# عملکرد ساختمانهای نامتقارن یک طبقه با آرایشهای متفاوت مراکز سختی، مقاومت و جرم تحت اثر نگاشتهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای زلزله

# Performance of Single Story Asymmetric Buildings with Different Configurations of Centers of Mass, Strength and Stiffness Subjected to One and Two Directional Earthquakes

**آرمین عظیمی‌نژاد و عبدالرضا سروقد مقدم**

پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

*Email: armin@iiees.ac.ir*

**چکیده:** *مطالعات اخیر نشان داده است که آرایشهای متفاوت مراکز سختی، جرم و مقاومت نسبت به یکدیگر می‌تواند تأثیر قابل توجهی در رفتار سازه‌های نامتقارن و پارامترهای پاسخ آنها داشته باشد. با تغییر آرایش مراکز سختی و مقاومت، مقادیر بحرانی پارامترهای تغییر شکل نسبی طبقات و شکل‌پذیری نیاز المانهای سازه‌ای تغییر کرده و در نتیجه خسارات عناصر سازه‌ای و غیرسازه‌ای که نمایانگر عملکرد سازه در حین زلزله است تغییر می‌کند. اما کاهش هر یک از این نوع خسارتها و پارامتر پاسخ متناظر با آن لزوماً سبب بهبود وضعیت خسارت نوع دیگر نمی‌گردد و اهمیت خسارات سازه‌ای و غیرسازه‌ای می‌تواند با توجه به شدت زلزله، ظرفیت تغییرشکل و مقاومت سازه تغییر نماید. در این مقاله رفتار سازه با آرایشهای متنوع سختی و مقاومت در سطوح مختلف زلزله مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور پارامترهای پاسخ متناسب با خرابیهای سازه‌ای و غیرسازه‌ای نظیر تغییرمکان نسبی طبقات و شکل‌پذیری مدلهای سه بعدی سازه‌ای تحت تأثیر نگاشتهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای محاسبه شدند. نتایج بیانگر آن است که برای هر نوع خرابی متفاوت، نحوه توزیع مطلوب مقاومت و سختی متفاوت بوده که می‌بایست با توجه به عملکرد مورد نظر انتخاب شده و مقاومت جانبی اعضا در حین طراحی تعیین گردند.*

**کلید واژه‌ها:** *ساختمانهای نامتقارن، پیچش، توزیع مقاومت، نگاشت دو مؤلفه‌ای*

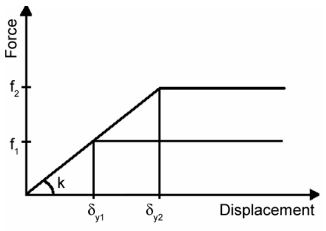
**Abstract:** *Recent studies have shown that the configuration of centers of mass, strength and stiffness can affect behavior of an asymmetric building. With change in configuration of centers, damage parameters such as interstory drift and ductility demand parameters may decrease. These parameters are good indicators of structural and non structural damages during earthquake excitations. But decrease of one damage parameter in specific centers configuration necessarily will not cause decrease of another parameter. The importance of damage parameters relative to each other in a building can be function of earthquake intensity, strength and deformation capacity of building. In this paper behavior of asymmetric buildings with different configuration of centers in different excitation levels are studied. For this purpose 3D building models are subjected to both one directional and two directional earthquake excitations and the ductility and interstory drift responses of models are compared. The results have shown that for different damage parameters, the proper configuration of centers is different, so to improve performance of a building, proper configuration of centers corresponding to the critical damage parameter must be used.*

## ۱- مقدمه

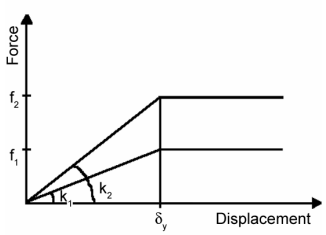
در زلزله ۷/۱ ریشتری لوما پریتا *(Loma Prieta)* و زلزله ۶/۷ ریشتری نورثریج *(Northridge)* در ایالات متحده، اگرچه تلفات جانی در ساختمانهایی که بر اساس استانداردهای جدید طراحی شده بودند ناچیز بود اما بعلت گستردگی خرابیهای ساختمانها، زیانهای اقتصادی و مالی زیادی بوجود آمد. این امر سبب شد تا نیاز شدید به دستورالعملها و آیین‌نامه‌هایی که قابلیت کنترل کردن میزان خسارات در زلزله‌های متوسط را دارا باشند احساس شود. در نتیجه مجموعه آیین‌نامه‌ها و دستورات مبتنی بر طراحی بر اساس عملکرد ایجاد شدند که به عنوان نمونه می‌توان از دستورالعملهای *SEAOC* و *FEMA356/357* نام برد [۱-۲].

عملکرد ساختمانها در زلزله‌های گذشته نشان داده است عموماً ساختمانهای نامتقارن نسبت به سازه‌های متقارن آسیب‌پذیرتر بوده و در حین زلزله دچار آسیبهای شدیدتر می‌گردند و احتمال فروریزش آنها نسبت به ساختمانهای متقارن بیشتر می‌باشد. با مطالعه رفتار این ساختمانها در حین زلزله می‌توان نتیجه گرفت که آسیب‌پذیری اینگونه ساختمانها در نتیجه لنگرهای پیچشی و تغییرمکانهای دورانی اضافی است که در اثر عدم تقارن در دیافراگمهای ساختمان ایجاد شده و سبب افزایش خسارات سازه‌ای و غیرسازه‌ای بویژه در وجوه بیرونی ساختمان می‌گردند. عدم تقارن در ساختمان می‌تواند در اثر توزیع نامتقارن جرم در دیافراگمهای ساختمان یا در اثر توزیع نامتقارن سختی یا مقاومت در المانهای باربر جانبی باشد. عدم توزیع یکنواخت جرم، سختی و مقاومت سبب می‌گردد تا نقطه اثر برآیند نیروهای ناشی از زمین‌لرزه با نقطه اثر برآیند نیروهای المانهای باربر جانبی یکی نبوده و در صورتیکه ساختمان دارای دیافراگمهای صلب یا نیمه صلب باشد لنگرهای پیچشی در این دیافراگمها ایجاد گردد. زمانیکه ساختمان در محدوده الاستیک رفتار می‌کند نقطه اثر برآیند نیروهای مقاوم جانبی منطبق بر مرکز سختی (مرکز صلبیت) ساختمان می‌باشد، اما زمانیکه در حین زلزله تعدادی از المانهای باربر جانبی جاری می‌گردند محل برآیند نیروهای مقاوم جانبی تغییر کرده و نهایتاً اگر تمامی المانهای باربر جانبی جاری گردند نقطه اثر برآیند نیروهای مقاوم جانبی بر مرکز مقاومت منطبق می‌گردد. بنابراین با توجه به نحوه رفتار سازه در حین زلزله میزان لنگرهای پیچشی ایجاد شده در حین زلزله تغییر می‌نماید و مراکز سختی و مقاومت نمایانگر وضعیت حدی این تغییرات در زمانیکه سازه در محدوده خطی یا غیر خطی (مصالح) رفتار می‌کند می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که محل مراکز جرم، سختی و مقاومت از پارامترهای اصلی می‌باشند که رفتار سازه‌های نامتقارن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از پارامترهای مهم دیگری که بر رفتار پیچشی سازه‌ها تأثیر می‌گذارند سختی و مقاومت پیچشی سازه و ممان اینرسی جرمی طبقات می‌باشند.

بطور معمول دستورالعملها و آیین‌نامه‌های طراحی ساختمانها در برابر زلزله ضوابط ویژه‌ای برای طراحی سازه‌های نامتقارن دارند، این دستورات در آیین‌نامه‌های طراحی براساس عملکرد نیز با وجود تفاوت زیادی که این آیین‌نامه‌ها با آیین‌نامه‌های عادی طراحی لرزه‌ای ساختمانها دارند تکرار شده‌اند. این در حالی است که این دستورات در طراحی‌های معمول و برای سطح خطر و عملکرد از پیش تعریف شده آیین‌نامه‌های معمول نیز دارای کاستی‌هایی می‌باشند. با توجه به انتظار رفتار شکل‌پذیر ساختمانها در مقابل زلزله‌های متوسط و شدید که در آن با افزایش نیروهای داخلی، اعضای مقاوم جاری شده و مقدار آن عملاً در اعضا ثابت باقی می‌ماند، لذا خرابی عضو از آن پس با ظرفیت تغییرشکل پلاستیک آن (متناسب با ظرفیت شکل‌پذیری عضو) کنترل می‌گردد. بنابراین طراحی سازه برای سطوح عملکرد متفاوت بطور طبیعی با طراحی بر اساس تغییرمکان همخوانی بیشتری نسبت به روشهای معمول طراحی بر اساس نیرو دارد. لذا در این رابطه روشهای طراحی جدید بر اساس تغییرمکان توسعه داده شده‌اند. اما در این روشها هم عموماً برای محاسبه مقاومت مورد نیاز عناصر باربر جانبی در طراحی سازه‌های جدید می‌بایست نیروی برش پایه بدست‌آمده و سپس در طبقات و بین عناصر باربر جانبی توزیع گردند که معمولاً از روشهای معمول آیین‌نامه‌های لرزه‌ای برای این منظور استفاده می‌گردد. ضوابط پیچشی آیین‌نامه‌ها بر این فرض استوار است که سختی عناصر باربر جانبی بر اساس ابعاد هندسی آن قابل محاسبه می‌باشد و در نتیجه در خلال تعیین مقاومت اعضا در سازه‌هایی که ابعاد هندسی المانهای باربر جانبی ثابت می‌مانند (نظیر سازه‌های بتنی) محل مرکز سختی ثابت باقی می‌ماند. نحوه رفتار المانها با این فرض در شکل (۱- الف) نشان داده شده است. مطالعات اخیر نشان داده است که این فرض در مورد بخش قابل‌توجهی از المانها که امروزه در ساخت ساختمانها بکار می‌روند معتبر نمی‌باشد. در این سری از المانها که از آنها با المانهای نوع $D$ نام برده می‌شود با تغییر مقاومت ولی با فرض ثابت ماندن ابعاد، عملاً تغییرمکان حد جاری شدن المان دچار تغییرات جزئی شده و لذا این سختی المان است که تابع میزان مقاومت و تغییرمکان حد جاری شدن می‌باشد. بنابراین در هنگام توزیع نیرو و تعیین مقاومت المانهای باربر جانبی، با تغییر مرکز مقاومت ساختمان مرکز سختی المان نیز متناسب با آن تغییر می‌نماید. نحوه رفتار اینگونه المانها در شکل (۱- ب) نشان داده شده است.



(a) Stiffness-Strength Independent Element



(b) Stiffness-Strength Dependent Element

**شکل ۱**- رفتار نیرو- تغییرمکان المانها.

ساختمانهایی که با توجه به عملکردهای متفاوتی که در سطوح خطر محتمل از آنها انتظار می‌رود دچار درجات متفاوتی از رفتارهای غیرخطی می‌گردند ممکن است برای آنها آرایش مناسب مراکز سختی، مقاومت و جرم در هرسطح عملکرد متفاوت باشد. به عنوان نمونه زمانیکه ساختمانی در سطح خطر مشخص برای سطح عملکرد سکونت بی‌وقفه طراحی می‌گردد، در این صورت از ساختمان انتظار رفتار غیرخطی قابل‌توجهی نمی‌رود و می‌توان انتظار داشت که مناسب‌ترین آرایش مراکز مقاومت، سختی و جرم آرایشی است که در آن مرکز جرم بر مرکز سختی منطبق گردد. در حالی که احتمالاً این آرایش برای ساختمانی که از آن انتظار عملکرد ایمنی جانی می‌رود یعنی ساختمانی که حین زلزله رفتار غیرخطی قابل‌ملاحظه از خود نشان می‌دهد مناسب نمی‌باشد.

