

# بررسی رفتار قاب میراگر پشت بام در ساختمان‌های مهاربندی شده تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور

علی اکبر یحیی آبادی<sup>۱</sup>؛ سید مهدی زهرائی<sup>۲</sup>

چکیده

سال‌هاست که از میراگر جرمی تنظیم شده به عنوان روشی مؤثر برای کاهش ارتعاشات ناشی از باد و زلزله در ساختمان‌های بلند استفاده می‌شود. در این مقاله عملکرد قاب‌های مهاربندی شده با میراگر جرمی تنظیم شده پشت بام مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور پاسخ لرزه‌ای خطی و غیرخطی شش ساختمان با مهاربند هم محور فولادی با ۳، ۵ و ۱۰ طبقه تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و دور مطالعه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از قاب میراگر پشت بام، پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های با پریود کوتاه را بیشتر از ساختمان‌های با پریود متوسط و بلند کاهش می‌دهد. استفاده از این قاب در ساختمان‌های سه طبقه سبب کاهش ۱۶ تا ۶۶ درصدی تغییرمکان بام در زلزله‌های مختلف شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، قاب میراگر جرمی تنظیم شده پشت بام در صورتی که از شتاب نگاشت ویژه ساختگاه مناسبی برای طراحی آن استفاده شود؛ سبب کاهش پاسخ لرزه‌ای تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور خواهد شد.

کلمات کلیدی

قاب میراگر جرمی تنظیم شده پشت بام، تحلیل تاریخی زمانی خطی، تحلیل تاریخی زمانی غیرخطی، زلزله‌های حوزه نزدیک، زلزله‌های حوزه دور

## *Studying Rooftop Damper Frame in Braced Structures under near and far field Earthquake Excitations*

A. Yahyaabadi; S. M. Zahrai

### ABSTRACT

Throughout the years, tuned mass dampers have been implemented effectively to reduce wind-induced vibrations and earthquake excitations in high-rise buildings. In this paper, the performance of braced frames with rooftop tuned mass damper frame is studied. For this purpose, linear and nonlinear time history dynamic analysis of six steel concentrically braced frames with 3, 5 and 15 stories subjected to near and far field earthquakes are conducted. Based on numerical results obtained in this research, applying a rooftop damper frame is more effective in reducing the seismic response of the braced frames with short periods of vibration than those with moderate and long lateral periods. It is found that rooftop tuned mass damper reduces the floor displacement of the 3-story building by as much as 18 to 66 percent under different earthquake excitations. Results also show that this type of damper frame with appropriate design can result in decreased seismic responses both under near and far field earthquake excitations.

### KEYWORDS

Rooftop tuned mass damper frame; linear dynamic analysis; nonlinear dynamic analysis; near field earthquakes; far field earthquakes

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: Email: A.Yahyaabadi@aut.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده فنی، گروه مهندسی عمران، قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، دانشگاه تهران:

Email: MZahrai@ut.ac.ir



میراگرهای ویسکوز از ساختمان جدا می‌شود. بر اساس نتایج این تحقیق پارامترهای پاسخ لرزه‌ای به مقدار ۸۴ درصد، در سازه میرا شده کاهش می‌یابند. این میزان کاهش در پاسخ ساختمان، با توجه به منطبق بودن پریرود غالب شتاب نگاشت استفاده شده بر پریرود اساسی ساختمان میرا شده، عجیب اما منطقی به نظر می‌رسد. نتایج تحقیقات Vilaverde نشان می‌دهد که کاهش قابل توجه در پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها با استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده در تراز بام ساختمان، امکان‌پذیر است.

سختی و جرم، دو فاکتور اساسی و تأثیرگذار بر مودهای ارتعاشی یک سازه هستند. تغییر سختی و جرم سازه در بسیاری از موارد اقتصادی یا عملی نیست، اما می‌توان پریرود اساسی سازه را با اضافه نمودن یک قاب خمشی نرم (با جرم مشخص) به تراز بام آن افزایش داد. از آنجا که در اکثر ساختمان‌ها، از بام به عنوان محلی برای تجهیزات مکانیکی استفاده می‌شود، قاب پشت بام را می‌توان به عنوان قاب میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال به کار برد. Reaveley, Johnson و Pantelides با انجام تحلیل‌های خطی چندین مدل نتیجه گرفتند که استفاده از این نوع قاب در صورت طراحی مناسب سبب کاهش پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها خواهد شد [۱۰].

پیش بینی رفتار واقعی ساختمان‌ها بر اساس رفتار خطی ممکن است منجر به نتایج غیرمنطقی شود؛ زیرا مشخصه‌های دینامیکی حرکات بحرانی زمین در حوزه خطی و غیرخطی متفاوتند. پس در این پژوهش به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار ساختمانها با قاب میراگر پشت بام، رفتار واقعی چندین ساختمان که با استفاده از قاب میراگر جرمی تنظیم شده بام (Roof Tuned Mass Damper Frame یا RDF) اصلاح شده‌اند، علاوه بر تحلیل‌های خطی با استفاده از تحلیل‌های غیر خطی نیز مورد بررسی قرار گرفته است؛ ضمن اینکه در این پژوهش کارایی این سیستم درحوزه نزدیک به صورت خاص مورد توجه قرار گرفته است.

برای طراحی ساختمان‌ها از ضوابط آیین‌نامه UBC97 [۱۱] و با در نظرگرفتن فاصله آنها از گسل استفاده شده است. حرکات ورودی زمین براساس مشخصات فرضی ساختگاه (خاک نوع SD و فاصله از گسل) انتخاب شده‌اند. برای کنترل پایداری این قاب‌ها از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. روش طراحی استاتیکی غیرخطی، طراحی قاب‌های پایدار و انعطاف‌پذیر را آسان می‌کند. شایان ذکر است که قاب‌ها در صورتی باعث کاهش پاسخ کلی سازه خواهند شد که از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار باشند.

