



# بررسی طیف ظرفیت تغییر مکان قاب فولادی چند طبقه با استفاده از روش انرژی بدون تعیین نقطه کنترل

\* علی گل افشار<sup>۱</sup>، فرهاد دانشجو<sup>۲</sup>

## چکیده

در ترسیم طیف ظرفیت تغییر مکان سازه یک درجه آزادی معادل در تحلیل‌های استاتیکی غیر خطی فزاینده جهت بررسی عملکرد سازه، نیاز به در نظر گیری یک نقطه از سازه به عنوان نقطه کنترل می باشد که در قاب‌های ساختمانی معمولاً مرکز جرم بام لحاظ می‌گردد. در این مقاله با انجام تحلیل استاتیکی فزاینده غیر خطی، طیف ظرفیت تغییر مکان از طریق دو روش مبتنی بر انرژی بدون نیاز به تعیین نقطه کنترل، برای دو قاب فولادی کوتاه و میان مرتبه بصورت دو بعدی تحت اثر مود اصلی و مودهای بالاتر محاسبه شده و با طیف ظرفیت تغییر مکان طبقات مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. بررسی نتایج نشان می دهد که دو روش مبتنی بر انرژی، طیف ظرفیت تغییر مکان را نزدیک به یکدیگر ارائه می نمایند و مقایسه آنها با طیف ظرفیت تغییر مکان با در نظر گیری نقطه بام به عنوان نقطه کنترل نشان می‌دهد که طیف ظرفیت تغییر مکان نقطه بام در مود اول بر طیف ظرفیت تغییر مکان حاصل شده از دو روش انرژی منطبق است و در مودهای بالاتر طیف ظرفیت تغییر مکان نقطه بام مقادیر بزرگتری را نسبت به دو روش انرژی از خود نشان داده است.

## کلمات کلیدی

طیف ظرفیت تغییر مکان، نقطه کنترل، سازه یک درجه آزادی معادل، تحلیل استاتیکی غیر خطی فزاینده

\* ۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، [a.golafshar@modares.ac.ir](mailto:a.golafshar@modares.ac.ir)

۲. عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس، [danesh\\_f@modares.ac.ir](mailto:danesh_f@modares.ac.ir)



ریاضی روش Montez در محاسبه طیف ظرفیت تغییر مکان در انتهای گام  $i$  ام در تحلیل استاتیکی فزاینده سازه تحت مود  $n$  ام در رابطه (۱) آورده شده است.

$$S_{d,n}^i = \sum \Delta D_n^i = \sum \left( \sum (F_{n,j}^i \Delta d_{n,j}^i) / V_n^i \right) \quad (1)$$

که در رابطه (۱)  $S_{d,n}^i$  برابر ظرفیت تغییر مکان سازه یک درجه آزادی در گام  $i$  ام در مود  $n$  ام می باشد.

$\Delta D_n^i$  برابر نمو تغییر مکان سازه یک درجه آزادی معادل در گام  $i$  ام در مود  $n$  ام می باشد.

$F_{n,j}^i$  نیروی وارد بر طبقه  $j$  ام در گام  $i$  ام در مود  $n$  ام می باشد.

$\Delta d_{n,j}^i$  نمو تغییر مکان طبقه  $j$  ام در گام  $i$  ام در مود  $n$  ام می باشد.

$V_n^i$  برش پایه در گام  $i$  ام و در مود  $n$  ام می باشد.

فرمولاسیون دوم مربوط به کار آقای Paraducci و همکاران است که در روش آنها انرژی ورودی به سازه با فرمولاسیون کمی متفاوت از روش آقای Montez و همکاران محاسبه شده و با انرژی کرنشی سازه یک درجه آزادی معادل می گردد و از این تعادل میزان نمو تغییر مکان سازه یک درجه آزادی معادل در هر گام محاسبه می گردد. بیان ریاضی روش آقای Paraducci در رابطه (۲) ارائه گردیده است.

