



## تحلیل استاتیکی غیر خطی مودال با یک بار اجرا برای ارزیابی لرزه‌های قاب‌های خمشی فولادی

کاظم شاکری<sup>۱</sup>، محسنعلی شایانفر<sup>۲</sup>

### چکیده

با توسعه کاربرد تحلیل پوش‌آور در سال‌های اخیر روش‌های پوش‌آور پیشرفته متعددی برای لحاظ کردن اثر مودهای بالاتر و همچنین اثر تغییر مشخصات مودال سازه در طول تحلیل ناشی از تسلیم اعضاء پیشنهاد شده است. روش‌های پیشنهادی عموماً برای لحاظ کردن اثرات مودهای بالاتر از چندین تحلیل پوش‌آور با الگوی بارهای متناسب با اشکال مودی سازه استفاده می‌نمایند و نتایج حاصل از این تحلیل‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شوند (به صورت چند بار اجرا). از آنجائیکه در ناحیه غیر خطی مودهای مختلف یک سازه را نمی‌توان مستقل از یکدیگر فرض کرد لذا تجزیه یک سازه چند درجه آزادی به چند سازه یک درجه آزادی در ناحیه غیر خطی از لحاظ تئوریک با مشکلاتی روبرو است. روش‌های تحلیل پوش‌آور مودال با چند بار اجرا نمی‌توانند اثرات اندرکنش بین مودها در ناحیه غیر خطی را لحاظ نمایند. به همین منظور برخی از محققین روش‌های مودال با یک بار اجرا را پیشنهاد داده‌اند که در آنها الگوهای بار متناسب با مودهای مختلف با یکدیگر ترکیب شده و به صورت یک الگوی بار واحد بر سازه اعمال می‌شوند (به صورت یک بار اجرا). در این مقاله به منظور بهبود و افزایش دقت روش‌های تحلیل پوش‌آور با یک بار اجرا یک روش جدید تحلیل پوش‌آور مودال با یک بار اجرا با الگوی بار به هنگام شونده ارائه شده است. روش پیشنهادی بر روی یک نمونه سازه ۹ طبقه فولادی تحت اثر زلزله کوبه به کار گرفته شده و مشاهده شده است که روش مذکور با دقت مناسبی می‌تواند پاسخ‌های حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی را تقریب بزند.

### کلمات کلیدی:

تحلیل غیرخطی، پوش‌آور، مودال، یک بار اجرا، ارزیابی لرزه‌ای، قاب‌های خمشی

## Single-Run Modal Nonlinear Static Procedure for Seismic Assessment of Steel Moment Frames

M. Shayanfar, K. Shakeri

### ABSTRACT

Application of the pushover methods have been increased in last decade. In recent years different advanced pushover methods have been proposed to account the higher modes effects and changes in the modal attribute during inelastic phases. Generally in these advanced methods multiple pushover analyses with lateral load corresponding to the considered elastic mode shapes are conducted separately, and then the total seismic response is estimated by combining the responses due to each modal load (multi-run). Since in the inelastic domain the modes are coupled so using of the modal decomposition concepts are not valid in the nonlinear range. Therefore the multi-run pushover methods encounter with some theoretical problems. These methods are not able to reflect the yielding effect of one mode in the other modes and the interaction between modes in the nonlinear range. For this purpose, some researchers have developed enhanced single-run modal methods in which the structure is pushed with combined modal forces. The modal combination concept is used to define the load pattern rather than to combine the nonlinear responses due to each mode. In this paper a new advanced single-run pushover method has been proposed. The proposed method is applied to SAC-9 building. This provides a good estimation of the peak inelastic drift response.

### Key words:

Nonlinear Analysis, Advanced Pushover, Modal, Single-Run, Seismic Demands, Steel Moment Frames

۱. دانشجوی دکتری سازه دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران [k\\_shakeri@iust.ac.ir](mailto:k_shakeri@iust.ac.ir)

۲. عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران [shayanfar@iust.ac.ir](mailto:shayanfar@iust.ac.ir)

## ۱- مقدمه

دو دهه گذشته تحلیل پوش‌آور به عنوان یک ابزار کاربردی مناسب نقش موثری در توسعه مهندسی زلزله بر مبنای عملکرد ایفا کرده و به طور گسترده‌ای در آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۱-۴]. با رواج یافتن تحلیل پوش‌آور به صورت حرفه‌ای در بین مهندسان، مطالعات گسترده‌ای در خصوص مزایا و معایب این روش صورت گرفته است [۵-۷]. مشکل اصلی روش‌های پوش‌آور سنتی موجود در آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های جاری از قبیل FEMA-356 [۱-۴] در این نکته نهفته است که این روش‌ها عموماً محدود به پاسخ یک مود تنها بوده و توانایی لحاظ کردن اثرات مدهای بالاتر همچون اثر تغییر مشخصات مودال سازه ناشی از تسلیم اعضا را ندارد.

