دانشگاه شهید باهنر کرمان

به نام خدا

پروژه درس طراحی سازه ها در برابر زلزله

آشنایی با مفاهیم تحلیل های غیر خطی

«استاتیکی و دینامیکی»

دانشجو:

مجتبی اصغری سرخی - ۸۷۵۶۳۰۲۸

Mojtaba808@yahoo.com

استاد راهنما:

دکتر سعید شجاعی باغینی

زمستان ۸۸

فهرست مطالب:

۱-مقدمه

۲-تحلیل های خطی

۳- تحلیل های غیر خطی

۴-تحلیل های دینامیکی غیر خطی NDA

- ۴-۱-دینامیکی طیفی غیر خطیRSA
- ۴-۲-دینامیکی افزایشی IDA
- ۴-۳-دینامیکی تاریخچه زمانی RHA

۵-تحلیل استاتیکی غیر خطی (پوش اور) NSP

- ۵-۱-روش استاتیکی غیر خطی در Fema ۲۷۳
- ۵-۲-الگوی بار جانبی طبق نشریه ۳۶۰
- ۵-۳-معایب تحلیل پوش اور
- ۵-۴-روش های برطرف نمودن نقاط ضعف تحلیل پوش اور

۶-تحلیل پوش اور مودالMPA

- ۶-۱- مزایای تحلیل پوش اور مودال
- ۶-۲- نقاط ضعف تحلیل پوش اور مودال و روش های برطرف نمودن آن
- ۶-۲-۱ -روش پوش اور مودال بهبود یافته Improved MPA
- ۶-۲-۲-روش پوش اور مودال بهنگام شونده Adaptive MPA
- ۶-۲-۳- بهینه کردن روش مودال پوش اور با درنظر گرفتن مفاهیم انرژی

۷-مراجع

۱- مقدمه

عملکرد صحیح لرزه ای یک سازه مستلزم آن است که مقاومت قابل دسترسی و ظرفیت های تغییر شکل اعضا بیش از نیازهای تحمیل شده به سازه بر اثر زمین لرزه باشد. باتوجه به رفتار سازه در زمان وقوع زمین لرزه، ارزیابی عملکرد دقیق آن باید توسط تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی و با استفاده از زمین لرزه های منتخب صورت گیرد.با ورود سازه به حیطه رفتار غیر خطی تحت اثر زلزله، جابجایی ها نسبت به نیروها توصیف بهتری از پاسخ سازه ارائه داده و با محدود کردن تغییر مکانها به جای نیروها، سطح تخریب سازه به طرز موثرتری کنترل می شود.

تغییر نگرش از طراحی بر اساس نیرو به سمت طراحی بر مبنای رفتار و عملکرد سازه، روش جدیدی را در زمینه طراحی به وجود اورده است که اصطلاحا طراحی بر اساس عملکرد[1] نامیده میشود. طراحی بر اساس عملکرد بر مبنای طراحی درحالات حدی می باشد. برای دستیابی به ظرفیت سازه در آن سوی محدوده الاستیک احتیاج به استفاده از تحلیل های غیر خطی میباشد.

تخمین نیازهای لرزه‌ای در سطوح عملکردی پائین مانند ایمنی جانی و جلوگیری از خرابی کلیه سازه، نیازمند ملاحظات گسترده رفتار غیر الاستیک سازه است.

در این پروژه پس از بررسی انواع تحلیل های خطی و غیر خطی و تعیین نقاط ضعف و قوت هر کدام از روش های تحلیل ، روش های پیشرفته آنالیز استاتیکی غیر خطی مورد بررسی قرار می گیرد.

[1] -Performance Base Seismic Design

۲- تحلیل های خطی

- منظور از تحلیل خطی، تحلیل سازه با در نظر گر فتن رفتار ارتجاعی خطی برای اجـزاء آن می باشد .

- بطور کلی روشهای تحلیل خطی هنگامی مناسب هستند که هنگام زلزله رفتار اجزاء سـازه در محدوده خطی قرار داشته باشد و یا تعداد کمی از اجزاء از حـد خطـی خـارج شـوند . چنانچه نسبت نیروهای ناشی از زلزله به ظرفیـت بـاربری اجـزاء کـوچکتر از ۲ باشـد اثـر رفتارغیرخطی قابل توجه نبوده و می توان ازروشهای تحلیل خطی استفاده نمود.

- در تحلیل خطی فقط اعضای اصلی مدل می شـوند و اعضـای غیراصـلی فقـط بـرای تغییـر شکلهای حاصل ازتحلیل کنترل می شوند، زیرا اعضـای غیراصـلی معمـولاً تحـت بارهـای رفت و برگشتی کاهش سختی و مقاومت قابـل تـوجهی خواهنـد داشـت و بـه سـرعت از سیستم باربری جانبی خارج می گردند .

- روشهای تحلیل خطی با فرض ایجاد مفصل خمیری در نقاط انتهایی اعضا تنظیم شـده انـد به گونه ای که اگر در مدلی مفصل خمیـری درنقطـه ای غیـر از دو انتهـا (نقـاط میـا نـی) ایجاد شود نتایج حاصل از تحلیل خطی درجهت اطمینان نخواهد بـود لـذا پـس از تحلیـل خطی برای اعضای تحت بارهای ثقلی قابل توجه، دیاگرام لنگر خمشی باید ترسـیم شـود، تا با استفاده از آن احتمال ایجاد مفصل خمیری در طول عضو بررسی شود.

- چنانچه P-Δ یا ترک خوردگی اجزاء بتنی یا بنـایی مـد نظـر باشـد ایـن آثـار در تحلیـل خطی به صورت ساده شده وارد می گردد .مثلاً اثـر P-Δ در تحلیـل اسـتاتیکی خطـی بـه صورت اضافه بار جانبی و اثر ترک خوردگی صرفاً با کاهش مشخصات مقاطع اعضاء در مدل وارد می شود .

الف) تحلیل استاتیکی خطی:

- روشهای تحلیل استاتیکی هنگامی مناسب هستند که پاسخ سازه هنگام زلزله عمدتاً ناشی از ارتعاش در مود اول باشد یابه عبارت دیگر اثر مودهای بالاتر قابل توجه نباشد . هنگامی اثر مودهای بالاتر از مود اول قابل توجه نیست که ساختمان کوتاه و منظم باشد لذا برای ساختمانهای بلند و ساختمانهای نامنظم لازم است از روشهای تحلیل دینامیکی استفاده شود.

- روش تحلیل استاتیکی خطی بر مبنای دو فرض اساسی زیر استوار است :

۱- رفتار مصالح خطی است؛

۲- علیرغم آن که نیروهای ناشی از زلزله دینامیکی است ، اثر آن بر روی سازه با اعمال بار معادل استاتیکی برآورد می گردد وکل نیروی وارده به سازه برابر ضریبی از وزن ساختمان محاسبه می گردد .

- در روش تحلیل استاتیکی خطی کل نیروی جانبی ناشی از زلزله به صورت ضریبی از جرم ساختمان محاسبه می شود . این ضریب، همان شتاب طیفی ارتجاعی است . اگر نیروی جانبی بدست آمده از این طریق به سازه اعمال شود و رفتار سازه ارتجاعی خطی فرض شود، تغییر شکلهای حاصل ، با آن چه که در زلزله طرح انتظار می رود برابر خواهد بود . اما در سازه های شکل پذیر رفتارسازه هنگام زلزله از محدودهٔ ارتجاعی خطی خارج می شود

- مقدار برش پایه در این روش چنان انتخاب شده است که حداکثر تغییرشکل سازه با آنچه که در زلزله ی سطح خطر موردنظر پیش بینی می شود مطابقت داشته باشد . چنانچه تحت اثر بار واردشده ، سازه به طور خطی رفتار کند، نیروهای به دست آمده برای اعضای سازه نیز نزدیک به مقادیر پیش بینی شده هنگام زلزله خواهند بود؛ ولی اگر سازه رفتار غیرخطی داشته باشد، نیروهای محاسبه شده از این طریق بیش از مقادیر حد جاری شدن

مصالح خواهند شد. به همین جهت هنگام بررسی معیارهای پذیرش نتایج حاصل از تحلیل خطی برای سازه هایی که هنگام زلزله رفتار غیرخطی دارند، اصلاح میشود .

- در روش استاتیکی معادل تنها شتاب مبنای طرح PGA در استخراج روابط مدنظر قرار می گیرد و دیگر خصوصیات تحریک از قبیل محتوای فرکانسی ، زاویه فازی ، مدت زمان اثر زلزله و نیز اثرات مد های بالاتر و نیز اضمحلال مصالح در این روش لحاظ نمی گردد.

ب) تحلیل دینامیکی خطی:

- در روش تحلیل دینامیکی خطی نیروها و تغییر شکلهای ناشی از زلزله با استفاده از روابط تعادل دینامیکی حاکم بر مدل ارتجاعی سازه تعیین می شود.

- از آنجا که در این روش مشخصات دینامیکی سازه در تحلیل وارد می گردد، نتایج حاصل دقیق تر از روش تحلیل استاتیکی خطی است اما به هرحال رفتار غیرخطی مصالح مدل منظور نمی شود .

تحلیل دینامیکی خطی می تواند به دو روش طیفی و روش تاریخچه زمانی انجام شود .

- در روش طیفی ، طیف مورد استفاده باید طیف ارتجاعی خطی بدون اصلاح برای تغییر شکلهای غیر خطی باشد. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی خطی برای سازه هایی که رفتار آنها در طول زلزله خطی باقی می ماند نزدیک به واقعیت است.

- در تحلیل تاریخچه زمانی، پاسخ سازه با استفاده از روابط دینامیکی در گام های زمانی کوتاه محاسبه می شود . در این روش بایدپاسخ مدل سازه تحت تحریک شتاب زمین براساس حداقل سه شتاب نگاشت محاسبه شود.

- فرضیات خاص این روش در محدود ه ی رفتارخطی عبارتند از:

۱ رفتار سازه را می توان به صورت ترکیب خطی از حالت های مودهای ارتعاشی مختلف

سازه که مستقل از یکدیگرند محاسبه نمود.

۲ زمان تناوب ارتعاشات سازه در هر مود در طول زلزله ثابت است.

- تحلیل خطی شبه دینامیکی یا طیفی :

روش دینامیکی تاریخچه زمانی برای تعیین تغییر مکانها و نیروهای ناشی از زلزله در سازها پر زحمت و وقت گیر است و معمولاً باید به وسیله حسابگرهای الکترونیک صورت گیرد . اگر به جای تاریخچه تغییر مکان، فقط مقادیر ماکزیمم ناشی از مودهای مختلف در گرفته شود تحلیل دینامیکی سازه ها به مقدار قابل ملاحظه ای ساده می شود .

چون ماکزیمم های مودهای مختلف در یک زمان اتفاق نمی افتد و همچنین لزوماً علامت یکسان ندارند نمی توان مقادیر ماکزیمم ها را با یکدیگر جمع نمود . بهترین کاری که در یک تحلیل شبه دینامیکی یا طیفی می توان انجام داد این است که جوابهای ماکزیمم بدست آمده از مودهای مختلف را بر اساس تئوری احتمالات ترکیب نمود . فرمولهای تقریبی مختلفی برای ترکیب کردن ماکزیمم ها بکار می رود که متداولترین آنها فرمول جذر مجموع مربعات می باشد .

بیشتر انرژی ناشی از زلزله در چند مود اول جذب می شود . از این رو برای سازه های با درجات آزادی خیلی زیاد معمولاً کافی است که ۳ تا ۶ مود اول با یکدیگر ترکیب شود و بدین ترتیب در محاسبات صرفه جویی قابل ملاحظه ای نمود .

در این روش تحلیل دینامیک با فرض رفتار الاستیک خطی سازه و با استفاده از حداکثر بازتاب کلیه مدهای نوسانی سازه که در بازتاب کل سازه اثر قابل توجهی دارند انجام می گیرد .

حداکثر بازتابهای دینامیکی سازه از قبیل نیروهای داخلی اعضا , تغییر مکانها , نیروهای طبقات , برشهای طبقات و عکس العمل پایه در هر مد را باید با روشهای آماری شناخته شده مانند روش جذر مجموع مربعاتSRSS و یا روش ترکیب مربعی کامل بازتابهای حداکثر هر مد CQC تعیین نمود . ترکیب اثرات حداکثر مدها در ساختمانهای نامنظم در پلان و یا در مواردی که زمانهای تناوب دو یا چند مد سازه با یکدیگر نزدیک باشند , باید صرفاً با روشهایی که اندرکنش مدهای ارتعاشی را در نظر می گیرد مانند روش ترکیب مربعی کامل انجام شود

معایب روش های دینامیکی طیفی:

- مبنای آنالیز مودال با توجه به مستقل بودن پریود های ارتعاشی صورت میگیرد و تحلیل طیفی تا زمانی عملکرد خوبی دارد که پریود ها به صورت مستقل در نظر گرفته می شوند.
- در سازه هایی که پتانسیل پیچش وجود داشته باشد(حرکت پیچشی همزمان با حرکت انتقالی در جهت x ، جهت y را هم تحت تاثیر خود قرار می دهد) باعث می گردد که فرض مستقل بودن پریود ها نقض شود.
- در روش طیفی اثر زمان لحاظ نمی شود لذا اثر پیچش نیز در ترکیب مد ها منظور نمی گردد.
- در این روش جرم ها به صورت متمرکز در نظر گرفته می شوند که برای سیستم برشی و المان های با جرم گسترده این روش قابل توجیه نمی باشد که اگر تحلیل با روش های اجزاء محدود انجام گیرد دچار خطا میگردد.