(۲)

$$S_{d,n}^i = \sum \Delta D_n^i = \sum \left( \sum \left( \left( F_{n,j}^i + \frac{1}{2} \Delta F_{n,j}^i \right) \times \Delta d_{n,j}^i \right) / \left( V_n^i + \frac{1}{2} \Delta V_n^i \right) \right)$$

که در رابطه (۲)  $\Delta F_{n,j}^i$  برابر نمو نیروی وارد بر طبقه  $j$  ام در گام  $i$  ام در مود  $n$  ام می باشد.

$\Delta V_n^i$  برابر نمو برش پایه در گام  $i$  ام و در مود  $n$  ام بوده و بقیه پارامترها مطابق تعاریف موجود در رابطه (۱) می باشد. در تعیین میزان  $S_{d,n}^i$  در روش معمول براساس تغییر مکان نقطه کنترل از رابطه (۳) مطابق زیر استفاده میشود.

$$S_{d,n}^i = \frac{u_{n,control}^i}{\Gamma_n \phi_{n,control}} \quad (3)$$

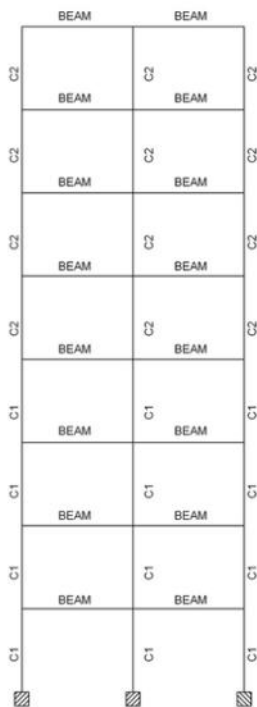
که در رابطه (۳)  $u_{n,control}^i$  تغییر مکان نقطه کنترل در گام  $i$

امروزه روش تحلیل لرزه ای استاتیکی فزاینده در بسیاری از آیین نامه ها [۱، ۲] وجود دارد و هدف از آن تعیین ظرفیت در برابر تقاضا و بررسی عملکرد سازه در تغییر مکان هدف می باشد. منحنی ظرفیت از رسم برش پایه در برابر تغییر مکان بام بدست می آید و سطح زیر این منحنی توانایی سازه را در استهلاک انرژی نشان می دهد. استفاده از تغییر مکان نقطه بام یک شاخص کلی از ظرفیت است و در صورت تحلیل استاتیکی فزاینده سازه تحت اثر مودهای بالاتر آنچنانکه در مطالعات Goel, Chopra [۳، ۴] نشان داده شده است در بعضی موارد حرکت نقطه بام در مودهای بالاتر معکوس می گردد و منجر به معکوس شدن منحنی ظرفیت می گردد. لذا با توجه به وابستگی طیف ظرفیت تغییر مکان به انتخاب محل نقطه کنترل، انتخاب نقطه کنترل مخصوصاً در تحلیلهای استاتیکی تحت اثر مودهای بالاتر مشکل می باشد لذا برای اجتناب از تعیین محل نقطه کنترل روشهایی بر اساس انرژی وجود دارد که تغییر مکان سازه یک درجه آزادی معادل را بدون در نظر گیری نقطه کنترلی خاصی بر روی سازه مشخص می نماید. در این مقاله دو روش ارائه شده توسط آقای Montez [۵] و همکاران و روش آقای Paraducci [۶] و همکاران در محاسبه طیف ظرفیت تغییر مکان، ارائه شده و کاربرد آنها در مورد دو نوع قاب خمشی فولادی در مودهای متفاوت بررسی گردیده است. همچنین طیف تغییر مکان بدست آمده از این دو روش با طیف تغییر مکان طبقات مختلف به عنوان نقطه کنترل مقایسه گردیده است.