## ۲- روش‌های تحلیل پوش‌آور پیشرفته

به منظور لحاظ کردن اثرات مدهای بالاتر در سالهای اخیر، روش‌های پوش‌آور پیشرفته مختلفی بر اساس مفاهیم ترکیب مودال سازه‌ای ارائه شده است که سادگی روش‌های پوش‌آور سنتی در آنها حفظ شده است با این تفاوت که به جای استفاده از یک تحلیل پوش‌آور از چندین تحلیل پوش‌آور مستقل استفاده میشود و الگوی بار اعمالی در این روش‌ها همچنان در طول تحلیل ثابت فرض می‌گردد [۸-۱۵]. در روش معروف پوش‌آور مودال (MPA) (Modal Pushover Analysis) پیشنهادی چوپرا و گوئل چندین تحلیل پوش‌آور با الگوی بار متناسب با اشکال مودی الاستیک چند مود اول انجام گرفته سپس پاسخ لرزه‌ای کلی سازه از ترکیب پاسخ‌های حاصل از هر مود با استفاده روش ترکیب جذر مجموع مربعات (SRSS) به دست می‌آید [۱۱]. از آنجائیکه در مدهای بالاتر افزایش جابجایی بام متناسب با افزایش جابجایی سایر طبقات نمی‌باشد و حتی در برخی موارد با افزایش برش پایه، جابجایی بام در جهت عکس حرکت می‌کند لذا استفاده از جابجایی بام به عنوان نقطه کنترل جابجایی در مدهای بالاتر با

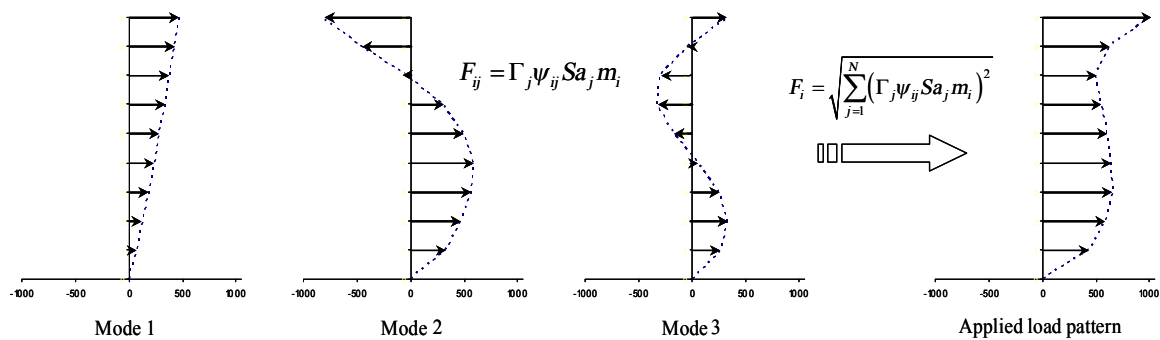
ابهاماتی روبرو است. به همین منظور چوپرا و گوئل ویرایش اصلاح شده‌ای از روش پوش‌آور مودال MMPA (Modified Modal Pushover Analysis) را بر اساس طیف پاسخ الاستیک در مدهای بالاتر پیشنهاد دادند [۱۳]. علاوه بر این به منظور لحاظ کردن اثرات تغییر در مشخصات مودال سازه ناشی از تسلیم اعضا، روش‌های پوش‌آور با چند بار اجرا با الگوی بار به هنگام شونده پیشنهاد شده است [۱۶، ۱۷]. با این حال در روش‌های پوش‌آور مودال با چند بار اجرا چه در حالت استفاده از الگوی بار ثابت و چه در حالت استفاده از الگوی بار متغیر به هنگام شونده، مدها مستقل از هم لحاظ شده و اثرات تسلیم اعضا در یک مود در مدهای دیگر منعکس نمی‌شود. در واقع این روش‌ها توانایی لحاظ کردن اثرات اندرکنش بین مدها در ناحیه غیر الاستیک را ندارند همچنین استفاده از قوانین ترکیب مودال الاستیک در ناحیه غیر الاستیک معتبر نمی‌باشد و از طرفی دیگر اجرای چندین تحلیل پوش‌آور مشخصاً پیچیده تر از اجرای یک تحلیل پوش‌آور می‌باشد همچنین از آنجائی که پاسخ کلی سازه در انتهای تحلیل از ترکیب نتایج حاصل از مدهای مختلف به دست می‌آید لذا امکان تعقیب و بررسی نتایج تحلیل، ترتیب و توالی وقوع مکانسیم‌های محلی و کلی در طول تحلیل غیرممکن می‌باشد.