میراگر جرمی تنظیم شده به عنوان روشی متداول برای کاهش ارتعاشات ناشی از باد در ساختمان‌های بلند به کار می‌رود. این سیستم‌ها از یک جرم متمرکز تشکیل شده اند که به وسیله فنر و میراگر به نقطه‌ای از سازه متصل می‌شوند که دارای شدیدترین مقدار ارتعاشات باشد [۱]. میراگرهای جرمی تنظیم شده توانایی کاهش پاسخ سازه در مقابل تحریکات زلزله را نیز دارند [۲]. ایده استفاده از این سیستم‌ها (TMD) را اولین بار Frahm در سال ۱۹۰۹ مطرح کرد [۳]. پس از طرح این ایده، تاکنون تحقیقات گسترده‌ای جهت تعیین کارایی میراگرهای جرمی تنظیم شده در کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها انجام شده است. در سال ۱۹۸۱، Kayina, Veneziano و Biggs میزان کارایی میراگرهای جرمی تنظیم شده در کاهش پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها را بررسی کردند [۴]. آنها در این تحقیق از زلزله‌های تاریخی به منظور تحلیل آماری یک سیستم الاستیک خطی استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که میراگرهای جرمی تنظیم شده برخلاف تصور رایج، تأثیر چندانی بر کاهش پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها ندارند. در سال ۱۹۸۳، Sladek و Klingner با بررسی اثر قاب میراگر جرمی تنظیم شده بر رفتار خطی و غیرخطی ساختمان تحت مؤلفه شمالی- جنوبی شتاب نگاشت ال سنترو (۱۹۴۰)، نتیجه گرفتند که TMD روش مناسبی برای کاهش پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها نیست [۵]. این نتایج مخالف با سایر تحقیقاتی است که نشان می‌دهند میراگرهای جرمی تنظیم شده، یک ابزار کنترل غیرفعال مؤثر در کاهش ارتعاشات ساختمان‌هاست [۶] و [۷]. اختلاف بین سیستم پیشنهادی و TMD مطالعه شده در مرجع [۵] در این است که سیستم پیشنهادی در مراجع [۶] و [۷] دارای رفتاری غیرخطی است و می‌تواند وارد مرحله پس از تسلیم شود. در سال ۲۰۰۴، Wong و Chee اثر قاب میراگر جرمی تنظیم شده بر قابلیت استهلاک انرژی و ورودی زلزله در ساختمانها را مورد بررسی قرار داده، نتیجه گرفتند که TMD در کاهش پاسخ‌های انرژی ساختمان‌های دارای پریرود متوسط و بلند نسبت به ساختمان‌های دارای پریرود کوتاه مؤثرتر است. TMD در کاهش انرژی جنبشی و کرنشی ماکزیمم سازه بسیار مؤثر است و مقدار انرژی میرایی را که بایستی توسط ساختمان مستهلک شود نیز کاهش می‌دهد [۸].

در سال ۱۹۹۸، Vilaverde ایده استفاده از بام ساختمان به عنوان جرم میراگر تنظیم شده غیرفعال را مطرح کرد [۹]. در مدل پیشنهادی وی، بام به وسیله بالشتک‌های لاستیکی و

به منظور بررسی تفاوت کارایی قاب میراگر جرمی تنظیم شده پست بام در حوزه نزدیک و دور، بررسی‌ها برای دو حالت حوزه نزدیک و حوزه دور به صورت جداگانه انجام شده است. سه مدل با تعداد طبقات ۳، ۵ و ۱۰ طبقه یک بار برای حوزه نزدیک و یک بار برای حوزه دور بر اساس ضوابط آیین نامه UBC و با در نظر گرفتن اثر فاصله از گسل طراحی شده‌اند. بدیهی است که به دلیل تفاوت طیف‌های طراحی در حوزه نزدیک و دور، مدل‌های واقع در این دو حوزه و به پیروی آن پیروی برخی از آنها با یکدیگر متفاوت شده است. مشخصات مدل‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. فرض شده که ساختگاه حوزه نزدیک در فاصله ۳ کیلومتری از چشمه لرزه زای نوع B واقع شده باشد. سیستم جانبی تمام مدل‌ها از نوع مهاربند هم مرکز انتخاب شده است. ساختگاه ساختمان‌ها، دارای خاک نوع  $S_D$  و فاکتور ناحیه لرزه‌ای  $Z=0.4$  است.

شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در این پژوهش براساس نوع خاک و فاصله ساختگاه از چشمه لرزه‌زا انتخاب شده‌اند. مشخصات این شتاب نگاشت‌ها در جداول (۲) و (۳)، و طیف شتاب آنها در اشکال (۱) و (۲) ارائه شده است. برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی، شتاب نگاشت‌ها مطابق ضوابط UBC مقیاس شده‌اند. سه شتاب‌نگاشت واقع در حوزه نزدیک بر اساس طیف طراحی حوزه نزدیک، و سه شتاب‌نگاشت واقع در حوزه دور بر اساس طیف طراحی حوزه دور مقیاس شده‌اند.

## ۳- روش طراحی قاب میراگر جرمی تنظیم شده

### پشت بام

ارزیابی اولیه قاب میراگر جرمی تنظیم شده پست بام، براساس دستورالعمل‌های AISC [۱۲] و [۱۳] نشان می‌دهد که تنش در اعضای قاب حتی در زلزله‌های ضعیف نیز از حد مجاز فراتر خواهد رفت. RDF در صورتی مؤثر و کارا خواهد بود که علاوه بر انعطاف‌پذیری بالا، اعضای تشکیل دهنده آن مجاز به تحمل تغییر شکل‌های غیرخطی باشند [۱۰].

پایداری RDF که یک قاب نرم خمشی است، براساس روش تحلیل استاتیکی غیرخطی پیشنهاد شده در دستورالعمل FEMA356 و دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان‌های موجود مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۴] و [۱۵]. این روش مستلزم آن است که بیشترین تغییر مکان غیرخطی (هدف) از تغییرمکان غیرخطی مجاز کوچک‌تر باشد. تغییرمکان هدف

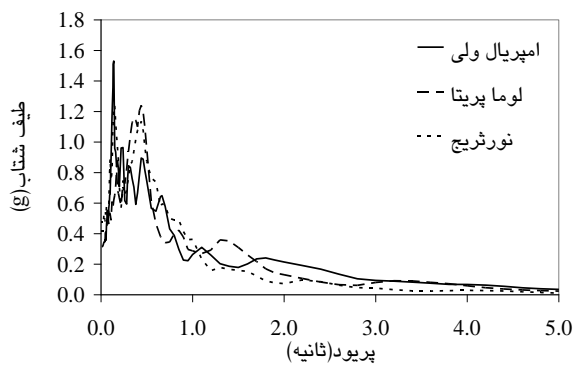
تابعی از پیروی اساسی و طیف شتاب طراحی RDF است.

شایان ذکر است طیف شتابی که برای محاسبه تغییر مکان هدف استفاده شده، از تاریخچه زمانی شتاب بام ساختمان استخراج شده است؛ بنابراین تغییرمکان هدف قاب بام برای هر ساختمان تحت شتاب نگاشت‌های مختلف، به صورت جداگانه محاسبه می‌شود و بیشترین مقدار به دست آمده، ملاک طراحی قرار می‌گیرد. از منحنی استاتیکی غیرخطی فزاینده، برای محاسبه تغییرمکان غیرخطی مجاز قاب بام استفاده شده است. این منحنی براساس ضوابط FEMA356 برای هر قاب میراگر جرمی تنظیم شده محاسبه شده است.

**تحلیل:** تحلیل پایداری RDF به همراه تحلیل سازه میراشده، مستلزم کاربرد روش طرح تکراری است. ابتدا RDF برای هر ساختمان و برای سطح عملکرد آستانه فروریزش طراحی می‌شود؛ سپس میراگر به ساختمان میرا نشده اضافه و تحلیل‌ها تکرار می‌گردند. به کمک نتایج تحلیل‌ها می‌توان میزان تاثیر این سیستم بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان را تعیین کرد. علاوه بر این می‌توان از تاریخچه زمانی شتاب بام ساختمان جهت محاسبه طیف پاسخ شتاب طراحی و ارزیابی پایداری RDF استفاده کرد. در صورتی که قاب پشت بام سبب افزایش پاسخ لرزه‌ای سازه گردد، یا شتاب بام ساختمان منجر به ناپایداری آن شود، باید طرح قاب اصلاح و تحلیل‌ها دوباره تکرار شوند.

