

# کنترل ایمنی سازه ای مهار شده به شکل خارج از مرکز توسط تحلیل استاتیکی غیرخطی

\* رامین روشن، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله پژوهشگاه  
\* عبدالرضا سروقدمقدم، استادیار پژوهشگاه مهندسی سازه پژوهشگاه

## ۱- چکیده

سیستم سازه‌ای ترکیبی است که سختی قاب مهاربندی هم مرکز (Concentric Braced Frame) را با شکل پذیری و قدرت جذب انرژی قاب مقاوم خمشی (Moment Resisting Frame) ترکیب می‌کند. در این سیستم حداقل یک انتهای هر مهاربند به یک قسمت مجزای تیر به نام تیر پیوند (Link Beam) متصل می‌شود. در یک طرح سیستم مهاربندی خارج از مرکز مطلوب، رفتار غیرخطی تحت بارگذاری تناوبی شدید، ابتدا توسط تیر پیوند جذب می‌شود. تیرهای پیوند مانند فیوزهای شکل پذیری (با محدود کردن نیروهای انتقال یافته به مهاربندها و سایر اعضای قاب) عمل کرده، سبب رفتار هیستریزیس قابل پیش بینی و پایدار تحت بارگذاری تناوبی می‌شوند [۱].

در این بررسی یک قاب مهاربندی خارج از مرکز انتخاب شده است که مشخصات هندسی و مقاطع آن به ترتیب در شکل و جدول (۱) مشاهده می‌شود. برای برآورد نیروهای ثقلی و زلزله به ترتیب از آیین نامه ۵۱۹ و استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش جدید) استفاده شده است. ساختمان به روش ارتجاعی خطی و با استفاده از نرم افزار SAP90 تحلیل شده است. عناصر ساختمانی به روش تنش مجاز

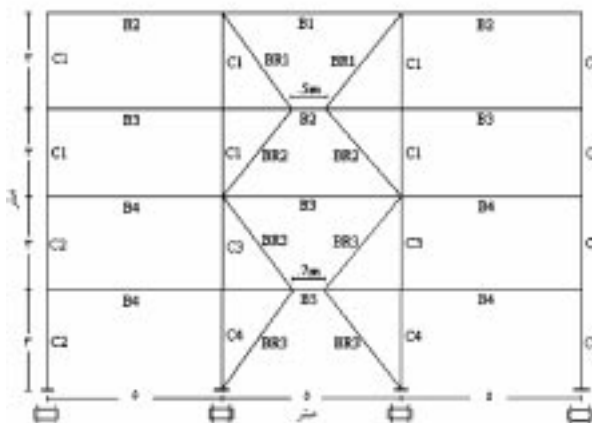
رفتار واقعی ساختمانها تحت نیروهای شدید زلزله غیرخطی است؛ بنابراین، لزوم انجام تحقیقات با مد نظر قرار دادن رفتار غیرخطی و بارگذاری واقعی آشکار می‌شود. عدم توجه مسائل اقتصادی برای تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی لزوم بکارگیری یک روش غیرخطی ساده شده را مشخص می‌کند. از میان روشهای غیرخطی ساده شده پیشنهادی برای آیین نامه های آینده، تحلیل استاتیکی غیرخطی بسادگی رفتار غیرخطی سازه را شبیه سازی کرده و به عنوان ابزاری مفید در ارزیابی لرزه ای ساختمانها، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در این مقاله، کاربرد تحلیل استاتیکی غیرخطی برای یک قاب متقارن کوتاه مرتبه با سیستم مهاربندی خارج از مرکز مورد بررسی، تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

## ۲- مقدمه

طرح لرزه ای آیین نامه بر اساس مدل های فیزیکی ساده شده، قضاوت مهندسی و تعدادی ضرایب تجربی استوار است که گاه به عدم انعطاف روند طراحی منجر می‌شود. در این راستا، ظرفیت و تقاضای لرزه ای ساختمان بوضوح بیان نشده و رفتار ساختمان در زلزله طرح که معمولاً باعث تغییرشکل های غیر ارتجاعی می‌شود بسیار نامشخص است. علت بکارگیری این روش طراحی، درک و اجرای نسبتاً آسان آن می‌باشد. اما، در این روش به دلیل وجود مسائل مذکور سطح ایمنی محدود شده و ممکن است به طرحهایی با ایمنی نامناسب منجر شود؛ بنابراین، برای شناخت خصوصیات مد انهدام ساختمان به روشهای تحلیلی غیرخطی نیاز می‌شود. تحلیل استاتیکی غیرخطی از روشهایی است که می‌تواند در ارزیابی لرزه ای ساختمانها مفید باشد.