به همین دلیل برخی از محققین روش‌های پوش‌آور مودال با یک بار اجرا را پیشنهاد دادند که در آنها از قوانین ترکیب مودال SRSS برای ترکیب نیروهای مودال و تعیین الگوی بار استفاده می‌شود [۱۸-۲۰]. همچنین به منظور لحاظ کردن اثرات تغییر مشخصات مودال سازه ناشی از تسلیم اعضا در طول تحلیل، روش‌های پوش‌آور مودال با یک بار اجرا با الگوی بار به هنگام شونده پیشنهاد شده است [۲۱-۲۴]. در هر مرحله بارگذاری الگوی بار از روی ترکیب نیروهای مودال لحظه‌ای سازه تعیین شده و از طریق یک تحلیل پوش‌آور واحد بر سازه اعمال می‌شود (یک بار اجرا). در الگوی بار اعمالی اثرات مدهای بالاتر

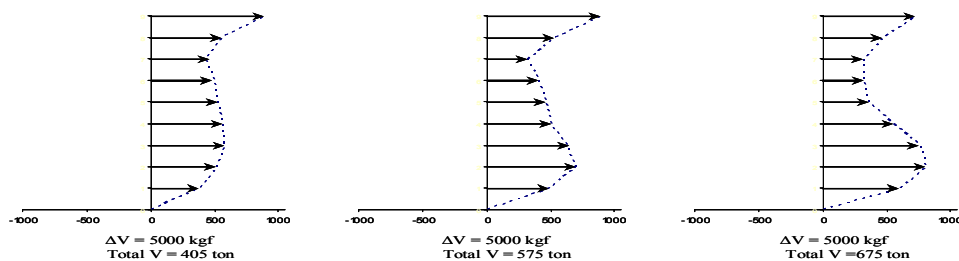
مورد نظر نیروهای مودال لحظه‌ای برای هر مود تعیین شده سپس از ترکیب آنها با استفاده روشهای ترکیب مودال از قبیل SRSS الگوی بار جانبی در هر محله تعیین می‌شود، شکل (۱). اگر چه این روش از لحاظ مفهومی و تئوری از پشتوانه قوی تری نسبت به روش‌های پوش‌آور سنتی برخوردار است و اثرات موده‌های بالاتر، اندرکنش بین مودها در ناحیه غیر الاستیک، تغییر در مشخصات مودال سازه ناشی از تسلیم اعضاء، زوال سختی و محتوای فرکانسی یک طیف طراحی یا طیف پاسخ ویژه را لحاظ می‌کند ولی با این حال این روش در تخمین پاسخ‌های غیر خطی عموماً نتوانسته است برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به روش‌های پوش‌آور سنتی داشته باشد و حتی در برخی موارد دقت نتایج نه تنها افزایش نیافته بلکه کاهش نیز یافته است.

و اندرکنش بین آنها در ناحیه غیر الاستیک لحاظ شده است همچنین رفتار سازه، ترتیب و توالی وقوع مفصل‌های پلاستیک، مکانیسم‌های محلی و کلی در طول تحلیل به راحتی از طریق تحلیل پوش‌آور با یک بار اجرا قابل تعقیب و بررسی می‌باشد.

در راستای این خط فکری ناشای یک روش پیشرفته تحلیل پوش‌آور با الگوی بار به هنگام شونده ارائه داد [۲۲] که بعداً توسط آنتونیو و پینهو از طریق یک مدل تحلیل فیبری (Fiber) تحت عنوان روش (Force-based Adaptive Pushover) FAP توسعه یافت [۲۳]. در این روش در هر مرحله بارگذاری بر اساس مشخصات ماتریس سختی لحظه‌ای سازه تحلیل مودال صورت گرفته و مطابق با مشخصات مودال سازه و با استفاده از طیف شتاب الاستیک



شکل (۱): نیروهای مودال طبقات مختلف در سه مود اول و تعیین الگوی بار اعمالی در مرحله اول بارگذاری روش FAP برای ساختمان ۹ طبقه فولادی SAC-9 تحت اثر زلزله کوبه



شکل (۲): تغییرات الگوی بار اعمالی در مراحل مختلف بارگذاری روش FAP در مورد ساختمان ۹ طبقه فولادی SAC-9

آنتونیو و پینهو همچنین یک روش پوش آور با الگوی بار به هنگام شونده بر اساس جابجایی ارائه داده‌اند که در آن به جای اعمال بار به صورت نیرو، اعمال بار به صورت جابجایی صورت می‌گیرد [۲۴]. این روش در مقایسه با روش FAP از عملکرد نسبتاً بهتری برخوردار است.