بطور کلی برای کنترل عملکرد سازه، میزان خسارات وارده به ساختمان در حین زلزله محدود می‌گردد. برای این منظور از پارامترهای خسارت مختلف که شرایط خسارات سازه‌ای و غیر سازه‌ای را نشان می‌دهند استفاده می‌گردد. معمولاً برای کنترل خسارات سازه‌ای از تغییرشکل یا دوران پلاستیک، تغییر مکان نسبی طبقات و یا از شکل‌پذیری استفاده می‌شود. برای کنترل میزان خسارات عناصر غیرسازه‌ای نیز از پارامترهایی نظیر تغییرمکان نسبی طبقات و یا شتاب طبقه استفاده می‌گردد. از جمله عوامل دیگری که بر آرایش مناسب مرکز جرم، سختی و مقاومت تأثیر می‌گذارد نوع پارامتر مورد بررسی می‌باشد. به عنوان نمونه آرایشی که می‌تواند میزان شکل‌پذیری در عضو بحرانی را بهبود به بخشد لزوماً سبب بهبود پارامتر تغییرمکان نسبی بین طبقات نمی‌گردد.

رفتار پیچشی سازه‌ها معمولا به عوامل متعدد و پارامترهای متنوع تابع مشخصات سازه بستگی دارد. زمانیکه مسأله در محدوده غیرخطی مورد بررسی قرار می‌گیرد تعداد پارامترهای حاکم بر مسأله افزایش می‌یابد. این مسأله با توجه به محدودیتهای محاسباتی در گذشته سبب شده تا اکثر مطالعات پیچشی انجام شده بر روی مدلهای ساده انجام گیرند. این مدلها معمولاً یک طبقه و با المانهای مقاوم برشی در یک جهت می‌باشند و مطالعات کمتری بر روی مدلهای چند طبقه یا مدلهای با سیستم مقاوم در هر دو جهت و تحت اثر نگاشتهای دو مؤلفه‌ای انجام گرفته است. در این تحقیق مدلهای یک طبقه با المانهای مقاوم در هر دو جهت، تحت تأثیر نگاشتهای تک مؤلفه‌ای یا دو مؤلفه‌ای در جهات اصلی مدلها قرار گرفته با آرایشهای متفاوت مراکز جرم، سختی و مقاومت، تأثیر آرایشهای متفاوت این مراکز بر رفتار پیچشی سازه بررسی می‌شود. پاسخهای مورد بررسی عبارت از دوران طبقه، حداکثر شکل‌پذیری نیاز اعضا و حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات حاصله از تحلیلهای دینامیکی غیرخطی می‌باشند.

## ۲- مروری بر مطالعات گذشته

در زلزله‌های گذشته آسیب‌پذیری بیشتر ساختمانهای نامتقارن نسبت به ساختمانهای متقارن مشهود بود و بر اساس آن ضوابط طراحی لرزه‌ای ویژه‌ای برای ساختمانهای نامتقارن وضع شده است. هازنر و آتینن [۳] در سال ۱۹۵۸ نشان دادند که نتایج حاصل از آنالیز استاتیکی که در آن خروج از مرکزیت نیروی برش طراحی برابر با فاصله مرکز سختی از مرکز جرم (خروج از مرکزیت استاتیکی) در نظر گرفته می‌شود عملاً در حاشیه اطمینان نبوده و تأثیر ممان اینرسی جرمی طبقه و رفتار دینامیکی پیچشی سبب بوجود آمدن لنگرهای پیچشی بزرگتری نسبت به لنگر پیچشی استاتیکی می‌گردد. در سالهای ۱۹۶۰ و پس از آن محققین با تعریف مفهوم خروج از مرکزیت دینامیکی سعی کردند تا با استفاده از نتایج آنالیزهای دینامیکی و کالیبره کردن نتایج آن با نتایج آنالیز استاتیکی خروج از مرکزیت طراحی را با تشدید خروج از مرکزیت استاتیکی تعریف نمایند [۴]. این امر منجر به معرفی روابط متداول خروج از مرکزیت طراحی گشت.

اکثر ساختمانها به شکلی طراحی می‌شوند که در زلزله وارد محدوده غیرخطی شده و المانهای آنها جاری شوند. رفتار غیرخطی سازه‌های نامتقارن از سالهای ۱۹۷۰ مورد توجه قرار گرفت. در اکثر مطالعات انجام شده بر روی رفتار غیرخطی، پارامتر شکل‌پذیری به عنوان معیار خسارت و رفتار غیرخطی سازه در نظر گرفته شده است. اشکال بزرگ این پارامتر این است که قادر به ملحوظ نمودن اثرات زوال مقاومت و کاهش سطح حلقه‌های هیسترزیس نمی‌باشد. در این مطالعات معمولاً رفتار المانها بصورت دو خطی با سخت شدگی پس از جاری شدن و یا الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده است. البته برخی مطالعات دقیقتر با استفاده از مدلهای هیسترزیس با در نظر گرفتن اثرات کاهش سختی، زوال مقاومت و کاهش سطح حلقه‌های هیسترزیس نشان داده است که شکل‌پذیری محاسبه شده بوسیله این مدلها تفاوت چندانی با مدلهای دو خطی ندارند [۴].

مطالعه رفتار غیرخطی سازه‌های نامتقارن نشان داده که بر خلاف نتایج مطالعات در محدوده خطی، پارامتر نسبت زمان تناوب مود انتقالی به مود دورانی تأثیر کمتری در تغییر میزان شکل‌پذیری نیاز المانهای مقاوم جانبی دارند. در مقابل نشان داده شده که میزان خروج از مرکزیت مرکز سختی نسبت به مرکز جرم تأثیر قابل‌توجه در شدت تقاضای شکل‌پذیری داشته و نیز نحوه توزیع مقاومت تأثیر قابل توجه در کنترل شکل‌پذیری نیاز

حداکثر در اعضاء باربر جانبی دارد. بنابراین نتیجه گرفته شد که خروج از مرکزیتهای مرکز سختی و مرکز مقاومت از پارامترهایی هستند که می‌بایست در حین طراحی سازه‌های نامتقارن مورد توجه قرار گیرند [۴].

سو و بینگ [۵] پیشنهاد کردند که برای کاهش شکل‌پذیری تقاضا در سمت نرم در ساختمانهای با توزیع نامتقارن سختی بهتر است تا مرکز مقاومت تا حد امکان به مرکز جرم نزدیک گردد. همچنین آنها خروج از مرکزیت مقاومت را پارامتری کم اثر در سیستمهای با توزیع نامتقارن جرم تشخیص دادند. در مقابل میتال و جین [۶] با تعریف خروج از مرکزیت مقاومت مؤثر سعی کردند تا آن را به عنوان پارامتری مؤثر برای هر دو سیستم نامتقارن جرم و سختی تعریف کنند.

دی استفانو و همکاران در سال ۱۹۹۳ [۷] به بررسی محل بهینه مرکز مقاومت برای کنترل شکل‌پذیری تقاضا در مدلهای یک طبقه با المانهای مقاوم جانبی در هر دو جهت اصلی سازه پرداختند. آنها مطالعات خود را با این فرض اصلی انجام دادند که سختی المانها مستقل از مقاومت می‌باشد و نتیجه گرفتند که مناسبترین محل مرکز مقاومت بین مرکز سختی و مرکز جرم و در فاصله مساوی بین آنها می‌باشد. چندلر و دوان نیز در سال ۱۹۹۷ [۸-۹] به بررسی محل بهینه مرکز مقاومت پرداختند و نتیجه گرفتند که محل بهینه مرکز مقاومت به خروج از مرکزیت سختی، شعاع ژیراسیون سختی، ضریب رفتار (متناسب با ظرفیت شکل‌پذیری) ساختمان و زمان تناوب سازه در جهت اعمال زلزله بستگی دارد.

پالی در سالهای ۱۹۹۶ و ۱۹۹۷ [۱۰-۱۱] به بررسی رفتار پیچشی ساختمانهای یک طبقه در حد نهائی با استفاده از بررسی مکانیسمهای پلاستیک پرداخت. او با توجه به شرایط المانهای مقاوم در جهت عمود بر تأثیر زلزله، سازه‌های نامتقارن را به دو دسته سازه‌های مهار شده و مهارنشده پیچشی تقسیم کرد. از نظر این محقق سازه‌هایی که در حد نهایی، المانهای مقاوم جانبی آنها در جهت عمود بر تأثیر زلزله، سختی پیچشی برای سازه تأمین نمایند مهار شده پیچشی می‌باشند. این محقق ضوابط پیچشی آیین‌نامه‌های لرزه‌ای که بر مبنای روشهای استاتیکی می‌باشند را نامناسب دانسته و روشهای دیگر برای توزیع مقاومت در بین عناصر باربر جانبی پیشنهاد نموده است. در ادامه ایشان به بررسی رفتار سازه‌های نامتقارن تحت اثر مؤلفه مایل زلزله پرداخته و نتیجه گرفته است که در این حالت میزان تقاضای شکل‌پذیری المانها کمتر از حالتی است که زلزله در جهات اصلی ساختمان تأثیر نماید اما در این حالت ممکن است ساختمان دچار دورانهای بزرگتر گردد. او پیشنهاد کرد که بهتر است در طراحی سازه‌های نامتقارن با تعبیه المانهایی که در حد نهائی الاستیک باقی می‌مانند میزان تغییرشکلهای پیچشی سازه را محدود کرد.

تا سال ۱۹۹۸ تقریباً تمامی مطالعات انجام شده برروی سازه‌های نامتقارن بر این فرض استوار بود که سختی المانهای سازه‌ای مستقل از مقاومت آنها می‌باشد و در نتیجه در خلال طراحی محل مرکز سختی و میزان خروج از مرکزیت سختی ثابت می‌باشد. اما مطالعاتی که در سالهای ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ [۱۲-۱۳] انجام شد نشان داد که در بسیاری از المانهای سازه‌ای که امروزه در ساختمانها بکار می‌روند از جمله المانهای بتن مسلح این فرض صحیح نمی‌باشد، بلکه در خلال سیکلهای طراحی که میزان مقاومت اعضاء تعیین می‌گردند عملاً سختی اعضا نیز دچار تغییر قابل‌ملاحظه گردیده در حالیکه میزان تغییرمکان حد جاری شدن اعضاء کمتر دچار تغییر می‌گردد. بر این اساس پالی در ادامه مطالعات خود [۱۴-۱۵] به بررسی رفتار پیچشی سازه‌های مهار شده و مهار نشده نامتقارنی که دارای این نوع المانها می‌باشند پرداخت. او نتیجه گرفت که در این سازه‌ها بحرانی‌ترین المان، دورترین المان با کمترین میزان تغییرمکان حد جاری شدن می‌باشد و مهمترین عامل که رفتار پیچشی سازه را کنترل می‌نماید خروج از مرکزیت مقاومت می‌باشد که می‌بایست با بررسی و تشخیص مکانیسم مناسب پیچشی مقدار آن تعیین گردد. اگرچه کاهش و یا حذف خروج از مرکزیت مقاومت لزوماً سبب بهبود رفتار پیچشی سازه نمی‌گردد. همچنین پالی استراتژی توزیع مقاومت آیین‌نامه‌ها را مناسب تشخیص نداد و پیشنهاد نمود تا به جای آن از توزیع مقاومت دلخواه با توجه به شرایط ساختمان در حد نهایی استفاده شود.

مایسلیماج و سو در سال ۲۰۰۲ [۱۶] به بررسی آرایشهای متفاوت مراکز سختی، مقاومت و جرم با مدلهای یک طبقه پرداختند. آنها چنین استدلال کردند که زمانیکه سازه در مرحله خطی رفتار می‌کند رفتار سازه بستگی به موقعیت مرکز سختی دارد اما زمانیکه یکی از المانهای مقاوم جانبی جاری می‌شود با جابجایی محل برآیند نیروهای مقاوم جانبی از مرکز سختی به سمت مرکز مقاومت، اهمیت مرکز مقاومت در پاسخ سازه افزایش می‌یابد. بنابراین هر دوی مراکز مقاومت و سختی در پاسخ سازه در مقابل زلزله از اهمیت برخوردار بوده و می‌بایست در طراحی مورد توجه قرار گیرند. آنها نتیجه گرفتند که بهترین پیکربندی، آن است که مراکز سختی و مقاومت در دو سمت مرکز جرم قرارگیرند، آنها این آرایش را آرایش بالانس نامیدند. مطابق با بررسیهای انجام شده توسط این محققین

آرایش بالانس تغییرمکان نسبی و دوران سازه را کاهش داده بود اما میزان شکل‌پذیری نیاز را در سمت سخت افزایش داده بود. آنها همچنین موقعیت مراکز سختی و مقاومت و ارتباط آنها با یکدیگر را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که فاصله مرکز سختی و مقاومت در یک سازه با تغییر مقاومت اعضا بدون تغییر ابعاد آنها ثابت بوده و برابر با فاصله مرکز تغییر مکان حد جاری شدن تا مرکز جرم می باشد.