## ۲ - بررسی فرمولاسیون ریاضی

فرمولاسیون روش پیشنهادی آقای Montez و همکاران برای محاسبه نمو ظرفیت تغییر مکان از تقسیم نمو انرژی ورودی به سازه چند درجه آزادی در گام  $i$  ام بر میزان برش پایه در همان گام بدست می آید و میزان مطلق ظرفیت تغییر مکان در انتهای هر گام از مجموع نموهای محاسبه شده تا انتهای همان گام بدست می آید. بیان





شکل (۱): نمای قابهای فولادی مورد مطالعه

مقطع بکاررفته در المانهای تیر و ستون در جدول (۱) بیان شده است. سازه های مورد تحلیل بر اساس مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان طراحی گردیده اند [۸].

جدول (۱): مشخصات مقاطع تیر و ستون

Beam	IPE24
C1	BOX 32X32X1.5
C2	BOX 30X30X1.2
C3	BOX 30X30X1

الگوی پخش بار جانبی بر اساس شکل مودهای ارتعاش الاستیک سازه می باشد. ۳ مود اول ارتعاشی قاب ۸ طبقه در شکل (۲) نشان داده شده است.

ام و مود n ام می باشد.

$\Gamma_n$  ضریب مشارکت مود n ام در جهت اعمال بار میباشد.

$\phi_{n,control}$  میزان دامنه جابجایی نقطه کنترل در بردار شکل مود n ام و در جهت اعمال بار میباشد.

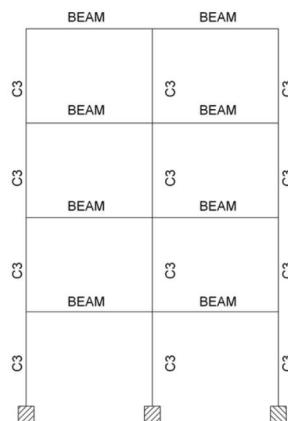
مقدار ظرفیت شتاب ( $S_{a,n}^i$ ) سازه یک درجه آزادی معادل در گام i ام و مود n ام نیز از رابطه (۴) قابل محاسبه میباشد.

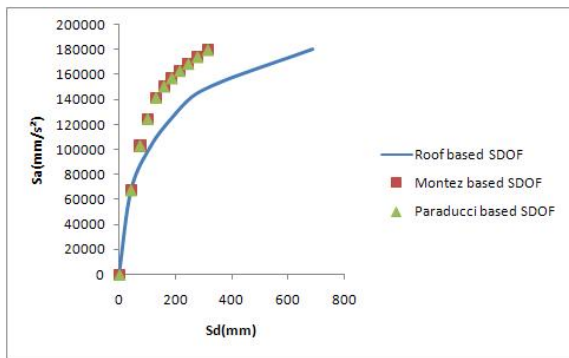
$$S_{a,n}^i = \frac{V_n^i}{M_{effective,n}} \quad (4)$$

که در رابطه (۴)  $M_{effective,n}$  جرم موثر مود n در جهت اعمال بار و  $V_n^i$  برش پایه در گام i ام و در مود n ام میباشد.

