبت دارد. اجرای جداسازی زلزله در آیین‌نامه‌ها بر این فرض استوار است که برای پریودهای حدود ۰,۵ تا ۴ ثانیه دامنه نیمه فرکانسی و انرژی ورودی و سرعت ثابت باشد. آیین‌نامه‌های طراحی مثل UBC, NZS4203 جزء

آیین‌نامه‌های فوق‌اند. برای یک سرعت ثابت، تغییرمکان به نسبت پریود (T) و شتاب معکوس به نسبت T خواهد بود. اگر پریود دو برابر شود، تغییرمکان دو برابر، ولی شتاب نصف خواهد شد.

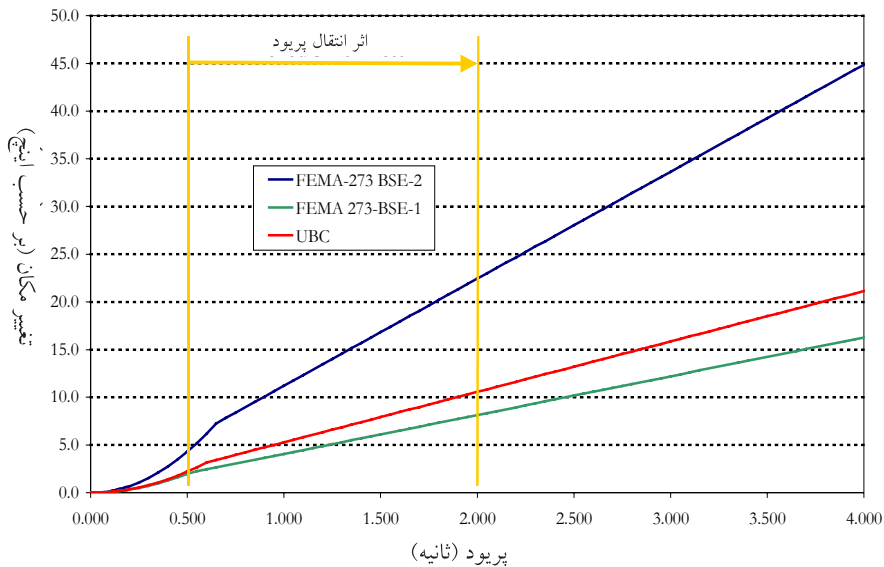
## ۲-۱-۳- بارهای زلزله در آیین‌نامه

تأثیر انتقال پریود را می‌توان به‌طور مستقیم از بارهای لرزه‌ای مشخص در آیین‌نامه محاسبه کرد. مشخصات آیین‌نامه به‌طور کلی یک ضریب C را تحت عنوان تابع پریود فراهم می‌آورد. این ضریب در واقع بیانگر شتاب طیفی مثل آن (C) ضرب در شتاب گرانش (g) است که شتاب را تحت واحد  $2 \text{ t/m}$  به ما تحویل می‌دهد.

شکل‌های ۲-۳ و ۲-۴ نشانگر انتقال پریود بر شتاب‌ها و تغییرمکان‌هاست. منحنی‌های این اشکال برای منطقه‌ای با لرزه‌پذیری بالا و مطابق با ضرایب FEMA 273 و UBC است. این اشکال نشان‌دهنده آن هستند که اثر انتقال پریود بالاترین تأثیر خود را زمانی خواهد داشت که سازه دارای پریود کمتر از ۱ ثانیه باشد که با این سیستم پریود آن ۲ ثانیه یا بیشتر است.