اکثر مطالعات سازه‌های نامتقارن برروی مدلهای با المانهای فقط در جهت تأثیر زلزله و تحت اثر نگاشتهای یک مؤلفه‌ای انجام شده‌اند و مدلهای با المانها در دو جهت و تحت تأثیر نگاشت زلزله در هر دو جهت اصلی ساختمان کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این درحالی است که در واقع سازه از هر دو جهت تحت تأثیر زلزله قرار گرفته و عملاً ساختمان با کمک المانهای جانبی خود نیز در مقابل بارهای پیچشی مقاومت می‌کند. سیامال و پیکائو در سال ۱۹۸۵ [۱۷] به بررسی مدلهای دو المانه در دو جهت اصلی ساختمان تحت تأثیر تحریکات سینوسی پرداختند. آنها نیز نتیجه گرفتند که خروج از مرکزیت سختی تأثیر قابل‌توجه بر تقاضای شکل‌پذیری المانهای باربر جانبی دارد. در مطالعه‌ای دیگر در سال ۱۹۹۰ گوئل و چوپرا [۱۸] به بررسی رفتار مدلهای نامتقارن با المانهای مقاوم در هر دو جهت اصلی پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که المانهای عمود بر جهت زمین‌لرزه تأثیر بسزائی در کاهش حداکثر شکل‌پذیری تقاضا و تغییرمکان حداکثر دارند و نیز آنکه تأثیر این المانها در مدلهای با زمان تناوب کوتاه بیشتر از مدلهای با زمان تناوب متوسط و بزرگ است. در سال ۱۹۹۳ سو و ینگ [۵] به بررسی آیین‌نامه‌های نیوزیلند و کانادا با استفاده از مدلهایی با المانهای مقاوم در هر دو جهت و تحت تأثیر رکوردهای دو مؤلفه‌ای پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که در صورتیکه حداقل سختی پیچشی آیین‌نامه نیوزیلند رعایت نگردد میزان تقاضای شکل‌پذیری در سمت نرم بیش از مقدار آن در سازه متقارن مبنا خواهد بود. کرنزا و همکاران [۱۹] با مطالعه مدلهای یک طبقه نتیجه گرفتند که مدلهای یک جهته برای اکثر ساختمانها بجز ساختمانهای با زمان تناوب کوتاه مناسب می‌باشند. در مطالعه دیگری چندلر و دوان [۲۰] به بررسی ضوابط آیین‌نامه‌های *UBC94*، *NBCC95*، *EC8-93* با مدلهای با المانهای مقاوم در هر دو جهت و با رکوردهای دو مؤلفه‌ای پرداختند. آنها نتیجه گرفتند هر سه آیین‌نامه برای المان سمت نرم محافظه‌کارانه و دو آیین‌نامه آخر برای مقادیر کوچک شعاع ژیراسیون غیرمحافظه کارانه هستند. در مطالعه‌ای بر سازه‌های یک طبقه تحت اثر نگاشتهای دو مؤلفه‌ای دی استفانو و همکاران [۲۱] به بررسی کارایی ضوابط طراحی آیین‌نامه *UBC* پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که ضوابط این آیین‌نامه برای مقابله با افزایش شکل‌پذیری‌های تقاضای ناشی از پیچش در المانهای باربر جانبی عمود بر جهت تأثیر زلزله کافی نمی‌باشند و برای طراحی این المانها می‌بایست ضوابط ویژه‌ای به آیین‌نامه اضافه گردد. ریدل و سانتا ماریا [۲۲] به مقایسه تأثیر رکوردهای یک جهته و دو جهته زلزله بر مدلهای یک طبقه با نامتقارنی یک جهته پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که در سازه‌های با زمان تناوب کوتاه، رکوردهای دو مؤلفه‌ای، سبب افزایش شکل‌پذیری نیاز و تغییرمکان سمت نرم می‌شود.

فایفر و همکاران [۲۳-۲۴] در مقالاتی به بررسی اثر پدیده پیچش در مدلهای با المانهای مقاوم در هر دو جهت اصلی تحت اثر نگاشتهای دو مؤلفه‌ای پرداختند. آنها ابتدا با بررسی و مقایسه مدلهای نامتقارن سختی دارای المانهای نوع *D* با مدلهای نامتقارن جرمی نتیجه‌گیری کردند که رفتار پیچشی اینگونه سازه‌ها مشابه می‌باشند. این در حالی بود که در مدلهای مورد مقایسه آنها مرکز سختی و مرکز مقاومت بر هم منطبق بودند. آنها همچنین نتیجه گرفتند که در سازه‌های پیچشی سخت میزان حداکثر تغییرشکل سازه تقریباً مشابه حالت خطی می‌باشد.

## ۳- بررسی ضوابط متداول طراحی سازه‌های نامتقارن در آیین‌نامه‌های طراحی بر اساس عملکرد

در دهه گذشته روالهای متعددی برای طراحی ساختمانهای جدید یا بهسازی ساختمانهای موجود بر اساس عملکرد مورد نظر پیشنهاد شده‌اند. این روالها معمولاً به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند. دسته اول این روشها، روشهای طراحی بر اساس نیرو که همان روال متداول آیین‌نامه‌های معمول طراحی سازه‌های جدید نظیر استاندارد ۲۸۰۰ [۲۵] و یا آیین‌نامه *IBC* [۲۶] می‌باشند. دسته دوم، روالهای طراحی بر اساس تغییرمکان که با توجه به ماهیت رفتار لرزه‌ای سازه طبیعتاً همخوانی بیشتری نسبت به سایر روشها با طراحی براساس عملکرد دارند مثل روش طیف نقطه جاری شدن (*YPS*) [۱۳] و یا روشهای پیشنهاد شده توسط پریستلی و کالوی [۲۷] می‌باشند. نهایتاً دسته سوم روشهای مبتنی بر انرژی می‌باشند. استفاده از همه این روشها در طراحی سازه‌های جدید معمولاً منجر به محاسبه نیروی برش طبقات ساختمان می‌گردد که می‌بایست در نهایت با راهکاری مناسب در بین عناصر باربر جانبی توزیع گردد. در تعیین راهکار مقاوم‌سازی ساختمانهای موجود نیز نحوه توزیع مقاومت در بین عناصر جانبی نیز می‌تواند از اهمیت ویژه در تعیین راهکار مناسب دارای صرفه اقتصادی برای بهسازی ساختمانهای

موجود برخوردار باشد. امروزه در آیین‌نامه نحوه توزیع نیرو به نسبت سختی می‌باشد که سختی اعضا بر اساس مشخصات هندسی آنها و بدون توجه به مقاومت اعضاء تعیین می‌گردد.

در طراحی سازه‌ها در آیین‌نامه‌ها از خروج از مرکزیت طراحی استفاده می‌شود که معمولاً به شکل رابطه زیر می‌باشد:

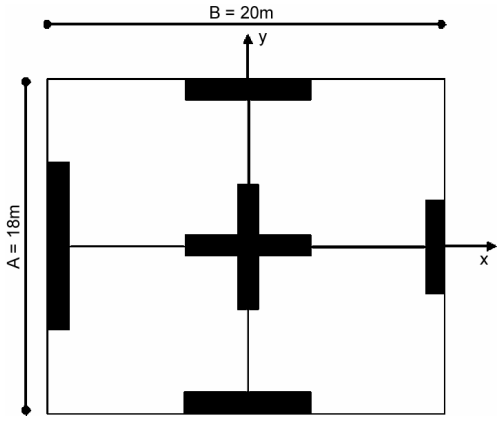
$$e_d = \alpha e_s \pm \beta b \qquad e_d = \gamma e_s \pm \beta b \qquad (1)$$

در این رابطه $e_d$ خروج از مرکزیت طراحی، $e_s$ خروج از مرکزیت سختی، $b$ پهنای دیافراگم طبقه عمود بر جهت مورد بررسی و $\alpha, \beta, \gamma$ ضرایبی هستند که در آیین‌نامه‌ها برای آنها مقادیر مختلفی در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه در مدرک فنی *FEMA 356* [۱]، $\alpha, \gamma$ برابر ۱ هستند و $\beta$ برابر ۰/۰۵ می‌باشد. مقدار $\beta b$ در این رابطه خروج از مرکزیت اتفاقی نامیده می‌شود که برای در نظر گرفتن اثرات عدم قطعیت در توزیع جرم و سختی در ساختمان و ملحوظ کردن اثر مؤلفه دورانی زمین‌لرزه بکار می‌رود.

در صورتیکه المانهای تشکیل‌دهنده سازه از نوع $k$ باشند، سختی و مقاومت آنها در ابتدای طراحی سازه مشخص بوده و امکان کنترل نامنظمی وسپس بکار بردن رابطه خروج از مرکزیت طراحی برای آنها امکان‌پذیر می‌باشد. اما اگر المانهای تشکیل‌دهنده سازه از نوع $D$ باشند. دیگر امکان تعیین شرایط نامنظمی سازه و بکار بردن خروج از مرکزیت طراحی بصورت مستقیم امکان‌پذیر نمی‌باشد.

## ٤- مشخصات مدلهای مورد بررسی

برای مطالعه نحوه عملکرد آرایشهای متفاوت مراکز سختی، مقاومت و جرم در سطوح مختلف خطر از مدلهای یک طبقه که در آنها بارهای ثقلی توسط سیستم قاب و بارهای جانبی توسط دیوارهای برشی تحمل می‌شوند استفاده شد (شکل ۲). ساختمانها




**شکل ۲**- پلان مدلهای نامتقارن.

شامل دیافراگم صلب به ابعاد ۱۸ در ۲۰ متر و شامل سه دیوار برشی بتن مسلح در هر جهت می‌باشند. از سختی دیوارها در جهت عمود بر دیوار و سختی پیچشی آنها صرفنظر شد. مدلها نسبت به جهت $x$ متقارن بودند و نامتقارنی در جهت $y$ با تغییر طول و مقاومت المانهای کناری ایجاد شدند. همچنین مدل متقارن نیز به عنوان مدل مبنا ایجاد شد. این مدل مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ [۲۵] طراحی شد و در طراحی مدلهای نامتقارن از برش پایه بدست‌آمده از همین مدل استفاده شد. به منظور ایجاد امکان مقایسه بین مدل متقارن و مدل نامتقارن از طراحی پیچشی مدلهای نامتقارن صرفنظر شد. بنابراین مقاومت جانبی همه مدلها مشابه و برابر با ۳۸/۲۵*ton* در نظر گرفته شد. مدل متقارن بر اساس رابطه آیین‌نامه دارای زمان تناوبی برابر با ۰/۲۴ ثانیه بوده و مقاومت تمامی مدلها در هر دو جهت $x$ و $y$ برابر می‌باشند. در مدل متقارن مشخصات تمامی دیوارهای برشی مشابه می‌باشند.

برای ایجاد مدلهای نامتقارن طول دیوارهای گوشه در جهت $y$ تغییر داده شد بطوریکه در مدلها خروج از مرکزیت تغییرمکان حد جاری شدن برابر ۱۰ درصد پهنای پلان ساختمان ایجاد شد (شکل ۲). در تمامی مدلها طول و محل دیوارهای برشی مشابه می‌باشد. طول المان سمت راست ۱۴۰ سانتیمتر، طول المان سمت چپ ۲۶۰ سانتیمتر و طول سایر المانها ۲۰۰ سانتیمتر می‌باشند.