- تحلیل خطی دینامیکی تاریخچه زمانی :

روش تحلیل دینامیکی (محاسبه لحظه به لحظه بازتابهای ساختمان تحت تاثیر شتاب نگاشت های واقعی زلزله) را می توان در مورد کلیه ساختمانها به کار برد .

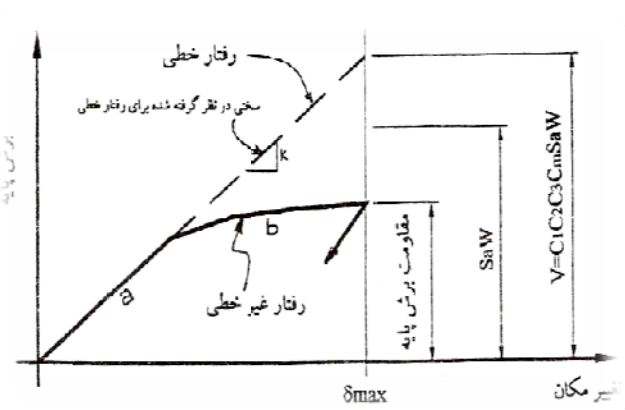
به طور کلی برای ساختمانهای کاملاً منظم و یا ساختمانهایی که در ارتفاع منظم هستند در صورتیکه از این روش استفاده شود می توان آنرا در دو امتداد متعامد ساختمان به طور جداگانه ای انجام داد ولی چنانچه ساختمان در پلان به حدی نامنظم باشد که نوسان آن در بعضی و یا تمام مدها عمدتاً به طور توام در دو امتداد متعامد انجام پذیرد یعنی ساختمان مدهای نوسانی داشته باشد که در آن مدها حرکت در یک امتداد توام با حرکت در امتداد عمود بر آن باشد برای ملحوظ نمودن اثرات این حرکات توام ساختمان باید بوسیله روش تحلیل دینامیکی و با استفاده از یک مدل سه بعدی محاسبه شود .

در این روش بازتابهای سازه در هر مقطع زمانی در مدت وقوع زلزله با تاثیر دادن شتابهای ناشی از حرکت زمین (شتابنگاشت) در تراز پایه ساختمان و انجام محاسبات دینامیکی مربوطه تعیین می گردد .

از این روش تحلیل می توان در تحلیل خطی الاستیک و یا تحلیل غیر خطی سازه های موجود استفاده نمود . مقایسه بین نتایج تحلیل الاستیک سازه با استفاده از طیف طرح استاندارد و یا طیف طرح ویژه ساختگاه یا آنچه از تحلیل تاریخچه زمانی خطی به دست می آید الزامی بوده و دلائل احتمالی بین آنها باید طی یک گزارش فنی جامع توجیه گردد .

۳- تحلیل های غیر خطی

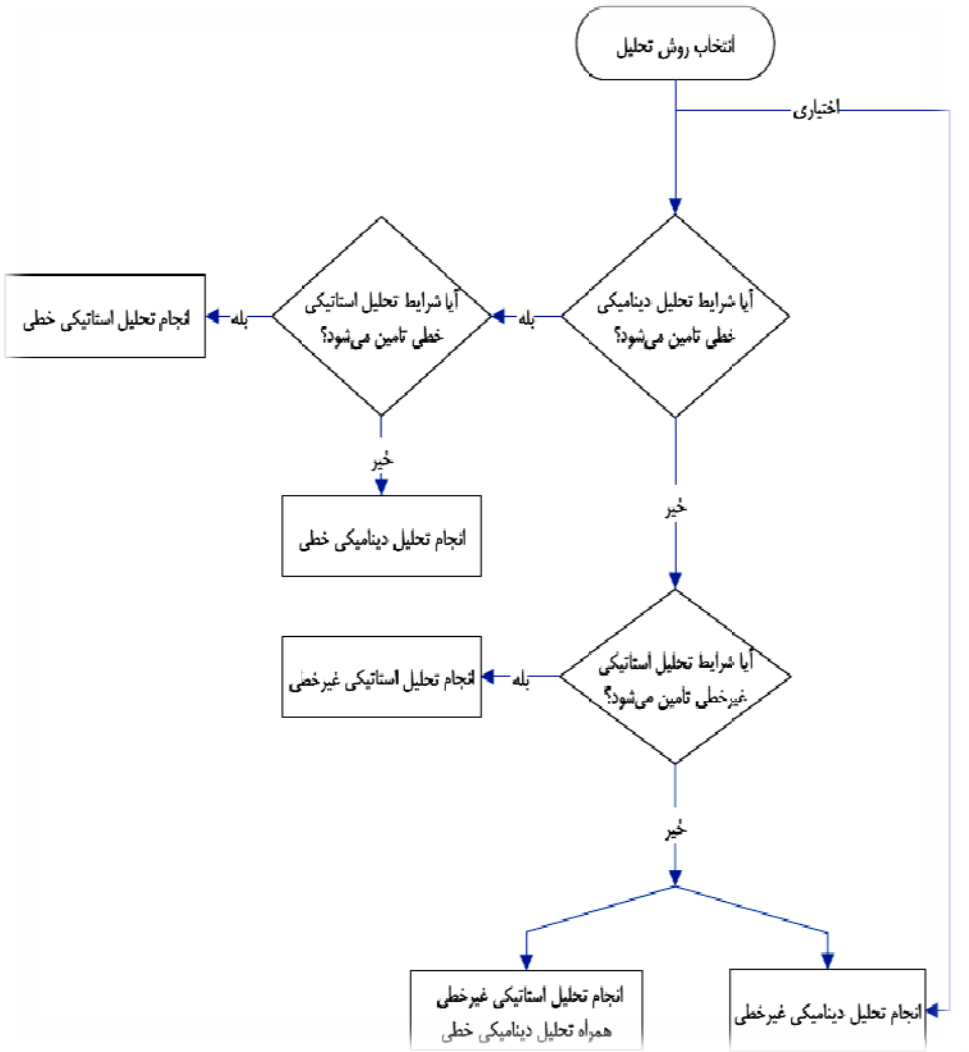
- منظور از تحلیل غیرخطی، تحلیل سازه با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی اجزاء آن به دلیل رفتار غیر خطی مصالح ، ترک خوردگی واثرات غیرخطی هندسی می باشد.
- در روشهای تحلیل غیر خطی مفصلهای خمیری در نقاط حداکثر لنگرهای ناشی از بارهای ثقلی پیش بینی شده و تحلیل مدل سازه بر این اساس انجام می شود. پس از تحلیل با استفاده از نتایج حاصل باید دیاگرام لنگر خمشی عضو مجدداً ترسیم شده و محل تشکیل مفصلهای خمیری کنترل شود . برای این منظور مشابه روشهای خطی ، دیاگرام لنگر از جمع دیاگرام لنگر بارهای ثقلی و لنگرحاصل از تحلیل تحت بار جانبی زلزله (برخلاف روشهای خطی که لنگر متناظر با ظرفیت مورد انتظار عضو در دو انتها قرار داده می شد) بدست می آید و باید با ظرفیت مورد انتظار از عضودر تمام طول مقایسه گردد . چنانچه موقعیت پیش بینی شده برای مفصل خمیری صحیح نباشد لازم است تحلیل سازه مجدداً و با اصلاح موقعیت مفصل خمیری انجام شود.
- شکل زیر اختلاف دو روش خطی و غیر خطی را نشان می دهد . خط منحنی رفتار واقعی مصالح یا رفتارجزئی از سازه و خط مستقیم رفتار خطی فرض شده را نشان می دهد. در محدودهٔ مشخص شده با حرف a اختلافی بین روش خطی و غیر خطی وجود ندارد b ، اما در محدودهٔ آن که تغییر شکلهای حاصل از تحلیل خطی مشابه تغییر شکلهای تحلیل غیر خطی بدست آیند لازم است نیروی جانبی افزایش داده شود.



به این ترتیب تغییر شکلها با دقت مطلوب محاسبه می گردند اما لازم است پیش از استفاده از نیروهای داخلی اعضا، برای کنترل یا طراحی، آن ها را به نحوی مناسب اصلاح نمود.

- در تحلیل غیر خطی تمام اعضای اصلی و غیراصلی مدل شده و اثر کاهش مقاومت وسختی اجزاء(کاهندگی)در مدل وارد می شود.

فلوچارت انتخاب روش تحلیل مطابق ضوابط نشریه ۳۶۰ بهسازی لرزه ای



٤- تحلیل های غیر خطی دینامیکی[۲] NDA

به طور کلی برای سیستم هایی که انتظار می رود رفتار غیر خطی داشته باشند نیروها و تغییر شکل ها را می توان با استفاده از تحلیل های زیر به دست آورد:

الف) تحلیل های دقیق ; به منظور تحلیل دقیق یک سازه می توان از روش تحلیل دینامیکی غیر خطی استفاده نمود که در این روش ابتدا مشخصات غیر خطی اعضای سازه تعریف شده و سپس با استفاده از شتاب نگاشت ها تحلیل مورد نظر صورت می پذیرد که این نوع تحلیل نیز می تواند به یکی از دو روش زیر انجام شود :

- تحلیل تاریخچه زمانی RHA - تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)

در روش تحلیل دقیق به هیچ وجه نمی توان از طیف های خطی و یا غیر خطی استفاده نمود ولی برای روش های غیر دقیق که رفتار غیر خطی سازه را نیز می توانند در نظر بگیرند می توان از روش های زیر استفاده نمود .

ب) تحلیل های ساده شده ، به عنوان مثال استفاده از طیف پاسخ غیر خطی ویا استاتیکی غیر خطی

ج) تحلیل های تقریبی (مانند روش استاتیکی معادل که با در نظر گرفتن ضریب رفتار می توان به صورت تقریبی اثر رفتار غیر خطی را وارد نمود)

۴-۱-آنالیز دینامیکی با استفاده از طیف پاسخ غیر خطی [۳] RSA

با استفاده از طیف پاسخ خطی، پاسخ سازه ها در محدوده خطی برآورد می شود ولی در زلزله های شدید چنین نبوده و سازه رفتاری غیر خطی از خود نشان می دهد. بنابراین می توان با استفاده از روش طیف پاسخ غیر خطی اولا رفتار غیر خطی سازه را در نظر گرفت و دوما از پیچیدگی های روش دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی (که جلوتر توضیح داده خواهد شد) در امان بود .

در واقع در این روش علاقه مند به دانستن قله پاسخ سازه با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی در برابر

[2] -Nonlinear Dynamic Analysis
[3] - Response Sectrum Analysis

زلزله هایی هستیم که در گذشته اتفاق افتاده و احتمال رویداد آن ها در آینده نیز وجود دارد .

مزیت این روش تعیین حداکثر پاسخ غیر خطی سازه ها با سرعت عمل بالا میباشد. و عمل رسیدن به نتایج بدون انجام محاسبات طولانی انجام می شود ولی این روش تحلیل نمی تواند رفتار واقعی سازه در برابر زلزله را نشان دهد ولی حداکثر تراز انرژی وارد بر سازه های مختلف و حداکثر پاسخ های محتمل آن ها را مشخص می کند

این روش در میان روش های رایج تحلیل نیست چراکه آیین نامه ها طیف غیر خطی را در اختیار ما نمی گذارند بنابراین برای استفاده از این روش ابتدا باید طیف پاسخ غیر خطی مربوطه را به دست آورد و سپس از این روش استفاده نمود که در این صورت این فرایند بسیار وقت گیر خواهد شد.

۴-۲-تحلیل دینامیکی افزایشی IDA[4]

یکی دیگر از روش های آنالیز دینامیکی غیر خطی ،تحلیل دینامیکی افزایشی می باشد. در این تحلیل، سازه تحت تاثیر یک سری از تحلیل های تاریخچه زمانی قرار می گیرد که شدت این تاریخچه زمانی ها به تدریج افزایش می یابد. به عبارت دیگر در این روش مقدار شتاب ماکزیمم به صورت افزایشی از یک مقدار بسیار کم که در طی آن پاسخ سازه الاستیک است مقیاس شده و به تدریج افزایش می یابد تا به نقطه حالت حدی هدف پس از تسلیم برسیم .