همانطوریکه توسط پاپانیکیولا و الناشای [۲۵] شرح داده شده است دلیل عملکرد ضعیف روش FAP می‌تواند به خاطر استفاده از قوانین ترکیب مودال درجه دوم از قبیل SRSS در این روش باشد بطوری که به خاطر استفاده از روش‌های ترکیب درجه دوم تغییر علامت نیروهای مودال در طبقات مختلف مودهای بالاتر از بین رفته و علامت مؤلفه‌های بردار الگوی بار اعمالی در تمام طبقات یکسان حاصل می‌شود. در واقع در این روش فقط مقادیر نیرویی حاصل از هر مود در تعیین الگوی بار لحاظ شده و اثرات تغییر علامت موجود در تراز طبقات مختلف مودهای بالاتر از بین می‌رود، شکل‌های (۱) و (۲).

### ۳- روش پیشنهادی تحلیل پوش آور مودال با یک بار اجرا با الگوی بار به هنگام شونده

در این مقاله به منظور رفع نارسائی‌های روش FAP یک روش پوش آور با الگوی بار به هنگام شونده بر اساس برش طبقات ارائه شده است. همانطوری که در قسمت قبلی اشاره شده در روش FAP، مؤلفه‌های بردار الگوی بار در تراز طبقات مختلف بدون توجه به مقدار و جهت بارهای وارده در سایر طبقات به طور مستقل از ترکیب نیروهای مودال در تراز همان طبقه به دست می‌آید، شکل (۱) و (۲) در حالیکه، جابجائی نسبی بین طبقات بعنوان یک شاخص تعیین کننده در ارزیابی خسارت سازه‌ای ارتباط مستقیمی با برش طبقه دارد که برابر با مجموع نیروهای وارده در طبقات بالا با لحاظ کردن علامت جبری آنها می‌باشد. بنابراین جابجایی نسبی بین طبقات مستقل از مقدار و جهت بارهای وارده در سایر

طبقات نمی‌باشد. به همین منظور در روش پیشنهادی در هر مرحله بارگذاری برای تعیین شکل الگوی بار برخلاف روش FAP از نیروهای مودال لحظه‌ای طبقات استفاده نمی‌شود بلکه شکل الگوی بار از روی برش مودال لحظه‌ای طبقات استخراج می‌شود.

در هر مرحله بارگذاری یک تحلیل مودال صورت گرفته و براساس مشخصات مودال لحظه‌ای سازه نیروهای وارد بر طبقات در هر مود طبق رابطه (۱) به دست می‌آید، شکل (۳-ا)، سپس از روی رابطه (۲) برش طبقات مختلف برای هر مود محاسبه شده شکل (۳-ب)، و با استفاده از قوانین ترکیب مودال مانند جذر مجموع مربعات (SRSS) و طبق رابطه (۳) با هم ترکیب شده و برش مودال ترکیبی طبقات در ترازهای مختلف حاصل می‌شود، شکل (۳-ج).

$$F_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \psi_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_i \psi_{ij}^2} \psi_{ij} m_i S a_j \quad (1)$$

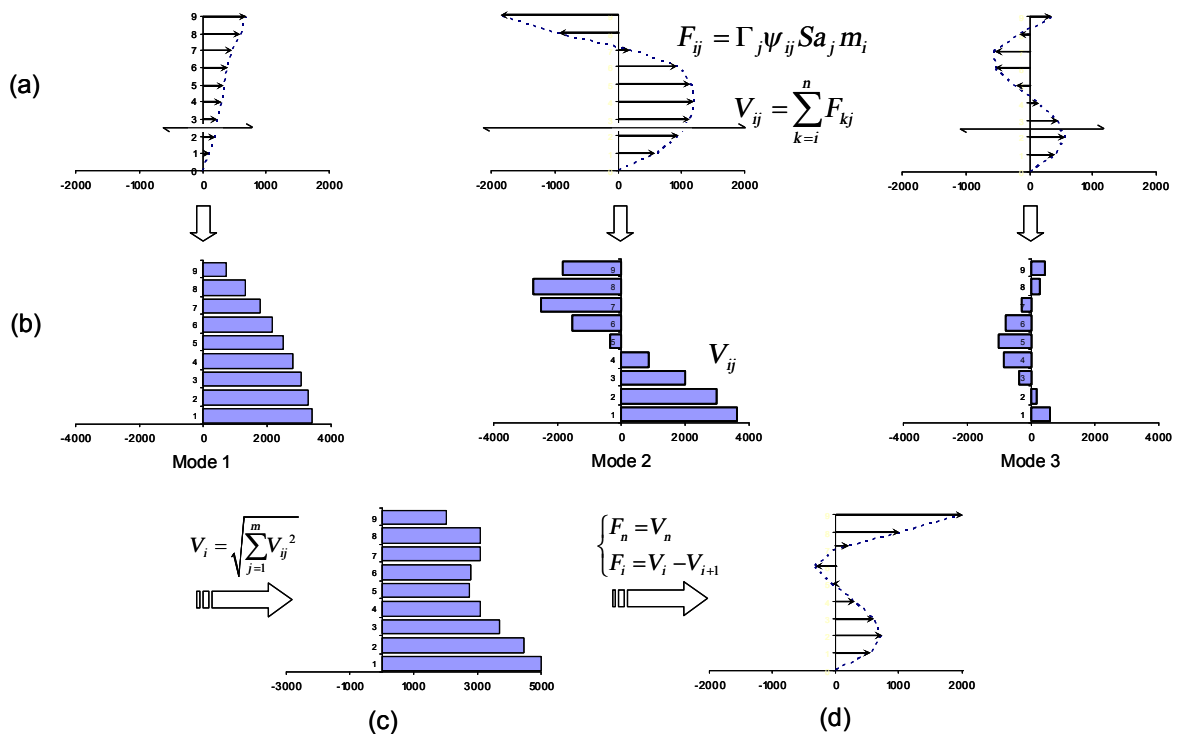
$$V_{ij} = \sum_{k=1}^n F_{kj} \quad (2)$$

