



# مقایسه تحلیل پوش اور ارتقا یافته و دینامیکی غیرخطی در بررسی آسیب پذیری ساختمانهای بتنی بلند

نسیم زراعت پرور<sup>1\*</sup>، آرش موسوی قاسمی<sup>2</sup>

1- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران، تبریز، ایران

[n.zeraatparvar@gmail.com](mailto:n.zeraatparvar@gmail.com)

2- استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی

تبریز

[amousavi2000@yahoo.com](mailto:amousavi2000@yahoo.com)

## چکیده

در سال های اخیر به دلیل توجه زیاد مهندسان به طراحی ساختمان ها بر اساس عملکرد، استفاده از روشهای تحلیل غیر خطی که پاسخ های عملکردی سازه را بهتر نشان می دهند، رو به افزایش است. تحلیل دینامیکی غیر خطی به عنوان دقیق ترین روش جهت تعیین تقاضای لرزه ای و هم چنین تشخیص مکانیسم مفاصل پلاستیک در سازه ها می باشد. ولی به علت مشکلات کاربردی، استفاده از این روش با محدودیت هایی رو به روست به همین دلیل تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) تبدیل به تحلیلی استاندارد برای ارزیابی و طراحی ساختمانها گردیده است. تحلیل پوش اور به دسته متعارف و ارتقایافته تقسیم می شود. پوش اور متعارف اثر مودهای بالاتر را در نظر نمی گیرد برای رفع این محدودیت روش جدیدی به نام تحلیل استاتیکی فزاینده غیر خطی مودی (MPA) به منظور بهبود دقت روشهای پوش اور سنتی ارائه شد. این روش قادر است اثر مودهای بالاتر از مود اصلی را در پاسخ نهایی سازه لحاظ کند. بنابراین استفاده از آن در ارزیابی لرزه ای ساختمانهایی که مشارکت مودهای بالاتر تعیین کننده است، مانند ساختمانهای بلند و نامنظم از اهمیت خاصی برخوردار است. در این تحقیق به بررسی دقت نتایج حاصل از تحلیل رانشی مودال در مقایسه با تحلیل دینامیکی غیر خطی بر روی ساختمانهای بتنی بلند می پردازیم و مشخص می کنیم در ساختمانهای بلند تا حدود چه ارتفاعی تحلیل رانشی مودال (MPA) می تواند کارآمد باشد نتیجه بررسی ها نشان داد در ساختمانهای بلند با پلان منظم تا ارتفاع 15 طبقه می توان نتایج قابل اطمینانی از روش تحلیلی پوش اور مودال به دست آورد.

**واژه های کلیدی:** تحلیل دینامیکی غیرخطی، پوش اور، تحلیل رانشی  
مودال، تحلیل استاتیکی غیرخطی، مودهای بالاتر

## 1- مقدمه

اگرچه در زلزله های اخیر دنیا، سازه های طراحی شده بر اساس ضوابط لرزه ای موجود، در حفظ ایمنی افراد مناسب عمل کرده اند اما دامنه خرابی های ایجاد شده در سازه ها و خسارت اقتصادی وارده بسیار گسترده و خارج از انتظار بوده است. امروزه به خوبی مشخص شده است که سازه های طراحی شده بر اساس این ضوابط، در برابر زلزله های شدید متحمل خسارات سنگین خواهند شد. از اینرو طراحی بر اساس عملکرد به عنوان روشی که مبتنی بر پذیرش تغییرمکان و شکل پذیری مورد انتظار و هماهنگی با سطوح مورد انتظار باشد، مورد توجه قرار گرفت. یکی از مسائل اساسی در طرح عملکردی ساختمان ها در برابر زلزله، به کارگیری روش ساده و در عین حال کارآمد در تحلیل، طراحی و کنترل سازه می باشد به نحوی که بتواند اهداف عملکردی مورد نظر را بطور قابل اطمینانی برآورده سازد. در پاسخ به این نیاز روش های غیرخطی ساده شده ای در مراجع مختلف ارائه شده است که عمدتاً در آنها روند تحلیل استاتیکی غیرخطی به عنوان ابزاری جهت تعیین تقاضای تغییر مکان در یک ساختمان که تحت تغییرشکلهای غیر خطی ناشی از زلزله قرار دارد استفاده می شود. روش استاتیکی غیر خطی را می توان به دو دسته متعارف و ارتقا یافته تقسیم نمود. در روش پوش اور متعارف، اثر مودهای بالاتر و اثر تغییر سختی سازه بر روی بارگذاری در نظر گرفته نمی شود، به همین جهت محققین با ارائه روش های نوین سعی دارند اثر مشارکت مودهای بالاتر، که مخصوصاً در سازه های بلند اثرات بیشتری بر روی پاسخ سازه دارند، و تغییرات سختی سازه در طول روند تحلیل و اندرکنش بین مودها را لحاظ کنند.