در این حالت مقادیر ماکزیمم برش پایه در مقابل تغییر مکان ماکزیمم بعد از هر بار اجرای تحلیل ترسیم می شود که به نمودار حاصل اصطلاحا نمودار پوش آور دینامیکی (dynamic pushover) یا منحنی های پوش IDA گفته می شود که شکل کلی آن شبیه همان نمودارهای پوش آور در تحلیل استاتیکی غیر خطی می باشد

نرم افزار هایی که قادر هستند فرایند فوق را به صورت اتوماتیک و بسیار راحت انجام دهند عبارتند از Opensees و Seismo Struct

[4]- Incremental Dynamic Analysis

۴-۳-آنالیز تاریخچه زمانی غیر خطی RHA [5]

آنالیز تاریخچه زمانی غیر خطی که یکی از روش های آنالیز دینامیکی غیر خطی می باشد روشی پیچیده و در عین حال دقیق ترین روش برای ارزیابی نیازهای غیر الاستیک سازه تحت اثر شتاب نگاشت های حرکت زمین است.

به منظور تعیین عملکرد محتمل سازه تحت یک زلزله مشخص ، نتایج به دست آمده از این آنالیز می تواند به طور مستقیم با اطلاعات به دست آمده از آزمایشات بر روی نمونه های مولفه های سازه ای مقایسه شوند.

- در آنالیز تاریخچه زمانی، آثار مودهای بالاتر و تغییرات در الگوی بار اینرسی به علت نرم شدگی سازه در خلال زلزله به طور خودکار درنظر گرفته می شود .

در این روش به طور مستقیم تغییر مکان کلی حداکثر که توسط یک شتاب نگاشت مشخص به سازه اعمال می شود، تعیین شده و احتیاجی به تخمین زدن این پارامتر نیاز بر پایه روابط تجربی – تئوریک نمی باشد.

این آنالیز به تغییراتی نظیر تغییر خصوصیات شتاب نگاشت و رفتار سخت شدگی غیر خطی المان های مورد استفاده بسیار حساس می باشد. به عنوان مثال دو رکورد که با استفاده از یک طیف پاسخ مقیاس شده اند، ممکن است در پیش بینی توزیع و مقدار رفتار غیر الاستیک سازه با هم تفاوت های قابل توجهی داشته باشند. به همین علت برای کاهش پراکندگی نتایج و برآورد صحیح نیاز های لرزه ای لازم است آنالیز های تاریخچه زمانی متعددی انجام شود. معمولا آیین نامه های ساختمان مقرر می دارند که در صورت استفاده از ۳ رکورد بیشینه پاسخ ها و در صورت استفاده از ۷ رکورد، مقدار میانگین نتایج ملاک عمل قرار گیرند .البته نوعا تعداد بسیار بیشتری رکورد برای تعیین عملکرد سیستم نیاز است.

[5]- Response History Analysis

باوجود اینکه تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی (RHA) دقیق‌ترین روش برای محاسبه نیازهای لرزه‌ای است اما به جهت وقت گیر بودن و نیز پیچیده بودن این تحلیل، درآئین‌نامه‌های کنونی مهندسی به منظور طراحی بر مبنای عملکرد سازه از روش استاتیکی غیرخطی (NSP) یا روش تحلیل بار افزون (پوش اور) آنطور که در Fema-273 آمده استفاده می کنند.

به طور کلی روش آنالیز دینامیکی غیر خطی در مقایسه با روش استاتیکی غیر خطی به علت اجتناب از تقریب های موجود برای ساده سازی مدل سازه ای دقت بیشتری دارد اما با توجه به حجم زیاد اطلاعات ورودی مورد نیاز (شتاب نگاشت حرکت زمین، رفتار هیسترتیک اعضای سازه و ...) و زمان بر بودن این آنالیز برای سازه ها با المان های زیاد انجام چنین محاسبات زیاد و پیچیده به علت محدودیت های نرم افزارها و سخت افزارهای موجود و حساس بودن این روش، تنها برای کارهای تحقیقاتی و یا طراحی سازه های خاص مناسب می باشد.

- روش تحلیل دینامیکی غیرخطی برای تمام ساختمانها قابل استفاده است . اما نظر به اینکه نتایج حاصل از این روش حساس به شتاب نگاشت انتخاب شده برای تحلیل و مدل رفتار غیر خطی مصالح و اجزاء سازه می باشد لازم است کنترل و تفسیر نتایج حاصل توسط افراد مجرب انجام گیرد .

۵-تحلیل استاتیکی غیر خطی(پوش اور)[6]

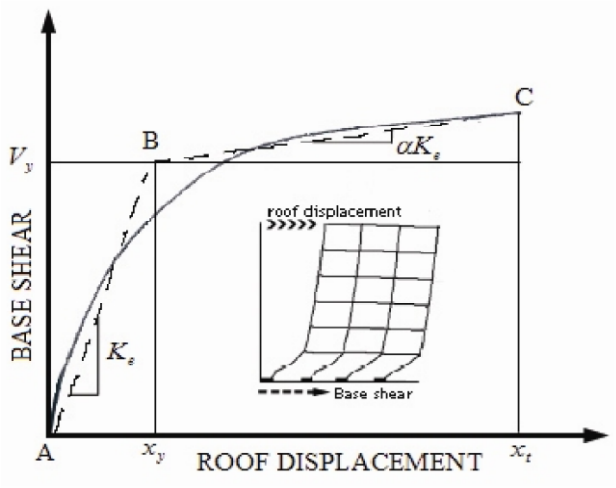
آنالیز پوش اور یک تحلیل استاتیکی غیر خطی تحت اثر بارهای جانبی فزاینده است.هدف از تحلیل استاتیکی غیر خطی فزاینده ،برآورد رفتار مورد انتظار یک سیستم سازه ای به کمک تخمین مقاومت و تغییرشکل مورد نیاز، به وسیله انجام یک تحلیل استاتیکی غیر خطی با در نظر گرفتن زلزله های طراحی و پس از آن مقایسه مقادیر مورد نیاز با ظرفیت های موجود در سطح رفتاری یا عملکردی مورد نظر است.این برآورد بر اساس شناسایی پارامترهای مهم رفتاری شامل تغییر مکان جانبی،تغییر شکل های نسبی اعضاء و اتصالات و ... خواهد بود.

روشهای تحلیلی که در طراحی بر اساس عملکرد و بهسازی لرزه ای سازه ها مطرح می شوند، عمدتا بر مبنای آنالیز استاتیکی غیر خطی می باشند. دلیل استفاده از این نوع آنالیز، سرعت بالای انجام آن ، سادگی تفسیر نتایج و دقت قابل قبول آن می باشد. این در حالیست که تحلیل های پیچیده بجز در موارد خیلی خاص و یا با فرض وجود اطلاعات کافی برای نشان دادن رفتار صحیح سیکلی بار ، تغییر شکل اعضای سازه ای از نظر اقتصادی توجیه پذیر نمیباشد.

این روش به صورت یک سری تحلیل گام به گام میباشد.در هر گام از این تحلیل ،کاهش سختی اعضاء در اثر ایجاد مفاصل پلاستیک بر اثر بارگذاری بر تحلیل گام بعدی در نظر گرفته می شود.در این روش بار جانبی ناشی از زلزله با یک الگوی بار مشخص ، استاتیک و به تدریج به صررت فزاینده به سازه اعمال می شود تا آنجا که تغییر مکان نقطه کنترل(مرکز جرم طبقه بام) تحت بار جانبی به مقدار مشخصی که تغییر مکان هدف نامیده می شود ،برسد و یا اینکه سازه فرو بریزد.سپس تغییرشکل ها و نیروهای ایجاد شده در اعضاء با معیارهای پذیرش آنها در سطوح عملکردی مختلف مقایسه و سطح عملکرد سازه و اجزای سازه ای تعیین می شود.در واقع تغییر مکان هدف نشان دهنده تقاضای تغییر مکانی زلزله مورد انتظار می باشد.

[6] POA-PushOver Analysis or NSP-Nonlinear Static PushOver Analysis

یکی از از مهمترین نتایج این تحلیل تعیین نمودار بار-تغییرمکان یا منحنی ظرفیت است که با مشخص کردن نیروی برش پایه و تغییر مکان جانبی بالاترین سطح سازه(بام) در هر گام و رسم این دو پارامتر در مقابل هم بدست می آید که به منحنی پوش اور معروف میباشد.



فرضیات روش تحلیل استاتیکی غیر خطی :

در تحلیل پوش اور ، هم توزیع نیرو و هم جابه‌جایی هدف با فرض آنکه پاسخ سازه با مد اول کنترل می‌شود و شکل مدی پس از تسلیم سازه تغییر نمی‌کند بنا نهاده شده است.

با توجه به اینکه پس از آنکه سازه تسلیم می شود هر دو فرض فوق تقریبی هستند اما تحقیقات به تخمین‌های خوبی از نیازهای لرزه‌ای منجر شده‌اند اگر چه چنین تخمین‌های خوبی از نیازهای لرزه‌ای عمدتاً به سازه‌هایی با ارتفاع کوتاه یا متوسط محدود می‌شود که در آنها خاصیت غیر الاستیک در تمامی ارتفاع سازه توزیع می‌شود.

مزایا و معایب روش استاتیکی غیر خطی :

- در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی ، بار جانبی به تدریج افزایش داده می شود تا آنجا که تغییر مکان در نقطه معینی از حد مورد نظر فراتر رود . درهنگام افزایش بار جانبی تغییر شکلها و نیروهای داخلی بطور مداوم تحت نظر قرار می گیرد. این روش مشابه روش تحلیل استاتیکی خطی است با این تفاوت که :

۱- رفتار غیر خطی تک تک اعضا و اجزاء سازه در تحلیل وارد می گردد.

۲ - اثر زلزله به جای اعمال بار مشخص، بر حسب تغییر شکل برآورد می گردد.

- در اغلب پژوهش های به انجام رسیده، به منظور تخمین دقت نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیر خطی ، از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی استفاده شده است. در این پژوهش ها تحلیل استاتیکی غیر خطی فقط بر مبنای مود اول نوسان سازه می باشد. این موضوع موجب کاهش دقت نتایج بدست آمده از تحلیل استاتیکی غیر خطی، بویژه برای سازه های بلند (که اثرات مودهای بالاتر حائز اهمیت است)، می شود.
- درعین حال روش های تحلیل استاتیکی غیرخطی باتوجه به سرعت بالای انجام این تحلیل ها و سادگی تفسیرنتایج درمقایسه باروش های تحلیل دینامیکی غیرخطی به سرعت مورداقبال مهندسان واقع شده اند.

فرایند تحلیل استاتیکی غیر خطی درنرم افزار:

- برای محاسبهٔ نیازهای لرزه‌ای به روش استاتیکی غیرخطی، سازه تحت یک بارگذاری جانبی منطبق بر الگوی توزیع بار آیین نامه مورد استفاده ، تا زمانی که تغییر مکان جانبی به مقدار متناظر آن برسد مورد بررسی قرار میگیرد. (برای نمونه در Fema273 سازه تحت بارگذاری جانبی با توزیع ثابت در ارتفاع که به صورت یکنواخت به منظور رسیدن به یک جابه‌جایی هدف از پیش تعیین شده افزایش می یابد)
- برآورد نیاز های لرزه ای سازه ها در این روش به وسیله تعیین نقطه عملکرد انجام می شود. نقطه عملکرد در این روش ها همان جابه جایی بام است.نیروها، تغییر مکان ها و تلاش های داخلی همگی در این نقطه محاسبه می شود .
- تعیین این جابه جایی بر اساس تعیین جابه جایی غیر خطی سیستم یک درجه آزادی معادل انجام می شود.
- مطابق ضوابط نشریه ۳۶۰، نرم‌افزار بصورت اتوماتیک یکی از نقاط طبقه آخر سازه(و نه خرپشته) را به عنوان نقطه کنترل در نظر می‌گیرد و حداکثر تغییر مکان جانبی حدوداً برابر ۲٪ ارتفاع سازه را مبنای آنالیز فرض می‌کند، مگر اینکه مهندس طراح تغییر مکان جانبی بیشتری را مد نظر داشته باشد که بستگی دارد سازه قابلیت رسیدن به تغییر مکان مورد نظر را داشته باشد یا نه.

