

## کنترل پیچش و شتاب دورانی سازه‌های جداسازی شده نامتقارن در پلان و ارتفاع تحت اثر دو مؤلفه افقی زلزله

میثم مردی<sup>۱\*</sup>، رضا عطارنژاد<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران گرایش سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد کاشان

meysam.mardi9@gmail.com

۲- استاد دانشکده عمران دانشگاه تهران

### چکیده

عدم تقارن در سازه‌های جداسازی شده، باعث ایجاد پدیده‌هایی خاص مانند پیچش در اینگونه سازه‌ها می‌شود. در این مطالعه به کنترل رفتار پیچشی و شتاب دورانی سازه‌های جداسازی شده با در نظر گرفتن نامتقارنی در پلان با استفاده از خروج از مرکزیت‌های جرمی ۲۵ و ۵۰ درصد بعد طولی سازه در یک و دو جهت به همراه نامتقارنی در ارتفاع با استفاده از کاهش سختی به میزان ۱۰ و ۳۵ درصد برای سازه‌های با تعداد طبقات ۴ و ۸ طبقه، تحت ۷ رکورد زلزله با دو مؤلفه افقی می‌باشد. با اعمال پارامترهایی از قبیل نسبت فرکانس غیرکوپله‌ی پیچشی به جانبی روسازه و سیستم جداسازی با مقادیر ۰/۸، ۱/۰ و ۱/۷ به بررسی رفتار پیچشی مدل ساده سازی شده از مدل سازه برشی واقعی، به تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌پردازیم. هدف از این مطالعه بررسی نسبت دوران بام به کف و نسبت پیچش دینامیکی به پیچش استاتیکی سازه می‌باشد. از نتایج بدست آمده می‌توان به تأثیر شدید نسبت فرکانس غیرکوپله‌ی پیچشی به جانبی سیستم جداسازی بر پیچش دینامیکی روسازه و اثر کم کاهش سختی در ارتفاع و تغییر در نسبت فرکانس غیرکوپله‌ی پیچشی به جانبی روسازه بر دوران روسازه اشاره نمود.

**واژه‌های کلیدی:** پیچش، فرکانس غیرکوپله‌ی پیچشی به جانبی، نسبت دوران بام به کف، نسبت پیچش دینامیکی به پیچش استاتیکی

### ۱- مقدمه

زمین لرزه‌ها یکی از عوامل طبیعی هستند که از گذشته‌هایی دور زندگی انسان‌ها را دچار مشکل نموده‌اند. جداسازی لرزه-ای، یک روش نوین برای طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله است. مشخصه‌های اصلی یک سیستم جداساز عبارت است از: انعطاف‌پذیری افقی برای افزایش پریود سازه و کاهش اثرات زلزله، اتلاف انرژی ورودی به سازه جهت کاهش تغییر مکان‌های روسازه و همینطور وجود سختی اولیه کافی در تغییر مکان‌های کوچک برای تأمین صلبیت در مقابل بارهای محیطی در حد تحمل سیستم. در این پژوهش مسأله اصلی نحوه تأثیر تغییرات سختی در ارتفاع و خروج از مرکزیت جرم در پلان بر روی رفتار لرزه‌ای سازه جداسازی شده می‌باشد. کارهای تحلیلی انجام شده در مورد ساختمان‌های جدا شده از پایه، بیشتر با ایده آل سازی دو بعدی سازه انجام گرفته است که عموماً برای ساختمان‌های متقارن یا ساختمان‌های با خروج از مرکزیت کم، معتبر می‌باشند، حال آنکه بررسی رفتار سه بعدی اینگونه سازه‌ها می‌تواند ملاک دقیق‌تری برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای آن‌ها باشد. ساختمان‌های امروزی دارای تجهیزات حساس و گران قیمتی‌اند که برای امور خدماتی، بازرگانی، آموزشی و پزشکی از اهمیت زیادی برخوردارند و در اکثر مواقع نیاز به سرویس دهی بی‌وقفه و حفظ آن‌ها در هنگام وقوع زمین لرزه و یا بعد از آن می‌باشد.

### ۲- مروری بر تحقیقات گذشته و ادبیات فنی موضوع

در مطالعه جانگید و داتا [1]، برای بررسی اثر روسازه بر سیستم جداسازی، از مدلی با ۳ درجه آزادی بهره گرفتند. جداگرها بصورت دو خطی فرض شدند و دریافتند که اگر سازه انعطاف پیچشی زیادی داشته باشد رفتار مناسبی از جداساز بدست نمی‌آید. در مطالعه‌ای دیگر، جانگید و داتا [2]، مدلی با ۳ درجه آزادی را مجدداً مورد استفاده قرار دادند با این تفاوت که برای حالت غیرخطی جداسازها مدل رفتاری متفاوت و پیچیده‌تری استفاده شد. این مدل اندرکنشی بین رفتار جداساز در جهت X و جهت Y در نظر می‌گیرد، یعنی جداساز در حالت غیرخطی در دوجهد بصورت مستقل عمل نمی‌نماید. این مدل رفتاری جداساز، مدل پارک و همکاران [3]، نامیده می‌شود. جانگید و کلی [4]، مدلی ساده ارائه نمودند متشکل از یک دال بر روی چند جداگر؛ نویسندگان بعنوان راهنمایی عمومی توصیه نموده‌اند که چیدمان جداسازها به گونه‌ای باشد که فرکانس پیچشی ۱/۲ برابر فرکانس جانبی باشد تا بتوان از روی همگذاری مودها با دقت قابل قبول استفاده نمود. در تحقیقات صورت گرفته توسط تنا و گومز [5]، اثر زلزله در یک و دوجهد بر روی سازه با خروج از مرکزیت در یک و دوجهد در روسازه بررسی شده است. نتایج حاصل از این تحقیقات بیانگر این نکته است که، زاویه‌ای که جابجایی حداکثر در آن رخ می‌دهد در سازه‌های متقارن و نامتقارن متفاوت است. در تحقیقات انجام گرفته توسط خوشنودیان و عزیز [6]، از همان ابتدا بررسی‌ها بر روی سازه برشی انجام شده است و مجموع جداسازها با چهار جداساز مدل شده‌اند. فرض سازه بصورت برشی دارای این مزیت است که امکان تغییر در محل مراکز جرم و سختی و همینطور امکان تغییر در مقدار زمان تناوب انتقالی سازه، نسبت فرکانس پیچشی به جانبی روسازه و نسبت فرکانس پیچشی به جانبی سیستم جداسازی، به راحتی وجود دارد. بررسی‌ها بر روی سه نوع سازه ۲ و ۵ و ۸ طبقه انجام گرفته است. نسبت فرکانس پیچشی به جانبی روسازه بین ۰/۸ ، ۱/۰ و ۱/۷ و نسبت فرکانس پیچشی به جانبی سیستم جداسازی بین ۰/۸ ، ۱/۰ و ۱/۷ تغییر می‌نماید. آنچه به عنوان نتیجه‌گیری از انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی ارائه شده است این است که روش محاسبه پیچش به وسیله ضرب مقدار برش پایه در خروج از مرکزیت، مقدار پیچش را بسیار کمتر از مقدار واقعی که در پیچش دینامیکی مشاهده می‌شود، ارائه می‌کند. ادیب رضانی و همکارانش [7]، در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که در سازه‌های نامتقارن با سیستم جداسازی هیستریک الاستومریک، اگر مرکز سختی جداسازها منطبق بر مرکز جرم روسازه باشد، ممان پیچشی حتی در سازه با خروج از مرکزیت بزرگ نیز کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. دنگ و هو [8]، نیز به بررسی تأثیر پارامترهای خروج از مرکزیت سختی و جرم در روسازه، خروج از مرکزیت در جداساز و سختی روسازه بر رفتار پیچشی سازه‌های جداسازی شده پرداختند. این نتیجه بدست آمد که بزرگنمایی پیچشی می‌تواند تحت تأثیر خروج از مرکزیت جداساز باشد و همچنین پاسخ پیچشی سازه تحت تأثیر خروج از مرکزیت جرم در روسازه و جداساز باشد.