$$V_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m V_{ij}^2} \quad (3)$$

در این روابط، i: شماره طبقه، j: شماره مود،  $\psi_{ij}$ : مؤلفه i ام بردار شکل مود j ام،  $m_i$ : جرم طبقه i ام،  $S a_j$ : مقدار شتاب طیفی متناسب با مود j ام،

$$\Gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \psi_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_i \psi_{ij}^2}$$

: ضریب مشارکت مود j ام،  $V_{ij}$ : برش طبقه در تراز طبقه i ام از مود j ام، و  $V_i$ : برش مودال ترکیبی طبقه i ام حاصل از ترکیب تمامی مودهای لحاظ شده می‌باشد.



شکل (۳): نحوه تعیین الگوی بار اعمالی در یکی از مراحل بارگذاری روش پیشنهادی در مورد ساختمان ۹ طبقه فولادی SAC-9 تحت اثر زلزله کوبه: (a) نیروهای مودال در طبقات سه مود اول و محاسبه برش طبقات، (b) پروفیل برش طبقات برای هر مود، (c) ترکیب برش طبقات حاصل از مودهای مختلف، (d) استخراج شکل الگوی بار اعمالی از روی پروفیل برش مودال ترکیبی طبقات.

در این رابطه،  $F_i$ : مؤلفه نام بردار شکل الگوی باراعمالی می‌باشد. در گام بعدی الگوی بار تعیین شده نسبت به مجموع مؤلفه هایش طوری نرمال می‌شود که مجموع مؤلفه ها برابر با واحد شود. بردار الگوی بار نرمال شده بر اساس مقدار برش پایه افزایشی در هر مرحله بارگذاری مقیاس شده و بر سازه اعمال می‌شود.

همانطوری که شرح داده شد در روش پیشنهادی با وجود اینکه از روش‌های ترکیب مودال درجه دوم از قبیل SRSS استفاده شده است، ولی با این حال برخلاف روش FAP، الگوی بار اعمالی در تمام طبقات مقادیر مثبت نداشته در هر طبقه‌ای که مقدار برش مودال ترکیبی کمتر از مقدار طبقه بالایی باشد الگوی بار اعمالی می‌تواند مقادیر منفی اختیار کند. لذا روش پیشنهادی به خوبی می‌تواند پروفیل‌های توزیع نیروی طبقات ترازهای مختلف با جهت‌های متفاوت را که در طول تحلیل دینامیکی غیر خطی مشاهده می‌شود را به خوبی شبیه‌سازی کند، (شکل d-۳).