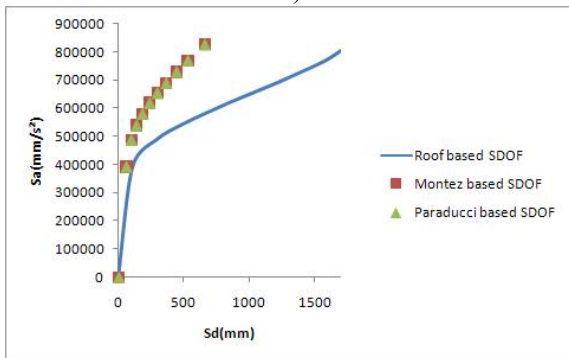
### ۳- کاربرد روش Paraducci و Montez

کاربرد دو روش ارائه شده در مورد دو قاب فولادی دو بعدی با اتصالات گیردار خمشی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل اول یک قاب فولادی دو دهانه و چهار طبقه بوده و مدل دوم یک قاب فولادی دو دهانه و هشت طبقه می باشد بار ثقلی وارد در طبقات یکسان بوده و برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر در طول تیر می باشد. رفتار غیر خطی در اعضا با در نظر گیری المانهای فایبر در مقطع و طول المانها می باشد که بر اساس رفتار غیر خطی ماده میتواند گسترش رفتار غیر خطی را در مقطع و طول اعضا پیش بینی نماید. نمای دو مدل در شکل (۱) آورده شده است. برای انجام تحلیلهای غیر خطی در این قسمت از نرم افزار seismostruc [۷] استفاده شده است.



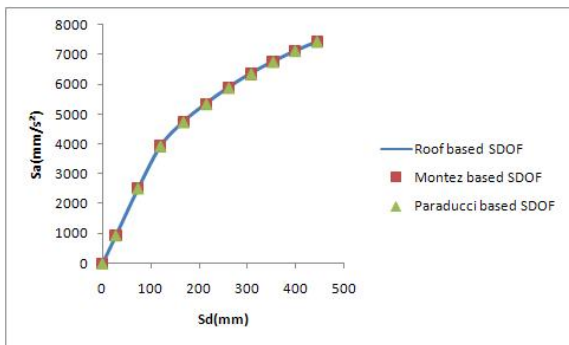


b)

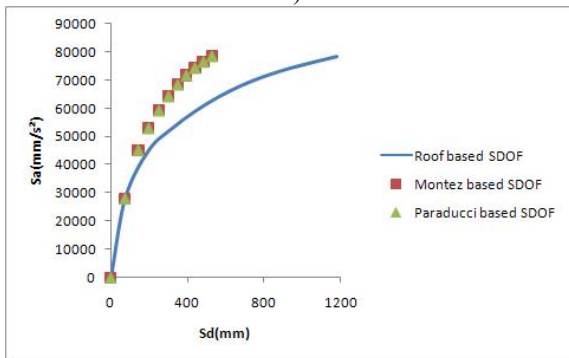


c)

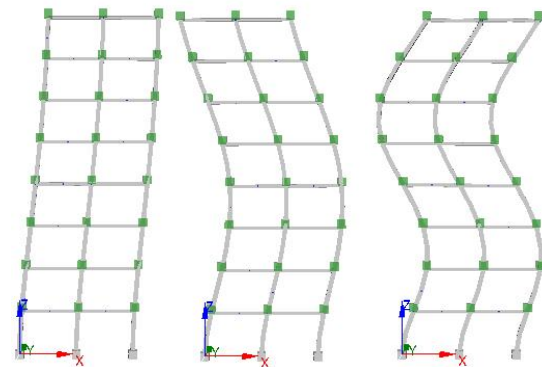
شکل (۳): طیف ظرفیت تغییر مکان - شتاب بام از روش معمول و روش انرژی در قاب چهار طبقه: (a) مود اول (b) مود دوم (c) مود سوم



a)

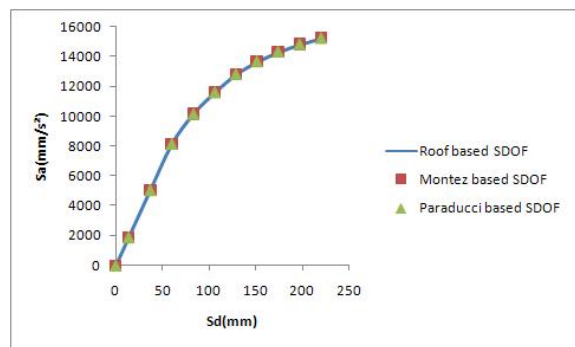


b)