در مطالعه پیش رو، با توجه به مطالعات گذشته سعی بر آن است با استفاده از مدل‌های سازه‌ای مختلف و تحت تأثیر پیچش‌های اعمالی و پارامترهای گوناگون دیگر از قبیل فرکانس غیرکویله‌ی پیچشی به جانبی روسازه و سیستم جداسازی لرزه‌ای، خروج از مرکزیت جرم در روسازه و دال سیستم جداسازی، کاهش سختی در ارتفاع و استفاده از سازه‌های با تعداد طبقات مختلف به آنالیز دینامیکی غیرخطی سازه‌ها با استفاده از ۷ رکورد زلزله در نرم افزار SAP2000 برای المان جداساز هسته سربی (LRB) بپردازیم. در این پژوهش هدف بررسی برخی از پاسخ‌های سازه‌ای از قبیل: ۱- نسبت دوران طبقه بام به دوران طبقه کف روسازه، که اثر پیچش حاصل از خروج از مرکزیت و دوران شکل گرفته از آن را در روسازه را بیان می‌کند؛ ۲- نسبت پیچش دینامیکی به پیچش استاتیکی روسازه، که معیاری تقریبی برای تخمین پیچش و شتاب دورانی رو سازه است. در مدل سازی‌ها از اثر سختی تیرها بر سیستم سازه‌ای صرف نظر شده و همچنین رفتار روسازه را بصورت خطی فرض می‌نماییم. بدین شکل در نهایت به مدل برشی ساده شده از سازه برشی اصلی دست می‌یابیم؛ یعنی متشکل از فنر، جرم متمرکز و چهار جداساز در چهار گوشه که بتوانند فرکانس پیچشی مورد نظر برای سیستم جداسازی را تأمین نمایند و همچنین نتایج آن‌ها منطبق بر یک مدل برشی واقعی باشد.

### ۳- روش تحقیق

در این مطالعه از آیین نامه ASCE7 2010 [9] بهره گرفته شده است. روش تحلیل سازه‌های جداسازی شده بطور کلی به دو نوع استاتیکی و دینامیکی دسته‌بندی می‌شوند. پیش از این در آیین‌نامه‌ها بدلیل اینکه تمرکز طراحی در سازه‌های جداسازی شده بر محدود کردن تغییر مکان جداسازها و بوجود آوردن رفتاری صلب برای روسازه استوار بود، روش استاتیکی معادل مورد تأکید قرار داشت. در ویرایش جدید آیین‌نامه‌ها حالت‌هایی که در آنها استفاده از تحلیل دینامیکی لازم است افزایش یافته، هرچند برای تغییر سطح حداقلی از نیروها و تغییر مکان‌های طرح، در تمامی آیین‌نامه‌ها استفاده از تحلیل استاتیکی به عنوان یک برآورد اولیه ضروری می‌باشد.

در بیشتر مسائل واقعی، میرایی سازه یک درجه آزادی را می‌توان به صورت قابل قبولی با یک میراگر ویسکوز خطی یا با یک وسیله میراکننده مدل سازی کرد. ضریب میرایی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که انرژی ارتعاشی تلف شده برابر با کل اتلاف انرژی برای تمام مکانیسم‌های میرایی سازه واقعی باشد. معمولاً تعیین خصوصیات میرایی با پیوندهای ارتعاشی طبیعی یک سازه، با تحلیل عملی نیست. نسبت‌های میرایی که از حرکت‌های کوچک سازه‌ای بدست می‌آیند نماینده میرایی‌های بالاتر در حرکت‌های سازه با شدت بیشتر نیستند. از سوی دیگر ثبت حرکت‌های سازه‌ای که دچار تسلیم قابل توجهی طی زلزله شده است نسبت‌های میرایی را بدست می‌دهند که شامل اتلاف انرژی مربوط به تسلیم مواد سازه نیز می‌شود، تحلیل دینامیکی قابل استفاده نیستند. اگر این داده‌ها در دسترس نباشند، از جدول ۱ می‌توان برای به دست آوردن میرایی مودهای مختلف استفاده نمود.

جدول ۱: مقادیر میرایی توصیه شده [9]

Stress Level	Type and Condition of Structure	Damping Ratio (%)
Working stress, no more than about $\frac{1}{2}$ yield point	Welded steel, prestressed concrete, well-reinforced concrete (only slight cracking)	2-3
	Reinforced concrete with considerable cracking	3-5
	Bolted and/or riveted steel, wood structures with nailed or bolted joints	5-7
At or just below yield point	Welded steel, prestressed concrete (without complete loss in prestress)	5-7
	Prestressed concrete with no prestress left	7-10
	Reinforced concrete	7-10
	Bolted and/or riveted steel, wood structures with bolted joints	10-15
	Wood structures with nailed joints	15-20

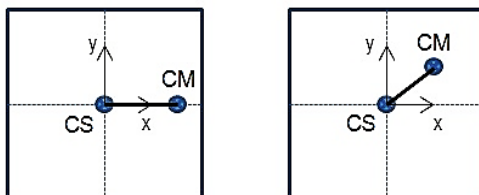
Source: N. M. Newmark, and W. J. Hall, *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif., 1982.

برای آنالیز دینامیکی غیرخطی یک سازه در برنامه SAP2000 [10]، دو روش موجود است:  
 ۱- انتگرال گیری مستقیم ۲- روش مودال یا FNA. روش انتگرال گیری مستقیم روش عمومی حل بسیاری از مسائل غیرخطی وابسته به زمان است، ولی روش FNA برای سازه‌های خطی که قسمتی از المان‌های آن رفتار غیرخطی دارند کاربرد دارد.