## ۳- قاب مورد مطالعه

سیستم مهاربندی خارج از مرکز (Eccentric Braced Frame)



شکل (۱): مشخصات هندسی

جدول (۱): مشخصات مقاطع

نماد	مقطع	نماد	مقطع
BR1	2U80 [ ]	B4	2IPE160+2PL120x10
BR2	2U120 [ ]	B5	2IPE180+2PL160x14
BR3	2U140 [ ]	C1	2IPE140
B1	IPE160	C2	2IPE140+2PL70x10
B2	2IPE160+2PL50x6	C3	2IPE140+2PL100x10
B3	2IPE160+2PL80x10	C4	2IPE140+2PL120x15

با استفاده از آیین نامه AISC و بدون اعمال فلسفه طرح ظرفیت طراحی شده اند. مدلسازی غیرخطی قاب مورد نظر توسط برنامه DRAIN-2DX انجام شده است. اطلاعات تکمیلی در مورد نحوه طراحی ساختمان در مرجع [۲] بیان شده است.

در طراحی سیستم مهاربندی خارج از مرکز، استفاده از تیر پیوند کوتاه با تسلیم برشی برتری دارد؛ لذا، تیر پیوند برای تسلیم در برش طراحی می گردد. همچنین در آرایش مهاربند انتخابی نیروی محوری در تیر ایجاد نمی شود و تمام مقاومت خمشی تیر برای مقاومت در برابر لنگرهای انتهایی پیوند باقی می ماند.

#### ۴- نکاتهای انتخابی

برای تحلیل دینامیکی، سه زلزله معروف طبس، ناغان و منجیل انتخاب شده است. این زلزله ها به دلیل پراکندگی جغرافیایی دارای ویژگیهای زمین ساختی ایران می باشند. همچنین از زلزله ال سنتر و به عنوان معیار جهانی و دو زلزله کرن کانتی و سانفرانندو نیز استفاده شده است. مشخصات این نگاشتها در جدول (۲) ارائه و به منظور ایجاد زمینه ای برای مقایسه نتایج همه نگاشتها به مقیاس  $0.35g$  همپایه شده اند.

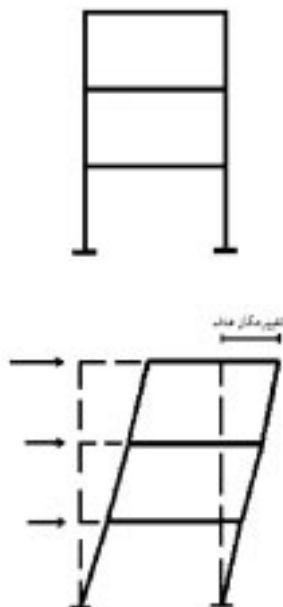
جدول (۲): مشخصات نگاشتهای انتخابی

ردیف	ایستگاه	سال وقوع (شمسی)	بیشینه شتاب زمین (g)
۱	ال سنتر و	۱۳۱۹	۰/۳۵
۲	کرن کانتی	۱۳۳۱	۰/۱۸
۳	سانفرانندو	۱۳۵۰	۰/۲۱
۴	ناغان	۱۳۵۶	۰/۷۲
۵	طبس	۱۳۵۷	۰/۹۳
۶	منجیل	۱۳۶۹	۰/۵۵

#### ۵- تحلیل استاتیکی غیرخطی

تحلیل استاتیکی غیرخطی یک روش تحلیلی ساده شده برای ارزیابی عملکرد ساختمان هنگام زلزله است. در این روش، ساختمان طرح شده تحت الگوی بارگذاری مشخص (تقریباً معادل نیروی اینرسی که هنگام