سپس، شکل الگوی بار اعمالی در هر مرحله از تحلیل از روی پروفیل برش مودال ترکیبی طبقات استخراج می‌شود. در واقع الگوی بار اعمالی طوری تعیین می‌شود که پروفیل برش طبقات حاصل از الگوی بار اعمالی برابر با پروفیل برش مودال ترکیبی طبقات باشد. مقدار مؤلفه‌های بردار شکل الگوی بار اعمالی از روی رابطه (۴) تعیین می‌شود (شکل d-۳). در گام بعدی الگوی بار تعیین شده نسبت به مجموع مؤلفه هایش با استفاده از رابطه (۵) نرمال می‌شود. بردار الگوی بار نرمال شده بر اساس مقدار برش پایه افزایشی در هر مرحله بارگذاری طبق رابطه (۶) مقیاس شده و بر سازه اعمال می‌شود.

$$\begin{cases} F_n = V_n \\ F_i = V_i - V_{i+1} \quad i = 1, 2, \dots, (n-1) \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{F}_i = \frac{F_i}{\sum F_i} \quad (5)$$

$$\Delta F_i = \Delta V_b \times \bar{F}_i \quad (6)$$

### ۳-۱- مراحل مختلف انجام روش پیشنهادی

مراحل مختلف انجام روش پیشنهادی در گام های متوالی زیر به طور خلاصه بیان شده است:

۱- ساخت مدل سازه‌ای که مشخصات غیرخطی مصالح و مواد در آن لحاظ شده است.

۲- تهیه طیف الاستیک ویژه محل (زلزله مورد نظر) جهت تعیین شتاب‌های طیفی در گام‌های مختلف تحلیل.

۳- انجام تحلیل مقادیر ویژه و محاسبه مشخصات مودال وضع موجود سازه از قبیل اشکال مودی  $\Psi_j$ ، فرکانس طبیعی  $\omega_j$ .

۴- محاسبه نیروهای مودال در تراز طبقات مختلف برای چند مود اول در نظر گرفته شده با استفاده از رابطه (۱).

۵- محاسبه برش‌های مودال در تراز مختلف طبقات برای چند مود اول در نظر گرفته شده با استفاده از رابطه (۲).

۶- ترکیب برش‌های مودال طبقات حاصل از مودهای مختلف با استفاده از روش‌های ترکیب مودال درجه دوم از قبیل جذر مجموع مربعات (SRSS) و محاسبه برش طبقه مودال ترکیبی در تراز طبقات مختلف با استفاده از رابطه (۳).

۷- تعیین مقدار و جهت مؤلفه‌های بردار بار افزایشی در تراز طبقات مختلف (الگوی بار اعمالی) با کسر کردن مقدار برش طبقه مودال ترکیبی هر طبقه از مقدار طبقه بالایی با استفاده از رابطه (۴).

۸- مقیاس کردن الگوی بار تعیین شده در گام (۷) براساس مقدار افزایشی برش پایه و اعمال آن بر مدل سازه‌ای.

۹- برگشت به گام سوم و تکرار فرآیند (گام‌های سوم تا هشتم) تا رسیدن به نقطه تغییر مکان هدف.

۱۰- محاسبه جابجایی‌ها، جابجایی نسبی بین طبقات، نیروی داخلی اعضای سازه‌ای و ... در نقطه تغییر مکان هدف.

### ۵- ارزیابی روش پیشنهادی

الگوریتم ارائه شده در روش پیشنهادی با استفاده از محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار Matlab [۲۶] و قابلیت‌های تحلیل سازه غیرخطی نرم‌افزار DRAIN-2DX [۲۷] به صورت یک برنامه کامپیوتری درآمده و به راحتی قابل اجرا بر روی انواع سازه‌ها می‌باشد. به منظور بررسی دقت و کارایی روش پیشنهادی، برنامه کامپیوتری تهیه شده بر روی یک نمونه ساختمان ۹ طبقه فولادی تحت اثر زلزله کوبه اعمال شده و پاسخ‌های حاصل از روش تحلیل پوش‌آور مودال با الگوی بار به هنگام شونده بر اساس برش طبقات و سایر روش‌های مطرح پوش‌آور با پاسخ‌های حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی مقایسه شده است. مشخصات رکورد زلزله کوبه مورد استفاده در تحلیل دینامیکی غیر خطی در جدول (۱) ارائه شده است و به راحتی در سایت <http://peer.berkeley.edu/smcat> قابل دسترسی است.

### ۵-۱- مدل سازه‌ای

مدل سازه‌ای مورد مطالعه در این تحقیق مربوط به ساختمان نمونه ۹ طبقه گروه تحقیقاتی SAC در منطقه لوس‌آنجلس می‌باشد که تحت عنوان SAC-9 در این مقاله از آن یاد می‌شود. ساختمان SAC-9 ساختمانی ۹ طبقه با سیستم قاب خمشی مقاوم فولادی پیرامونی می‌باشد که توسط مهندسین مشاور برای فاز II پروژه تحقیقاتی گروه SAC طراحی شده است. در طراحی این سازه ملزومات لرزه‌ای آیین‌نامه UBC 1994 برای منطقه لوس‌آنجلس رعایت شده است. برای کسب اطلاعات بیشتر در این خصوص خوانندگان می‌توانند به مرجع [۲۸] مراجعه نمایند. در این تحقیق فقط یکی از قاب‌های مقاوم خمشی ۵ دهانه پیرامونی در جهت شمال-جنوب به صورت دوبعدی با لحاظ کردن نصف وزن ساختمان مدل شده است.