#### ۴- پارامترهای متغیر و پارامترهای ثابت در مدل سازی

#### ۴-۱- پارامترهای متغیر در مدل‌سازی

۱- $e_s$ ، عبارت است از فاصله بین مرکز جرم و مرکز سختی روسازه که با مقادیر ۰/۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ بعد طولی سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. خروج از مرکزیت در یک جهت و در دو جهت همانند شکل ۱ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: نحوه اعمال خروج از مرکزیت جرم در یک و دو جهت

۲- $e_b$ ، عبارت است از فاصله بین مرکز جرم و مرکز سختی سیستم جداسازی که مانند خروج از مرکزیت روسازه، در دو حالت خروج از مرکزیت یک جهته و خروج از مرکزیت دو جهته با مقادیر ۰/۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ بعد طولی سازه در مدل‌های سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳- $\Omega_{ts}$ : نسبت فرکانس پیچشی به جانبی غیرکوپله روسازه با پایه فیکس می‌باشد که از رابطه ۱ بدست می‌آید. مقدار  $\Omega_{ts}$  در این پژوهش، ۰/۸، ۱/۰ و ۱/۷ فرض می‌شود.

$$\Omega_{ts} = \frac{\omega_{\theta s}}{\omega_{x s}} = \frac{T_{\theta s}}{2\pi} = \frac{T_{x s}}{T_{\theta s}} \quad (1)$$

که در رابطه ۱،  $\omega_{x s}$  و  $T_{x s}$  به ترتیب فرکانس زاویه‌ای جانبی و زمان تناوب جانبی روسازه و  $\omega_{\theta s}$  و  $T_{\theta s}$  به ترتیب فرکانس زاویه‌ای پیچشی و زمان تناوب پیچشی روسازه می‌باشند.

۴- $\Omega_{tb}$ : نسبت فرکانس پیچشی به جانبی غیرکوپله سیستم جداسازی است که از رابطه ۲ بدست می‌آید. مقدار  $\Omega_{tb}$  در این پژوهش، ۰/۸، ۱/۰، ۱/۷ فرض می‌شود.

$$\Omega_{tb} = \frac{\omega_{\theta b}}{\omega_{x b}} = \frac{T_{\theta b}}{2\pi} = \frac{T_{x b}}{T_{\theta b}} \quad (2)$$

که در رابطه ۲،  $\omega_{x b}$  و  $T_{x b}$  به ترتیب فرکانس زاویه‌ای جانبی و زمان تناوب جانبی سیستم جداسازی، و  $\omega_{\theta b}$  و  $T_{\theta b}$  به ترتیب فرکانس زاویه‌ای پیچشی و زمان تناوب پیچشی سیستم جداسازی می‌باشند.

۵- تعداد طبقات: در این مطالعه سازه‌ها به صورت ۴ و ۸ طبقه مدل می‌شوند که زمان تناوب جانبی سازه ۴ طبقه با پایه فیکس را ۰/۶ ثانیه و سازه ۸ طبقه را ۱/۱ ثانیه فرض می‌کنیم.

۶- تغییرات سختی در ارتفاع: علاوه بر اینکه سازه با توزیع یکنواخت سختی در ارتفاع مورد مطالعه قرار می‌گیرد، برای اعمال توزیع غیریکنواخت سختی در ارتفاع، سختی جانبی و پیچشی روسازه، هر دو طبقه کاهش پیدا می‌کند. بدین منظور درصد کاهش سختی برابر ۱۰ و ۳۵ درصد در نظر گرفته شده است.

۷- جرم طبقات: برای جرم مؤثر هر طبقه، پلانی مربع شکل برای هر طبقه فرض می‌شود و به این ترتیب مقدار اینرسی جرم و شعاع ژیراسیون محاسبه خواهد شد. برای محاسبه اینرسی جرمی هر طبقه، جرم در هر مترمربع را برابر ۶۵۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته و پس از تعیین ابعاد با استفاده از رابطه ۳، اینرسی جرمی هر طبقه محاسبه می‌شود.

$$I = \frac{m(a^2 + b^2)}{12} \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $m$  جرم هر طبقه،  $a$  و  $b$  ابعاد هر طبقه می باشند که برابر یکدیگر فرض می شوند.

#### ۴-۲- پارامترهای ثابت در مدل سازی

در مقابل این چند پارامتر که در مدل های مختلف تغییر می کند، پارامترهایی نیز وجود دارند که در تمامی مدل ها یکسان و بدون تغییر باقی می ماندند که عبارتند از: ۱- زمان تناوب انتقالی سازه جداسازی شده: با فرض روسازه صلب برای تمام مدل ها ۲/۵ ثانیه در نظر می گیریم.

۲- شعاع ژیراسیون: جرم هر طبقه برابر با ۱۱۲۵۰۰ کیلوگرم و اینرسی جرمی برابر با ۵۰۰۰۰۰۰ کیلوگرم در مترمربع می باشد، لذا شعاع ژیراسیون با توجه به رابطه ۴ محاسبه و برابر مقدار ثابت ۶/۶۷ می باشد.

$$r = \sqrt{\frac{I}{m}} = \sqrt{\frac{5000000}{112500}} = 6.67m \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $m$  جرم هر طبقه،  $I$  اینرسی جرمی هر طبقه و  $r$  شعاع ژیراسیون است.

#### ۵- محاسبه سختی پیچشی و جانبی روسازه و سیستم جداسازی و محل قرارگیری جداسازها

##### ۵-۱- محاسبه سختی پیچشی و جانبی روسازه

برای تعریف جرم و سختی سازه دیدگاه حاکم، جرم و سختی حول مرکز جرم می باشد. با توجه به مقدار مشخص جرم و زمان تناوب، با انجام آنالیز مودال و با حل معادله ماتریسی ۵، می توان مقدار سختی را برای هر طبقه بدست آورد. پس از محاسبه سختی جانبی سازه با استفاده از  $\Omega_{\theta}$ ، مقدار زمان تناوب پیچشی سازه به دست می آید و با توجه به اینکه مرکز جرم به عنوان درجه آزادی در نظر گرفته شده است، این بار نیز با داشتن زمان تناوب پیچشی سازه با حل معادله ماتریسی ۶، برای اینرسی جرمی و سختی پیچشی می توان سختی پیچشی سازه حول مرکز جرم را بدست آورد. سپس با استفاده از رابطه ۷، مقدار سختی پیچشی سازه حول مرکز سختی را بدست می آوریم:

$$(K - \omega^2 M)I = 0 \quad (5)$$

$$(\bar{K}_{\theta} - \omega^2 I)I = 0 \quad (6)$$

$$K_{\theta} = \bar{K}_{\theta} - K \times e_s^2 \quad (7)$$

که در رابطه ۷،  $K$  سختی جانبی روسازه،  $K_{\theta}$  سختی پیچشی حول مرکز سختی روسازه،  $\bar{K}_{\theta}$  سختی پیچشی روسازه حول مرکز جرم و  $e_s$  فاصله مرکز جرم از مرکز سختی روسازه است.