زلزله به سازه اعمال می گردد). در محل جرمهای قابل ملاحظه در ساختمان قرار گرفته، بارهای جانبی تا رسیدن ساختمان به تغییرشکل مورد انتظار در زلزله طرح (تغییر مکان هدف) به تدریج افزایش می یابند. در این حالت، نیروهای اعضا و تغییرشکلهای کلی و موضعی سازه (تخمینی از تجربه سازه در زلزله طرح است) محاسبه می شوند. در پایان به منظور کنترل ایمنی و در صورت نیاز برای رفع نقاط ضعف سیستم سازه از این ارزیابیها استفاده می شود [۳]. مراحل اصلی تحلیل استاتیکی غیرخطی در شکل (۲) شامل انتخاب مدل سازه چند درجه آزاد (Multi Degrees of Freedom)، تعیین تغییر مکان هدف برای سازه مذکور، اعمال الگوی بار انتخابی به سازه چند درجه آزاد تا رسیدن به تغییر مکان هدف و محاسبه پارامترهای پاسخ مورد نیاز در تغییر مکان هدف مشاهده می شود. اطلاعات تکمیلی در مورد اهداف، نقاط ضعف و قوت تحلیل استاتیکی غیرخطی در مرجع [۴] بیان شده است.



شکل (۲): مراحل اصلی تحلیل استاتیکی غیرخطی

#### ۵-۱- تغییر مکان هدف

ارزیابی نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی معمولاً در حداکثر تغییر مکان بامی که سازه در زلزله طرح تجربه می کند انجام می شود. مقایسه تحلیلهای دینامیکی ارتجاعی خطی (مقاومت بی نهایت) و غیرارتجاعی نشان می دهد که تغییر مکانهای حداکثر ساختمانهای با پررود متوسط تا بلند در تحلیلهای خطی و غیرخطی تقریباً یکسان می باشند؛ بنابراین، برای تخمین تغییر مکان هدف تحلیل استاتیکی

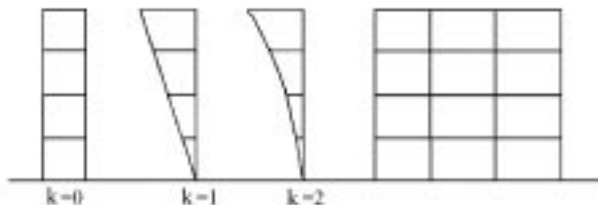
۲- الگوی بار اصلاح شده [۵]: در این روش از یک توزیع بار اصلاح- شده بر اساس بردارهای حالت ساختمان استفاده می شود تا بیانگر تغییر در توزیع بارهای جانبی، حالات مختلف تغییرشکل و انعکاس مدهای بالاتر باشد. نیروی جانبی طبقه  $i$  با رابطه (۱) محاسبه می شود:

$$P_i = \frac{W_i h_i^k}{\sum_{j=1}^N W_j h_j^k} \cdot V_b \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $V_b$  برش پایه،  $W_i$  وزن،  $h_i$  ارتفاع،  $P_i$  برش طبقه و  $k$  شاخصی است که حالت توزیع بار جانبی را کنترل می کند و تابعی از پیروی اصلی سازه می باشد. رابطه (۲) نحوه محاسبه شاخص  $k$  را ارائه می دهد:

$$I \leq k = I + \frac{(T-0.5)}{2} \leq 2 \quad (2)$$

توزیع بار جانبی تابعی از دامنه  $k$  می باشد. به عنوان مثال، اثر مقادیر مختلف  $k$  بر نحوه توزیع بار جانبی در شکل (۴) مشاهده می شود و عبارتند از:



شکل (۴): توزیع بار جانبی برای مقادیر مختلف  $k$

$k=0$ : مقدار ثابت شتاب (توزیع بار جانبی یکنواخت)؛

$k=1$ : تغییرخطی شتاب (توزیع بار مثلثی معکوس)؛

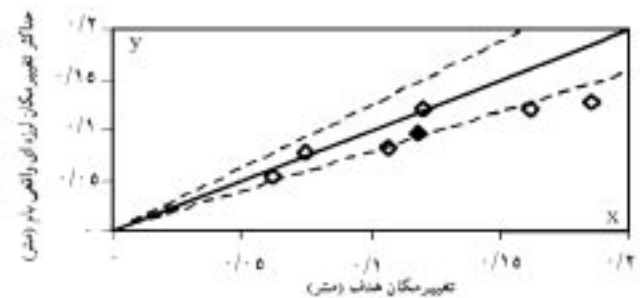
$k=2$ : منحنی درجه دو شتاب (توزیع بار سهمی).