## 2- روش پوش اور سنتی

در حالت کلی در روشهای تحلیل پوش اور سنتی مشخصات مصالح و مواد غیر الاستیک بطور مستقیم در مدل سازه ای وارد می شود. سپس این مدل سازه ای تحت اثر یک الگوی بار جانبی به صورت افزایشی تا رسیدن به یک تغییرمکان هدف هل داده شده و مقادیر تغییرشکلهای داخلی و نیروها تعیین می شوند. ترتیب وقوع شکستگی ها، مفاصل پلاستیک در طول فرآیند به راحتی قابل نمایش می باشد. این فرآیند

تا زمانی که جابه جایی سازه از جابه جایی هدف تجاوز نماید و یا اینکه سازه فرو ریزد ادامه می یابد. در این روش ها سعی بر آن است که جابه جایی هدف برابر با ماکزیمم جابه جایی محتمل تحت اثر زمین لرزه مورد انتظار باشد. در واقع در روش تحلیل پوش اور جهت ارزیابی عملکرد سازه، طیف ظرفیت سازه با طیف تقاضای لرزه ای مقایسه می شود.

شکل مودی حاکم  $\{\phi\}$  در طول زمان تحلیل بدون توجه به تغییر شکل های حاصل از تسلیم اعضا ثابت فرض می شود. با فرض معلوم بودن بردار  $\{\phi\}$ ، الگوی بار جانبی بر اساس این شکل مود فرضی حاکم با استفاده از رابطه (1) تعیین می شود.

(1)

$$\{f\} = [m] \times \{\phi\}$$

$[m]$  ماتریس جرم سیستم چند درجه آزادی،  $\{\phi\}$  بردار شکل مود فرضی حاکم و  $\{f\}$  بردار شکل الگوی بار جانبی می باشد.

با اعمال افزایش الگوی بار جانبی بر سازه، منحنی پوش اور (منحنی برش پایه- جابه جایی بام) حاصل برای سازه چند درجه آزادی با استفاده از مفاهیم تجزیه مودال در دینامیک سازه ها به منحنی نیرو- جابه جایی سیستم یک درجه آزادی معادل با جرم واحد و یا به عبارتی دیگر به منحنی شتاب- جابه جایی تبدیل می شود. پس از تبدیل منحنی پوش اور سیستم چند درجه آزادی به منحنی طیف ظرفیت سیستم یک درجه آزادی معادل، ماکزیمم جابه جایی سیستم یک درجه آزادی معادل  $D_1^*$  تحت اثر زمین لرزه مورد انتظار با استفاده از طیف الاستیک معادل یا طیف غیرالاستیک تعیین می شود. ماکزیمم جابه جایی بام مورد انتظار سیستم چند درجه آزادی  $U_{ro}$ ، با استفاده از معادله زیر تخمین زده می شود

(2)

$$U_{ro} = D_1^* \Gamma \phi_r$$

### 3- روشهای پوش اور پیشرفته

به منظور لحاظ کردن اثرات مودهایی بالاتر در سال های اخیر، روش های پوش اور پیشرفته مختلفی بر اساس مفاهیم ترکیب مودال سازه ای ارائه شده است که سادگی روش های پوش اور سنتی در آن ها حفظ شده است با این تفاوت که به جای استفاده از یک تحلیل پوش اور از چندین تحلیل پوش اور مستقل استفاده می شود و الگوی بار اعمالی در این روش ها همچنان در طول تحلیل ثابت فرض می گردد.



