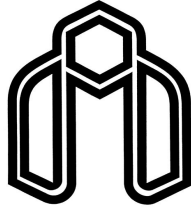


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای پل های عرشه باکس بتن ارمه
چند قابی با قوس افقی دارای سیستم جداساز لرزه ای
با استفاده از منحنی شکنندگی

نگارنده: میثم بالو

استاد راهنما

دکتر حسین پهلوان

استاد مشاور

مهندس علی ناصری

بهمن ۱۳۹۹

شماره: ۹۹، ۴۵ / ۱۴
تاریخ: ۱۳۹۹، ۱۲، ۲۵

باسمه تعالی



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای میثم بالو با شماره دانشجویی ۹۶۳۳۰۱۰۴ رشته مهندسی عمران گرایش سازه تحت عنوان ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای بل های عرشه باکس بتن آرمه جند قابی یا قوس افقی دارای سیستم جداساز لرزه ای با استفاده از منحنی شکنندگی که در تاریخ ۹۹/۱۱/۳۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

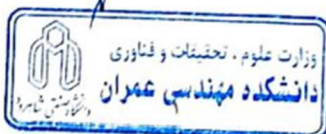
الف) درجه علمی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹ ☐
 ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹ ☒ (د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ ☐
 ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
 نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر حسین پهلوان	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-----		
۳- استاد مشاور	مهندس علی ناصری	دانشجوی دکتری سازه	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محسن کرامتی	استادیار	
۵- استاد منتحن اول	دکتر محمد شمعخی امیری	استادیار	
۶- استاد منتحن دوم	دکتر ابراهیم زمانی بیدختی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضا نادری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تصوه: در صورتی که کسی مرنود شود حماکتر یکبار دیگر (در مدت تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تشکر و قدردانی

با سپاس بیکران از همه عزیزانی که در تحقق این پژوهش یاری نمودند ، بویژه استاد گرانقدر جناب آقای دکتر حسین پهلوان که این فرصت به بنده داده و با راهنمایی های ارزنده در تحقق این پژوهش همواره یاری رسانیدند . همچنین از آقای مهندس علی ناصری ، مشاور این پژوهش به جهت کمک های ارزنده و صبوری مضاعفی که در پیشبرد امور داشته اند بینهایت سپاس گزارم .

تعهد نامه

اینجانب **میثم بالو** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - سازه دانشگاه صنعتی شاهرود به شماره دانشجویی ۹۶۳۳۰۸۴ تائید می نمایم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

چکیده

پل ها به عنوان یکی از اصلی ترین و آسیب پذیرترین سازه ها در شریان های حیاتی هر کشور محسوب می شوند. فراوانی پل های عرشه جعبه بتنی دارای قوس افقی در دنیا از یکسو و رفتار دینامیکی پیچیده ای ناشی از شرایط هندسی خاص این کلاس از پل ها از سوی دیگر که آسیب پذیری بیشتری را ناشی خواهد شد هدف این تحقیق قرار گرفت. بنابراین یک مدل پل عرشه جعبه ای شکل بتن آرمه دارای قوس افقی و کفایت استفاده از جداساز لرزه ای هسته سربی با مقایسه مدل پل در حالات با و بدون جداساز لرزه ای توسط منحنی های شکنندگی مورد ارزیابی قرار گرفته و سطوح خسارات لرزه ای محتمل بدست آمده اند. نتایج پژوهش با مدل سازی پل در نرم افزار المان محدود CSi Bridge تحت تحریک ۱۰۰ زوج شتاب نگاشت واقعی تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفته و پاسخ المان ها از آن استخراج شده است. بطوریکه متوسط حداکثر تغییر مکان نسبی در مدل با جداساز لرزه ای نسبت به حالت بدون جداساز لرزه ای در جهت طولی و عرضی به ترتیب ۶۷ و ۶۴ درصد کاهش یافته است. ضمناً در پی انجام آنالیز مودال و مقایسه پریود ارتعاش پل ها مشاهده می شود پریود اول تا سوم ارتعاش پل ها در حالت با جداگر نسبت به حالت بدون جداگر افزایش قابل توجه ای مواجهه بوده است. نتایج این پژوهش حکایت از آن داشته که در این کلاس از پل ها استفاده از جداگر لرزه ای بطور چشم گیری موجب کاهش دریافت ستونها شده بطوریکه شکنندگی لرزه ای سیستم پل در سطوح آسیب مختلف کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: ۱- پل قوس بتنی ۲- جداساز هسته سربی ۳- بیشینه تغییر مکان نسبی ستون ها ۴- منحنی شکنندگی ۵- آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی.

پیش گفتار

الگوی حاضر با هدف دستیابی به قالب و چهارچوبی استاندارد برای نگارش و تدوین پایان‌نامه‌های دانشگاه صنعتی شاهرود توسط کتابخانه مرکزی تهیه شده است. در این الگو با تعریف سبک‌های مختلف متناسب با نیازهای موجود در تایپ و تدوین پایان‌نامه تلاش شده است تا دانشجو بتواند با صرف کمترین وقت پایان‌نامه خود را تدوین نماید. ترتیب قسمت‌های مختلف این الگو مطابق با آیین‌نامه‌ی آموزشی دانشگاه است. لطفاً خود را مقید به استفاده از این الگو و ترتیب کنید و تمامی صفحات را به دقت مطالعه فرمایید.

فهرست مطالب

فصل اول:	۱.....
کلیات پژوهش	۱.....
۱-۱ مقدمه	۲.....
۲-۱ بیان مساله	۲.....
۳-۱ اهمیت و ضرورت انجام تحقیق	۵.....
۴-۱ فرضیات تحقیق	۵.....
۵-۱ اهداف مشخص تحقیق	۶.....
۶-۱ نوع آوری	۷.....
۷-۱ ساختار پایان نامه	۷.....
فصل دوم:	۹.....
مروری بر ادبیات موضوع	۹.....
۱-۲ مقدمه	۱۰.....
۲-۲ تاریخچه ی مختصر جداسازی پایه	۱۰.....
۳-۲ جداساز های لرزه ای	۱۱.....
۱-۳-۲ انواع جداساز های لرزه ای	۱۵.....
۲-۳-۲ عملکرد در برابر بار های فشاری	۱۵.....
۳-۳-۲ عملکرد در برابر بارهای کششی	۱۵.....
۴-۳-۲ جداگرهای سربی لاستیکی (LRB)	۱۶.....
۵-۳-۲ اتلاف انرژی	۱۸.....
۶-۳-۲ مزایای جداسازی لرزه ای عبارتست از:	۲۱.....
۴-۲ منحنی های شکنندگی	۲۲.....
۱-۴-۲ روش تجربی : (Empirical Method)	۲۳.....
۱-۴-۲-۱ فواید استفاده از روش تجربی	۲۳.....
۲-۴-۲-۱ محدودیت های روش تجربی	۲۳.....
۲-۴-۲ روش قضاوت مهندسی (Approach Judgmental)	۲۳.....
۳-۴-۲ روش تحلیلی: (Analytical Method)	۲۴.....
۳-۴-۲-۱ فواید روش تحلیلی	۲۴.....
۲-۳-۴-۲ محدودیت های روش تحلیلی	۲۴.....

۲۴.....	۴-۴-۲ روش ترکیبی : (Hybrid Method)
۲۵.....	۵-۲ اساس کار منحنی های شکنندگی
۲۵.....	۶-۲ توزیع احتمال نرمال
۲۶.....	۱-۶-۲ توزیع احتمال لوگ نرمال
۲۷.....	۷-۲ تولید منحنی های شکنندگی
۲۸.....	۸-۲ تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی (NLTHA)
۲۹.....	۹-۲ پیشینه تحقیق
۳۳.....	۱۰-۲ نتیجه گیری
۳۵.....	فصل سوم:
۳۵.....	روش تحقیق
۳۶.....	۱-۳ مقدمه :
۳۶.....	۲-۳ شیوه تحلیل مسائل مهندسی
۳۷.....	۳-۳ روش حل عددی
۳۷.....	۴-۳ نرمافزار CSi Bridge 2017
۳۸.....	۵-۳ روش کار
۳۹.....	۶-۳ مدل سازی اجزای پل
۴۱.....	۷-۳ مدل رفتاری مصالح بتن و فولاد
۴۱.....	۱-۷-۳ فرضیات مدل سازی مصالح
۴۳.....	۲-۷-۳ مقاطع عرضی ستون ها
۴۴.....	۳-۷-۳ المان های عرشه
۴۵.....	۴-۷-۳ کلید برشی
۴۶.....	۸-۳ معرفی کلاس پل مورد مطالعه
۴۷.....	۹-۳ پارامترها و مشخصات هندسی
۴۹.....	۱۰-۳ پایه های کناری (کوله)
۴۹.....	۱۱-۳ ضوابط آیین نامه ای طراحی پل های جداسازی شده
۴۹.....	۱-۱۱-۳ آیین نامه طراحی جداساز لرزه ای آمریکا
۴۹.....	۲-۱۱-۳ اصول جداسازی لرزه ای
۵۰.....	۱۲-۳ ضریب رفتار
۵۱.....	۱۳-۳ طیف طراحی

۱۴-۳	سطوح عملکرد لرزه ای	۵۱
۱۵-۳	مشخصات جداساز	۵۱
۱-۱۵-۳	معرفی مشخصات جداساز در نرم افزار	۵۳
	فصل چهارم	۵۵
	تجزیه و تحلیل داده ها	۵۵
۱-۴	مقدمه	۵۶
۲-۴	بارهای غیر لرزه ای	۵۶
۳-۴	آنالیز مودال و ارائه شکل های مودی	۵۶
۴-۴	تحلیل دینامیک غیرخطی (تاریخچه زمانی)	۵۸
۱-۴-۴	انتخاب شتابنگاشت ها	۵۸
۲-۴-۴	تعداد رکوردهای مورد استفاده	۵۹
۵-۴	نتایج تحلیل	۶۱
۶-۴	صحت سنجی	۶۳
۱-۶-۴	مقایسه نتایج صحت سنجی	۶۳
۷-۴	منحنی شکنندگی	۶۵
۱-۷-۴	مقدمه	۶۵
۲-۷-۴	مجموعه زمین لرزه ها	۶۶
۳-۷-۴	مدل های نیاز لرزه ای احتمالاتی	۶۸
۴-۷-۴	پارامتر های شکنندگی	۷۲
۵-۷-۴	تخمین ظرفیت اعضا و مدل های احتمالاتی	۷۳
۶-۷-۴	ظرفیت ستون ها در حالات حدی مختلف	۷۴
۸-۴	منحنی های شکنندگی لرزه ای پل مورد مطالعه	۷۵
۱-۸-۴	پل در حالت بدون استفاده از جدا ساز لرزه ای	۷۵
۲-۸-۴	پل با جداساز لرزه ای	۷۶
۹-۴	مقایسه منحنی های شکنندگی	۷۷
۱-۹-۴	مقایسه در سطح آسیب جزئی	۷۷
۲-۹-۴	مقایسه در سطح آسیب متوسط	۷۹
۳-۹-۴	مقایسه در سطح آسیب گسترده	۷۹
۴-۹-۴	مقایسه در سطح آسیب کامل	۸۰

فصل پنجم.....	۸۱
جمع بندی و پیشنهادات.....	۸۱
۱-۵ مقدمه.....	۸۲
۲-۵ جمع بندی و نتیجه گیری.....	۸۳
۳-۵ پیشنهادات.....	۸۵
مراجع.....	۸۷

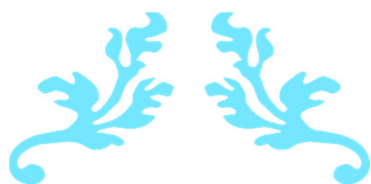
فهرست شکل ها

شکل ۱-۲	مقبره کوروش در پاسارگاد	۱۰
شکل ۲-۲	دو نوع مهم از جداگرهای لرزه‌ای استفاده شده به منظور محافظت لرزه‌ای سازه	۱۲
شکل ۳-۲	مکانیزم جداسازی لرزه‌ای	۱۳
شکل ۴-۲	جانمایی جداگر لرزه‌ای در سازه	۱۴
شکل ۵-۲	مقطعی از جداگر لرزه‌ای	۱۷
شکل ۶-۲	تغییر شکل برشی در یک جداگر سربی لاستیکی	۱۸
شکل ۷-۲	نمودار رفتاری جداساز	۱۹
شکل ۸-۲	حلقه نیرو-جابجایی میراگر ویسکوز	۲۰
شکل ۹-۲	اثر میرایی بر پاسخ سازه	۲۱
شکل ۱۰-۲	نمودار توزیع نرمال	۲۵
شکل ۱۱-۲	نمودار توزیع لوگ نرمال	۲۶
شکل ۱۲-۲	نمونه منحنی شکنندگی	۲۸
شکل ۱-۳	پلان پل قوسی مورد مطالعه	۴۰
شکل ۲-۳	مدل پل با ارتفاع ثابت	۴۰
شکل ۳-۳	مقطع عرضی پل مورد مطالعه	۴۰
شکل ۴-۳	سطوح مختلف محصورشدگی	۴۱
شکل ۵-۳	مشخصات رفتاری پلاستیک فولادی	۴۲
شکل ۶-۳	مشخصات رفتاری پلاستیک فشاری و کششی بتن	۴۲
شکل ۷-۳	تأثیر سطوح مختلف محصورشدگی بر روی منحنی تنش-کرنش ستون	۴۳
شکل ۸-۳	مدل المان محدود پایه چند ستونه	۴۴
شکل ۹-۳	منحنی تنش کرنش فولاد مورد استفاده در مدل	۴۴
شکل ۱۰-۳	عرض موثر عرشه	۴۵
شکل ۱۱-۳	رفتار چرخه‌ای کلید برشی	۴۶
شکل ۱۲-۳	اصول طراحی جداساز	۵۰
شکل ۱۳-۳	معرفی جداساز لرزه‌ای در نرم افزار	۵۳
شکل ۱۴-۳	نمای سه بعدی از سازه	۵۳
شکل ۱-۴	اشکال مودی حالت بدون جداساز لرزه‌ای	۵۷
شکل ۲-۴	اشکال مودی در حالت با جداساز لرزه‌ای	۵۷

- شکل ۳-۴ نمودار مقایسه ای مدهای ارتعاش ۵۸
- شکل ۴-۴ تعریف تابع شتاب نگاشت به نرم افزار ۶۰
- شکل ۵-۴ تخصیص رکورد زلزله در دو جهت X و Y به سازه ۶۱
- شکل ۶-۴ یک نمونه از شتاب نگاشت مولفه طولی زلزله اعمالی ۶۲
- شکل ۷-۴ یک نمونه شتاب نگاشت مولفه عرضی زلزله اعمالی ۶۲
- شکل ۸-۴ نمودار میانگین حداکثر تغییر مکان نسبی طولی و عرضی ۶۳
- شکل ۹-۴ نمودار میانگین حداکثر تغییر مکان نسبی طولی و عرضی پل با شعاع $R=0.5L$ ۶۴
- شکل ۱۰-۴ پاسخ مدل تحلیلی ($R=L$) در راستای طولی ۶۴
- شکل ۱۱-۴ پاسخ مدل پل در ($R=0.5L$) در راستای طولی ۶۴
- شکل ۱۲-۴ پاسخ مدل تحلیلی ($R=L$) در راستای عرضی ۶۴
- شکل ۱۳-۴ پاسخ مدل پل در ($R=0.5L$) در راستای عرضی ۶۴
- شکل ۱۴-۴ طرح شماتیک از روند تحلیل شکنندگی ۶۷
- شکل ۱۵-۴ بزرگا، فاصله و شتاب مجموعه ۱۰۰ تایی زلزله ۶۸
- شکل ۱۶-۴ مدل های احتمالاتی تقاضای لرزه ای ۶۹
- شکل ۱۷-۴ پارامتر های نیاز لرزه ای ستون پل بدون جداساز لرزه ای ۷۰
- شکل ۱۸-۴ پارامتر های نیاز لرزه ای ستون پل با جداساز لرزه ای ۷۱
- شکل ۱۹-۴ تأثیر مقدار میانگین بر شکنندگی ۷۲
- شکل ۲۰-۴ تأثیر مقدار پراکندگی بر شکنندگی ۷۳
- شکل ۲۱-۴ منحنی شکنندگی پل بدون استفاده از جدا ساز لرزه ای ۷۵
- شکل ۲۲-۴ منحنی شکنندگی پل در وضعیت استفاده از جداسازی لرزه ای ۷۶
- شکل ۲۳-۴ منحنی شکنندگی پل بدون جداساز و با جداساز در سطوح آسیب جزئی ۷۸
- شکل ۲۴-۴ مقایسه شکنندگی پل در حالت با جداساز و بدون جداساز در سطح آسیب جزئی ۷۸
- شکل ۲۵-۴ مقایسه شکنندگی پل بدون جداساز و با جداساز در سطح آسیب متوسط ۷۹
- شکل ۲۶-۴ مقایسه شکنندگی پل بدون جداساز و با جداساز در سطح آسیب گسترده ۸۰
- شکل ۲۷-۴ مقایسه شکنندگی پل بدون جداساز و با جداساز در سطح آسیب کامل ۸۰

فهرست جدول ها

جدول ۱-۳ پارامترهای هندسی توصیف کننده مدل پل	۴۸
جدول ۲-۳ رده بندی ضریب اصلاح پاسخ	۵۱
جدول ۳-۳ پارامترهای طراحی جداساز لرزه ای	۵۲
جدول ۴-۳ پارامترهای طراحی جداساز لرزه ای	۵۲
جدول ۱-۴: مقایسه پریود مدها در حالت پل با شعاع ۶۶ متر ($R=0.5L$)	۶۵
جدول (۲-۴) لیست اعضای اولیه و ثانویه در پل مورد مطالعه	۷۴
جدول (۳-۴) میزان ظرفیت ستون ها در سطوح آسیب چهارگانه	۷۵



فصل اول:

کلیات پژوهش

۱-۱ مقدمه

خرابی های پل ها در زلزله های گذشته عملکرد قابل قبولی از پل ها نشان نداده اند. از طرفی پل ها نقشی تعیین کننده ای در فرآیند امدادرسانی پس از زلزله خواهند داشت. علاوه بر این برای تامین ملزومات ضروری در حین این فرآیند و تسهیل در بهره برداری از زیرساخت های حیاتی جهت امدادرسانی ، لزوم حفظ عملکرد مناسب پل ها پس از وقوع زلزله را بیش از پیش اذعان می دارد . ویرانی این سازه ها تاثیر شگرفی بر وضعیت اقتصاد یک ناحیه داشته و می تواند آسیب جدی به عملکرد زیرساخت های آن منطقه وارد نموده و همچنین خدمت رسانی پس از وقوع زلزله را با معضلات زیادی روبرو خواهد نمود . لذا به منظور تسهیل در ارزیابی و به دنبال آن مقاوم سازی پل ها اخیراً از منحنی های شکنندگی (Fragility Curves) استفاده می شود . بدین سبب ، اخیراً آئین نامه های بهسازی لرزه ای معتبر دنیا توجه ویژه ای به استفاده از این منحنی ها برای کنترل عملکردی پل ها داشته اند . این منحنی های حالات احتمال شرطی هستند که توسط آنها عملکرد لرزه ای مورد انتظار پل ارزیابی می گردد. بطوریکه علاوه بر استفاده در روند ارزیابی لرزه ای پل ها، در طراحی پل ها نیز استفاده شده است . بدین صورت که کارشناسان با استفاده از نتایج منحنی شکنندگی تاثیر تغییرات پارامترهای طراحی پل را در خرابی های مورد انتظار ناشی از زخداد زلزله مورد مطالعه قرار می دهند. در این تحقیق به ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای پل های عرشه باکس بتن ارمه چند قابی با قوس افقی دارای سیستم جداساز لرزه ای با استفاده از منحنی شکنندگی پرداخته شده است .

۲-۱ بیان مساله

امروزه ، به علت توسعه شهرها ، تردد وسایل نقلیه ، نیاز انسان به جاده ها و شریانهای حیاتی فزونی یافته اند . با توجه به محدودیتهای موجود مانند کمبود فضای شهری و موانع موجود در مسیر راه، ایجاد پل هایی با ارتفاع پایه های متغیر و انحنای افقی یا قائم ناگزیر شده است . یکی از حادثترین مشکلات ناشی از زلزله ، خرابی وارده به مسیرهای تردد شهری بوده اند . این خرابی ها با تبعات جبران ناپذیری مواجه خواهند بود .

یکی از موضوعاتی که در پژوهش های اخیر نگاه ویژه ای به آن شده است، ارزیابی عملکرد لرزه های پل های عرشه باکس بتنی چندقابه تحت تاثیر رکوردهای زلزله وارد به سازه پل بوده است . ساختار هندسی پیچیده پل می تواند پیش بینی و آنالیز رفتار را مشکل و در نهایت احتمال آسیب پذیری را افزایش دهد . در پل های با طول نسبتاً زیاد اثر نامنظمی می تواند وضعیت بحرانی تری به خود گیرد . مضاف بر نامنظمی های سازه ای و تغییرات احتمالی در شرایط ژئوتکنیکی محل درساختگاه پل ، در حین وقوع زمین لرزه هر یک از پایه های پل در معرض تحریک های گوناگونی^۱ قرار خواهند گرفت . یکی از مواردی که میتواند در عملکرد لرزه های پل ها تاثیر بسزایی داشته باشد ، استفاده از سیستم جداساز لرزه ای^۲ (LRB) خواهد بود . از طرفی با توجه به لزوم بررسی اطمینانی تر عملکرد سازه ها در مقابل زلزله، پر واضح است عملکرد دقیق تر، برخورد احتمالاتی با متغیر های تصادفی بوده و با توجه به ماهیت زلزله و عدم قطعیت های موجود ، نیاز به بررسی پارامترهای مختلف تاثیرگذار بر موضوع می باشد . لذا موضوعی که در این پژوهش سعی بر آن است ارزیابی عملکرد لرزه های پلهای عرشه باکس بتن ارمه چند قابی با قوس افقی تحت اثر زلزله دارای سیستم جداساز لرزه ای با توجه به عدم قطعیت و همچنین به بررسی دقیقتر منحنی های شکنندگی آن پرداخته شود . برآورد آسیب پذیری پل و اعضای آن، نقش برجسته ای در بررسی تلفات احتمالی سازه و نیز تصمیم گیری برای ایمنی و ملاحظات پس از وقوع زلزله دارد. از این روی در شرایط کنونی بهره گیری از منحنی های شکنندگی که حالات احتمالاتی شرطی بوده و احتمال فراگذشت سازه پل یا اجزای آن را از سطوح خرابی های معین ، مشخص می کنند، گسترش یافته است. از منحنی های شکنندگی برای کنترل کمی پاسخ منحنی های شکنندگی را به دو بخش دسته بندی می شوند :

¹ Multiple Support Excitation

² Lead Robber Bearing (LRB)

الف - منحنی شکنندگی های تجربی که بر مبنای اطلاعات بدست آمده از خرابی پیشین تولید می شوند .

ب- ترسیم منحنی های شکنندگی تحلیلی توسط تحلیل دینامیکی سازه با شبیه سازی عددی پاسخ لرزه ای سازه ها

علی رغم وجود شیوه های گوناگونی برای تحلیل ، بدیهی است که اطمینانی ترین روش، (NLTHA) و یا به عبارتی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی می باشد. لزوم دانستن مفاهیم آمار و احتمالات جهت تولید یا ترسیم Fragility Curve ضروری خواهد بود . بدلیل مواجهه یا عدم قطعیت های متفاوتی درجوانب گوناگون نظیر شرایط هندسی ، بارگذاری و سایر شرایط از قبیل پارامترهای ژئوتکنیکی به هریک از این داده ها یک نوع توزیع احتمالاتی نسبت داده می شود. در اختیار داشتن داده های توزیع احتمالاتی پارامترهای مختلف ، منجر به تولید مدل های متفاوت تحت اثر شتاب نگاشت های با خصوصیات متنوع شده و در نهایت پارامترهای مختلف پاسخ آنها حاصل می گردد . با انتخاب یک معیار خرابی که تابعی از پارامترهای متغیرهای گوناگونی می باشند میزان خسارت مشخص می شود . در ادامه این فرآیند با علم به معیار خرابی احتمال فراگذشت سطح مشخصی از وقوع خسارت به ازای شدت معین زمین لرزه حاصل شده و در نهایت منجر به تولید منحنی های شکنندگی می شود . این منحنی ها علاوه بر ارزیابی خطر لرزه ای در جهت دهی به انتخاب روش های مقاوم سازی ، مقایسه شیوه های مختلف و اتخاذ بهینه ترین گزینه کاربرد عمده ای دارد و در امر برنامه ریزی پس از رخداد زلزله کلیدی می باشد . با توجه به آنکه منحنی های منحنی های ترسیم شده کاربرد عمده ای دارد و به عنوان ابزار کارآمد در اختیار پژوهشگران قرار می گیرد اعتبار آنها بسیار مهم و حیاتی می باشد . لذا از دقیق ترین روش تحلیل ، تحت عنوان ¹(NLTHA) با معتبرترین فرضیات مدل سازی اجزا جهت ترسیم منحنی های شکنندگی استفاده می شود .

¹ Nonlinear Time History Analysis

۳-۱ اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

پل ها به عنوان یکی از اصلی ترین و حیاتی ترین سازه ها در شبکه های حمل و نقل هر کشور محسوب می شوند. ارزیابی آسیب پذیری شریان های حیاتی از جمله راه ها و ابنیه فنی به دلیل آنکه به بسیاری از فعالیت های کلان و استراتژیک وابسته است از اهمیت شایانی برخوردار است. علاوه بر کارکرد اصلی شبکه حمل و نقل در ترانزیت کالا و مسافر، وجود راه (خصوصا راه های مبادی ورودی و خروجی شهری) در زمان وقوع سوانح طبیعی تاثیر بسزایی در فعالیت های امداد و نجات و ایجاد شرایط طبیعی بعد از وقوع حادثه دارد. همچنین به لحاظ اقتصادی، ابنیه و تاسیسات وابسته به آن از جمله سرمایه های مهم هر کشوری به شمار رفته از این رو توجه همه جانبه به مقوله کاهش آسیب پذیری راه ها و ابنیه فنی از ضروریات اجتناب ناپذیر به شمار می رود.

۴-۱ فرضیات تحقیق

با توجه به تاریخچه مطالعات انجام شده و همچنین بررسی اثراتی که زلزله اصلی دارد، به نظر می رسد بررسی استفاده از جداساز های لرزه ای بر روی عملکرد لرزه ای پلهای عرشه باکس بتن آرمه که به عنوان یکی از روش های ویژه طراحی عملکردی نیز می باشد مثمر ثمر واقع گردد. این پژوهش با هدف بررسی استفاده از سیستم جداساز لرزه ای هسته سربی (LRB) بر روی عملکرد لرزه ای پلهای عرشه باکس بتن آرمه دارای قوس افقی به کمک رسم منحنی های شکنندگی مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت بررسی موضوع ذکر شده در ابتدا باید مدلسازی پل با استفاده از نرم افزار CSI Bridge انجام شده و در مرحله بعدی اثر رکوردهای زلزله را در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثر جداساز به سازه را مورد بررسی و تحلیل قرار داده، سپس با اعمال رکوردهای زلزله مختلف منحنی های شکنندگی پل ها تولید می گردد. منحنی شکنندگی، بیانگر احتمال خرابی در یک میزان مشخص شده در سطوح مختلفی از تحریکات زمین لرزه است که به لحاظ ریاضی احتمال وقوع خسارات سازه را نمایش می دهد. بررسی احتمالاتی موضوع فوق و

لحاظ کردن عدم قطعیت، درک بهتر و واقعی تری نسبت به رویکرد معینی در مورد رفتار سازه ارائه خواهد داد.

برای ارزیابی سازه‌های مدل مورد بررسی نیازمند به استفاده از نرم افزار مدل سازی پل می باشیم که در این تحقیق از نرم افزار CSI Bridge استفاده خواهد شد. پس از نرم افزار SAP از برنامه CSI Bridge بعنوان یک نرم افزار جامع تجاری و قدرتمند جهت تحلیل و طراحی تخصصی انواع پل استفاده می شود که توسط کمپانی CSI ارائه شده است . از قابلیت های ویژه این برنامه می توان به مدل سازی پل با ساختار پیچیده، تجزیه و تحلیل خزش و انقباض، کشش کابل اشاره نمود . ضمناً برنامه CSI Bridge قادر به تخصیص هندسه ی غیرخطی (تحلیل پی-دلتا و تغیر شکل های بزرگ) مصالح غیرخطی، تعریف شرایط مرزی و حالات بار می باشد . با استفاده از این نرم افزار می توان جهت نشان دادن توالی ساخت در انواع پل ها نظیر پل های معلق، کابلی، پلهای بتنی با روش طره متعادل از نمودار گانت و برنامه ریزی ساخت به سهولت بهره برداری نمود و مورد استفاده قرار داد .

۱-۵ اهداف مشخص تحقیق

از اهداف مشخص شده این مطالعه ارزیابی خسارات پل عرشه باکس بتنی دارای قوس افقی است که از این طریق میزان آسیب وارده بررسی شده و در این راستا استفاده از جداگر لرزه ای و تاثیر آن در کاهش آسیب پذیری مورد ارزیابی قرار گرفته است . در پایان مقایسه شیوه های بکار گرفته شده در ارزیابی انجام شده و راهکارها و پیشنهاداتی در توسعه تحقیقات ارائه شده است .

