دانشگاه شمال

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

رشته عمران – سازه

عنوان پایان نامه:

بررسی رفتار لرزه ای ساختمان های فلزی نامتقارن در ارتفاع با روش آنالیز استاتیکی فزاینده غیرخطی مودی

استاد راهنما:

دکتر محمود یحیایی

نگارش:

لیلا لطفی جندقی

زمستان ۸۸

حمد وستایش ایزد منان را کـه توفیـق تـدوین وگـردآوری ایـن مجموعه را به من اعطا فرموند و با سـپاس فـراوان از زحمـات استاد گرامی آقای دکتر یحیایی که پیشنهادات وتـذکرات ایشـان موجب تکمیل این پایان نامه گردید.

چکیده

در حال حاضر منطقی ترین و کاربردی ترین روش ارزیابی سازه ها ، روش های استاتیکی غیرخطی می باشد. یکی از فرضیات اولیه در این روش ها تعیین پاسخ سازه چند درجه آزادی تحت حرکت لرزه ای زمین از پاسخ یک سیستم یک درجه آزادی می باشد.با توجه به تفاوت تغییرمکان حداکثر در این سیستم ها، توزیع نیروها وتغییرشکل ها در این دو سیستم متفاوت خواهد بود که یکی از علتهای این تفاوت، اثر مودهای بالاتر می باشد. در روش های رایج آنالیز بار جانبی افزاینده، توزیع نیرو و تغییرمکان هدف بر این فرض استوار است که پاسخ سازه توسط مود ارتعاشی اصلی سازه کنترل می شود.ما در سازه هایی که تحت تأثیر مودهای ارتعاشی به غیر از مود اصلی ارتعاشی خود قرار دارند، همانند سازه های بلند ویا ساختمان های با طبقه ضعیف ،ویا ساختمان های نامتقارن در پلان که در آنها پیچش اتفاق می افتد ویا ساختمان های نامنظم در ارتفاع نمی توان به صحت روش های آنالیز بارجانبی افزاینده که در آنها آنالیز با فرض کنترل سازه توسط مود اصلی ارتعاشی صورت می گیرد اطمینان کرد.بنابراین مطالعات اخیر در این زمینه ،برگسترش روش بارجانبی افزاینده به سازه هایی که در آنها اثر مودهای بالاتر مهم می باشد متمرکز شده است.به این منظور روش جدید آنالیز بار جانبی افزاینده چند مودی ارائه(MPA) شده است که درآن اثر مشارکت تمام مودهای ارتعاشی، که در نیازهای لرزه ای سازه مهم می باشند، در پاسخ سازه در نظر گرفته می شود. اما به علت وجود پدیده ای که در آن در طی آنالیز بار جانبی افزاینده مود سوم، پس از تسلیم سازه ،بام در خلاف جهت اعمال بار جانبی تغییر مکان می دهد، کاربرد روش (MPA) در برآورد نیازهای لرزه ای با مانع روبرو خواهد بود. بنابراین روش اصلاح شده ای بر روش (MPA) در دستور العمل FEMA440 توصیه شده است که در آن پاسخ سازه در مودهای بالاتر با این فرض محاسبه می شود، که سیستم الاستیک خطی باقی می ماند. در این پایان نامه با انتخاب چند قاب فولادی مهاربندی با طبقات مختلف که دارای نامنظمی جرم در ارتفاع می باشند کارایی روش های پیشنهادی مزبور در منظور کردن اثر مودهای بالاتر و ارزیابی رفتار این قاب ها ،مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل،با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی مقایسه شده و نتیجه گیری های لازم به عمل آمده است.