۳- الگوی بار طیفی: الگوی بار طیفی متناظر با حداکثر نیروی طبقات حاصل از تحلیل دینامیکی طیفی به روش ترکیب مربعی کامل (Complete Quadratic Combination) می باشد. در این روش، تحلیل دینامیکی با فرض رفتار ارتجاعی خطی ساختمان و با استفاده از حداکثر بازتاب کلیه مدهای نوسانی آن انجام می شود که حداکثر بازتاب در هر مد با توجه به زمان تناوب آن مداز طیف طرح به دست می آید و سپس بازتاب کلی ساختمان از ترکیب آماری بازتابهای حداکثر هر مد تخمین زده می شود [۶].

### ۳-۵- مقایسه الگوهای بار انتخابی

الگوهای بار انتخابی در شکل (۵) طوری همپایه شده اند تا برش پایه آنها برابر واحد (عدد یک) شود. در این شکل با توجه به ارتعاش

غیرخطی به جای استفاده از میانگین تغییرمکانهای لرزه ای واقعی بام حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی زمین لرزه های مختلف، می توان از میانگین تغییرمکانهای بام سازه حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی ارتجاعی زمین لرزه های متفاوت استفاده کرد. برای کنترل صحت این موضوع، تغییرمکانهای بام حاصل از این دو تحلیل در قالب مورد مطالعه با یکدیگر مقایسه می شوند. ارتباط بین تغییرمکانهای هدف بر اساس تحلیلهای دینامیکی ارتجاعی با تغییرمکانهای لرزه ای واقعی بام ساختمان حاصل از تحلیلهای تاریخچه زمانی غیرخطی در شکل (۳) مشاهده می شود. در نمودار این شکل، محور  $X$  بیانگر حداکثر تغییرمکان بام حاصل از تحلیلهای تاریخچه زمانی ارتجاعی و محور  $Y$  بیانگر حداکثر تغییرمکان لرزه ای بام حاصل از تحلیلهای دینامیکی غیرخطی برای قاب مورد نظر است. بنابراین هر نقطه در نمودار، بیانگر مقادیر مذکور برای یک نگاشت خاص است و خطوط منقطع بیانگر تفاوت به میزان ۲۰ درصد می باشند. با توجه به شکل (۳)، در قاب مورد مطالعه فرض رفتار ارتجاعی به نتایج محافظه کارانه ای از تغییرمکان حداکثر بام منجر می شود. برای افزایش دقت این تقریب می توان از میرایی بالاتری در تحلیل دینامیکی ارتجاعی قاب مذکور استفاده کرد.



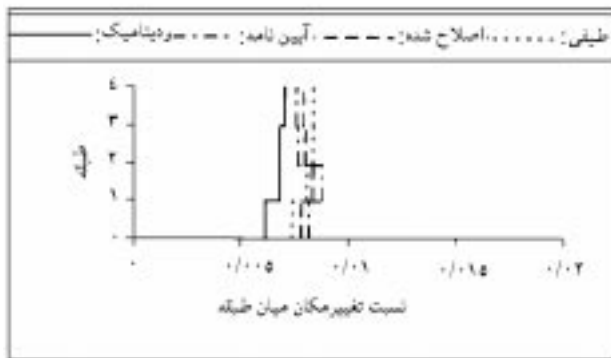
شکل (۳): مقایسه تغییرمکان بام حاصل از تحلیلهای دینامیکی ارتجاعی و غیرخطی

### ۲-۵- توزیع بار جانبی

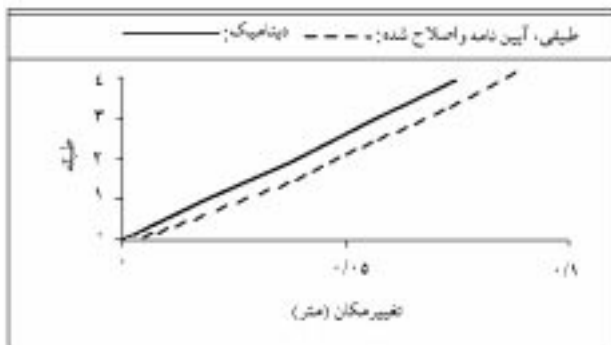
نحوه توزیع بار جانبی در تحلیل استاتیکی غیرخطی بر صحت نتایج تأثیر می گذارد. در حقیقت این توزیع بیانگر نیروی اینرسی جانبی است که به شدیدترین پاسخها در ساختمان منجر می شود. در این مقاله به منظور ارزیابی میزان حساسیت نتایج نسبت به الگوی بار انتخابی از سه الگوی بار ثابت استفاده می شود. این الگوها عبارتند از:

#### ۱- الگوی بار استاتیکی معادل آیین نامه: این الگو حاصل توزیع

نیروی جانبی پیشنهادی در آیین نامه طرح ساختمانها در برابر زلزله است. در این روش نیروی جانبی زلزله بر مبنای زمان تناوب اصلی نوسان ساختمان و با استفاده از طیف بازتاب طرح تعیین می شود.



شکل (۶، الف): مقایسه نحوه توزیع نسبت تغییر مکان میان طبقه در ارتفاع ساختمان حاصل از تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی



شکل (۶، ب): مقایسه نحوه توزیع تغییر مکان در ارتفاع ساختمان حاصل از تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی

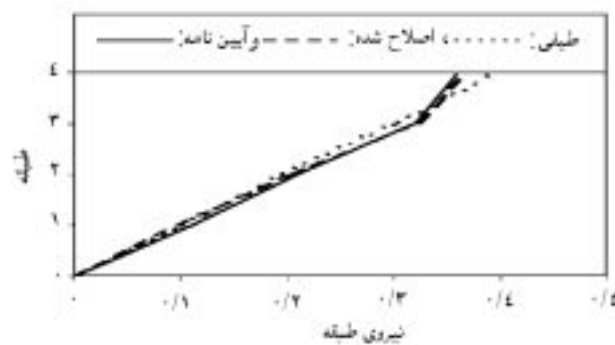
با حفظ رفتار ارتجاعی ستونها به توزیع یکنواخت تغییر مکان میان طبقه در ارتفاع ساختمان منجر می‌شود.

## ۷- میزان حساسیت نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی به تغییر مکان هدف

تحلیل استاتیکی غیرخطی نسبت به نوع الگوی بار جانبی حساس است و از بین الگوهای بار مورد استفاده توزیع بار طیفی به روش ترکیب مربعی کامل بهترین تقریب را از تحلیل دینامیکی غیرخطی ارائه می‌دهد. بنابراین، به منظور کنترل حساسیت مدل نسبت به تغییر مکان هدف، از توزیع بار مذکور که تقریب بهتری از نسبت تغییر مکان میان طبقه قاب مورد مطالعه ارائه می‌دهد استفاده می‌شود و تغییر مکانهای هدف متفاوتی برای انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی در نظر گرفته می‌شوند.

### ۷-۱- نسبت تغییر مکان میان طبقه

نسبت تغییر مکان میان طبقه حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی برای تغییر مکانهای هدف متفاوت در شکل (۷) ارائه شده است که با میانگین حداکثر نسبت تغییر مکان میان طبقه حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی مقایسه می‌شوند. بنابراین؛ مشاهده می‌شود