۱-۶ نوع آوری

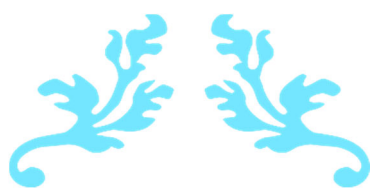
با توجه به آنکه سایر روش های مقاوم سازی در ارزیابی لرزه ای این کلاس از پل در تحقیقات پیشین مطالعه شده است . استفاده از جداساز لرزه ای در ارزیابی لرزه ای و مقایسه آن در حالت بدون استفاده از جداساز هسته سربی ، نوع آوری این تحقیق می باشد .

۱-۷ ساختار پایان نامه

تحقیقات انجام شده در این مطالعه ، ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای پل های عرشه باکس بتن ارمه چند قابی با قوس افقی دارای جداگر لرزه ای تحت اثر زلزله اصلی با استفاده از منحنی شکنندگی متمرکز شده است . در ادامه فصول مورد بحث، به طور خلاصه حاوی مطالب ذیل است :

- **فصل دوم:** در این فصل ضمن مرور تاریخچه سیستم جداگر لرزه ای و معرفی انواع جداسازها ، سیستم های ائتلاف انرژی و بیان ویژگی های آن ، به توصیف روش تولید منحنی شکنندگی (Fragility curve) در تخمین احتمال خرابی پرداخته شده است . ضمناً به بررسی نتایج تحقیقات و مطالعات پژوهشگران در دهه های پیشین پرداخته و آسیب پذیری پل ها در مقابل زمین لرزه های رخ داده شده در ادوار مربوطه مرور شده است .
- **فصل سوم:** در این فصل ضمن آشنایی با ویژگی ها و قابلیت های نرم افزار CSI Bridge به بررسی پارامترهای مورد نیاز جهت طراحی و تخصیص جداساز لرزه ای هسته سربی پرداخته می شود . ضمناً یک تیپ از پل مورد مطالعه در این تحقیق با شرایط هندسی و فرضیات مربوطه در مصالح ، توصیف می شود . در ادامه با انجام آنالیز Modal ، زمان تناوب و شکل های مودی پل صورت گرفته و پس از آن با انجام آنالیز NLTHA (تاریخچه زمانی غیرخطی) و استخراج پاسخ های مربوط به اعضا منحنی های شکنندگی ترسیم می شوند .

- **فصل چهارم:** در این فصل داده ها و پارامترهای مربوطه ارائه شده و با تعریف روابط احتمال شکنندگی پل ، منتهی به ترسیم منحنی های شکنندگی شده و نتایج حاصله توصیف و مقایسه شده است .
- **فصل پنجم:** فصل پنجم به بحث ، نتیجه گیری و جمع بندی کلی از این پروژه پرداخته خواهد شد و همچنین پیشنهاداتی به منظور توسعه در تحقیقات آتی بیان خواهد شد.



فصل دوم:

مروری بر ادبیات موضوع

۱-۲ مقدمه

منظور از ریسک پذیری لرزه ای بیان احتمال آسیب ها و تلفات در نواحی لرزه خیز در اثر زلزله است . ارزیابی ریسک لرزه ای اولین اقدامیست که در بازه زمانی اقدامات مربوط به زلزله باید به آن پرداخته شود. در فرایند ارزیابی ریسک لرزه ای ،زمینه های گستره زیادی از علوم از قبیل لرزه شناسی و مهندسی ژئوتکنیک که در بیان کمی ارتعاشی که در حین زلزله به سازه اعمال می شود دخیل خواهند بود. علم مهندسی سازه در بیان کمی نتایج و خسارات وارده و علوم اقتصادی در تخمین هزینه ترمیم و تبیین عواقب اجتماعی و اقتصادی خسارات تاثیرگذار نشان داده شده اند . عدم قطعیت های موجود در جوانب گوناگون ارزیابی ، لزوم استفاده از روش های احتمالاتی را می طلبد که این امر، منجر به افزایش صعوبت در بررسی دقیق تر موضوع می گردد .

۲-۲ تاریخچه ی مختصر جداسازی پایه

از نخستین ایده های جداسازی سازه از پایه را می شود به مقبره کوروش در پاسارگاد در عصر ایران قدیم یافت . با ملاحظه در شیوه ساخت و جانمایی مصالح سنگی و عدم استفاده از ملات در بین آنها حاکی از آنست که به نوعی با این اقدام از جابجایی و لغزش این المان ها بر روی یکدیگر جلوگیری شده است.



شکل ۱-۲ مقبره کوروش در پاسارگاد

با نگاهی به گذشته ، سیستم جداساز لرزه ای در سال ۱۹۰۰ در سازه ای در توکیو با کاربری هتل دیده می شود . استفاده از جداگر لرزه ای در پلها نیز پیش از سال ۱۹۷۰ رایج شده است . قابلیت اتلاف انرژی که

ناشی از افزایش انعطاف پذیری بوده از نخستین کاربردهای جداگر در پل ها می باشد . ایده جداگر های سربی لاستیکی در سال ۱۹۷۰ تولید شده است و منجر به افزایش انعطاف پذیری و ارتقای میزان میرایی در یک واحد منفرد شده اند. در آغازین سال های ۱۹۸۰ ارتقای تکنولوژی در صنایع لاستیک منجر به تولید قطعات جدیدی تحت عنوان " لاستیک با میرایی بالا " ^۱ شده اند . این اجزای باربر در کرنش های برشی پایین، از سختی زیادی برخوردارند و از سویی دیگر در کرنش های بالا سختی پایین داشته اند .

۳-۲ جداساز های لرزه ای

جداساز های لرزه ای به دو گروه تفکیک می شوند : دسته اول که بوسیله اجزاء الاستومری ساخته می شوند و دسته دوم توسط اجزاء لغزشی تولید می گردند . عمده سازه های جداسازی شده در پل ها از اجزای الاستومری بهره می برند که ممکن است سیستم اتلاف انرژی در آن ، هسته سربی در مرکز و یا گوشه های آن باشد . به این جداگرها، جداگرهای سربی لاستیکی ^۲ (LRB) گفته می شود. جداگرهای لغزشی نیز عمدتاً از تیپ جداگرهای آونگی اصطکاکی ^۳ (FPB) هستند و سیستم اتلاف انرژی در آن ، اصطکاک می باشد. جزئیات این نوع از جداگرها مطابق شکل ۲-۲ بصورت شماتیک نمایش داده می شود . انتخاب نوع جدا گر تصمیم مهم می باشد و باید ملاحظات فنی از عوامل مختلف در نظر گرفته شود، زیرا عواملی از قبیل ظرفیت تحمل بار محوری ، فضای آزاد موجود ^۴ جهت تامین جابجایی های احتمالی در حین زمین لرزه ، فضای لازم جهت جانمایی جداگر ، بارهای سرویس و دوام ^۵ در برابر دراز مدت در انتخاب آن تاثیر بسزایی خواهد داشت . ضمناً مواد استفاده شده در تولید جداگر از اهمیت زیادی برخوردار است . بطوریکه می بایست از لحاظ شیمیایی واکنش ناپذیر بوده و در مقابل آلودگی های زیست محیطی مقاوم باشد .

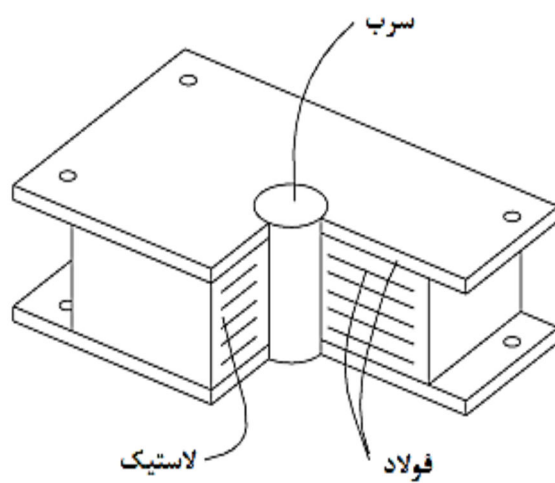
^۱ HDRB

^۲ Lead Robber Bearing (LRB)

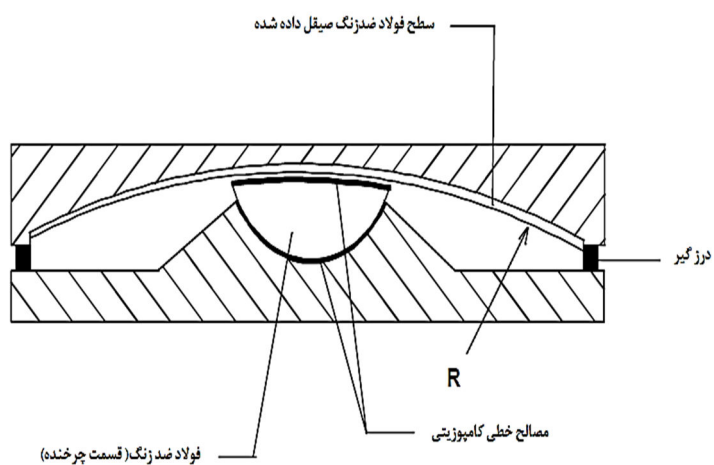
^۳ Friction Pendulum Bearing (FPB)

^۴ Clearance

^۵ Reliability

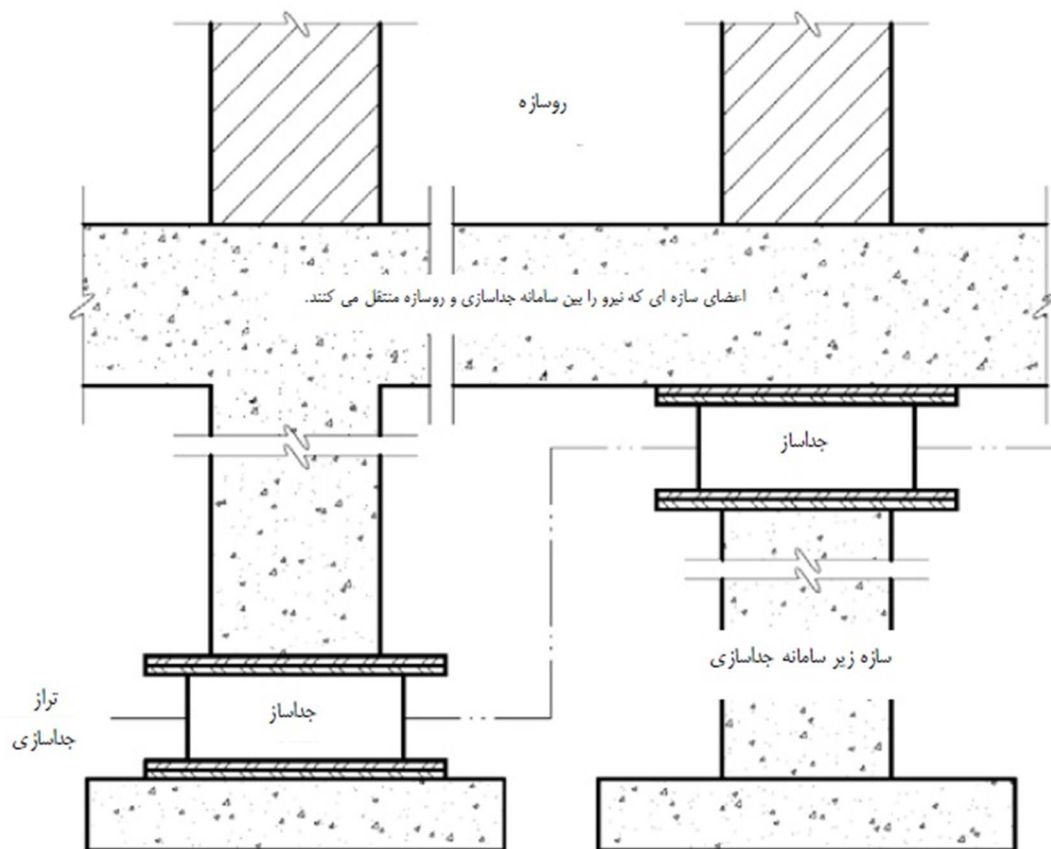


الف - جداساز هسته سربی



ب- جداساز آونگی اصطکاکی

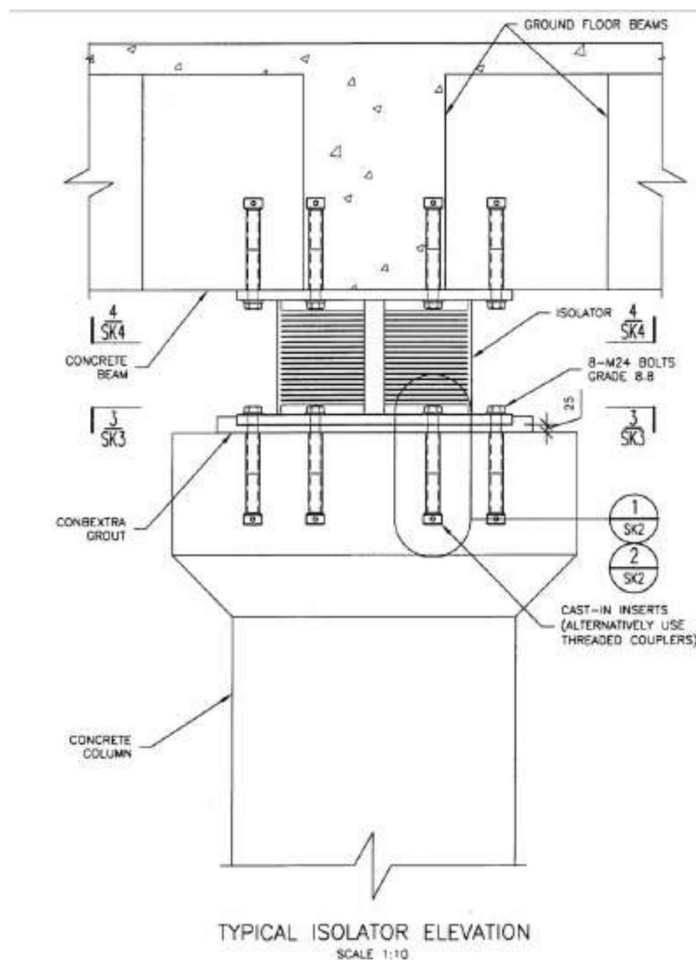
شکل ۲-۲ دو نوع مهم از جداگرهای لرزه‌ای استفاده شده به منظور محافظت لرزه‌ای سازه [۱]



شکل ۲-۳ مکانیزم جداسازی لرزه ای [۲]

یکی از شیوه های کنترل و یا محدود نمودن تحرکات لرزه ای در سازه پلها استفاده از جداساز های لرزه ای می باشد. هدف این سامانه و شیوه های جداسازی شده در این روش ها ، محدود نمودن پاسخ لرزه ای، و کاستن نیرو و شتاب ورودی زلزله به پل می باشد. بنابراین این رویکرد اصل بر ایجاد انعطاف پذیری در پایه سازه در صفحه افقی مبتنی است و از اجزای میران برای کاهش دامنه حرکت ناشی از زلزله و جلوگیری از انتقال قسمت اعظمی از حرکت افقی زمین به سازه و (اثر زلزله را تا ۸۰ درصد کاهش میدهد) کاهش شتابهای طبقات و تغییر مکان های نسبی (Drift) می شود. باید توجه داشت که جداگرها در کل مقیاس سازه نصب می شوند و اجرای آن تنها در بخشی از آن باعث ایجاد تفاوت در جابجایی دو بخش می گردند. دوره تناوب نوسان سازه های جداسازی شده ۲ تا ۴ ثانیه تخمین زده می شود. در سازه هایی که بروی خاک های خیلی ضعیف بنا ساخته خواهند شد یا سازه های بلند (Tall Building) حصول انعطاف پذیری ممکن

است براحتی مقدور نباشد بنابراین استفاده از جداگر مفید واقع خواهد شد. جداگرهای لرزه ای، توسط متعلقاتی مطابق شکل ۴-۲ حدفاصل روسازه و زیرسازه تعبیه می گردد و موجب افزایش دوره تناوب اصلی سازه می شود.



شکل ۴-۲ جانمایی جداگر لرزه ایی در سازه [۳]

از اینرو ملاحظات جهت اتلاف انرژی در جداگر لرزه ای تبیین می گردد تا علاوه بر کاهش جابجایی های نسبی، منجر به کاستن شتاب سازه نیز شود. بنابراین لازم است یک جداگر لرزه ای دارای خصوصیات ویژه در تحمل بارهای ثقلی و جانبی، تامین انعطاف پذیری و ظرفیت بالا در جذب انرژی باشد. ویژگی های مزبور توسط یک یا چند ابزار در سیستم جداگر لرزه ای محقق می شود. امان های ضربه گیر نیز جهت کاهش جابجایی جداسازها، توسط طراحان محاسبه شده و منظور می گردد.

۲-۳-۱ انواع جداساز های لرزه ای

جداسازهای الاستومری (Elastomeric Bearing) شامل موارد زیر می باشند :

- جداسازهای لاستیکی با ورقه های فولادی و میرایی کم

- جداسازهای لاستیکی با میرایی زیاد. (High Damping)

- جداسازهای لاستیکی هسته ی سربی (LRB)

جداسازهای اصطکاکی (Friction Bearings) شامل موارد زیر می باشند :

- جداسازهای اصطکاکی.

- جداساز های الاستیک اصطکاکی.

- جداساز های اصطکاکی پاندولی (FPB)

جهت برخورداری از قابلیت های توام جداساز های لاستیکی و اصطکاکی، این دست از جداگرها در دو

حالت موازی و سری ادغام می شوند .

۲-۳-۲ عملکرد در برابر بار های فشاری

افزایش تعداد لایه های لاستیکی از طریق کاهش در ضخامت آن ها در جداسازهای از تیپ لاستیکی ، منجر به افزایش ضریب شکل یک بعدی و به همین ترتیب افزایش سختی قائم جداساز شده و همچنین مولفه نیرو و تغییر شکل رابطه خطی پیدا خواهند کرد.

۲-۳-۳ عملکرد در برابر بارهای کششی

رفتار جداساز های لاستیکی به همراه ورق های فولادی در برابر نیروی کششی بصورت دو خطی می باشد . سختی کششی این جداگرها در مقایسه با سختی آن ها در جهت فشاری به طور قابل ملاحظه ای کم تر می باشد بطوریکه ماکزیمم ظرفیت مجاز تنش کششی وارده ۱۰ تا ۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. جداگرهای لاستیکی ظرفیت کمتری در برابر نیروهای کششی داشته و از سختی پایینی برخوردارند . ضمناً ، جداسازهای از تیپ LRB محدودیت زیادی در برابر کشش دارند. در نتیجه در طراحی سازه ها اغلب ، هدف

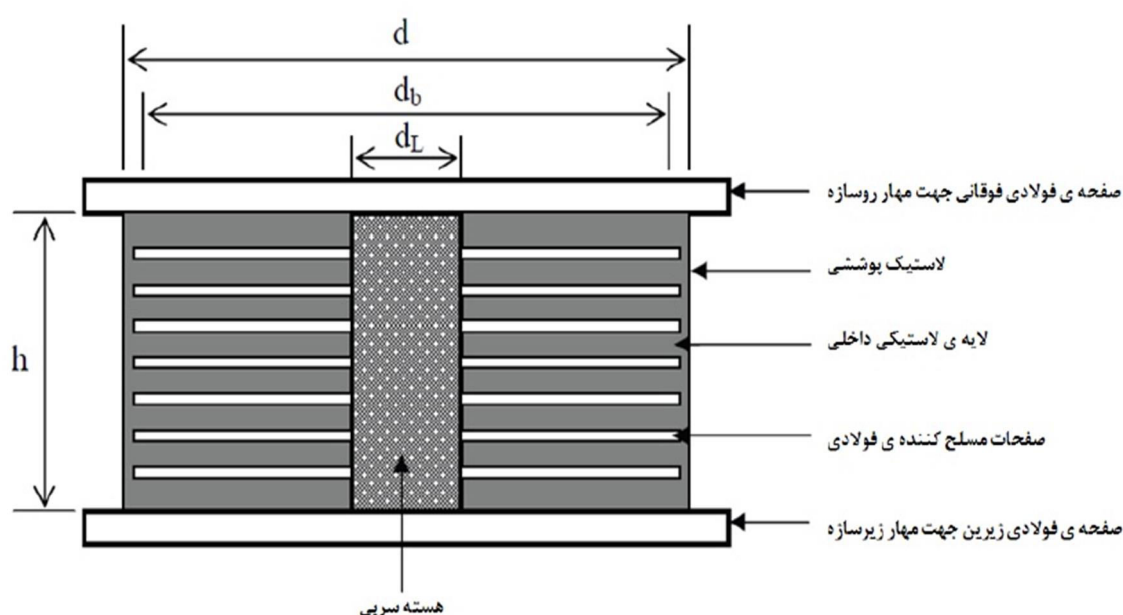
به حداقل رسانیدن کشش می باشد . جهت رفع موانع و محدودیت ها در حین نصب جداگر و متعلقات مربوطه ، و بدلیل احتمال بالای رخداد تغییر مکان های ناشی از حرکت پاندولی ، لازم به ایجاد درز انقطاع می باشد . استفاده از اتصالات انعطاف پذیر در تاسیسات مکانیکی و برقی این ساختمان ها به منظور مطابقت با جابجایی های احتمالی جداگر امری بسیار مهم می باشد .

۲-۳-۴ جداگرهای سربی لاستیکی (LRB)

جداگر سربی لاستیکی باربرهای الاستومری هستند که با هدف افزایش اتلاف انرژی در حین جابجایی های افقی با استفاده از لاستیک با میرایی اندک و یک یا چند هسته سربی در مرکز و گوشه ها تقویت شده اند. این لایه ها بین لایه های نازک فولادی^۱ به هم فشرده شده اند. این جداگرهای به کار رفته در پل اغلب بطور مستقیم زیر روسازه نصب می شوند و جایگزین تکیه گاه های انبساط مرسوم بر روی زیرسازه قرار می گیرند. مطابق شکل ۲-۵ ، مقطعی از یک نمونه جداگر لرزه ای با مقطع دایره معمولی نمایان شده است . هسته های سربی در سوراخ از پیش ایجاد شده ای در جداگر با فشار یا تزریق قرار داده میشود و ابعاد آن جهت فراهم نمودن امکان تداخل مناسب بعد از فرایند نصب تعیین و تطبیق می شود . ساختمان کریستالی سرب بدلیل قابلیت برگشت پذیر بودن به حالت اولیه و همچنین پتانسیل بالا در مقابله با پدیده خستگی از مهمترین دلایل انتخاب این ماده می باشد . هسته سربی به همراه لاستیک ها ، سختی اولیه را تحت بارهای بهره برداری ایجاد نموده و منجر به استهلاک انرژی در اثر بارهای جانبی می شود . فلز سرب بدلیل ویژگی هایی خاص خود ، تحت بار های بالاتر جاری شده و منجر به کاهش قابل توجه ای در سختی جانبی جداگر مربع به حد تسلیم می رسد و تغییر شکل فیزیکی می دهد. بنابراین رفتار پایداری را تحت سیکل های متوالی با تشکیل حلقه های Hysteresis و رفتار دوخطی نشان داده و بدین ترتیب منجر به استهلاک سطح قابل توجه ای از انرژی در زمان وقوع زمین لرزه ها می شود . از صفحه های فولادی در قسمت تحتانی و

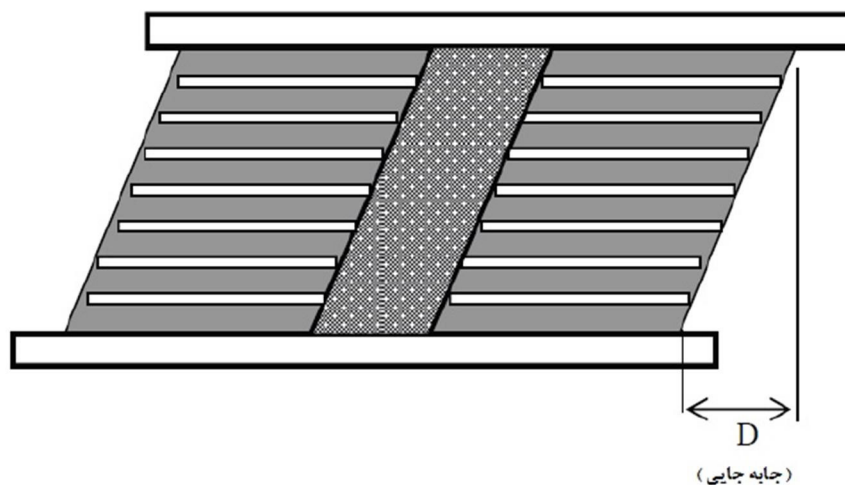
^۱Shim

فوقانی جداگر بمنظور اتصال جداگر به روسازه و نیز زیرسازه استفاده می شود . لایه های لاستیکی داخلی که بطور معمول ضخامتی بین ۸ تا ۲۰ میلی متر دارند موجب بالابردن انعطاف پذیری در جهت جانبی مهیا می شوند . صفحات مسلح کننده فولادی که معمولاً ۳ یا ۴ میلیمتر ضخامت دارند ضمن محصورشدگی هسته سربی موجب تامین سختی در جهت قائم و ظرفیت باربری محوری می گردد . جداگر در جهت قائم سخت اما در جهت افقی در زمانیکه که هسته سربی تسلیم شود انعطاف پذیر می باشد.



شکل ۲-۵ مقطعی از جداگر لرزه ای [۴]

سختی جانبی لایه های لاستیکی و هسته سربی تحت بارهای سرویس بصورت توأم علیه تحرکات جانبی تامین شده و کفایت می کند . با جاری شدن هسته سربی در اثر بارهای لرزه ای صفحات مسلح کننده فولادی به این هسته در اثر تغییر شکل برشی ، موجب کاهش سختی جانبی جداگر و متعاقب آن تغییر شکل برشی لایه های لاستیکی شده و انعطاف پذیری جانبی جداگر و پرپود سازه جداسازی شده افزایش می یابد . مطابق شکل ۲-۶ تغییر شکل جداساز لرزه ای تحت اثر بارگذاری جانبی نمایان می شود.



شکل ۲-۶ تغییر شکل برشی در یک جداگر سربی لاستیکی [۴]

۲-۳-۵ اتلاف انرژی^۱

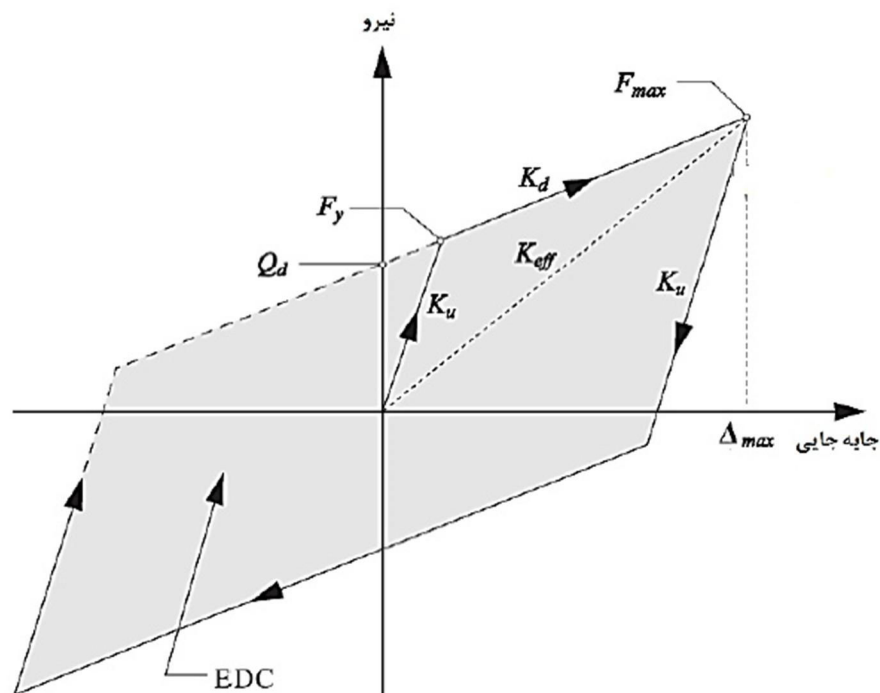
همانطور که انتظار می رود سختی جانبی کم جداگرها باعث کاهش نیروهای لرزه ای می شود اما این موضوع امکان وقوع جابجایی های زیادی در رو سازه را نیز می تواند موجب شود. در پل ها جهت تدارک فضا برای این جابجایی از اتصالات انبساطی عریض تر و تکیه گاه های با طول بیشتری استفاده خواهد شد. بنابراین اغلب سامانه های جداسازی دارای یک مکانیسم اتلاف انرژی جهت اعمال سطح قابل توجهی از میرایی به سازه خواهند بود. در نتیجه این جابجایی ها در محدوده قابل قبولی قرار خواهند گرفت. مکانیسم هایی این چینی در ذات خود به صورت چرخه های پسماندی^۲ می باشند بطوریکه که تحت بارهای تناوبی بین منحنی های نیرو-جابجایی، بارگذاری و باربرداری یک ناهمخوانی وجود دارد.