##### ۵-۲- محاسبه سختی پیچشی و جانبی سیستم جداسازی

برای مدل سازی سیستم جداساز لرزه ای از جداسازهای لرزه ای با رفتار دو خطی مطابق شکل ۲ استفاده می کنیم. باید توجه داشت که در اینجا تنها تفاوتی که بین سازه ۴ طبقه و ۸ طبقه وجود دارد مقدار جرم مؤثر بر روی سیستم جداسازی می باشد. برای بدست آوردن پارامترهای رفتار دو خطی جداسازها ابتدا بایستی مقدار جابجائی طراحی را مشخص نموده که این مقدار از روش استاتیکی و با مفروضات روبرو حاصل می شود: میرائی معادل ویسکوز  $B_D$ ، ۱۰٪ فرض شده است. در نهایت مطابق بر روابط ارائه شده در آیین نامه، جابجائی طراحی از رابطه ۸ بدست می آید:

$$D_D = \frac{g \times S_{D1} \times T_D}{4\pi \times B_D}$$

(۸)

در رابطه ۸،  $S_{DI}$  شتاب طیفی طرح در زمان یک ثانیه که برای خاک نوع D بنا به آیین نامه ASCE7 2010 [9] برابر  $0.6g$  بدست آمده است،  $g$  شتاب ثقلی زمین،  $T_D$  زمان تناوب مؤثر طرح و  $B_D$  ضریبی است که با توجه به میرایی معادل ویسکوز در جابجائی طراحی به دست می‌آید؛ که مقدار آن در این پژوهش معادل  $1/2$  است. با قرار دادن مقادیر پارامترها در رابطه ۸، مقدار جابجائی طراحی برای جداسازها بدست می‌آید.  
 برای بدست آوردن سختی مؤثر جداسازها می‌توان از رابطه زمان تناوب و سختی مؤثر یعنی رابطه ۹ استفاده نمود:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff}}} \Rightarrow K_{eff} = 4\pi^2 \times \frac{W}{T_D^2} \quad (9)$$

سپس با استفاده از مقدار سختی مؤثر جداسازها، خواص دو خطی آنها از روابط ۱۰ الی ۱۳ بدست می‌آید:

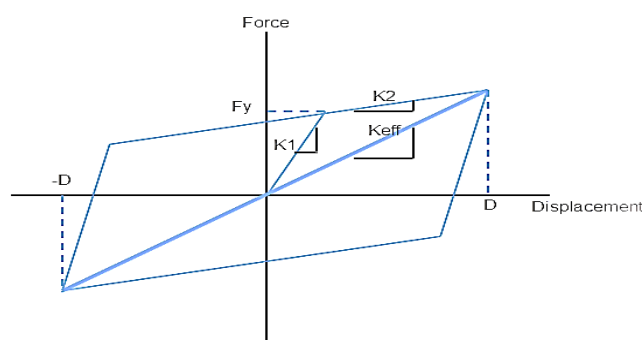
$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D_D} \quad (10)$$

$$W_D = 2\pi \times K_{eff} \times D_D^2 \times \beta \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{K_2}{K_1} \quad (12)$$

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \quad (13)$$

در روابط ۹ تا ۱۳ و با توجه به شکل ۲ داریم:  $Q$ : محل برخورد خط نیرو - تغییرمکان بعد از تسلیم با محور نیرو،  $A$ : سطح داخل نمودار نیرو - تغییرمکان،  $W_D$ : انرژی اتلاف شده در هر سیکل از چرخه هیسترسیس تحت جابجایی  $D_D$ ،  $D_y$ : جابجایی تسلیم. روند به دست آوردن مشخصات دو خطی جداسازها به صورت تکرار شونده می‌باشد، یعنی با یک فرض اولیه برای یکی از پارامترها شروع می‌شود و تا جایی که تغییرات پارامتر مورد نظر به سمت صفر میل کند، ادامه می‌یابد. در اینجا پارامتر مورد نظر  $D_y$  می‌باشد که در ابتدا آن را مساوی صفر فرض می‌کنیم، مقدار  $\alpha$  را نیز برابر  $0.2$  در نظر می‌گیریم و به این ترتیب مشخصات دو خطی المان‌های جداساز به دست می‌آیند.



شکل ۲: رفتار دو خطی نیرو - تغییر مکان جداسازها

### ۵-۳- محاسبه محل قرارگیری جداسازها

برای به دست آوردن محل قرارگیری جداسازها، با داشتن مقدار زمان تناوب پیچشی پایه و با حل یک معادله، مقدار سختی پیچشی سازه حول مرکز جرم را با استفاده از روابط ۱۴ الی ۱۶ به دست می‌آوریم:

$$K_{\theta b} = \sum_{i=1}^4 [(K_{xi} \times Y_i^2) + (K_{yi} \times X_i^2)] \quad (14)$$

$$K_{\theta b} = K_i \times 4 \times [(e_x^2 + e_y^2) + (x^2 + y^2)] \quad , x = y \quad (15)$$

$$x^2 = y^2 = \frac{K_{\theta b} - 4K_i \cdot e^2}{8} = \frac{K_{\theta b} - K \cdot e^2}{8} \quad (16)$$

که در روابط ۱۴ الی ۱۶  $X, Y$  فاصله جداساز از مرکز جرم سازه هستند و  $x, y$  فاصله جداساز از مرکز سختی سازه می باشد.  $K$  سختی جانبی مجموع جداسازها است که در این محاسبات آن را برابر  $K_2$  فرض می کنیم. همچنین  $e$  مقدار خروج از مرکزیت جرم می باشد. از طرفی  $K_{\theta b}$  از روابط ۱۷ و ۱۸ محاسبه می شود:

$$\omega_{\theta b}^2 = \frac{K_{\theta b}}{I} \quad (17)$$

$$\omega_{xb}^2 = \frac{K_2}{W} \quad (18)$$

در روابط ۱۷ و ۱۸،  $I$  برابر است با مجموع اینرسی جرمی تمامی طبقات بعلاوه جداساز و  $W$  مجموع جرم روسازه و دال جداساز می باشد.

## ۶- یافته ها

بخشی از سختی جانبی و پیچشی بدست آمده برای روسازه و سیستم جداسازی سازه های ۴ و ۸ طبقه را می توان در جداول ۲ و ۳ مشاهده نمود.

جدول ۲: سختی پیچشی و جانبی سازه چهار طبقه با کاهش ۱۰٪ سختی در ارتفاع

4 Story - Reduce Stiffness = 10 percent					
es/r	Stories	K	$K\Theta - \Omega ts=0.8$	$K\Theta - \Omega ts=1.0$	$K\Theta - \Omega ts=1.7$
0.00	1,2	104988295.7	2986333743	4666146474	13485163310
	3,4	94489466.1	2687700369	4199531827	12136646979
0.5	1,2	104988295.7	1818630297	3498443027	12317459863
	3,4	94489466.1	1636767267	3148598725	11085713877

جدول ۳: سختی پیچشی، جانبی و نیروی تسلیم جداسازهای سازه دوازده طبقه

8 Story-Base Isolation Information						
es/r= 0.25 , eb/r= 0						
$\Omega tb$	$K\Theta b$ (N.m)	x , y (m)	$K1i$ (N)	$K2i$ (N)	$Fyi$ (N)	$Dy$ (m)
0.8	151858704	3.66	6673478.21	1334695.64	102572.21	0.0153
1	237279225	4.62				
1.7	685736960.1	7.96				