روش های تعیین نقطه عملکرد:

روش های متعددی برای تعیین نقطه عملکرد وجود دارد که در حالت کلی می توان آن ها را به گروه های زیر تقسیم بندی کرد :

۱- روش اصلاح جابه جایی یا ضریب جابه جایی

- روش ضرایب FEMA 356 مشابه دستورالعمل بهسازی ایران
- روش اصلاح شده ضرایب جابه جایی FEMA 440

نکته : در روش ضریب جابه جایی، برای به دست آوردن جابه جایی نیاز، ابتدا جابه جایی نیاز الاستیک به دست آمده و سپس با اعمال ضرایبی جابه جایی نیاز غیر الاستیک محاسبه می شود .

۲- روش خطی سازی معادل یا طیف ظرفیت

- روش خطی سازی معادل طبق دستورالعمل FEMA 440
- روش طیف ظرفیت طبق دستورالعمل ATC40

در این روش تخمین حداکثر پاسخ با بیان ظرفیت و تقاضای سازه در قالب شتاب و تغییرمکان طیفی صورت می گیرد(از این رو طیف ظرفیت نامیده می شود).منحنی ظرفیت (برش پایه در مقابل تغییرمکان بام)به منحنی ظرفیت معادل(شتاب طیفی در مقابل تغییرمکان طیفی) و طیف طرح به طیف تقاضا تبدیل می شود.نهایتا با رسم این دو منحنی در یک نمودار تغییرمکان هدف محاسبه می شود.

نکته : در روش طیف ظرفیت، جابه جایی نیاز بر اساس نقطه تقاطع منحنی ظرفیت با طیف الاستیک نیاز تعیین می شود، البته این طیف الاستیک جهت انعکاس پاسخ غیر خطی سازه تعدیل می شود .

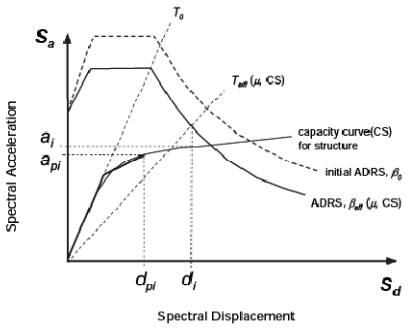


Figure 6-8 Determination of estimated maximum displacement using direct iteration (Procedure A)

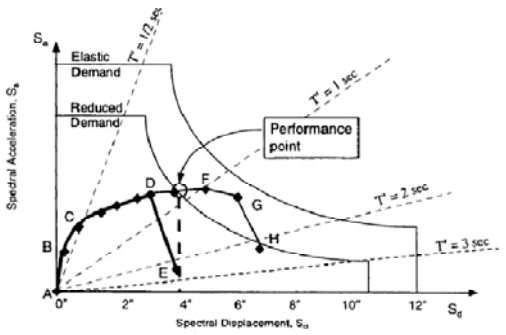
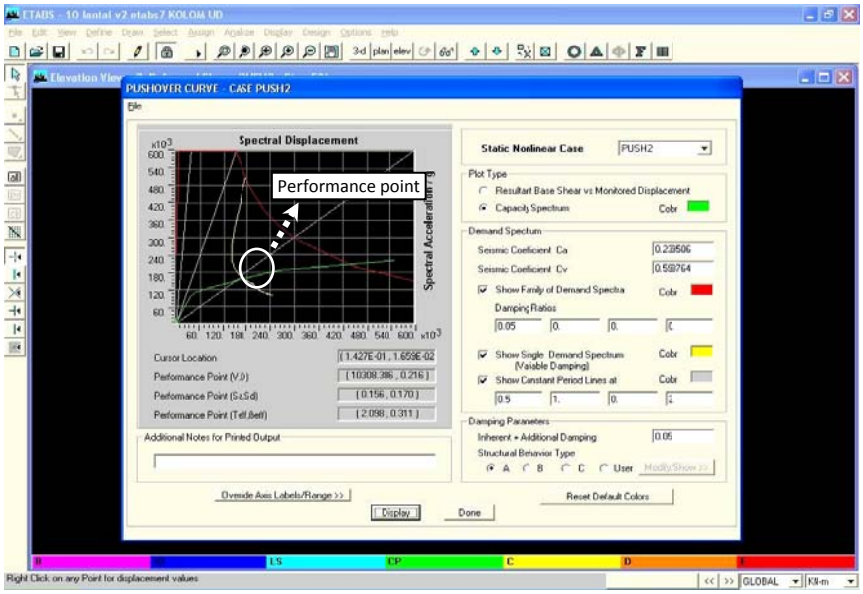
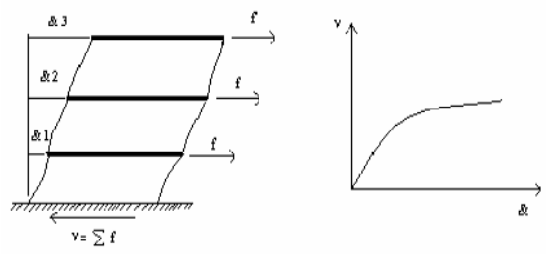
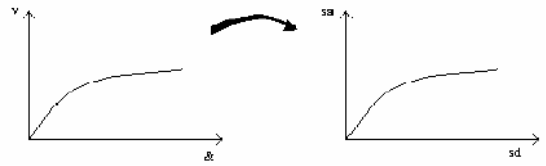


Figure 6-7. Effect of Deformation Enhancement on Structural Performance

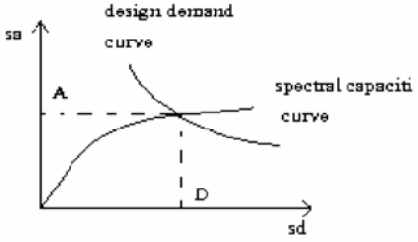




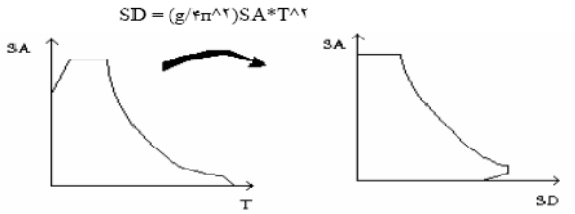
شکل (۲-۱- a) منحنی ظرفیت



شکل (۲-۱- b) تبدیل منحنی ظرفیت به طیف ظرفیت



شکل (۲-۱- d& e) طیف نیاز و ظرفیت



شکل (۲-۱- c) طیف تقاضای طرح

۳- روش تحلیل استاتیکی فزاینده مودال

در این روش، تحلیل استاتیکی غیر خطی با در نظر گرفتن مودهای بالاتر سازه انجام شده و لذا دقت به مراتب بیشتری نسبت به روش های قبلی دارد ولی بر عکس دو روش قبل هنوز در دستورالعمل ها وارد نشده است

۵-۱-روش تحلیل استاتیکی غیر خطی در Fema ۲۷۳

از روش های ارائه شده در Fema می توان به طور معادل در طراحی سازه های جدید هم استفاده کرد.در روش استاتیکی غیر خطی NSP ارائه شده در این راهنما،خصوصیات غیر خطی بار-جابجایی از اجزاء به طور مستقیم مدل می شود.مدل ساختمان تحت یک بار جانبی اضافه شونده قرار می گیرد تا به یک جابجایی هدف برسد یا ساختمان فرو بریزد.این جابجایی هدف ، نمایانگر جابجایی حداکثری است که سازه در طی زلزله طراحی تجربه می کند.

جابجایی هدف می تواند به وسیله هر روشی که اثر پاسخ غیر خطی روی جابجایی را در نظر می گیرد، محاسبه شود، مثل اثرات میرایی در نقطه عملکردی.چنین روشی که به روش ضرایب جابجایی شناخته می شود در Fema ۲۷۳ شرح داده شده است.

الگوی بار جانبی طبق Fema-۲۷۳ :

۱- توزیع یکنواخت: $S_j^* = mj$ (که شماره طبقات $j = 1,2,.....n$)

(توزیع بار برای سازه ۹ طبقه فرضی درجداول و اشکال زیر مشاهده می گردد)

Table C.1. FEMA273 "uniform" lateral force distribution

Floor, j	m_j ($10^{-3}\times$kg)	$s_j^* = \frac{m_j}{\sum_i m_i}$
1	503.5	0.112
2	494.7	0.110
3	494.7	0.110
4	494.7	0.110
5	494.7	0.110
6	494.7	0.110
7	494.7	0.110
8	494.7	0.110
9	534.1	0.119

۲- توزیع نیروی جانبی معادل (ELF): $S_j^* = mjh_j^k$ که hj ارتفاع طبقه jام از تراز پایه می‌باشد و توان k برابر ۱ است برای زمان تناوب اصلی $T_1 \le 0.5\,\text{sec}$, $k = 2$ برای $T_1 \ge 2.5\,\text{sec}$ و برای مقادیر بنیابین به صورت خطی تغییر می کند.

Table C.2. FEMA273 equivalent lateral force (ELF) distribution

Floor j	$m_j h_j^k$ ($10^{-3}\times$kg-m^k)	$s_j^* = \frac{m_j h_j^k}{\sum_i m_i h_i^k}$
1	371.0	0.007
2	1015.0	0.020
3	1963.2	0.038
4	3196.8	0.062
5	4707.4	0.091
6	6488.3	0.126
7	8534.2	0.165
8	10840.6	0.210
9	14471.1	0.281

۳- توزیع SRSS: Sk این توزیع، نیروهای جانبی تعریف می‌شود که از محاسبه معکوس برش طبقات به روش RSA خطی الاستیک بدست می‌آیند.

Table C.3. FEMA 273 SRSS force distribution

	Lateral Forces			Story Shears				Lateral Force	
Floor j	f_{j1} (kN)	f_{j2} (kN)	f_{j3} (kN)	V_{j1} (kN)	V_{j2} (kN)	V_{j3} (kN)	V_j (kN)	f_j (kN)	$\tilde{f}_j = \frac{f_j}{\sum_i f_i}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1	59.7	234.2	277.2	1917.1	1114.9	478.2	2268.7	203.3	0.090
2	97.7	355.0	354.0	1857.4	880.7	200.9	2065.4	222.5	0.098
3	136.8	430.2	285.0	1759.7	525.7	-153.1	1842.9	159.2	0.070
4	176.9	446.1	87.5	1622.9	95.5	-438.1	1683.7	105.7	0.047
5	215.0	381.9	-166.4	1446.0	-350.6	-525.6	1578.0	101.2	0.045
6	250.3	240.6	-352.6	1231.0	-732.5	-359.3	1476.8	95.2	0.042
7	286.0	-5.8	-326.5	980.7	-973.1	-6.6	1381.6	148.4	0.065
8	320.5	-320.7	-46.8	694.7	-967.3	319.9	1233.1	400.9	0.177
9	374.1	646.6	366.7	374.1	-646.6	366.7	832.2	832.2	0.367

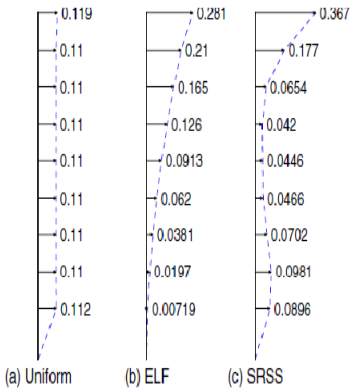
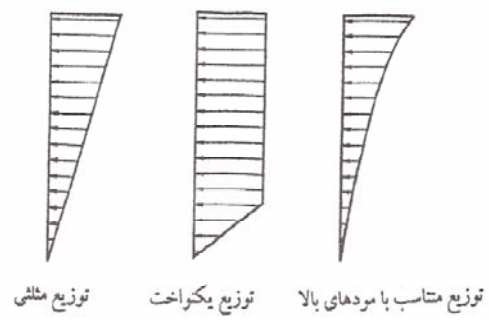


Fig. 5.1. Force distributions in FEMA-273: (a) "uniform"; (b) ELF; and (c) SRSS

۵-۲-الگوی بار جانبی طبق نشریه ۳۶۰

نحوه توزیع نیروی جانبی در ارتفاع ساختمان در طول ارتعاشات زلزله بسیار پیچیده است.بعضی از این حالت های مختلف توزیع نیروی جانبی در شکل زیر نشان داده شده است:



از نقطه نظر طراحی ، توزیع نیروی جانبی باید به گونه ای انتخاب شود که بحرانی ترین شرایط را ایجاد نماید.چنانچه سازه در محدوده رفتار ارتجاعی خطی باشد، توزیع نیروی جانبی تابع پارامترهای زیادی از جمله محتوای فرکانسی و دامنه ارتعاشات زلزله ، فرکانسها و شکل مودهای سازه می باشد.اگر سازه رفتار غیرخطی داشته باشد توزیع نیروی جانبی علاوه بر پارامترهای فوق تابع تسلیم موضعی یا کلی اجزاء سازه نیز خواهد بود و به همین جهت بسیار پیچیده تر می باشد.