سطح هاشور خورده زیر منحنی بیانگر انرژی مستهلک شده طی هر سیکل از حرکت جداساز می باشد. با بهره گیری از مجموعه نرم افزارهای تحلیل (NLTHA)، ابزار تحلیلی برای این سیستم های غیرخطی فراهم است اما شامل محدودیت هایی از قبیل پیچیده و زمان بر بودن می باشند. بنابراین روش های ساده

^۱ Energy Dissipation

^۲ Hysteresis

شده ای گسترش یافته ، بطوریکه از خصوصیات الاستیک مؤثر و میراگر ویسکوز معادل جهت نمایش دادن استهلاک انرژی استفاده می کنند . مطابق روابط و پارامترهای زیر ، محاسبه نسبت میرایی ویسکوز معادل (β_{eq}) انجام می شود .



شکل ۷-۲ نمودار رفتاری جداساز [۵]

نیروی حداکثر: F_{max} نیروی تسلیم: F_y مقاومت مشخصه: Q_d

سختی مؤثر: K_{eff} سختی الاستیک: K_u سختی پساالاستیک: K_d

حداکثر جابجایی تحمل شده: Δ_{max}

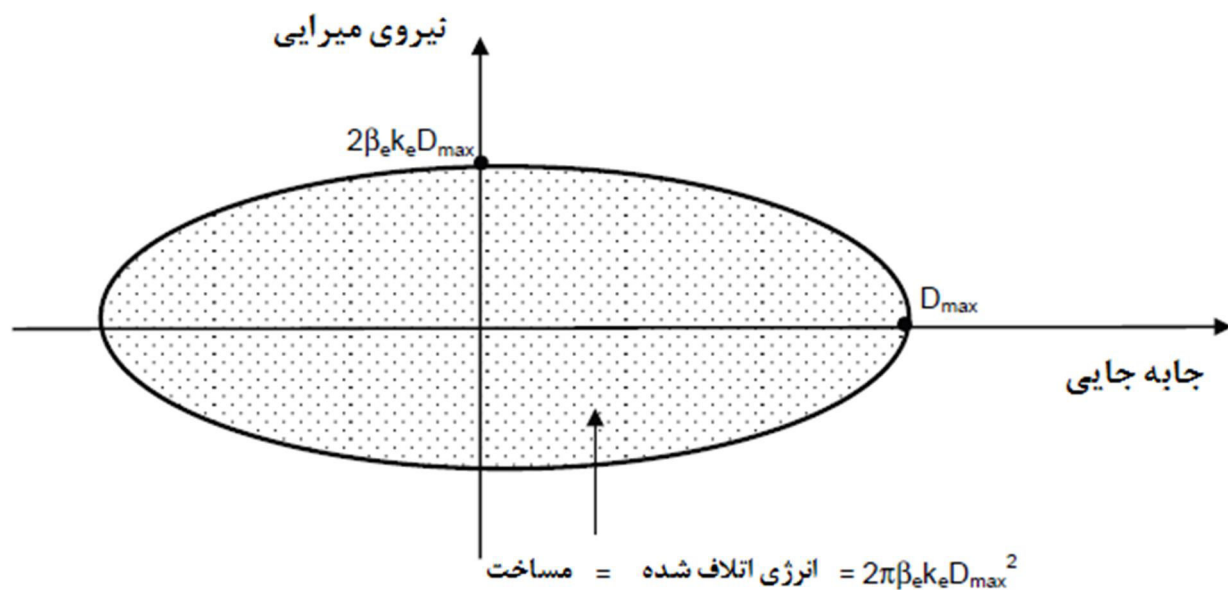
انرژی اتلاف شده به ازای یک چرخه که برابر است با مساحت حلقه هیستریزیس: EDC

محاسبه این نسبت با توجه به برابر بودن انرژی اتلاف شده در هر چرخه از حرکت میراگر و دستگاه

پسماندی انجام می گردد . با تساوی مساحت زیر چرخه نیرو جابجایی در شکل ۲-۸ با سطح زیر منحنی

پسماند در شکل ۷-۲ حاصل می گردد . مطابق رابطه مقابل می توان بیان نمود :

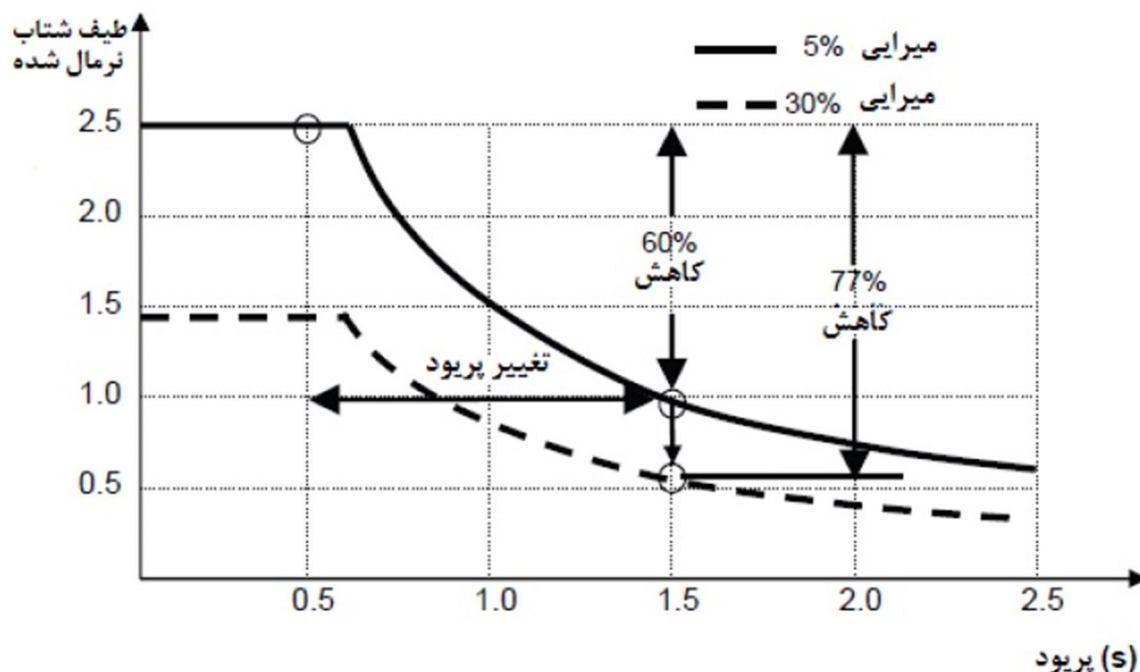
$$\beta_{eq} = \frac{\text{انرژی اتلاف شده پسماندی}}{2\pi K_e D_{max}^2}$$



شکل ۲-۸ حلقه نیرو-جابجایی میراگر ویسکوز

مطابق شکل ۲-۹ با افزایش میزان میرایی علاوه بر جابجایی، نیروهای لرزه‌ای نیز در مقایسه با نیروهای به دست آمده از طیف با میرایی ۵ درصد کاهش می‌یابند. منحنی‌های پر نشان دهنده طیف پاسخ شتاب با ۵ درصد میرایی و منحنی‌های خط چین نشان دهنده طیف پاسخ شتاب با ۳۰ درصد میرایی می‌باشد و مختص شرایط خاک سخت می‌باشند. شکل ۲-۹ نشان دهنده این مطلب می‌باشد که در پریود ۱.۵ ثانیه چنانچه میزان میرایی از ۵ درصد به ۳۰ درصد فزونی یابد کاهش ناشی از تاثیر انعطاف پذیری از مقدار ۶۰

درصد به ۷۷ درصد رسانده می شود .



شکل ۲-۹ اثر میرایی بر پاسخ سازه [۱]

۲-۳-۶ مزایای جداسازی لرزه ای عبارتست از:

- خدمت رسانی بی وقفه و پویایی سازه در حین و پس از زلزله
- کاهش نیروی جانبی وارده به پل
- کاهش خسارات به پایین ترین سطح ممکن از خرابی
- جایگزین مناسب برای سایر سیستم های باربر جانبی (مهاربند یا دیوار برشی)
- امکان سازی استفاده در سازه های موجود (سایت سبز سازه)
- جابجایی فرکانس طبیعی سازه به خارج از دامنه انرژی زلزله
- افزایش میرایی

۲-۴ منحنی های شکنندگی^۱

میزان آسیب پذیری اجزای سازه پل را می توان بر حسب میزان خطر زمین لرزه در هر قسمت از سازه که به شتاب حساس است، توصیف نمود. احتمال وقوع یا فراگذشت از یک سطوح آسیب خاص را بر حسب یک شاخص معرف زمین لرزه مانند PGA , PGV , PGD (به ترتیب جابجایی ، سرعت و شتاب) تبیین کرد. استمرار این فرآیند برای مقادیر مختلف PGA یا سایر مولفه ها منجر به تولید منحنی های شکنندگی می شود. آسیب پذیری در بین حالت های چهارگانه جزئی، متوسط، سنگین و کامل در منحنی شکنندگی توزیع می شود . این منحنی ها در هر سطح از آسیب پذیری تحت یک شدت زمین لرزه خاص به صورت نمودار مجزا ترسیم می شوند و در فرآیند ارزیابی ریسک لرزه ای به عنوان ورودی وارد می شوند.

۴- روش برای بدست آوردن منحنی های شکنندگی وجود دارد:

۱- روش تجربی^۲

۲- بر اساس قضاوت مهندسی^۳

۳- روش تحلیلی^۴

۴- روش ترکیبی^۵

^۱ Fragility Curve

^۲ Empirical Method

^۳ Approach Judgmental

^۴ Analytical Method

^۵ Hybrid Approach

۲-۴-۱ روش تجربی : (Empirical Method)

این روش بر مبنای مشاهدات آسیب به سازه ها در زمین لرزه های گذشته و اطلاعات جمع آوری شده از آن است و چنانچه تمام خصوصیات و اثرات اندرکنش خاک و سازه ، مشخصات چشمه لرزه ای، توپوگرافی و فاصله گسل تا ساختگاه لحاظ گردد ، در فعالیت های عملی روشی قابل قبول است. اما با توجه به آنکه این داده ها مختص یک منطقه بوده اند و همچنین بدلیل فقدان کافی داده های مورد نیاز پیرامون زلزله های پیشین در مناطق با فراوانی جمعیت قابل توجه ، کار برد منحنی های شکنندگی را محدود می سازد .

۲-۴-۱-۱ فواید استفاده از روش تجربی

از مهمترین مزیت های استفاده از روش تجربی ، قابلیت تخمین سازه های قدیمی (ساخت غیراصولی) ، تبیین خرابی های واقعی در تمام اجزا ، در نظر گرفتن موده های واقعی شکست و سهولت در کاربرد آن بدلیل فرضیات ساده و اندکی که دارد می باشد .

۲-۴-۱-۲ محدودیت های روش تجربی

از اصلی ترین محدودیت منحنی های شکنندگی تجربی حتی برای پل های عادی (مقاوم سازی نشده) عدم وجود اطلاعات کافی برای تمامی نوع و کلاس پل ها و سطوح مختلف آسیب پذیری است که منجر به عدم امکان تشکیل منحنی های شکنندگی برای تعداد زیادی از کلاس پل ها شده است . از طرف دیگر دسته بندی کردن پل های کلاس مختلف با هم به منظور افزایش داده ها منجر به غیر یکنواختی اطلاعات و افزایش عدم قطعیت منحنی های شکنندگی شده است . [۶]

۲-۴-۲ روش قضاوت مهندسی (Approach Judgmental)

منحنی های استخراجی در این شیوه به مانند منحنی های FEMA / NIBS و ATC-13 بر مبنای اطلاعات کارشناسان بدست آمده است . این روش مستقل از داده های کمی و کیفی ناشی از محدودیت های آماری آسیب سازه ای است . بطوریکه پذیرش و اعتماد به این منحنی ها و وابسته به تجربه مهندسی و مقتضیات منطقی دارد . در صورت محدودیت استفاده سایر روش ها می توان به این روش رجوع نمود .

۲-۴-۳ روش تحلیلی: (Analytical Method)

چنانچه اطلاعات تجربی کافی در تشکیل منحنی های شکنندگی در دسترس نباشد این روش ها که مبتنی بر آنالیز مدل های گوناگون تحت شدت های افزایشده شتاب زلزله پایگاه داده های آماری است قابل دستیابی هستند . با تعدد آنالیزهای انجام شده درصد کاهش خطا ، کم شده و منحنی های با قابلیت پذیرش مناسب تری نسبت به دو روش قبل بدست می آید. این آنالیز ها با روش های آنالیز تاریخیچه زمانی غیر خطی ، آنالیز خطی طیفی و آنالیز استاتیکی غیر خطی قابل حصول می باشند .

۲-۴-۳-۱ فواید روش تحلیلی

مهمترین مزیت های استفاده از روش تحلیل در تولید منحنی شکنندگی ، مناسب بودن آن در سازه های فاقد سابقه آسیب ، در نظر گرفتن اثر اندرکنش بین خاک و سازه و عدم نیاز به شدت زلزله در این فرایند می باشد .

۲-۴-۳-۲ محدودیت های روش تحلیلی

روش تحلیلی علی رغم برخی مزیت هایی که دارد معایبی نیز دارد که از بارز ترین این محدودیت ها می توان به داشتن روشی خاص و فرضیات پیچیده ، عدم اهتمام به ملاحظات معماری و پارتیشن های داخلی اشاره نمود . ضمناً ، این روش مبتنی بر سازه های واقعی آسیب پذیری نیز نمی باشد . پیشنهاد می شود که منحنی های شکنندگی حاصل از روش تحلیلی با داده های زلزله های واقعی مقیاس شود زیرا کاربرد روش های تحلیلی به علت مراحل محاسباتی زمان بر محدود می باشد .

۲-۴-۴ روش ترکیبی: (Hybrid Method)

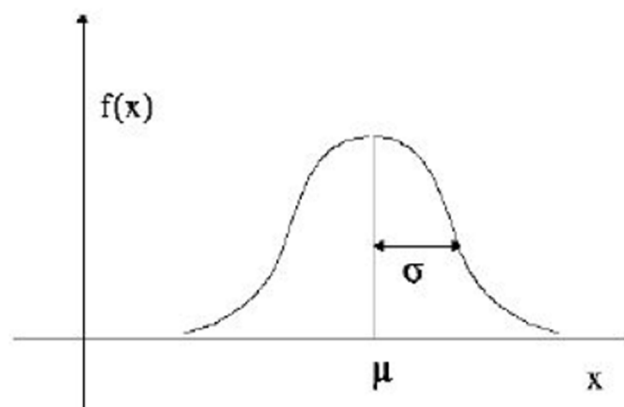
این روش جهت برطرف نمودن نواقص روش های دوم و سوم در کمبود داده ها و بالابردن دقت در مدل سازی استفاده شده است . در روش ترکیبی با ترکیب داده های ناشی از خرابی های گذشته و ارزیابی ریاضی سازه ها در جنبش های پیشین و انجام تحلیل مدل ها نسبت به تولید منحنی شکنندگی اقدام می شود .

۵-۲ اساس کار منحنی های شکنندگی

جهت تولید منحنی های شکنندگی نیاز به یک توزیع آماری مناسب برای مولفه تقاضای مهندسی که از آنالیز دینامیکی غیر خطی بدست می آید می باشد. عمدتاً انجام این فرآیند از توزیع نرمال استفاده شده و برای تخمین احتمال یک توزیع نرمال از سطح زیر منحنی توزیع نرمال بهره گرفته شده است.

۶-۲ توزیع احتمال نرمال

توزیع احتمال نرمال را از مهمترین توزیع های آماری می توان نامید. زیرا کاربردهای گسترده ای در علوم فنی و علوم مهندسی به ویژه در فرآیند تحلیل های قابلیت اعتماد دارد. نمودار این توزیع مطابق شکل (۲-۱۰) تحت عنوان منحنی نرمال تعریف می گردد. شایان ذکر است، اغلب رخ دادهایی که در پژوهش های محققان رخ می دهند از این شیوه توزیع تبعیت می کنند. نام دیگر این منحنی بواسطه تکمیل مطالعات مربوطه توسط Gauss با عنوان منحنی گاوس نامیده می شود.



شکل ۲-۱۰ نمودار توزیع نرمال

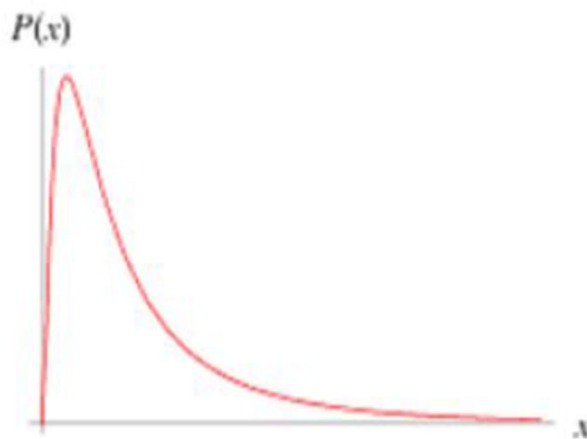
همانطور که در شکل ۲-۱۰ مشخص می باشد بسیاری از موارد وجود دارد که داده ها تمایل به جمع شدن در اطراف مقدار وسطی دارند بدون آنکه متمایل به چپ یا راست باشند و به توزیع نرمال نزدیک می شوند. چگالی احتمال متغیر نرمال X به صورت زیر می باشد، که در آن $\sigma > 0$ است.

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad 0 < \sigma \quad \text{رابطه ۱-۲}$$

در توصیف رابطه ۱-۲، پارامترهای μ و σ معرف میانگین و انحراف معیار توزیع نرمال می باشند. پارامتر تصادفی نرمال با میانگین μ و انحراف معیار $\sigma=1$ متغیر تصادفی استاندارد نامیده می شود و آن را با نماد U تعریف می نمایند. اگر نماد X دارای توزیع نرمال با میانگین μ و انحراف معیار σ باشد، بنابراین متغیر $\frac{X-\mu}{\sigma}$ به متغیر نرمال استاندارد بدل خواهد شد. بدلیل کاربرد فراوان استفاده از تابع چگالی نرمال استاندارد و تابع چگالی تجمعی آن را با نمادهای خاص $\Phi(U)$ و $\Phi(U)$ نیز بیان می نمایند. حل این تابع و استخراج احتمال های لازم با استفاده از تغییر متغیر مزبور و انتقال به فضای نورمال استاندارد میسر می گردد.

۱-۶-۲ توزیع احتمال لوگ نرمال

در صورتیکه $\ln X$ دارای توزیع نرمال باشد متغیر تصادفی X دارای توزیع احتمال لوگ نرمال مطابق شکل ۲-۱۱ خواهد بود. در نتیجه تابع چگالی احتمال آن به صورت زیر نوشته خواهد شد.



شکل ۱۱-۲ نمودار توزیع لوگ نرمال

$$\frac{1}{x\lambda\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\lambda}{\lambda}\right)^2\right] \quad 0 < \lambda \quad \text{رابطه ۲-۲}$$

که در آن $\lambda = E(\ln X)$ و $\sqrt{\lambda^2} = \sqrt{Var(\ln X)}$ به ترتیب معرف میانگین و انحراف معیار استاندارد $\ln X$ می باشند و به عنوان پارامترهای توزیع معرفی می گردند. مقادیر میانگین و واریانس توزیع لوگ نرمال بر اساس

پارامترهای توزیع و با استفاده از روابط زیر قابل دستیابی اند . ضمناً به کمک این روابط مقادیر λ و ξ بشرح زیر قابل استخراج خواهند بود .

$$\lambda = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \xi^2 \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

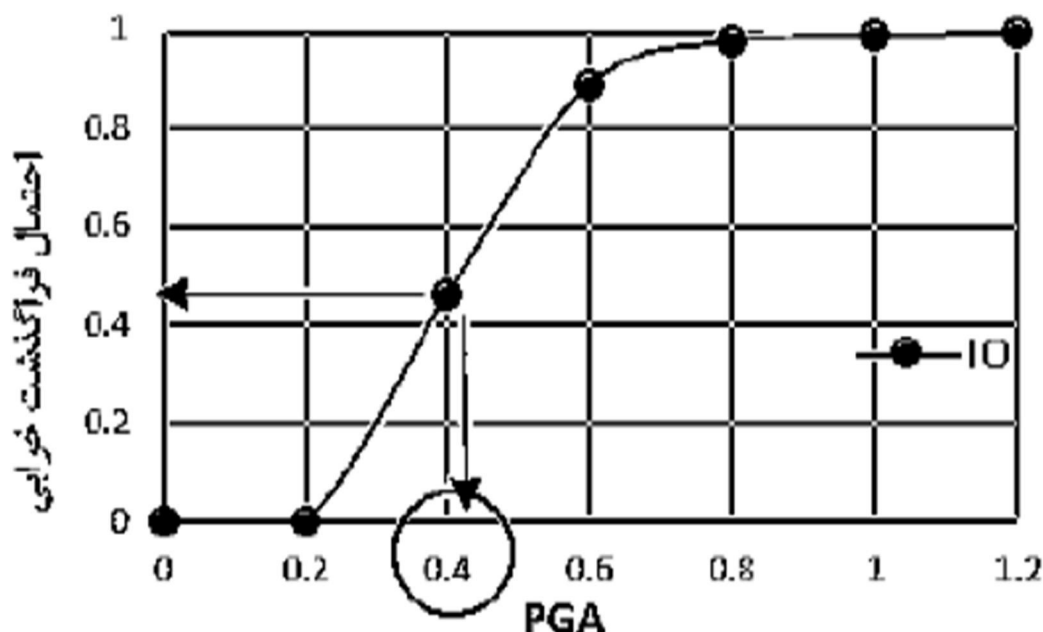
$$\xi^2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \lambda^2 \quad \text{رابطه ۲-۴}$$

۷-۲ تولید منحنی های شکنندگی

عموماً ، منحنی های شکنندگی بدین ترتیب تعریف می شوند :

$$\text{Fragility} = P [EDP > AC | IM] \quad \text{رابطه ۲-۵}$$

در رابطه فوق پارامتر IM شدت زلزله و یا بعبارت دیگر حداکثر (PGA) است . EDP شاخص تقاضای مهندسی ناشی از تحلیل و AC شرایط قابل قبول مربوط به حالت حدی می باشد. بین پارامتر (EDP) و شاخص (IM) در شکل گیری توزیع لوگ نرمال آماری تناظر یک به یک برقرار می باشد . تخمین احتمال فراگذشت هر یک از EDP ها از یک میزان مشخصی از (AC) ، با تعیین شاخص مقدار میانگین و نیز پارامتر انحراف معیار تحت مجموع جنبش ها محاسبه می شود.



شکل ۲-۱۲ نمونه منحنی شکنندگی (حسینی و مجد ، ۱۳۸۹)

در رابطه (۲-۵) IM شاخص شدت زمین لرزه است که معادل شتاب ماکزیمم زمین (PGA) مفروض می باشد. پارامتر EDP مولفه تقاضای مهندسی حاصل از استخراج داده ها از تحلیل های دینامیکی غیر خطی است. AC شرایط قابل قبول در ارتباط با حالت حدی در نظر گرفته شده است. (LS , CP , IO) تابع احتمال داده شده در رابطه های ۲-۶ محاسبه می شود:

$$p = p(\text{EDF} \geq \text{AC}) = 1 - P(\text{EDF} \leq \text{AC}) = 1 - \varphi\left(\frac{\text{AC} - \mu}{\sigma}\right) \quad \text{رابطه ۲-۶}$$

جهت ارزیابی احتمال فراگذشت از یک حد مرزی (AC) مقادیر میانگین و انحراف معیار هر یک از مولفه های تقاضای مهندسی تحت مجموع رکورد های شتاب نگاشت زلزله حاصل می گردد سپس با استفاده از توزیع تجمعی نرمال احتمال فراگذشت هر یک از اجزا از حالت حدی داده شده مشخص می گردد.

۲-۸ تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی (NLTHA)

تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی که یکی از زیر مجموعه های تحلیل دینامیکی غیر خطی است دارای شیوه کار زمان بر اما با دقت بالا، برای تخمین نیاز های غیر خطی سازه تحت تاثیر شتاب نگاشت های حرکت

زمین است که بدلیل مشخص کردن عملکرد احتمالی سازه تحت یک زمین لرزه خاص ، نتایج حاصله با اطلاعات به دست آمده قادر خواهد بود به طور مستقیم از آزمایشهای روی نمونه پارامتر های سازه ای قیاس گردند. در فرایند NLTHA ، تغییرات در نمونه های بار اینرسی به دلیل نرم شدگی سازه در حین زلزله و تاثیر مود های بالاتر ، به صورت خودکار لحاظ می شوند . در این شیوه به مستقیماً بیشینه جابجایی ، که توسط یک شتاب نگاشت خاص به سازه وارد می گردد حاکم است و نیازی به سنجش این مولفه با روابط تجربی - تئوریک نخواهد بود . این تحلیل به تغییر در رفتار سخت شدگی غیر خطی المان های استفاده شده و همچنین تفاوت در شاخصه های شتاب نگاشت ، حساسیت بالایی دارد . به عنوان مثال دو رکورد زلزله که با استفاده از یک طیف پاسخ مقیاس گردیده اند، امکان اختلاف در پیش بینی مقدار و توزیع رفتار غیر خطی سازه هایشان دور از ذهن نخواهد بود . در نتیجه برای تخمین صحیح نیاز های لرزه ای و کاهش پراکندگی در نتیج حاصله ، لازم است تا از رکوردهای بیشتری در این روند بهره برد . در اغلب آیین نامه ها توصیه شده است که در صورت استفاده از ۳ رکورد زلزله ماکزیمم پاسخ ها و در صورت استفاده از ۷ رکورد زلزله ، مقدار میانگین پاسخ ها، لحاظ گردد . ولی تعداد بیشتری از رکورد زلزله جهت عملکرد دقیق تر سیستم مورد نیاز است.

۹-۲ پیشینه تحقیق

امروزه استفاده از منحنی های شکنندگی کاربرد گسترده ای در تحلیل خطر زلزله دارند. اولین اقدام در مقوله فرموله کردن فرآیند ارزیابی ریسک لرزه ای توسط ویتمن و همکاران [۷] برداشته شد. موسسه فناوری کاربردی^۱ (ATC) در سال ۱۹۸۵ برای انجام عملیات ریسک لرزه ای زیر ساخت های ایالت کالیفرنیا از ماتریس های احتمالاتی آسیب و توابع ترمیم استفاده نمود. [۸]

این موسسه در سال ۱۹۹۱ در گزارش ۲۵ خود به معرفی مفاهیم مربوط به توابع شکنندگی پیوسته با انجام

¹ Applied Technology Council

برازش روی مقادیر گسسته ماتریس های احتمالاتی آسیب پرداخت. [۹] کارشناسان سازمان FEMA¹ (مدیریت اضطراری فدرالی ایالات متحده آمریکا) در سال ۱۹۹۷ اقدام به طراحی و عرضه نرم افزار HAZUS (آنالیز ریسک لرزه ای - هزس) نموده که در آن ملاحظات و ویژگی های جغرافیایی^۲ منطقه لحاظ شده و با استفاده از داده های مربوطه و بهره گیری از این نرم افزار کمک شایانی در تخمین خرابی های احتمالی در سطوح مختلف می نماید. [۱۰]

در سال ۲۰۰۷ خالو و کافی موسوی رفتار خمشی پلهای جعبه ای پیش تنیده دارای قوس افقی را بوسیله مدل سازی و تحلیل المان محدود سه بعدی، مطالعه کردند. طول پل، هندسه مقطع و خصوصیات مصالح در همه مدلها یکسان و مشابه بود، درحالیکه زاویه انحنای پل از صفر تا ۹۰ درجه متغیر بود. نتایج تحلیل نشان دادند که در پلهای قوسی، توزیع تنش بطور قابل ملاحظه ای درمقایسه با پل های مستقیم، متفاوت است. نتایج نشان داد که با توزیع مجدد مناسب و بهینه میلگردهای پیش تنیدگی در عرض مقطع، کاهش قابل توجه تنش برآیند ممکن خواهد بود. [۱۱]

توندینی و استوجادینویچ^۳ (۲۰۱۲) رفتار لرزه ای پلهای قوسی شکل با عرشه باکس بتنی متعارف در کالیفرنیا آمریکا (بطور ویژه، یک مدل تقاضا احتمالی لرزه ای برای یک پل ۵ دهانه با پایه میانی تک ستون دایره ای) را مورد مطالعه قرار دادند. پارامتر اصلی شعاع قوس افقی پل بود. این شعاع از بینهایت تا شعاع تیز^۴ تغییر داده شد و اثر انحناء پل در پارامترهای پاسخ لرزه ای مشاهده گردید. نتایج به این صورت بود که با کاهش شعاع پل های قوسی تک ستونه سختی جهت عرضی آنها افزایش می یابد. در حالیکه سختی و پیروی پل در جهت طولی وابسته به مقدار شعاع قوس عرشه نیست. [۱۲]

¹ Federal Emergency Management Agency

² Geographical Information System

³ Tondini & Stojadinovic, 2012

⁴ Sharp

در سال ۱۳۹۲ نگهدار و همکاران به ارزیابی کفایت بهره گیری از سیستم جداگر لرزه ای هسته سربی^۱ در اثر رکوردهای زلزله منجیل و El-centro تحت تحلیل دینامیکی در پل ها در دو حالت با شاهتیر فلزی و بتنی پرداخته است. نتایج حاکی از آنست که با این روش مقاوم سازی در بهسازی لرزه ای پل موجب کاهش قابل ملاحظه پاسخ های لرزه ای، تنش ها و کاهش جابجایی پایه پل مقاوم سازی شده می گردد. [۱۳]

عباسی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی رفتار لرزه ای پل های بتنی جعبه ای چندقابی بدون قوس (مستقیم) پرداختند. آنها رفتار لرزه ای پل های بتنی جعبه ای چندقابی با چهار سطح از بی نظمی ارتفاع، اعم از منظم تا بسیار نامنظم را با استفاده از منحنی های شکنندگی بررسی کردند.

