



# ارزیابی رفتار سازه‌های فولادی مهاربندی نامتقارن با سیستم جداساز لرزه‌ای

علی منصوری<sup>۱\*</sup>، فرزاد مشکین‌فام حصاری<sup>۲</sup>

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان

\* قوچان، صندوق پستی ۶۷۳۳۵-۹۴۷۷۱، a.mansouri@qiet.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۱۵)

## چکیده

جداسازی از پایه، یکی از راهکارهای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه است که در آن به جای افزایش ظرفیت عضوهای سازه، میزان تقاضا کاهش می‌یابد. از آنجایی که شمار بسیاری از سازه‌های موجود و جدید نامتقارن هستند، مناسب است اثر این موضوع در سازه‌های جداسازی شده نیز، بررسی شود. در سازه‌های نامتقارن، وجود فاصله افقی بین مرکز جرم و مرکز سختی، موجب ایجاد پیچش در سازه می‌شود که این موضوع سبب تحمیل نیرو و تغییر شکل‌های اضافی به عضوهای سازه می‌شود. در این پژوهش رفتار سازه‌های نامتقارن جداسازی شده با سیستم باربر جانبی مهاربند هم‌محور فولادی، با استفاده از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی و نرم‌افزار SAP2000 بررسی شده است. در خصوص اثرهای نامتقارنی در سازه، دو حالت برون محوری جرم و برون محوری سختی در نظر گرفته شده است. در هر حالت با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برون محوری، رفتار سازه با تکیه‌گاه ثابت و جداسازی شده بررسی شده است. همچنین رفتار سازه‌های نامتقارن با برون محوری‌های جرم و سختی مورد مقایسه قرار گرفته است. بر پایه نتیجه‌های تحلیل، جداسازی از پایه در هر دو حالت برون محوری جرم و سختی سبب کاهش قابل توجه دوران طبقات و اثرهای پیچشی در سازه شده است. همچنین در هر دو حالت سازه با تکیه‌گاه ثابت و سازه جداسازی شده، برون محوری سختی سبب ایجاد پیچش کمتری در سازه، نسبت به برون محوری جرم شده است. به علاوه به منظور کاهش اثرهای پیچشی در سازه‌های جداسازی شده نامتقارن، روشی برای طراحی جداسازها در این سازه‌ها پیشنهاد شده است.

## واژگان کلیدی

جداسازی از پایه، سازه نامتقارن، برون محوری جرم، برون محوری سختی، تشدید پیچشی

## Evaluation of the Seismic Behavior of Asymmetric Base Isolated Braced Steel Structures

A. Mansouri, F. Meshkinfam Hesari

### Abstract

Base isolation can improve the seismic performance of structures by reducing the seismic demands instead of increasing the capacity. Many of existing and new structures are asymmetric, thus the effect of asymmetry on the behavior of isolated structures should be studied. In asymmetric structures the horizontal distance between center of mass and center of rigidity, induce inherent torsional moment which can generate extra forces and deformations in the members. In the present research work the seismic behavior of asymmetric isolated concentric braced structures is investigated by nonlinear dynamic analyses using SAP2000 software. The behavior of fixed base and isolated asymmetric structures for different values of mass and stiffness eccentricities are studied and compared to each other. Based on the analysis results, base isolation has reduced story rotations and torsional amplifications in asymmetric structures in mass eccentric and stiffness eccentric structures. Also smaller torsional amplifications can be expected in stiffness eccentric structures than mass eccentric structures. Furthermore a new method for designing isolators in asymmetric structures is proposed which can reduce story rotations and torsional moments in such structures.

### Keywords

Base isolation, Asymmetric structure, Mass eccentricity, Stiffness eccentricity, Torsional amplification



جداسازهای لرزه‌ای به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، در سال‌های اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته‌اند. در سازه‌های جداسازی شده از پایه، در هنگام زلزله بخش عمده تغییر شکل جانبی، در تراز جداساز اتفاق می‌افتد و مقدار تغییر شکل روسازه بسیار کم خواهد بود، لذا از میزان رفتار غیرخطی و در نتیجه خسارت در روسازه به میزان زیادی کاسته خواهد شد، به عبارتی با استفاده از جداسازها، به جای افزایش ظرفیت سازه، میزان تقاضای اعمالی به آن کاهش می‌یابد [۱ و ۲].

در کنار برتری‌های جداسازی از پایه، این روش دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد: این روش برای سازه‌های واقع بر روی خاک نرم مناسب نیست. همچنین، در سازه‌های بلند با دوره تناوب بالا تأثیر آن کمتر است. به علاوه اجرای آن در سازه، دشوار و پرهزینه بوده و نیاز به نیروی متخصص با مهارت بالا دارد [۱].

هرچند پژوهش‌های زیادی بر روی رفتار سازه‌های متقارن جداسازی شده از پایه انجام شده است، لکن رفتار سازه‌های نامتقارن به علت پژوهش‌های کمتر انجام شده، همچنان در دست بررسی است. در سازه‌های نامتقارن به علت وجود فاصله بین مرکز جرم و مرکز سختی سازه، پیچش در سازه به وجود آمده و عضوهای سازه می‌بایست نیروها و تغییر شکل‌های اضافی ناشی از پیچش را تحمل کنند. برون محوری سازه سبب وابسته شدن رفتار انتقالی و پیچشی سازه به یکدیگر می‌شود، لذا رفتار سازه‌های جداسازی شده متقارن و نامتقارن با یکدیگر متفاوت است [۳].

پژوهش Nagarajiah و همکارانش [۴] بر روی سازه‌های چندطبقه سه‌بعدی نشان داد اثرهای پیچشی می‌تواند بسته به میزان برون محوری در روسازه و سیستم جداساز قابل توجه باشند.

بر پایه پژوهش Jangid و Datta [۵] بر روی یک سازه یک طبقه و یک دهانه جداسازی شده، برون محوری روسازه سبب تغییر چندان‌ی در جابجایی در تراز جداساز نمی‌شود.

Tena-Colunga و Gomez-Soberon [۶] رفتار پیچشی سازه‌های جداسازی شده را با انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی با مقادیرهای مختلف برون محوری، بین مرکز جرم و مرکز سختی سازه، بررسی کردند. بر پایه نتیجه‌های به دست آمده، تغییر مکان حداکثر جداساز همواره در حالتی که برون محوری در دو راستا وجود داشته باشد اتفاق نمی‌افتد.

بر پایه پژوهش Shakib و Fuladgar [۷] اثر مؤلفه قائم زلزله بر پاسخ سازه‌های نامتقارن جداسازی شده با جداساز اصطکاکی خالص قابل ملاحظه است.

Ismail [۸] با بررسی رفتار سازه‌های نامتقارن جداسازی شده تحت زمین لرزه‌های حوزه نزدیک گسل، نشان داد با استفاده از جداسازهای RNC می‌توان به لحاظ تئوری، پیچش را در سازه‌های نامتقارن حذف نمود.

پژوهش Khoshnoudian و Imani Azad [۹] بر روی سازه‌های نامتقارن جداسازی شده نشان داد در نظر گرفتن هر دو مؤلفه افقی حرکت زمین، سبب تشدید اثرهای پیچشی سازه جداسازی شده، در مقایسه با لحاظ یک مؤلفه افقی می‌شود.

Siringoringo و Fujino [۱۰] رفتار یک سازه جداسازی شده نامتقارن L شکل، ۱۴ طبقه را در زلزله بزرگ شرق ژاپن در سال ۲۰۱۱ بررسی کردند. در سازه مذکور علی‌رغم عملکرد مطلوب سیستم جداساز، به علت تأثیر موده‌های پیچشی، شتاب قابل توجهی در طبقات بالایی ایجاد شد.

Kilar و Koren [۱۱] رفتار سازه‌های نامتقارن جداسازی شده با شش توزیع متفاوت جداساز در پلان را بررسی کردند. بر پایه نتیجه‌های تحلیل در کلیه حالات در نظر گرفته شده، جداسازی سبب کاهش اثرهای پیچشی در سازه شده است.

Kilar و همکارانش [۱۲] در یک مطالعه موردی رفتار یک سازه نامتقارن جداسازی شده را بررسی نمودند. بر پایه نتیجه‌های به دست آمده از نقطه نظر لرزه‌ای، سطح اشغال کامل بار زنده همواره بحرانی نبوده و سطوح اشغال کمتر، متناظر با ۱۰ تا ۱۵ درصد برون محوری، سبب ایجاد خسارت بیشتر در ستون‌های سازه شده است.