روش معروف پوش اور مودال MPA پیشنهادی چوپرا و گوئل یکی از روشهای پوش اور پیشرفته است که در آن چندین تحلیل پوش اور با الگوی بار متناسب با اشکال مودی الاستیک چند مود اول انجام گرفته و پاسخ لرزه ای سازه در هر مود بطور 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. در واقع سازه چند درجه آزادی به چند سازه یک درجه آزادی تبدیل می شود. سپس پاسخ لرزه ای کلی سازه از ترکیب پاسخ های حاصل از هر مود با استفاده از روش ترکیب جذر مجموع مربعات (SRSS) به دست می آید. تحقیقات اخیر بیانگر آنست که روش تحلیل MPA دقت کافی برای مسائل کاربردی طراحی و ارزیابی ساختمان را دارد.

#### 4- روش پوش اور مودال

در سال 2002 چوپرا و گوئل [Chopra and Goel 2002] روش تحلیل پوش اور مودال Modal Pushover Analysis با الگوی بار ثابت با چند بار اجرا (MPA) را پیشنهاد دادند. در روش MPA پاسخ لرزه ای سازه در هر مود بطور مستقل از هل دادن سازه با الگوی توزیع بار ثابت ناشی از نیروهای اینرسی در آن مود تا رسیدن به تغییرمکان هدف حاصل می شود. سپس پاسخ کلی سازه از روی ترکیب پاسخ مودها به دست می آید. در واقع سازه چند درجه آزادی به چند سازه یک درجه آزادی تبدیل می شود (مطابق شکل 1) بطور کلی این روش بدین صورت انجام می گیرد که برای هر مود در نظر گرفته شده یک تحلیل استاتیکی غیرخطی با الگوی بار جانبی بصورت  $s_n^* = m\phi_n$  انجام می گیرد و این الگوی بار جانبی تا رسیدن به تغییرمکان هدفی که از تحلیل دینامیکی غیرخطی سیستم معادل یک درجه آزادی با رابطه نیرو- تغییرمکان بصورت  $F_{sn}/L_n - D_n$  بدست می آید، افزایش پیدا می کند. لازم به ذکر است که رابطه  $F_{sn}/L_n - D_n$  برای سیستم معادل یک درجه آزادی غیرخطی از تبدیل منحنی پوش اور سازه در آن مود بدست می آید. برش پایه اعمالی به ساختمان در هر مرحله در مقابل تغییرمکان بام سازه در مقابل هم رسم می شوند و منحنی پوش اور حاصل می شود. حال این منحنی پوش اور باید به یک منحنی که بیان کننده رابطه بین  $F_{sn}/L_n - D_n$  است تبدیل شود.

برای این تبدیل از روابط زیر استفاده می کنیم:

$$(3) \quad F_{sn} = \frac{V_{bn}}{\Gamma_n} \quad D_n = \frac{u_m}{\Gamma_n \phi_m}$$

در این حالت مقادیر متناظر با نقطه تسلیم برای  $F_{sn}/L_n$  و  $D_n$  عبارتند از:

$$\frac{F_{sny}}{L_n} = \frac{V_{bny}}{M_n^*} \quad D_{ny} = \frac{u_{rny}}{\Gamma_n \phi_{rn}} \quad (4)$$

که در آن  $M_n^* = L_n \Gamma_n$  برابر جرم موثر مودی می باشد. این دو پارامتر با رابطه زیر به هم مربوط می شوند:

$$\frac{F_{sny}}{L_n} = \omega_n^2 D_{ny} \quad (5)$$

دوره تناوب طبیعی سیستم یک درجه آزادی مربوط به مود  $n$  ام برابر خواهد بود با:

$$T_n = 2\pi \left( \frac{L_n D_{ny}}{F_{sny}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

اکنون به شرح مراحل روش MPA می پردازیم:

- 1) محاسبه فرکانس های طبیعی و اشکال مودی سازه
- 2) به دست آوردن رابطه برش پایه- تغییرمکان بام  $V_b - u_{rn}$  (منحنی پوش اور) با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی بر مبنای توزیع بار برای مود  $n$  ام سازه که در این رابطه  $s_n^* = m \phi_n$  ماتریس جرم سازه است.