برای گسترش به همه انواع پل ها در این کلاس، عدم قطعیت مربوط به زلزله، هندسه سازه و مصالح در نظر گرفته شد. نتایج تحقیق نشان داد که خسارت پل با افزایش نامنظمی ارتفاعی افزایش می یابد [۱۴]

راماناتان و همکاران^۲ (Ramanathan) در سال ۲۰۱۲ به بررسی خلا مطالعاتی در زمینه ی جزئیات طراحی منحصربفرد برای طراحی وساخت پل ها پرداختند. آنها تاثیر تکامل اصول طراحی لرزه ای و جزئیات عملکرد لرزه ای پل قوسی شکل بتنی پیوسته چند دهانه را ارزیابی کردند. همچنین احتمال شکست از طریق توسعه منحنی های شکنندگی در سراسر دوره های طراحی توسط زلزله های سن فرناندو ۱۹۷۱ و لوما پریتا ۱۹۸۹ را مشخص کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که بهبود قابل توجهی در عملکرد پل های جدید طراحی شده براساس اصول طراحی براساس ظرفیت مشاهده می شود. [۱۵]

پهلوان و همکاران (۲۰۱۵) ارزیابی احتمالاتی پلهای قوسی عرشه باکس بتن آرمه ۴ دهانه با ارتفاع ستون های منظم (با شش شعاع قوس متفاوت) را مورد بررسی قرار داده که دارای چهار دهانه و یک درز میانی بودند. با اعمال یکصد رکورد زلزله، شکنندگی را برای هر یک از اجزای پل ترسیم کرده و ارزیابی آسیب

¹Lead Robber Bearing (LRB)

²Ramanathan & et al , 2012

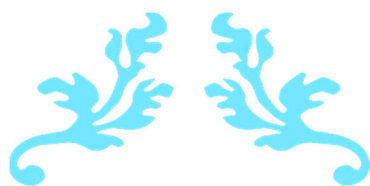
دیدگی احتمالاتی را برای سطوح آسیب چهارگانه بررسی کردند و به مقاوم سازی پل با روش های متفاوت پرداختند . [۱۶] شایانفر و همکاران (۲۰۲۰) با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی بروی مدل های با مشخصات تصادفی، مدل های نیاز لرزه ای احتمالاتی به صورت توابع نرمال لگاریتمی را تهیه نموده اند . با اعمال زلزله در دو حالت مجزا، یکی اعمال یکنواخت زلزله به همه پایه های پل و دیگری اعمال تحریکات غیر یکنواخت با لحاظ کردن اثر حرکت موج زلزله در خاک حد فاصل بین پایه ها نتیجه ارزیابی بشرح زیر حاصل شد : آسیب پذیری اجزای مختلف نسبت به یکدیگر در سطوح آسیب چهارگانه ثابت نیست . در سطح آسیب جزئی درز آبند آسیب پذیرترین عضو است و پس از آن افتادگی عرشه و و کلید برشی آسیب پذیرترین عضو می باشد . در حالیکه در سطح آسیب متوسط ستونها آسیب پذیر تر از سایر اجزا ارزیابی شده اند . با افزایش انحنای عرشه احتمال آسیب پذیری اجزا و سیستم بیشتر می شود در حالیکه در آیین نامه ها ارزیابی شکنندگی لرزه ای در این کلاس پل در نظر گرفته نمیشود . با کاهش شعاع عرشه از مقدار بینهایت تا شعاعی برابر نصف طول پل در سطح آسیب متوسط میانه شکنندگی ۴۷ درصد کاهش می یابد که در سطوح آسیب گسترده و کامل این عدد به ترتیب مقادیر ۴۷ و ۷۹ کاهش در میانه شکنندگی نسبت به پل مستقیم را نشان می دهد. [۱۷]

ناصری و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی تاثیر شعاع انحنا در پل های عرشه باکس بتنی چندقاب دارای درز میانی و قوس افقی پرداخته اند . در این پژوهش از ۱۲۰ رکورد پیشنهاد شده توسط بیکر و همکاران در حوزه های نزدیک و دور از گسل و در ۶ شعاع مختلف بهره گرفته شده که در آن مولفه قائم زلزله لحاظ شده است . با استفاده از شیوه های پربولیک ، ۱۰ مدل هندسی بصورت تصادفی انتخاب شده و کلیه عدم قطعیت ها در هر نمونه شعاع اعمال شده است . در نتیجه ترسیم شکنندگی با انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی ، نتایج حاکی از آنست که در سطح آسیب جزئی ، درز کوله آسیب پذیر عضو از اجزای پل می باشد . در صورتیکه در سایر سطوح ، ستون ها و افتادگی عرشه آسیب پذیرترین اجزا می باشند . با بررسی مقادیر شاخص میانه شکنندگی ، نتایج نشان می دهد که افزایش احتمال خرابی با بالارفتن سطوح آسیب رابطه

مستقیم داشته است . در آئین نامه معتبر HAZUS- MH به ملاحظات مربوط به حوزه نزدیک نپرداخته است . بنابراین نتایج این پژوهش در ارزیابی عملکرد پل های با قوس افقی حائز اهمیت می باشد . هم چنین نتایج نشان می دهد که شعاع انحنا و فاصله از گسل بعنوان دو فاکتور با اهمیت در برآورد احتمال خرابی پل به شمار می رود . [۱۸]

۲-۱۰ نتیجه گیری

همانطور که در این فصل تشریح گردید ، مطالعات زیادی بر روی آسیب پذیری لرزه ای پل ها توسط منحنی شکنندگی انجام شده است . اما همانطور که بیان شد، تحقیق بر روی عملکرد ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای پل های عرشه باکس بتن ارمه چند قابی با قوس افقی دارای سیستم جداساز لرزه ای به صورت مجزا و ترکیبی تحت توسعه منحنی های شکنندگی و مقایسه رفتار لرزه ای و آسیب پذیری آنها تحت شتاب نگاشت های زلزله حوزه دور و نزدیک گسل ، با توجه به جنبه تازه و نو آور بودن ، این مطالعه را قوت می بخشد.



فصل سوم:

روش تحقیق

۳-۱ مقدمه :

منحنی شکنندگی، احتمال خرابی متناظر با یک حالت خسارت معین را در سطوح مختلفی از تحریکات لرزه ای بیان می کند. منحنی شکنندگی یک پل، نسبت بین حرکات و سطح آسیب لرزه ای محتمل را بیان می نماید. انتخاب درست شتاب نگاشت های هر ناحیه اهمیت بسزایی دارد. با استفاده از معیارهای PGA ، PGV ، PGD ، Sa ، S_v و شاخص S_d که به ترتیب معرف ماکزیمم شتاب زمین ، ماکزیمم سرعت زمین ، ماکزیمم جابجایی ، شتاب طیفی و تغییر مکان طیفی می باشد ، نسبت به تعریف بزرگا و شدت زمین لرزه در تحلیل شکنندگی اقدام نموده و با استفاده از تحلیل Regression و تولید منحنی ها ، ارزیابی خسارات لرزه ای در سطوح مختلف مبین می شود. [۱۹]

۳-۲ شیوه تحلیل مسائل مهندسی

شیوه تحلیل مسائل مهندسی مطابق سه روش زیر طبقه بندی می شود :

الف - روش تحلیل دقیق (Exact Solution)

ب- روش عددی (Numerical Solution)

ج - روش تجربی (Experimental Method)

در روش الف (تحلیل دقیق) مبادرت به محاسبه دقیق پارامترهای معادلات دیفرانسیل حاکم بر میدان های فیزیکی می شود . این میدان های فیزیکی نظیر میدان تنش، میدان حرارتی یا میدان الکتریکی و... می باشند . در صورتیکه در روش های عددی به حل تقریبی مسائل پرداخته خواهد شد. در شیوه تجربی با توجه به اینکه مبنای آن بر گرفته از خود واقعیات است، روشی مناسبی بنظر میرسد گرچه در زمان و هزینه صرفه جویی نمی شود . است. در مقایسه شیوه های مزبور ، روش عددی از کاربردی ترین روشهای در حل مسائل مهندسی است زیرا روش اجزای محدود نیز زیر مجموعه آنها می باشد . در ادامه به مختصری از مزیت های روش عددی بویژه روش اجزا محدود در مقایسه با سایر روش ها اشاره می شود :

- مرتفع نمودن ضعف عمده روش‌های آزمایشگاهی به جهت پرهزینه و زمان بر بودن آن .
- برطرف نمودن محدودیت روش های تجربی در تحلیل مدل های هندسی پیچیده و ارائه نتایج دقیق.
- رفع نقصان شیوه حل دقیق در زمینه حل مسائل در شرایط مرزی پیچیده .

۳-۳ روش حل عددی

روش آنالیز عددی (Numerical analysis) به تخصیص روشهای Simplex محاسباتی و حل مسائل ریاضیات پیوسته می‌پردازد که توسط روش‌های تحلیلی قابل حل نبوده اند . از سایر روش های حل محاسبات عددی ، می توان به روش ریاضیات گسسته ، حل معادلات دیفرانسیل خطی و غیر خطی نام برد . حل مسائل پیوسته توسط الگوریتم هایی انجام می شود که در بسیاری از موارد علوم فنی و مهندسی کاربرد گسترده ای دارد . به عنوان مثال در تحلیل بسیاری از سازه ها ، علوم هواشناسی و نقشه های جوی از زمین ، تجزیه ساختار مولکول ها و مخازن کاربرد دارد . ضمناً، امروزه اغلب ابررایانه ها بر مبنای این الگوریتم ها برنامه ریزی می شوند. در نتیجه محاسبات عددی از نتایج عملی حاصل از اجرای محاسبات برای یافتن روش های جدید جهت تجزیه و تحلیل مسائل از قبیل شبیه سازی در مقیاس نانو بهره می برد . بدین منظور می بایست سیستم های مورد نظر را از نظر ریاضی مدل سازی نمود و معادلات مربوطه را برای آنها حل کرد. از آنجاییکه حل دقیق معادلات اغلب امکان پذیر نیست باید از حل عددی بجای سایر روش ها برای حل معادلات استفاده کرد.

۴-۳ نرم افزار CSi Bridge 2017

باتوجه به پیشرفت تکنولوژی و رشد فزاینده در سطح تقاضای جوامع ، نیاز بشر به برخورداری از سازه های متنوع و خاص فزونی یافت . بدین ترتیب متخصصان مربوطه با بهره گیری از فناوری رایانه ای درفرآیند مدل سازی ، تحلیل و طراحی این نوع سازه ها، مبادرت به برآورده نمودن این نیاز بشر نمود اند . لذا سازه های پل بدلیل جایگاه استراتژیک و آسیب پذیری بالا در برقراری شبکه های حمل و نقل ، از اهمیت ویژه

ای برخوردارند . بدین جهت لزوم در اختیار داشتن برنامه دقیق و قدرتمند در فرآیند مدل سازی ، آنالیز و طراحی این دست از سازه ها بیش از پیش ضروری می باشد . شرکت¹ CSi یکی از شرکت هایی است که سال های متمادی در زمینه رایانه ای کردن و تسهیل مدل سازی و تحلیل و طراحی انواع سازه فعالیت دارد که دستاورد این فعالیت ها، برنامه های متنوع شرکت CSi است که برنامه های قدرتمندی در مدل سازی و تحلیل و طراحی سازه های پیچیده در مقایسه با سایرین دارد . یکی از محصولات شرکت CSi، برنامه SAP است که مورد استفاده اغلب مهندسان در پژوهش ها و فعالیت های مهندسی می باشد . این محصول ابزار قدرتمندی برای مدل سازی، تحلیل و طراحی انواع سازه ها است. ضمناً قابلیت مدل سازی ، تحلیل و طراحی پل را نیز داراست . با توجه به توسعه سازه های پل در زمینه طراحی و ساخت ، این شرکت برنامه CSi Bridge را عرضه کرده است و فرآیند مدل سازی، تحلیل و طراحی سازه پل را با جزئیاتی بیشتر و دقیق تر ارائه نموده است . سادگی و فراوانی در استفاده از آن از سوی کاربران این نرم افزار آن را به یکی از مفید ترین نرم افزارهای طراحی پل بدل نموده است. به کمک این برنامه می توان سازه های پل با هندسه متفاوت را مدل سازی نمود و در آن با ملاحظه به شرایط مرزی بارگذاری در حالات متفاوت را اعمال نمود . با توجه به آنکه پل مورد مطالعه در این تحقیق از نظر هندسی پیچیده و در ردیف پل های نامنظم قرار می گیرد در مدل سازی و فرآیند تحلیل از این بسته نرم افزاری المان محدود بهره گرفته شد .

۳-۵ روش کار

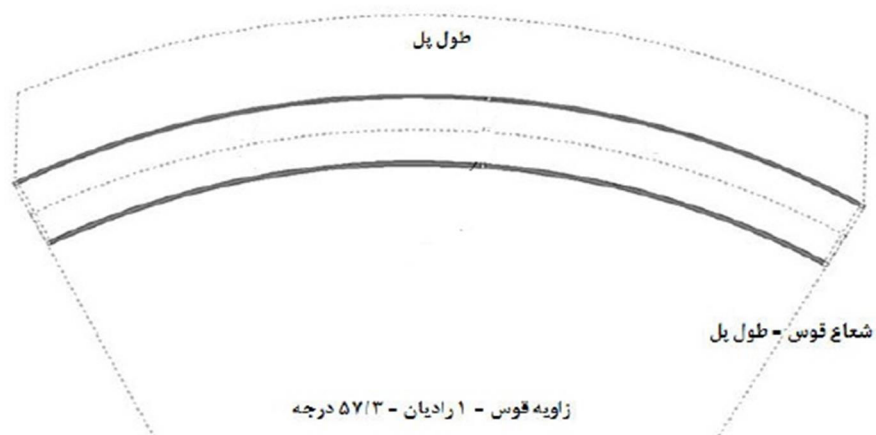
با توجه به آنکه هدف از این پژوهش بررسی ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای پل های عرشه باکس بتن آرمه چند قابی با قوس افقی دارای سیستم جداساز لرزه ای با استفاده از منحنی شکنندگی می باشد ، جهت بررسی موضوع ذکرشده در ابتدا باید مدلسازی پل با استفاده از نرم افزار CSIBridge انجام شده و در مرحله

¹ Computers and Structures, Inc

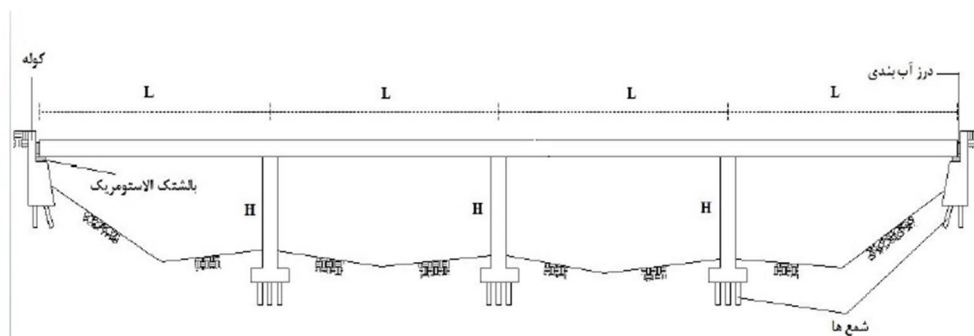
بعدی اثر رکوردهای زلزله را در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثر جداساز به سازه اعمال کرده و پارامترهای لرزه ای مورد نیاز را مورد بررسی و تحلیل قرار داده، سپس با اعمال رکوردهای زلزله مختلف منحنی های شکنندگی پل ها را بدست می آوریم. این منحنی ها ابزار مناسبی جهت برآورد و تخمین احتمال خرابی از مقداری مشخص در رده های متفاوتی از جنبش های لرزه ای زمین است که به لحاظ ریاضی احتمال بروز خرابی در سازه را نمایش می دهد.

۳-۶ مدل سازی اجزای پل

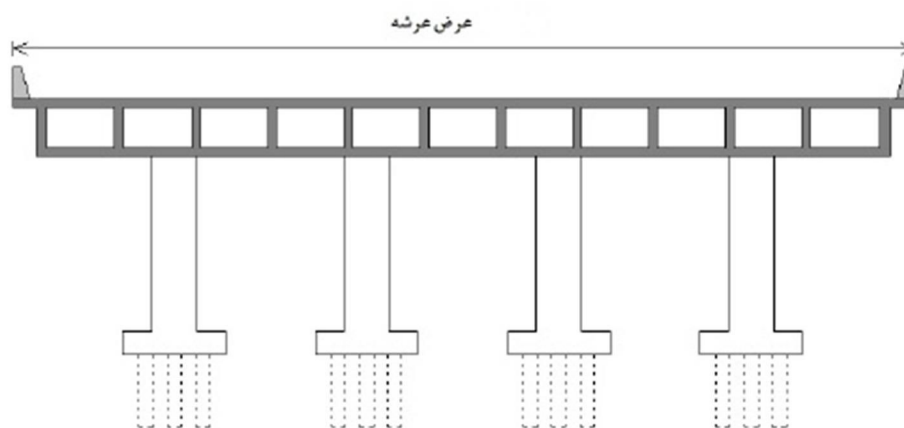
در این تحقیق ، مدل پل بصورت سه بعدی با شش درجه آزادی منظور گشته است . کلاس این پل از نوع قوس بتنی جعبه ای چندقابی و چند ستونه (چهار ستونه) می باشد . جابجایی طولی و عرضی ستون ها به عنوان پارامتر اصلی این تحقیق به منظور آسیب پذیری لرزه ای در دو حالت با جداساز لرزه ای و بدون جداساز لرزه ای در نظر گرفته می شود . پلان این پل و مدل مبنا و مقطع عرضی آن مطابق شکل های ۱-۳ و ۲-۳ و ۳-۳ دارای شعاع انحنای برابر با طول پل یا زاویه انحنای یک رادیان می باشد .



شکل ۱-۳ پلان پل قوسی مورد مطالعه



شکل ۲-۳ مدل پل با ارتفاع ثابت



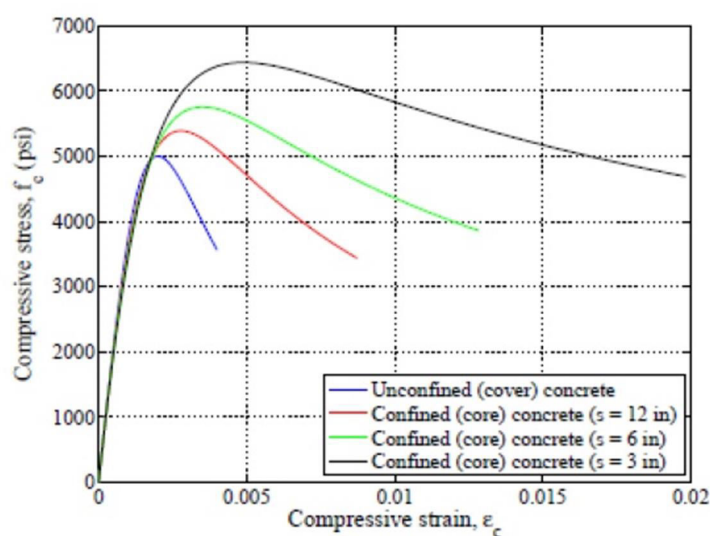
شکل ۳-۳ مقطع عرضی پل مورد مطالعه

مدل سازی این پل در نرم افزار انجام گردیده و آنالیز مودال صورت پذیرفت . بار گذاری وارد بر پل شامل بار مرده شامل بار مرده ناشی از وزن شاهتیرها ، بار آسفالت به ضخامت ۱۰ سانتی متر و جرم مخصوص ۲.۲ تن در هر متر مکعب می باشد .

۷-۳ مدل رفتاری مصالح بتن و فولاد

۱-۷-۳ فرضیات مدل سازی مصالح

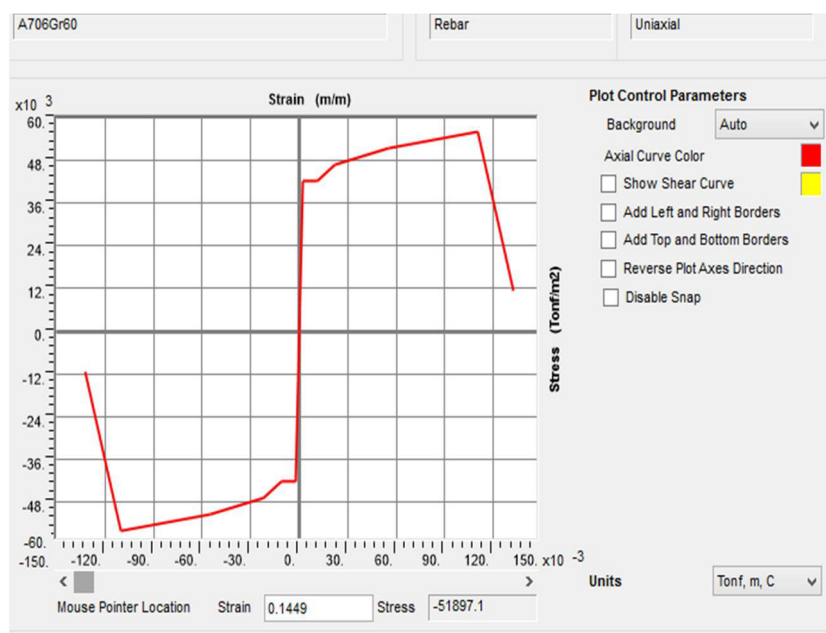
مزیت خاص مقاطع عرضی فایبر در امکان تخصیص خصوصیات مصالح مختلف در نقاط متفاوت مقطع یک عضو می باشد . بطوریکه می تواند ویژگی بتن محصور نشده به پوشش بتن و هم چنین بتن محصور شده به هسته بتن را تخصیص دهد . شکل ۳-۴ منحنی تنش - کرنش بتن در حالات مختلف محصور نشده و محصور شده با فواصل مختلف را نشان می دهد .



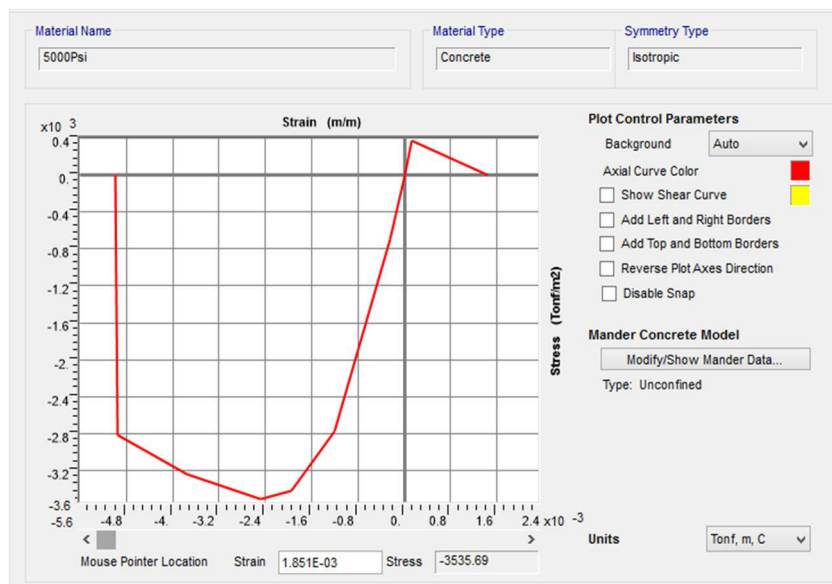
شکل ۳-۴ سطوح مختلف محصورشدگی [۱۵]

مقاومت فشاری بتن استاندارد 34.5 MPa و مقاومت فولاد 414 MPa می باشد که به وسیله خاموت نمره #۴ (قطر ۱۳ میلیمتر) محصور شده است .

جهت مدل سازی رفتار فولاد و بتن از آئین نامه Calterans کالیفرنیا [۲۰] و مدل Mander^۱ [۲۱] برای توصیف رفتار غیرخطی مصالح و اعضا بویژه پایه ها استفاده گردید. ضمناً، مشخصات رفتاری مصالح فولاد و بتن مورد استفاده برای تحلیل و طراحی در اشکال زیرارائه شده است.



شکل ۳-۵ مشخصات رفتاری پلاستیک فولادی

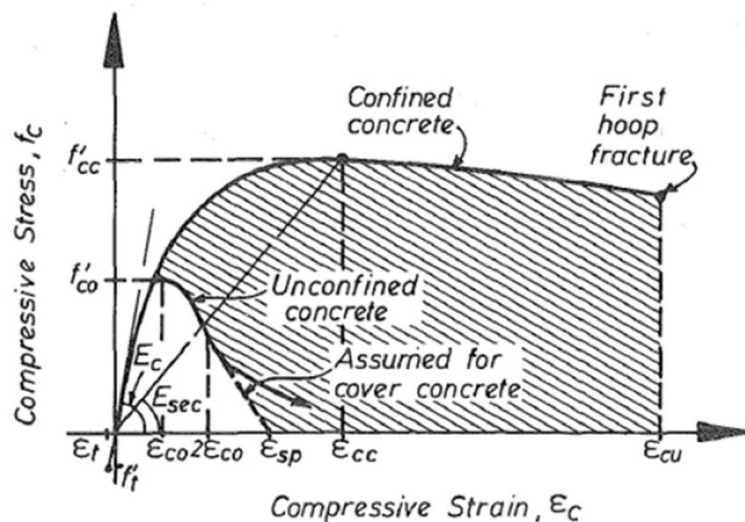


شکل ۳-۶ مشخصات رفتاری پلاستیک فشاری و کششی بتن

¹Mander

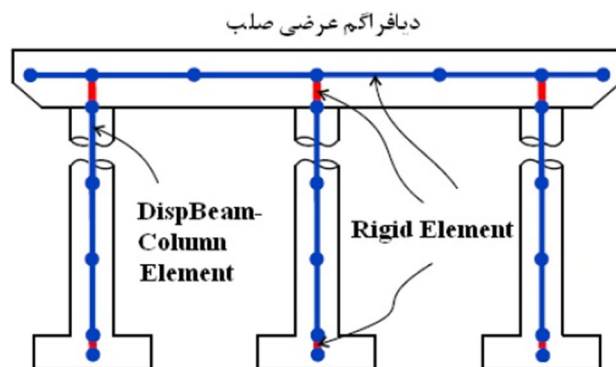
۳-۷-۲ مقاطع عرضی ستون ها

مدل سازی مقطع عرضی ستونها با استفاده از المانهای فایبر انجام می شوند تا امکان تشکیل مفصل پلاستیک را در هر قسمت از المان باشد. (*Displacement-based beam-column*) جهت مدل کردن ستونها از المان های تیر- ستون غیر خطی استفاده می شود. مطابق شکل ۳-۸ و مطالعه مدل المان محدود گسسته پایه چند ستونه ای نشان می دهد که هر چقدر تعداد این المان ها ¹(DBE) بیشتر باشد دقت محاسبات بالاتر رفته و نتایج تحلیل و تجربی انطباق بیشتری خواهند داشت. شکل ۳-۷ یک مقطع فایبر را برای یک ستون بتنی نشان می دهد که شامل بتن محصور شده و محصور نشده (جهت هسته داخلی بتن) می باشد. شکل ۳-۹ بیانگر مشخصات فولاد مورد استفاده در مدل سازی آرماتورهای موجود در مقطع ستون می باشد.