کلمات کلیدی : تحلیل بار جانبی افزاینده ، اثر مودهای بالاتر ،قاب های نامنظم جرمی در ارتفاع، تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی

« **فهرست مطالب** »

فصل اول : مقدمه..... ۱

مقدمه..... ۲

۱-۱- ساختار پایان نامه..... ۵

۱-۲- روش های معمول طراحی سازه ونقاط ضعف آنها..... ۶

۱-۳- طراحی بر اساس عملکرد..... ۹

۱-۳-۱- سطوح عملکرد ۱۱

۱-۳-۱-۱- سطوح عملکرد سازه ای ۱۱

۱-۳-۱-۲- سطوح عملکرد غیر سازه ای ۱۳

۱-۴- آنالیز استاتیکی غیرخطی ۱۴

۱-۵- ارزیابی روش های آنالیز استاتیکی غیرخطی ۱۹

۱-۵-۱- ارزیابی واصلاح روش ضریب جابجایی ۲۰

۱-۵-۱-۱- ضریب C_1 ..... ۲۰

۱-۵-۱-۲- ضریب C_2 ..... ۲۵

۱-۵-۱-۳- ضریب C_3 ..... ۲۸

۱-۶- آنالیز تاریخچه زمانی غیر خطی ۳۱

فصل دوم : معایب روش آنالیز استاتیکی غیر خطی و اثر مودهای بالاتر.....۳۶

مقدمه ۳۷

۲-۱- معایب روش آنالیز استاتیکی غیر خطی ۳۸

۲-۲- اثر مودهای بالاتر ۴۳

۲-۳- نتیجه گیری ۵۹

فصل سوم : روش آنالیز بار جانبی افزاینده چند مودی وجزئیات مدل سازی ۶۰

مقدمه ۶۱

۳-۱- روش آنالیز Pushover چند مودی ۶۲

۳-۲- روش آنالیز Pushover چند مودی اصلاح شده ۶۸

۳-۲-۱- آنالیز طیف پاسخ مودال.....۶۹

۳-۳- مدل سازی ومحاسبات ۷۰

۳-۳-۱- معرفی مدل ها ۷۰

۳-۳-۲- خصوصیات دینامیکی مدل ها ۷۲

۳-۴- جزئیات مدل سازی ۸۳

۳-۴-۱- مدل سازی المان های قاب مهاربندی ۸۳

۳-۴-۱-۱- مدل سازی تیر های الاستیک ۸۳

۳-۴-۱-۲- مدل سازی ستون ها در قاب ساده ۸۴

۳-۴-۱-۳- مدل سازی مهاربند ها ۸۵

۳-۵- شتابنگاشت های مورد استفاده درآنالیز NLTH ۸۷

فصل چهارم : نتایج آنالیزها ۹۴

مقدمه ۹۵

۴-۱- آنالیز بار جانبی چند مودی ۹۵

۴-۱-۱ - الگوی بار جانبی ۹۵

۴-۱-۲- منحنی ظرفیت سازه ها ۱۰۰

۴-۱-۳- نمایش دو خطی معادل ۱۰۶

۴-۱-۴- محاسبه تغییر مکان هدف ۱۰۸

۴-۲- ارزیابی پارامتر های کلی ۱۱۴

۴-۲-۱- تغییر مکان ۱۱۴

۴-۲-۲- نسبت گریز بین طبقه ای ۱۲۴

۴-۲-۳- برش طبقات ۱۳۲

فصل پنجم : نتیجه گیری ۱۴۳

۵-۱- جمع بندی نتایج ۱۴۴

۵-۲- پیشنهادات برای ادامهٔ کار ۱۴۷

فهرست مراجع ۱۴۹

پیوست الف ۱۵۲

« فهرست جداول»

جدول ۱-۱- ضرایب موجود در دستورالعمل FEMA356 وضرایب اصلاح شده آن در FEMA440 ..... ۳۰