3) تبدیل منحنی حاصل به صورت منحنی ایده آل دو خطی

4) تبدیل منحنی پوش اور ایده آل شده به شکل رابطه  $F_{sn}/L_n - D_n$

5) محاسبه تغییرشکل حداکثر  $D_n$ ، سیستم معادل یک درجه آزادی غیرخطی متناظر با مود  $n$  ام با منحنی رفتاری. این عمل از طریق انجام یک تحلیل دینامیکی غیرخطی و یا از روی طیف پاسخ طراحی غیرخطی مربوطه بدست می آید.

6) محاسبه تغییرمکان حداکثر بام  $u_{rno}$ ، متناظر با مود  $n$  ام  $u_{rno}$  در حقیقت تغییرمکان هدف در مود  $n$  ام می باشد.

7) سازه برای رسیدن به حداکثر جابه جایی بام پوش شود.

(8) با توجه به تغییر مکان هدف  $u_{rno}$ ، استخراج کردن سایر اطلاعات پاسخ سازه از روی نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی مربوط به مود  $n$  ام.

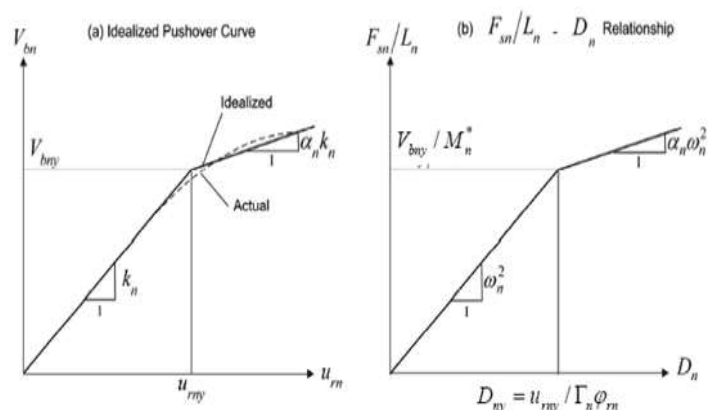
(9) تکرار مراحل 3 تا 8 برای هر تعداد مود لازم جهت رسیدن به دقت مورد نظر. معمولاً 2 تا 3 مود اول سازه کفایت می‌کند.

(10) تعیین پاسخ کل سازه با ترکیب کردن پاسخ های حداکثر مودی با استفاده از روش  $SRSS$  و یا روش های دیگر:

(7)

$$r_o = (\sum_{n=1}^N r_{no}^2)^{1/2}$$

روش  $MPA$  در تخمین پاسخ سازه در مقیاس پارامترهای محلی (همچون دوران پلاستیک مفصل) موفق ارزیابی نشده است البته عدم موفقیت در تخمین پاسخ سازه در مقیاس محلی، مشخصه کلی تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌باشد.

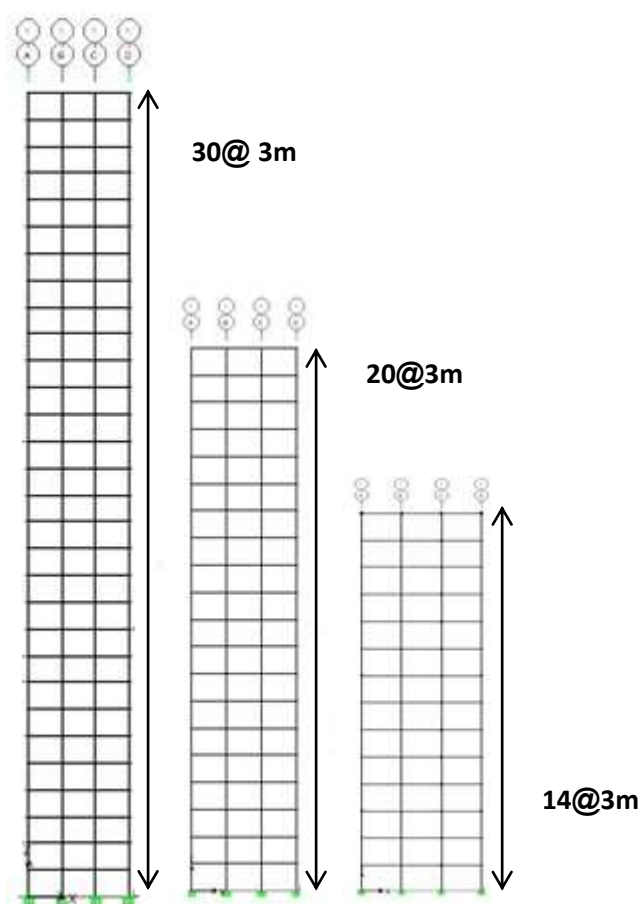


شکل 1- تعیین منحنی ظرفیت سیستم یک درجه آزادی غیرخطی متناظر با مود  $n$  ام و تبدیل آن به منحنی ایده آل شده دوطرفی ظرفیت سازه یک درجه آزادی

## 5- معرفی مدل های مورد مطالعه

همه مدل ها پلان منظم و متقارن سه دهانه داشته و طول هر یک از دهانه ها 4 متر می باشد. مدل های مورد مطالعه سه ساختمان 14، 20، 30 طبقه بتنی هستند که به صورت سه بعدی طراحی و مدلسازی شده اند. ارتفاع طبقات 3 مترو سیستم سقف تیرچه بلوک است، این ساختمان ها بر اساس آئین نامه 2800 زلزله ایران و آئین نامه ACI طراحی شده اند. برای محاسبه نیروهای زلزله فرض شده که زمین منطقه از نوع II بوده و شتاب مبناي طرح نیز برای پهنه زلزله خیزی با خطر نسبی زیاد انتخاب شده است، برای ضریب رفتار سازه با توجه به سیستم قاب

خمشی بتنی ویژه عدد 12 در نظر گرفته شده است. مقاومت فشاری بتن مصرفی 25MPa و تنش جاری شدن فولاد 400MPa انتخاب شده است. در این مدل ها به مقایسه دقت و توانایی روش پوش اور مودال نسبت به نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی به عنوان روش دقیق پرداخته می شود. پارامتر پاسخی که از تحلیل ها استخراج و مورد مقایسه قرار گرفته جابه جایی نسبی طبقات است که به سبب ارتباط مستقیم آن با خسارت وارد بر سازه از اهمیت بیشتری نسبت به جابه جایی طبقات برخوردار است.



شکل 2- نمای کلی قابهای مورد مطالعه

## 6- معرفی نرم افزار و زلزله های به کار رفته در این تحقیق

در این تحقیق از نرم افزار Etabs جهت طراحی و مدلسازی و از نرم افزار Sap جهت انجام تحلیلهای پوش اور مودال و دینامیکی غیرخطی استفاده شده است. از نرم افزار Seismosignal نیز در تبدیل