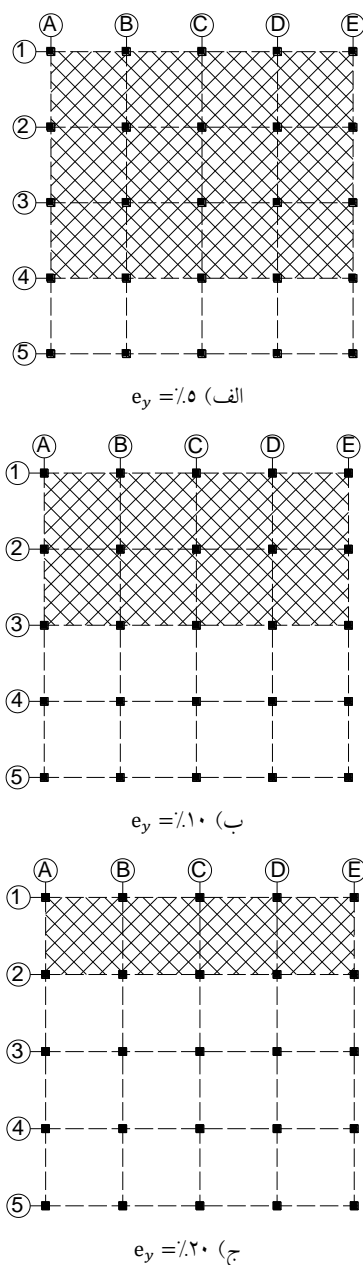
بر پایه پژوهش Tena-Colunga و Escamilla-Cruz [۱۳] با کاهش نسبت زمان تناوب سازه جداسازی شده به زمان تناوب سازه با تکیه‌گاه ثابت متناظر، اثرهای پیچشی در سیستم جداساز افزایش می‌یابد.

Ryan و Chopra [۱۴] نیز روشی برای برآورد حداکثر تغییر شکل جداساز، در سازه نامتقارن بر پایه تحلیل غیرخطی پیشنهاد دادند.

در پژوهش حاضر رفتار سازه فولادی مهاربندی شده دارای سیستم جداساز لرزه‌ای، با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی بررسی شده است. به منظور در نظر گرفتن اثرهای نامتقارنی در سازه، دو حالت برون محوری جرم و برون محوری سختی لحاظ شده است. در هر حالت مقادیرهای مختلف برون محوری برای سازه در نظر گرفته شده است و رفتار سازه در دو حالت



مختلف سطح اشغال بار زنده، در پلان ساختمان در نظر گرفته شده است. بدین معنی که بار زنده در تعدادی دهانه‌ها همانند شکل (۲) اعمال شده است و مقدار بار زنده در سایر دهانه‌ها صفر در نظر گرفته شده است. این کار سبب جابجا شدن مرکز جرم ساختمان در راستای محور Y می‌شود. بر این اساس امکان ایجاد سه مقدار برون محوری جرمی ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ بعد ساختمان در راستای Y فراهم شده است.



شکل ۲- سطوح اشغال بار زنده و مقدارهای برون محوری‌های جرمی

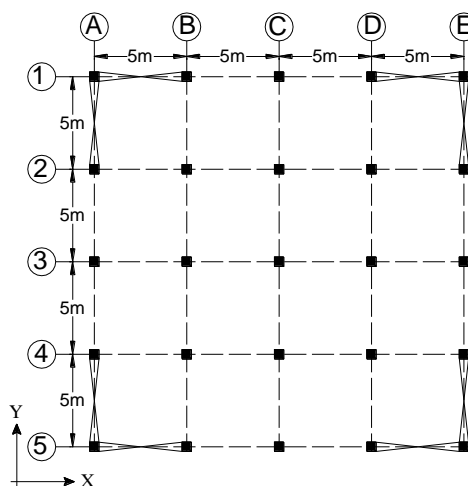
همچنین به منظور ایجاد مقدارهای مختلف برون محوری سختی چیدمان مهاربندها در پلان، همانند شکل (۳) تغییر داده

با تکیه‌گاه ثابت و جداسازی شده بررسی شده است. همچنین به منظور کاهش پیچش در سازه‌های نامتقارن جداسازی شده، راهکاری برای طراحی جداسازها پیشنهاد شده است که در آن اثرهای نامتقارنی سازه لحاظ شده است.

## ۲- مشخصات سازه مورد بررسی

### ۲-۱- روسازه

سازه مورد بررسی یک ساختمان پنج طبقه با سیستم باربر جانبی مهاربند هم‌محور فولادی و سیستم کف تیرچه‌بلوک می‌باشد. کاربری ساختمان اداری، نوع خاک تپ II و لرزه‌خیزی ساختگاه خیلی زیاد ( $A=0.35$ ) در نظر گرفته شده است. بار مرده کف طبقات  $500 \text{ kg/m}^2$  و بار زنده معادل  $1000 \text{ kg/m}^2$  (اتاق بایگانی با قفسه‌های متحرک) لحاظ شده است. علت انتخاب این مقدار بار زنده، امکان ایجاد مقدارهای مختلف برون محوری جرمی با تغییر دهانه‌هایی که بار زنده در آن‌ها اعمال می‌شود، می‌باشد. پلان ستون گذاری و موقعیت اولیه مهاربندها که به شکل ضربدری در نظر گرفته شده‌اند، در شکل (۱) ارائه شده است.



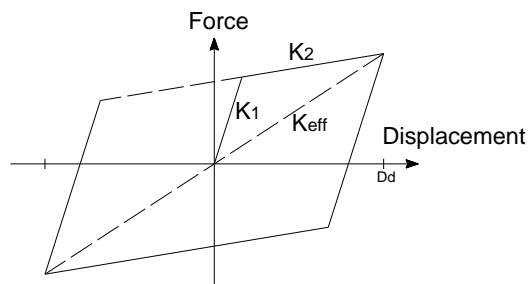
شکل ۱- پلان ستون گذاری و مهاربندی سازه

طراحی سازه بر پایه استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵] و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۶] با رعایت ضوابط مربوط به طراحی لرزه‌ای انجام شده است. ستون‌ها علاوه بر ترکیبات بار متعارف ثقلی و جانبی، با ترکیبات بار تشدید یافته بر پایه مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۶] طراحی و کنترل شده‌اند.

نامتقارنی در سازه در دو حالت برون محوری جرم و سختی ایجاد شده است. به منظور ایجاد برون محوری جرمی سه حالت

## ۲-۲- سیستم جداساز

جداساز در نظر گرفته شده در این پژوهش از نوع لاستیکی با ورقه های فولادی می باشد. نمودار نیرو-تغییر مکان در نظر گرفته شده برای جداساز به صورت دوخطی و همانند شکل (۴) می باشد.



شکل ۴- الگوی دوخطی سیستم جداساز

طراحی سیستم جداساز با استفاده از نشریه ۵۲۳ [۱۷] انجام شده است. بر پایه این نشریه دوره تناوب سازه جداسازی شده  $(T_D)$  می بایست حداقل سه برابر دوره تناوب اصلی سازه با تکیه گاه ثابت در نظر گرفته شود که در طراحی جداسازها این مقدار معادل  $2/5$  ثانیه لحاظ شده است. سختی جانبی مؤثر جداساز نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$K_{eff} = \frac{W}{g} \times \frac{2\pi}{T_D} \quad (1)$$

که در آن  $W$  مجموع بار مرده و زنده اعمالی به جداساز است. مقدار تغییر مکان طرح  $(D_D)$  نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$D_D = \frac{g}{4\pi^2} \times \frac{A \times (S+1) T_S^{2/3} \times T_D}{B_D} \quad (2)$$

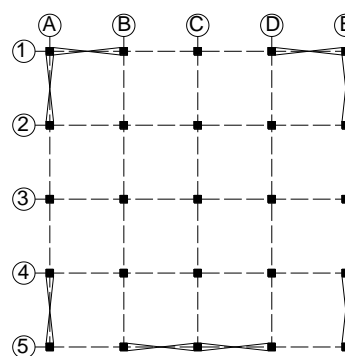
که در آن  $A$  شتاب مبنای طرح می باشد. پارامترهای  $S$  و  $T_S$  توجه به تیپ خاک و بر پایه استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵] تعیین می شوند. پارامتر  $B_D$  نیز ضریب میرایی می باشد که بر پایه مفاد نشریه ۵۲۳ [۱۷] برای نسبت میرایی معادل مؤثر  $20\%$ ، برابر  $1/5$  انتخاب شده است.