۷- شتاب نگاشت های مورد استفاده، نحوه مدل سازی در نرم افزار و اعتبار سنجی مدل ها

۷-۱- شتاب نگاشت های مورد استفاده

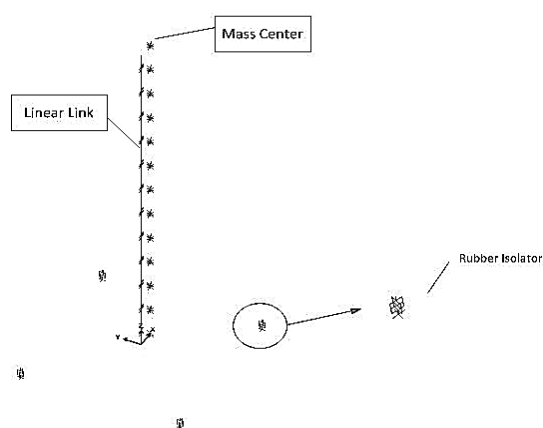
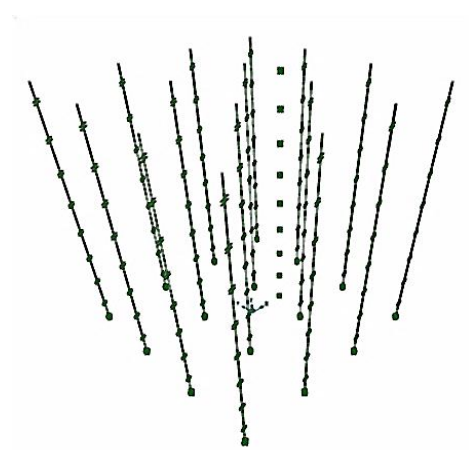
برای بررسی رفتار سازه‌های جداسازی شده، ۷ رکورد زلزله که در دو جهت افقی به سازه اعمال می‌شوند مورد استفاده قرار گرفتند. مبنای انتخاب این رکوردها محل طراحی جداسازها بوده که سایت نوع D برای طراحی آنها در نظر گرفته شده بود و بنابراین ایستگاه‌های انتخابی به نوعی بودند که در این نوع سایت قرار داشته باشند. مشخصات رکوردها در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده

Earthquake	Station	Site Class	Magnitude	PGA (g)
Duzce, Turkey	Bolu	D	7.14	0.775
Imperial Valley	El Centro	D	6.95	0.2639
Northridge 1994	Sylmar	D	6.69	0.7239
Loma Prieta	Gilroy Array	D	6.93	0.4612
Northridge 1994	Newhall	D	6.69	0.5864
Kobe, Japan 1995	Takarazuka	D	6.9	0.6935
N. Palm Springs	North Palm Springs	D	6.06	0.644

### ۷-۲- نحوه مدل سازی در نرم افزار

برای مدل نمودن طبقه پایه، ۴ جداساز با مرکز جرم دال سیستم جداسازی و مرکزسختی روسازه، به صورت BODY به یکدیگر متصل شده‌اند [10]، تا به راحتی بتوان با تغییر فاصله بین جداگرها و مرکز جرم سیستم، نسبت فرکانسی مورد نظر را بدست آورد. مدل برشی واقعی در شکل ۳ و مدل ساده شده از مدل برشی واقعی، که در نرم افزار مورد استفاده قرار گرفته است، در شکل ۴ قابل مشاهده است.



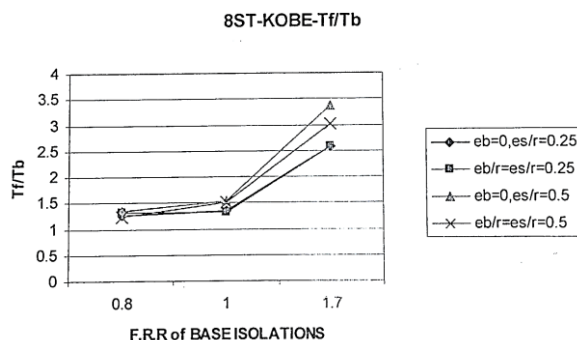
شکل ۴: مدل ساده شده سازه برشی

شکل ۳: مدل واقعی سازه برشی

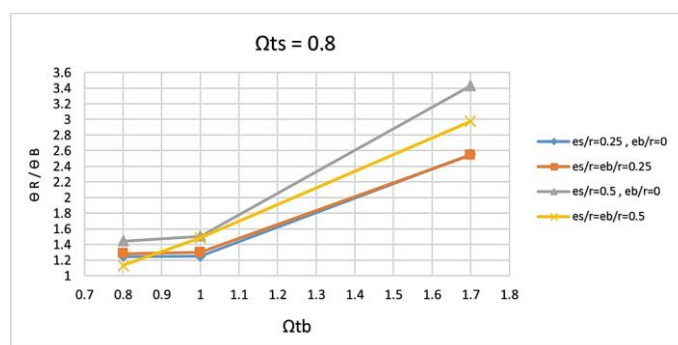
### ۷-۳- اعتبار سنجی مدل‌ها



برای بررسی صحت مدل‌های ساخته شده در این تحقیق، نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی مدل ساختمان‌های ۴ طبقه با خروج از مرکزیت در یک جهت (جهت Y) و  $\Omega_{ts} = 0.8$  تحت اثر تک مولفه افقی زلزله Kobe ژاپن، با نتایج بدست آمده برای مدل‌های معادل آن در مطالعه انجام شده در مرجع [6] مقایسه شده است. با توجه به تطبیق خوب نمودارهای ۱ و ۲ می-توان به صحت مدل‌های مورد مطالعه پی برد.



نمودار ۱: نسبت دوران بام نسبت به کف سازه هشت طبقه [6]



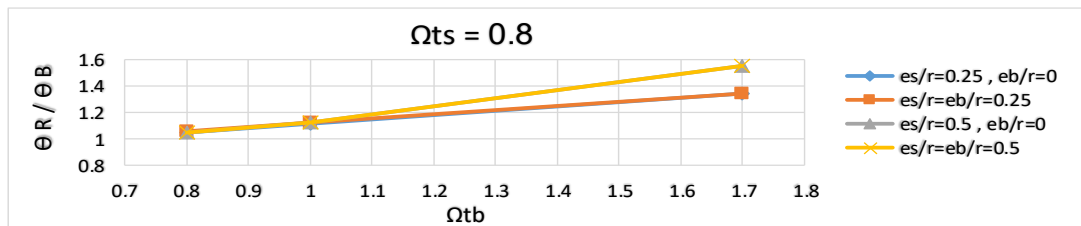
نمودار ۲: نسبت دوران بام به کف سازه هشت طبقه نامتقارن به متقارن تحت تک مولفه افقی زلزله کوبه

## ۸- بررسی نسبت دوران بام به کف سازه و نسبت پیچش دینامیکی به پیچش استاتیکی

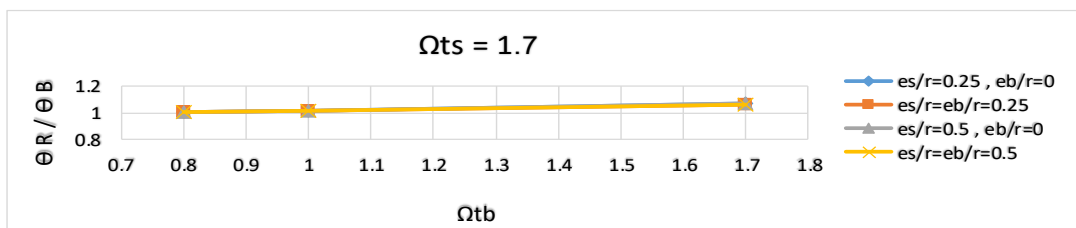
### ۸-۱- بررسی نسبت دوران بام به کف سازه