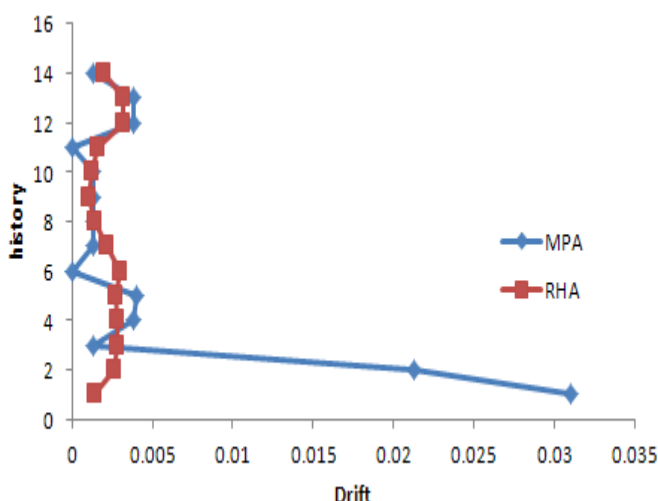
داده های شتاب نگاشت به طیف پاسخ و پردازش اطلاعات شتاب نگاشت ها استفاده شده است. برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی لازم است که تعدادی شتاب نگاشت متناسب با مشخصات ژئوتکنیکی و شرایط خاک محل احداث پروژه انتخاب گردد و این شتاب نگاشت ها با طیف طرح منطقه، سازگار شوند. در این تحقیق از پنج شتاب نگاشت Landres، Northridge، Sanfernando، Parkfield و Tabas استفاده شده است. چنانچه تعداد زلزله ها بین سه تا شش عدد باشد مقادیر ماکزیمم را استخراج می کنیم. در این تحقیق نیز پس از انجام تحلیل ها و بررسی نتایج، شتاب نگاشتی که بیشترین پاسخ ها را نتیجه می دهد، به عنوان معیار بررسی در نظر گرفته شده و شتاب نگاشت Sanfernando برای این منظور انتخاب شده است.

#### جدول 1- خصوصیات رکورد

#### زلزله مورد استفاده

شتاب نگاشت	ایستگاه ثبت زلزله	PGA
Sanfernando	USGS 128 Lake Hughes -12	0.366g

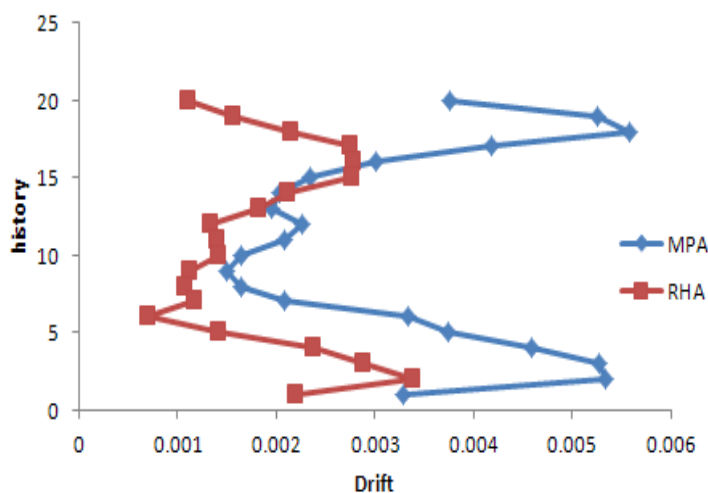
#### 7- ارزیابی روش پوش اور مودال



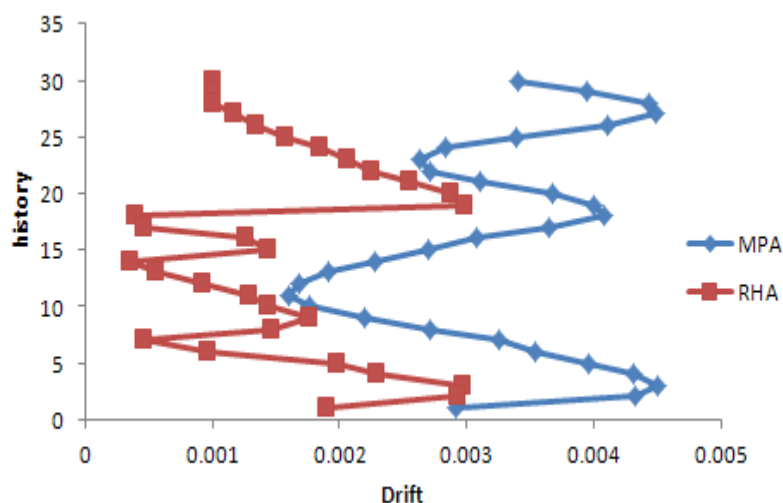
شکل 3- نمودار مقایسه جابه جایی نسبی طبقات در روش پوش اور مودال و تاریخچه زمانی در مدل 14 طبقه تحت اثر زلزله