شکل ۲-۳: تأثیر انتقال پریود بر شتاب



شکل ۲-۴: تأثیر انتقال پریود بر تغییر مکان

تغییر مکان‌ها در شکل ۲-۴ از ضریب برش آیین‌نامه محاسبه شده‌اند. برای هر آیین‌نامه‌ای که یک ضریب طراحی (C) را مشخص می‌کند، شتاب با ضریبی نمایش داده خواهد شد که تبدیل به یک تغییر مکان شبه طیفی ( $S_d$ ) می‌شود و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$S_d = \frac{gC}{\omega^2}$$

که در آن  $\omega$  فرکانس دایره‌ای بر حسب رادیان بر دور است. این به فرمول پریود مربوط می‌شود که در آن:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

و تغییر مکان  $\Delta$  را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$\Delta = S_d = \frac{gCT^2}{4\pi^2}$$

برای بیشتر آیین‌نامه‌ها، ماورای یک پریود مینیمم تا جایی سرعت ثابت فرض می‌شود که ضریب برش پایه ثابت و ضریب برش پایه نسبت معکوس با T داشته باشد که برابر

$$C = \frac{C_v}{T}$$

رابطه‌ی زیر خواهد بود:

در این رابطه  $C_v$  یک ثابت مربوط به فاکتورهای مثل نوع خاک، لرزه پذیری، آثار نزدیکی به گسل و غیره است. حال نتیجه تغییرمکان و ضریب برش برابر ثابت زیر می شود:

$$\Delta C = C_v^2 \left( \frac{g}{4\pi^2} \right)$$

در این معادله،  $C_v$  به طور مشخص از آیین نامه به دست می آید. ثابت مربوط به واحدهای طول،  $g/4\pi^2$  برابر عدد ۲۴۸٫۵ در واحد میلی متر و ۹٫۷۸۸ در واحد اینچ است.

با این کار می توانیم مقایسه ای بین ضریب برش پایه (C) و تغییرمکان ( $\Delta$ ) داشته باشیم. اگر بخواهیم ضریب برش پایه را نصف کنیم، تغییرمکان نیز دوبرابر می شود و اگر آن را یک چهارم کنیم تغییرمکان چهار برابر خواهد شد.

برای مثال اگر ناحیه بندی ۴ در آیین نامه ی UBC را در نظر بگیریم و اثر نزدیکی گسل را  $N_v = 1.6$  و  $N_a = 1.2$  و تیپ پروفیل خاک را فرض کنیم، آن گاه ضرایب لرزه ای برابر  $C_a = 0.48$  و  $C_v = 0.64$  می شوند. پریود برای بیش از سرعتی که آن را ثابت فرض کردیم از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$T_s = \frac{C_v}{2.5C_a} = 0.533$$

برای پریودهای بالاتر از ۰٫۵۳۳ ثانیه، میزان  $\Delta C = 248.5 \times 0.64^2 = 101.8$  در واحد میلی متر و ۴٫۰۱ در واحد اینچ خواهد شد. جدول ۲-۱ رابطه ی بین ضریب برش پایه و تغییرمکان را برای این مثال نشان داده است. در پریود انتقال (۰٫۵۳ ثانیه) ضریب برابر ۱٫۲ می شود. برای مثال اگر می خواهید این فاکتور را از ۴ به ۰٫۳ کاهش دهید، تغییرمکان برابر ۳۳۹ میلی متر یا ۱۳٫۴ اینچ خواهد شد. در این تغییرمکان پریود را می توان به صورت  $C_v / C = 0.64/0.30 = 2.13$  ثانیه محاسبه کرد.

در بیشتر آیین نامه ها ضریب ۰٫۵ را برای میرایی در نظر گرفته اند و مقادیر جدول ۲-۱ نیز بر این اساس منظور شده است. همان گونه که قبلاً گفته شد، تغییرمکان با افزایش میرایی رابطه دارد که با این افزایش، میرایی در سیستم می تواند اثر انتقال پریود را کاهش دهد.

با وجود آن که مثال بالا بر اساس UBC است، تابعی شبیه آن را می توانید از هر آیین نامه ای استخراج کنید که ضریبی را به عنوان یک تابع معکوس از پریود مشخص کند:

• ضریب C را در هر پریود T در ماورای پریود انتقال محاسبه کنید.