ضخامت کل جداساز لاستیکی صرف نظر از ورق های فولادی بالا و پایین آن، بر پایه تغییر مکان طرح  $(D_D)$  و حداکثر تغییر شکل نسبی برشی قابل تحمل توسط لاستیک  $(\gamma_{max})$  به شرح زیر محاسبه می شود:

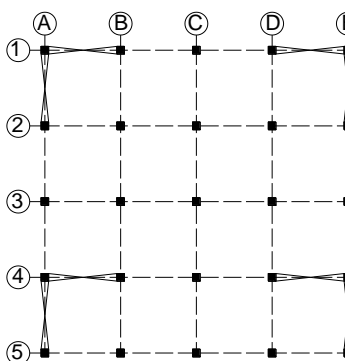
$$t_t = \frac{D_D}{\gamma_{max}} \quad (3)$$

از آنجاکه با توجه به رابطه (۱) طراحی جداسازها و تعیین ابعاد و جزئیات آن ها بر پایه بار قائم ثقلی اعمالی به جداساز انجام می شود، همانند شکل (۵) از دو تیپ جداساز برای

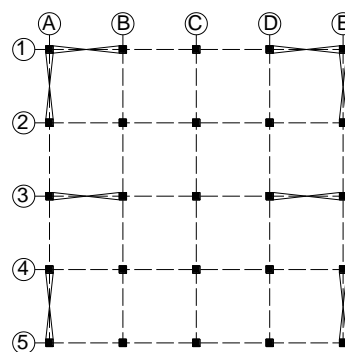
شده است. با این کار مرکز سختی ساختمان در راستای محور  $Y$  جابجا شده و امکان ایجاد سه مقدار برون محوری سختی معادل  $5\%$ ،  $20\%$  و  $30\%$  بعد ساختمان، در راستای محور  $Y$  فراهم شده است. شایان ذکر است که برای هر یک از حالات برون محوری جرم و سختی طراحی اولیه سازه بر پایه استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵] و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۶] به صورت جداگانه انجام شده است.



الف)  $e_y = 5\%$



ب)  $e_y = 20\%$

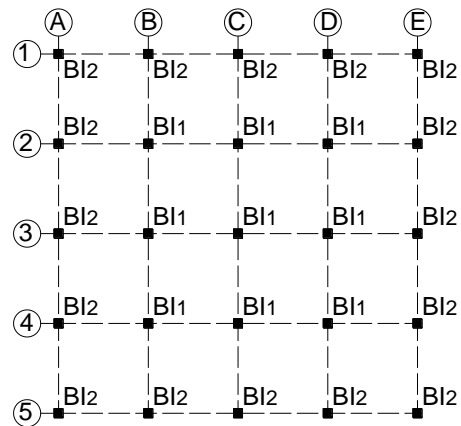


ج)  $e_y = 30\%$

شکل ۳- چیدمان مهاربندها در پلان برای ایجاد مقدارهای مختلف برون محوری سختی



ستون‌های داخلی و خارجی سازه استفاده شده است. مشخصات جداسازها که بر پایه ضوابط نشریه ۵۲۳ [۱۷] طراحی شده‌اند در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۵- پلان تیپ بندی جداسازها

### ۳- مشخصات زمین لرزه‌های ورودی

به منظور تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، از هفت زوج شتاب‌نگاشت متعلق به مؤلفه‌های افقی هفت زلزله مختلف ثبت شده، همانند جدول (۲) استفاده شده است. مشخصات رکوردها از پایگاه داده حرکات زمین PEER [۱۸] استخراج شده است. بر پایه استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵] در صورت استفاده از هفت زوج شتاب‌نگاشت در تحلیل دینامیکی می‌توان مقدار متوسط

بیشینه بازتاب‌های به دست آمده از آن‌ها را به عنوان بازتاب نهایی تلقی کرد. برای تحلیل سه بعدی سازه زوج شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بر پایه استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵] و با روش زیر مقیاس شده‌اند:

الف- کلیه شتاب‌نگاشت‌ها به مقدار حداکثر خود مقیاس شده‌اند. بدین معنی که حداکثر شتاب همه آن‌ها برابر با شتاب ثقل  $g$  در نظر گرفته شده است.

ب- طیف پاسخ شتاب هر یک از زوج شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده با منظور کردن نسبت میرایی ۵ درصد تعیین شده است.

پ- طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب‌نگاشت با استفاده از روش جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب شده و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته شده است.

ت- طیف‌های پاسخ ترکیبی هفت زوج شتاب‌نگاشت، متوسط‌گیری شده و در محدوده زمان‌های تناوب  $0.2T$  و  $1.0T$  با طیف طرح استاندارد مقایسه شده است. ضریب مقیاس آن‌چنان تعیین شده است که در این محدوده مقدار متوسط‌ها در هیچ حالت کمتر از  $1/4$  برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نباشد. شکل (۶) طیف متوسط شتاب‌نگاشت‌ها، طیف استاندارد و طیف متوسط با اعمال ضریب مقیاس را نشان می‌دهد.

ث- ضریب مقیاس تعیین شده، در شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده در بند (الف) ضرب شده و در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱- مشخصات جداسازها

$K_2/K_1$	سختی اولیه $K_1$ (kN/m)	سختی مؤثر $K_{eff}$ (kN/m)	تغییر مکان طرح $D_D$ (mm)	شمار لایه‌ها	ضخامت جداساز (mm)	قطر جداساز (mm)	تیپ جداساز
۰/۱	۱۲۸۰	۹۴۰	۲۲۸	۱۳	۱۶۰	۵۰۰	BI <sub>1</sub>
۰/۱	۸۳۲	۴۶۷	۲۲۸	۱۶	۱۶۰	۴۰۰	BI <sub>2</sub>

جدول ۲- مشخصات حرکات ورودی زمین [۱۸]

نام زلزله	ایستگاه	سال وقوع	بزرگای زلزله	PGA (g) مؤلفه طولی	PGA (g) مؤلفه عرضی
طیس	طیس	۱۹۷۸	۷/۳۵	۰/۸۵۴	۰/۸۶۲
کوبه	KJMA	۱۹۹۵	۶/۹	۰/۸۳۴	۰/۶۳۰
امپریال والی	السترو	۱۹۴۰	۶/۹۵	۰/۲۸۱	۰/۲۱۱
نورتریج	لیک هاگس	۱۹۹۴	۶/۶۹	۰/۱۶۵	۰/۲۱۷
گلباف	گلباف	۱۹۸۱	۶/۰	۰/۲۳۶	۰/۲۸۲
پالم اسپرینگ	کابازون	۱۹۸۶	۶/۰۶	۰/۲۲۱	۰/۲۰۴
لوما پریتا	کاپیتولا	۱۹۸۹	۶/۹۳	۰/۵۱۱	۰/۴۳۹

تحلیل سازه شود. به طور کلی انتظار می‌رود جداسازی سبب کاهش تقاضای تغییرشکل جانبی در سازه شود و بخش اصلی تغییرشکل در تراز جداساز رخ دهد. بدین شکل با تحلیل سازه در دو حالت ذکر شده، از صحت این امر در الگوی عددی مورد استفاده اطمینان حاصل می‌شود.

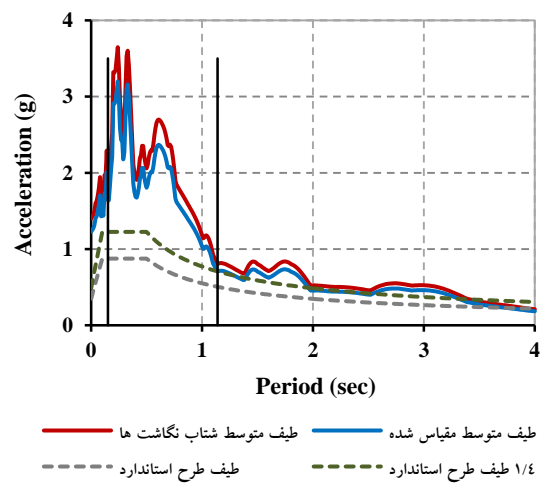
پس از آن رفتار سازه نامتقارن جداسازی شده که هدف اصلی پژوهش حاضر است، در دو حالت برون محوری جرم و سختی مورد بررسی قرار گرفته است. در خصوص سازه‌های نامتقارن غالباً نگرانی اصلی، ایجاد پیچش در سازه و وارد شدن نیروهای اضافی به اعضا به دلیل اثرهای پیچشی است. وجود پیچش در سازه با ایجاد دوران در دیافراگم کف طبقات نمایان می‌شود. بدین معنا که در سازه کاملاً متقارن، در صورت اعمال بار به مرکز جرم، دوران ایجاد شده تحت بار جانبی صفر است و با افزایش برون محوری، مقدار دوران افزایش می‌یابد. لذا در خصوص سازه‌های نامتقارن در پژوهش حاضر، مقدار دوران پلان طبقات در حالات مختلف محاسبه شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در انتها نیز رفتار سازه‌های نامتقارن دارای برون محوری جرم و سختی با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

#### ۱-۵- سازه متقارن

سازه مورد بررسی در این بخش همان‌طور که در بخش ۲-۱ معرفی شد، از نظر شکل هندسی پلان، توزیع جرم در پلان و موقعیت قرارگیری عضوهای سیستم باربر جانبی کاملاً متقارن است. سازه در دو حالت با تکیه‌گاه ثابت و جداسازی شده، الگوسازی و تحلیل شده است و از جهات مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است.