**ملاحظات طراحی:** براساس تحقیقات انجام شده در مورد روش طراحی RDF، می‌توان پایداری و کارایی این قاب‌ها را با رعایت چندین توصیه طراحی بهبود بخشید [۱۰]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از حداقل سه ستون در هر RDF (به جای دو ستون) سبب افزایش شکل‌پذیری این قاب‌ها خواهد شد. این موضوع تأکیدی دوباره بر اثر قابل توجه تعداد درجات نامعینی بر رفتار غیرخطی سازه‌ها است که مورد توجه آیین‌نامه‌های ساختمانی نیز قرار گرفته است. علاوه بر این، رعایت اصل ستون قوی و تیر ضعیف در طراحی این سیستم سبب افزایش بیشترین تغییرمکان غیرخطی مجاز در این قاب‌ها خواهد شد. در طراحی این قاب باید تلاش نمود که شیب پس از تسلیم منحنی استاتیکی غیرخطی فزاینده قاب منفی نباشد، تا بدین طریق بتوان از افت مقاومت در محدوده غیرخطی و پس از تشکیل مفاصل جلوگیری کرد.

نکته بسیار مهم دیگری که بایستی در طراحی RDF منظور گردد، سیستم نما و پوشش این قاب‌هاست. سیستم‌های نما می‌توانند اثر قابل توجهی بر خصوصیات دینامیکی سازه داشته باشند [۱۵]. در تحلیل جانبی ساختمان‌ها، اغلب اثرات سختی سیستم نما مورد توجه قرار نمی‌گیرد. با وجود این، نما می‌تواند



شکل ۲- طیفهای پاسخ شتاب زلزله های حوزه دور

رایج نما در RDF که سبب تغییر مود ارتعاشی اساسی این قابها خواهد شد، می تواند منجر به کاهش کارایی این سیستم و یا حتی افزایش پاسخ شتاب لرزه ای ساختمان اصلی گردد. سیستم نمای قاب پشت بام بایستی به گونه ای باشد که سبب افزایش جرم و سختی قاب نشود. از این رو می توان از سیستمهایی نظیر آنچه در جداساز لرزه ای به کار برده می شود، استفاده نمود. اتصالات لغزشی یا فاصله دار می توانند شرایطی را فراهم نمایند که سیستم نما تأثیری بر رفتار دینامیکی قاب نداشته باشد.

#### ۴- مراحل طراحی قاب میراگر جرمی تنظیم شده

##### پشت بام

برای طراحی قاب میراگر جرمی تنظیم شده پشت بام (RDF) از روش ارائه شده در مرجع [۱۰] استفاده شده است. مراحل طراحی یک RDF کارا و پایدار عبارت است از: (۱) انجام تحلیل دینامیکی ساختمان برای تعیین مودها و پریودهای ارتعاشی آن (۲) تعیین شتاب نگاشت مشخصه ساختگاه با مقیاس نمودن شتاب نگاشتهای مناسب واقعی، و محاسبه طیف پاسخ ویژه ساختگاه به منظور تعیین میزان تغییری که بایستی در پریود اساسی سازه روی دهد تا پاسخ لرزه ای آن کاهش یابد. طبق روش معمول، تولید شتاب نگاشت مشخصه ساختگاه توسط زلزله شناسان انجام می شود. شتاب نگاشت مشخصه ساختگاه به نحوی انتخاب می شود که بزرگی، فاصله و سایر پارامترهای لرزه ای آنها مشابه خطر غالب در محل باشد؛ این انتخاب از طریق تجزیه خطر (Disaggregation) انجام می شود. شتاب نگاشت مشخصه ساختگاه ممکن است از موارد ثبت شده، رکوردهای سازگار با طیف خطر یکنواخت (UHS)، یا از فرمهای مختلف شتاب نگاشت های مصنوعی انتخاب شود [۱۶]. (۳) مدلسازی قاب پشت بام که در نهایت قاب میراگر جرمی تنظیم شده پشت بام (RDF) خواهد شد. (۴) اعمال

سبب افزایش سختی سازه و در نتیجه کاهش پریود مودهای ارتعاشی آن شود که این مسأله نیز ممکن است افزایش پاسخ شتاب ساختمان را در پی داشته باشد.

رفتار دینامیکی میراگرهای جرمی تنظیم شده، مهم ترین موضوع در این نوع سیستم هاست. استفاده از سیستمهای

جدول (۱): مشخصات مدلها

ساختمان های حوزه نزدیک		
مدل	تعداد طبقات	پریود (ثانیه)
A	۳	۰/۳۶
B	۵	۰/۵۳
C	۱۰	۰/۹۸
ساختمان های حوزه دور		
مدل	تعداد طبقات	پریود (ثانیه)
D	۳	۰/۳۶
E	۵	۰/۵۵
F	۱۰	۱/۱۳

جدول (۲): شتابنگاشت های استفاده شده برای تحلیل ساختمان های

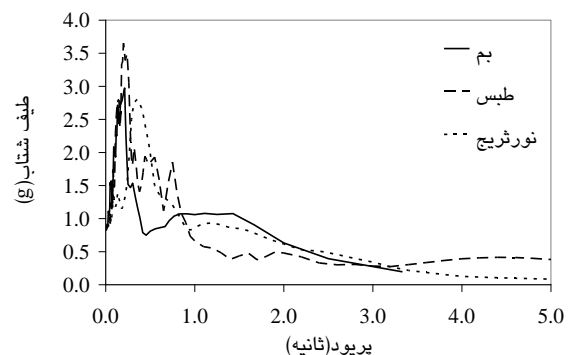
##### واقع در حوزه نزدیک

شتابنگاشت	بزرگی	فاصله از چشمه لرزه زا (کیلومتر)	مدت زمان (ثانیه)	شتاب زمین حداکثر (g)
بم	۶/۵	۳/۰	۳۹/۳	۰/۷۹۰
طبس	۷/۴	۳/۰	۳۲/۸۴	۰/۸۵۲
نورثریج	۶/۷	۳/۶	۴۰	۰/۸۴۳

جدول (۳): شتابنگاشت های استفاده شده برای تحلیل ساختمان های

##### واقع در حوزه دور

شتابنگاشت	بزرگی	فاصله از چشمه لرزه زا (کیلومتر)	مدت زمان (ثانیه)	شتاب زمین حداکثر (g)
امپریال ولی	۶/۹	۱۶/۰	۳۹/۵۲	۰/۳۱۵
لوما پریتا	۷/۱	۱۵/۸	۳۹/۹۵	۰/۴۱۷
نورثریج	۶/۷	۲۳/۲	۳۱/۵۹	۰/۴۷۴