جدول ۳-۱- تیر ورق های ساخته شده از ورق های استاندارد..... ۷۱

جدول ۳-۲- مشخصات قاب های 11IR2M , 11IR2B, 11R2..... ۷۵

جدول۳-۳- مشخصات قاب های 11IR2T ۷۵

جدول ۳-۴- مشخصات قاب های 11IR3M, 11IR3B, 11R3 ..... ۷۶

جدول ۳-۵- مشخصات قاب های 11IR3T ۷۶

جدول ۳-۶- مشخصات قاب های 13IR2M, 13IR2B, 13R2 ..... ۷۷

جدول ۳-۷- مشخصات قاب 13IR2T ۷۷

جدول ۳-۸- مشخصات قاب های 13IR3M, 13IR3B, 13R..... ۷۸

جدول ۳-۹- مشخصات قاب 13IR3T ۷۸

جدول ۳-۱۰- خصوصیات دینامیکی مدل 11R3 ..... ۷۹

جدول ۳-۱۱- خصوصیات دینامیکی مدل 11IR3B ۷۹

جدول ۳-۱۲- خصوصیات دینامیکی مدل 11IR3M ۷۹

جدول ۳-۱۳- خصوصیات دینامیکی مدل 11IR3T ۷۹

جدول ۳-۱۴- خصوصیات دینامیکی مدل 13R2..... ۸۰

جدول ۳-۱۵- خصوصیات دینامیکی مدل 13IR2B ۸۰

جدول ۳-۱۶- خصوصیات دینامیکی مدل 13IR2M ۸۰

جدول ۳-۱۷- خصوصیات دینامیکی مدل 13IR2T ۸۰

جدول ۳-۱۸- لیست شتابنگاشت های مورد استفاده در روش NLTH ۹۰

جدول ۴-۱ مقادیر تغییر مکان هدف در قاب های۵ طبقه با ضریب جرمی ۳..... ۱۰۹

جدول ۴-۲ مقادیر تغییر مکان هدف در قاب های۷ طبقه با ضریب جرمی۲ ..... ۱۱۰

جدول ۴-۳- مقادیر تغییر مکان هدف در قاب های ۹ طبقه با ضریب جرمی ۳..... ۱۱۱

جدول ۴-۴- مقادیر تغییر مکان هدف در قاب های۱۱ طبقه با ضریب جرمی ۳..... ۱۱۲

جدول ۴-۵- مقادیر تغییر مکان هدف در قاب های۱۳ طبقه با ضریب جرمی ۲..... ۱۱۳

جدول الف-۱- مشخصات قاب های 5R2، 5IR2B ، 5IR2M ۱۵۳

جدول الف-۲- مشخصات قاب های 5IR2T ۱۵۴

جدول الف-۳- مشخصات قاب های 5R3، 5IR3B ، 5IR3M ۱۵۴

جدول الف-۴- مشخصات قاب های 5IR3T ۱۵۴

جدول الف-۵- مشخصات قاب های 7IR2M , 7IR2B, 7R2 ..... ۱۵۵

جدول الف-۶- مشخصات قاب های7IR2T ۱۵۵

جدول الف-۷- مشخصات قاب های 7IR3M , 7IR3B, 7R3 ..... ۱۵۶

جدول الف-۸- مشخصات قاب های7IR3T ۱۵۶

جدول الف-۹- مشخصات قاب های 9IR2M , 9IR2B, 9R2 ..... ۱۵۷

جدول الف-۱۰- مشخصات قاب 9IR2T ۱۵۷

جدول الف-۱۱- مشخصات قاب های 9IR3M , 9IR3B, 9R 3 ..... ۱۵۸

جدول الف-۱۲- مشخصات قاب 9IR3T ۱۵۸

«فهرست اشکال »

شکل ۱-۱- منحنی های نیرو درمقابل تغییر شکل برای مولفه های پاسخ ۸

شکل ۱-۲- عملکرد و نیاز تغییرشکل سازه ای برای سازه شکل پذیر ۱۲

شکل ۱-۳- عملکرد و نیاز تغییرشکل سازه ای برای سازه غیر شکل پذیر ۱۳

شکل ۱-۴- منحنی مقاومت جانبی سازه درترازهای مختلف تغییر شکل ۱۵

شکل ۱-۵- گامهای روش آنالیز استاتیکی غیر خطی ۱۶

شکل ۱-۶ - مقایسه ضریب C_1 در دستورالعمل FEMA 356 با وبدون محدودیت اعمال شده ۲۱

شکل ۱-۷- مقایسه ضریب C_1 برای مدل الاستو پلاستیک تحت رکورد زلزله در سایتC ۲۳

شکل ۱-۸- انواع کاهش مقاومت.....۲۶

شکل ۱-۹-پارامترهای لازم برای تعیین محدودیت روی مقاومت ۲۹

شکل ۲-۱- مفصل های پلاستیک ایجاد شده در ساختمان تحت الگوی بار مختلف :a)الگوی بار FEMA 356 ومود اول b)الگوی بار مود دوم c)الگوی بار مود سوم.....۴۸