این نسبت معیاری است برای کنترل فرض حرکت صلب روسازه که اگر این فرض ۱۰٪ صحیح باشد مقدار این نسبت برابر عدد ۱ خواهد بود. با توجه به نمودارهای بدست آمده به این موضوع پی می‌بریم که فرض صلبیت روسازه، برای سازه‌های نامتقارن در پلان فرضی اشتباه است. برای سازه چهارطبقه در نمودارهای شماره ۳ و ۴ (کاهش سختی ۳۵٪ در ارتفاع)، شاهد اختلاف به ترتیب ۱۶٪ و ۵٪ در  $\Omega_{tb} = 1.7$  هستیم و این اختلاف برای سازه ۸ طبقه در نمودار شماره ۵ و ۶ (مقارن در ارتفاع و  $\Omega_{tb} = 1.7$ )، به ترتیب به اعداد ۳/۸ و ۱/۲۳ رسیده است با کاهش  $\Omega_{ts}$  از ۱/۷ به ۱ و بعد از آن به ۰/۸، شاهد افزایش بیشتر این نسبت هستیم و دلیل آن کاهش سختی پیچشی و رفتار نرم روسازه است. بیشترین اختلاف را در جایی مشاهده می‌شود که  $\Omega_{ts}$  برابر ۱/۷ است و دلیل آن رفتار سخت سیستم جداسازی در مقابل دوران است و اکثریت دوران وارده را روسازه متحمل می‌شود.

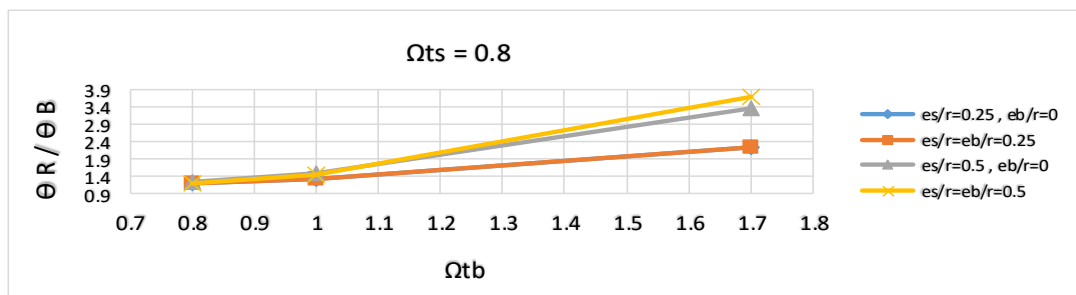
برای حالت خروج از مرکزیت در دو جهت برای سازه چهارطبقه به اعداد تقریباً یکسانی می‌رسیم مانند نمودار ۷، ولی برای سازه هشت طبقه در نمودار ۸ با اختلافی ۱۰ درصدی برای سازه با خروج از مرکزیت  $e_s = 0.5$  مواجه شدیم.



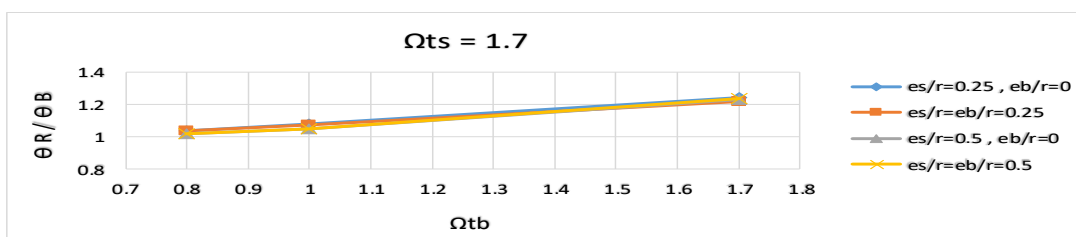
نمودار ۳: نسبت دوران بام به کف سازه چهار طبقه، ۳۵٪ کاهش سختی (D)، با خروج از مرکزیت یک جهته



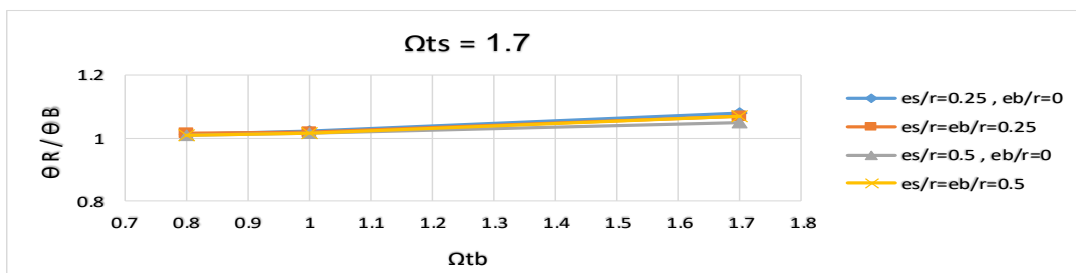
نمودار ۴: نسبت دوران بام به کف سازه چهار طبقه، ۳۵٪ کاهش سختی (D)، با خروج از مرکزیت یک جهته



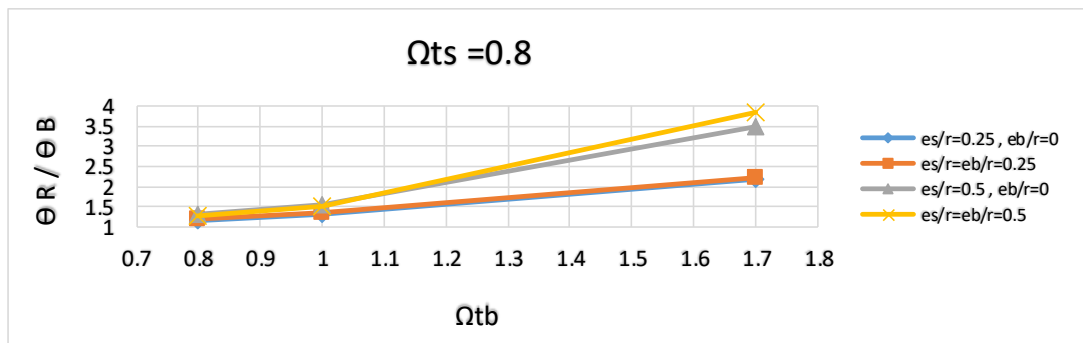
نمودار ۵: نسبت دوران بام به کف سازه هشت طبقه، (B)، با خروج از مرکزیت یک جهته