شکل (۲): الگوی سه مود طبیعی ارتعاش قاب هشت طبقه

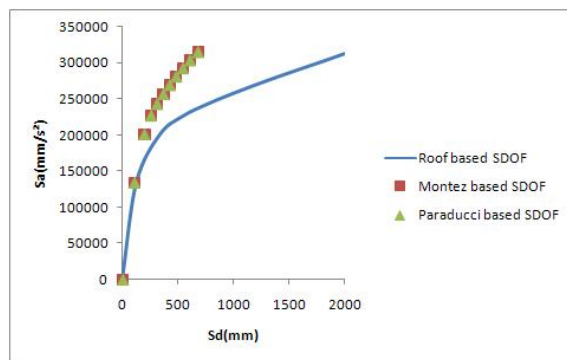
هر دو قاب تا رسیدن نقطه بام به میزان  $0,025$  ارتفاع کلی قابها آنالیز گردیده اند. در اشکال (۳) و (۴) طیف ظرفیت تغییر مکان - شتاب نقطه بام و روش Montez و Paraducci تحت اثر سه مود اول برای دو قاب فولادی ۴ و ۸ طبقه نشان داده شده است. در محاسبه ظرفیت تغییر مکان سازه یک درجه آزادی معادل بر اساس نقطه بام در روش معمول از رابطه (۳) استفاده شده است و برای تعیین طیف ظرفیت تغییر مکان، بر اساس روش انرژی از روابط (۱) و (۲) استفاده گردیده است. ملاک محاسبه طیف ظرفیت شتاب نیز رابطه (۴) می باشد.



a)



از بررسی طیف ظرفیت تغییر مکان - شتاب ارائه شده در اشکال (۳) و (۴) و با توجه به نتایج مشابه روش Montez و روش Paraducci در موده‌های بالاتر، در جدول‌های (۲) تا (۵) میزان طیف ظرفیت تغییر مکان در موده‌های دوم و سوم در روش معمول و در هر دو قاب فولادی با در نظر گیری طبقات مختلف به عنوان نقطه کنترل و رابطه (۳) با طیف ظرفیت تغییر مکان بر اساس روش انرژی مطابق رابطه (۱) مقایسه گردیده اند. علامت منفی در جداول نشان دهنده تغییر جهت حرکت در طبقه مورد نظر میباشد.



c)

شکل (۴): طیف ظرفیت تغییر مکان - شتاب بام از روش معمول و روش انرژی در قاب هشت طبقه (a: مود اول (b) مود دوم (c) مود سوم

جدول (۲): مقایسه طیف ظرفیت تغییر مکان در طبقات مختلف بر اساس روش معمول و انرژی در مود دوم و قاب چهار طبقه

گام	طیف ظرفیت تغییر مکان (میلیمتر)				روش انرژی
	روش معمول				
	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	
۱	۳۹	۳۹	۳۴	۴۳	۴۰
۲	۵۸	۵۴	-۳	۱۱۴	۷۳
۳	۷۰	۶۱	-۵۵	۱۸۶	۱۰۰
۴	۸۶	۷۳	-۱۰۴	۲۵۸	۱۳۰
۵	۹۹	۸۴	-۱۶۴	۳۲۹	۱۵۸
۶	۱۱۱	۹۴	-۲۲۸	۴۰۱	۱۸۶
۷	۱۲۳	۱۰۶	-۲۹۰	۴۷۲	۲۱۵
۸	۱۳۷	۱۲۰	-۳۴۶	۵۴۴	۲۴۵
۹	۱۵۵	۱۳۹	-۳۹۵	۶۱۵	۲۷۹
۱۰	۱۷۶	۱۶۲	-۴۳۴	۶۸۷	۳۱۵

جدول (۳): مقایسه طیف ظرفیت تغییر مکان در طبقات مختلف بر اساس روش معمول و انرژی در مود سوم و قاب چهار طبقه