شکل ۲-۲- منحنی Pushover مودهای اول تا سوم قاب خمشی فولادی سه طبقه ۵۲

شکل ۳-۱- مدل های ۵ ,۷, ۹, ۱۱و ۱۳ طبقه منظم ونامنظم ۷۴

شکل ۳-۲- نمایش اشکال مودی قاب های ۱۱ طبقه با ضریب جرمی۳ .....۸۱

شکل ۳-۳- نمایش اشکال مودی قاب های ۱۳ طبقه با ضریب جرمی۳.....۸۲

شکل ۳-۴- نمودار بار - جابجایی برای مهاربندها بر اساس FEMA 356 .....۸۶

شکل ۳-۵- طیف پاسخ طراحی آیین نامه ۲۸۰۰ .....۸۷

شکل ۳-۶- طیف پاسخ طراحی برای خاک نوع Π مورد استفاده در پایان نامه ۸۸

شکل ۳-۷- نمایش طیف های پاسخ ۱۰ شتابنگاشت انتخابی وطیف میانگین آنها ۹۲

شکل ۳-۸- نمایش میانگین طیف های پاسخ شتاب ۱۰ شتابنگاشت انتخابی وطیف پاسخ نهایی وطیف طرح ۹۳

شکل۴-۱- توزیع بار جانبی در آنالیز Pushover مود اول و دوم و سوم قاب 9R3 .....۹۶

شکل۴-۲- توزیع بار جانبی در آنالیز Pushover مود اول و دوم و سوم قاب9IR3B ۹۷

شکل۴-۳- توزیع بار جانبی در آنالیز Pushover مود اول و دوم و سوم قاب9IR3M ۹۸

شکل۴-۴- توزیع بار جانبی در آنالیز Pushover مود اول و دوم و سوم قاب9IR3T ۹۹

شکل ۴-۵- منحنی ظرفیت قاب11R3 در مودهای اول تا سوم ۱۰۲

شکل ۴-۶- منحنی ظرفیت قاب 11IR3B در مودهای اول تا سوم ۱۰۲

شکل ۴-۷- منحنی ظرفیت قاب 11IR3M در مودهای اول تا سوم ۱۰۳

شکل ۴-۸- منحنی ظرفیت قاب 11IR3T در مودهای اول تا سوم ۱۰۳

شکل ۴-۹- منحنی ظرفیت قاب 13R2 در مودهای اول تا سوم ۱۰۴

شکل ۴-۱۰- منحنی ظرفیت قاب 13IR2B در مودهای اول تا سوم ۱۰۴

شکل ۴-۱۱- منحنی ظرفیت قاب 13IR2M در مودهای اول تا سوم ۱۰۵

شکل ۴-۱۲- منحنی ظرفیت قاب 13IR2T در مودهای اول تا سوم ۱۰۵

شکل ۴-۱۳- نمایش دو خطی منحنی ظرفیت قاب 11R3B در مود اول ۱۰۶

شکل ۴-۱۴- نمایش دو خطی منحنی ظرفیت قاب 11R3B در مود دوم ۱۰۷

شکل ۴-۱۵- نمایش دو خطی منحنی ظرفیت قاب 11R3B در مود سوم ۱۰۷

شکل ۴-۱۶- تغییر مکان حداکثر قاب های ۵ طبقه با ضریب جرمی ۲ .....۱۱۶