عموماً یکی از اهداف جداسازی افزایش زمان تناوب سازه و کاهش نیروهای جانبی اعمالی به سازه می‌باشد. مقدار دوره تناوب سه مود اول نوسان، برای سازه‌های با تکیه‌گاه ثابت و جداسازی شده و همچنین نسبت دوره تناوب سازه جداسازی شده به دوره تناوب سازه با تکیه‌گاه ثابت در جدول (۳) ارائه شده است. مودهای اول و دوم مربوط به درجات آزادی انتقالی و مود سوم مربوط به پیچش سازه می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار زمان تناوب مودهای انتقالی در سازه جداسازی شده حدود سه برابر سازه با تکیه‌گاه ثابت است، این نسبت در مود پیچشی بزرگ‌تر از هفت می‌باشد.

بیشینه جابجایی طبقات در دو حالت با تکیه‌گاه ثابت و



شکل ۶- طیف متوسط شتاب نگاشت‌ها و طیف طرح استاندارد

#### ۴- الگوسازی و تحلیل سازه

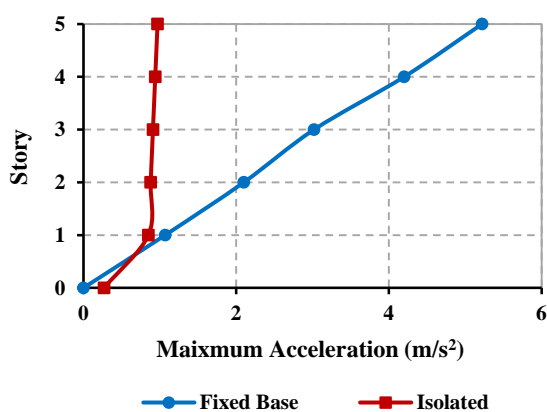
الگوسازی و تحلیل سازه با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 و روش تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شده است. رفتار غیرخطی در عضوهای سازه و همچنین سیستم جداساز در نظر گرفته شده است. با توجه به سیستم سازه‌ای مورد پژوهش مؤلفه شکل‌پذیر سازه، نیروی محوری مهاربندها می‌باشد. لذا مفصل خمیری محوری، در مهاربندها بر پایه پارامترهای الگوسازی نشریه ASCE41 [۱۹] تعریف شده‌اند. الگوسازی جداساز نیز با استفاده از المان لینک غیرخطی از نوع Rubber Isolator انجام شده است. رفتار جداساز به صورت ایده ال دوخطی در نظر گرفته شده است که دارای خصوصیات غیرخطی در راستای برشی و خصوصیات خطی در سایر درجات آزادی است. در هر یک از شرایط در نظر گرفته شده برای سازه، دو حالت تکیه‌گاه ثابت (FB) و جداسازی شده (BI) در نظر گرفته شده است تا امکان مقایسه این دو حالت و بررسی اثرهای جداسازی وجود داشته باشد.

#### ۵- نتیجه‌های تحلیل

در این بخش نتیجه‌های تحلیل سازه در حالات مختلف ارائه شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نخست رفتار سازه کاملاً متقارن در دو حالت با تکیه‌گاه ثابت (بدون جداساز) و جداسازی شده بررسی شده است. هرچند رفتار سازه‌های متقارن جداسازی شده در پژوهش‌های قبلی مورد بررسی قرار گرفته است، لکن انجام این بررسی‌ها در خصوص سازه مورد پژوهش می‌تواند موجب اطمینان از صحت روش الگوسازی و

همچنین در سازه با تکیه‌گاه ثابت مقدار جابجایی ایجاد شده در همه طبقات قابل توجه است، حال آنکه در سازه جداسازی شده، بخش عمده جابجایی کل در تراز جداساز رخ داده است و مقدار جابجایی نسبی طبقات بسیار کمتر از حالت قبل است. مقدار میانگین بیشینه جابجایی شتاب‌نگاشت‌ها در تراز جداساز معادل ۶ سانتیمتر می‌باشد. مقدار متوسط بیشینه جابجایی نسبی طبقات در سازه جداسازی شده و سازه با تکیه‌گاه ثابت به ترتیب ۰/۷۲ و ۳/۲ سانتیمتر می‌باشد؛ بنابراین جداسازی به‌طور متوسط سبب کاهش ۷۷ درصدی جابجایی نسبی طبقات شده است. این موضوع سبب بهبود قابل توجه در عملکرد لرزه‌ای سازه می‌شود. کاهش جابجایی نسبی طبقات به معنای تقاضای لرزه‌ای کمتر در عضوهای سازه و در نتیجه رفتار غیرخطی و خسارت کمتر در آن‌ها می‌باشد. همچنین کاهش جابجایی نسبی طبقات سبب کاهش اثرهای  $P-\Delta$  و ناپایداری ناشی از آن می‌شود. به‌علاوه این موضوع سبب کاهش خسارت در اجزاء غیر سازه‌ای نیز خواهد شد.

مقدار میانگین بیشینه شتاب طبقات حاصل تحلیل با استفاده از هفت شتاب‌نگاشت، در دو حالت سازه با تکیه‌گاه ثابت و جداسازی شده در شکل (۸) ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود مقدار شتاب در سازه با تکیه‌گاه ثابت، در همه طبقات، بیش از سازه جداسازی شده است. مقدار میانگین بیشینه شتاب در تراز بام در سازه جداسازی شده و سازه با تکیه‌گاه ثابت به ترتیب ۱/۰۲ و ۵/۲۲  $m/s^2$  می‌باشد؛ بنابراین جداسازی سبب کاهش ۸۰ درصدی شتاب در تراز بام شده است.



شکل ۸- میانگین بیشینه شتاب طبقات

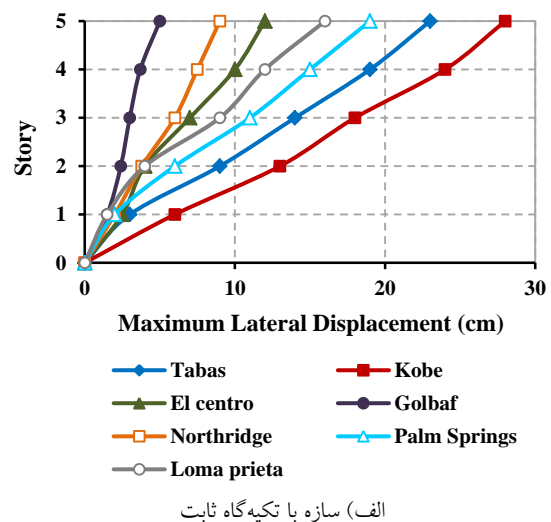
همچنین با توجه به شکل (۸) در خصوص سازه با تکیه‌گاه

جداسازی شده به ترتیب در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار جابجایی کل در تراز بام، در سازه جداسازی شده کمتر از سازه با تکیه‌گاه ثابت است. مقدار میانگین بیشینه جابجایی بام در شتاب‌نگاشت‌های مختلف، در سازه جداسازی شده و سازه با تکیه‌گاه ثابت به ترتیب ۹/۶ و ۱۶ سانتیمتر می‌باشد؛ بنابراین جداسازی سبب کاهش ۴۰ درصدی جابجایی بام شده است.

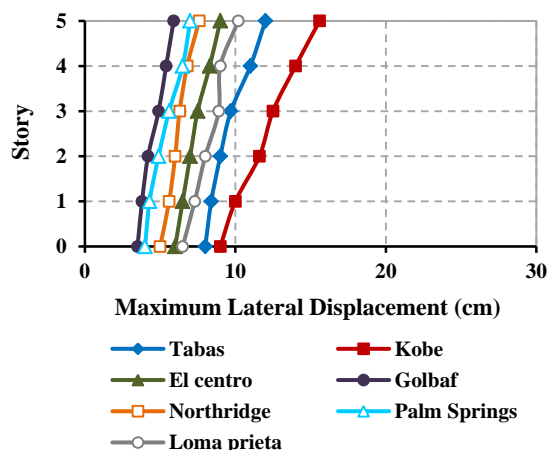
جدول ۳- دوره تناوب سازه‌های متقارن با تکیه‌گاه ثابت و

جداسازی شده (ثانیه)

نوع سازه	مود اول	مود دوم	مود سوم
تکیه‌گاه ثابت	۰/۶۷	۰/۶۶۲	۰/۱۰۸
جداسازی شده	۲/۰۲	۱/۹۲	۰/۷۹۳
$T_{BI}/T_{FB}$	۳/۰۲	۲/۹	۷/۳۴



الف) سازه با تکیه‌گاه ثابت



ب) سازه جداسازی شده

شکل ۷- بیشینه جابجایی طبقات تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف

ثابت، یک رابطه تقریباً خطی بین شتاب طبقه و ارتفاع تراز موردنظر مشاهده می‌شود، درحالی‌که در سازه جداسازی‌شده مقدار افزایش شتاب پس از اولین طبقه بسیار کم است. از آنجاکه نیروی اینرسی اعمالی به طبقه در هنگام زلزله با شتاب آن طبقه نسبت مستقیم دارد، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در سازه با تکیه‌گاه ثابت، با افزایش ارتفاع تراز طبقه موردنظر، مقدار نیروی جانبی اعمالی به آن طبقه، به‌صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد، لکن در خصوص سازه جداسازی‌شده نیروی اعمالی به تراز طبقات تقریباً ثابت است یا دارای رشد بسیار ناچیز است.