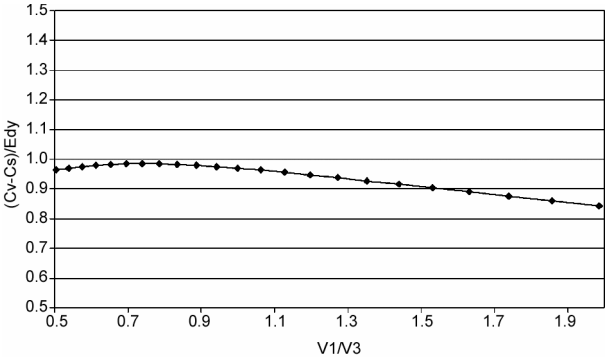
به منظور ایجاد خروج از مرکزیت مقاومت در مدلها، میزان مقاومت در المانهای سمت راست افزایش و مقاومت در المان سمت چپ کاهش داده شد بشکلی که مقاومت کلی سازه ثابت باقی ماند. با این فرض میزان خروج از مرکزیت مقاومت می‌تواند از رابطه زیر محاسبه شود:

$$e_s = \frac{-BV_1l_1 + BV_3l_3}{2\sum_{i=1}^{3} V_i l_i} \qquad (2)$$

در این رابطه، $B$ بعد ساختمان، $V_i$ و $l_i$ بترتیب مقاومت و بعد المان $i$ می‌باشند. در این رابطه فرض شده است که سختی هر المان متناسب با مقاومت آن و متناسب با عکس طول آن می‌باشد. این فرض بر اساس معادله ارائه شده توسط پریسلی و کوالسکی [۱۲] می‌باشد.

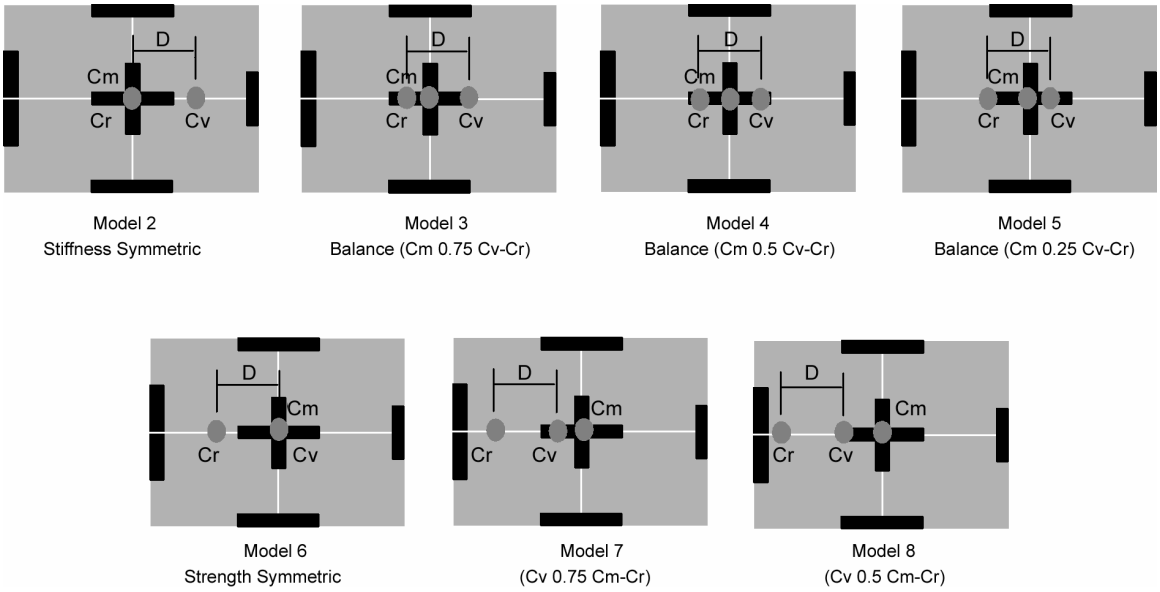
مایسلیماج و سو [۱۶] نشان داده‌اند که در ساختمانهای معمول، با توزیع مقاومت به فرمهای متفاوت بین عناصر باربر جانبی، عملاً فاصله بین مرکز مقاومت و مرکز سختی تقریباً ثابت باقی می‌ماند و این فاصله برابر با فاصله مرکز تغییرمکان حد جاری شدن از مرکز جرم می‌باشد. برای اینکه این مسئله مورد بررسی قرار گیرد مدلهای متنوعی مشابه با مدل ۱ با نسبتهای متفاوت مقاومت المان گوشه سمت چپ به سمت

راست در نظر گرفته شدند با این شرط که جمع مقاومت دو المان ثابت باقی بماند. سپس محل مرکز مقاومت با استفاده از رابطه ۲ محل مرکز سختی و در نهایت مقدار فاصله مرکز سختی از مرکز مقاومت محاسبه شد. در شکل (۳) مقدار این فاصله تقسیم بر خروج از مرکزیت تغییرمکان حد جاری شدن برای نسبتهای مختلف مقاومت المان سمت چپ به المان سمت راست نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده برای نسبتهای مقاومت بین ۰/۵ تا ۲ که محدوده‌ای است که در اکثر ساختمانهای رخ می‌دهد، یافته سو و مایسلیماج از دقت مناسبی برخوردار است. بنابراین می‌توان پذیرفت که فاصله بین مراکز مقاومت و سختی ثابت و برابر با فاصله مرکز تغییرمکان حد جاری شدن از مرکز مقاومت می‌باشد.




**شکل ۳-** نسبت فاصله بین مراکز سختی و مقاومت به فاصله مراکز تغییرمکان حد جاری شدن و جرم برای نسبتهای متفاوت مقاومت دیوارهای گوشه چپ و راست.

به منظور بررسی رفتار آرایشهای متفاوت مراکز سختی، مقاومت و جرم رفتار مدل متقارن و ۷ مدل نامتقارن مورد مقایسه قرار گرفتند (شکل ۴). تمامی مدلهای نامتقارن مشخصات هندسی مشابه، ابعاد المانهای مشابه و مقاومت جانبی یکسان داشتند. عدم تقارن سازه‌های نامتقارن با تفاوت مقاومت المانهای سمت چپ و راست ایجاد شده بود. مشخصات این مدلها و مدل متقارن در جدول (۱) آورده شده‌اند.




**شکل ۴**- شرایط مختلف مراکز سختی مقاومت و جرم در مدلهای نامتقارن (فاصله مراکز نسبت به بعد پلان بصورت شماتیک بزرگتر انتخاب شده‌اند).

**جدول ۱:** مشخصات مدلهای مورد مطالعه.

| مدل | شرح | خروج از مرکزیت (٪) | | طول المانهای جهت $y$ ($cm$) | | | مقاومت المانهای جهت $y$ ($Ton$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | مقاومت | سختی | ۱ | ۲ | ۳ | ۱ | ۲ | ۳ |
| ۱ | متقارن | ۰ | ۰ | ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۱۳/۳ | ۱۳/۳ | ۱۳/۳ |
| ۲ | متقارن از نظر سختی | ۱۰ | ۰ | ۲۶۰ | ۲۰۰ | ۱۴۰ | ۹/۳۳ | ۱۳/۳ | ۱۷/۳۳ |
| ۳ | مدل بالانس *(Cm, 0.75 Cv-Cs)* | ۷/۵ | -۲/۵ | ۲۶۰ | ۲۰۰ | ۱۴۰ | ۱۰/۳۳ | ۱۳/۳ | ۱۶/۳۳ |
| ۴ | مدل بالانس *(Cm, 0.5 Cv-Cs)* | ۵ | -۵ | ۲۶۰ | ۲۰۰ | ۱۴۰ | ۱۱/۳۳ | ۱۳/۳ | ۱۵/۳۳ |
| ۵ | مدل بالانس *(Cm, 0.25 Cv-Cs)* | ۲/۵ | -۷/۵ | ۲۶۰ | ۲۰۰ | ۱۴۰ | ۱۲/۳۳ | ۱۳/۳ | ۱۴/۳۳ |
| ۶ | متقارن از نظر مقاومت | ۰ | -۱۰ | ۲۶۰ | ۲۰۰ | ۱۴۰ | ۱۳/۳۳ | ۱۳/۳ | ۱۳/۳۳ |
| ۷ | مدل دی استفانو *(Cv, 0.25 Cm-Cs)* | -۳/۳ | -۱۳/۳ | ۲۶۰ | ۲۰۰ | ۱۴۰ | ۱۴/۶۶ | ۱۳/۳ | ۱۲/۰۰ |
| ۸ | مدل دی استفانو *(Cv, 0.5 Cm-Cs)* | -۱۰ | -۲۰ | ۲۶۰ | ۲۰۰ | ۱۴۰ | ۱۷/۳۳ | ۱۳/۳ | ۹/۳۳ |

مدل شماره ۲ مدلی است که در آن مرکز مقاومت بر مرکز سختی منطبق است و از نظر توزیع سختی متقارن می‌باشد. مدلهای شماره ۳ تا ۵ مدلهایی هستند که توسط مایسلیماج و سو [۱۶] پیشنهاد شده‌اند و مدلهای بالانس نامیده شده‌اند.

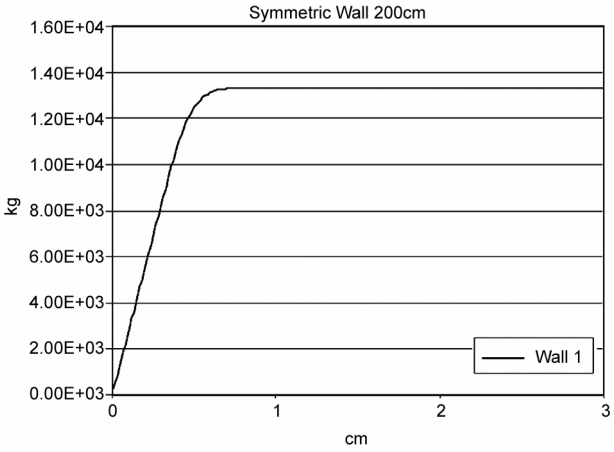
در تمامی این مدلها مرکز جرم در بین مرکز سختی و مرکز مقاومت قرار گرفته است. در مدل ۳ مرکز جرم در فاصله ۰/۲۵ فاصله بین مرکز مقاومت و مرکز سختی نسبت به مرکز مقاومت قرار گرفته است. در مدلهای ۴ و ۵ این فاصله به ۰/۵ و ۰/۷۵ تغییر کرده است. مدل ۶ مدلی است که در آن توزیع مقاومت به صورت متقارن بوده و مرکز مقاومت بر مرکز سختی قرار گرفته است. مدلهای ۷ و ۸ مدلهایی هستند که مطابق با پیشنهاد دی استفانو و همکاران [۷] مرکز مقاومت در بین مرکز سختی و مرکز جرم قرار گرفته است. در مدل ۷ مرکز مقاومت در فاصله یک چهارم فاصله مرکز جرم و مرکز سختی نسبت به مرکز جرم قرار دارد و در مدل ۸ این فاصله برابر ۰/۵ می‌باشد. برای تحلیل دینامیکی غیرخطی مدلها ۷ نگاشت دو مؤلفه‌ای انتخاب شدند. تمامی این نگاشتها بر اساس حداکثر شتاب زمین ($PGA$) در جهت $x$ به هفت مقدار مختلف مقیاس شدند و سطوح عملکرد بر اساس شدتهای مختلف $PGA$ تعریف شدند. برای سطح عملکرد بی‌وقفه نگاشتها به مقادیر ۰/۰۵g و ۰/۱۵g، برای سطح عملکرد ایمنی جانی ۰/۲۵g، ۰/۳۵g (شتاب مبنای طرح) و ۰/۴۵g و برای سطح آستانه فروریزش ۰/۵۵g و ۰/۷g در نظر گرفته شدند. مدلهای انتخاب شده در برنامه *OPENSEES* [۲۸] مدلسازی شده و مورد تحلیل قرار گرفتند. رابطه تنش کرنش در مصالح بصورت دو خطی فرض شدند. مدلسازی المانها در برنامه با استفاده از المانهای غیرخطی انجام گرفت که قابلیت در نظر گرفتن گسترش تدریجی تغییرشکلهای غیرخطی در طول و در مقطع المان را دارا بودند. برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی الگوریتم نیوتن- رافسون مورد استفاده قرار گرفت و به منظور کنترل همگرایی از الگوریتم همگرایی انرژی استفاده شد. در آنالیزهای دینامیکی میزان نسبت میرایی برابر ۵ ٪ برای مود اول سازه در نظر گرفته شد. در تحلیلها به روش رایلی این میرایی بصورت ضریبی از ماتریس جرم تأثیر داده شدند.