شکل ۴-۱۷- تغییر مکان حداکثر قاب های ۵ طبقه با ضریب جرمی ۳ ..... ۱۱۷
شکل ۴-۱۸- تغییر مکان حداکثر قاب های ۹ طبقه با ضریب جرمی ۲ ..... ۱۱۸
شکل ۴-۱۹- تغییر مکان حداکثر قاب های ۹ طبقه با ضریب جرمی۳ ..... ۱۱۹
شکل ۴-۲۰- تغییر مکان حداکثر قاب های ۱۳ طبقه با ضریب جرمی۲ ..... ۱۲۰
شکل ۴-۲۱- تغییر مکان حداکثر قاب های ۱۳ طبقه با ضریب جرمی۳ ..... ۱۲۱
شکل ۴-۲۲- مقایسه تغییر مکان حداکثر قاب های ۵ طبقه با ضریب جرمی ۲ بر اساس ضوابط FEMA440 و FEMA 356 ..... ۱۲۲
شکل ۴-۲۳- مقایسه تغییر مکان حداکثر قاب های ۵ طبقه با ضریب جرمی ۳ بر اساس ضوابط FEMA440 و FEMA 356 ..... ۱۲۳
شکل ۴-۲۴-گریز درون طبقه ای حداکثر قاب های ۵ طبقه با ضریب جرمی۲ ..... ۱۲۶
شکل ۴-۲۵-گریز درون طبقه ای حداکثر قاب های ۵ طبقه با ضریب جرمی۳ ..... ۱۲۷
شکل ۴-۲۶-گریز درون طبقه ای حداکثر قاب های۹ طبقه با ضریب جرمی۲ ..... ۱۲۸
شکل ۴-۲۷-گریز درون طبقه ای حداکثر قاب های۹ طبقه با ضریب جرمی۳ ..... ۱۲۹
شکل ۴-۲۸-گریز درون طبقه ای حداکثر قاب های۱۳طبقه با ضریب جرمی۲ ..... ۱۳۰
شکل ۴-۲۹-گریز درون طبقه ای حداکثر قاب های۱۳طبقه با ضریب جرمی۳ ..... ۱۳۱
شکل ۴-۳۰- برش حداکثر طبقات قاب ۵ طبقه با ضریب جرمی۲ ..... ۱۳۴
شکل ۴-۳۱- برش حداکثر طبقات قاب ۵ طبقه با ضریب جرمی۳ ..... ۱۳۵
شکل ۴-۳۲- برش حداکثر طبقات قاب۹ طبقه با ضریب جرمی۲ ..... ۱۳۶
شکل ۴-۳۳- برش حداکثر طبقات قاب ۹ طبقه با ضریب جرمی۳ ..... ۱۳۷

شکل ۴-۳۴- برش حداکثر طبقات قاب ۱۳ طبقه با ضریب جرمی۲ .....۱۳۸

شکل ۴-۳۵- برش حداکثر طبقات قاب ۱۳ طبقه با ضریب جرمی۳ .....۱۳۹

شکل ۴-۳۶- نمودار برش طبقات برای قاب های ۵ طبقه با ضریب جرم ۲ و۳ بـا دو روشNLTH و MMPA ۱۴۰

شکل ۴-۳۷- نمودار برش طبقات برای قاب های ۹ طبقه با ضریب جرم ۲ و۳ بـا دو روشNLTH و MMPA ۱۴۱

شکل ۴-۳۸- نمودار برش طبقات برای قاب های ۱۳ طبقه با ضریب جرم ۲ و۳ بـا دو روشNLTH و MMPA ۱۴۲