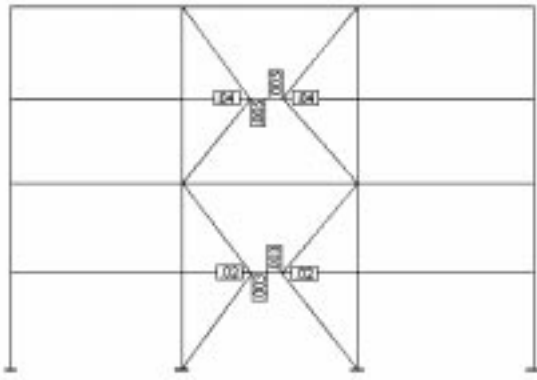


شکل (۵): توزیعهای بار جانبی برای استفاده در تحلیل استاتیکی غیرخطی

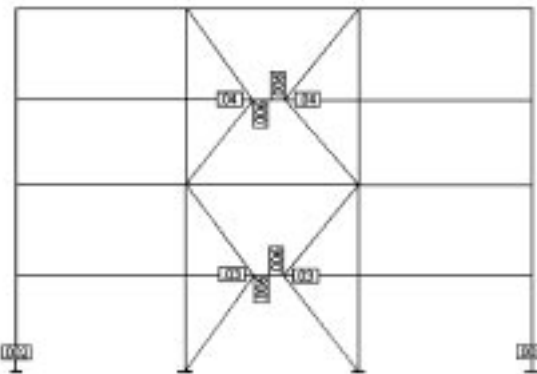
غالب ساختمان در مد اصلی، توزیعها از شکل ظاهری نسبتاً یکسانی تبعیت می‌کنند. کاهش شدت بار آیین نامه در طبقه فوقانی قاب به دلیل ارتباط مستقیم این توزیع با وزن و ارتفاع طبقات است. الگوی بار طیفی متناظر با جرم و سختی طبقات توزیع می‌شود؛ ولی، بیانگر کاهش جرم و سختی در طبقه فوقانی نمی‌باشد. علت این امر وجود مقاطع محافظه کارانه در طبقه فوقانی قاب است که سبب حفظ روند خطی توزیع بار طیفی در این طبقه می‌شود.

## ۶- شاخصهای مرتبط با تغییر مکان

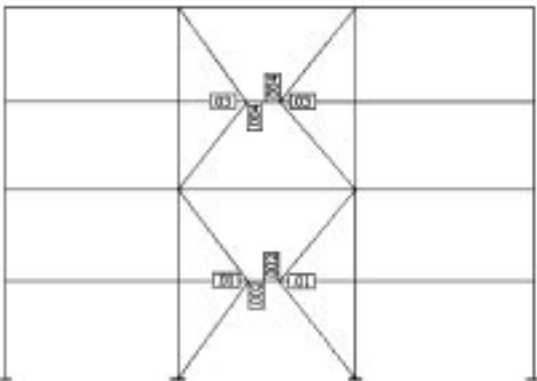
در تخمین رفتار واقعی ساختمان هنگام وقوع زمین لرزه شاخصهای تغییر مکان و تغییر مکان میان طبقه نسبت به سطح نیرو در اعضا از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند؛ زیرا، زمان وقوع زمین لرزه نیروهای چندین برابر نیروهای طراحی به ساختمان وارد می‌شود که این نیروی اضافی با افزایش مقاومت و شکل پذیری کنترل می‌شود. بنابراین حتی زمین لرزه‌های متوسط می‌توانند ساختمان را به محدوده غیرخطی هدایت کنند که در این ناحیه به دلیل باز توزیع نیرو در اعضا، سطح نیرو در عضو از اهمیت کمتری برخوردار است. نتایج تغییر مکان و نسبت تغییر مکان میان طبقه حاصل از میانگین تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی و تحلیل استاتیکی غیرخطی در شکل (۶ الف و ب) مقایسه می‌شوند. در این شکل تحلیل استاتیکی غیرخطی تخمینی دست بالا، اما نسبتاً خوب از رفتار واقعی ساختمان ارائه می‌دهد؛ زیرا میانگین مقادیر تغییر مکان هدف مورد استفاده برای تحلیل استاتیکی غیرخطی بیشتر از میانگین حداکثر تغییر مکان بام حاصل از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی می‌باشد. تغییر مکان میان طبقه تقریباً به طور یکنواخت در ارتفاع ساختمان توزیع می‌شود که علت آن عدم توزیع مفاصل در ستونها و جذب انرژی اعمالی در تیر پیوند می‌باشد. قاب یاد شده به طور غیر مستقیم از فلسفه تیر ضعیف- ستون قوی تبعیت می‌کند و



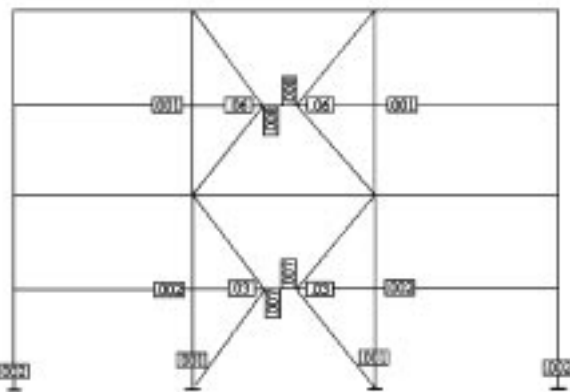
شکل (۸، الف): نحوه توزیع و دامنه چرخش مفاصل پلاستیک- زمین لرزه ناغان