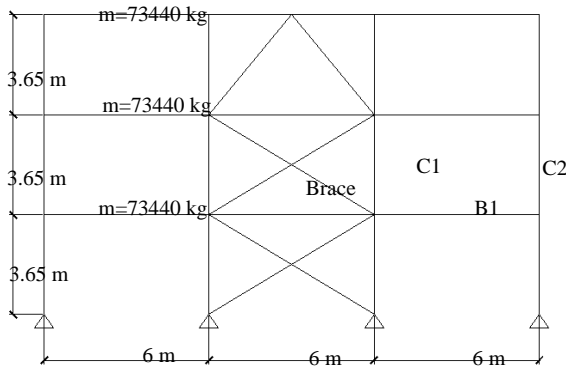
شکل (۱): طیف های پاسخ شتاب زلزله های حوزه نزدیک

بر اساس نتایج تحلیل مودال حدود ۰/۵۹ ثانیه است. با قراردادن RDF بر بام ساختمان اصلی و انجام تحلیل سازه میرا شده (شکل ۵)، نتایج لازم جهت بررسی پایداری قاب پشت بام به دست می‌آید. برای تعیین پایداری قاب پشت بام ضروری است که طیف پاسخ شتاب در تراز بام ساختمان محاسبه شود. از نتایج تحلیل ساختمان میرا شده می‌توان طیف پاسخ شتاب بام ساختمان (شکل ۷) را محاسبه نمود. اکنون می‌توان با استفاده از طیف شتاب و پریود مؤثر RDF ( $T_e=0.59$ ) تغییر مکان هدف ( $\delta_i$ ) قاب پشت بام را به کمک معادله زیر محاسبه کرد (معادله ۳-۱۴ دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود [۱۷]):

$$\delta_i = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a T_e^2 g / 4\pi^2 \quad (1)$$

جدول (۴): مشخصات مقاطع ساختمان سه طبقه واقع در حوزة نزدیک و RDF طراحی شده برای آن

مشخصات مقطع	نام مقطع
TUBO 200X200X16	C1
TUBO 140X140X10	C2
TUBO 160X160X16	C3
TUBO 100X100X10	C4
HE300B	B1
IPE240	B2
TUBO 140X140X8	Brace



شکل (۳): ساختمان سه طبقه واقع در حوزة نزدیک

بارهای ثقیلی به RDF و انجام تحلیل مودال و تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده قاب. (۵) اصلاح طرح قاب با توجه به شکل منحنی استاتیکی غیرخطی فزاینده و تغییر مکان سطح عملکرد آستانه فروریزش، به گونه‌ای که منحنی استاتیکی غیرخطی فزاینده آن قابل قبول باشد. (۶) اضافه نمودن RDF به تراز بام ساختمان و انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی و طیفی. پاسخ حداکثر ساختمان میرا شده (ساختمان با RDF) نشان دهنده کارایی این سیستم خواهد بود. در صورتی که قاب پشت بام سبب کاهش پاسخ سازه نشده باشد، بایستی جرم و قاب آن به منظور تغییر پریود اساسی‌اش اصلاح و گامهای ۳ تا ۶ مجدداً تکرار شوند. (۷) محاسبه تاریخچه زمانی شتاب بام ساختمان برای هر رکورد لرزه‌ای. (۸) محاسبه طیف پاسخ بام ساختمان برای تمام شتاب‌نگاشت‌ها. (۹) تعیین ضرایب مورد نیاز برای محاسبه تغییر مکان هدف RDF بر اساس ضوابط FEMA356 (یا دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود) و با استفاده از طیف پاسخ بام ساختمان و پریود مؤثر RDF (۱۰) کنترل این موضوع که تغییر مکان هدف محاسبه شده از مقدار متناظر با آستانه فروریزش بر روی منحنی استاتیکی غیرخطی فزاینده RDF (که در گام‌های ۳ و ۴ محاسبه می‌شود) کوچکتر باشد.

## ۵- طراحی و تحلیل RDF برای مدل سه طبقه واقع در حوزة نزدیک

به منظور روشن‌تر شدن موضوع، در این بخش نحوه طراحی RDF برای مدل A به عنوان نمونه شرح داده می‌شود. مدل A، قابی با مهاربند هم محور سه طبقه است که در فاصله ۳ کیلومتری از چشمه لرزه‌زای نوع B و بر روی خاک نوع S<sub>D</sub> ( $180 < V_S < 360$  (m/sec)) واقع شده است. بر اساس تحلیل مودال، پریود اساسی این مدل حدود ۰/۳۶ ثانیه می‌باشد. پیکربندی، ابعاد، اندازه اعضا و جرم لرزه‌ای مدل A در شکل (۳) و مشخصات مقاطع در جدول (۴) داده شده است.

در شکل (۴)، پیکربندی، ابعاد، اندازه اعضا و جرم RDF طراحی شده برای ساختمان مدل A و در جدول (۴) مشخصات مقاطع ارائه شده است. در شکل (۵) ترکیب این قاب با ساختمان نمایش داده شده است. در این مثال جرم قاب پشت بام حدود ۶/۵ درصد جرم اصلی سازه است.

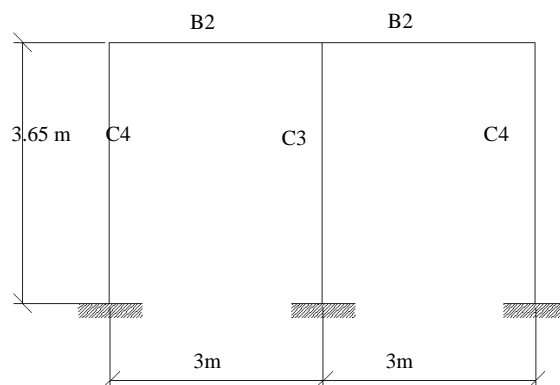
نتیجه تحلیل فزاینده قاب پشت بام، که در شکل (۶) نمایش داده شده، نشان می‌دهد که قاب توانایی تحمل ۳۵۰ میلی‌متر تغییر شکل جانبی را قبل از رسیدن به سطح عملکرد آستانه فروریزش داراست. پریود مود ارتعاشی اساسی این قاب

جدول (۵): تغییر مکان هدف برای RDF  
ساختمان سه طبقه واقع در حوزه نزدیک

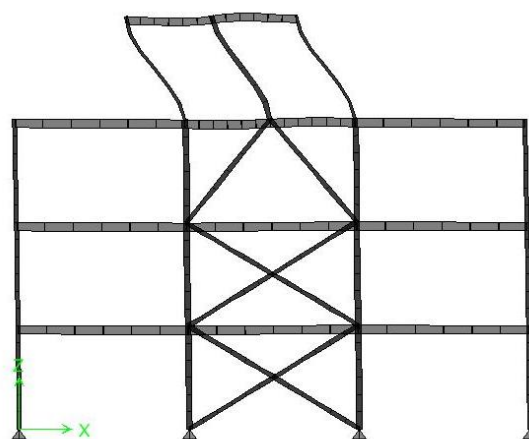
تغییر مکان هدف (mm)	شتاب طیفی (g)	پریود مؤثر RDF : $T_e = 0.59$		
		$C_0$ , $C_1$ , $C_3$	$C_2$	بند نگاشت
۵۶	۰/۵۴	۱/۰۰	۱/۲۰	بم
۹۹	۰/۹۵	۱/۰۰	۱/۲۰	طیس
۱۱۶	۱/۱۲	۱/۰۰	۱/۲۰	نورثریج

حاضر منطبق بر منحنی استاندارد ۲۸۰۰ [۱۸] نیست، مقدار  $C_1$  برای هر رکورد با توجه به زمان مشترک بین دو ناحیه شتاب ثابت و سرعت ثابت طیف شتاب بام محاسبه شده است.  $C_2$  ضریب اعمال اثرات کاهش سختی و مقاومت اعضای سازه‌ای بر تغییر مکان است و مقدار آن بر اساس جدول ۳-۳ دستورالعمل بهسازی تعیین می‌شود.  $C_3$  ضریب اعمال اثرات دینامیکی P-delta بر تغییر مکان است و مقدار آن بر اساس ضریب پایداری  $\theta$  تعیین می‌شود. مطابق ضوابط دستورالعمل بهسازی، ضریب  $C_3$  برای سازه‌هایی که پس از تسلیم دارای سختی مثبت هستند برابر یک است.