شکل الف-۱- منحنی ظرفیت قاب 7R2 در مودهای اول تا سوم.....۱۵۹

شکل الف-۲- منحنی ظرفیت قاب 7IR2B در مودهای اول تا سوم ۱۵۹

شکل الف-۳- منحنی ظرفیت قاب 7IR2M در مودهای اول تا سوم ۱۶۰

شکل الف-۴- منحنی ظرفیت قاب 7IR2T در مودهای اول تا سوم ۱۶۰

شکل الف-۵- منحنی ظرفیت قاب 9R3 در مودهای اول تا سوم ۱۶۱

شکل الف-۶- منحنی ظرفیت قاب 9R3B در مودهای اول تا سوم ۱۶۱

شکل الف-۷- منحنی ظرفیت قاب 9R3M در مودهای اول تا سوم ۱۶۲

شکل الف-۸- منحنی ظرفیت قاب 9R3T در مودهای اول تا سوم ۱۶۲

شکل الف-۹- تغییر مکان حداکثر قاب های ۷ طبقه با ضریب جرمی ۲ .....۱۶۳

شکل الف-۱۰- تغییر مکان حداکثر قاب های ۷ طبقه با ضریب جرمی ۳ .....۱۶۴

شکل الف-۱۱- تغییر مکان حداکثر قاب های ۱۱ طبقه با ضریب جرمی ۲ .....۱۶۵

شکل الف-۱۲- تغییر مکان حداکثر قاب های ۱۱ طبقه با ضریب جرمی ۳ ..... ۱۶۶

شکل الف -۱۳-گریز درون طبقه ای حداکثر قاب های ۷ طبقه با ضریب جرمی۲ ..... ۱۶۷

شکل الف -۱۴-گریز درون طبقه ای حداکثر قاب های ۷ طبقه با ضریب جرمی۳ ..... ۱۶۸

شکل الف -۱۵-گریز درون طبقه ای حداکثر قاب های ۱۱ طبقه با ضریب جرمی۲ ..... ۱۶۹

شکل الف -۱۶-گریز درون طبقه ای حداکثر قاب های ۱۱ طبقه با ضریب جرمی۳ ..... ۱۷۰

شکل الف-۱۷- برش حداکثر طبقات قاب ۷ طبقه با ضریب جرمی۲ ..... ۱۷۱

شکل الف-۱۸- برش حداکثر طبقات قاب ۷ طبقه با ضریب جرمی۳ ..... ۱۷۲

شکل الف-۱۹- برش حداکثر طبقات قاب ۱۱ طبقه با ضریب جرمی۲ ..... ۱۷۳

شکل الف-۲۰- برش حداکثر طبقات قاب ۱۱ طبقه با ضریب جرمی ۳ ..... ۱۷۴

فصل اول

مقدمه

مقدمه

پاسخ سازه را در هنگام وقوع زلزله به دلیل پیچیدگی پارامترهای حرکت زمین و خواص سازه، نمی‌توان به دقت پیش‌بینی کرد. در سالهای اخیر تلاش‌های زیادی به منظور ارزیابی رفتار سازه‌های موجود، در برابر نیروهای ناشی از زلزله انجام شده است. روشی که در اکثر آیین‌نامه‌های ساختمانی موجود مورد استفاده قرار گرفته، بر پایه معیار مقاومت و رفتار الاستیک خطی سازه‌ها می‌باشد. در حالی که مطالعات صورت گرفته در سال‌های اخیر نشان می‌دهند به منظور پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای واقعی ساختمان در مقابل تحریک‌های لرزه‌ای، باید خصوصیات غیرالاستیک رفتار سازه‌ای در نظر گرفته شود. بنابر مطالعات اخیر، در سازه‌هایی که تحت اثر زمین‌لرزه قرار دارند، تغییرمکان ها نسبت به نیروها توصیف بهتری از پاسخ سازه ارائه می‌دهند و با محدود کردن تغییرمکان ها به جای نیروها، میزان خرابی، که مستقیماً به تغییرمکان ها مربوط می‌شود، به طور مؤثرتری کنترل می‌شود. در حال حاضر منطقی‌ترین روش ارزیابی و تقویت سازه‌های موجود و طراحی سازه‌های جدید روشهای آنالیز لرزه‌ای غیرالاستیک می‌باشند [۱]. اهمیت این روش ها با توسعهٔ مهندسی بر پایه عملکرد (PBE)، به عنوان روشی برای طراحی و ارزیابی لرزه‌ای، افزایش یافته است. هدف از کاربرد این روشها، پیش‌بینی رفتار سازه در زلزله های آینده می‌باشد.

تفاوت روشهای مختلف آنالیز غیرالاستیک در فرضیات بکار رفته در مدل‌سازی سیستم سازه‌ای و نحوهٔ بیان خصوصیات زمین لرزه می‌باشد. انتخاب هر یک از روشهای آنالیز غیرالاستیک، به هدف آنالیز، هدف عملکردی موردنظر، سطح عدم قطعیت قابل قبول، در دسترس بودن منابع و اطمینان از داده‌های موجود بستگی دارد [۲].