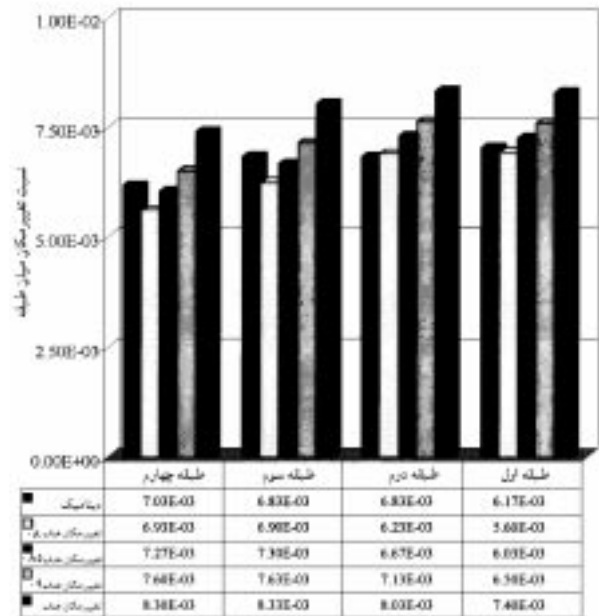
شکل (۸، ب): نحوه توزیع و دامنه چرخش مفاصل پلاستیک- زمین لرزه طیس



شکل (۸، پ): نحوه توزیع و دامنه چرخش مفاصل پلاستیک- زمین لرزه منجیل



شکل (۸، ت): نحوه توزیع و دامنه چرخش مفاصل پلاستیک- زمین لرزه کرن



شکل (۷): مقایسه نسبت تغییر مکان میان طبقات حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی بر اساس تغییر مکانهای هدف متفاوت با نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی

استفاده از  $0.85$  تغییر مکان هدف در تحلیل استاتیکی غیرخطی، بهترین تقریب را از تحلیل دینامیکی غیرخطی ارائه می کند.

## ۲-۲- چرخش مفاصل پلاستیک

در ساختمانهایی که به هنگام زمین لرزه رفتار غیرخطی دارند میزان تغییر شکل پلاستیک، شاخص مناسبی از رفتار است. جاری شدنهای کلی در اطراف اتصالات تیر به ستون ممکن است در دو انتهای تیر، ستون (بالا و پایین اتصال) و چشمه اتصال رخ دهند. بنابراین؛ تقاضاهای کلی، میزان چرخش مفاصل پلاستیک در تیرها، ستونها و کجی و پیچیدگی پلاستیک (در اثر تنش برشی) چشمه اتصال می باشند [۷]. دامنه و موقعیت مکانی چرخش مفاصل پلاستیک قاب مورد نظر تحت زمین لرزه های متفاوت با نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی حاصل از الگوی بار طیفی و  $0.85$  تغییر مکان هدف به ترتیب در شکل های (۸، الف- ج) و (۹) مقایسه می شوند. در قاب مورد نظر تحلیل استاتیکی غیرخطی بر اساس الگوی بار طیفی تخمین خوبی از نحوه توزیع خسارت ارائه می دهد. تیر پیوند همانند یک فیوز شکل پذیر سبب اتلاف انرژی در قاب می شود. دامنه چرخش مفاصل پلاستیک اعضای خارج از تیر پیوند حتی در شرایط بحرانی از حد مجاز ( $0.2$  رادیان) تجاوز نمی کنند. جذب انرژی اعمالی زلزله توسط تیر پیوند و بکارگیری مهاربند خارج از مرکز در قاب خمشی از دلایل اصلی این پدیده می باشد.

۸۵/۰ در تغییر مکان هدف و استفاده از الگوی بار طیفی قاب مورد مطالعه باعث بهبود نتایج می شود. به طور کلی تحلیل استاتیکی غیرخطی سیستم مهاربندی خارج از مرکز مورد مطالعه، تقریب خوبی از تحلیل دینامیکی غیرخطی ارائه می دهد.

### ۹- مراجع

1-Engelhardt, M. D. & Popov, E. P. (1989), "On Design of Eccentrically Braced Frames", Earthquake Spectra, Vol. 5, No. 3, PP. 495-511.

۲- روشن، رامین. "ارزیابی نتایج آنالیزهای غیرخطی استاتیکی و دینامیکی در ساختمانهای فولادی کوتاه مرتبه دارای سیستم های مهاربندی متفاوت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۸.