در خصوص میزان رفتار غیرخطی نیز بر پایه نتیجه‌های تحلیل، در سازه دارای تکیه‌گاه ثابت مفاصل خمیری در مهاربندهای طبقات پایین تشکیل شده‌اند (یک تا سه طبقه در شتاب‌نگاشت‌های مختلف) و در برخی موارد تغییرشکل غیرخطی آن‌ها از تغییرشکل متناظر با عملکرد آستانه فروریزش نیز فراتر رفته است. این در حالی است که در سازه جداسازی‌شده کلیه مهاربندها در مرحله الاستیک بوده و در هیچ از آن‌ها مفصل خمیری تشکیل نشده است. این موضوع نشان‌دهنده عملکرد مطلوب سیستم جداساز در کاهش رفتار غیرخطی و خسارت در روسازه، به‌واسطه تحمل بخش قابل‌توجهی از تغییرشکل در تراز جداساز می‌باشد.

#### ۲-۵- سازه نامتقارن با برون محوری جرم

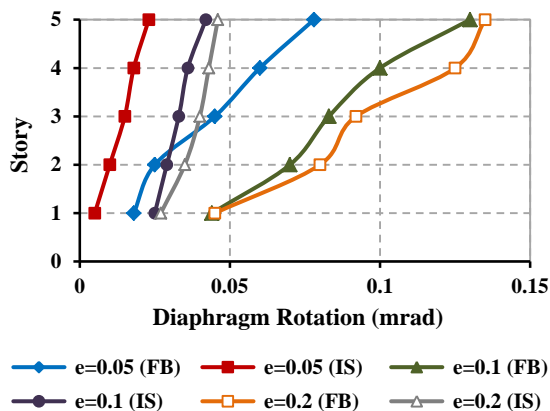
همان‌طور که در بخش ۲-۱ تشریح شد به‌منظور ایجاد مقدارهای مختلف برون محوری جرم، سطوح مختلف اشغال بار زنده، در پلان ساختمان در نظر گرفته شد. بدین ترتیب سه مقدار برون محوری جرمی معادل ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ بعد ساختمان، در پژوهش حاضر در نظر گرفته شد.

در این بخش به‌منظور بررسی رفتار سازه‌های نامتقارن و بررسی اثرهای جداسازی، مقدار دوران طبقات که متناسب با مقدار لنگر پیچشی در سازه است، مورد استفاده قرار گرفته است. به‌منظور محاسبه دوران در هر طبقه، اختلاف تغییرمکان جانبی دو انتهای سازه، بر بعد سازه در راستای عمود تقسیم شده است.

در شکل (۹) نمودار میانگین بیشینه دوران طبقات، در تحلیل با شتاب‌نگاشت‌های مختلف و در شکل (۱۰) مقدارهای متوسط آن، برای طبقات یک سازه ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش برون محوری در هر دو حالت سازه با تکیه‌گاه ثابت و جداسازی‌شده، مقدار دوران طبقه افزایش می‌یابد. همچنین مقدار دوران طبقه در طبقات بالایی بیش از طبقات پایین است.

نکته جالب‌توجه این است که مقدارهای دوران طبقات در سازه جداسازی‌شده، به میزان حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد نسبت به سازه با تکیه‌گاه ثابت کاهش یافته است (شکل (۱۱)). این بدین معنی است که جداسازی علاوه بر کاهش جابجایی نسبی طبقات -که مزیت‌های آن در بخش ۴-۱ تشریح شد- می‌تواند سبب کاهش قابل‌توجه دوران طبقات و اثرهای پیچشی در سازه شود. به عبارتی میزان نامنظمی در پلان و نامتقارنی سازه، پس از جداسازی کاهش فراوان خواهد یافت. البته بر پایه شکل (۱۱) با افزایش میزان برون محوری جرم میزان تأثیر جداسازی در کاهش دوران طبقات کم می‌شود.

همچنین همان‌طور که ذکر شد با توجه به شکل (۹) میزان دوران در طبقات بالایی، در هر دو حالت سازه با تکیه‌گاه ثابت و جداسازی‌شده بیش از طبقات پایین است، لکن میزان رشد دوران در طبقات بالا نسبت به طبقات پایین، در سازه جداسازی‌شده کمتر از سازه با تکیه‌گاه ثابت است. نسبت مقدار متوسط دوران آخرین طبقه به دوران اولین طبقه، در سازه‌های با تکیه‌گاه ثابت و جداسازی‌شده به ترتیب ۳/۲۰ و ۱/۹۵ می‌باشد؛ بنابراین در سازه‌های جداسازی‌شده، نرخ افزایش دوران در طبقات متوالی کوچک‌تر است.



شکل ۹- میانگین بیشینه دوران طبقات برحسب مقدارهای مختلف برون محوری جرم

#### ۳-۵- سازه نامتقارن با برون محوری سختی

با توجه به توضیحات ارائه‌شده در بخش ۲-۱ به‌منظور ایجاد برون محوری سختی، چیدمان‌های مختلف برای مهاربندها در پلان در نظر گرفته شد و بر این اساس امکان ایجاد سه مقدار برون محوری سختی معادل ۵٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ بعد ساختمان در راستای Y فراهم گردید. در این بخش نیز به‌منظور مقایسه رفتار



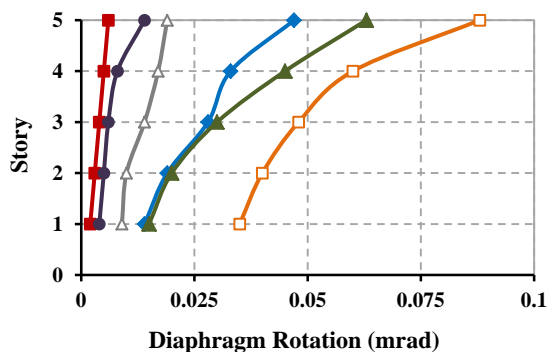


Figure 12: Diaphragm Rotation (mrad) vs Story. Legend: e=0.05 (FB) (blue diamond), e=0.05 (IS) (red square), e=0.2 (FB) (green triangle), e=0.2 (IS) (purple circle), e=0.3 (FB) (orange square), e=0.3 (IS) (grey triangle).

Figure 12: میانگین بیشینه دوران طبقات برحسب مقادارهای مختلف برون محوری سختی

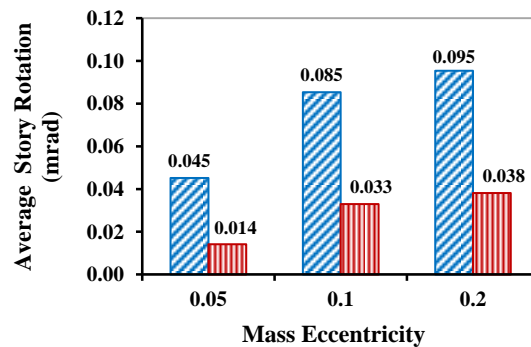


Figure 10: مقدارهای متوسط بیشینه دوران طبقات مختلف برحسب مقادارهای مختلف برون محوری جرم

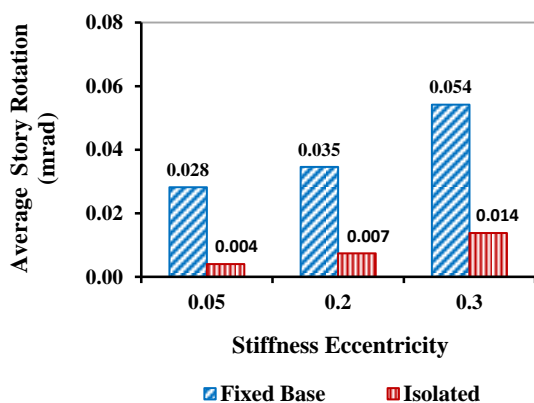


Figure 13: متوسط بیشینه دوران طبقات مختلف برحسب مقادارهای مختلف برون محوری سختی

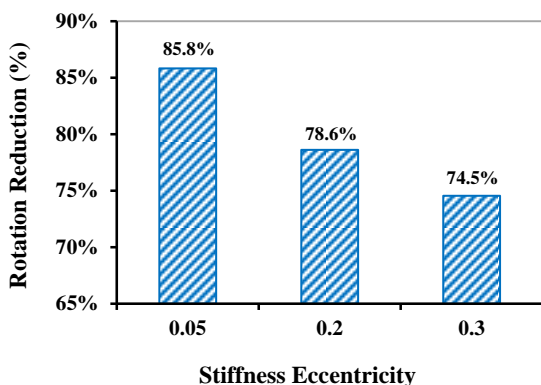


Figure 14: درصد کاهش متوسط بیشینه دوران طبقات در سازه جداسازی شده، برحسب مقادارهای مختلف برون محوری سختی در این حالت نیز رشد افزایش دوران در طبقات متوالی در