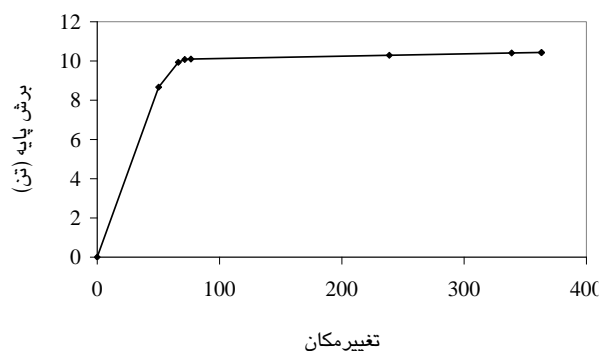
در جدول (۵) خلاصه نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده RDF طراحی شده برای مدل A، ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، تغییر مکان هدف RDF برای تمام شتاب‌نگاشت‌ها از حداکثر تغییر مکان هدف مجاز (۳۵۰ میلی‌متر) کوچکتر است؛ بنابراین عملکرد سازه در این شتاب‌نگاشت‌ها بهتر از عملکرد آستانه فروریزش خواهد بود. زمان تناوب اساسی سازه میراشده مدل A حدود ۰/۶۲ ثانیه است که به مقدار قابل توجهی از زمان تناوب سازه میراننده ( $T=0.74$ ) بزرگتر است. بنابراین پاسخ سازه در برابر تحریک زمین تغییر خواهد کرد. در شکل (۸) بیشترین تغییر مکان غیرخطی طبقات مدل A در دو حالت میرا شده و میرا نشده نمایش داده شده است. در شکل (۹) تغییر مکان غیرخطی بام مدل A در حالت میرا نشده با حالت میرا شده تحت شتاب نگاشت طیس مقایسه شده است. در جدول‌های (۶) و (۷) خلاصه نتایج تحلیل‌های خطی و غیرخطی مدل A در دو حالت با و بدون RDF داده شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل (۴): RDF طراحی شده برای مدل سه طبقه واقع در حوزه نزدیک



شکل (۵): مود اساسی سازه میرا شده (مدل سه طبقه واقع در حوزه نزدیک)،  $T=0.63$  sec



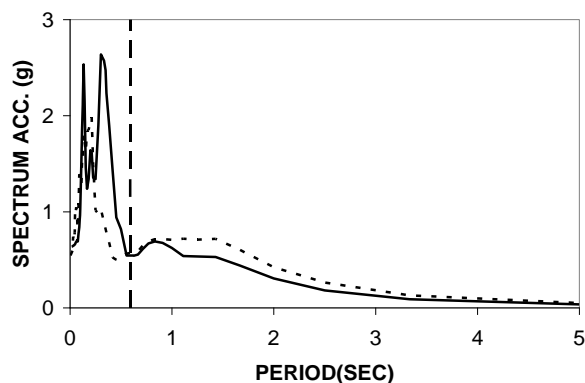
شکل ۶- منحنی استاتیکی غیرخطی فزاینده برای RDF

$C_0$  ضریب اصلاح برای ارتباط تغییر مکان طیفی سیستم یک درجه آزادی به تغییر مکان سیستم چند درجه آزادی است.  $C_1$  ضریب تصحیح برای اعمال تغییر مکان‌های غیر ارتجاعی سیستم است. مقدار  $C_1$  برای  $T_e > T_s$  برابر یک است.  $T_s$  زمان مشترک بین دو ناحیه شتاب ثابت و سرعت ثابت در طیف پاسخ است. از آنجا که منحنی طیف پاسخ در پژوهش

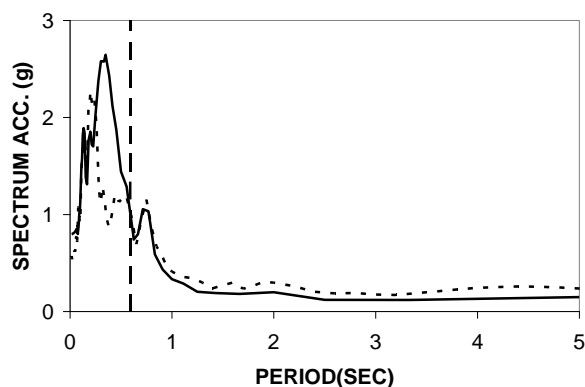


جدول (۶): تغییر مکان بام در دو حالت خطی و غیر خطی برای مدل A (با و بدون RDF)

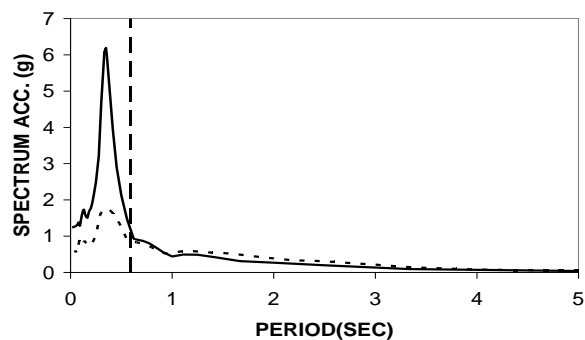
درصد تغییرات	تغییر مکان بام (mm)		شتاب نگاشت	نوع تحلیل
	RDF با	بدون RDF		
-۵/۶	۳۰/۰	۳۱/۶	بم	خطی
-۱۶/۸	۳۲/۳	۳۸/۸	طیس	
-۲۴/۰	۴۱/۷	۵۴/۸	نورتریج	
-۲۲/۶	۲۶/۴	۳۴/۱	بم	غیر خطی
-۴۱/۹	۲۷/۹	۴۸/۰	طیس	
-۲۵/۱	۹۵/۸	۱۲۷/۹	نورتریج	