3-Krawinkler, H. (1996), "Pushover Analysis: Why, How, When and When Not To Use it", Proc. Of the 1996 Convention of the Structural Engineering Association of California, Maui, Hawaii, October 2-4, PP. 17-36.

۴- روشن، رامین؛ سروقدمقدم، عبدالرضا. "کاربرد آنالیز استاتیکی فزاینده غیرخطی در ارزیابی لرزه ای ساختمانها"، جلد اول، اولین کنفرانس علمی - تخصصی انجمن مهندسان راه و ساختمان ایران، تهران، ۱۳۷۸.

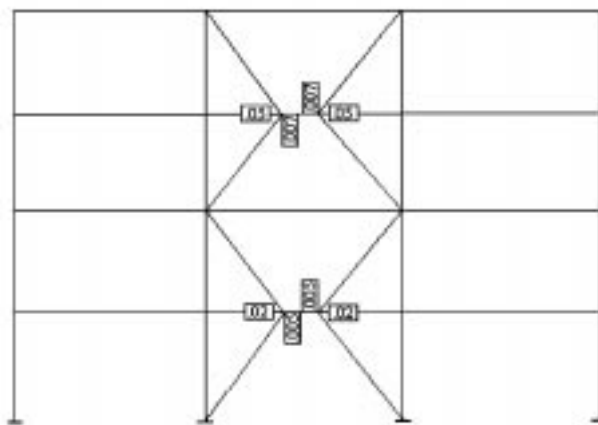
5-Kim, S. D. Hong, W. K. & Ju, Y. K. (1999), "A Modified Dynamic Inelastic Analysis of Tall Buildings Considering Changes of Dynamic Characteristics", The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 8, No. 1, PP. 57-73.

۶- آیین نامه طرح ساختمانها در برابر زلزله، ویرایش دوم، ۱۳۷۶.

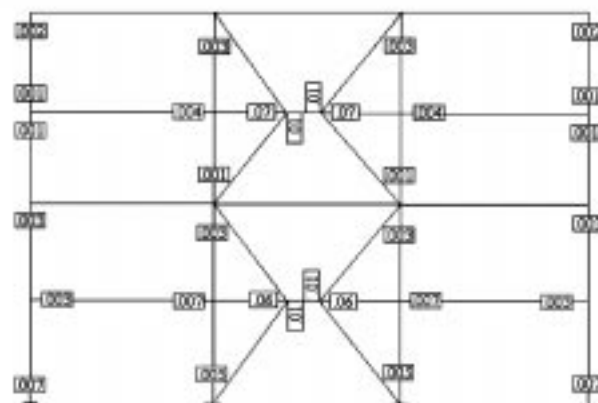
7-Krawinkler, H. & A. Al. Ali. (1996), "Seismic Demand Evaluation for a 4-Story Steel Frame Structure Damaged in the Northridge Earthquake", The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 5, No. 1, PP. 1-27.

\* R.Roshan@Engineer.com

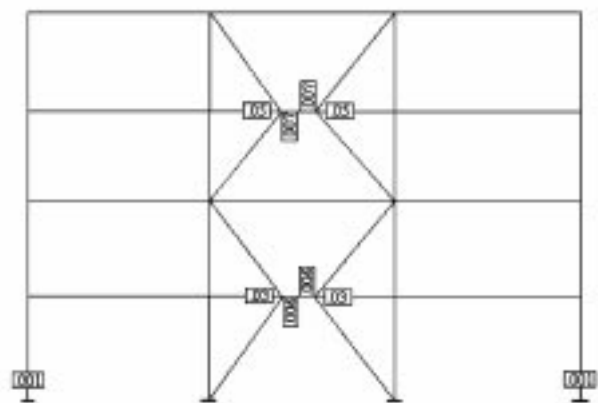
\* moghadam@dena.iiees.ac.ir ◀



شکل (۸، ث): نحوه توزیع دامنه چرخش مفاصل پلاستیک - زمین لرزه السنترو



شکل (۸، ج): نحوه توزیع دامنه چرخش مفاصل پلاستیک - زمین لرزه سانفرناندو



شکل (۹): نحوه توزیع دامنه چرخش مفاصل پلاستیک - تحلیل استاتیکی

غیرخطی

### ۸- نتیجه

میزان صحت نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی تابعی از انتخاب صحیح الگوی بار و تغییر مکان هدف می باشد. اعمال ضریب تصحیح