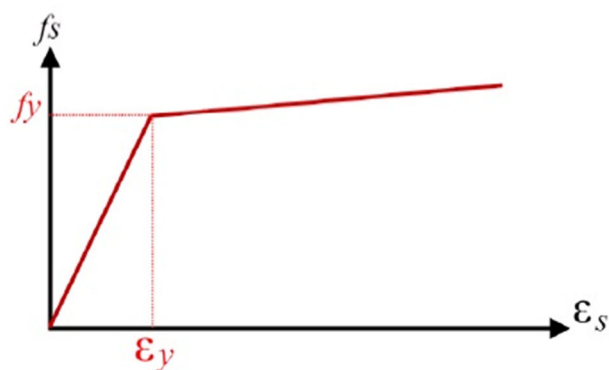


شکل ۳-۷ تأثیر سطوح مختلف محصورشدگی بر روی منحنی تنش-کرنش ستون [۲۲]

¹Displacement-based element



شکل ۳-۸ مدل المان محدود پایه چند ستونه [۲۳]

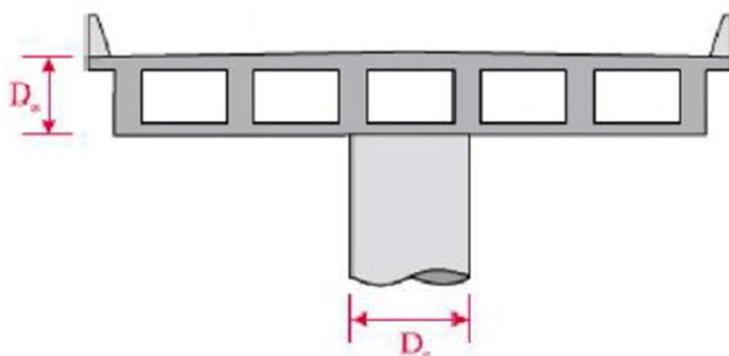


شکل ۳-۹ منحنی تنش کرنش فولاد مورد استفاده در مدل [۱۶]

۳-۷-۳ المان های عرشه

مدل سازی عرشه از نوع مقطع جعبه بتنی مطابق شکل ۳-۱۰ در نرم افزار انجام گردید . با توجه به آنکه روسازه (عرشه پل) در هنگام زلزله در محدوده ارتجاعی باقی می ماند ، المان های عرشه با استفاده از الگوی تیر-ستون غیر خطی مدل می شوند . همچنین به المان های عرضی عرشه خصوصیات هندسی و سختی های بزرگی تخصیص داده می شود . لذا عرشه در راستای عرضی بصورت کاملاً صلب عمل می کند و

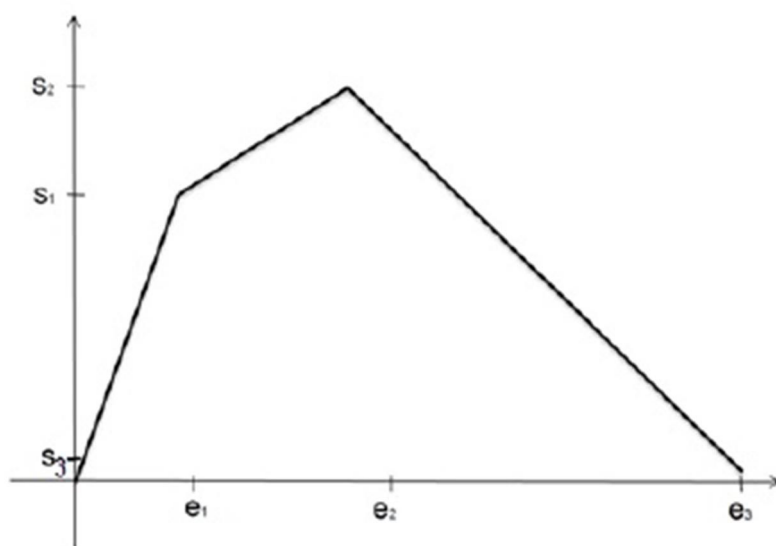
نوع دیافراگم Solid انتخاب می گردد . [۱۲]



شکل ۳-۱۰ عرض موثر عرشه [۱۸]

۳-۷-۴ کلید برشی

کلید برشی نقش مهمی در محدود نمودن حرکت عرضی نسبیه عرشه و کوله را دارد و اغلب در پل های با دهانه متوسط یا کم استفاده می شوند. عموماً، پتانسیل خرابی در این المان ها از بین یکی از چهار مکانیزم اصطکاک برشی، خمش، برش و یا لهیدگی می باشند. این اعضا بار ثقلی تحمل نمی کنند اما در حین وقوع زلزله عکس العمل روسازه را به کوله و سرستون ها انتقال می دهند. طراحی این المان ها به گونه ایست که نیرویی بیشتر از ظرفیت اعضای زیرسازه را انتقال ندهند (Aviram و همکاران ۲۰۰۸). [۲۲] با توجه به کلاس پل در این تحقیق، کلید برشی تنها در محل کوله بکار می روند و ظرفیت آنها از ۷۵ درصد ظرفیت برشی شمع و کوله به اضافه یکی از دیوارهای کناری بیشتر نشود. ضمناً، جهت کنترل جابجایی عرضی عرشه، به عرشه ۲۰ سانتی متر آزادی حرکت داده شد تا پس از آن حد توسط کلید برشی محدود شود. شکل ۳-۱۱ رفتار چرخه ای یک کلید برشی را نشان می دهد که نتیجه مطالعات Megally و همکارانش است. [۲۴]



شکل ۳-۱۱ رفتار چرخه ای کلید برشی [۲۴]

۳-۸ معرفی کلاس پل مورد مطالعه

با مطالعه اطلاعات استخراج شده پل های موجود در کالیفرنیا ، نتایج حاکی از آنست که اغلب پل های بزرگراهی موجود را پل بتنی با مقطع جعبه ای که عموماً ، برای دهانه های بلندتر استفاده می شوند تشکیل می دهد کلاس پل مورد مطالعه از نوع پل قوسی بتنی چندقابی چهار دهانه با عرشه جعبه ای و پایه های چهار ستونه می باشد . مدل اصلی پل مطابق نمونه های ساخته شده در کالیفرنیا می باشد که مشخصات آن برگرفته از پژوهش رامناتان (۲۰۱۲) [۱۵] بوده و مربوط به دوره طراحی لرزه ای پیش از ۱۹۷۱ می باشد. پارامترهای هندسی توصیف کننده مدل پل جهت تحلیل دینامیکی غیرخطی در جدول ۳-۱ ارائه شده اند . اجرای این کلاس از پل به شیوه ایست که عرشه و سرستون بصورت یکپارچه اجرا می گردند و قاب های چند ستونی بر روی یک سرشمع قرار گرفته و یک گروه شمع زیر آن قرار می گیرند .

سختی فنرهای انتقالی و دورانی پایه ها مطابق جدول ۳-۱ می باشند که بیانگر رفتار فونداسیون ستون ها می باشند . سختی افقی و قائم شمع ها بر اساس اطلاعات موجود در نقشه و آزمایشات پژوهشگران با در نظر گرفتن هندسه گروه شمع قابل انجام می باشد . از سختی پیچشی شمع ها به علت عدم تائید قابل

ملاحظه صرف نظر شده است [۲۵] و سختی قائم آن با لحاظ مقاومت انتهای شمع براساس مطالعات انجام شده توسط چوی^۱ (۲۰۰۲) معادل 175 KN/mm در نظر گرفته شده و سختی افقی موثر شمع به مانند شمع های موجود در کوله معادل 7 KN/mm تعیین می گردد. میرایی رایلی ۵ و ۱۵ درصد به ترتیب برای پل در حالت بدون جداساز لرزه ای و با جداساز لرزه ای بر مبنای توصیه های ژنگ و ماکریس^۲ (۲۰۰۲) [۲۶] در نرم افزار اعمال شده است.

۹-۳ پارامترها و مشخصات هندسی

مشخصات مکانیکی و هندسی مربوط به مدل سازی و سایر پارامترهای توصیف کننده مدل پل مربوطه مطابق جدول ۱-۳ می باشد :

¹Choe

²Zhang & Makris

جدول ۳-۱ پارامترهای هندسی توصیف کننده مدل پل [۱۲]

تیپ پل :		پل قوسی چند دهانه پیوسته بتنی با شاه تیر جعبه ای
تعداد ستون در هر قاب	4	
ارتفاع ستون	6 m	
قطر هر ستون	1.5 m	
تعداد آرماتور طولی (#۱۱)	42	
فاصله آرماتورهای عرضی (#۴)	0.3 m	
طول هر دهانه	33.1 m	
عرض عرشه	33.5 m	
تعداد جعبه های مقطع عرشه	11	
ارتفاع کلی روسازه	1.46 m	
ضخامت بال های مقطع عرشه	0.3 m	
ضخامت جان	0.2 m	
فاصله مرکز به مرکز سلول های عرشه	2.86 m	
سختی انتقالی شالوده ستون	7.06 kN/mm	
سختی دورانی شالوده ستون	صفر	

۳-۱۰ پایه های کناری (کوله)

بررسی زلزله های گذشته در پل ها حاکی از آن است که کوله (Abutment) ظرفیت زیادی در جذب نیرو خواهد داشت. این المان ها دارای دو رفتار طولی و عرضی هستند. در رفتار طولی، فشار خاک پشت کوله که تحت تاثیر دو رفتار مقاوم و محرک بوده، موثر می باشد. در حالت مقاوم (Passive) با اعمال فشار این المان به خاک پشت رخ داده، و در این فرایند فشار خاک و پایل های فونداسیون کوله ایفای نقش نموده و موثر واقع می شوند. حالت محرک (Active) با دور شدن المان از خاک پشت آن رخ می دهد و تنها پایل های آن ایفای نقش می کنند. از سایر عواملی که در گسیختگی کوله ها موثر می باشند می توان به نوع فونداسیون و شرایط ژئوتکنیکی در حین زمین لرزه اشاره نمود. [۶]

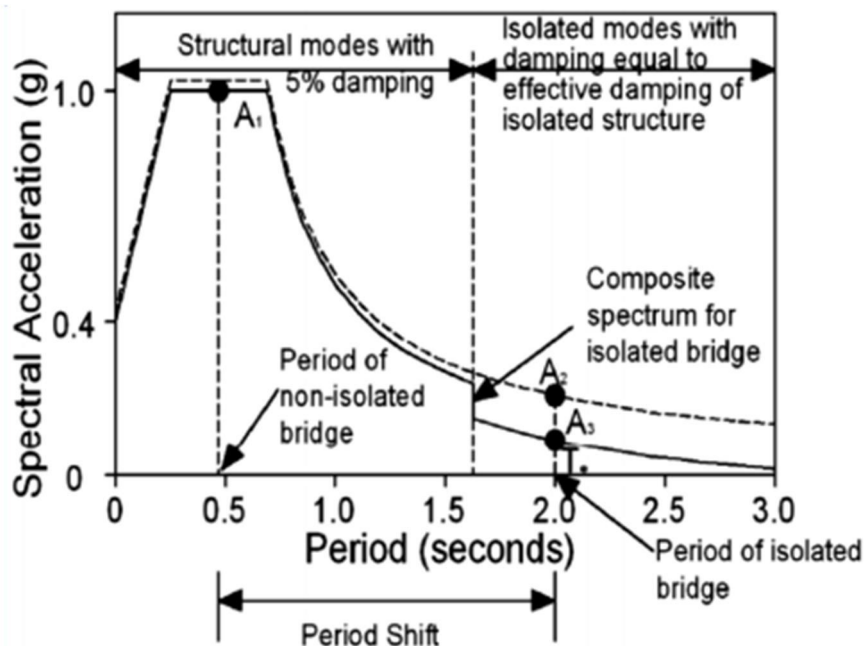
۳-۱۱ ضوابط آیین نامه ای طراحی پل های جداسازی شده

۳-۱۱-۱ آیین نامه طراحی جداساز لرزه ای آمریکا

جهت طراحی سیستم جداساز لرزه ای پل ها از راهنمای ارائه شده توسط انتشارات آشتو (۲۰۱۰) بهره گرفته می شود. این راهنما مختص جداسازی سیستم های می باشد که در صفحه افقی ایجاد شده و فرضیات طراحی در آن بدین صورت می باشد که در جهت قائم صلب بوده اند. ضمناً، مشخصات ارائه شده توسط این راهنما مختص سامانه های جداسازی غیرفعال (Passive) می باشد.

۳-۱۱-۲ اصول جداسازی لرزه ای

اصول جداسازی لرزه ای در شکل (۳-۱۲) به نمایش درآمده است. خطوط خط چین طیف پاسخ طراحی می باشد. خط پیوسته نشانگر طیف پاسخ ترکیبی برای یک سازه پل جداسازی شده می باشد. انتقال پریود انعطاف پذیری لازمه را برای سیستم جداساز به جهت کاهش شتاب طیفی فراهم آورده است. همچنین افزایش میرایی فراهم آورده شده توسط سیستم جداساز مجدداً شتاب طیفی را کاهش داده است.



شکل ۳-۱۲ اصول طراحی جداساز [۵]

با افزایش پریود اصلی و میرایی سازه پاسخهای ناشی از تحلیل کاسته خواهد شد. در فرایند افزایش پریود نیروها کاهش یافته، در حالیکه به مقادیر جابجایی ها افزوده خواهد شد. در حالت افزایش مقدار میرایی، پاسخ نیروها و جابجایی توأمأ نزول می یابد.

با توجه به دو فاکتور فوق و رعایت الزامات مربوط به طراحی پل های جداسازی شده، رفتار تمام اجزای پل کاملاً ارتجاعی می ماند. از آنجائیکه جابجایی جداگر لرزه ای از مهمترین فاکتورهای موثر در این سیستم لرزه ای می باشد، آئین نامه های معتبر مربوطه بازبازرسی دوره ای (QC) و انجام تست های سلامت را لازم می دانند.

۳-۱۲ ضریب رفتار

ضریب رفتار در پل دارای سامانه جداساز لرزه ای در تمام سیستم های زیرسازه نباید بزرگتر از نصف مقدار توصیه شده در مقررات آشتو باشد اما نیازی نیست که از ۱.۵ کوچکتر منظور شود. [۴]

جدول ۳-۲ مقادیر ضریب را بر اساس رده بندی صورت گرفته در استاندارد آشتو ارائه می دهد.

۳-۱۳ طیف طراحی

برای پل های جداسازی شده لرزه ای نیز از همان طیف پاسخ الاستیک مربوط به پل های جداسازی نشده استفاده می شود.

۳-۱۴ سطوح عملکرد لرزه ای

سطوح عملکرد لرزه ای در طراحی جداسازی نیز همان سطوح عملکرد لرزه ای در طراحی بدون جداساز لرزه ای می باشد.

جدول ۳-۲ رده بندی ضریب اصلاح پاسخ [۲۷]

زیرسازه			رده اهمیت پل
			سایر
			ضروری
			حیاتی
پایه دیواری در راستای قوی			1.5
			1.5
			2
قاب - شمع های بتنی مسلح			
فقط شمع قائم			1.5
			2
			3
با شمع های مایل			1.5
			1.5
			2
تک ستون			1.5
			2
			3
قاب - شمع های فولادی یا مرکب			
فقط شمع قائم			1.5
			3.5
			5
با شمع های مایل			1.5
			2
			3
قاب های چند ستونی			1.5
			3.5
			5

۳-۱۵ مشخصات جداساز

پارامترهای طراحی جداساز لرزه ای هسته سربی مطابق جدول ۳-۳ و ۳-۴ می باشد :

جدول ۳-۳ پارامترهای طراحی جداساز لرزه ای [۳،۲۸]

تغییر مکان طرح	ضریب رفتار رو سازه	ضریب شکل	تغییر شکل نسبی برشی	میرایی	دوره تناوب طبیعی طرح
DD	R	S	γ_c	β_{eff}	TD
(cm)			%	%	Sec
28	2	20	150%	15%	2.5

با تخصیص پارامترها و روابط مربوطه، مشخصات مکانیکی و هندسی جداساز لرزه ای مطابق جدول ۳-۴ می باشد :

جدول ۴-۳ پارامترهای طراحی جداساز لرزه ای

مقدار	مشخصه	واحد	عنوان
2.68	K_{eff}	(KN/mm)	سختی موثر جانبی
31.75	Q_d	(T)	مقاومت مشخصه
1.53	K_d	(KN/mm)	سختی ثانویه
7.84E5	σ_c	kg/m ²	تنش تسلیم سرب
18	D_p	(cm)	قطر هسته سربی
110	D	(cm)	قطر جداساز
32	H	(cm)	ارتفاع جدا ساز
14	T_t	(mm)	ضخامت لاستیک
14	N	IRHD- 60	تعداد لایه لاستیک
4	T_s	(mm)	ضخامت ورق فولادی

۳-۱۵ معرفی مشخصات جداساز در نرم افزار

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: LRB

Direction: U3

Type: Rubber Isolator

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 2.68

Effective Damping: 0.15

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 1.53

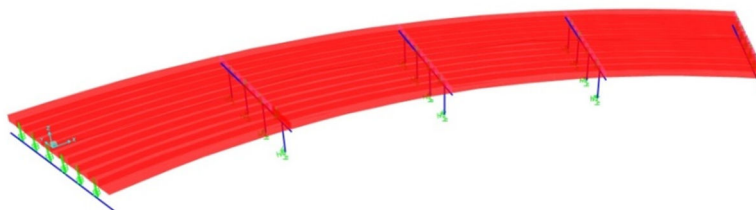
Yield Strength: 317.

Post Yield Stiffness Ratio: 0.57

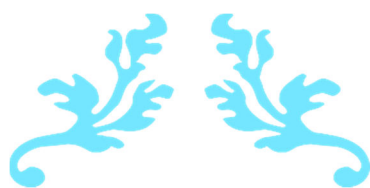
OK Cancel

شکل ۳-۱۳ معرفی جداساز لرزه ای در نرم افزار

جداساز لرزه ای در جهت های $u2$ و $u3$ دارای سختی و مقاومت نهایی می باشد و در جهت $u1$ دارای سختی بالا و فیکس در نظر گرفته شده است . مطابق شکل ۳-۱۴ می توان مقادیر سختی و مقاومت های در نظر گرفته شده برای هر یک از جهت را مشاهده نمود .



شکل ۳-۱۴ نمای سه بعدی از سازه



فصل چهارم

تجزیه و تحلیل داده ها

۴-۱ مقدمه

پل ها یکی از عناصر بسیار مهم و حیاتی شبکه راه ها می باشند و اثر بسزایی بر حوزه های مهم نظیر ، مالی ، امنیتی و سیاسی ایفا می کنند . بطوریکه می توان این دست از سازه ها را بعنوان آسیب پذیرترین شبکه ها در برابر تحرکات زمین تلقی نمود . اخیراً پیشرفت گسترده ای در سیستم های اتلاف انرژی و روش های تحلیلی در سرتاسر دنیا صورت گرفته که با کمک بسط روش های المان محدود^۱ حاصل شده است . با ارتقای ظرفیت نرم افزاری و هم چنین سخت افزاری و توسعه در تجهیزات ، روش های تحلیلی دقیق و مناسب جایگزین روش های پیشین که اغلب دستی و روش های محاسبات تکراری بوده اند ، شده ، بطوریکه فرآیند مدل سازی ۳ بعدی با ۶ درجه آزادی کلیه اجزای پل با اعمال شرایط و رفتار غیرخطی در هندسه و مصالح توسط آنالیز تاریخیچه زمان میسر شده است . در نتیجه آنالیز NLTHA پارامترهای لازم به عنوان نیاز لرزه ای در تولید منحنی شکنندگی حاصل می شود .

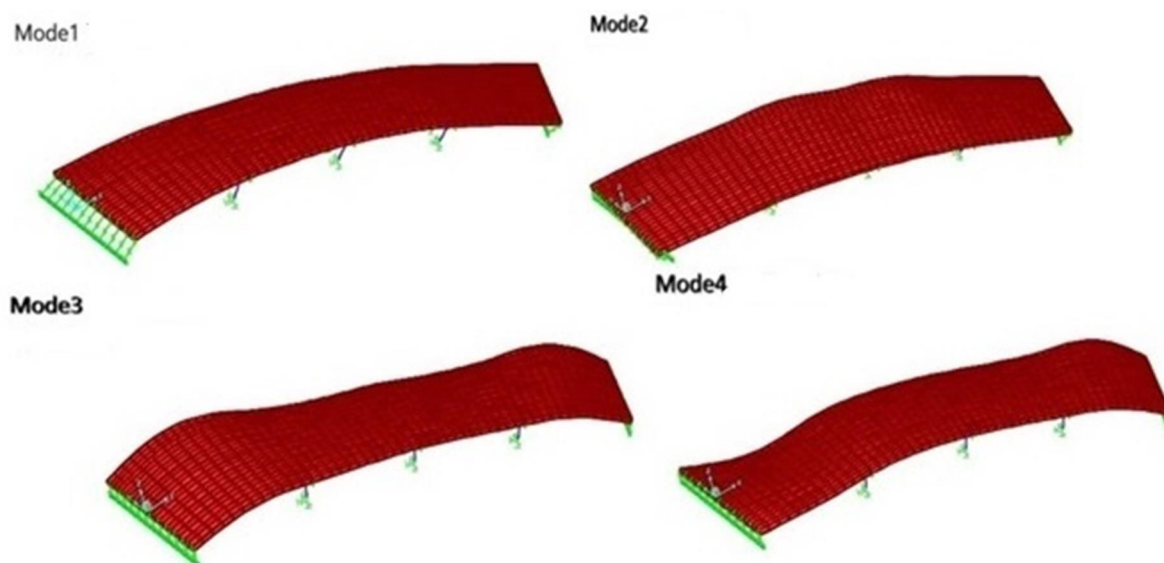
۴-۲ بارهای غیر لرزه ای

در یک سیستم جداگر لرزه ای ، کنترل جابجایی ها بعنوان یکی از مزیت ها و کارایی مهم این سیستم ضروری است . با توجه به لزوم برخورداری از یک المان انعطاف پذیر و صلبیت کافی در سیستم ، مقاومت مناسب و کافی جداگر در برابر بارهای بهره برداری و عبارتی کلیه بارهای غیرلرزه ای اهمیت بسزایی داشته و مرتباً می بایست کنترل گردد .

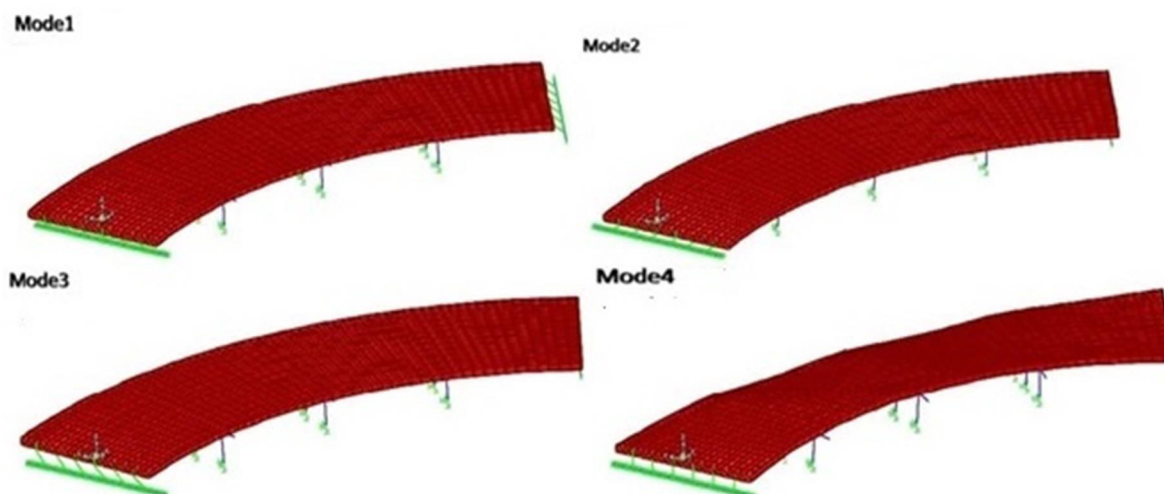
۴-۳ آنالیز مودال و ارائه شکل های مودی

آنالیز مودال پل در نرم افزار انجام گرفت و اشکال مودی مربوط به مودهای اول تا چهارم پل مورد مطالعه در دو حالت با جداساز لرزه ای و حالت بدون استفاده از جداساز لرزه ای در اشکال ۴-۱ و ۴-۲ نمایش داده شده است. اغلب در پل های مستقیم ، مود ابتدائی (اساسی) در راستای طولی ، مود دوم در راستای عرضی و مود

سوم پیچشی بوده و بطور کلی در اکثر موارد ، موده‌های دوم و بالاتر مبتنی بر رفتارها و پاسخ های عرضی و پیچشی پل می باشند . اما در مورد پل قوسی چندقابی مورد نظر با توجه به اشکال ۱-۴ و ۲-۴ مشخص می باشد که پاسخ غالب موده‌های اول و دوم ، پیچشی درون صفحه ای و موده‌های سوم و چهارم ، پیچشی حول محور مرکزی پل می باشند .

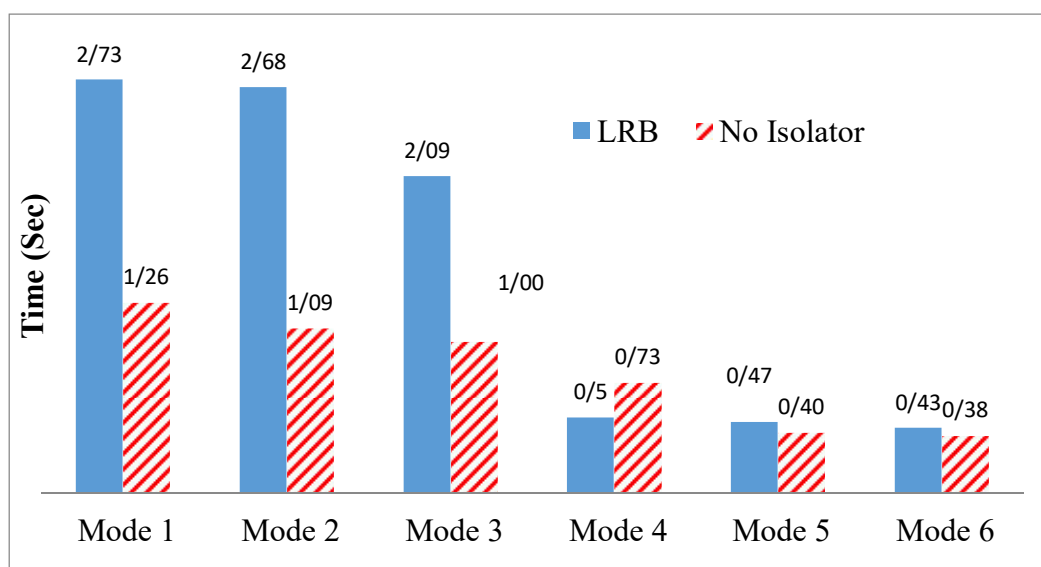


شکل ۱-۴ اشکال مودی حالت بدون جداساز لرزه ای



شکل ۲-۴ اشکال مودی در حالت با جداساز لرزه ای

نمودار مقایسه ای چهار مد اول در دو حالت با جداساز و بدون جداساز لرزه ای پل ارائه گردیده مطابق شکل ۳-۴ می باشد . همانطور که ملاحظه می گردد استفاده از جداساز های لرزه ای موجب افزایش پریود سازه می شود . بطوریکه در سه مود اول در حالت با جداساز لرزه ای نسبت به حالت بدون جداساز با افزایش بیش از دو برابری مواجه بوده است .



شکل ۳-۴ نمودار مقایسه ای مدهای ارتعاش

۴-۴ تحلیل دینامیک غیرخطی (تاریخچه زمانی)

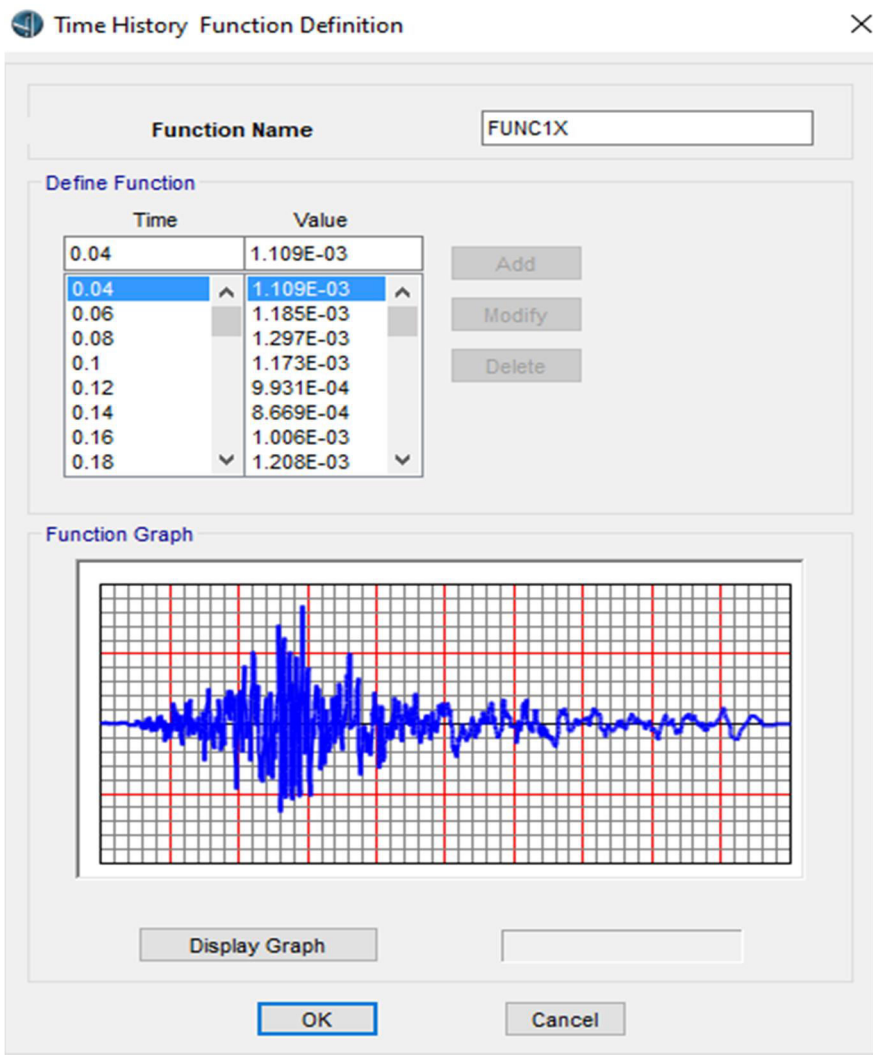
۴-۴-۱ انتخاب شتابنگاشت ها

زوج شتابنگاشتهایی که جهت تحلیل و طراحی سازه مورد مطالعه گزینش می شوند می بایست از جوانب مختلف نظیر ویژگی های ساختمانی و خصوصیات زمین شناسی در مختصات مربوطه ، محتوا ، پریود اصلی سازه و احتمال رخداد ، مشابه سازه مورد بررسی باشد بطوریکه شرایط لرزه ای ساختگاه ، تا حد امکان با شتاب نگاشت هایی که برگزیده شده اند مشابهت داشته و با شیوه های معتبر نسبت به تنظیم شتاب نگاشت ها ، طیف طرح و تولید شتابنگاشتهای مصنوعی سازگار با آن اقدام نموده شده باشد . بدیهی است تهیه و تنظیم این مهم امری زمان بر و مشکل می باشد ، اما بدلیل تاثیر قابل ملاحظه در ارزیابی ها و متعاقباً استفاده از نتایج حاصله در برنامه ریزی های خرد و کلان ، بر اهمیت آن می افزاید . بطوریکه امروزه در اغلب

آئین نامه ها و مطالعات مربوطه ، محققان و کارشناسان ذیصلاح به توجه به این فرآیند توصیه ای دوچندان دارند .