در نشریه دستورالعمل بهسازی لرزه ای(۳۶۰) برای توزیع نوع اول و دوم موارد زیر بیان گردید:

۱-توزیع نوع اول

به عنوان توزیع نوع اول باید بار جانبی به یکی از سه روش زیر محاسبه و بر مدل سازه اعمال شود. برای سازه هایی که دارای زمان تناوب اصلی بزرگتر از یک ثانیه هستند فقط میتوان از روش سوم این نوع توزیع بار استفاده نمود .

۱-۱توزیع متناسب با توزیع بار جانبی در روش استاتیکی خطی مطابق رابطه ۱۰-۳ از این توزیع هنگامی می توان استفاده نمود که حداقل ۷۵ ٪ جرم سازه در مود ارتعاشی اول در جهت موردنظر مشارکت کند .در صورت انتخاب این توزیع، توزیع نوع دوم باید از نوع یکنواخت انتخاب شود .

۱-۲-توزیع متناسب باشکل مود اول ارتعاش در جهت موردنظر، از این توزیع زمانی می توان استفاده نمود که حداقل ۷۵ ٪ جرم سازه در این مود مشارکت کند .

۱-۳توزیع متناسب با نیروهای جانبی حاصل از تحلیل دینامیکی خطی طیفی، برای این منظور تعداد مودهای ارتعاشی مورد بررسی باید چنان انتخاب شود که حداقل ۹۰ % جرم سازه در تحلیل مشارکت کند .

۲-توزیع نوع دوم

به عنوان توزیع نوع دوم باید بارجانبی به یکی از دو روش زیر محاسبه و بر مدل سازه اعمال شود .

۲-۱-توزیع یکنواخت که در آن بار جانبی متناسب با وزن هر طبقه محاسبه می شود .

۲-۲توزیع متغیر که در آن توزیع بارجانبی برحسب وضعیت رفتار غیرخطی مدل سازه در هر گام افزایش بار با استفاده از یک روش معتبر تغییر داده می شود .

بار جانبی که به ترتیب فوق انتخاب می شود باید جداگانه در دو جهت مثبت و منفی به سازه وارد شود و رابطه ی بین برش پایه و تغییرمکان نقطه ی کنترل باید برای هر گام افزایش نیروهای جانبی تا رسیدن به تغییرمکانی حداقل۱.۵ برابر تغییرمکان هدف ثبت شود. در تحلیل غیرخطی بارهای ثقلی اعضا مطابق بند 8-2-3در ترکیب با بار جانبی باید منظور شود.

با توجه به موارد فوق نکات زیر جهت تحلیل استاتیکی غیر خطی در نرم افزار قابل برداشت است:

- برای توزیع نوع اول از روش ۱ و ۲ زمانی می‌توان استفاده نمود که درصد مشارکت مودی برای مود اول ارتعاش بیشتر از ۷۵٪ باشد، این مورد در سازه‌های کاملاً منظم هم گاهی به ندرت اتفاق می‌افتد، بنابراین می‌توان برای تمامی سازه از روش ۳ برای توزیع نوع اول استفاده نمود .حال چنانچه از روش سوم برای توزیع نوع اول استفاده شده باشد برای توزیع نوع دوم می‌توان از توزیع یکنواخت استفاده نمود
- بهترین و ساده ترین روش برای الگوی بار یکنواخت به عنوان توزیع یکنواخت استفاده از حالت accl و انتخاب جهت اعمال شتاب ثابت بر اساس نیاز X یا Y می‌باشد، به عنوان یک روش دیگر می‌توان یک حالت بار جانبی استاتیکی معرفی کرد که در آن به تمامی طبقات نیروی واحد (۱) اعمال شده باشد و آن حالت بار را برای توزیع یکنواخت بصورت Load در معرفی Push استفاده نمود، هر دو روش نتیجه ثابتی خواهند داشت.
- شاید در آنالیز استاتیکی تصور توزیع یکنواخت نیروی زلزله در طبقات دشوار و غیر قابل قبول باشد ولی در آنالیز غیر خطی با توجه به اینکه ظرفیت پلاستیک تک تک المانها مورد بحث قرار می‌گیرد بسته به سختی طبقات امکان دارد چنین حالتی حتی بیشتر از

توزیع بار مثلثی معکوس محتمل الوقوع باشد، برای توزیع نوع دوم نیز آئین نامه Fema356و نشریه ۳۶۰ توزیع یکنواخت را تقریباً برای تمامی حالات اجبار کرده است.

- به منظور تحلیل و طراحی لازم است علیرغم پیچیدگی های فوق روش ساده و عملی برای تعیین توزیع نیروی جانبی مورد استفاده قرار گیرد به نحوی که بحرانی ترین حالتهای ممکن را در بر داشته باشد.بر اساس توزیع نیروی جانبی برای ساختمان ها با زمان تناوب کوچکتر یا مساوی ۰.۵ ثانیه که در آن ها مود اول ارتعاش نقش عمده دارد پارامتر K در رابطه ۱۰-۳ برابر یک اختیار می گردد به این ترتیب توزیع نیروی جانبی به شکل مثلثی می باشد.
- در ساختمان های با زمان تناوب بزرگتر یا مساوی ۲.۵ ثانیه اثر مودهای بالاتر از مود اول قابل توجه بوده و موجب شتابهای بزرگ در طبقات آخر ساختمان می گردد.برای آنکه توزیع نیروی جانبی با این پدیده مطابقت داشته باشد پارامتر K برابر ۲ انتخاب می شود.برای ساختمان های با زمان تناوب بین ۰.۵ تا ۲.۵ ثانیه مقدار K از درون یابی خطی بدست می آید.با افزایش ارتفاع ساختمان توزیع نیروی جانبی از خط مستقیم به منحنی تبدیل می گردد.(تفسیر نشریه ۳۶۰)

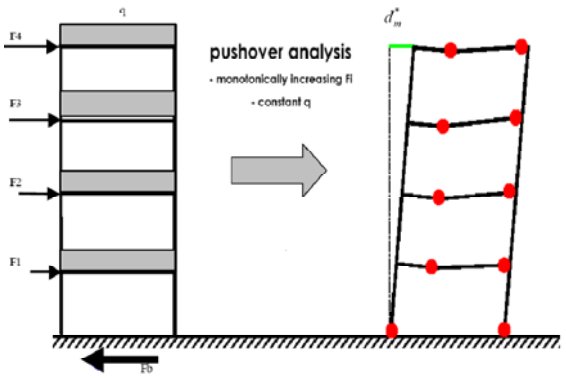
الگوی بار جانبی متناسب با نیروهای جانبی حاصل از تحلیل دینامیکی خطی طیفی:

- چنانچه سازه نا منظم باشد می‌بایست آنالیز دینامیکی طیفی خطی انجام شود، از نتایج توزیع نیروی دینامیکی در طبقات سازه حاصل از آنالیز دینامیکی خطی می‌توان الگوی باری را معرفی نمود که حاصل از ترکیب مدهای ارتعاش در روش آنالیز دینامیکی خطی می‌باشد.
- برای تحلیل دینامیکی خطی که با ترکیب چهار مد اول نوسان انجام می‌گردد می‌بایست یک حالت بار جانبی بصورت User Load معرفی نموده و با کسر نیروی برشی طبقات از همدیگر نیروی وارد بر هر طبقه را استخراج نمود، حالت بار مذکور را می‌توان به عنوان الگوی بار جانبی برای توزیع نوع اول در آنالیز استاتیکی غیر خطی استفاده نمود .
- چنانچه هدف آنالیز غیر خطی سازه مورد نظر برای بار دینامیکی می‌باشد بهتر است از ترکیب مدها استفاده شود و برش دینامیکی طبقات را بصورت استاتیکی توزیع نموده و

الگوی بار جدیدی را معرفی و سازه را تحلیل کرد .چنانچه ترکیب مودها را بخواهیم در معرفی الگوی بار انجام دهیم باید به نسبت جرم مودی هر مد، ارتعاش مدها را ترکیب نمود. برای این منظور میبایست در منوی معرفی الگوی بار جانبی در قسمت Load Patternگزینه Mode را انتخاب کرده و Add نموده، بلافاصله شماره مود مورد نظر را نرم‌افزار سوال خواهد کرد که می‌توان مود اول را انتخاب کرد.

- چنانچه آنالیز دینامیکی خطی انجام شده باشد با ترکیب مودها با جرم مودی تجمعی بیش از ۹۰٪ قابل قبول خواهد بود ولی چون توزیع دینامیکی زلزله در آنالیز طیفی را مستقیماً نمی‌توان به عنوان الگوی بار جانبی معرفی نمود لذا می‌بایست ابتدا توزیع بار دینامیکی در طبقات سازه بصورت استاتیکی تبدیل شده و تحت یک حالت بار جدید (بصورت User Loadمعرفی گردد، سپس از این حالت بار (Load Pattern) می‌توان به عنوان الگوی بار جانبی که نتیجه آنالیز دینامیکی طیفی می‌باشد استفاده کرد.
- چنانکه بخواهیم مستقیماً مدهای نوسان را به عنوان الگوی بار جانبی معرفی نمائیم می‌بایست ضرایب هر مود برابر جرم مودی مربوطه معرفی گردد. به عنوان مثال چنانچه فرض شود جرم مود اول ۴۵ و مود دوم ۳۳ و مود سوم ۹ و مود چهارم ۳ باشد (مجموعاً ۹۰٪) حال در معرفی الگوی بار می‌بایست ضریب مودها را دقیقاً منطبق بر جرم مودی هر مد نوسان معرفی نمود یعنی برای مود اول تا چهارم به ترتیب ۰.۴۵ و ۰.۳۳ و ۰.۰۹ و ۰.۰۳
- نتایج آنالیز دینامیکی خطی که حاصل از روش ترکیب مودها (Modal Analysis) میباشد می‌تواند به عنوان توزیع نوع اول معرفی شود و حتماً به عنوان توزیع نوم دوم می‌بایست از توزیع یکنواخت استفاده کرد، هر دو الگوی بار می‌بایست معیارهای پذیرش سازه را در نقطه عملکرد احراز نمایند

نحوه معرفی مفاصل پلاستیک اعضاء در آنالیز پوش اور:



برای مهاربندیهای هم محور معرفی یک Hingاز نوع Axialدر ۰.۴ طول عضو کافی است، برای تیرهائی که اتصالشان به ستونها مفصلی است جهت بررسی تسلیم تیرها تحت بار ثقلی می‌توان در وسط دهانه تیر یک مفصل خمشی M3 معرفی کرد، برای ستونها معرفی مفصل P-M2-M3 در حالت ۳ بعدی در ابتدا و انتها صحیح است .

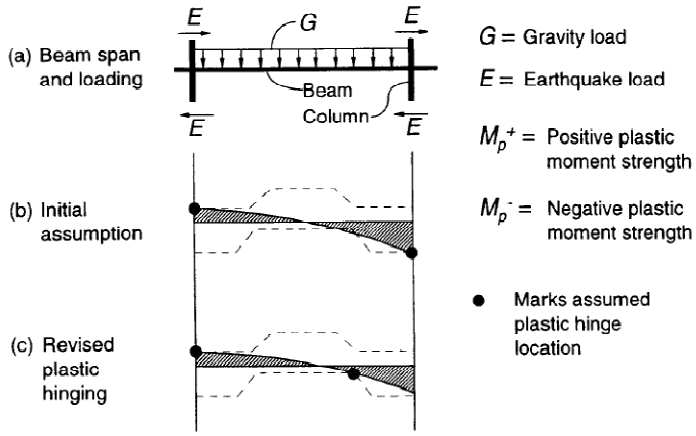


Figure 9-3. Procedure to Identify Plastic Hinge Location in Horizontal Spanning Components

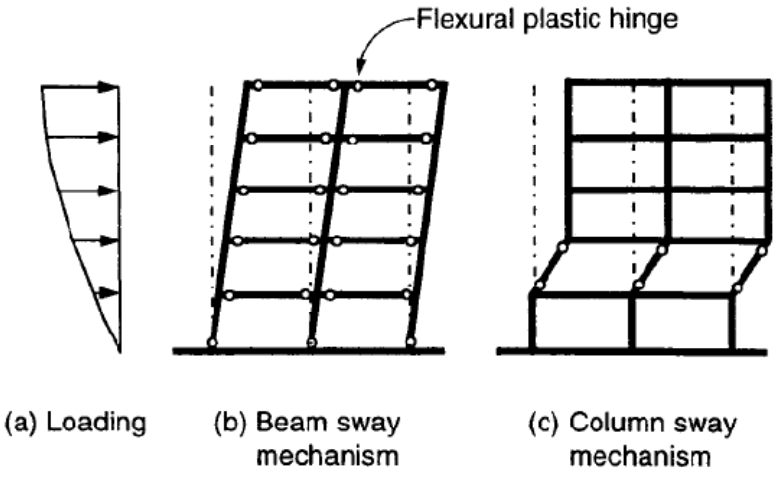
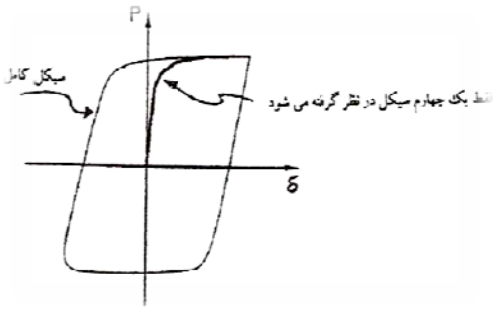