نمودار ۶: نسبت دوران بام به کف سازه هشت طبقه، (B)، با خروج از مرکزیت یک جهته



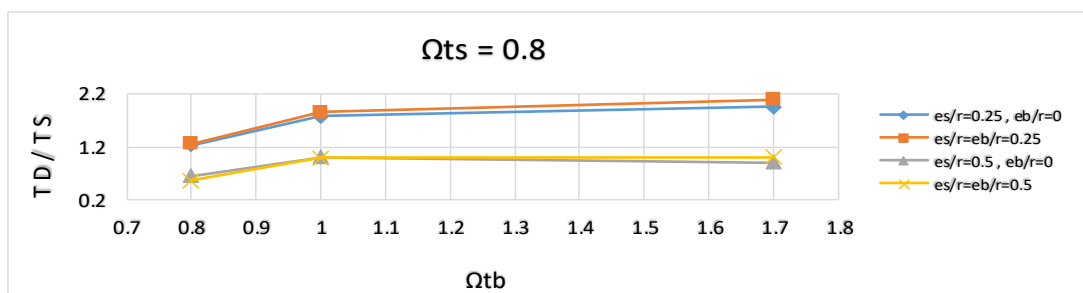
نمودار ۷: نسبت دوران بام به کف سازه چهار طبقه، ۱۰٪ کاهش سختی در ارتفاع (D)، خروج از مرکزیت دوجته



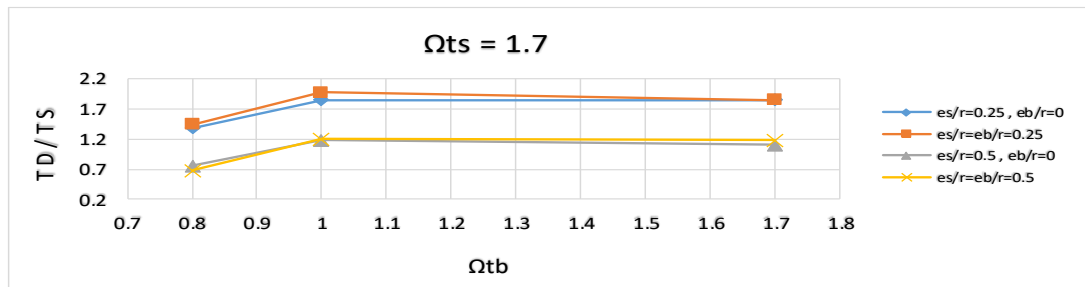
نمودار ۸: نسبت دوران بام به کف سازه هشت طبقه، ۱۰٪ کاهش سختی در ارتفاع (D)، با خروج از مرکزیت دوجبهته

### ۸-۲- نسبت پیش‌دینامیکی به پیش‌استاتیکی

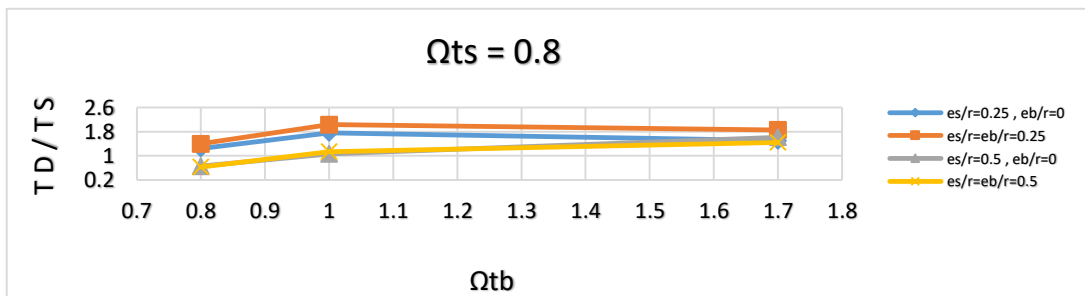
نسبت پیش‌دینامیکی به پیش‌استاتیکی ( $\frac{TD}{TS}$ )، طبق مطالعات لی [11]، نسبتی است تقریبی که برای تخمین پیش و شتاب دورانی روسازه استفاده می‌شود. افزایش خروج از مرکزیت، باعث افزایش پیش‌استاتیکی می‌شود، چراکه از حاصل ضرب خروج از مرکزیت در ماکزیمم برش پایه تشکیل شده است و در نهایت به کاهش شدید نسبت پیش‌دینامیکی به پیش‌استاتیکی ختم می‌شود. با افزایش نسبت فرکانس غیرکوپله‌ی پیش‌دینامیکی به جانبی سیستم جداسازی، سختی پیش‌دینامیکی سیستم جداسازی افزایش یافته و در نتیجه شاهد افزایش پیش‌دینامیکی وارد بر روسازه هستیم و همین‌طور افزایش تعداد طبقات سازه نیز موجب افزایش پیش‌دینامیکی می‌شود. تأثیرات این پارامترها را می‌توان در نمودارهای ۹ و ۱۰ مشاهده نمود، که برای سازه هشت طبقه افزایش ۲۰ درصدی ( $\frac{TD}{TS}$ ) را به همراه داشته است. با مشاهده نمودار ۹ برای سازه با ۳۵٪ کاهش سختی و نمودار ۱۰ برای سازه بدون کاهش سختی از سازه‌های هشت طبقه نوع D (نامقارن در پلان و ارتفاع)، متوجه می‌شویم که تغییرات سختی در ارتفاع روسازه تأثیر قابل توجهی بر نسبت ( $\frac{TD}{TS}$ ) نداشته و تنها اختلافی در حدود ۴٪ الی ۵٪ را ایجاد می‌کند که قابل چشم‌پوشیست. در مورد تأثیر  $\Omega_{ts}$  بر روی سازه‌های با تعداد طبقات کم تغییرات چشم‌گیری دیده نمی‌شود و در هر دو نمودار ۱۱ و ۱۲ با  $\Omega_{ts}$  متفاوت، اعداد تقریباً یکسانی را شاهد هستیم. شرایط نسبت ( $\frac{TD}{TS}$ ) برای حالت خروج از مرکزیت در دو جهت تقریباً همانند خروج از مرکزیت یک جهته است (با اختلاف جزئی در حد ۵٪) که در نمودار ۱۳ برای سازه هشت طبقه قابل مشاهده می‌باشد.



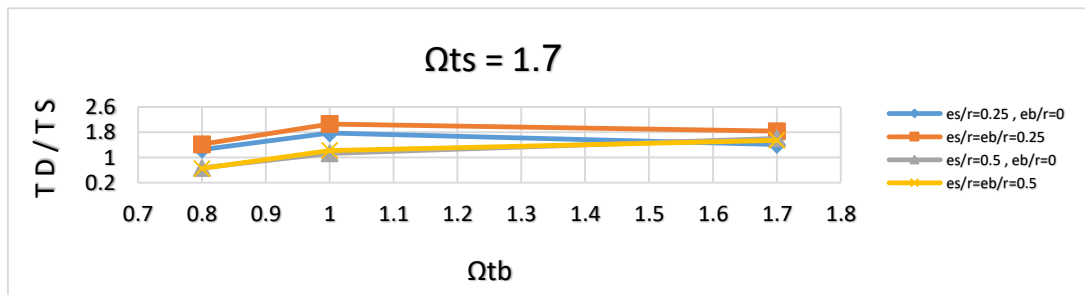
نمودار ۹: پیش‌دینامیکی به استاتیکی سازه هشت طبقه، ۳۵٪ کاهش سختی در ارتفاع (D)، خروج از مرکزیت یک جهته