گام	طیف ظرفیت تغییر مکان (میلیمتر)				
	روش معمول				روش انرژی
	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	
۱	۵۹	۱۰۳	۴۲	۱۱۱	۵۸
۲	۹۴	۲۵۹	۳۸	۲۹۷	۹۶
۳	۱۲۷	۳۶۴	۴۵	۴۸۳	۱۳۶
۴	۱۶۵	۴۵۲	۶۰	۶۶۹	۱۸۲
۵	۲۱۶	۵۶۸	۸۰	۸۵۵	۲۳۷
۶	۲۸۱	۷۳۸	۹۷	۱۰۴۰	۲۹۷
۷	۳۵۹	۹۳۱	۱۲۰	۱۲۲۶	۳۶۵
۸	۴۵۰	۱۱۲۶	۱۵۵	۱۴۱۲	۴۴۴
۹	۵۵۰	۱۳۲۰	۲۰۲	۱۵۹۸	۵۳۱
۱۰	۶۹۱	۱۴۷۵	۳۰۸	۱۷۸۴	۶۶۲

جدول (۴): مقایسه طیف ظرفیت تغییر مکان در طبقات مختلف بر اساس روش معمول و انرژی در مود دوم و قاب هشت طبقه

گام	طیف ظرفیت تغییر مکان (میلیمتر)								
	روش معمول							روش انرژی	
	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷		طبقه ۸
۱	۷۶	۷۶	۷۶	۷۶	۷۷	۸۹	۷۳	۷۴	۷۵
۲	۱۲۱	۱۲۱	۱۲۰	۱۱۷	۱۰۰	-۲۸۹	۲۲۸	۱۹۷	۱۴۵
۳	۱۴۵	۱۴۴	۱۴۱	۱۳۴	۹۶	-۷۸۱	۳۸۵	۳۲۰	۱۹۹
۴	۱۶۷	۱۶۶	۱۶۲	۱۵۰	۹۱	-۱۲۶۱	۵۳۹	۴۴۳	۲۵۳
۵	۱۸۵	۱۸۴	۱۷۸	۱۶۲	۸۲	-۱۷۵۹	۶۹۳	۵۶۶	۳۰۴
۶	۱۹۹	۱۹۸	۱۹۰	۱۶۹	۶۵	-۲۳۱۳	۸۵۱	۶۸۹	۳۵۲
۷	۲۱۰	۲۰۸	۱۹۹	۱۷۲	۳۸	-۲۹۳۶	۱۰۱۵	۸۱۲	۳۹۷
۸	۲۱۹	۲۱۷	۲۰۶	۱۷۶	۸	-۳۵۹۷	۱۱۸۳	۹۳۵	۴۴۲
۹	۲۲۸	۲۲۵	۲۱۳	۱۸۰	-۲۲	-۴۲۷۳	۱۳۵۲	۱۰۵۸	۴۸۷
۱۰	۲۳۶	۲۳۳	۲۲۰	۱۸۵	-۵۲	-۴۹۵۱	۱۵۲۱	۱۱۸۱	۵۳۲



جدول (۵): مقایسه طیف ظرفیت تغییر مکان در طبقات مختلف بر اساس روش معمول و انرژی در مود سوم و قاب هشت طبقه