Figure 9-4. Idealized Flexural Mechanisms in Multi-Story Frames

۵-۳- تحلیل پوش اور و معایب آن

با وجود آنکه مقادیر بدست آمده از آنالیز بار افزون با مقادیر دقیق بدست آمده از روش RHA مطابقت دارد. (حداکثر جابه‌جایی چرخش مخزن پلاستیک تیر با مقادیر بدست آمده از روش RHA مطابقت دارد) این تحلیل دارای معایبی نیز میباشد:

- آنالیز پوش‌اُور نمی‌تواند مقادیر تجمعی پاسخ را بدست آورد. به طور مثال انرژی تلف شده در زمان تسلیم تحت زلزله یا چرخش تجمعی یک مفصل پلاستیک. این مسئله در واقع یک محدودیت ذاتی آنالیزهای پوش‌اُور می‌باشد.
- در سازه های بلند که مود های دوم و سوم هم تاثیر زیادی در منظور نمودن رفتار سازه در خود دارند فرض استفاده از مود اول نمی تواند از دقت بالایی برخوردار باشد.زیرا باز توزیع نیروهای اینرسی و تغییرات خصوصیات ارتعاشی پس از ورود سازه به مرحله غیر خطی در آنها دیده نشده است.
- روش تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال (الاستیک) در مقایسه با روشهای تحلیل غیر خطی تاریخچه زمانی در سطوح زلزله های پایین دارای دقت مناسبی می باشد اما در سطوح زلزله های بالا اختلاف زیادی دارد، که پیشنهاد می شود برای این حالت، می توان الگوی بارگذاری جانبی بر اساس شکل مود پلاستیک سازه در انتهای تغییر مکان هدف اولیه، به سازه ها اعمال گردد.
- به دلیل حرکات رفت و برگشتی تغییر رفتار غیر خطی اجزاء سازه مستقیماً منظور نمی شود. زیرا در این روش فقط یک چهارم دوره ی تناوب ارتعاش بررسی می گردد.به این ترتیب ممکن است محاسبه نیروها و برآورد تغییر شکلهای خمیری با خطا انجام شود خصوصاً زمانی که به دلیل افزایش تغییر شکلهای خمیری اثر مودهای بالاتر قابل توجه شود .



٥-٤-روش های برطرف نمودن نقاط ضعف تحلیل پوش اور

روش های تحلیل پوش اور مودال با الگوی بار ثابت:

برای در نظر گرفتن اثرات مود های بالاتر،روش های پوش اور پیشرفته مختلفی بر اساس مفاهیم ترکیب مودال سازه ای ارائه شده اند که سادگی روش های پوش اور سنتی در آنها حفظ شده و الگوی باراعمالی همچنان در طول تحلیل ثابت فرض می شود.

در سازه های با زمان تناوب طولانی مانند ساختمان های بلند که اثر مودهای بالاتر در رفتار لرزه ای آنها تاثیر قابل توجهی دارد، نمود پیدا می کند و آن عدم توانایی این روشها در شناسایی مکانیزم شکست ناشی از مودها بالاتر می باشد. که با Pushover مودال با در نظر گرفتن سه مود تغییر شکل سازه اثرات مودهای بالاتر در مقایسه با روشهای مرسوم در Fema273 دقت پاسخ ها را در مقایسه با روش تحلیل دینامیکی غیرخطی بالاتر خواهد برد.

استفاده از مفاهیم ترکیب مودال به شیوه های متفاوتی در روش های پوش اور پیشنهادی صورت می گیرد که می توان آنها را به دو گروه عمده تقسیم بندی کرد

الف) در گروه اول از قوانین ترکیب مود ها برای تعیین الگوی بار اعمالی استفاده شده و الگوی بار از ترکیب الگوهای بار متناسب با چند مود اول تعیین می شود.بارهای جانبی بر اساس الگوی بار تعیین شده به صورت افزایشی در قالب یک تحلیل پوش اور به سازه اعمال می شود.در این شیوه با وجود اینکه اثرات مودهای بالاتر در الگوی بار اعمالی منعکس شده است با این حال شکل الگوی بار اعمالی محدود به یک شکل ثابت و یگانه بوده و منحنی پوش اور(طیف ظرفیت) حاصل،در نهایت همانند طیف ظرفیت یک سیستم یک درجه آزادی با شکل مود فرضی ثابت ظاهر می شود.در واقع همان مشکلات تحلیل پوش اور سنتی در این رو ها نیز پابرجا بوده و بدیهی است که پیش بینی پاسخ سیستم چند درجه آزادی از طریق پاسخ یک سیستم یک درجه آزادی نمی تواند به درستی صورت گیرد

ب)گروه دوم روش پوش اور مودال

هیچ یک از توزیع‌های، نیروهای تغیر ناپذیر نمی‌توانند مشارکت مدهای بالاتر را در پاسخ سازه یا باز توزیع نیروهای اینرسی به دلیل تسلیم سازه و تغییر در خصوصیات ارتعاشی سازه را درنظر

بگیرند. برای غلبه بر این محدودیتها برای اولین بار "چوپرا و گول[۷]" در سال ۲۰۰۱ با چاپ گزارشی ، توزیع نیروی بهنگام شونده را پیشنهاد کرده‌اند تا بتواند به توزیع متغیر زمانی نیروهای اینرسی نزدیک‌تر باشد.

اگرچه این توزیع نیروی به هنگام شونده تخمین‌های بهتری از نیازهای لرزه‌ای بدست می‌دهند از لحاظ مفهومی پیچیده و از نظر محاسباتی نیاز به یک کاربرد روتین در آئین‌نامه‌های مهندسی سازه دارند. همچنین تلاش‌هایی برای لحاظ کردن مدهای بالاتر از مد اول در آنالیز بار افزون (پوش اور) صورت گرفته است .

٦-تحلیل پوش اور مودال[۸]

در این روش سازه با با الگوهای بار جانبی متناسب با مود شکل های ارتعاشی آن پوش داده و منحنی ظرفیت سازه در هر مود رسم می شود.سپس با استفاده از مفهوم سازه یک درجه آزاد معادل متناسب با هر مود و با در نظر گرفتن شتابنگاشت مورد نظر،تغییر مکان حداکثر سازه یک درجه آزاد بدست می آید و با استفاده از این مقادیر،تغییر مکان حداکثر سازه چند درجه آزاد محاسبه می شود.سپس سازه در هر مود تا تغییرمکان هدف مشخص همان مود تحت اثر نیروهای جانبی متناسب با شکل مود مورد نظر،پوش داده می شود.در نهایت پاسخ های مورد نظر با ترکیب پاسخ های بدست آمده از هر مود استخراج می شوند.

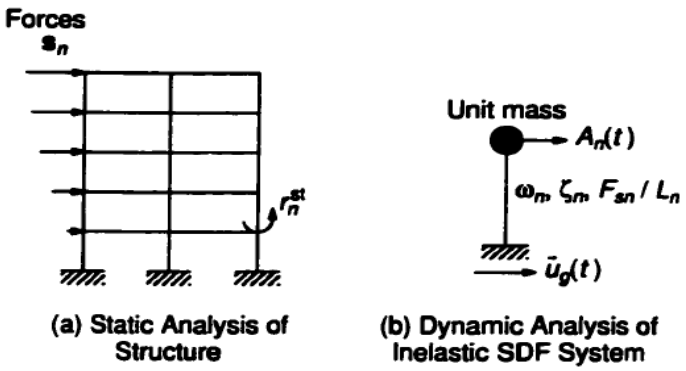
در این روش فرض می شود که پاسخ مود ها در حالت غیر الاستیک به صورت غیر همبسته می باشد.بنابراین پاسخ لرزه ای سازه در هر مود به طور مستقل از هل دادن سازه با الگوی توزیع بار ثابت ناشی از نیروهای اینرسی در آن مود تا رسیدن به تغییر مکان هدف حاصل می شود.سپس پاسخ کلی سازه از روی ترکیب پاسخ مود ها با استفاده از روش جذر مجموع مربعات SRSS

[7] -Chopra & Goel
[8] MPA-Modal PoshOver Analysis

بدست می آید.این روش برای ساختمان‌های الاستیک نتایجی بدست می‌دهد که برابر با روش شناخته شده تحلیل RSA می‌باشد. زیرا توزیع نیروی جانبی استفاده شده دو ویژگی دارد:

- به نظر می رسد منطقی‌ترین انتخاب از بین تمامی توزیع نیروهای تغییر ناپذیر می‌باشد.
- برای سیستم‌های الاستیک پاسخ مدی دقیقی بدست می‌دهد.

پاسخ‌های مودال حداکثر r_{no} که هر یک با یک آنالیز پوش اور بدست می‌ایند با استفاده از قوانین ترکیب مدی مناسب SRSS ترکیب می‌شوند تا تخمینی از مقدار حداکثر ro پاسخ کل را بدست دهند. بدیهی است که این کاربرد قوانین اینکه این روش برای ساختمانهای الاستیک معادل با روش شناخته شده RSA تحلیل دینامیکی غیر خطی طیفی می‌باشد منطقی به نظر می‌رسد.



Conceptual explanation of uncoupled modal response history analysis of inelastic MDF systems. (Source: Chopra and Goel, 2001)

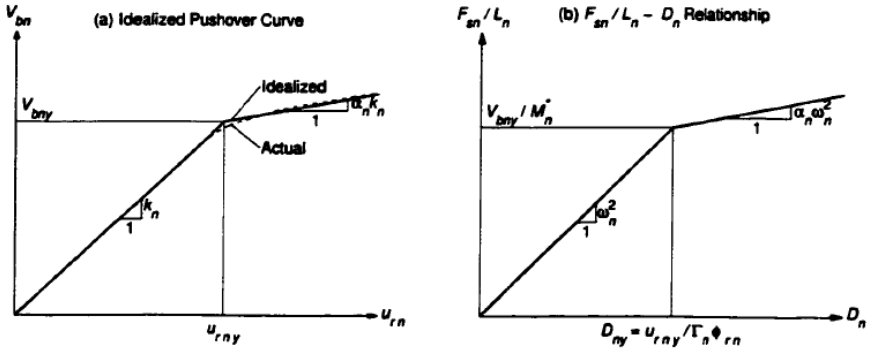
پاسخ غیر الاستیک حداکثر یک ساختمان به تحریک زلزله را می‌توان با روش MPA شرح داده شده بدست آورد.

این روش به صورت گام‌های متوالی در زیر خلاصه شده است :

۱- فرکانس های طبیعی wn و مدها ϕ_n را برای ارتعاش الاستیک خطی ساختمان محاسبه میکنیم.

۲- برای مد nام منحنی پوش اور برش پایه – جابه‌جایی بام $(V_{bn}-u_{rn})$ را برای توزیع نیروی S_n^* بدست می آوریم. $s_n^* = m\phi_n$

۳- منحنی پوش اور را به صورت یک منحنی دوخطی ایده‌آل سازی میکنیم



e 2.6 Properties of the *n*th-"mode" inelastic SDF system from the pushover curve. (Source: Chopra and Goel, 2001)

۴- منحنی پوش اور ایده آل شده ار به رابطه $F_{sn}/L_n - D_n$ در می آوریم

۵- جابه‌جایی حداکثر Dn سیستم یک درجه آزادی غیر الاستیک مد nام را بدست می آوریم

۶- جابه‌جایی حداکثر بام u_{rno} سیستم یک درجه آزادی غیرالاستیک مد nام $u_{rno}=\Gamma_n \phi_{rn} D_n$

۷- در u_{rno} مقادیر پاسخ‌های موردنظر r_{no} (از قبیل جابجایی های طبقات،جابجایی نسبی داخل طبقه،دوران مفاصل پلاستیک و غیره)را بدست می آوریم.

۸- گام‌های ۳ تا ۷ را برای تعداد مدهای لازم تا رسیدن به دقت کافی تکرار میکنیم. معمولاً دو یا سه مد اول کفایت می کند.