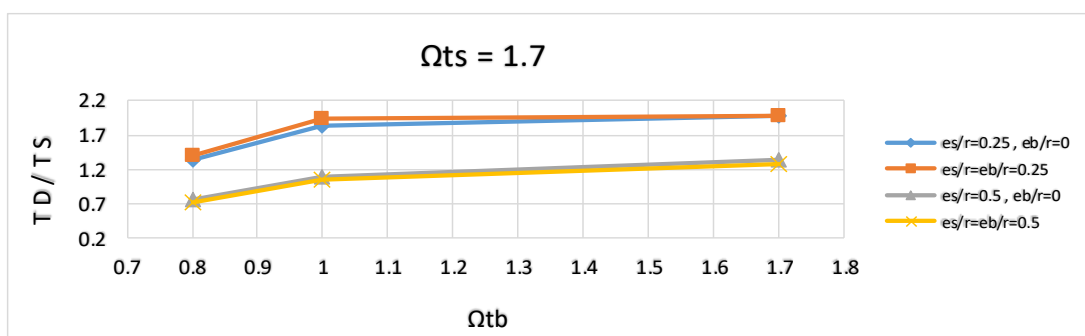
نمودار ۱۰: پیچش دینامیکی به استاتیکی سازه هشت طبقه، (B)، خروج از مرکزیت یک جهته



نمودار ۱۱: پیچش دینامیکی به استاتیکی سازه چهار طبقه، (B)، خروج از مرکزیت یک جهته



نمودار ۱۲: پیچش دینامیکی به استاتیکی سازه چهار طبقه، ۳۵٪ کاهش سختی در ارتفاع (D)، خروج از مرکزیت یک جهته



نمودار ۱۳: پیچش دینامیکی به استاتیکی سازه هشت طبقه، (B)، خروج از مرکزیت دو جهته

## ۹- نتیجه گیری

- ۱- دوران بام و کف سازه در صورت عدم وجود خروج از مرکزیت، حتی در سازه با توزیع غیر یکنواخت سختی در ارتفاع، بسیار ناچیز و قابل صرف نظر کردن می باشد.
- ۲- مشخصات سختی پیچشی در جداسازها تأثیر بسزایی در رفتار صلب روسازه دارد، به نحوی که با افزایش نسبت فرکانس غیرکوپله‌ی پیچشی به جانبی سیستم جداسازی، دوران سیستم جداسازی کاهش یافته و در مقابل باعث افزایش دوران روسازه می شود. در سازه‌های با کاهش سختی در ارتفاع، مقدار نسبت دوران بام به کف نیز افزایش می یابد، بطوریکه هر چه اختلاف سختی بین طبقه فوقانی و جداساز بیشتر می شود، دوران سازه نیز افزایش می یابد.
- ۳- تغییرات سختی در ارتفاع با افزایش در تعداد طبقات رابطه مستقیم دارد به طوری که در برخی از سازه‌های ۸ طبقه میزان دوران تا ۱۰٪ دچار افزایش شد.
- ۴- تأثیر خروج از مرکزیت بر نسبت پیچش دینامیکی به استاتیکی، بسیار چشمگیر است چراکه باعث افزایش پیچش استاتیکی شده و در نهایت به کاهش شدید این نسبت ختم می شود. در واقع خروج از مرکزیت، در به وجود آمدن پیچش در سازه‌ها نقش اصلی را ایفا می کند. این نکته باید بسیار مورد توجه طراحان سازه قرار بگیرد که حتی در خروج از مرکزیت‌های کوچک نیز از پیچش دینامیکی صرف نظر نکنند.
- ۵- سختی پیچشی سیستم جداسازی بر اثر افزایش نسبت فرکانس غیرکوپله پیچشی به جانبی از ۰/۸ به ۱/۷، زیاد شده و در نتیجه شاهد افزایش پیچش دینامیکی وارده بر روسازه بودیم.
- ۶- کاهش سختی در ارتفاع روسازه در نمودارهای سازه‌ای تغییرات زیادی ایجاد نمی کند چرا که هر دو پارامتر پیچش دینامیکی و پیچش استاتیکی، مربوط به یک سازه هستند و همینطور شکل گرفته از سختی پیچشی و سختی جانبی مربوط به همان سازه که متناسب با آن تغییر می کنند و برای اینگونه سازه‌ها به جواب‌هایی یکسان از نسبت پیچش دینامیکی به استاتیکی، همانند سازه‌های متقارن در ارتفاع، رسیدیم.
- ۷- شرایط نسبت پیچش دینامیکی به استاتیکی، برای حالت خروج از مرکزیت در دوجبهت در تعدادی از سازه‌ها همانند خروج از مرکزیت یک جهته است، اما افزایش کمی در مقدار پیچش دینامیکی در برخی از سازه‌های بلند به دلیل خروج از مرکزیت در دوجبهت را شاهد بودیم و به تبع باعث افزایش نسبت پیچش دینامیکی به استاتیکی، بخصوص در ارتباط با سازه‌های با نسبت فرکانس غیرکوپله‌ی پیچشی به جانبی بزرگتر از یک گردید.

## مراجع

1. Jangid RS, Datta TK. Seismic Response of Torsionally Coupled Structure with Elasto-Plastic Base Isolation. *Engineering Structures*; 16 (4): 256-262, 1994.
2. Jangid RS, Datta TK. Nonlinear Response to Torsionally Coupled Base Isolated Structure. *Journal of Structural Engineering*, New York; N.Y (1): 120, 1-22, 1994.
3. Park YJ, Wen YK, Ang AHS. Random Vibration of Hysteretic Systems under Bidirectional Ground Motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*; 14 (4), 543-557, 1986.
4. Jangid RS, Kelly JM. Torsional Displacements in Base-Isolated Buildings. *Earthquake Spectra*; 16 (2), 443-454, 2000.

**4<sup>th</sup>. International Congress on Civil Engineering , Architecture  
and Urban Development  
27-29 December 2016, Shahid Beheshti University , Tehran , Iran**

5. Tena CA, Gomez SL. Torsional Response of Base-Isolated Structures Due to Asymmetries in the Superstructure. *Engineering Structures*; 24 (12), 1587-1599, 2002.
6. Khoshnoudian F, Azizi N. Nonlinear Response of a Torsionally Coupled Base-Isolated Structure. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings*; 160 (4 B), 207-219, 2007.
7. Adibramezani M, Moghadam AS, Ziyaeifar M. Assessment of a Technique for the Torsional Response Reduction of Seismic Isolated Asymmetric Structures. *Journal of Applied Sciences*; 9 (15), 2653-2670, 2009.
8. Dang Y, Huo KC. Research on the Effect of Torsional Response of Base-Isolated Buildings. *Wuhan Ligong Daxue Xuebao/Journal of Wuhan University of Technology*; 32 (14), 137-141, 2010.
9. Engineers ASOC. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston, Virginia; 2010.
10. *Computers and structures I. CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge*. Berkeley, California, USA; 2016.
11. Lee DM. Base Isolation for Torsion Reduction in Asymmetric Structures under Earthquake Loading. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*; 8 (4), 349-359, 1980.