## ۵- بررسی نتایج تحلیلی

مدل متقارن و ۷ مدل نامتقارن بوسیله نرم‌افزار *OPENSEES* تحت اثر رکوردهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای معرفی شده در جدول (۲) مورد تحلیل قرار گرفتند. نگاشتها همگی بر روی خاک مشابه ثبت شده‌اند و سعی شده است تا با تنوع در فاصله‌ها و محتوای فرکانسی آنها گویای رفتار مدلها در زلزله‌های حوزه نزدیک و دور باشند. شدت زلزله‌ها بین ۶/۷ تا ۷/۶ ریشتر و حداقل $PGA$ در انتخاب رکوردها ۰/۱۵g در نظر گرفته شدند. برای مدل‌سازی دیوارها از المانهای رشته‌ای *(Fiber Element)* این برنامه استفاده شد. این المانهای دیوار در هر دو جهت تقسیم شده و در نتیجه اثر تغییرمکان افقی یک سمت در جاری شدن رشته‌های بیرونی المانهای سمت عمود بر آن در نظر گرفته شده است. رفتار غیر خطی رشته‌های المانها بصورت الاستو پلاستیک کامل فرض شد در نتیجه رفتار غیرخطی المانها نیز به شکل الاستوپلاستیک می‌باشد با این تفاوت که تبدیل رفتار از حالت الاستیک به پلاستیک کامل به صورت تدریجی اتفاق می‌افتد. نمونه منحنی نیرو تغییرمکان دیوارها در شکل (۵) آورده شده است. به منظور مقایسه عملکرد مدلهای نامتقارن، پاسخهای دوران طبقه به‌عنوان معیار رفتار پیچشی مدلها و پارامترهای حداکثر تغییرمکان طبقه، تغییرمکان نسبی طبقات و شکل‌پذیری نیاز المانها بعنوان معیار خسارت عناصر سازه‌ای و غیرسازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

**جدول ۲:** مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده.

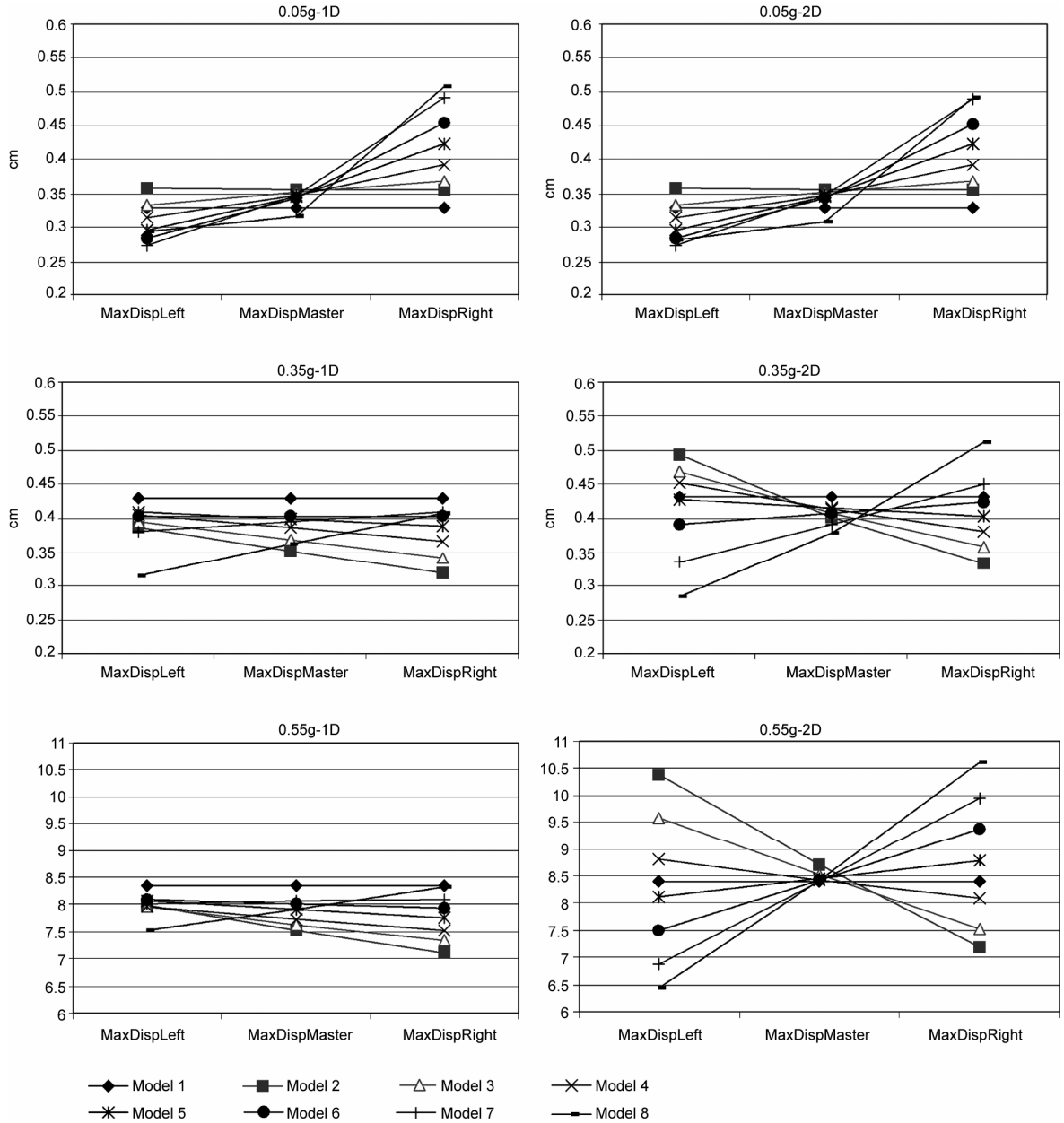
| | نام | سال | شدت $R$ | مدت *(s)* | $PGA$ *(g)* | جهت مؤلفه $x$ | *Site* | فاصله از گسل *(km)* | نوع خاک |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | *Northridge* | ۱۹۹۴ | ۶/۷ | ۲۰ | ۰/۳۰۸ | ۳۶۰ | *Arleta* | ۳/۹ | *B* |
| ۲ | *Loma Prieta* | ۱۹۸۹ | ۶/۹ | ۲۰ | ۰/۶۴۴ | ۰ | *Corralitos* | ۵/۱ | *B* |
| ۳ | *Tabas* | ۱۹۷۹ | ۷/۴ | ۳۵ | ۰/۹۲۶ | *N74E* | *Tabas* | ۳ | *B* |
| ۴ | *Chi-chi* | ۱۹۹۹ | ۷/۶ | ۳۰ | ۰/۵۱۲ | *North* | *TCU045* | ۲۴/۰۶ | *B* |
| ۵ | *Sanfernando* | ۱۹۷۱ | ۶/۶ | ۲۰ | ۰/۳۲۴ | ۲۱ | *Castiac* | ۲۴/۲ | *B* |
| ۶ | *Kerncounty* | ۱۹۵۲ | ۷/۴ | ۲۵ | ۰/۱۵۶ | ۲۱ | *Taft* | ۴۲ | *B* |
| ۷ | *Manjil* | ۱۹۹۰ | ۷/۴ | ۳۵ | ۰/۱۸۴ | *N66E* | *Qazvin* | ۴۹ | *B* |




**شکل ۵**- نمودار نیرو تغییرمکان دیوارهای برشی مدل متقارن.

در شکل (۶) حداکثر تغییرمکان گوشه‌های دیافراگم مدلها تحت اثر رکورد طبس برای حداکثر شتابهای ۰/۰۵g، ۰/۳۵g و

۰/۵۵$g$ در حالتهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش شدت، میزان اختلاف حداکثر تغییرمکان در دو سمت دیافراگمها افزایش پیدا می‌کند که نمایانگر افزایش تأثیر پیچش می‌باشد. در شدتهای پایین زلزله که در آنها مدلها در محدوده خطی رفتار می‌کنند، رفتار مدلها تحت اثر رکوردهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای مشابه می‌باشد. اما با افزایش شدت زلزله عملاً اختلاف تغییر مکان در دو سمت مدلها افزایش پیدا می‌کند و مدلها تحت اثر رکوردهای دو مؤلفه‌ای دچار پیچش شدیدتر می‌گردند. این امر ناشی از جاری شدن المانهای عمود بر جهت نامتقارن سازه در اثر مؤلفه دوم زلزله می‌باشد که به شدت سبب کاهش سختی پیچشی مدلها می‌گردند. در شدتهای پایین زمین‌لرزه ($PGA$ برابر با ۰/۰۵$g$) حداکثر تغییرمکان در سمت المان کوچکتر و یا سمت نرم سازه (گوشه‌ای که المان کوچکتر در آن واقع است) رخ داده است. اما در شدتهای بالاتر این نحوه رفتار تغییر کرده و در مدلهایی که در آنها مرکز جرم بین مرکز سختی و مرکز مقاومت یا روی آنها قرار داشته، حداکثر تغییرمکان در سمت سخت سازه (گوشه‌ای که المان بزرگتر در آن واقع است) بوجود آمده است. بعنوان نمونه در مدل شماره ۲ که حداکثر خروج از مرکزیت مقاومت را داشته، حداکثر تغییرمکان در سمت سخت اتفاق افتاده و تقریباً تغییرمکانی مشابه با مدل ۸ با حداکثر جابجایی در آن ایجاد شده است. اما در مدلهایی که خروج از

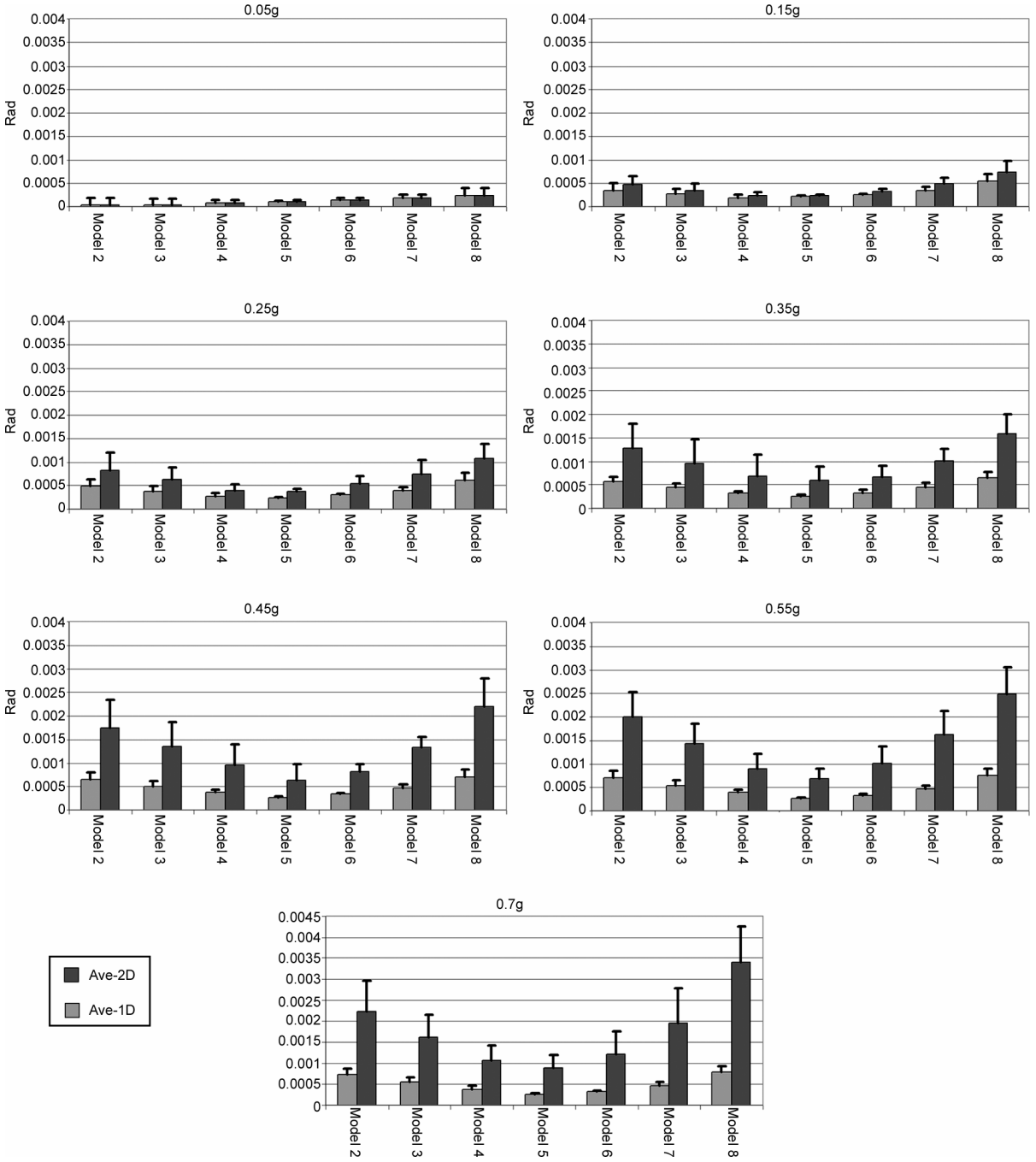



**شکل ۶**- حداکثر تغییرمکان گوشه‌ها و مرکز جرم دیافراگم مدلها برای زلزله طبس با $PGA$های ۰/۰۵$g$، ۰/۳۵$g$ و ۰/۵۵$g$ در حالتهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای.