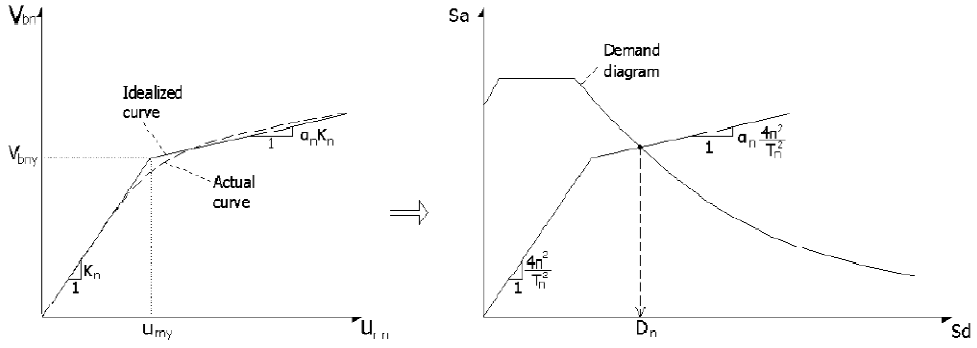


Figure 1: Idealized pushover curve of the n^{th} mode of the MDOF system, and corresponding capacity curve for the n^{th} mode of the equivalent inelastic SDOF system

۹- پاسخ کل را با ترکیب پاسخ‌های مودال حداکثر با استفاده از قاعده ترکی SRSS تعیین می کنیم. از چرخش کل یک مفصل پلاستیک مقدار تسلیم چرخش مفصل را کسر می کنیم تا چرخش پلاستیک مفصل بدست آید.

$$r_0 \approx \left(\sum_{n=1}^{N} {r_{n0}}^2 \right)^{1/2}$$

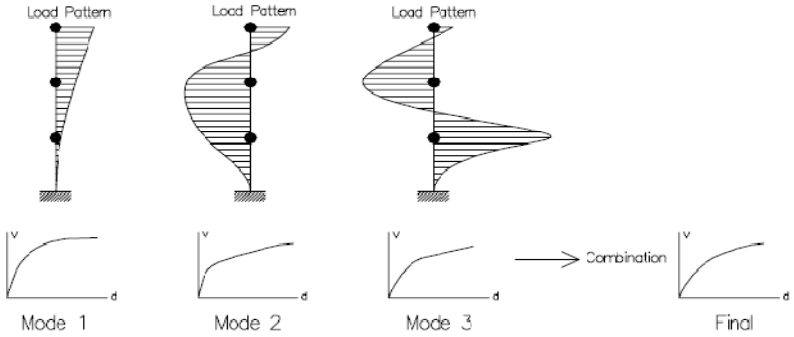


Figure 2.2 Method by Sasaki et al. (1998)

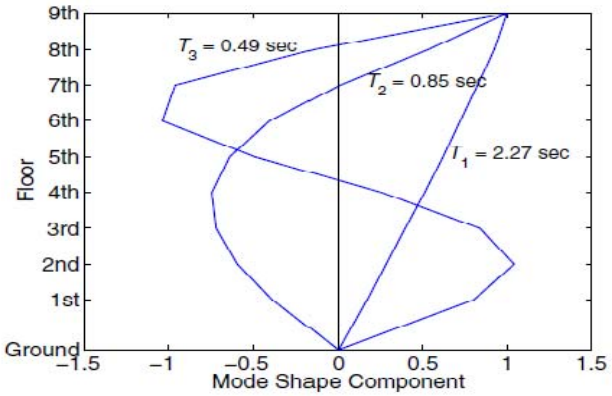


Fig. 3.3. First three natural-vibration periods and modes of the 9-story building

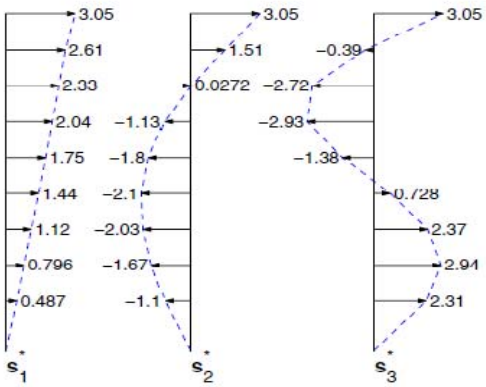
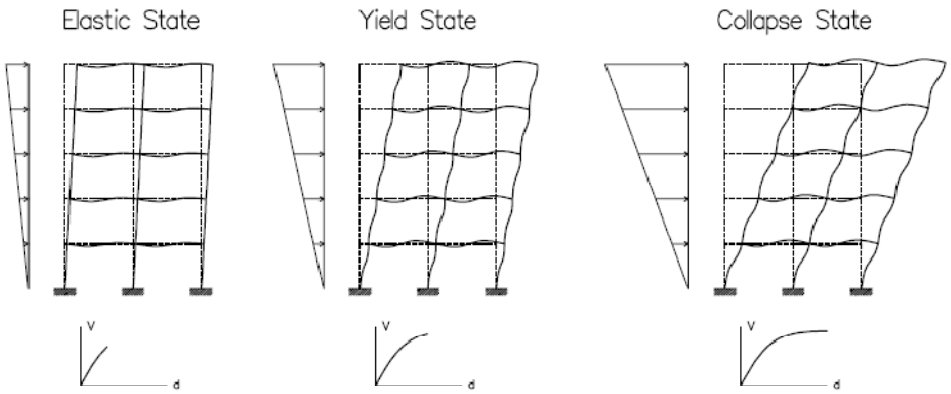


Fig. 3.4. Force distributions $s_n^* = m\phi_n$, $n = 1, 2,$ and 3



٦-١- مزیت های تحلیل پوش اور مودال

- خطاها وابستگی کمی به شدت زلزله دارند که این مسئله را مشاهدات ناشی از کاربردهای عملی نشان می دهد. روش MPA معادل روش RSA می‌باشد که هم اکنون روش استاندارد در مسائل مهندسی است بنابراین خطاهای ناشی از ترکیب مدی که در این روش وجود دارد قابل قبول است این حقیقت که MPA قادر است که پاسخ سازه‌های به اندازه کافی در محدوده غیرالاستیک را به خوبی تخمین بزند نشان می‌دهد که این روش به اندازه کافی برای کاربردهای عملی در طراحی ساختمان‌ها دقیق است.
- نتایج موجود در گزارشات مراجع [۶-۱] نشان داده شده است برای یک تعداد مشخص از مدها خطاها در نتایج MPA به طورکلی بزرگتر از روش RHA هستند . اگر چه هر دو آنالیز منجر به مقادیر حداکثر برابر برای پاسخ‌های مدی هر یک از مدها می‌شود در روش RHA خطاها فقط ناشی از د رنظر گرفتن مدهای بالاتر هستند .همچنین خطای درنظر نگرفتن مدهای بالاتر چنانچه سه مد اول درنظر گرفته شود کوچک است خطاهای دیگر در روش آنالیز بار افزون (پوش اور) ناشی از تقریب‌های ذاتی در روش‌های ترکیب مدی می باشد.
- آنالیز پوش اور یک سیستم غیرالاستیک یک طبقه کاملاً نیازهای لرزه‌ای حداکثر را پیش‌بینی می کند که عبارتند از جابه‌جایی، چرخش های گره، چرخش پلاستیک مفصل

وغیره. بهرحال آنالیز پوش اور به طور ذاتی دارای محدودیت‌هایی است که نمی‌تواند مقادیر تجمعی پاسخ را تخمین بزند به عنوان مثال انرژی تلف شده در تسلیم یا چرخش تجمعی یک مفصل پلاستیک

- پاسخ حداکثر یک ساختمان چند طبقه الاستیک ناشی از مد ارتعاشی nام را می‌توان به طور دقیق به وسیلهٔ آنالیز استاتیکی سازه تحت بارهای جانبی توزیع شده در ارتفاع براساس $S_n = m\phi_n$ که m ماتریس جرم سازه و ϕ_n مد n ام می‌باشد تعیین کرد و سازه تا تغییر مکان بام تعیین شده از جابه‌جایی حداکثر Dn سیستم یک درجه آزادی الاستیک مد nام تحت بار افزاینده قرار می‌گیرد این سیستم خصوصیات ارتعاشی (فرکانس طبیعی wn و نسبت میدایی ξ_n سیستم چند درجه آزادی مد n ام را دارد. برای این سیستم Dn را طیف طرح الاستیک بدست می‌آید ترکیب این پاسخ‌های مدی حداکثر با یک قانون ترکیب مدی مناسب مانند SRSS به روش آنالیز مودال پوش اور (MPA) منجر می‌شود.
- روش MPA برای سازه‌های الاستیک معادل روش RSA استاندارد می‌باشد که طبیعت و اندازه خطاهای برخواسته از قوانین ترکیب مدی تقریبی به خوبی درک شده است.

- تحلیل استاتیکی غیر خطی فزاینده مودال روشی بسیار ساده بر مبنای اعمال نیرو استاتیکی بر اساس شکل مدها به سازه می باشد. با توجه به موفقیت این روش در تعیین پاسخهای سازه بخصوص سازه های با ارتفاع بلند، اخیرا تحقیقات گسترده برای گسترش آن بر سازه های با خصوصیات متفاوت دیگر نیز صورت گرفته است. در این روش نیاز لرزه ای برای هر مد بطور مجزا با توزیع نیروی اینرسی مطابق با همان مد با استفاده از آنالیز استاتیکی غیر خطی Pushover Analysis تعیین می گردد، برای ساختمان نامتقارن در پلان ، این توزیع نیرو شامل دو مولفه جانبی و یک مولفه پیچشی در تراز هر طبقه می باشد. سپس پاسخهای مرتبط با چند مد اول این توزیع مودال برای رسیدن به دقت مناسب، به وسیله یک قانون ترکیب مد معتبر مانند CQC برای تخمین پاسخ نهایی غیر خطی سازه ترکیب می شود. روش مذکور در محدوده الاستیک معادل آنالیز طیف پاسخ استاندارد RSA می باشد

- همچنین روش تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال نسبت به نامنظمی های ایجاد شده در مدلها حساس نمی باشد یعنی افزایش درصد نامنظمی مدلها باعث کاهش دقت روش نخواهد شد.

٦-٢- نقاط ضعف تحلیل پوش اور مودال و روش های برطرف نمودن آن

- گرچه روش MPA چند مود اول سازه را دربر میگیرد و در این مورد از دقت بیشتری نسبت به POA برخوردار است اما همچنان دربکار بردن الگوی نا متغیرتوزیع بار جانبی ضعف اساسی دارد.
- در تحلیل مودال پوش اور باز توزیع نیرو های اینرسی بعد از به تسلیم رسیدن سازه لحاظ نمی گردد .
- سختی سازه پس از رسیدن به نقطه تسلیم کاهش می یابد و الگوی جابجایی هم متعاقب آن میبایست تغییر یابد.بنابراین باید از سختی ثانویه ای برای لحاظ مرحله بعد از تسلیم استفاده نمود

٦-٢-١ -روش مودال پوش اور بهبود یافته [9]

یکی از راه حل ها برای لحاظ نقاط ضعف بالا، روش مودال پوش اور بهینه شده میباشد که توسط مرجع [۲۵] در سال ۲۰۰۸ مطرح گردیدکه این نقطه ضعف عمده روش مودال پوش اور را پوشش می دهد.

در این روش الگوی توزیع بار جانبی در دو فاز یکی برای حالت قبل از تسلیم و دیگری برای بعد از تسلیم بکار گرفته می شود.در فاز اول ، روش POA با استفاده از ۳ مود اول سازه مورد بررسی قرار میگیرد(همانند MPA)اما در فاز دوم ، روش POA تنها برای مود اول سازه مورد بررسی قرار

[9] -Improved Modal PushOver Analysis

میگیرد و الگوی توزیع بار جانبی بر اساس تخمین جابجایی نهایی در نقطه تسلیم و با صرفنظر از اثر مد های بالاتر برای سازه منظور میگردد.

نتایج مقاله مرجع [۲۵] نشان می دهد که مودال پوش اور بهینه شده به مراتب دقیق تر از روش پوش اور یا مودال پوش اور میباشد.نتایج این روش نشان می دهد که مد های بالاتر وقتی جابجایی سازه به حالت نهایی خود میرسد تاثیر چندانی در پاسخ غیر الاستیک سازه نخواهد گذاشت و خطای صرفنظر از مد های بالاتر برای حالت غیر الاستیک قابل چشم پوشیست.اما با وجود این هنوز روشی نهایی برای رفع نقایص مودال پوش اور نمی تواند باشد.