جدول (۱): مشخصات رکورد زلزله مورد استفاده در تحلیل‌ها

زلزله	سال	بزرگا (M)	ایستگاه	مولفه	نزدیکترین فاصله تا گسل (KM)	PGA (g)	PGV (cm/s)	شرایط خاک (CWB)
کوبه	1995	6.9	0 KJMA	0	0.6	0.821	81.3	B

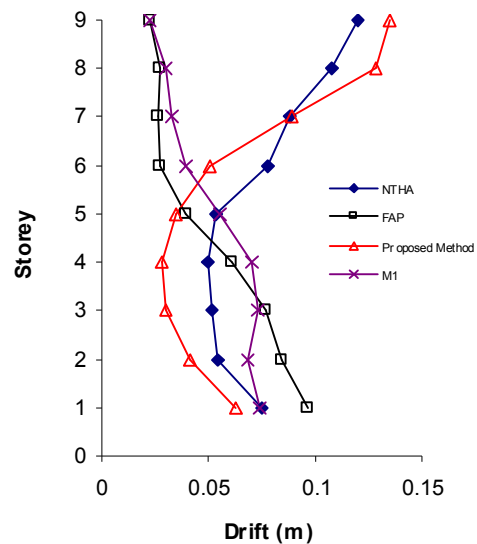
## ۵-۲- پیش‌بینی جابجایی نسبی بین طبقات

به منظور ارزیابی دقت روش پیشنهادی در تخمین جابجایی نسبی بین طبقات به عنوان یک شاخص مهم در خسارت‌پذیری سازه‌ها، نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی به عنوان مبنای کار لحاظ شده و نتایج حاصل از روش پیشنهادی و سایر روش‌های پوش‌آور با این مبنا مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از روش پوش‌آور پیشنهادی Proposed Method، روش پوش‌آور مودال با الگوی بار به هنگام شونده بر اساس نیروی طبقات FAP، و روش پوش‌آور سنتی با الگوی بار ثابت بر اساس مود اول M1، همچنین نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی برای سازه SAC-9 تحت اثر زلزله کوبه در شکل (۴) نشان داده شده است.

همانطوری که در شکل (۴) مشاهده می‌شود روش پیشنهادی با دقت مناسبی توانسته پاسخ‌های حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی سازه ۹ طبقه فولادی SAC-9 تحت اثر زلزله کوبه را تقریب بزند. روش مذکور در مقایسه با سایر روش‌های مورد مطالعه از دقت بالاتری برخوردار است. همچنین مشاهده می‌شود که پاسخ‌های حاصل از روش FAP در مقایسه با روش سنتی M1 نه تنها بهبود نیافته بلکه تا حدودی نیز خطا افزایش یافته است. علت این امر قبلاً در بخش ۲ شرح داده شده است و این نشان می‌دهد که در روش FAP به خاطر استفاده از قوانین ترکیب مودال درجه دوم نه تنها اثر تغییر علامت در طبقات مختلف موده‌های بالاتر لحاظ نمی‌شود بلکه شکل مود اول نیز در این روش از دست می‌رود.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش تحلیل پوش‌آور پیشرفته مودال به هنگام شونده با یک بار اجرا ارائه شده است. به طوریکه اثرات موده‌های بالاتر، اندرکنش بین موده‌ها در ناحیه غیر الاستیک، تغییر در مشخصات مودال سازه ناشی از تسلیم اعضاء، زوال سختی و محتوای فرکانسی یک طیف طراحی یا طیف پاسخ ویژه در آن لحاظ شده است. همچنین از آنجائیکه در هر مرحله بارگذاری شکل الگوی بار اعمالی از روی پروفیل برش مودال ترکیبی طبقات تعیین می‌شود لذا تغییر علامت نیروهای مودال در طبقات مختلف موده‌های بالاتر نیز لحاظ می‌شود. دقت روش پیشنهادی بر روی سازه ۹ طبقه فولادی SAC-9 تحت اثر زلزله کوبه مورد ارزیابی قرار گرفته و مشاهده شده است روش پیشنهادی از دقت مناسبی در تخمین جابجایی نسبی بین طبقات برخوردار است.