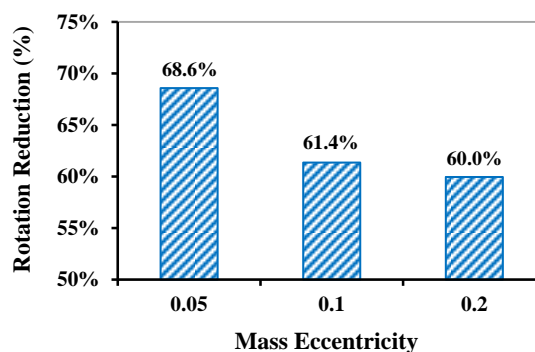
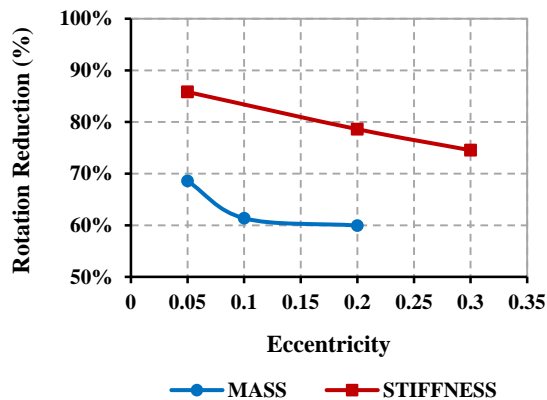


Figure 11: درصد کاهش مقادارهای متوسط بیشینه دوران طبقات در سازه جداسازی شده، برحسب مقادارهای مختلف برون محوری جرم

سازه برای مقادارهای مختلف برون محوری، دوران طبقات در حالات مختلف محاسبه شده و ارائه می گردد.

مقادارهای میانگین بیشینه دوران طبقات برحسب مقادارهای مختلف برون محوری سختی در شکل (۱۲) ارائه شده است. همچنین مقادارهای متوسط آن برای طبقات مختلف یک سازه، در شکل (۱۳) ارائه شده است. در اینجا نیز مشابه حالت قبل مقدار دوران با افزایش برون محوری افزایش یافته است و مقدار دوران در سازه جداسازی شده نسبت به سازه با تکیه گاه ثابت، به میزان قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. مقدار متوسط کاهش بیشینه دوران طبقات در شکل (۱۴) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود مقدار دوران طبقات، با جداسازی سازه از پایه برای مقادارهای مختلف برون محوری سختی بین ۷۵ تا ۸۵٪ کاهش یافته است. این موضوع نشان می دهد جداسازی، در خصوص سازه های نامتقارن با برون محوری سختی نیز می تواند در کاهش اثرهای پیچشی در سازه بسیار مؤثر باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در سازه دارای برون محوری سختی، جداسازی سبب کاهش بیشتری در میزان دوران و پیچش طبقات شده است. به عبارتی از این نظر، جداسازی در سازه‌های دارای برون محوری سختی مؤثرتر و مفیدتر است.



شکل ۱۶- درصد کاهش متوسط بیشینه دوران طبقات در سازه جداسازی‌شده، برحسب مقدارهای مختلف برون محوری جرم و سختی

لذا می‌توان چنین جمع‌بندی نمود که در سازه دارای برون محوری سختی اولاً مقدارهای دوران و پیچش، کمتر از سازه دارای برون محوری جرم است، ثانیاً در چنین سازه‌هایی جداسازی سبب کاهش بیشتری در دوران طبقات می‌شود؛ بنابراین سازه‌های نامتقارن دارای برون محوری سختی، تحت بار جانبی، وضعیت مطلوب‌تری نسبت به سازه‌های دارای برون محوری جرم دارند. شایان‌ذکر است که در بسیاری از موارد در ساختمان‌ها، توزیع جرم در پلان طبقات نسبتاً یکنواخت است و آنچه سبب ایجاد نامتقارنی در سازه‌ها می‌شود، عدم تقارن در موقعیت المان‌های باربر جانبی در پلان است؛ بنابراین در غالب موارد بخش عمده برون محوری سازه از نوع برون محوری سختی است.

#### ۶- پیشنهاد روشی برای طراحی جداسازها در سازه‌های

##### نامتقارن، به‌منظور کاهش پیچش

با توجه به نتیجه‌های به‌دست‌آمده در بخش ۴، جداسازی سازه سبب کاهش دوران طبقات و اثرهای پیچشی در سازه می‌شود. در این بخش هدف اصلاح روش طراحی جداسازها به‌گونه‌ای است که مقدار پیچش در سازه تا حد امکان کم شود.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده در بخش ۲-۲ تعیین سختی مؤثر هر یک از جداسازها، بر پایه بار محوری ثقلی اعمالی به آن و دوره تناوب انتخابی سازه جداسازی‌شده انجام می‌شود

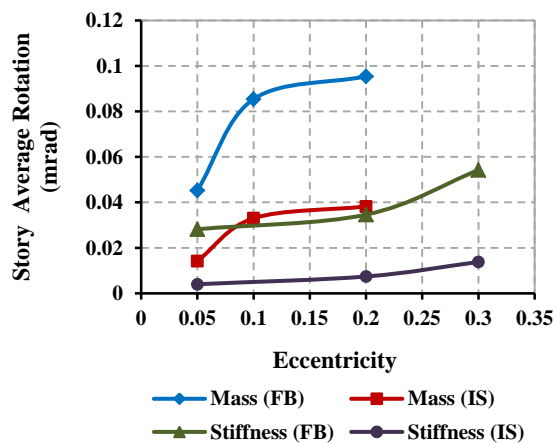
سازه با تکیه‌گاه ثابت بیش از سازه جداسازی‌شده می‌باشد. بر پایه نتیجه‌های تحلیل، نسبت مقدار متوسط دوران آخرین طبقه به دوران اولین طبقه، در سازه‌های با تکیه‌گاه ثابت و جداسازی‌شده به ترتیب ۳/۰۹ و ۲/۶۰ می‌باشد. لذا نرخ افزایش دوران در طبقات متوالی در سازه جداسازی‌شده کاهش یافته است.

#### ۵-۴- مقایسه نتیجه‌های سازه‌های نامتقارن با برون محوری

##### جرم و سختی

در بخش‌های قبل رفتار سازه‌های نامتقارن با برون محوری جرم و سختی مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر جداسازی از پایه، در این سازه‌ها بررسی شد. در این بخش رفتار دو نوع سازه مذکور مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

در شکل (۱۵) مقدار متوسط دوران طبقه سازه‌های نامتقارن، در دو حالت برون محوری جرم و برون محوری سختی برای سازه‌های با تکیه‌گاه ثابت و جداسازی‌شده ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو حالت سازه با تکیه‌گاه ثابت و سازه جداسازی‌شده، برون محوری سختی سبب دوران کمتری در پلان و در نتیجه اثرهای پیچشی کمتری در سازه، نسبت به برون محوری جرم شده است. نکته جالب‌توجه این است که دوران سازه جداسازی‌شده دارای برون محوری جرم نزدیک به دوران سازه با تکیه‌گاه ثابت دارای برون محوری سختی می‌باشد.



شکل ۱۵- مقدارهای متوسط بیشینه دوران طبقات مختلف برحسب مقدارهای مختلف برون محوری جرم و سختی

همچنین در شکل (۱۶) درصد کاهش متوسط بیشینه دوران طبقات در سازه جداسازی‌شده، نسبت به سازه با تکیه‌گاه ثابت در دو حالت برون محوری جرم و سختی ارائه شده است.



سپس روش پیشنهادی به حالتی که برون محوری در هر دو راستا وجود داشته باشد تعمیم داده می‌شود.

در ابتدا سختی مؤثر هر یک از جداسازها با روش نشریه ۵۲۳ [۱۷] و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود، سپس مجموع سختی سامانه جداساز ( $K_I$ ) تعیین می‌شود.

موقعیت مرکز سختی معادل سیستم از رابطه زیر قابل محاسبه است:

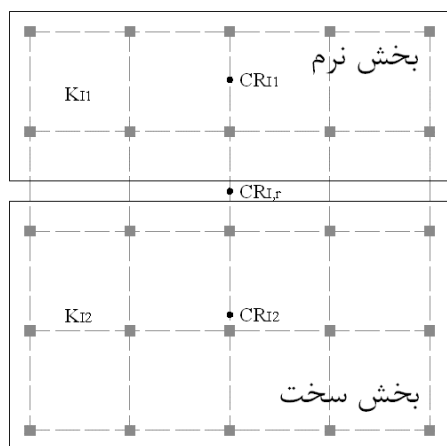
$$Y_{RT} = \frac{K_S Y_{RS} + K_I Y_{RI}}{K_S + K_I} \quad (۴)$$

که در آن  $K_I$  و  $K_S$  به ترتیب سختی روسازه و سختی مؤثر کل سیستم جداساز و  $Y_{RI}$  و  $Y_{RS}$  به ترتیب مختصات  $Y$  مرکز سختی روسازه و مرکز سختی سیستم جداساز می‌باشند.