مرکزیت مقاومت کمتر یا صفر بوده نظیر مدلهای ۵ و ۶، تغییر محل حداکثر تغییرمکان از سمت سخت به سمت نرم سبب شده، تا تغییرمکان حداکثر این مدلها کاهش یافته و شکل پیکربندی تغییرشکل سازه تقریباً مشابه مدل متقارن شود و یا به عبارت دیگر میزان حداکثر تغییرمکان این مدلها در گوشه‌ها نزدیکتر به مقدار آن در محل مرکز جرم شود.

به منظور مقایسه رفتار پیچشی مدلها در شکل (۷) میانگین حداکثر دوران دیافراگم مدلها در شدتهای مختلف تحت اثر رکوردهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای نشان داده شده است. در این شکلها خطهای سیاه مقادیر انحراف معیار پاسخهای دورانی نسبت به میانگین پاسخها می‌باشد.

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش شدت زلزله مقدار دوران مدلها افزایش می‌یابد. در شدتهای پایین زلزله که رفتار مدلها بصورت خطی می‌باشد مدلهایی که دارای خروج مرکزیت سختی کمتر می‌باشند مانند مدلهای ۳ و ۴ دچار دوران کمتر می‌گردند اما با اندکی افزایش شدت رکورد زلزله این مدلهای ۵ و ۴ هستند که کمترین میزان دوران را دارا می‌باشند. با افزایش بیشتر شدت زلزله مدل ۶ نیز پاسخ دورانی مناسبی نسبت به سایر مدلها از خود نشان می‌دهد. در مجموع مدل ۵ در بین مدلها کمترین پاسخ دورانی را از خود نشان داده است.



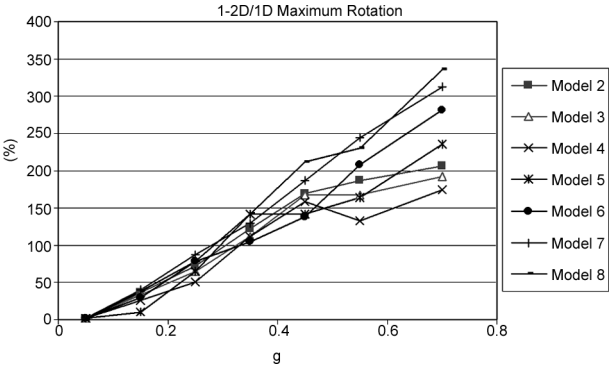

**شکل ۷**- میانگین دوران حداکثر دیافراگم در ۷ رکورد انتخابی برای حالتهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای.

نکته دیگری که در این میان قابل مشاهده است اینکه تنها وجود آرایش بالانس و صرف قرارگیری مرکز جرم بین مرکز مقاومت و مرکز سختی سبب مناسبتر شدن پاسخ نگشته و مدل ۳ با وجود داشتن شرایط آرایش بالانس و قرار گیری مرکز جرم بین مرکز مقاومت و مرکز سختی رفتاری مشابه مدل ۷ که شرایط آرایش بالانس را نداشته از خود نشان داده است.

با مقایسه رفتار مدلها تحت اثر رکوردهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای مشاهده می‌شود که اگرچه تأثیر زلزله در هر دو جهت اصلی سبب افزایش دوران طبقات شده است اما روندی که در مقایسه بین مدلهای مختلف مشاهده شد، حفظ شده است. به منظور بررسی و مقایسه پاسخهای دورانی در دو حالت تأثیر زلزله بصورت تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای و تأثیر شدت زلزله بر آن در شکل (۸) نسبت اختلاف دو حالت به نسبت پاسخ حالت تک مؤلفه‌ای بر حسب درصد ($\alpha$) براساس رابطه زیر محاسبه شده

$$\alpha = \frac{\Delta_{1D} - \Delta_{2D}}{\Delta_{1D}} * 100 \qquad (۳)$$

در این رابطه $\Delta_{2D}$ حداکثر تغییرمکان در حالت دو مؤلفه‌ای و $\Delta_{1D}$ حداکثر تغییرمکان در حالت تک مؤلفه‌ای می‌باشند.

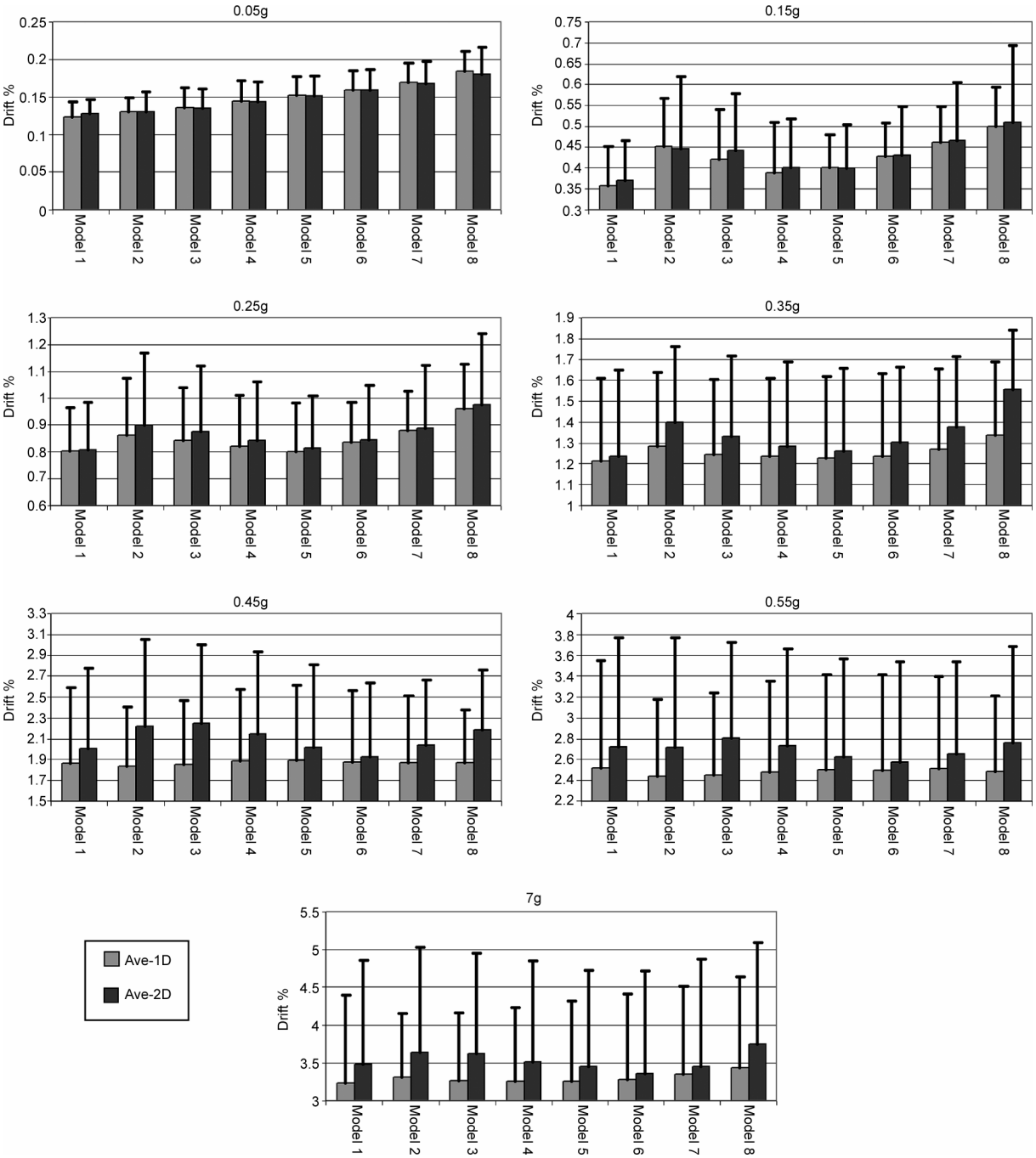



**شکل ۸**- نسبت افزایش دوران طبقه برای مدلها درحالت رکوردهای دو مؤلفه‌ای به تک مؤلفه‌ای.

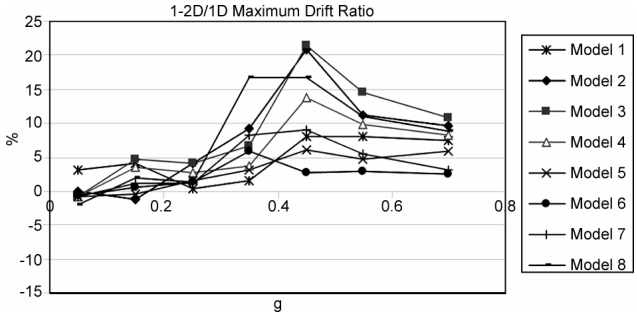
با توجه به شکل (۸) تقریباً در همه حالتها در شدتهایی که رفتار سازه غیر خطی بوده است (تقریباً از $0/10g$) رکوردهای دو مؤلفه‌ای میزان دوران طبقه را افزایش داده‌اند. این روند در همه مدلها تا $0/45g$ تقریباً به شکل خطی با شیبهایی مشابه بوده است اما با افزایش بیشتر شدت زلزله در مدلهای ۲، ۳ و ۴ این روند تغییر می‌کند و از شدت افزایش دوران طبقه در این مدلها کاسته می‌شود.

در شکل (۹) میزان تغییرمکان نسبی طبقه برای شدتهای زمین‌لرزه از $0/05g$ تا $0/7g$ برای حالتهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای آورده شده است (مقیاس محورهای عمودی در این شکل مشابه نمی‌باشد). مجدداً خطهای سیاه نمایانگر انحراف معیار پاسخها برای زلزله‌های مختلف می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود اختلاف بین مدلهای متفاوت برای این پارامتر کمتر است که این امر می‌تواند به این علت باشد که مود رفتار غالب سازه، مود انتقالی بوده و تغییرشکلهای پیچشی تأثیر کمتری در پاسخ کلی سازه دارند. در شدتهایی که سازه در محدوده خطی رفتار نموده مناسبترین مدلها، مدلهای با حداقل خروج از مرکزیت سختی بوده‌اند. اما با افزایش شدت زلزله و به محض اینکه سازه وارد محدوده غیرخطی می‌گردد روال فوق تغییر نموده و مدلهایی که در آنها مرکز جرم بین مرکز سختی و مرکز مقاومت، در فاصله کمتر به مرکز مقاومت قرار دارد پاسخ مناسبتری نسبت به سایر مدلها از خود نشان می‌دهند. در شدتهای کمتر، مدل ۵ مناسبترین پاسخ را داشته و مدل ۴ نزدیک به مدل ۵ رفتار می‌نماید. اما با افزایش $PGA$ که رفتار غیرخطی مدلها در حین زلزله تشدید می‌گردد، به مرور مدل شماره ۶ که در آن مرکز جرم بر مرکز مقاومت منطبق است پاسخ مناسبتری از خود نشان می‌دهد. البته با افزایش شدت زمین‌لرزه عملاً از سهم تغییرشکل پیچشی نسبت به سهم کلی تغییرشکل کاسته شده و حساسیت مدلها به نحوه توزیع مقاومت کاهش می‌یابد.