#### Sanfernando





شکل 4- نمودار مقایسه جابه جایی نسبی طبقات در روش پوش اور مودال و تاریخچه زمانی در مدل 20 طبقه تحت اثر زلزله Sanferando



شکل 5- نمودار مقایسه جابه جایی نسبی طبقات در روش پوش اور مودال و تاریخچه زمانی در مدل 30 طبقه تحت اثر زلزله Sanferando

## 8- نتیجه گیری

به عنوان يك نتیجه كلي مي توان عنوان نمود كه افزايش تعداد طبقات، افزايش سطح شتاب حداكثر زمین (PGA) و به طور كلي هر عاملي كه وضعیت سازه را به سمت غیرالاستيك تر شدن پیش ببرد باعث اختلاف بیشتری بین نتایج روش های دینامیکی و استاتیکی غیر خطی می گردد.

به عبارت دیگر تخمین و ارزیابی روش های استاتیکی غیرخطی از عملکرد سازه ، به سمت نامطلوب بودن سوق می یابد بنابراین در زلزله های قوی عملکرد روش های استاتیکی غیرخطی ناکافی می باشد. با نگاه دقیق به پاسخ حاصل برای پارامتر مورد مقایسه و نمودارهای رسم شده می توان گفت که روش پوش اور مودال برای کاربردهای عملی در طراحی و تقویت ساختمانهای بلند با پلان منظم تا 15 طبقه می تواند دقت کافی داشته باشد و در طبقات بالاتر باید روش های پوش اور ارتقا یافته دیگری انتخاب و بررسی شوند.

## مراجع :

[1] Federal Emergency Management Agency, FEMA273. (1997), "NEHRP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Building", Building Seismic Safety Council, Washington DC.

[2] Applied Technology Council, ATC40,(1997)."Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings California Seismic Safety Commission".

[3] Anil K. Chopra and Rakesh K. Goel ,Chintanapakdee,(2001) Statics of SDF-System Estimate of Roof Displacement for Pushover Analysis Building ,College of engineering, University of California.

[4] Krawinkler H, Seneviratna GDPK,(1998) Pros and Cons of a Pushover Analysis of Seismic Performance Evaluation. Engineering Structures, 20,452-464.

[5] Anil K. Chopra and Rakesh K. Goel ,(2005) Role of Higher Mode Pushover Analyses in Seismic Analysis of Buildings, Earthquake Spectra, 21(4):1027-1041.

[6] Moghadam AS.(2002) A pushover procedure for tall buildings. Proc. 12th European Conference on Earthquake Engineering London (United Kingdom): Elsevier Science Ltd, p.395.

[7] Bansal,Rohit, (2011) Pushover analysis of reinforced concrete frame, Master these, Department of civil engineering, THAPAR University.

[8] زرفام، پ.، 1389، برآورد قابلیت اعتماد پذیری لرزه ای سازه ها بر پایه تحلیل احتمالاتی غیرخطی مودال، پایان نامه دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

- [9] اندایش، م.، 1384، استفاده از آنالیز پوش اور مودال جهت تخمین پاسخ لرزه ای قابهای دوبعدی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- [10] سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، 1385، دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود، نشریه شماره 360.
- [11] آل رسول، س. و کرامتی، ا.، 1385، بررسی رشد سطح عملکرد در سازه های بلند بتن آرمه مقاوم شده با مهاربند فلزی، هفتمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس.
- [12] شاکری، ک.، شایانفر، م.، 1387، تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال با یک بار اجرا برای ارزیابی لرزه ای قاب های خمشی فولادی، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، سال چهارم، شماره چهارم.
- [13] پاک نیت، ش. و پاک نیت، ا.، 1390، تحلیل های مورد نیاز در بهسازی لرزه ای سازه ها، تهران: انتشارات متفکران، چاپ دوم.
- [14] زراعت پرور، ن. مقایسه تحلیل پوش اور ارتقایافته و دینامیکی غیرخطی در بررسی آسیب پذیری ساختمانهای بتنی بلند، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی تبریز، تبریز، 1392 .