۴-۴-۲ تعداد رکوردهای مورد استفاده

با گردآوری شتاب زمین (PGA) و اعمال آن در دو راستای اصلی و بصورت متعامد پاسخ های ناشی از تحلیل آن با توجه به مولفه زمان مشخص می شوند ، بطوریکه پس از تحلیل تغییرمکان نسبی ستون ها در دو جهت طولی و عرضی قرائت می شود . در این پژوهش از ۱۰۰ زوج شتابنگاشت Krawinkler استفاده می شود. گستره وسیع این شتاب نگاشت ها بدلیل دقت بالا تمهید عدم قطعیت ها در مدلسازی های مربوط به زمین لرزه و پاسخ ها تخصیص می یابند. با انجام آنالیز دینامیکی غیرخطی سازه و اعمال شتاب زمین در تراز پایه سازه پل به صورت تابعی از زمان، در تراز پایه پل نتایج مولفه ها حاصل می شوند . بنحویکه هر لحظه زمانی معادل بیشینه پاسخ ناشی از آنالیز غیرخطی با شتاب نگاشت مورد نظر است. طراحی جداگر لرزه ای هسته سربی (LRB) با اعمال طیف گسترده ای از رکوردها (حداقل شامل سه دسته تاریخچه زمانی) و بصورت همزمان با استفاده از مشخصات غیرخطی جداگر و ثبت مجموع ماکزیمم جابجایی های عمود برهم در همه مراحل زمانی و پی در پی انجام می شود .



شکل ۴-۴ تعریف تابع شتاب نگاشت به نرم افزار

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name: ACcel1 Set Def Name Modify/Show...

Initial Conditions

☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☐ Continue from State at End of Modal History

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case

Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	FUNC1X	9.81
Accel	U1	FUNC1X	9.81
Accel	U2	FUNC1Y	9.81

☐ Show Advanced Load Parameters

Time Step Data

Number of Output Time Steps: 2000

Output Time Step Size: 0.02

Other Parameters

Modal Damping: Constant at 0.27 Modify/Show...

Nonlinear Parameters: Default Modify/Show...

Load Case Type: Time History Design...

Analysis Type: ☐ Linear ☒ Nonlinear

Solution Type: ☒ Modal ☐ Direct Integration

History Type: ☒ Transient ☐ Periodic

Mass Source: Previous (MSSSRC1)

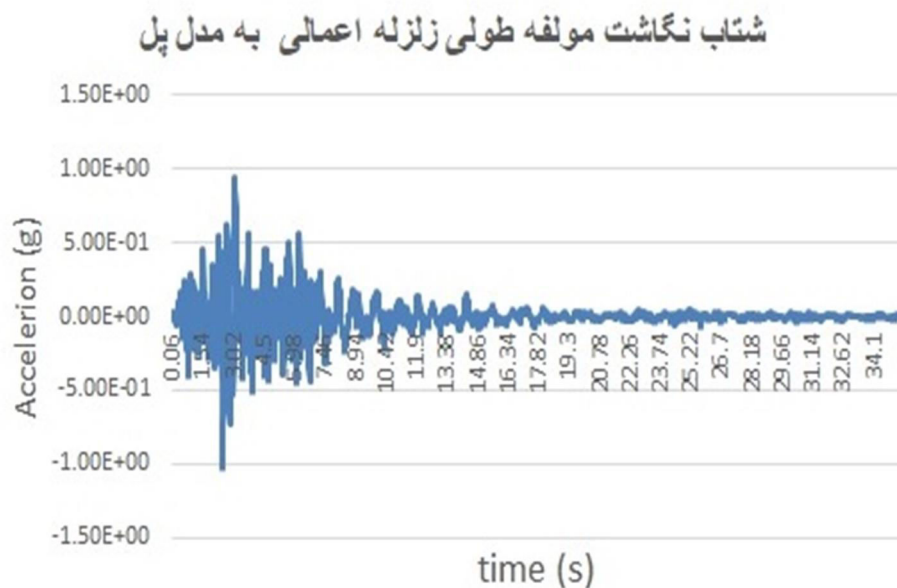
OK Cancel

شکل ۴-۵ تخصیص رکورد زلزله در دو جهت X و Y به سازه

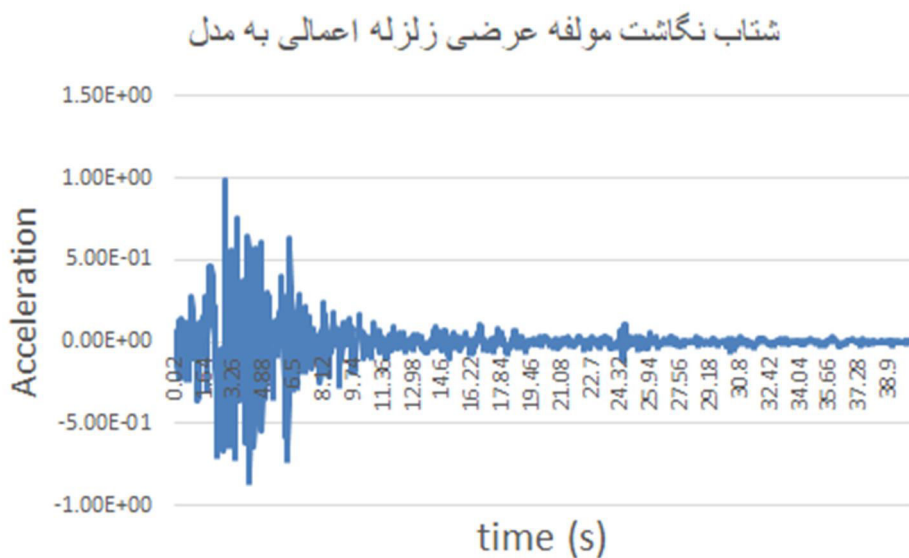
۴-۵ نتایج تحلیل

تحلیل NLTHA با در نظر گرفتن نسبت میرایی رایلی برای پل در حالت بدون جداساز لرزه ای هسته سربی (LRB) به میزان ۵ درصد و برای پل در حالت با جداساز لرزه ای به میزان ۱۵ درصد تحت جفت رکوردها در دو جهت متعامد انجام شد و تغییر مکان نسبی ستون ها در دو جهت طولی و عرضی برداشت شد .

شکل های ۴-۶ و ۴-۷ تاریخچه زمانی نمونه ای از شتاب مولفه های طولی و عرضی زلزله اعمالی را نشان می دهد .

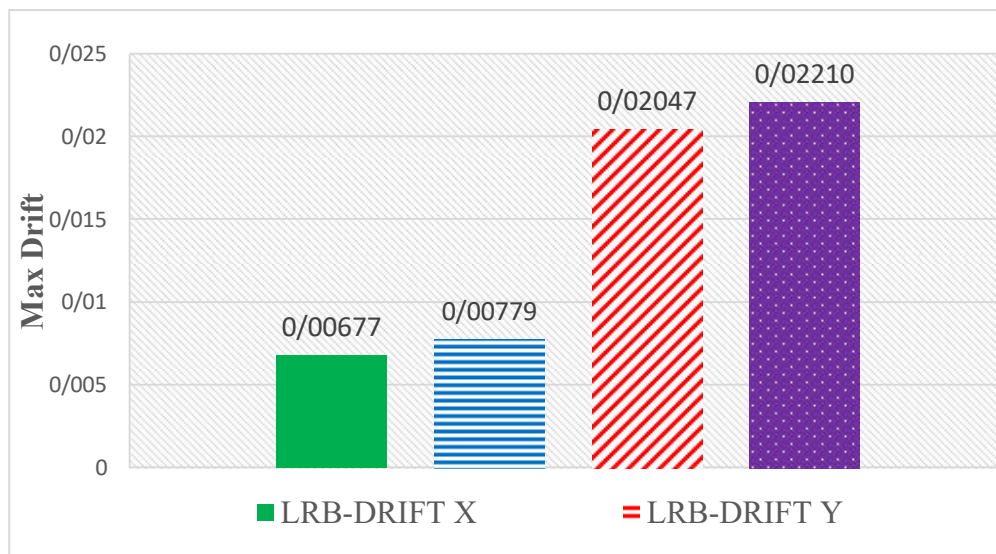


شکل ۴-۶ یک نمونه از شتاب نگاشت مولفه طولی زلزله اعمالی



شکل ۴-۷ یک نمونه شتاب نگاشت مولفه عرضی زلزله اعمالی

در شکل ۴-۸ نمودار میله ای مقایسه مقدار حداکثر تغییر مکان نسبی در حالت با و بدون جداگر هسته سربی با درج مقدار میانگین آن ها به تفکیک نشان داده شده است بطوریکه حداکثر تغییر مکان نسبی در مدل با سیستم جداساز لرزه ای نسبت به حالت بدون جداساز در جهت طولی و عرضی به ترتیب ۶۷ و ۶۴ درصد کاهش یافته است .

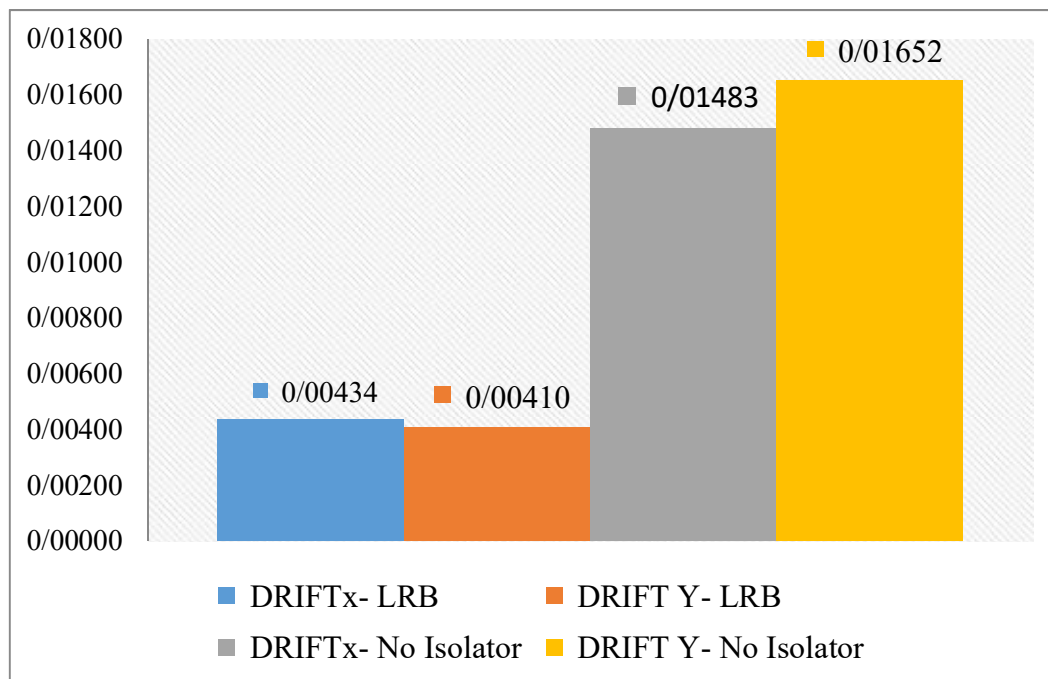


شکل ۴-۸ نمودار میانگین حداکثر تغییر مکان نسبی طولی و عرضی

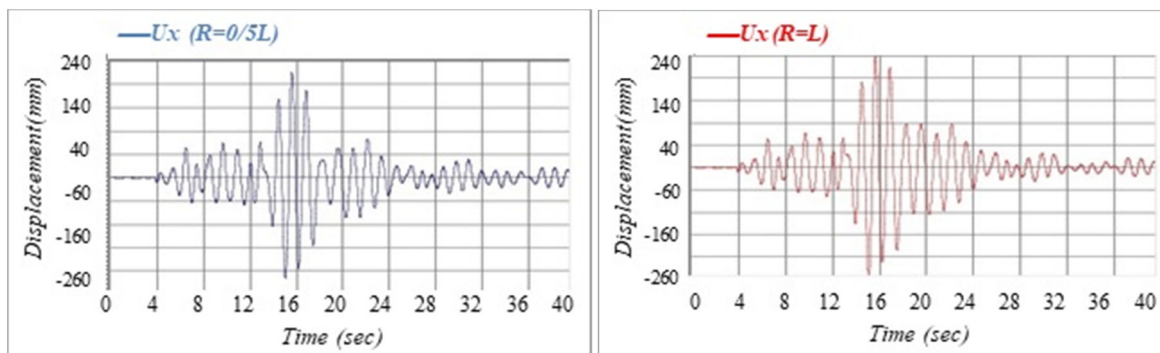
۴-۶ صحت سنجی

۴-۶-۱ مقایسه نتایج صحت سنجی

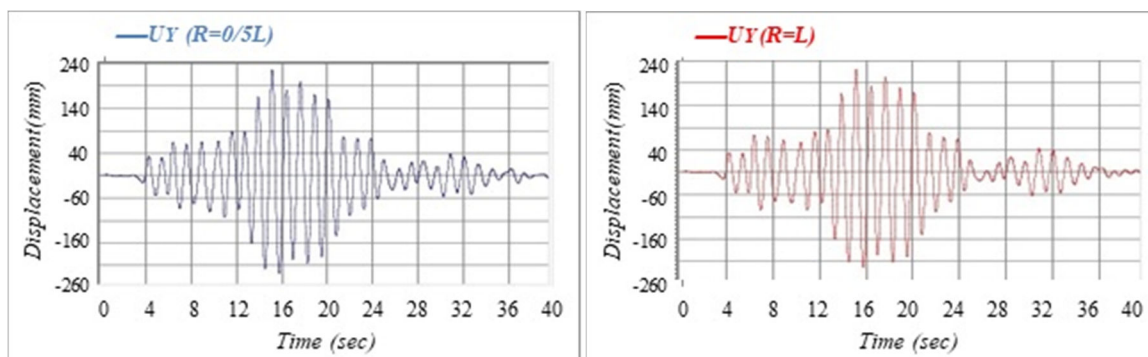
بمنظور انجام فرآیند صحت سنجی و کنترل نتایج حاصل شده، مقایسه نتایج حاصل شده در این مطالعه با پاسخ های استخراج شده از آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی این کلاس از پل با شعاع ۶۶ متر ($R=0.5L$) تحت ۲۰ رکورد Krawinkler انجام شد. نتایج حکایت از آن دارد که در حالت استفاده از جداگر نسبت به حالت بدون جداگر لرزه ای، متوسط حداکثر تغییر مکان نسبی در جهت طولی و عرضی مطابق نمودار شکل ۴-۹ به ترتیب ۷۰ و ۷۵ درصد کاهش می یابد. با ملاحظه اشکال ۴-۱۰، ۴-۱۱، ۴-۱۲ و ۴-۱۳ می توان پاسخ تحلیلی در مدل پل ($R=L$) را با مدل پل در حالت ($R=0.5L$) مورد مقایسه قرار داد. جهت تعیین میزان دقت نتایج تحلیل پل های مورد مطالعه، به مقایسه نتایج آنالیز مودال پرداخته می شود. مطابق جدول ۴-۱ و بررسی نتایج سه مود اول ارتعاش کلاس پل این مطالعه در حالت ($R=0.5L$) با نتایج پژوهش ناصری و همکاران (۲۰۲۰) [۱۸] در همین حالت، بیانگر دقت مناسب این پژوهش دارد.



شکل ۹-۴ نمودار میانگین حداکثر تغییر مکان نسبی طولی و عرضی پل با شعاع $R=0.5L$



شکل ۱۰-۴ پاسخ مدل تحلیلی در راستای طولی ($R=L$) در راستای طولی. شکل ۱۱-۴ پاسخ مدل پل در ($R=0.5L$) در راستای طولی.



شکل ۱۲-۴ پاسخ مدل تحلیلی در راستای عرضی ($R=L$) در راستای عرضی. شکل ۱۳-۴ پاسخ مدل پل در ($R=0.5L$) در راستای عرضی.

جدول ۴-۱: مقایسه پریود مدها در حالت پل با شعاع ۶۶ متر ($R=0.5L$).

MODE	مدل پل مطالعه	مدل پژوهش ناصری و همکاران (۲۰۲۰)
1	1.28(sec)	1.4(sec)
2	1.09(sec)	1.1(sec)
3	0.99(sec)	0.98(sec)

۷-۴ منحنی شکنندگی

۱-۷-۴ مقدمه

در این قسمت الگوریتم بکار رفته در رسم Fragility Curves مدل این پژوهش تشریح شده و در ادامه نسبت به ترسیم منحنی های شکنندگی که حالات احتمالاتی شرطی بوده اقدام خواهد شد. این منحنی ها بدلیل قابلیت تخمین احتمال فراگذشت از یک رده آسیب معین ، ابزار دقیق و مناسبی در ارزیابی خطر لرزه ای می باشند . با بهره گیری از این ظرفیت ، فرآیند تخصیص خدمات سازه های آسیب دیده و ترتیب سرویس دهی پس از وقوع زلزله با توجه به ارزیابی دقیق صورت گرفته سطوح آسیب اجزای سازه ای تسهیل می شود . شکنندگی شیوه مناسبی برای مقایسه گزینه های مختلف طراحی، روش های متفاوت مقاوم سازی و میزان خرابی می باشد. در این مطالعه آسیب های وارده در سطوح مختلف با استفاده از پارامتر های نظیر معیار شدت و پارامتر فنی تقاضا با هم مرتبط می شوند.

عناصر مهم تولید این منحنی عبارتند از :

مجموعه رکورد های زلزله

مدل های اجزا محدود سازه

مدلهای نیاز لرزه ای احتمالاتی

تخمین ظرفیت اعضا

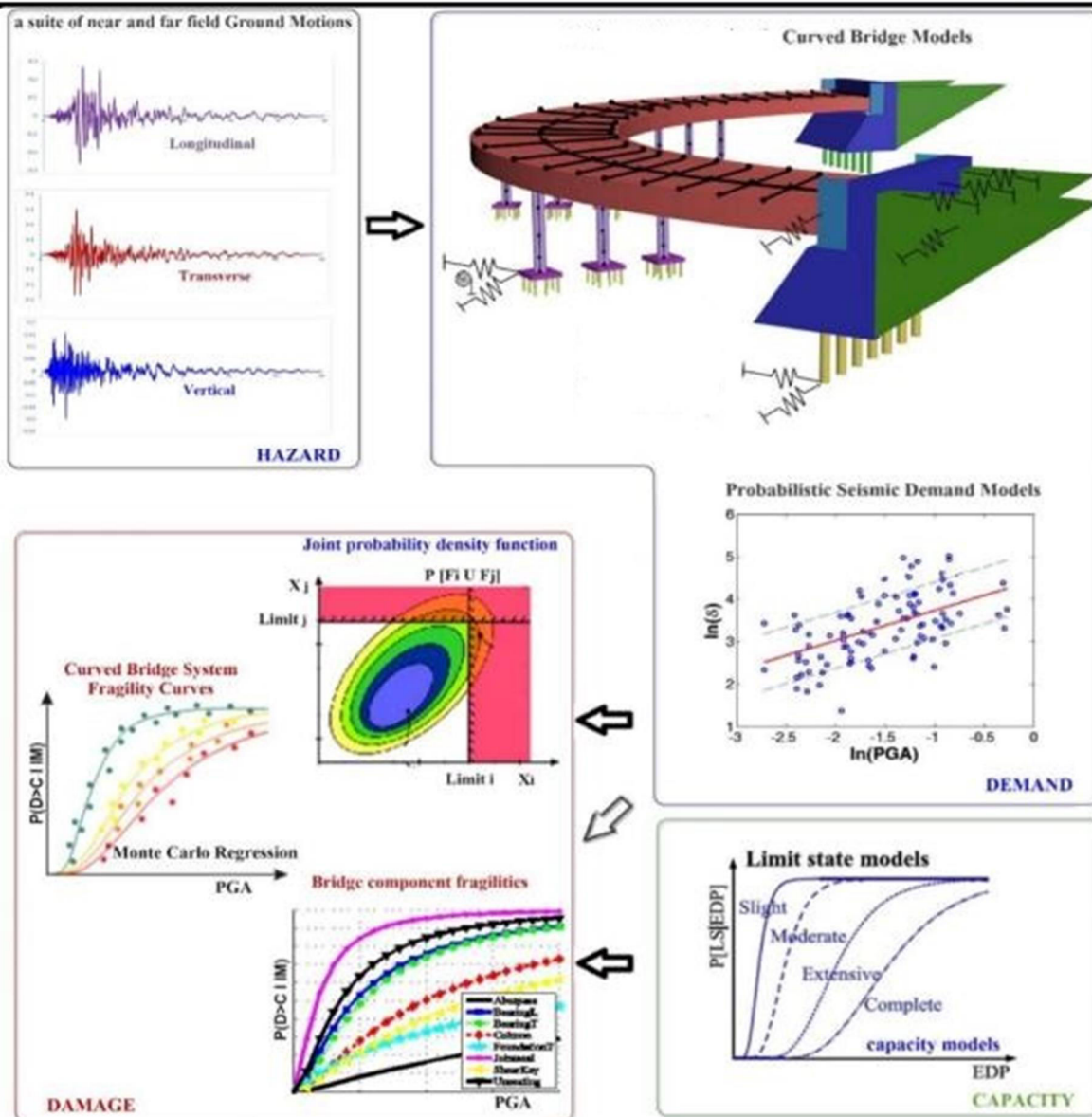
ترسیم منحنی فرجیلیتی

نخستین گام در تولید منحنی شکنندگی انتخاب مجموعه مناسبی از شتاب نگاشت های متناسب با ملاحظات لرزه ای منطقه مورد مطالعه می باشد . در گام بعدی همه مدل های سازه ای که با اعمال جفت رکوردها (در دو جهت عمود برهم) و انجام تحلیل NLTHA در نرم افزار المان محدود بطور تصادفی ایجاد می گردند . با درج پاسخ مولفه های اجزای سازه ای ناشی از تحلیل که شاخص مناسبی در ارزیابی آسیب پذیری می باشند ، مقدمات تولید مدل های احتمالاتی لرزه ای با کمک روبربط مربوطه مهیا شده و بدین ترتیب ظرفیت اجزای سازه ای موردنظر در حالات عملکردی در سطوح مختلف بصورت کمی مورد مقایسه و کارشناسی قرار می گیرد . شکل ۴-۱۴ الگوی کلی این چهارچوب و مولفه های ضروری آن را نشان می دهد.

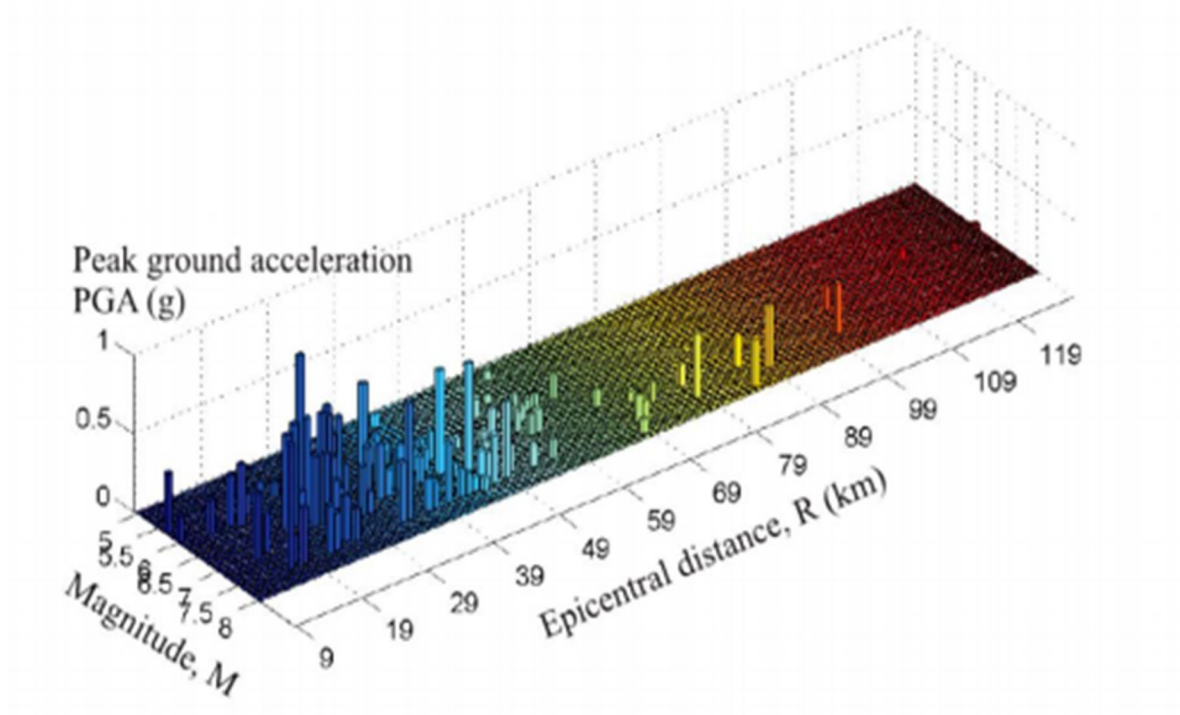
۴-۷-۲ مجموعه زمین لرزه ها

گردهم آوردن دسته مناسبی از رکوردها گام نخست در ترسیم منحنی شکنندگی می باشد . لزوم تطبیق شرایط لرزه ای ناحیه مورد بررسی با رکوردهای گزیده شده و پوشش گستره وسیعی از شتاب نگاشت ها و عدم قطعیت ها حاکی از اهمیت و صعوبت انتخاب این مجموعه می باشد . از این رو در این پژوهش از یکصد جفت رکورد پایگاه PEER¹ که توسط Krawinkler تنظیم شده استفاده شده است .

¹ PEER Strong Motion Databas



شکل ۴-۱۴ طرح شماتیک از روند تحلیل شکنندگی [۱۸]



شکل ۴-۱۵ بزرگا، فاصله و شتاب مجموعه ۱۰۰ تایی زلزله [۲۹]

c

۴-۷-۳ مدل های نیاز لرزه ای احتمالاتی

تهیه مدل های احتمالاتی نیاز لرزه ای از دیگر مراحل ترسیم منحنی های شکنندگی می باشد. بیان این مدل های احتمالاتی از طریق ارتباط بین پاسخ مولفه های سازه که در این پژوهش پاسخ تغییر مکان نسبی ستونهاست، بعنوان تقاضای لرزه ای مدل و شتاب حداکثر زمین (PGA) می باش. رابطه ۴-۱ که نتیجه پژوهش مدل پیشنهادی کرنل و همکاران [۳۰] می باشد بیانگر ارتباط بین این مولفه ها می باشد:

$$\ln[S_a] - \ln[S_s] = \ln \left(\frac{(S_a/S_s) - 1}{S_s} \right) \quad 4-1$$

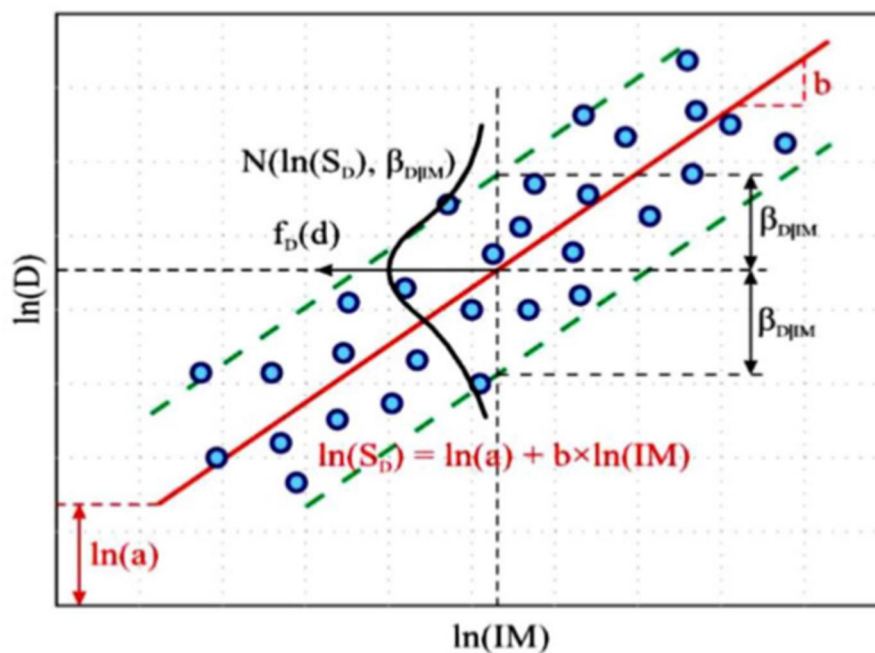
در این رابطه، SD مقدار میانه نیاز لرزه ای و BD|IM انحراف معیار استاندارد نیاز به ازای شاخص شتاب حداکثر زمین ناشی از تحلیل رگرسیون و Φ تابع احتمال نرمال تجمعی می باشد. مطابق رابطه توانی ۴-۲، ارتباط بین SD و شاخص شتاب حداکثر زمین لرزه بعنوان معیار شدت زلزله در این پژوهش بیان می گردد:

$$\sigma_{\ln(D)}^2 = \sigma^2(\ln(D)) \quad 2-4$$

توصیف رابطه ۲-۴ در فضای لوگاریتمی نیز به صورت رابطه خطی ۳-۴ می باشد که در آن، پارامترهای a و b ضرایب ناشی از رگرسیون و $\ln(a)$ عرض از مبدا می باشد. رابطه ۴-۴ نیز محاسبه پراکندگی نیاز لرزه ای می باشد. شکل ۱۲-۴ شیوه استخراج پارامتر SD را نمایش می دهد.