بم



طیس



نورتریج

— طیف بام  
 ..... طیف تراز زمین  
 - - - - - RDF =  $T_e$  پرپود

شکل (۷): طیف‌های پاسخ شتاب بام برای مدل سه طبقه واقع در حوزه نزدیک

## ۶- نتایج تحلیل‌های عددی

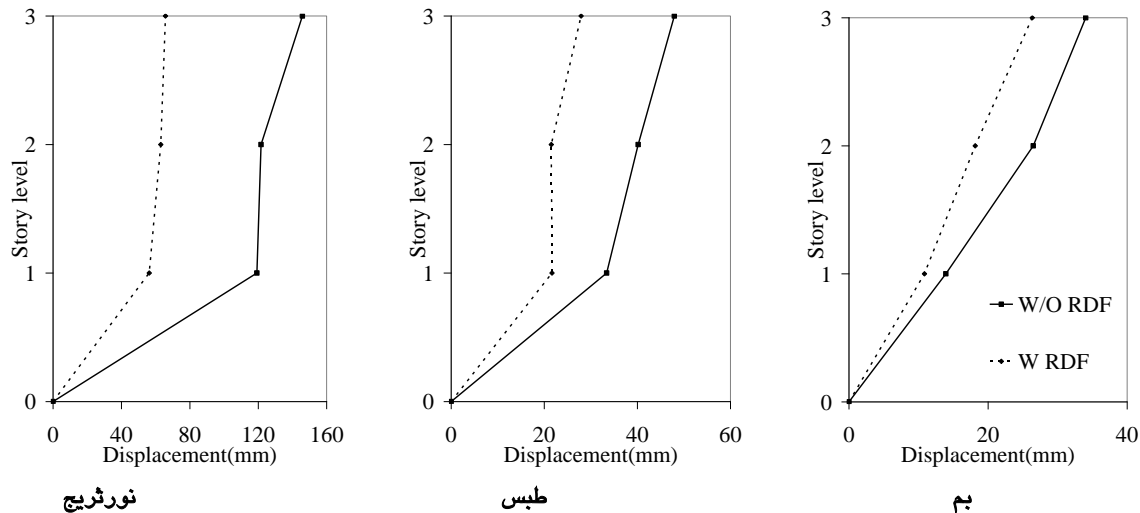
RDF برای هر کدام از ساختمان‌ها به صورت جداگانه طراحی شده و اثر آن بر پاسخ لرزه‌ای ساختمانها بررسی شده است. در جدول (۷) تأثیر این قاب بر افزایش پرپود مدل‌ها ارائه شده است. تغییر پرپود اساسی ساختمان‌ها سبب تغییر حداکثر پاسخ لرزه‌ای آنها خواهد شد. در جداول ۹ تا ۱۲ میزان تغییرات به وجود آمده در حداکثر تغییر مکان

جدول (۷): حداکثر نیروی محوری بادبندها در دو حالت خطی و غیر خطی برای مدل A (با و بدون RDF)

درصد تغییرات	حداکثر نیروی محوری بادبندها (Ton)		شتاب نگاشت	نوع تحلیل
	RDF با	بدون RDF		
-۷/۳	۸۱/۶	۸۸/۰	بم	خطی
-۱۳/۶	۹۸/۱	۱۱۶/۳	طیس	
-۱۹/۶	۱۵۳/۷	۱۱۹/۲	نورتریج	
-۱۴/۶	۹۴/۷	۱۱۰/۱	بم	غیر خطی
-۵۵/۳	۱۱۰/۵	۱۱۵/۶	طیس	
-۳/۷	۱۸۲/۸	۱۸۳/۵	نورتریج	

مدل‌ها تحت شتاب‌نگاشت‌های مربوطه ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از RDF در اکثر موارد سبب کاهش تغییر مکان بام ساختمان شده است. درصد کاهش پاسخ ساختمان سه طبقه، به علت کاربرد قاب میراگر جرمی تنظیم شده پشت بام، بسیار چشمگیر است. کاربرد RDF در این ساختمان سبب کاهش ۶۶ درصدی تغییر مکان غیرخطی بام تحت زلزله امپریال‌ولی شده است. کاربرد یک قاب خمشی پایدار و نرم در بام ساختمان سبب افزایش پرپود آن شده و پاسخ لرزه‌ای ساختمان به همین دلیل کاهش یافته است؛ به عبارت دیگر این سیستم بیشتر از طریق کاهش میزان تقاضای

ورودی باعث کاهش پاسخ سازه‌ها می‌گردد (مشابه جداسازهای لرزه‌ای). زیرا شکل طیف‌های



شکل (۸): تغییرمکان غیرخطی مدل سه طبقه واقع در حوزه نزدیک در دو حالت با و بدون RDF

پریود پالس باشد، سبب کاهش پاسخ سازه خواهد شد. مقایسه نتایج خطی و غیرخطی نشان می‌دهد که درصد تغییرات پاسخ در حالت غیرخطی تا اندازه‌ای مستقل از حالت خطی است. این موضوع با توجه به اینکه در حالت غیرخطی پریود ساختمان و RDF به صورت لحظه‌ای با زمان تغییر می‌کند، منطقی به نظر می‌رسد. با وجود این، در صورتی که RDF سبب کاهش پاسخ خطی ساختمان شود، اغلب منجر به کاهش پاسخ لرزه‌ای غیرخطی آن نیز خواهد شد؛ بنابراین می‌توان با اطمینان قابل قبولی، از نتایج تحلیل خطی برای طراحی قاب میراگر جرمی تنظیم شده استفاده کرد. در جداول (۱۳) تا (۱۶) درصد تغییرات به وجود آمده در حداکثر نیروی محوری بادبندها به علت کاربرد RDF آورده شده است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهند که RDF علاوه بر تغییرمکان، سبب کاهش تقاضای نیروی اعضای باربر جانبی نیز می‌شود. استفاده از این سیستم سبب کاهش ۵۵ درصدی حداکثر نیروی بادبندهای ساختمان سه طبقه در زلزله طیس شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که استفاده از RDF در کاهش تغییرمکان در مقایسه با نیروی محوری بادبندها مؤثرتر بوده است. استفاده از این سیستم سبب کاهش

پاسخ در زلزله‌های مختلف، همان‌طور که در شکل (۷) نیز مشاهده می‌شود، گویای این واقعیت است که مقادیر طیف پاسخ در بیشتر موارد با افزایش پریود ساختمان کاهش می‌یابد؛ از این رو چنان‌که نتایج نشان می‌دهند، کارایی این سیستم با افزایش ارتفاع ساختمان کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که با طراحی مناسب خرپشته‌های ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه می‌توان ایمنی لرزه‌ای آنها را با صرف هزینه‌ای ناچیز به مقدار قابل توجهی بهبود بخشید.