به طور کلی، دو روش آنالیز لرزه‌ای غیرالاستیک برای تخمین پاسخ لرزه‌ای و ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه وجود دارد. یکی از آنها روش آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی سازه تحت رکوردهای زلزله ویژهٔ ساختگاه می‌باشد. هرچند این روش دقیق ترین و صحیح‌ترین روش آنالیز لرزه‌ای سازه می‌باشد، اما به علت لزوم در نظر گرفتن تعداد زیادی آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی با رکوردهای سازگار با طیف، به دلیل پراکندگی نتایج بدست آمده از هر رکورد زلزله و از آنجا که انجام چنین محاسباتی، نسبت به پارامترهای حرکت زمین و مدل غیرخطی سازه بسیار حساس می‌باشد، این روش پیچیده، غیراقتصادی و زمان‌بر خواهد شد. در حال حاضر انجام این گونه آنالیزها فقط برای انجام کارهای تحقیقاتی و یا طراحی سازه‌های خاص مناسب می‌باشد.

روش دیگری که برای تخمین پاسخ لرزه‌ای سازه وجود دارد و در حال حاضر منطقی‌ترین روش برای آنالیز و ارزیابی عملکرد سازه در کاربرد های عملی است، روش های آنالیز استاتیکی غیرخطی (Pushover) می‌باشند. این روش آنالیز، روش ساده شده‌ای برای تخمین پاسخ غیرخطی سازه در ترازهای مختلف تغییر مکان جانبی، از پاسخ الاستیک اولیه تا مکانیزم گسیختگی و شروع خرابی می‌باشد [۳]. در این روش ها ، ارزیابی پاسخ حداکثر مورد انتظار در مدل چند درجه آزادی ، به ارزیابی این پاسخ در یک سیستم یک درجه آزادی معادل تبدیل می‌شود . متداول ترین روش های استاتیکی غیرخطی، روش ضریب جابجایی[1] و روش طیف ظرفیت[2] می‌باشند که به ترتیب در FEMA356 [٤] و ATC-40 [٥] مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در هر دو روش از خطی سازی معادل و ضرایب اصلاح تغییر مکان استفاده می‌شود. طبق تحقیقات به عمل آمده در آمریکا توسط

[1]-Displacement Coefficient Method
[2]-Capacity Spectrum Method

کمیتهATC[3]، نشان داده شده است که در عمل، دو روش طیف ظرفیت و ضریب جابجایی برای یک سازهٔ واحد و برای یک زلزله واحد به دو تخمین کاملاً متفاوت از تغییر مکان حداکثر منجر می‌شوند. به این منظور راهکارهایی برای اصلاح هر دو روش در دستورالعمل FEMA440 پیشنهاد شده است که منجر به نزدیک شدن جواب های دو روش شده است.

در آنالیز Pushover ، توزیع نیرو و تعیین تغییرمکان هدف بر این دو فرض استوار است که پاسخ سازه به وسیلهٔ مود اصلی ارتعاشی ساختمان کنترل می‌شود و دوم اینکه اشکال مودی پس از تسلیم سازه بدون تغییر باقی می ماند. اما در سازه‌هایی که تحت تأثیر مودهای ارتعاشی به غیر از مود اصلی ارتعاشی خود قرار دارند، همانند سازه‌های بلند و یا ساختمان‌ها با طبقه ضعیف، و یا ساختمان‌های نامتقارن در پلان که در آنها پیچش اتفاق می‌افتد و یا ساختمان‌های نامنظم در ارتفاع، نمی‌توان به صحت نتایج روش‌های رایج آنالیز بار جانبی افزاینده که در آنها آنالیز، با فرض کنترل سازه توسط مود اصلی ارتعاشی صورت می‌گیرد اطمینان کرد. هیچکدام از الگوهای بار منفرد[4] اثر مودهای بالاتر را در پاسخ سازه در نظر نمی‌گیرند، بنابراین برای رفع این مشکل، استفاده از بردارهای بار چندگانه پیشنهاد شده است.

بنابراین مطالعات اخیر در این زمینه، بر گسترش روش بار جانبی افزاینده به سازه‌هایی که در آنها اثر مودهای بالاتر مهم است، متمرکز شده است. به این منظور روش جدید آنالیز بار جانبی افزاینده چند مودی (MPA) ارائه شده است که در آن اثر مشارکت تمام مودهای ارتعاشی، که در نیازهای لرزه‌ای سازه مهم می‌باشند، در پاسخ سازه در نظر گرفته می‌شود.

[1]-Applied Technology Council
[2]-Single Load Vector