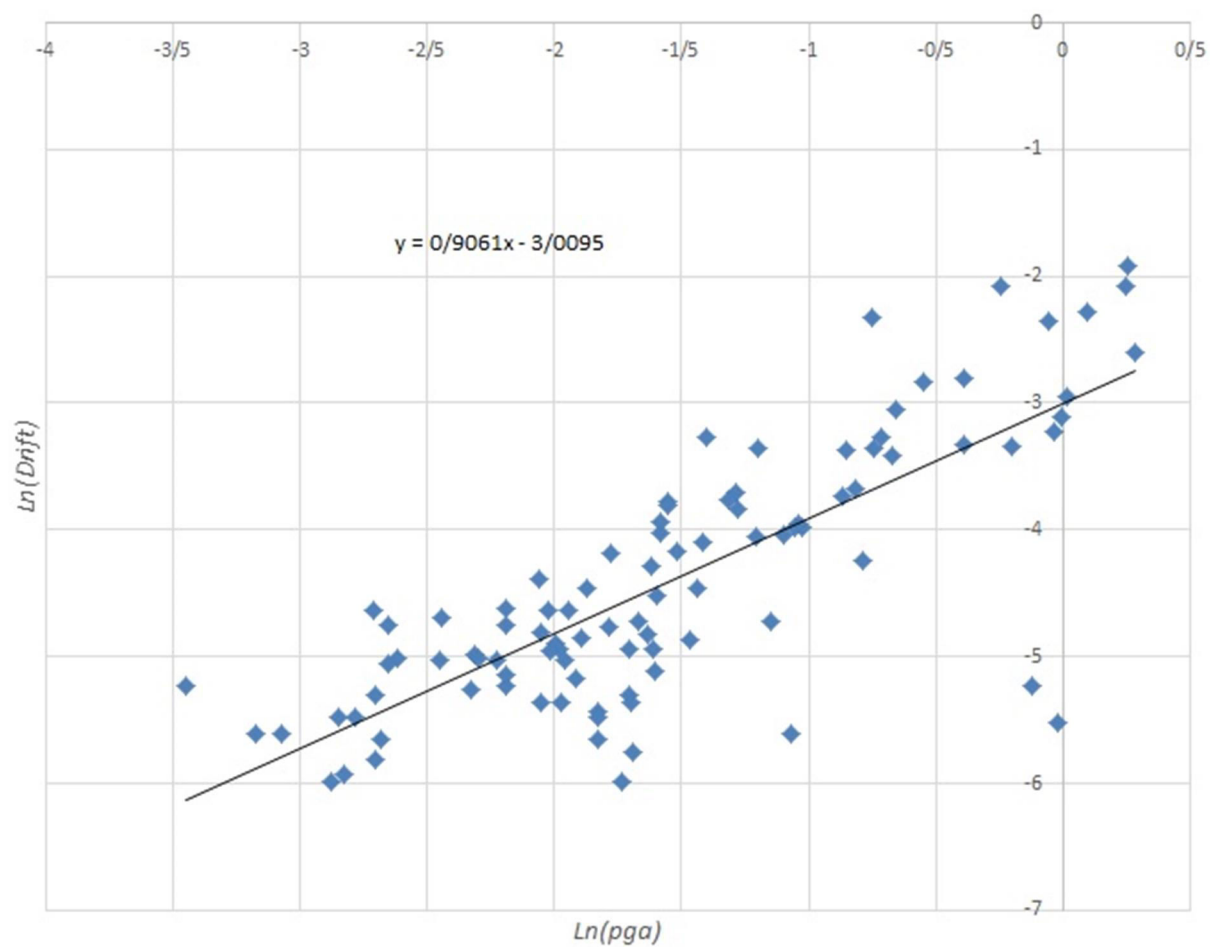
$$\sigma^2(\ln(D)) = \sigma^2(\ln(D)) + \sigma^2(\ln(IM)) \quad 3-4$$

$$\sigma_{\ln(D)}^2 \cong \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(D_i) - \ln(D)]^2}{n-1}} \quad 4-4$$

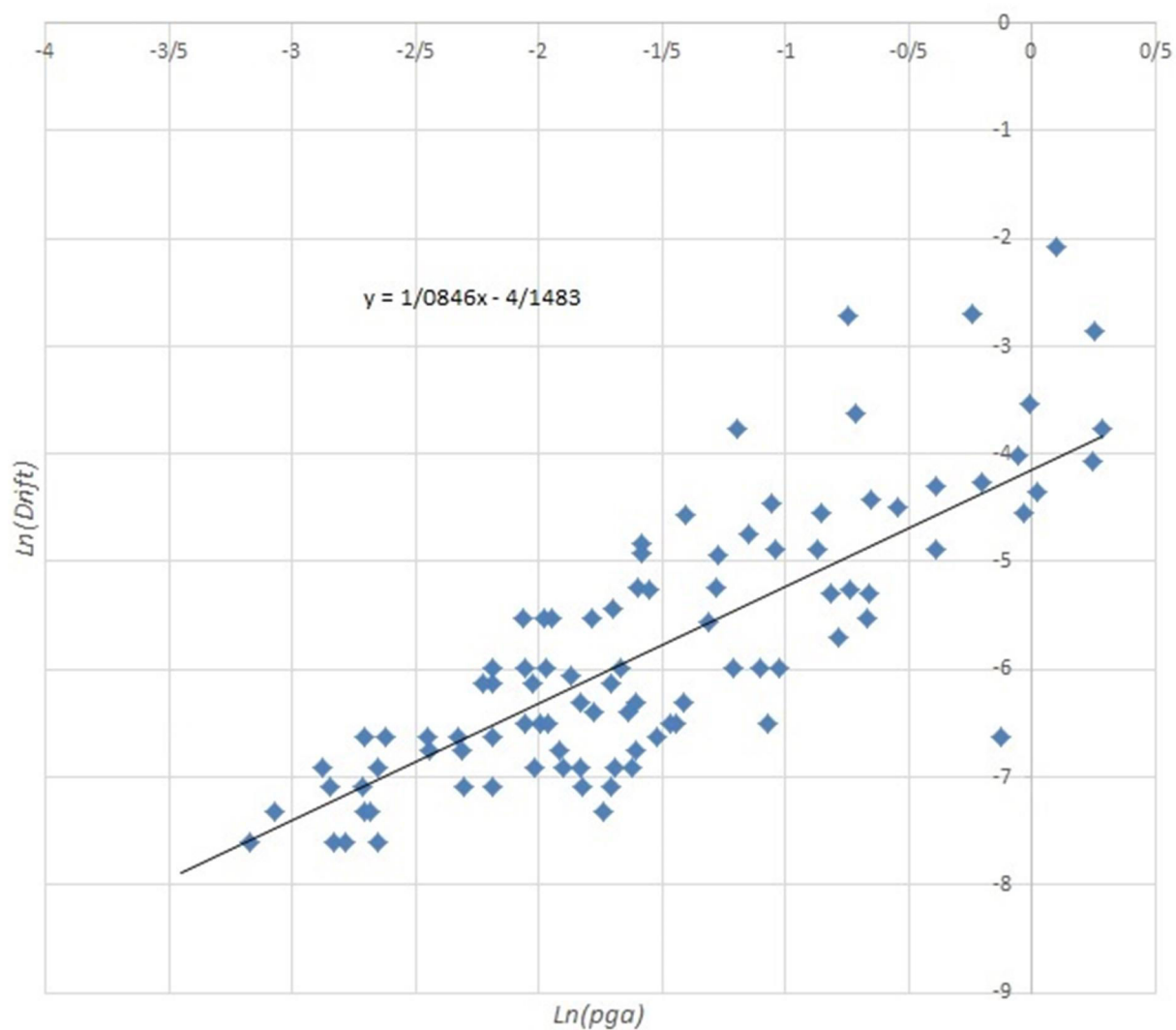


شکل ۱۶-۴ مدل های احتمالاتی تقاضای لرزه ای [۴]

جهت گزیدن شاخص مناسبی در تخمین تقاضای لرزه ای در این مطالعه، به تحقیقات انجام شده توسط **padgett** و **Nelson [31,32]** رجوع شده است. بر این اساس حداکثر شتاب زمین (**PGA**) بعنوان معیار مناسب در این تخمین انتخاب شده است. پارامترهای نیاز لرزه ای پل در این پژوهش در اشکال (۴-۱۷ و ۴-۱۸) ملاحظه می شود.



شکل ۴-۱۷ پارامترهای نیاز لرزه ای ستون پل بدون جداساز لرزه ای



شکل ۴-۱۸ پارامتر های نیاز لرزه ای ستون پل با جداساز لرزه ای

با جایگزینی رابطه ۴-۳ در رابطه ۴-۱ شکنندگی اعضا مختلف پل های مورد مطالعه از رابطه ۴-۵ با استفاده از پارامتر های بدست آمده از رگرسیون محاسبه شده اند.

$$[\quad | \quad] = \left(\frac{(\quad) - \lambda C}{\xi C} \right) \quad ۴-۵$$

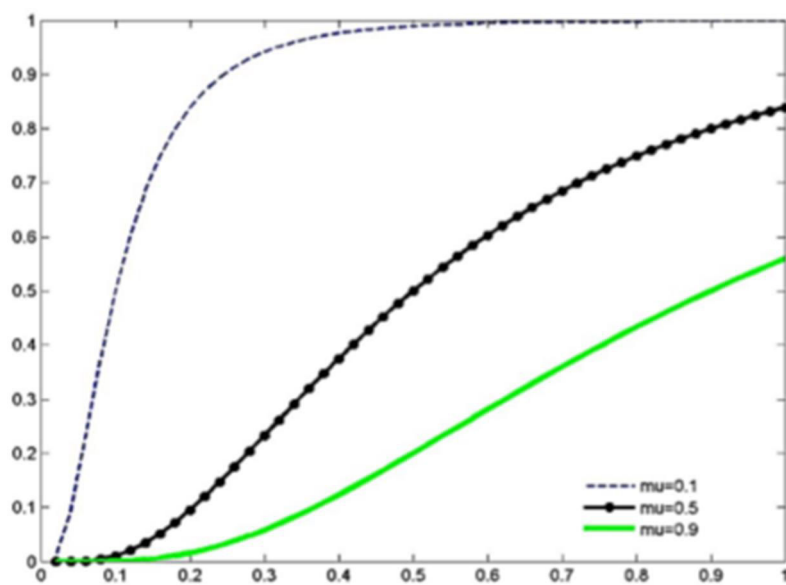
$$\lambda C = \left(\frac{(\quad) - a}{b} \right) \quad ۴-۶$$

$$\xi C = \frac{\sqrt{(\quad)^2 + \quad^2}}{b} \quad ۴-۷$$

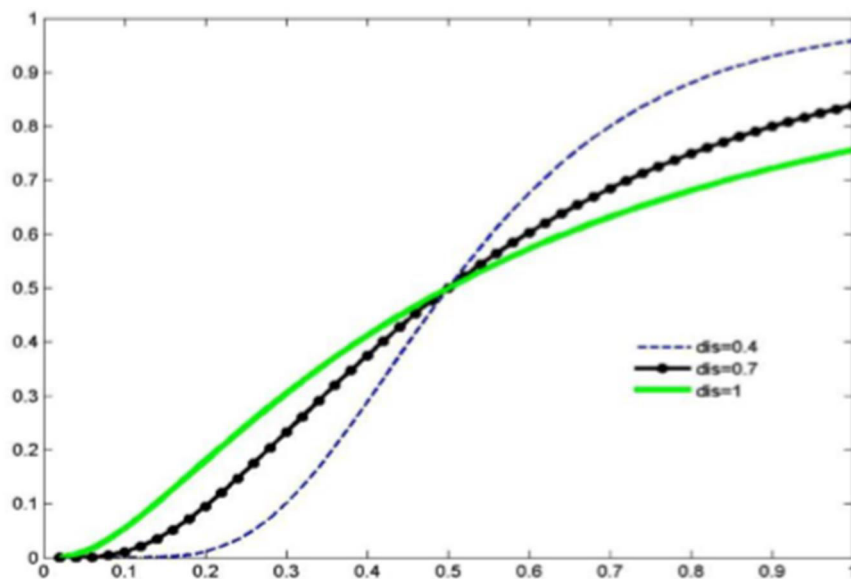
که در روابط بالا λC مقدار میانه نیاز زلزله در فضای لگاریتمی و λC مقدار پراکندگی در تخمین شیب خط (b) می باشد.

۴-۷-۴ پارامترهای شکنندگی

شاخص های λC و λC بترتیب تحت عنوان شاخص میانگین و پراکندگی تعریف می شوند. پارامترهای فوق مطابق روابط ۴-۶ و ۴-۷ حاصل شده و به کمک رابطه ۴-۵ ترسیم منحنی شکنندگی میسر می شود. در نتیجه رویه فوق، نتایج حاکی از آنست که با افزایش میانه منحنی تمایل به حرکت در سمت راست داشته و به عبارتی خوابیده تر می شود. جهت مقایسه و ارزیابی اعضای مختلف در مقدار مشخصی از PGA و پراکندگی، مطابق شکل ۴-۱۹ رشد تغییرات مقدار میانگین با احتمال خرابی رابطه عکس دارد. ضمناً، همانطور که در شکل ۴-۲۰ می توان ملاحظه نمود در مقدار مشخصی از میانگین، در مقادیر کمتر از میانه، پراکندگی با شکنندگی رابطه مستقیم دارد. در حالیکه در مقادیر بالاتر از میانه، تغییرات مقادیر پراکندگی با شکنندگی رابطه عکس دارد. [۱۴]



شکل ۴-۱۹ تأثیر مقدار میانگین بر شکنندگی [۴]



شکل ۴-۲۰ تأثیر مقدار پراکندگی بر شکنندگی [۴]

بدین ترتیب شاخص مقادیر میانه در ارزیابی آسیب پذیری اعضا گزینه مناسبی می باشد . استفاده از این شیوه در برنامه ریزی های کلان شهری جهت تخمین زیرساخت های حیاتی حمل و نقل شهری نظیر سازه های پل و انتخاب بهترین روش جهت مقاوم سازی می باشد .

۴-۷-۵ تخمین ظرفیت اعضا و مدل های احتمالاتی

در فرآیند ترسیم شکنندگی ، علاوه بر تقاضا (Demand) ، نیاز به بررسی و تخمین ظرفیت اعضای مدل های احتمالاتی می باشد که با دو پارامتر SC و C^2 بترتیب با عنوان مقدار میانه و شاخص پراکندگی بیان می شوند . جهت ارزیابی و آسیب پذیری اجزای پل در سطوح آسیب چهارگانه (جزئی ، متوسط ، گسترده و کامل) از توزیع نرمال لوگاریتمی استفاده می شود . در این راستا ، دسته بندی اجزای مختلف پل و لحاظ نمودن عدم قطعیت اعضای مختلف پر اهمیت می باشد . با توجه به آنکه میزان احتمال خرابی و آسیب المان های مختلف در یک سازه پل از جوانب مختلف ، اعم از کیفی و کمی مشابه نمی باشد ، برنامه های متفاوت نظیر ، زمان بندی ، بودجه و تخصیص منابع مالی در امر مقاوم سازی و ... را تحت شعاع خود قرار می دهد . از اینرو بسته به میزان اهمیت اجزای پل و میزان تاثیر المان های سازه ای در خرابی های احتمالی ، اعضای

پل به دو بخش ، تحت عنوان المان های اولیه و ثانویه قسمت شده اند . مطابق جدول ۴-۲ در بخش اعضای اولیه ، به المان هایی تعلق دارد که نظیر ستون ها ، آسیب آن اعضا در سطح آسیب پذیری بالا منجر به انسداد پل و توقف خدمت رسانی می گردد . بنابراین لزوم خدمت رسانی بی وقفه این دست از سازه در شرایط وقوع زلزله بعنوان سازه های با اهمیت زیاد بر توجه به آن می افزاید . در بخش دیگر که به گروه ثانویه اصلاق می گردد ، به اعضای از سازه پل تعلق دارد که آسیب پذیری آن المان ها گرچه فرایند بهره برداری و حمل و نقل شهری را با معضلاتی روبرو می کند و از کیفیت خدمت رسانی می کاهد اما منجر به توقف عملکرد سازه پل نمی شود .

جدول (۴-۲) لیست اعضای اولیه و ثانویه در پل مورد مطالعه [۶]

اعضای اولیه	ستون ها – افتادگی عرشه از روی کوله ها
اعضای ثانویه	جابجایی کلید برشی ، عجابجایی عرشه -جابجایی مقاوم ، محرک و عرضی کوله ، تغییر شکل تکیه گاه ها ی الاستومریک، جابجایی شالوده قابها -دوران شالوده قابها

۴-۷-۶ ظرفیت ستون ها در حالات حدی مختلف

اهمیت ستون ها در ارزیابی شکنندگی لرزه ای پل ها آنچنان زیاد است که اکثر مطالعات قبلی انجام شده در زمینه ارزیابی لرزه ای پل ها تنها شکست ستون ها را ملاک عمل قرار داده اند. لیکن در این تحقیق و در بررسی اعضای اصلی در خرابی سیستم پل، با توجه به تأمین نشیمن کافی برای پل مورد مطالعه تمرکز اصلی این تحقیق بر روی شکنندگی ستون های پل استوار بوده است. در این تحقیق میزان تغییر مکان نسبی پایه ها (دریفت) به عنوان پارامتر نیاز ستون در نظر گرفته شده است. منظور از تغییر مکان نسبی ، نسبت اختلاف تغییر مکان دو گره ابتدا و انتهای ستون نسبت به یک دیگر به ارتفاع ستون می باشد. جزییات ستون های پل که در فصول پیشین به تفصیل توضیح داده شده است . این مقدار (DRIFT) در سطوح خرابی مختلف در جدول ۴-۳توضیح داده شده است.

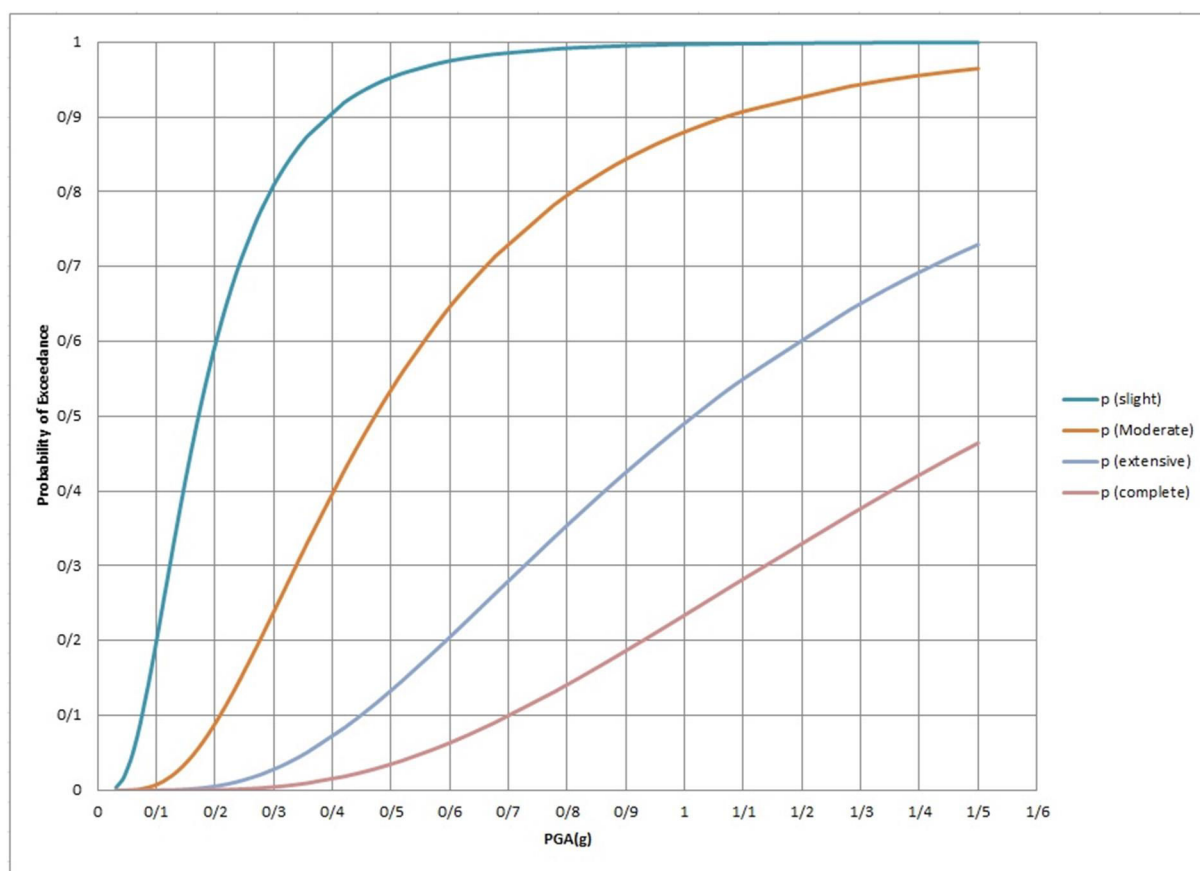
جدول (۳-۴) میزان ظرفیت ستون ها در سطوح آسیب چهارگانه [۳۳]

المان	واحد	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
		SC	BC	SC	BC	SC	BC	SC	BC
ستون (تغییر مکان نسبی)	Drift (%)	0.0141	0.22	0.0275	0.24	0.039	0.18	0.05	0.22

۸-۴ منحنی های شکنندگی لرزه ای پل مورد مطالعه

۱-۸-۴ پل در حالت بدون استفاده از جدا ساز لرزه ای

در این قسمت از پژوهش احتمال شکنندگی لرزه ای پل عرشه جعبه ای بتن آرمه در حالت بدون استفاده از جدا ساز لرزه ای همراه با احتمال شکنندگی کلی آن در زلزله هایی با شدت مختلف محاسبه شده اند. شکل ۲۱-۴ منحنی های شکنندگی در چهار سطح آسیب متفاوت گزارش شده است.

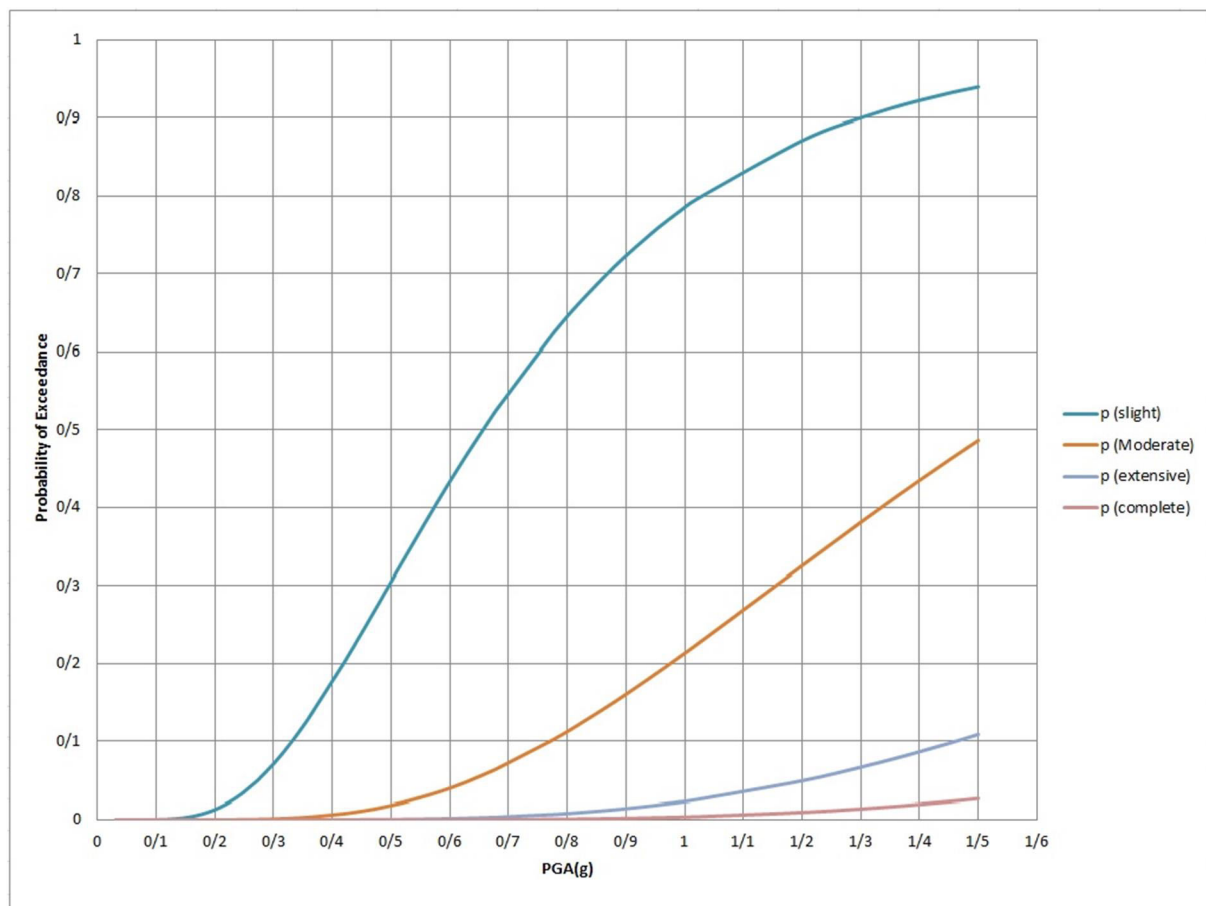


شکل ۲۱-۴ منحنی شکنندگی پل بدون استفاده از جدا ساز لرزه ای

محور افقی در نمودار ، نشان دهنده حداکثر شتاب زلزله بر مبنای شتاب گرانش زمین و محور قائم احتمال آسیب پذیری اعضای پل را نشان می دهد .

۴-۸-۲ پل با جداساز لرزه ای

جهت بررسی کفایت و میزان اثر گذاری سیستم جدا سازی لرزه ای بر میزان آسیب پذیری و شکنندگی پل مورد مطالعه، مدل سازی تحلیلی با در نظر گیری سیستم جدا ساز طراحی شده مختص همین پل صورت پذیرفت. در شکل ۴-۲۲ منحنی های شکنندگی در چهار سطح آسیب، به دست آمده از نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی در بزرگای شتاب متفاوت گزارش شده است.