نتایج ارائه شده در جداول (۹) تا (۱۲) همچنین نشان می‌دهند در صورتی که در طراحی RDF، فاصله ساختمان تا چشمه لرزه‌ها مورد نظر قرارگیرد، کارایی این سیستم تا حدودی مستقل از فاصله ساختمان تا چشمه‌های لرزه‌ها خواهد بود. تفاوت بارز زلزله‌های حوزه نزدیک با حوزه دور، وقوع یک پالس پریود بلند در تاریخچه زمانی سرعت و جابجایی این زلزله‌هاست. مطابق اظهار نظر Tothong و Cornell [۱۹]، سازه‌های با نسبت  $T/T_p \leq 0.5$  (که  $T$  پریود سازه و  $T_p$  پریود پالس است) در معرض آسیب‌های بسیار شدیدتری در حوزه نزدیک قرار دارند؛ بنابراین در صورتی که بتوان پریود سازه را از این محدوده دور نمود، تقاضای لرزه‌ای به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا خواهد کرد. استفاده از قاب خمشی نرم و پایدار در بام مدل‌های واقع در حوزه نزدیک (مدل‌های E, D و F) سبب شده که پریود سازه افزایش و از محدوده  $T/T_p \leq 0.5$  دور شود. در نتیجه پاسخ مدل‌ها کاهش پیدا کرده است؛ بنابراین در صورتیکه RDF بر اساس طیف ویژه ساختگاه مناسبی طراحی شود که با توجه به ماهیت پالس مانند زلزله‌های حوزه نزدیک تعیین شده است، به نحوی که بیانگر



پریتا	-۲۷/۱	-۵/۱	-۶/۱
نورثریج	-۴۳/۱	-۱۲/۱	۱۷

جدول ۱۲- در صد تغییرات تغییر مکان بام ساختمانهای واقع در حوزة دور (تحلیل غیرخطی)

شتاب نگاشت	۳ طبقه	۵ طبقه	۱۰ طبقه
امپریال ولی	-۶۵/۵	۰/۸	-۷/۸
لوما پریتا	-۲۶/۵	-۲۸/۱	-۷/۷
نورثریج	-۱۷/۶	-۱۵/۷	۱۵/۷

۶۵، ۲۷ و ۱۸ در صدی تغییر مکان ساختمان سه طبقه تحت شتابنگاشت‌های امپریال ولی، لوما پریتا و نورثریج شده است. در حالی که مقادیر متناظر کاهش در نیروی محوری بادبندها به ترتیب ۰،۷ و ۹ درصد است.

همان‌طور که مشاهده شد، استفاده از RDF در اکثر موارد بررسی شده در این پژوهش سبب کاهش پاسخ لرزه‌ای

جدول ۱۳- در صد تغییرات حداکثر نیروی محوری بادبندها در ساختمانهای واقع در حوزة نزدیک (تحلیل خطی)

شتاب نگاشت	۳ طبقه	۵ طبقه	۱۰ طبقه
بم	-۷/۳	-۸/۰	-۷/۸
طیس	-۱۳/۶	-۱۶/۲	-۶/۲
نورثریج	-۱۹/۶	۲/۶	-۴/۲

جدول ۱۴- در صد تغییرات حداکثر نیروی محوری بادبندها در ساختمانهای واقع در حوزة نزدیک (تحلیل غیرخطی)

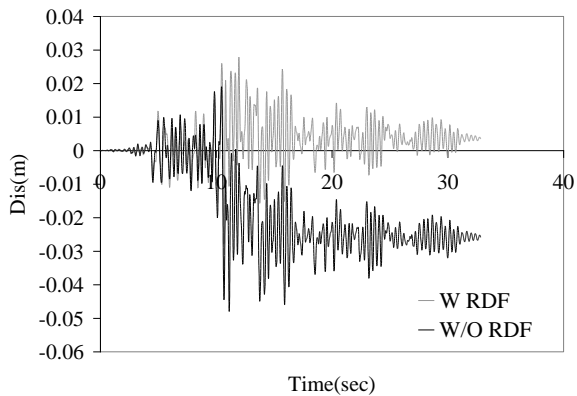
شتاب نگاشت	۳ طبقه	۵ طبقه	۱۰ طبقه
بم	-۱۴/۶	-۱/۳	-۰/۴۴
طیس	-۵۵/۳	۰/۶	-۶/۳
نورثریج	-۳/۷	-۱/۸	-۲/۰

جدول ۱۵- در صد تغییرات حداکثر نیروی محوری بادبندها در ساختمانهای واقع در حوزة دور (تحلیل خطی)

شتاب نگاشت	۳ طبقه	۵ طبقه	۱۰ طبقه
امپریال ولی	-۱۵/۱	-۱/۵	-۶/۸
لوما پریتا	-۲۴/۶	-۱۰/۰	-۳/۷
نورثریج	-۲۳/۲	-۴/۴	-۲۲/۸

جدول ۱۶- در صد تغییرات حداکثر نیروی محوری بادبندها در ساختمانهای واقع در حوزة دور (تحلیل غیرخطی)

شتاب نگاشت	۳ طبقه	۵ طبقه	۱۰ طبقه
امپریال ولی	-۷/۳	-۵/۱	-۱۹/۸



شکل (۹): تغییر مکان غیرخطی بام مدل سه طبقه واقع در حوزة نزدیک در دو حالت با و بدون RDF تحت شتاب نگاشت طیس

جدول (۸): پیروید اساسی ساختمان‌ها در دو حالت با و بدون RDF

مدل	RDF بدون	RDF با	تغییرات درصد
A	۰/۳۶	-۰/۶۲	۷۰/۶
B	۰/۵۳	-۰/۷۸	۴۹/۹
C	۰/۹۸	۱/۵۰	۵۳/۳
D	۰/۳۶	-۰/۴۹	۳۶/۷
E	۰/۵۵	-۰/۶۸	۲۵/۱
F	۱/۱۳	۱/۴۸	۳۱/۸

جدول (۹): در صد تغییرات تغییر مکان بام ساختمان‌های واقع در حوزة نزدیک (تحلیل خطی)

شتاب نگاشت	۳ طبقه	۵ طبقه	۱۰ طبقه
بم	-۵/۰۶	-۳/۶	-۱۳/۱
طیس	-۱۶/۷۵	-۲۵/۱	۰/۹
نورثریج	-۲۳/۹۹	-۲۵/۵	-۸/۶

جدول ۱۰- در صد تغییرات تغییر مکان بام ساختمانهای واقع در حوزة نزدیک (تحلیل غیرخطی)

شتاب نگاشت	۳ طبقه	۵ طبقه	۱۰ طبقه
بم	-۲۲/۵۸	-۳/۵	-۷/۰
طیس	-۴۱/۸۷	-۱۱/۴	-۹/۸
نورثریج	-۵۴/۹	-۲۸/۷	-۵/۵

جدول ۱۱- در صد تغییرات تغییر مکان بام ساختمانهای واقع در حوزة دور (تحلیل خطی)

شتاب نگاشت	۳ طبقه	۵ طبقه	۱۰ طبقه
امپریال ولی	۹	۲	/۹
ولی	-۱۸/۱	-۱۲/۱	-۲۵
لوما	۸	۳	/۶

لوما پریتا	-۵/۱	-۴۱/۲	-۵/۱
نورثریچ	-۰/۰۹	-۱۱/۶	-۸/۸

مدل‌های بررسی شده در این تحقیق شده است. کارایی RDF در ساختمان‌های کوتاه مرتبه قابل توجه است. کاربرد RDF در ساختمان سه طبقه بررسی شده در این پژوهش سبب کاهش ۶۶ درصدی تغییر مکان غیرخطی بام و کاهش ۷ درصدی حداکثر نیروی محوری بادبندها تحت زلزله امپریال‌ولی شده است.