به منظور تعیین موقعیت جدید مرکز سختی سامانه جداساز  $(Y_{RI,r})$  مقدار  $Y_{RT}$  در رابطه (۴) معادل مختصات  $Y$  مرکز جرم روسازه ( $Y_{CM}$ ) در نظر گرفته می‌شود. لذا  $Y_{RI,r}$  از رابطه (۵) قابل محاسبه است:

$$Y_{RI,r} = \frac{Y_{CM}(K_S + K_I) - K_S Y_{RS}}{K_I} \quad (۵)$$

پس از تعیین موقعیت جدید مرکز سختی سامانه جداساز، می‌بایست سختی جداسازها به گونه‌ای اصلاح شود که موقعیت مرکز سختی آنها منطبق بر موقعیت جدید شود. بدین منظور همانند شکل (۱۸) سامانه جداساز به دو بخش نرم و سخت، در طرفین موقعیت جدید مرکز سختی سامانه جداساز تقسیم می‌شود.

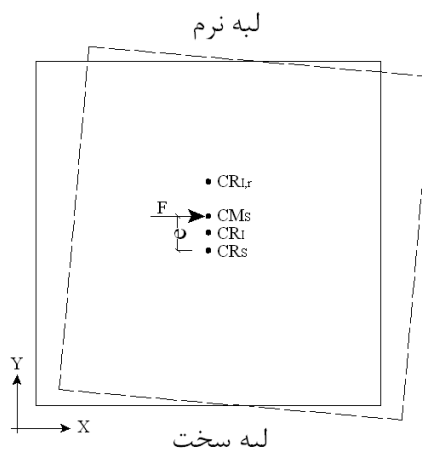


شکل ۱۸- تقسیم سامانه جداساز به دو بخش سخت و نرم

به منظور تغییر موقعیت مرکز سختی سامانه جداساز، می‌بایست مقدار سختی جداسازهای واقع در بخش نرم در یک

و اثرهای پیچش در سازه، در طراحی جداساز لحاظ نمی‌شود. در روش پیشنهادی با اصلاح مقادیرهای سختی مؤثر جداسازها، پیچش در سازه کاهش می‌یابد. طراحی جداساز شامل تعیین مساحت آن، شمار و ضخامت لایه‌ها بر پایه سختی مؤثر اصلاح شده جداساز انجام خواهد شد.

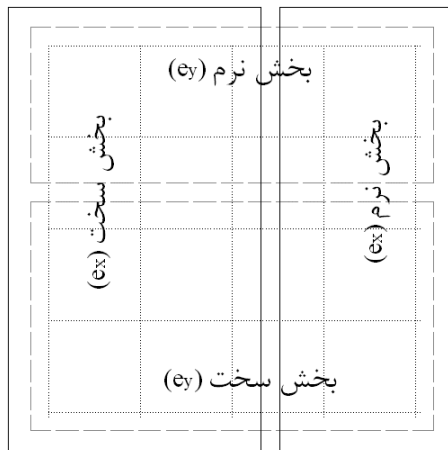
همان‌طور که در شکل (۱۷) نشان داده شده است، علت ایجاد پیچش در سازه فاصله بین مرکز جرم و مرکز سختی است. در این حالت تحت بار جانبی، یک وجه سازه تغییرشکل جانبی بیشتری دارد که اصطلاحاً به آن لبه نرم اطلاق می‌شود و وجه دیگر تغییرشکل کمتری دارد و لبه سخت نامیده می‌شود. در سازه جداسازی شده، با توجه به جرم ناچیزها جداسازها نسبت به جرم سازه، موقعیت مرکز جرم معادل سیستم ( $CM_T$ ) تقریباً منطبق بر مرکز جرم روسازه ( $CM_S$ ) می‌باشد. لکن از آنجاکه سختی جداسازها قابل توجه است، موقعیت مرکز سختی سیستم تابع موقعیت مرکز سختی روسازه ( $CR_S$ ) و همچنین مرکز سختی سامانه جداساز ( $CR_I$ ) می‌باشد. در روش پیشنهادی هدف این است که موقعیت مرکز سختی سامانه جداساز به گونه‌ای اصلاح شود ( $CR_{I,R}$ ) که موقعیت مرکز سختی معادل روسازه و جداساز بر موقعیت مرکز جرم سازه منطبق شود. بدین منظور می‌بایست سختی جداسازهای واقع در مجاورت لبه نرم افزایش و سختی جداسازهای واقع در نزدیکی لبه سخت کاهش یابد تا مرکز سختی سیستم جداساز به لبه نرم نزدیک شود.



شکل ۱۷- کاهش پیچش در سازه با روش پیشنهادی

در ادامه مراحل پیاده‌سازی روش پیشنهادی بیان می‌شود. در ابتدا با فرض اینکه برون محوری در پلان فقط در یک راستا (راستای  $Y$ ) وجود داشته باشد، مراحل کار تشریح می‌شود،

متناظر همانند شکل (۱۹) ضرب می‌شوند. به عبارتی در حالتی که سازه دارای برون محوری در دو راستا باشد، سختی هر یک از جداسازها دو بار اصلاح می‌شود، به بیان دیگر در هر یک از مقدارهای سختی جداساز، دو ضریب اصلاح ضرب می‌شوند.



شکل ۱۹- بخش‌های سخت و نرم مربوط به برون محوری دو راستا

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، جداسازهای سازه دارای برون محوری جرم ۵٪ مجدداً با این روش طراحی شد و سازه جداسازی شده تحت هفت شتاب‌نگاشت مورد تحلیل قرار گرفت. جزئیات محاسبات روش پیشنهادی و ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  به دست آمده در جدول (۴) ارائه شده است. قابل ذکر است که مبدأ مختصات در محل ستون گوشه پایین پلان در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- استفاده از روش پیشنهادی در طراحی جداسازهای سازه مورد بررسی

$Y_{CM}$ (m)	$Y_{RS}$ (m)	$K_S$ (kN/m)	$K_I$ (kN/m)	$Y_{RI,r}$ (m)	$K_{I1}$ (kN/m)	$K_{I2}$ (kN/m)	$Y_{RI1}$ (m)	$Y_{RI2}$ (m)	$\alpha$	$\beta$
۱۱	۱۰	۳۴۵۰۰	۱۵۹۳۲	۱۳/۱۶	۶۰۸۹	۹۸۴۳	۱۶/۹۲	۵/۷۲	۱/۹۳۱	۰/۴۲۴

طراحی جداسازها به ترتیب ۰/۰۰۷ و ۰/۰۱۴ میلی رادیان می‌باشد. لذا در روش پیشنهادی مقدارهای میانگین دوران به میزان ۰/۵۰٪ نسبت به روش نشریه ۵۲۳ [۱۷] کاهش یافته است که این موضوع نشان‌دهنده نتیجه قابل قبول روش پیشنهادی می‌باشد.

#### ۷- نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر جداسازی از پایه، بر رفتار سازه فولادی با سیستم باربر جانبی مهاربند هم‌محور بررسی شده است. به منظور ارزیابی رفتار سازه‌های نامتقارن در شرایط ذکر شده دو حالت

ضریب افزایش ( $\alpha$ ) و مقدار سختی جداسازهای واقع در بخش سخت در یک ضریب کاهش ( $\beta$ ) ضرب شوند. مقدارهای ضرایب مذکور از حل هم‌زمان دو معادله (۶) و (۷) قابل محاسبه هستند:

$$\alpha K_{I1} + \beta K_{I2} = K_I \quad (6)$$

$$\alpha K_{I1} Y_{RI1} + \beta K_{I2} Y_{RI2} = K_I Y_{RI,r} \quad (7)$$

که در آن  $K_{I1}$  و  $K_{I2}$  به ترتیب مجموع سختی جداسازهای واقع در بخش نرم و بخش سخت می‌باشند.  $Y_{RI1}$  و  $Y_{RI2}$  نیز به ترتیب مختصات  $Y$  موقعیت مرکز سختی جداسازهای بخش نرم و بخش سخت می‌باشند. بنا بر معادله (۶) مجموع سختی جداسازهای سازه ثابت در نظر گرفته شده است.

پس از تعیین ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  سختی هر یک از جداسازها، در ضریب مربوطه ضرب شده و طراحی جداساز بر پایه سختی اصلاح شده انجام می‌شود.