٦-۲-۲-روش مودال پوش اور بهنگام شونده[10]

در همه روش های پوش اور مودال که تاکنون شرح داده شده ، الگوهای بار اعمالی در طول تحلیل ثابت بوده و بر اساس مشخصات دینامیکی الاستیک سازه تعیین می شدند.برای در نظر گرفتن اثرات تغییرات ایجاد شده در مشخصات مودال در نواحی غیر الاستیک ، تحلیل های پوش اور متعددی با الگوی بار بهنگام شوند Adaptive ارائه شده اند.مرجع [۲۸]

در این روش ها الگوی بار اعمالی در هر مرحله از تحلیل بر اساس مشخصات مودال لحظه ای سازه بهنگام شده در مشخصات دینامیکی سازه ناشی از تشکیل مفاصل و تغییر شکل های پلاستیک در نظر گرفته می شود.با این حال در هیچ یک از تحلیل های پوش اور مذکور شیوه مشخصی برای تعیین تغییر مکان هدف ارائه نشده است و در مقالات مرجع[۲۸] سازه تا جایی هل داده می شود تا تغییر مکان بام برابر با مقدار حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی شود.

همچنین در این روش ها برای مقیاس کردن الگوهای بار متناسب با هر مود و ترکیب آنها در هر مرحله ، از طیف الاستیک استفاده می شود ، در حالی که کاربرد طیف الاستیک در ناحیه الاستیک در ناحیه غیر الاستیک با ابهاماتی همراه است

[10] -Adaptive Modal PushOver Analysis

٤-٢-٣- بهینه کردن روش مودال پوش اور با درنظر گرفتن مفاهیم انرژی

در روش MPA درواقع پاسخ یک سیستم چند درجه آزادی از طریق ترکیب پاسخ های چندین سیستم یک درجه آزادی حاصل می شود.از آنجا که در مود های بالاتر افزایش جابجایی بام متناسب با تغییرات جابجایی سایر طبقات نیست، در بعضی موارد حتی ممکن است به علت تشکیل مکانیزم در سیستم سازه ای ، برای حرکت، جابجایی بام در جهت عکس نیز بوده و با افزایش برش پایه ، کاهش یابد.برای رفع این مشکل اولین بار هرناندومنتز و همکارانش در مرجع [۲۷] روش تحلیل پوش اور مودال بر اساس مفهوم انرژی را ارئه دادند.

در مقاله مرجع [۲۹] و در ژانویه ۲۰۱۰ به چاپ رسیده است ، مفاهیم انرژی با مفاهیم طیف ظرفیت در آمیخته می شود و و ضمن درنظر گرفتن اثر مد های بالاتر با فرض سازه در ناحیه الاستیک خطی ، طیف انرژی مودال و دیاگرام تقاضای سازه ساخته میشود که از تلاقی این دو ،نقطه هدف دینامیکی تعیین میگردد

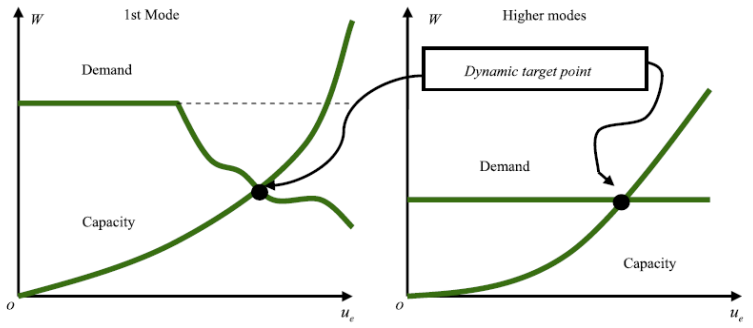


Fig. 4. Dynamic target point evaluation using energy capacity and demand diagrams.

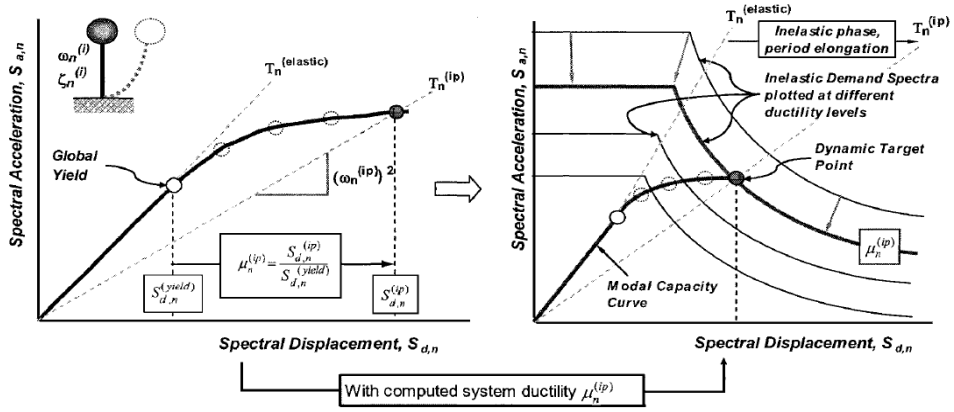


Fig. 2. Performance point evaluation using system ductility through a set of inelastic spectra

مزیت روش های انرژی نسبت به روش های دیگر

- در این روش اثرات حرکت گسل نزدیک زمین را هم می توان در تحلیل دید.
- بررسی سختی ثانویه در ناحیه غیر الاستیک

خلاصه ای از روند روش مبتنی بر انرژی

- ساختن دیاگرام طیف مودال انرژی ظرفیت از سیستم ESDOF بوسیله توزیع بار جانبی در مقایسه با جابجایی های مبتنی بر انرژی
- ساختن دیاگرام مودال انرژی تقاضا سیستم ESDOF تحت تاثیر حرکت مشخصی از زمین
- تعیین نقطه تلاقی این دو دیاگرام که مشابه نقطه عملکرد در روش طیف ظرفیت میباشد
- بکار بردن ترکیب مودال.که در نتیجه آن می توان تقاضای لرزه ای از هر توزیع بار جانبی مودال را تخمین زد.

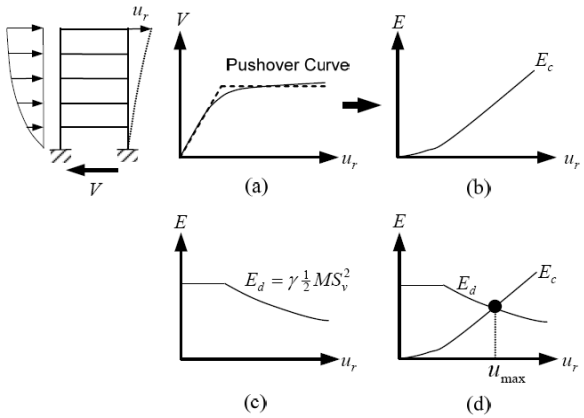
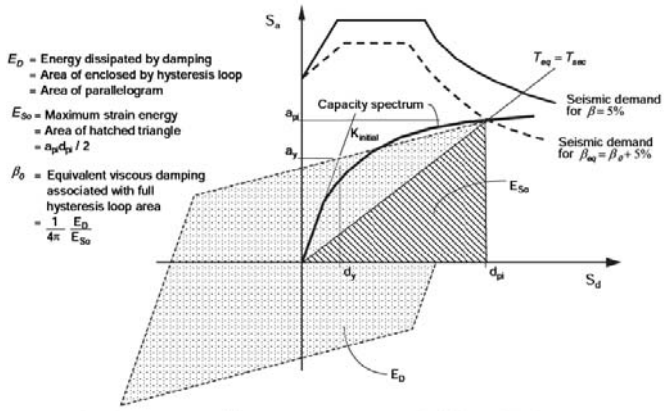


Figure 1. Proposed energy spectrum evaluation method for MDOF systems: (a) Push-over curve, (b) Energy-displacement capacity diagram, (c) Energy demand diagram, and (d) Determination of displacement demand



Graphical representation of the Capacity-Spectrum Method of equivalent linearization, as presented in ATC-40.

۷-مراجع

۱- دستور العمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود –نشریه ۳۶۰ سازمان برنامه و بودجه

۲- تفسیر دستور العمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود- نشریه ۳۶۱ سازمان برنامه و بودجه

۳- راهنمای کاربردی دستور العمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود سازه های فلزی- نشریه ۳۶۳

[۴] Chopra AK, Goel RK. A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: Theory and preliminary evaluation. Report No. PEER 2001/03. Berkeley (CA): Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California; 2001.

[۵] Chopra AK, Goel RK. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. Earthq Eng Struct Dyn 2002;31(3):561_82.

[۶] Chopra AK, Goel RK, Chintanapakdee C. Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands. Earthq Spectra 2004;20(3):757_78.

[۷] Chopra AK, Goel RK. A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings. Earthq Eng Struct Dyn 2004;33(8): 903_27.

[۸] Chopra AK, Goel RK. Role of higher-mode pushover analyses in seismic analysis of buildings. Earthq Spectra 2005;21(4):1027_41.

[۹] Jan TS, Liu MW, Kao YC. An upper-bound pushover analysis procedure for estimating the seismic demands of high-rise buildings. Eng Struct 2003;26(1):

[10] Poursha M, Khoshnoudian F, Moghadam AS. A consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of tall buildings. Eng Struct 2009;31(2):591_9.

[11] Hernandez-Montes E, Kwon OS, Aschheim MA. An energy based formulation for first and multiple-mode nonlinear static (Pushover) analyses. J Earthq Eng 2004;8(1):69_88.

[12] Tjhin T, Aschheim M, Hernandez-Montes E. Observations on the reliability of alternative multiple-mode pushover analysis methods.

[13] Gupta B, Kunnath SK. Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures. Earthq Spectra 2000;16(2):367_91.

[14] Kalkan E, Kunnath SK. Adaptive modal combination for nonlinear static analysis of building structures. J Struct Eng 2006;132(11):1721_31.

[15] Park HG, Eom T, Lee H. Factored modal combination for evaluation of earthquake load profiles. J Struct Eng 2007;133(7):956_68.

[16] Shakeri K, Shayanfar MA, Kabeyasawa T. A story shear-based adaptive pushover procedure for estimating seismic demands of buildings. Eng Struct 2010;32(1):174_83.

[17] Antoniou S, Pinho R. Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force based pushover analysis. J Earthq Eng 2004;8(4):497_522.

[18] Antoniou S, Pinho R. Development and verification of a displacement-based

adaptive pushover procedure. J Earthq Eng 2004;8(5):643_61.
[19] Pinho R, Monteiro R, Casarotti C, Delgado R. Assessment of continuous span bridges through nonlinear static procedures. Earthq Spectra 2009;25(1): 143_59.
[20] Pinho R, Marques M, Monteiro R, Casarotti C. Using the adaptive capacity spectrum method for seismic assessment of irregular frames. In: Proceedings of the 5th European workshop on the seismic behaviour of irregular and complex structures. Paper No. 21. Catania (Italy); 2008.
[21] Leelataviwat S, Saewon W, Goel SC. Application of energy balance concept in seismic evaluation of structures. J Struct Eng 2009;135(2):113_21.
[22] Leelataviwat S, Saewon W, Goel SC. An energy based method for seismic evaluation of structures. In: Proceedings of 14th world conference on earthquake engineering. Paper No. 05-01-0037; 2008.
[23] Villaverde R. Methods to assess the seismic collapse capacity of building structures: State of the art. Struct Eng 2007;133(1):57_66.
[24] Kotanidis C, Doudoumis IN. Energy based approach of static pushover analysis.
[25] Zhai Changhai, Mao Jianmeng, and Xie Lili1 , An improved modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands of structures , 2008
[26] Shakeri, K. Shayanfar, M.A. and Moghadam, A.S. (2007) "An efficient method for optimum combination of modes required for pushover analysis", Proceedings of the Ninth Canadian Conference on Earthquake Engineering.
[27] Hernandez-Montes, E. Kwon, O. S. and Aschheim, M.A. (2004) "An energy-based formulation for first-and multiple-mode nonlinear static (Pushover) analyses", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, pp. 69-88.
[28] Gupta, B. and Kunnath, S.K. (2000) "Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures", Earthquake Spectra,
[29] Yi Jiang, Gang Li _, Dixiong Yang , A modified approach of energy balance concept based multimode pushover analysis to estimate seismic demands for
[۳۰] Applied Technology Council. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Report ATC-40. Redwood City (CA); 1996.
[۳۱] Federal Emergence Management Agency. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Report FEMA-273. Washington (DC); 1997.
[۳۲] Federal Emergence Management Agency. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Report FEMA-356. Washington
[۳۳] Federal Emergence Management Agency. Improvement of nonlinear static seismic analysis procedure. Report FEMA-440. Washington (DC); 2005.
[۳٤] Federal Emergence Management Agency. Next-generation performancebased seismic design guidelines. Report FEMA-445, Washington (DC); 2006.

۳۵- جزوه درس طراحی سازه ها در برابر زلزله ، جناب دکتر شجاعی ، دانشگاه باهنر کرمان زمستان ۸۸

۳۶-جناب مهندس مقدس پور و جناب مهندس زرین قلم ، فروم تخصصی وبسایت ایران سازه ، زمستان ۸۸