اگرچه نتایج نشان‌دهنده وقوع کاهش در پاسخ لرزه‌ای اکثر مدلها است، امکان تشدید پاسخ لرزه‌ای ساختمان تحت شتاب‌نگاشت‌های خاص وجود دارد. با این حال RDF سبب کاهش پاسخ لرزه‌ای کل ساختمان تحت اثر گروه شتاب‌نگاشت‌های مشخصه مشابه می‌شود؛ از این رو RDF می‌تواند به عنوان یک روش بسیار مناسب برای کاهش پاسخ لرزه‌ای ساختمان تحت اثر شتاب‌نگاشت مشخصه ساختگاه به کار برده شود.

در این مطالعه اثر ارتفاع ساختمان و فاصله از گسل بر کارایی RDF مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند در صورتی که در طراحی RDF از شتاب‌نگاشت مشخصه مناسبی استفاده شود، می‌توان از این سیستم برای بهبود رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های واقع در حوزه نزدیک و دور به طور مشابه بهره گرفت.

بررسی‌های انجام شده در این پژوهش همچنین نشان می‌دهند، در مواردی که RDF سبب کاهش پاسخ لرزه‌ای خطی ساختمان شود، معمولاً منجر به کاهش پاسخ لرزه‌ای غیرخطی آن نیز خواهد شد؛ از این رو می‌توان با اطمینان قابل قبولی از نتایج تحلیل خطی برای طراحی RDF استفاده کرد.

## ۸- مراجع

- [۱] Engineering News Record, *Tuned mass dampers steady sway of sky scrapers in wind*, Aug. 18, 1977.
- [۲] Kitamura H., Fujita T., Teramoto T. and Kihara H., *Design and analysis of a tower structure with a tuned mass damper*, Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, Proceedings, VIII, 1988, 415-420.
- [۳] Frahm H., *Devise for damping vibrations of bodies*, U.S. Patent No. 989958, Oct. 30, 1909.
- [۴] Kayina AM, Veneziano D., Biggs JM., *Seismic effectiveness of tuned mass dampers*, *Journal of the structural division (ASCE)* 1981; 107:1465-1484.
- [۵] Sladek JR, Klingner RE., *Effect of tuned mass dampers on seismic response*, *Journal of the structural Engineering (ASCE)* 1983; 109:2004-2009.
- [۶] Brock JE., *A note on damper vibration absorber*, *Journal of applied mechanics (ASME)* 1946; 13: A-284.
- [۷] Den Hartog JP., *Mechanical Vibrations* (4<sup>th</sup> edn). McGraw-Hill: New York, 1956.
- [۸] Wong K. K. F. and Chiee Y. L., *Energy Dissipation of tuned mass dampers during earthquake excitations*,

ساختمان‌ها شده است؛ اما از آنجا که برای هر مدل تحت تمام شتاب‌نگاشت‌ها از یک نوع RDF استفاده شده، امکان تشدید پاسخ بیشینه در بعضی موارد وجود دارد. چنان‌که در سه مورد مورد از موارد بررسی شده در این تحقیق، پاسخ غیرخطی افزایش یافته است که البته میزان افزایش بیشینه پاسخ در دو مورد آن (تغییر مکان غیرخطی ساختمان پنج طبقه تحت شتاب‌نگاشت امپریال‌ولی و حداکثر نیروی محوری بادبندهای ساختمان پنج طبقه تحت شتاب‌نگاشت طبس) بسیار ناچیز است. با وجود این می‌توان طرح RDF را به گونه‌ای اصلاح کرد که مقادیر بیشینه پاسخ در این موارد خاص نیز کاهش یابند. آنچه مسلم است برای یک ساختمان مشخص، نمی‌توان یک RDF واحد را به گونه‌ای طراحی کرد که سبب کاهش پاسخ لرزه‌ای ساختمان تحت تمام حرکات ممکن زمین شود. خوشبختانه از آنجا که شتاب‌نگاشت‌ها به شدت وابسته به نوع خاک و فاصله از منابع لرزه‌زا هستند، گستره شتاب‌نگاشت‌هایی که متناظر با حرکات طراحی مشخصه ساختگاه باشند محدود است؛ از این رو در صورتی که مهندس طراح از آگاهی کافی در مورد شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه و مشخصه‌های شتاب‌نگاشت‌های مناسب برای ساختگاه، برخوردار باشد، طراحی یک RDF کارا و پایدار برای ساختمان امکان‌پذیر خواهد بود.

تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی مشخصه ساختگاه، مؤثرترین روش طراحی RDF برای سازه‌های موجود یا سازه‌های جدید است [۱۴]. بررسی‌های ژئوتکنیکی به همراه مطالعات مبتنی بر احتمال حرکات زمین می‌تواند برای تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی مشخصه ساختگاه مورد استفاده قرارگیرد. روشی که در این پژوهش از آن استفاده شد، نیازمند تحلیل تاریخچه زمانی به منظور ارزیابی پایداری RDF است؛ از این رو استفاده از شتاب‌نگاشت مشخصه‌ای که مناسب ساختگاه باشد، علاوه بر اینکه زمینه تحلیل پایداری RDF را فراهم می‌سازد، می‌تواند در طراحی یک RDF مؤثر برای سازه بسیار مفید واقع شود.

## ۷- نتیجه گیری

بر اساس نتایج تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش، استفاده از جرم و سازه خریشته ساختمان به صورت RDF می‌تواند به عنوان روشی مؤثر برای کاهش پاسخ لرزه‌ای ساختمان استفاده شود. تغییر زمان تناوب اصلی ساختمان به علت کاربرد RDF سبب کاهش شتاب و تغییر مکان اغلب



- Cohen JM. , *Cladding Design: whose responsibility?* , Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE) 1991; 5(3):208-217.
- Cornell, C. A, *Hazard analysis, ground motions, and probabilistic assessment for PBSB*, Proceedings Inter. Workshop on Performance Based Design, Bled, Slovenia, June. 2004.
- دستورالعمل بهسازی ساختمانهای موجود، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، خرداد ۱۳۸۱.
- استاندارد ۲۸۰۰ ایران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ویرایش سوم، ۱۳۸۴.
- Tothong, P., and Luco, N., *Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics: (In press in the special issue: Seismic Reliability Analysis of Structures), 2007.
- [۱۵] Struct. Design Tall Spec. Build.,2004,13:105-121.
- [۹] Vilaverde R., *Roof isolation system to reduce seismic response of buildings: A preliminary assessment*, Earthquake Spectra, 1998, 14(3):521-532.
- [۱۰] Johnson J. G. , Reaveley L. D. and Pantelides C., *A rooftop tuned mass damper frame*, Earthquake Engng Struct. Dyn. , 2003, 32: 965-984.
- [۱۱] *International Conference of Building Officials, Uniform Building Code UBC-97*, Whittier, CA.
- [۱۲] *American Institute of Steel Construction, Manual of Steel Construction, ASD (9th edn )*, 1989.
- [۱۳] *American Institute of Steel Construction, Manual of Steel Construction, LRFD (2nd edn )*, 1994.
- [۱۴] FEMA, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Publication No. FEMA356, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2000.