روند ذکر شده در رکوردهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای تقریباً مشابه می‌باشد. اما در رکوردهای تک مؤلفه‌ای که میزان دوران دیافراگم در آنها کمتر است، اختلاف بین پاسخ تغییر مکان نسبی به مراتب کمتر از زمانی است که مدلها در هر دو جهت اصلی خود تحت تأثیر تحریکات لرزه‌ای قرار می‌گیرند. به منظور بررسی میزان تأثیر دو مؤلفه‌ای بودن رکوردها در شدتهای مختلف، مقدار افزایش تغییرشکل نسبی در شدتهای ۰ تا $0/7g$ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در نظر گرفتن رکوردهای دو مؤلفه‌ای در تحلیل مقدار تغییرمکان نسبی طبقه را تا حدود ۲۰٪ افزایش داده است. البته این مسئله برای همه مدلها مشابه نبوده و میزان تغییرات این پارامتر برای مدلهایی که خروج از مرکزیت مقاومت کمتر داشته‌اند تا زیر ۱۰٪ محدود شده است. حداکثر اختلاف پاسخها بین حالت تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای در اکثر مدلها در حدود در شدت $0/45g$ اتفاق افتاده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در نظر گرفتن رکوردهای دو مؤلفه‌ای در تحلیل مقدار تغییرمکان نسبی طبقه را تا حدود ۲۰٪ افزایش داده است. البته این مسئله برای همه مدلها مشابه نبوده و میزان تغییرات این پارامتر برای مدلهایی که خروج از مرکزیت مقاومت کمتر داشته‌اند تا زیر ۱۰٪ محدود شده است. حداکثر اختلاف پاسخها بین حالت تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای در اکثر مدلها در حدود در شدت $0/45g$ اتفاق افتاده است.




**شکل ۹**- میانگین تغییر شکل نسبی طبقه در ۷ رکورد انتخابی برای حالتهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای.

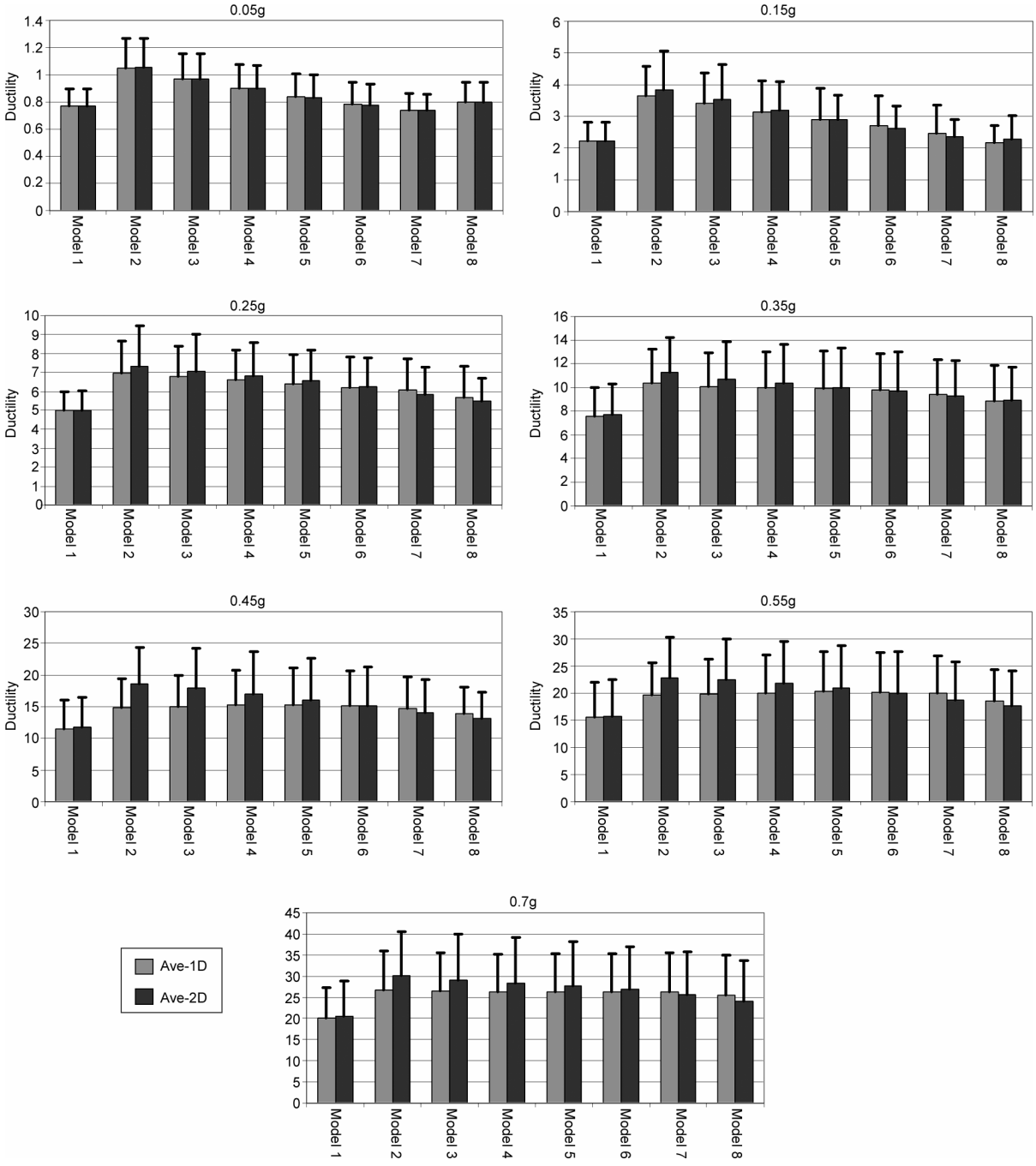



**شکل ۱۰**- نسبت افزایش تغییرمکان نسبی طبقه برای مدلها درحالت رکوردهای دو مؤلفه‌ای به تک مؤلفه‌ای.

میزان تقاضای شکل‌پذیری در المانهای سازه‌ای پارامتری است که در بررسی رفتار سازه‌های نامتقارن مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. با توجه به اینکه این معیار خسارت، از تقسیم تغییر مکان حداکثر بر تغییرمکان حد جاری شدن به دست می‌آید در واقع

مقدار نحوه تغییرات آن در پلان ساختمان منتجه نحوه توزیع تغییر مکان حداکثر و تغییرمکان جاری شدن المانها می‌باشد. مقدار میانگین این پارامتر برای مدلهای مختلف در ۷ رکورد زلزله انتخابی برای شدتهای $0/05g$ تا $0/7g$ در شکل (۱۱) نشان داده شده است. (مقیاس محورهای عمودی در این شکل مشابه نمی‌باشد). در این شکل نتایج برای حالت تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای آورده شده‌اند.

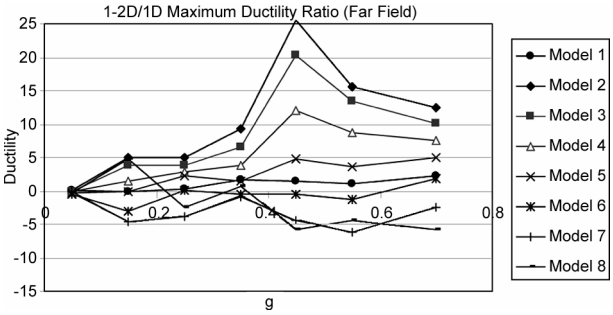
همانطور که مشخص است حساسیت این متغیر نسبت به نحوه توزیع مقاومت در المانهای جانبی نسبت به تغییرمکان نسبی طبقه و یا تغییرمکان مطلق بیشتر می‌باشد که علت آن می‌تواند در نحوه توزیع تغییرمکان حد جاری شدن و تغییرات شدیدتر آن در الگوی هندسی مدل انتخاب شده باشد. مجدداً با وجود آنکه دو مؤلفه‌ای بودن رکوردها مقدار شکل‌پذیری نیاز المانها را تغییر داده اما شدت آن به حدی نبوده تا نحوه عملکرد مدلها نسبت به یکدیگر را تغییر دهد. در همه موارد به جز در شدت $0/05g$ که میزان تغییر مکان گوشه‌ها کمتر بوده مدل شماره ۸ که در آن مرکز مقاومت بین مرکز سختی و مرکز جرم و در وسط آنها قرار گرفته کمترین میزان شکل‌پذیری تقاضا را داشته است و مقدار آن تقریباً شبیه به مدل متقارن مبنا یعنی مدل شماره ۱ می‌باشد. البته در اینجا نیز با افزایش شدت زلزله میزان تأثیر پاسخ پیچشی نسبت به پاسخ انتقالی کاهش یافته و اختلاف بین مدلها کاهش می‌یابد.



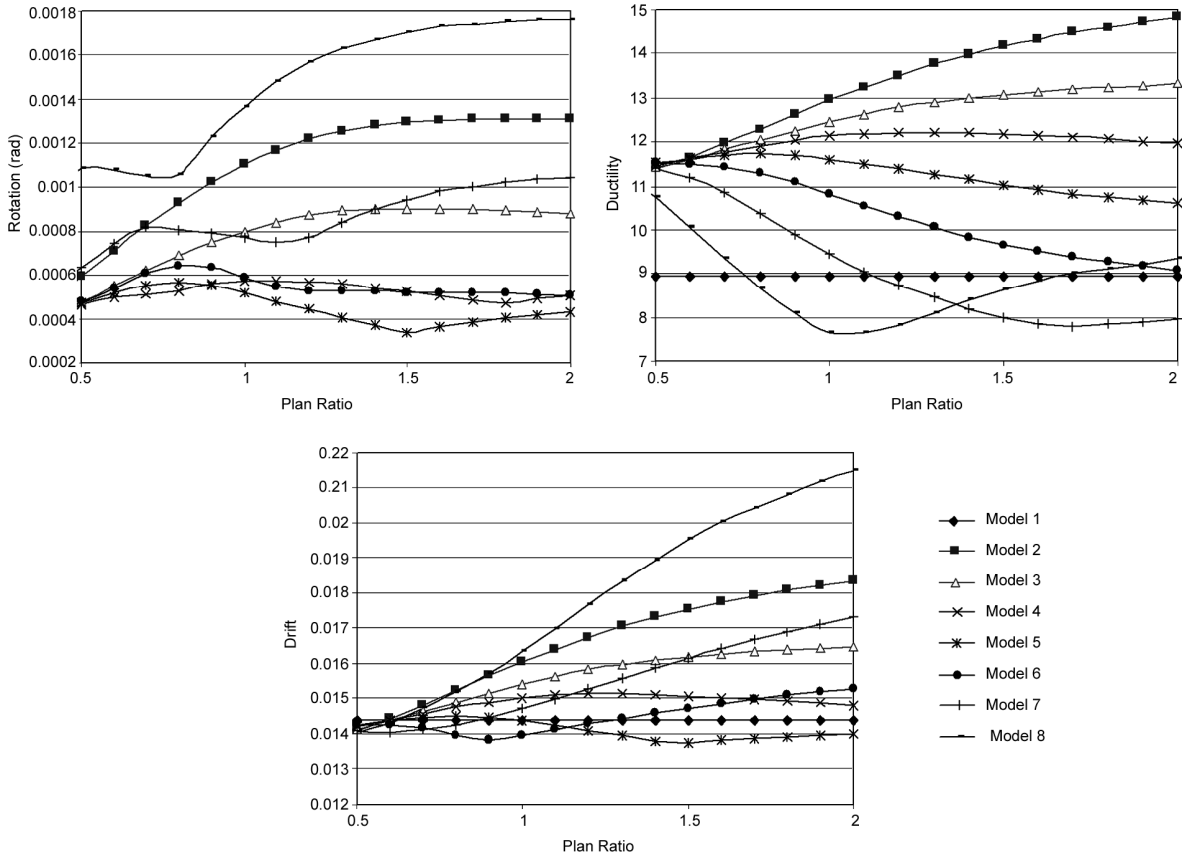

**شکل ۱۱**- میانگین تقاضای شکل‌پذیری در ۷ رکورد انتخابی برای حالتهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای.