گام	طیف ظرفیت تغییر مکان (میلیمتر)								روش انرژی
	روش معمول								
	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸	
۱	۸۲	۸۱	۸۰	۴۰	۸۴	۸۴	۸۹	۸۵	۸۳
۲	۱۵۰	۱۴۵	۱۳۴	-۸۴۲	۱۹۵	۱۶۹	-۲۲۳	۳۳۹	۱۹۴
۳	۱۷۴	۱۶۷	۱۵۱	-۱۱۷۶	۲۳۱	۱۹۰	-۷۶۱	۵۵۱	۲۵۳
۴	۱۹۵	۱۸۴	۱۶۵	-۱۳۴۳	۲۵۷	۲۰۷	-۱۳۳۶	۷۶۲	۳۰۸
۵	۲۱۸	۲۰۲	۱۷۹	-۱۴۹۱	۲۸۳	۲۲۷	-۱۹۰۹	۹۷۴	۳۶۴
۶	۲۴۲	۲۲۰	۱۹۵	-۱۶۵۰	۳۱۲	۲۴۹	-۲۴۸۰	۱۱۸۶	۴۲۱
۷	۲۶۷	۲۳۹	۲۱۰	-۱۸۳۹	۳۴۵	۲۷۴	-۳۰۴۲	۱۳۹۸	۴۸۰
۸	۲۹۵	۲۶۰	۲۲۸	-۲۰۳۷	۳۸۱	۳۰۱	-۳۵۹۵	۱۶۰۹	۵۴۰
۹	۳۲۶	۲۸۳	۲۴۸	-۲۲۷۰	۴۲۳	۳۳۴	-۴۱۳۲	۱۸۲۱	۶۰۴
۱۰	۳۶۵	۳۱۵	۲۷۴	-۲۶۷۴	۴۸۱	۳۸۳	-۴۶۱۱	۲۰۳۳	۶۷۷

متفاوت می باشند. با توجه به مدل‌های در نظر گرفته شده در این مقاله، کاربرد روش‌های انرژی را میتوان در انواع دیگری از سیستم‌های لرزه ای مقاوم نظیر مهاربندها یا دیوارهای برشی نیز مورد مطالعه قرار داد.

#### مراجع

- [1] ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Applied technology council ,1997.
- [2] FEMA-356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Prepared by american society of civil engineers for the federal emergency management agency, 2000.
- [3] R.K. Goel , A.K. Chopra ,Reversal in higher mode pushover curves and its implications on implementation of the MPA procedures, Report distributed to participants in project ATC-55, applied technology council, 2002
- [4] R.K. Goel , A.K. Chopra ,Role of higher mode pushover analyses in seismic analysis of buildings, Earthquake Spectra, 16:2 , 1027-1041 ,2005.

با توجه به نتایج مشاهده می شود بطور کلی، طیف تغییر مکان محاسبه شده از روش انرژی شباهت خاصی در مودهای بالا به طیف تغییر مکان طبقات مختلف ندارد و به عنوان یک شاخص کلی برای برآورد رفتار سیستم سازه چند درجه آزادی بصورت سازه یک درجه آزادی معادل میتواند مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۴- نتیجه گیری

با بررسی طیف ظرفیت تغییر مکان - شتاب سازه یک درجه آزادی معادل برای قابهای موجود در این مطالعه، مشاهده گردید دو روش ذکر شده در تعیین ظرفیت تغییر مکان سازه یک درجه آزادی معادل، میزان طیف ظرفیت تغییر مکان در مود اول را کاملاً مشابه با طیف ظرفیت تغییر مکان نقطه بام پیش بینی می نمایند. با بررسی مودهای بالاتر سازه نیز مشاهده گردید بطور کلی ظرفیت تغییر مکان سازه یک درجه آزادی معادل با استفاده از روش‌های Montez و Paraducci با ظرفیت تغییر مکان طبقه بام یکسان نبوده و با ظرفیت تغییر مکان طبقات مختلف نیز



- [5] E.M. Hernandez , O.S. Kwon , M.A. Aschheim , An energy-based formulation for first and multiple-mode nonlinear static (pushover) analyses, *Journal of Earthquake Engineering*, 8:1 ,69-88 , 2004.
- [6] A. Parraducci , F. Comodini , M. Lucarelli , M. Mezzi , E. Tomassoli, Energy based nonlinear static analysis, *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 2006, Geneva, Switzerland.
- [7] Seismosoft seismostruct , Acomputer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures (online) , available from [URL:http://www.seismosoft.com](http://www.seismosoft.com) , 2011.

[۸] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمانهای فولادی، تهران، نشر توسعه ایران، ۱۳۸۷.