شکل ۴-۲۲ منحنی شکنندگی پل در وضعیت استفاده از جداسازی لرزه ای

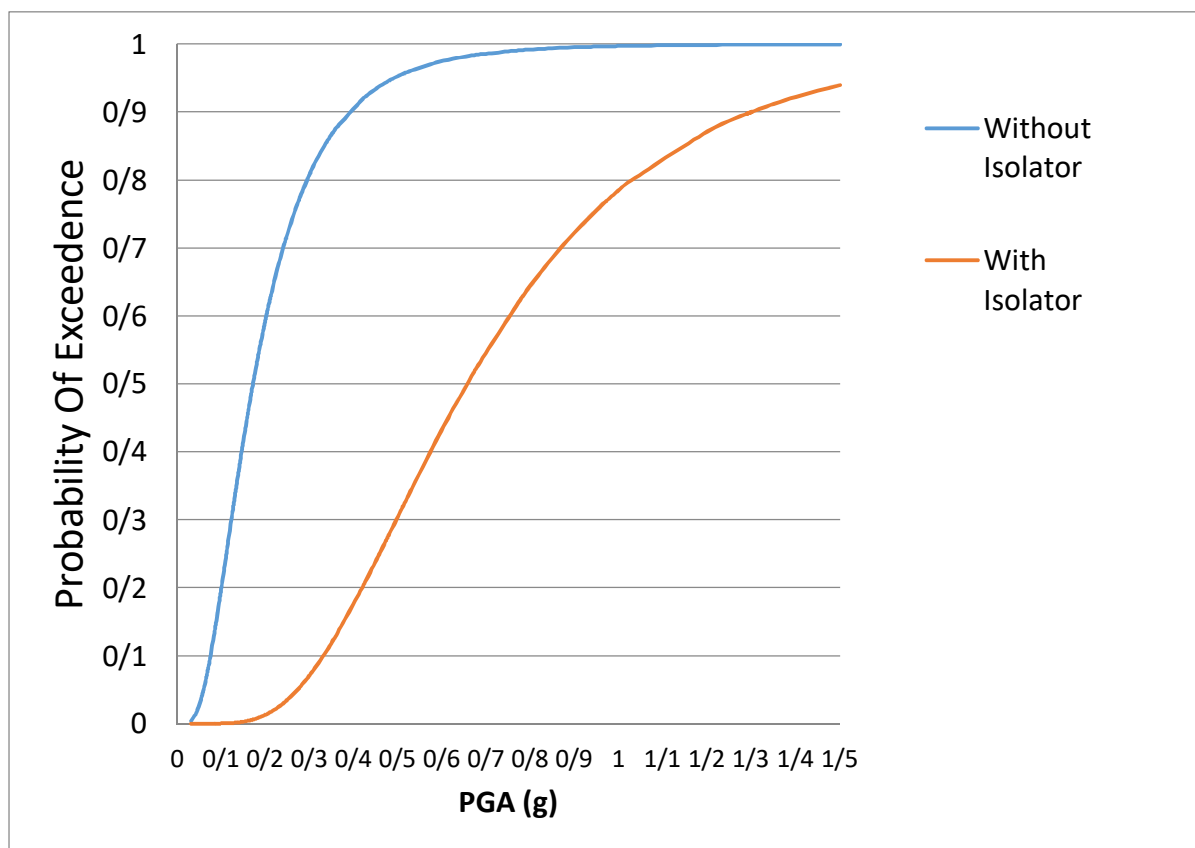
با ترسیم منحنی های شکنندگی پل در حالت های مطلوب و حالت استفاده از سیستم جاذب انرژی امکان نتیجه گیری در میزان تاثیر این سامانه فراهم گشته که در ادامه به این مهم می پردازیم .

۹-۴ مقایسه منحنی های شکنندگی

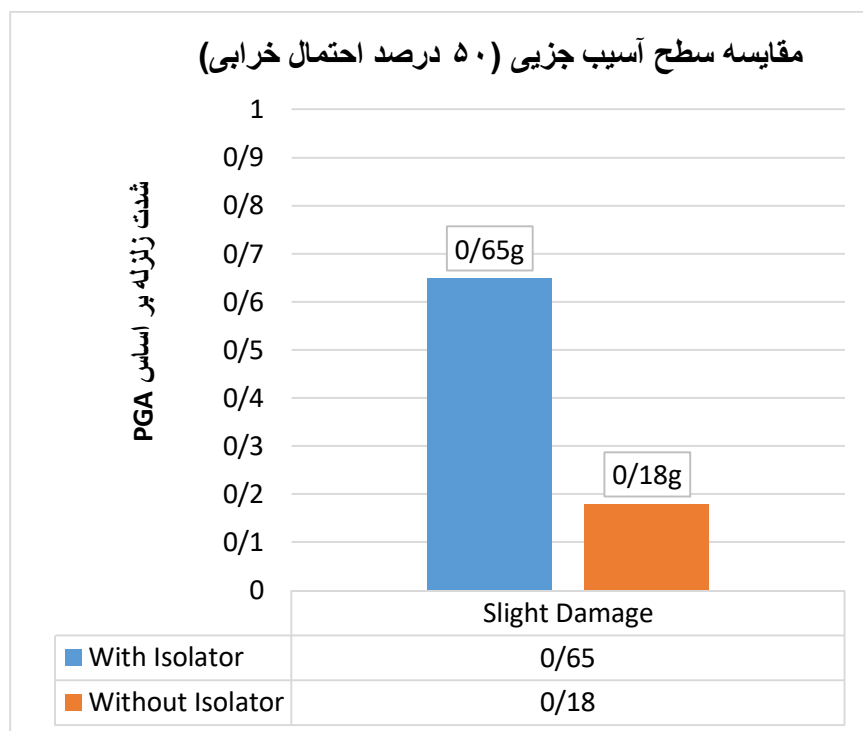
همان طور که در قسمت قبل توضیح داده شد ، با خاتمه مراحل ترسیم Fragility Curve امکان مقایسه پل بدون استفاده از جداساز لرزه ای و با استفاده از جداساز لرزه ای به جهت بررسی میزان آسیب پذیری پل در شرایط گوناگون مهیا گشت . این مطالعات می تواند نمونه مناسبی به جهت تصمیم گیری در عملکرد و بهره برداری به جهت انتخاب روش موثر در کاهش ایجاد آسیب های غیر قابل انتظار باشد. در ادامه به مقایسه میزان آسیب پذیری در سطوح مختلف پل در حالت بدون جداساز و با جداساز لرزه ای می پردازیم.

۱-۹-۴ مقایسه در سطح آسیب جزئی

جهت مقایسه در سطح آسیب جزئی از معیار میانه شکنندگی (مقدار PGA در احتمال خرابی ۵۰ درصد) که شاخص خوبی برای مقایسه منحنی های شکنندگی است، استفاده خواهد شد . با توجه به مقایسه نمودار مطابق شکل های ۴-۲۳ و ۴-۲۴ و بررسی شاخص میانه شکنندگی در سطح آسیب جزئی نشان می دهد که پل در حالتی که از جداساز هسته سربی بهره می برد میانه شکنندگی معادل زلزله ای با شتاب $0.65g$ می باشد ، در صورتیکه که برای این کلاس از پل در حالت مطلوب (بدون استفاده از جداساز لرزه ای) میانه شکنندگی معادل زلزله ای با شتاب $0.18g$ برآورد می گردد .



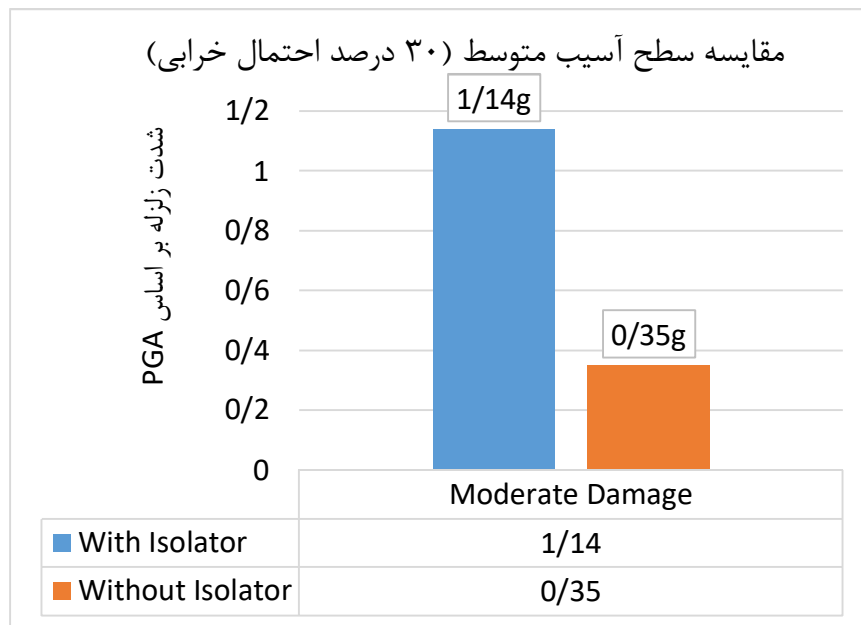
شکل ۴-۲۳ منحنی شکنندگی پل بدون جداساز و با جداساز در سطوح آسیب جزئی



شکل ۴-۲۴ مقایسه شکنندگی پل در حالت با جداساز و بدون جداساز در سطح آسیب جزئی

۴-۹-۲ مقایسه در سطح آسیب متوسط

کنترل میزان آسیب در سایر سطوح نیز کفایت و تاثیر استفاده از سیستم جداسازهای لرزه ای را بیش از پیش روشن مینماید. در این راستا سطح آسیب ۳۰ در صد برای سطوح متوسط مورد مقایسه قرار گرفته است. بطوریکه در حالت پل با جداساز هسه سربی در سطح آسیب متوسط، ۳۰ درصد احتمال آسیب معادل زلزله ای با شتاب $1.14g$ می باشد در صورتیکه در حالت پل بدون جداگر این سطح از آسیب معادل زلزله ای با شتاب $0.35g$ می باشد.



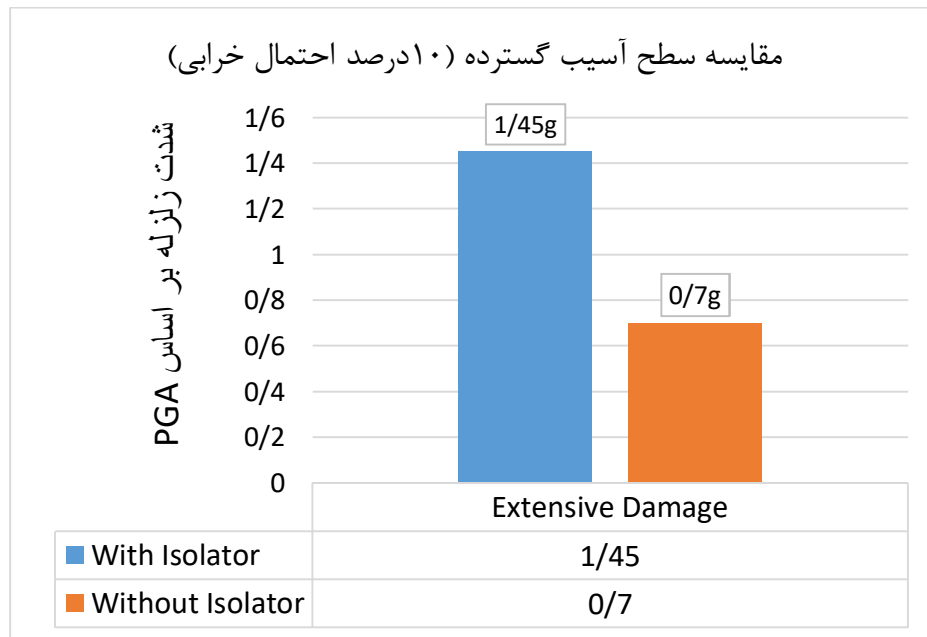
شکل ۴-۲۵ مقایسه شکنندگی پل بدون جداساز و با جداساز در سطح آسیب متوسط

۴-۹-۳ مقایسه در سطح آسیب گسترده

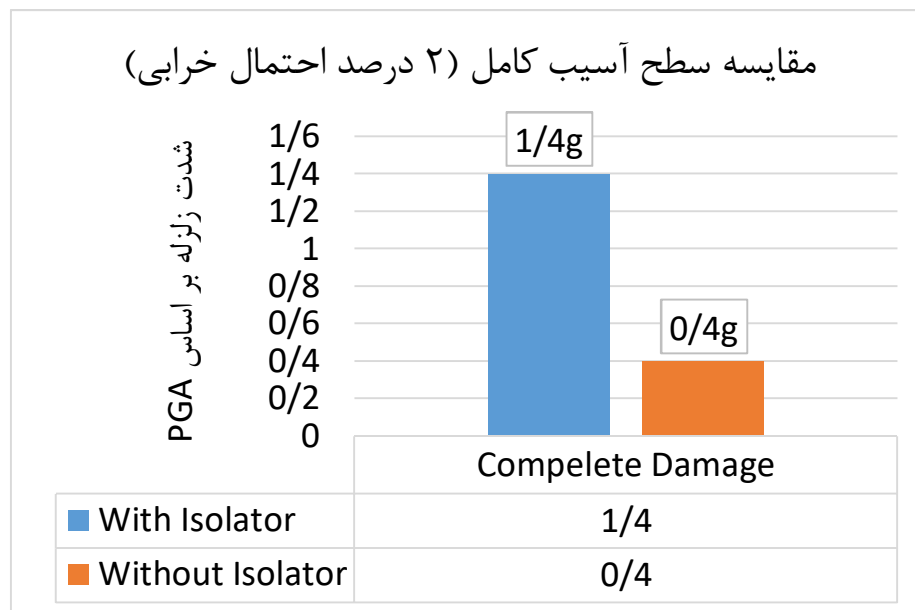
جهت مقایسه در سطح آسیب گسترده، بررسی خرابی ۱۰ درصد ملاک عمل واقع خواهد شد. بطوریکه در حالت پل با جداگر، ۱۰ درصد احتمال آسیب معادل زلزله ای با شتاب $1.45g$ می باشد در صورتیکه در حالت پل بدون جداگر این سطح از آسیب معادل زلزله ای با شتاب $0.7g$ می باشد.

۴-۹-۴ مقایسه در سطح آسیب کامل

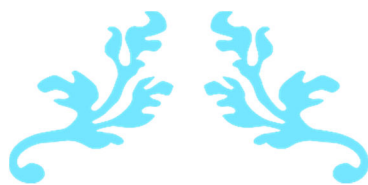
برای ارزیابی در سطح آسیب گسترده، بررسی ۲ درصد احتمال خرابی ملاک عمل واقع خواهد شد. بطوریکه در حالت پل با جداگر، ۲ درصد احتمال آسیب معادل زلزله ای با شتاب $1.4g$ می باشد در صورتیکه در حالت پل بدون جداگر این سطح از آسیب معادل زلزله ای با شتاب $0.7g$ برآورد می گردد.



شکل ۴-۲۶ مقایسه شکنندگی پل بدون جداساز و با جداساز در سطح آسیب گسترده



شکل ۴-۲۷ مقایسه شکنندگی پل بدون جداساز و با جداساز در سطح آسیب کامل



فصل پنجم

جمع بندی و پیشنهادات

پژوهش حاضر با هدف "ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای پل های عرشه باکس بتن ارمه چند قابی با قوس افقی دارای سیستم جداساز لرزه ای با استفاده از منحنی شکنندگی" انجام شد. مطالعات انجام شده در قالب ۵ فصل تهیه و تنظیم شده است. در فصل نخست، به کلیات پژوهش، اهداف و فرضیات تحقیق و ساختار پژوهش اشاره شده است. در فصل ۲ با مروری بر ادبیات فنی و نگاهی گذرا به تاریخچه، نتایج تحقیقات انجام شده توسط پژوهشگران در ادوار مختلف مرور شده و ضمن معرفی برخی سیستم های کنترل لرزه ای و بیان محاسن و معایب آنها، به ترسیم منحنی شکنندگی و روش های تولید آن جهت ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای اجزای سازه پرداخته شده است. در فصل ۳ به معرفی شیوه تحقیق و روش اجرای کار و بیان تجهیزات سخت افزاری و نرم افزاری با توجه به ملاحظات و ضوابط لرزه ای معتبر در تخمین آسیب پذیری اعضا سازه پل اقدام شده است. در فصل ۴ پاسخ مولفه های ناشی از تحلیل، استخراج شده و نتایج در قالب گراف و جداول مربوطه بیان شده است. در فصل آخر (پنجم) به بررسی اجمالی نتایج حاصله پرداخته و با معضلاتیکه طی این فرآیند مواجه شده بود اشاره شده است. ضمناً در این راستا به ارائه برخی راهکارها و پیشنهاداتی جهت توسعه مطالعات آتی پرداخته شده است.

۵-۲ جمع بندی و نتیجه گیری

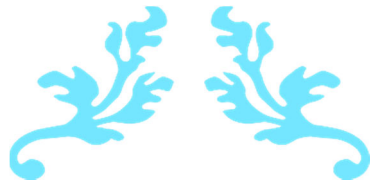
این پژوهش با هدف ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای پل های عرشه باکس بتن ارمه چند قابی با قوس افقی دارای سیستم جداساز لرزه ای با استفاده از منحنی شکنندگی انجام شده است . پس از بررسی اصول ، مبانی و مدل سازی بر مبنای اصول و فرضیات منطقی مهندسی به مقایسه نتایج حاصل شده و نتایج ناشی از تحلیل نرم افزار پرداخته شده است . با توجه به نتایج حاصله می توان تاثیر به کارگیری جداساز لرزه ای در پل را مشاهده نمود . در حالت پل جداسازی نشده، شکل اصلی ارتعاشی پل، حالت حرکت قائم عرشه است. هر قدر سختی جانبی جهت عرضی عرشه پل بیشتر باشد، این شکل ارتعاش پل در مودهای بیشتری به چشم میخورد. جداسازی لرزه ای، مود ارتعاشی انتقال جانبی پل را به مود اصلی ارتعاش پل تبدیل میکند، بنابراین از عواقب زیانبار زلزله بر پل کاسته خواهد شد بطوریکه پل هر چه سختتر باشد، تأثیر جداسازی لرزه ای در کاهش پاسخهای نیرویی و تغییرمکانی بیشتر خواهد بود. با توجه به کلاس پل، میزان کاهش در برش پایه و شتابنگاشتهای مورد استفاده و تأثیرپذیری پل با سختی اولیه متفاوت خواهد بود . در مواردی که پل دوره تناوب جانبی کمتری دارند، برش پایه جانبی نسبی بیشتر و در حالت جداسازی نشده بسیار بیشتر از حالت های جداسازی شده خواهد بود که مقدار کاهش آن نیز رابطه مستقیم با زلزله (شتابنگاشت) وقوع یافته دارد. سیستم جداگر لرزه ای بدلیل توانایی در کاهش نیروی وارده به اجزای پل و جذب انرژی نقش فیوز^۱ را ایفا نموده بطوریکه قابلیت تعویض پس از خرابی را خواهد داشت . همانطور که اکثر آیین نامه های ارزیابی آسیب پذیری از قبیل HAZUS دریافت ستون ها را به عنوان شاخص شکنندگی پل در نظر می گیرند در این مطالعه نیز با استخراج نتایج تحلیل و تغییر مکان های نسبی ستون ها در دو حالت پل با و بدون جداگر لرزه ای مورد مقایسه قرار گرفته است .

^۱Fuse

با بررسی منحنی های شکنندگی به دست آمده ، به کارگیری جداساز لرزه ای سبب بهبود عملکرد و کاهش احتمال خرابی پل می گردد . لذا نتایج حاکی از آن است که بیشترین میزان کاهش در سطح آسیب کامل وقوع یافته است. بطوریکه در سطح آسیب جزئی در حالت پل با جداگر لرزه ای میانه شکنندگی معادل زلزله ای با شتاب $0.65g$ می باشد اما در حالت بدون جداگر این سطح از آسیب معادل زلزله ای با شتاب $0.18g$ برآورد می گردد. سطح آسیب متوسط در حالت جداسازی شده 30% درصد احتمال خرابی معادل زلزله ای با شتاب $1.14g$ و در حالت بدون جداساز معادل زلزله ای با شتاب $0.35g$ ارزیابی شده است . در سطح آسیب گسترده 10% درصد احتمال خرابی معادل زلزله ای با شتاب $1.45g$ در حالت استفاده از جداساز لرزه ای مواجه بوده اما در حالت بدون جداساز معادل زلزله ای با شتاب $0.7g$ تخمین زده می شود . در سطح آسیب کامل نتایج حکایت از آن دارد که در حالت پل با جداساز لرزه ای دو درصد احتمال خرابی در زلزله ای با شتاب $1.4g$ رخ داده در حالیکه در حالت بدون جداساز لرزه ای معادل زلزله ای با شتاب $0.4g$ برآورد می گردد. ضمناً با ملاحظه نتایج تحلیل و مقایسه تغییر مکان نسبی ستون ها نتایج حکایت از آن دارد که تغییر مکان نسبی طولی و عرضی در حالت پل جداسازی شده به ترتیب کاهش 67% و 64% درصدی داشته اند.

۳-۵ پیشنهادات

- پیشنهاد می شود که پل با عرشه باکس بتن ارمه چند قابی با قوس افقی با حالت انواع دیگر سیستم جداساز لرزه ایی بررسی شود و نتایج را با نتایج این پژوهش مقایسه شود.
- پیشنهاد می شود جهت توسعه منحنی شکنندگی به یک روش یا سامانه در مقاوم سازی و ارزیابی لرزه ای اکتفا نشود و ترکیبی از روش های مقاوم سازی را در ارزیابی بهره برده و نتیجه سیستم ترکیبی را در سطوح مختلف مقایسه نمود . همچنین پیشنهاد میگردد در ترکیب یاد شده اجرای مختلف پل را مورد ارزیابی قرار داد و تنها به یک المان اکتفا ننمود .
- پیشنهاد می شود که پل مورد مطالعه را در سایر حالت های هندسی محتمل از قبیل اثر توام قوس افقی و قائم و یا پل در حالت دارای زاویه تورب مورد بررسی قرار داده و نتایج را در حالت با و بدون استفاده از جداساز لرزه ای توسط منحنی شکنندگی توصیف کرد .
- پیشنهاد می شود این پژوهش را با نرم افزار های دیگر شبیه OpenSEES بررسی شوند و نتایج را با نتایج این پژوهش مقایسه شود.
- پیشنهاد می شود که پل با عرشه باکس بتن ارمه چند قابی با قوس افقی دارای سیستم جداساز لرزه ای با اثر گذاری اندرکنش خاک سازه بررسی و مقایسه شود.



مراجع

[1] Buckle, I.G., et al., Seismic isolation of highway bridges. 2006.

[2] J. Zhang, N. Makris, Seismic response analysis of highway overcrossings including soil-structure interaction, Earthquake engineering & structural dynamics, 31(11) (2002) 1967-1991.

[۳] نشریه ۵۲۳، (۱۳۸۹)، "راهنمای طراحی و اجرای سیستم های جداساز لرزه ای در ساختمانها" معاونت امور فنی سازمان مدیریت و برنامه ریزی.

[۴] - هدایتی گودرزی، مهدی (۱۳۹۴)، "ارزیابی آسیب پذیری پل های جعبه ای جداسازی شده شهری با استفاده از منحنی شکنندگی (بررسی موردی پل تهران)" پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران

[5] Highway, A.A.o.S., et al., Guide Specifications for Seismic Isolation Design. 2010: American Association of State Highway and Transportation Officials

[۶] پهلوان، ح (۱۳۹۴)، "ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای احتمالاتی و مقاوم سازی پل های بتن آرمه با نرم افزار Open SEES" جلد اول، چاپ اول، انتشارات آزاده، تهران، ص ۱۲

[7] Whitman, R. V., Biggs, J. M., Brennan III, J. E., Cornell, A. C., de Neufville, R. L., Vanmarcke, E. H. (1975). Seismic Design Decision Analysis, Journal of Structural Division, 101(ST5), pp. 1067-1084

[8] ATC (1985). Earthquake damage evaluation data for California, Report No. ATC-13, Applied Technology Council, Redwood City, CA.111

[9] ATC (1991). Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Coterminous United States, Report No. ATC-25, Applied Technology Council, Redwood City, CA.

[10] FEMA-273 (1997). NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Report No. FEMA-273, Building Seismic Safety Council Seismic Rehabilitation Project, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC

[11] A.R. Khaloo, M. Kafimosavi, Enhancement of flexural design of horizontally curved prestressed bridges, Journal of bridge engineering, 12(5) (2007) 585-590.

[12] N.Tondini, B. Stojadinovic, Probabilistic seismic demand model for curved reinforced concrete bridges, Bulletin of Earthquake Engineering, 10(5) (2012) 1455-1479.

[۱۳] - رحمت اله نگهدار، مجید پاسبانی، مسعود ابی ترابی، رضا اشراقی. ۱۳۹۲. "بهسازی لرزه ای پل ها با استفاده از سیستم جداساز پایه .وزارت علوم، تحقیقات و فناوری" - دانشگاه محقق اردبیلی

[14] M. Abbasi, B. Zakeri, G.G. Amiri, Probabilistic seismic assessment of multiframe concrete box-girder bridges with unequal-height piers, Journal of Performance of Constructed Facilities, 30(2) (2015) 04015016

[15] K.N. Ramanathan, Next generation seismic fragility curves for California bridges incorporating the evolution in seismic design philosophy, Georgia Institute of Technology, 2012.

[16] -H. Pahlavan, B. Zakeri, G.G. Amiri, M. Shaianfar, Probabilistic vulnerability assessment of horizontally curved multiframe RC box-girder highway bridges, Journal of Performance of Constructed Facilities, 30(3) (2015) 04015038.

[۱۷] - محسنعلی شایانفر، اسدالله عباسلو، حسین پهلوان، محمدعلی برخورداری. ۱۳۹۹. "ارزیابی احتمالاتی آسیب پذیری لرزه‌ای زیر ساختهای شبکه حمل و نقل با تأکید بر پل های عرشه جعبهای بتن آرمه مستقیم و قوسی تحت تحریکات چندگانه". فصلنامه مهندسی حمل و نقل

[18] Ali Naseri, Alireza MirzaGoltabar Roshan, Hossein Pahlavan and Gholamreza Ghodrati Amiri, " Effects of curvature radius on vulnerability of curved bridges subjected to near and far-field strong ground motions," Structural Monitoring and Maintenance, Vol. 7, No. 4 (2020) 000-000

[19]- S. Saxena V., Deodatis, G., Shinozuka, M. and Q. Feng M., "Development of Fragility Curves for MultiSpan Reinforced Concrete Bridges," Dept. of Civil and Environmental Engineering, Princeton University, Princeton, pp. 1-7, 2001.

[20] G. Taylor, The propagation and decay of blast waves, The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor, 3 (1939) 221-235.

[21] J.B. Mander, M.J. Priestley, R. Park, Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of structural engineering*, 114(8) (1988) 1804-1826.

[22] Aviram A., Mackie K. R., Stojadinovic B., "Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California," Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, California, 2008

[23] Pahlavan, H., Naseri, A., Rafiei, S., & Bagheri, H. (2018). Seismic Vulnerability Assessment of Horizontally Curved Multi frame RC Box-Girder Bridges Considering the Effect of Column Heights and Span Numbers. Doi: 10.22060/CEEJ.2017.12135.5130.

[24] S. Megalley, P. Silva, F. Seible, Seismic Response of Sacrificial Exterior Keys in Bridge Abutments, in, La Jolla, CA: Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, 2002.

[25] M. Shinozuka, M.Q. Feng, X. Dong, T. Uzawa, T. Ueda, Damage assessment of a highway network under scenario earthquakes for emergency response decision support, in: *Smart Structures and Materials 2000: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, International Society for Optics and Photonics, 2000, pp. 264-276.

[26] J. Zhang, N. Makris, Seismic response analysis of highway overcrossings including soil-structure interaction, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(11) (2002) 1967-1991.

[27] FHWA. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 9th Ed, 2020

[۲۸] نشریه ۳۶۰، (۱۳۸۵)، "دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود" معاونت امور فنی سازمان

مدیریت و برنامه ریزی

[29] FHWA (2006). Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges : part 1- Bridges,. FHWA-HRT-06-032., Fairbank Highway Research center 6300 Georgetown Pike McLean, VA, McLean, VA 22101-2296

[30] Cornell, A. C., Jayaler, F., Hamburger, R. O., Foutch, A. D. (2002). Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines, *Journal of Structural Engineering*, 128(4), pp. 526-533.

[31] Nielson, B. G. (2005). Analytical Fragility Curves for Highway Bridges in Moderate Seismic Zones, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.

[32] Padgett, J. E. (2007). Seismic Vulnerability Assessment of Retrofitted Bridges using Probabilistic Methods, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.

[33] Jeon, J. S., Shafieezadeh, A., & DesRoches, R. [2015]. "System fragility curves for a long multi-frame bridge under differential support motions." 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, Vancouver

Abstract.

Bridges are counted as one of the most important and vulnerable structures in the vital veins of every country. The abundance of the concrete box deck bridges with horizontal arches on the one hand, and the complex dynamic behavior resulted from special geometric conditions of this class of bridges which have made them more vulnerable on the other hand, were aimed to be studied in this research. In this study, a model of a concrete box deck bridge with horizontal arches and the appropriateness of using lead-rubber bearing system were examined, and ultimately, two states of the bridge with and without seismic isolation were assessed by fragility curves, and the amount of possible seismic damage have been obtained. The study results were analyzed by modeling the bridge in the CSI Bridge finite-element software in three dimensions and under the excitation of 100 pairs of real accelerogram and under nonlinear time-history analysis, and the responses of the elements were extracted. So that, compared to the state without seismic isolator, the maximum relative displacement in the model with seismic isolator has decreased by 67 and 64 percent in the longitudinal and transverse directions; respectively. Also, based on the result of modal analysis and comparison of the vibration period, the results show a significant increase in the first to third period of vibration of bridges in the state with seismic isolation compared to the without seismic isolation. The results of studies indicate that In this bridges with lead-rubber bearing system have reduced the drift of columns significantly so that the seismic fragility of the bridge system has been reduced at different levels of damage.

Keywords: 1- Horizontal arch bridge 2- Lead-Rubber Bearing 3- Maximum relative displacement of columns 4- Fragility curve 5- Nonlinear time-history analysis



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Structural Engineering

**Siesmic fragility of assessment of horizontally curved multiframe
RC Box-Girder bridges with base isolation**

By : Meysam Balou

Supervisor:
Dr. Hosein Pahlavan

Advisor:
Ali Naseri

February 2021