به منظور بررسی شرایط پاسخ شکل‌پذیری تقاضا در دو حالت تأثیر تک جهته و دو جهته زلزله، میزان اختلاف این دو حالت در مقابل تغییرات شدت زلزله در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود دو مؤلفه‌ای بودن رکوردهای زلزله در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تا حدود ۲۵٪ میزان پاسخها را تغییر داده و این امر بیشترین تأثیر خود را در مدلهایی داشته که مرکز جرم به مرکز سختی نزدیک بوده است. در مقابل مدلهایی که دارای خروج از مرکزیت مقاومت کمتری بوده‌اند در مقابل تأثیر دو مؤلفه‌ای شتاب نگاشتها چیزی در حدود ۵+٪ تا ۵-٪ تغییر نموده‌اند که البته در این میان تغییرات شکل‌پذیری نیاز در مدل با توزیع مقاومت متقارن کمترین میزان را داشته است. بیشترین میزان تغییرات درحالت دو مؤلفه‌ای نسبت به حالت تک مؤلفه‌ای در شدت ۰/۴۵$g$ اتفاق افتاده است. در مدلهایی که مرکز مقاومت و مرکز سختی در یک سمت مرکز جرم قرار داشته‌اند تقریباً می‌توان گفت که تحلیل تک مؤلفه‌ای میزان شکل‌پذیری نیاز را در حاشیه اطمینان و تا حدودی بصورت دست بالا ارائه نموده است. با مقایسه انحراف معیار نتایج در شکلهای (۷)، (۹) و (۱۱) مشخص می‌گردد انحراف معیار برای پارامتر دوران طبقه در مدلهای مختلف متفاوت بوده و معمولاً برای مدلهایی که حداقل پاسخ را دارند کمتر است اما انحراف معیار در پاسخ تغییرمکان نسبی طبقه و شکل‌پذیری نیاز ضمن اینکه از مقدار بالاتری نسبت به پارامتر دوران طبقه برخوردار است اما تقریباً مقدار آن در مدلهای مختلف مشابه بوده است.

جهت بررسی تأثیر نسبت ابعاد پلان در عملکرد مدلها نسبت به یکدیگر مطالعه پارامتری بر مجموعه‌ای از مدلها مشابه مدل انتخابی و با نسبت عرض به طولهای متفاوت انجام گرفت. در این بررسی نسبت عرض به طول مدلها به شکلی تغییر داده شده که جرم کلی مدل تغییر ننماید. نسبت عرض به طول مدلها از مقدار ۰/۵ تا ۲ تغییر داده شدند. در شکل (۱۳) نتایج این بررسی برای نگاشت طبس با بیشینه ۰/۳۵$g$ برای پاسخهای دوران طبقه، تغییر شکل نسبی بین طبقات و نسبت شکل‌پذیری نشان داده شده است.




**شکل ۱۲**- نسبت تقاضای شکل‌پذیری برای مدلها درحالت رکوردهای دو مؤلفه‌ای به تک مؤلفه‌ای.




**شکل ۱۳**- تغییرات پاسخهای دوران، تغییرشکل نسبی و نسبت شکل‌پذیری مدلها با تغییر ابعاد پلان تحت اثر نگاشت دو مؤلفه‌ای طبس با $PGA$=۰/۳۵$g$.

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود برای نسبتهای عرض به طول کوچکتر از یک که بعد پلان سازه در جهت متقارن بیشتر از جهت نامتقارن است میزان پاسخ دورانی سازه‌ها کم می‌باشد اما با افزایش نسبت عرض به طول پلان و افزایش بعد سمت نامتقارن، پاسخ دورانی سازه افزایش می‌یابد. این امر سبب می‌گردد تا با افزایش نسبت عرض به طول، تأثیر توزیع مقاومت نیز در بین مدلها افزایش یابد. برای پارامترهای تغییرشکل نسبی طبقه و دوران طبقه در نسبتهای عرض به طول کوچکتر از ۱، مدلهای ۴، ۵ و ۶ با تفاوت ناچیز بهترین عملکرد را داشته‌اند اما با افزایش نسبت عرض به طول تفاوت پاسخ مدلهای متفاوت افزایش یافته و مدل ۵ عملکرد مناسبتری نسبت به سایر مدلها از خود نشان می‌دهد. اما برای پارامتر نسبت شکل‌پذیری وضعیت متفاوت می‌باشد در این حالت برای نسبتهای کوچکتر از ۱/۴ مدل ۸ با تفاوت قابل‌ملاحظه نسبت به سایر مدلها عملکرد مناسبتر داشته؛ اما با افزایش نسبت عرض به طول مدل ۷ عملکرد مناسبتری از خود نشان می‌دهد. این امر به این علت می‌باشد که با افزایش نسبت عرض به طول، اختلاف توزیع تغییرمکان در دو سمت پلان افزایش یافته و میزان تأثیر تغییر مکان حد جاری شدن در این پارامتر افزایش می‌یابد. می‌توان انتظار داشت که با افزایش بیشتر نسبت عرض به طول پلان آرایش مناسب مراکز برای نسبت شکل‌پذیری شبیه‌تر به آرایش مناسب برای تغییرمکان نسبی گردد.

## ٦- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه عملکرد ساختمانهای یک طبقه با آرایشهای متفاوت مراکز سختی و مقاومت و جرم تحت اثر نگاشتهای تک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای در محدوده غیرخطی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. با توجه به مطالب ارائه شده و در محدوده مدلهای مورد بررسی نتایج زیر را می‌توان ارائه نمود:

۱- لزوماً قرارگیری مرکز جرم در بین مرکز سختی و مرکز مقاومت سبب کاهش دوران طبقه یا تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای نمی‌گردد بلکه می‌بایست مرکز جرم حتی‌المقدور در فاصله‌ای کمتر نسبت به مرکز مقاومت قرار گیرد.

۲- برای کاهش دوران طبقه، تغییرشکل یا تغییرمکان نسبی طبقات، مناسبترین آرایش مراکز جرم، سختی و مقاومت در محدوده غیرخطی در این مطالعه آرایشی بود که در آن مرکز جرم بین مرکز مقاومت و مرکز سختی و در فاصله یک چهارم نسبت به مرکز مقاومت قرار گیرد.

۳- برای کاهش شکل‌پذیری نیاز المانهای مقاوم جانبی برای نسبتهای عرض به طول کوچکتر از ۱/۴، مناسبترین آرایش در محدوده غیرخطی و در بین مدلهای مورد بررسی آرایشی بود که در آن مرکز مقاومت در وسط مرکز سختی و مرکز جرم قرار داشت اما با افزایش نسبت عرض به طول محل این آرایش تغییر کرده و آرایش مناسب برای پارامتر نسبت شکل‌پذیری به آرایشهای مناسب برای تغییرشکل نسبی طبقه و دوران طبقه نزدیک می‌گردد.

۴- تأثیر دو جهته زلزله در تحلیلهای تاریخچه زمانی غیرخطی در اکثر موارد سبب افزایش پاسخ پیچشی سازه و به طبع تغییر سایر پارامترهای پاسخ می‌گردد اما این میزان در مدلهایی که خروج از مرکزیت مقاومت آنها کوچکتر است، کمتر می باشد.

۵- با افزایش شدت زلزله تأثیر رکوردهای دو مؤلفه‌ای بر پاسخ پیچشی بصورت خطی و صعودی می‌باشد اما این امر در پاسخهای تغییرمکان و شکل‌پذیری نیاز از یک روند مشابه پیروی نمی‌کند و لزوماً بصورت افزایشی نمی‌باشد.

۶- به منظور بهبود سازه در سطوح عملکرد مورد نظر می‌بایست در ابتدا نوع خرابی بحرانی و پارامتر متناظر با آن تعیین شده و با توجه به آن آرایش مناسب برای مراکز سختی، مقاومت و جرم تعیین گردند.

بر اساس مطالعات دلالرا و چوپرا [۲۹] نتایج به‌دست آمده از مدلهای یک طبقه با سه المان مقاوم جانبی قابل تعمیم برای ساختمانهای چند طبقه نامتقارن منظم در ارتفاع و با المانهای مقاوم جانبی بیشتر می‌باشند. اما مسائل خاصی که در این ساختمانها مطرح می باشند نظیر نحوه توزیع پارامترهای خرابی در ارتفاع سازه و یا نحوه تغییر این پارامترها در سیستمهای سازه‌ای دیگر نیاز به بررسیهای مستقلی دارند که خارج از محدوده این نوشتار می‌باشد.

## مراجع


1. American Society of Civil Engineers (ASCE) (2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA.
2. Seismology Committee, Structural Engineers Association of California (1999). "Recommended Lateral Force Requirements and Commentary", 3 Edition.
3. Housner, G.W. and Outinen, H. (1958). "The Effect of Torsional Oscillation on Earthquake Stresses", Bulletin of Seismological Society of America, **48**, 221-229.

4. Rutnberg, A. (1992). "Nonlinear Response of Asymmetric Building Structures and Seismic Codes: A State of The Art Review", European Earthquake Engineering, **2**, 3-19.

5. Tso, W.K. and Ying, H. (1992). "Lateral Strength Distribution Specification to Limit the Additional Inelastic Deformation of Tortionally Unbalanced Structures", *Enginnering Structures*, **14**, 263-277.

6. Mittal, A.K. and Jain, A.K. (1995). "Effective Strength Eccentricity Concept for Inelastic Analysis of Asymmetric Structures", *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, **24**, 69-84.

7. De Stefano, M. et al (1993). "Inelastic Response and Design Criteria of Plan-Wise Asymmetric Systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22**, 245-259.

8. Chandler, A.M. and Duan, X.N. (1997). "Performance of Asymmetric Code Designed Buildings for Serviceability and Ultimate Limit States", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **26**, 717-735.

9. Chandler, A.M. and Duan, X.N. (1997). "An Optimized Procedure for Seismic Design of Torsionally Unbalanced Structures", *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, **26**, 737-757.

10. Paulay, T. (1996). "Seismic Design for Torsional Response of Ductile Buildings", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, **29**(3), 178-198

11. Paulay, T. (1997). "Are Existing Seismic Torsion Provisions Achieving the Design Aims?", *Earthquake Spectra*, **13**(2), 259-279

12. Priestley, M.J.N. and Kowalsky, M.J. (1998). "Aspects of Drift and Ductility Capacity of Rectangular Cantilever Structural Walls", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, **31**(2), 73-85.

13. Aschiem, M. (2002). "Seismic Design Based on the Yield Displacement", *Earthquake Spectra*, **18**(4).

14. Paulay, T. (1997). "Seismic Torsional Effects on Ductile Structural Wall Systems", *Journal of Earthquake Engineering*, **1**(4), 721-745.

15. Paulay, T. (1998). "Torsional Mechanism in Ductile Building Systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **27**(10), 1101-1121.

16. Myslimaj, B. and Tso, W.K. (2002). "A Strength Distribution Criterion for Minimizing Torsional Response of Asymmetric Wall-Type Systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**, 99-120.

17. Syamal, P.K. and Pekau, O.A. (1985). "Dynamic Response of Bilinear Asymmetric Structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **13**(4), 527-541.

18. Goel, R.K. and Chopra, A.K. (1990). "Inelastic Earthquake Response of One-Storey Asymmetric-Plan Systems: Effects of Stiffness and Strength Distribution", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **19**, 949-970.

19. Corenza, J.C. et al (1994). "Effect of Transverse Load-Resisting Elements on Inelastic Earthquake Response Eccentric-Plan Buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **23**.

20. Chandler, A.M. and Duan, X.N. (1997). "Performance of Asymmetric Code-Designed Buildings for Serviceability and Ultimate Limit States", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**.

21. De Stefano, M. et al. (1998). "Inelastic Seismic Response of One-Way Plan-Asymmetric Systems Under Bi-directional Ground Motions" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **27**, 363-376.

22. Riddell, R. and Santa-Maria, H. (1999). "Inelastic Response of One-storey Asymmetric Plan Systems to Bi-directional Earthquake Motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**, 273-285.

23. Iztok, P. and Fajfar, P. (2005). "On the Inelastic Torsional Response of Single-Storey Structures Under Bi-axial Excitation", *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, **34**, 931-941.

24. Marusic, D. and Fajfar, P. (2005). "On the Inelastic Seismic Response of Asymmetric

Buildings under Bi-Axial Excitation", *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, **34**, 943-963.

25. Permanent Committee for Revising the Standard 2800 (1999). "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings", Building and Housing Research Center, Tehran, Iran.

26. The International Code Council (2003). "The International Building Code".

27. Priestley, M.J.N and Calvi, G.M. (1997). "Concept and Procedure for Direct Displacement-Based Design", Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes, Fajfar and Krawinkler, Balkema, Rotterdam, 171-181.

28. OpenSees (2005). "Open System for Earthquake Engineering Simulation", Homepage Web Site: http://opensees.berkeley.edu/.

29. De la Llera, J. and Chopra, A. (1994). "Accidental and Natural Torsion in Earthquake Response and Design of Buildings", EERC, Report No. 94/07.