شکل (۴): پروفیل جابجایی نسبی طبقات حاصل از روش‌های مختلف تحلیل پوش‌آور و تحلیل دینامیکی غیر خطی برای ساختمان ۹ طبقه فولادی SAC-9 تحت اثر زلزله کوبه

- 1- Applied Technology Council (1996) "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", ATC-40, Volume 1, Redwood City.
- 2- American Society of Civil Engineers (2000) "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- 3- European Committee for Standardization (2002) "Eurocode8: Design of Structures for Earthquake Resistance", Part 1, European standard prEN 1998-1, Draft No.5, May 2002, CEN, Brussels, Belgium.
- 4- Otani, S. Hiraishi, H. Midorikawa, M. & Teshigawara M. (2000) "New seismic design provisions in Japan", Uzumeri Symposium, ACI Annual Convention, Toronto.
- 5- Krawinkler, H. & Seneviratna, GDPK. (1998) "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation", Engineering Structures, Vol. 20, No. 4-6, pp. 452-464.
- 6-Kim, S. & D'Amore, E. (1999) "Push-over analysis procedures in earthquake engineering", Earthquake Spectra, Vol. 15, No. 3, pp. 417-434.
- 7- Applied Technology Council (2005) "Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures", (ATC-55 Project), FEMA-440. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C..
- 8-Paret, T.F. Sasaki, K.K. Elibeck, D.H. & Freeman, S.A. (1996) "Approximate inelastic procedures to identify failure mechanism from higher mode effects", Proceedings of the eleventh world conference on earthquake engineering.
- 9- Sasaki, K.K. Freeman, S.A. & Paret, T.F. (1998) "Multi-mode pushover procedure (MMP) – a method to identify the effects of higher modes in a pushover analysis", Proceedings of the sixth U.S. national conference on earthquake engineering.
- 10- Moghadam, A.S. (2002) "A pushover procedure for tall buildings", Proceedings of the twelfth European conference on earthquake engineering.
- 11- Chopra, A.K. & Goel, R.K. (2002) "A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 31, pp. 561-582.
- 12-Hernandez-Montes, E. Kwon, O-S. 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.
- 13- Chopra, A.K.; Goel, R.K. and Chinatana-pakdee, C. (2004). "Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands" Earthquake Spectra, August, 2004, Vol. 20, No. 3, pp. 757-778.
- 14- Shakeri, K. Shayanfar, M.A. & 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.
- 15- Mori, Y; Yamanaka, T; Luco, N. and Cornell, C.A. (2006) "A static predictor of seismic demand on frames based on a post-elastic deflected shape" Earthquake Engineering and Structure Engineering 2006; 35:1295–1318.
- 16- Gupta, B. Kunnath, S.K. (2000) "Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures", Earthquake Spectra, Vol. 16, No. 2, pp. 367-391.
- 17- Kalkan, E. Kunnath, S.K. (2006) "Adaptive modal combination procedure for nonlinear static analysis of building structures". Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 11, pp. 1721-1731.
- 18- Matsumori, T. Otani, S. Shiohara, H. & Kabeyasawa, T. (1999) "Earthquake member deformation demands in reinforced concrete frame structures", Proceedings of the US-Japan Workshop on performance-based earthquake engineering methodology for RC building structure.
- 19- Kunnath, S.K. (2004) "Identification of modal combination for nonlinear static analysis of building structures", Computer-aided Civil Engineering, Vol. 19 pp. 246-259.
- 20- Jan, T.S. Liu, M.W. & Kao, Y.C. (2004) "An upper-bound pushover analysis procedure for estimating the seismic demands of high-rise buildings", Engineering Structures, Vol. 26, pp.117-128.
- 21- Requena, M. and Ayala, G. (2000). "Evaluation of a simplified method for the determination of the non-linear seismic response of RC frames" Proceedings of the Twelfth World Conference on Earthquake Engineering, Paper 2109. New Zealand Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand.
- 22- Elnashai, A.S. (2001) "Advanced inelastic static (pushover) analysis for earthquake applications", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 12, No. 1, pp. 51-69.
- 23- Antoniou, S. Pinho, R. (2004) "Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 497-522.
- 24- Antoniou, S. Pinho, R. (2004) "Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure", Journal Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 5, pp. 643-661.
- 25- Papanikolaou, V.K; Elnashai, A. S. and Pareja, J.F. (2006) "Evaluation of conventional and adaptive pushover analysis II: Comparative results" J Earthquake Eng 2006;10(1):127–151.
- 26- Math Works Inc. (2005) "MATLAB, the language of technical computing", Version 7.1.0.246 (R14), Natick Massachusetts.
- 27- Prakash, V. & Powell, G. H. (1993) "DRAIN-2DX Base Program Description and User Guide", Version 1.10, Report No. UCB/SEMM-93/17, University of California at Berkeley.
- 28- Gupta, A. & Krawinkler, H. (1999) "Seismic demands for performance evaluation of steel moment resisting frame structures" (SAC Task 5.4.3). Report no. 132. Palo Alto, CA: John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University.