در صورتی که سازه دارای برون محوری در دو راستا باشد، می‌بایست عملیات فوق، دو بار برای دو راستا به صورت جداگانه انجام شود. بدین معنی که یکبار صرفاً با لحاظ برون محوری  $\epsilon_y$  مقدار مختصات  $Y$  موقعیت جدید مرکز سختی سامانه جداساز ( $Y_{RI,r}$ ) تعیین شده، ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  مربوط به این راستا محاسبه شده و در سختی جداسازهای بخش سخت و نرم این راستا (شکل (۱۹)) ضرب می‌شوند. سپس همین عملیات برای برون محوری  $\epsilon_x$  انجام می‌شود و ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  راستای عمود محاسبه شده و در سختی جداسازهای بخش سخت و نرم

در شکل (۲۰) میانگین بیشینه دوران طبقات در شرایط تکیه‌گاه ثابت و همچنین جداسازی شده در دو حالت ارائه شده است. در خصوص سازه جداسازی شده یکبار طراحی جداسازها با روش متعارف و بر پایه نشریه ۵۲۳ [۱۷] و بار دیگر با استفاده از روش پیشنهادی انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار دوران طبقات در حالتی طراحی جداسازها بر پایه روش پیشنهادی انجام شده است، کمتر از مقدار متناظر در حالتی است که طراحی جداسازها با روش متعارف انجام شده است. بر پایه نتیجه های تحلیل میانگین دوران طبقات مختلف در روش پیشنهادی و روش متعارف

۵- جداسازی از پایه سبب کاهش قابل توجه دوران طبقات و اثرهای پیچشی در سازه شده است. مقدار دوران طبقات، در سازه دارای برون محوری جرم بین ۶۰ تا ۷۰ درصد و در سازه دارای برون محوری سختی بین ۷۵ تا ۸۵ درصد نسبت به سازه با تکیه‌گاه ثابت کاهش یافته است. لذا در سازه دارای برون محوری سختی، جداسازی سبب کاهش بیشتری در میزان دوران و پیچش طبقات، نسبت به سازه دارای برون محوری جرم شده است.

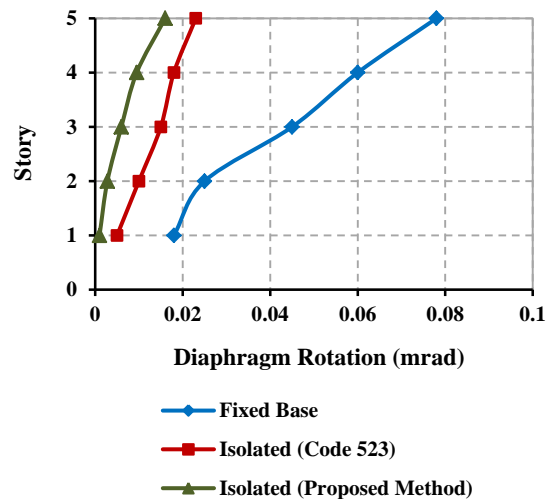
۶- جداسازی سبب کاهش نرخ افزایش دوران در طبقات متوالی سازه شده است.

۷- در هر دو حالت سازه با تکیه‌گاه ثابت و سازه جداسازی شده، برون محوری سختی سبب دوران کمتری در پلان و در نتیجه اثرهای پیچشی کمتری در سازه، نسبت به برون محوری جرم شده است.

۸- بر پایه روش پیشنهادی، به منظور کاهش پیچش در سازه‌های نامتقارن، می‌توان سختی جداسازهای واقع در مجاورت لبه نرم را افزایش و سختی جداسازهای واقع در نزدیکی لبه سخت را کاهش داد تا مرکز سختی سیستم جداساز به لبه نرم نزدیک شود.

## ۸- مراجع

- [1] Naeim, F. and Kelly, J.M. (1999), "Design of Seismic Isolated Structures", Wiley, New York.
- [2] Chopra, A.K. (2007), "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", Pearson Education, New Jersey.
- [3] Khoshnudian, F. and Motamedi, D. (2013), "Seismic Response of Asymmetric Steel Isolated Structures Considering Vertical Component of Earthquakes", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 6, pp. 1333-1347.
- [4] Nagarajaiah, S., Reinhorn, A. and Constantinou, M. (1993), "Torsion in Base-Isolated Structures with Elastomeric Isolation Systems", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 10, pp. 2932-2951.
- [5] Jangid, R. S. and Datta, T. K. (1994), "Nonlinear Response of Torsionally Coupled Base Isolated Structure", Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 1, pp. 1-22.
- [6] Tena-Colunga, A. and Gomez-Soberon, L. (2002), "Torsional Response of Base-Isolated Structures Due to Asymmetries in the Superstructure", Engineering Structures, Vol. 24, No. 12, pp. 1587-1599.
- [7] Shakib, H. and Fuladgar, A. (2003), "Effect of Vertical Component of Earthquake on the Response of Pure-Friction Base-Isolated Asymmetric Buildings", Engineering Structures, Vol. 25, No. 14, pp. 1841-1850.
- [8] Ismail, M. (2015), "Elimination of Torsion and Pounding of Isolated Asymmetric Structures under Near-Fault Ground Motions", Structural Control and Health Monitoring, Vol. 22, No. 11, pp. 1295-1324.
- [9] Khoshnudian, F. and Imani Azad, A. (2011), "Effect of Two Horizontal Components of Earthquake on Nonlinear



شکل ۲۰- مقایسه میانگین بیشینه دوران طبقات بر پایه روش پیشنهادی و روش نشریه ۵۲۳

برون محوری جرم و برون محوری سختی در نظر گرفته شده و سازه مورد بررسی با مقدارهای مختلف برون محوری، تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفته است. همچنین به منظور کاهش دوران و اثرهای پیچشی در سازه‌های نامتقارن، روش متعارف طراحی جداسازها برای این سازه‌ها اصلاح شده است. شایان ذکر است که نتیجه‌های کمی به دست آمده برای نمونه مورد بررسی برقرار می‌باشند و در قاب‌های دیگر با سیستم مهاربندی متفاوت و با به کارگیری جداسازهایی با مشخصات متفاوت یا چیدمان متفاوت یافته‌ها تغییر خواهند کرد. مهم‌ترین نتیجه‌های به دست آمده به قرار زیر می‌باشند:

۱- جداسازی سازه سبب افزایش زمان تناوب آن، تا حدود سه برابر در مودهای انتقالی و بیش از هفت برابر در مود پیچشی، نسبت سازه با تکیه‌گاه ثابت گردید.

۲- جداسازی سازه سبب کاهش ۴۰ درصدی جابجایی بام و به طور متوسط موجب کاهش ۷۷ درصدی جابجایی نسبی طبقات شده است.

۳- جداسازی سبب کاهش ۸۰ درصدی شتاب در تراز بام شده است. همچنین در سازه جداسازی شده مقدار شتاب در طبقات مختلف تقریباً ثابت است، در حالی که در سازه با تکیه‌گاه ثابت با افزایش تراز طبقه، مقدار شتاب با یک‌روند تقریباً خطی افزایش می‌یابد.

۴- در سازه جداسازی شده هیچ‌گونه رفتار غیرخطی در عضوهای سازه مشاهده نشد، در حالی که در سازه با تکیه‌گاه ثابت رفتار غیرخطی قابل توجه در مهاربندهای طبقات پایین رخ داد.

Response of Torsionally Coupled Base Isolated Structures”, the Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 20, No. 8, pp. 986-1018.

- [10] Siringoringo, D.M. and Fujino, Y. (2015), “Seismic Response Analyses of an Asymmetric Base Isolated Building During the 2011 Great East Japan (Tohoku) Earthquake”, Structural Control and Health Monitoring, Vol. 22, No. 1, pp. 71-90.
- [11] Kilar, V. and Koren, D. (2009), “Seismic Behaviour of Asymmetric Base Isolated Structures with Various Distributions of Isolators”, Engineering Structures, Vol. 31, No. 4, pp. 910-921.
- [12] Kilar, V., Petrovič, S., Koren, D., and Šilih, S. (2011), “Seismic Analysis of an Asymmetric Fixed Base and Base-Isolated High-Rack Steel Structure”, Engineering Structures, Vol. 33, No. 12, pp. 3471-3482.
- [13] Tena-Colunga, A. and Escamilla-Cruz, J.L. (2007), “Torsional Amplifications in Asymmetric Base-Isolated Structures”, Engineering Structures, Vol. 29, No. 2, pp. 237-247.
- [14] Ryan, K.L. and Chopra, A.K. (2004), “Estimation of Seismic Demands on Isolators in Asymmetric Buildings using Non-Linear Analysis”, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 33, No. 3, pp. 395-418.
- [15] استاندارد ۳-۲۸۰۰، (۱۳۸۴)، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- [16] مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۲)، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی.
- [17] نشریه شماره ۵۲۳، (۱۳۸۹)، راهنمای طراحی و اجرای سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌ها، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور.
- [18] PEER Strong Motion Database, <http://ngawest2.berkeley.edu>, 2016
- [19] ASCE/SEI-41, (2007), Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers.

