

## نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

### نسبت تغییرمکان غیرالاستیک سازه‌های دارای حرکت گهواره‌ای در زلزله‌های حوزه دور و نزدیک به گسل پالس گونه

نوید رهگذر<sup>۱</sup>، عبدالرضا سروقدمقدم<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

#### چکیده

سازه‌های مرکزگرا با حرکت گهواره‌ای توانایی کاهش آسیب ماندگار و تمرکز خسارت در میراگرهای تعویض‌پذیر را دارند. این مقاله به تعیین نسبت تغییرمکان غیرالاستیک سازه‌های مرکزگرا در معرض زلزله‌های حوزه دور از گسل و نزدیک به گسل پالس‌مانند می‌پردازد. بدین منظور نسبت تغییرمکان غیرالاستیک، یعنی نسبت حداکثر تغییرمکان غیرالاستیک به حداکثر تغییرمکان الاستیک، با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی محاسبه می‌گردد. همچنین تاثیر پارامترهای لرزه ای و مدل سازی بر پاسخ تغییرمکان غیرالاستیک سازه برگشت پذیر دارای حرکت گهواره‌ای ارزیابی می‌شود. نتایج مطالعه نشان می‌دهد، تاثیر پارامترهای دوره تناوب پالس زلزله، دوره تناوب غالب رکوردها، و پارامترهای مدلسازی (ضریب اصلاح پاسخ، سختی پس از تسلیم و نسبت انرژی اتلافی) بر نسبت تغییرمکان غیرالاستیک قابل ملاحظه است، اما پارامترهای دیگر نظیر فاصله سایت تا مرکز گسلش، بزرگای زلزله و نوع سایت تاثیر کمتری بر نتایج تحلیل دارد. در انتها با استفاده از رگرسیون دو مرحله ای نتایج مطالعه آماری، روابطی جدید برای برآورد طیف های با مقاومت ثابت مقیاس نشده (سازگار با آیین نامه) و مقیاس شده برای سیستم های مرکزگرا دارای حرکت گهواره‌ای در معرض زلزله های دور و نزدیک به گسل پالس گونه ارائه شده است.

کلمات کلیدی: سیستم برگشت پذیر دارای حرکت گهواره ای، نسبت تغییرمکان غیرالاستیک، زلزله‌های حوزه دور، زلزله‌های حوزه نزدیک پالس گونه، تحلیل دینامیکی غیر خطی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/JSCE.2017.77217.1070	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت	
doi: 10.22065/JSCE.2017.77217.1070	۱۳۹۷/۱۲/۲۸	۱۳۹۶/۰۶/۲۴	۱۳۹۶/۰۶/۲۴	۱۳۹۶/۰۵/۱۷	۱۳۹۵/۱۱/۱۹	
عبدالرضا سروقدمقدم			*نویسنده مسئول:			
moghadam@iiees.ac.ir			پست الکترونیکی:			

# Inelastic Displacement Ratio for Rocking Buildings Subjected to Far-Field and Near-Field Pulse-Like Ground Motions

Navid Rahgozar<sup>1</sup>, Abdolreza S. Moghadam<sup>2\*</sup>

1- PhD Student in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

## ABSTRACT

Self-centering rocking buildings are capable of reducing permanent damage and concentrating damage to replaceable energy dissipation devices. This paper aims to calculate inelastic displacement ratio for self centering rocking buildings under far field and near field pulse like ground motions. In this paper, the inelastic displacement ratio, i.e. the ratio of the maximum inelastic displacement to the maximum displacement of the elastic system, for self centering rocking systems are determined using nonlinear dynamic time history analysis. The effects of seismic and modeling parameters on the inelastic displacement demands of self-centering rocking buildings are also evaluated. Findings show that the effect of the pulse period of ground motions, predominant period of ground motions, and modelling parameters (i.e. response modification factor, hardening ratio, and energy dissipation ratio) on the inelastic displacement ratio are considerable, while influences of the other parameters such as distance to the fault site, ground motion magnitude, and the soil site are less on the analysis results. Finally, using a two-stage regression on the statistical results, new equations are proposed for estimation of the scaled and unscaled (code base) constant strength spectra of self-centering rocking buildings under far field and near field pulse like ground motions.

## ARTICLE INFO

Received: 07/02/2017

Revised: 08/08/2017

Accepted: 15/09/2017

## Keywords:

self-centering rocking system, inelastic displacement ratio, far-field ground motions, near-field ground motions, nonlinear dynamic analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017.77217.1070

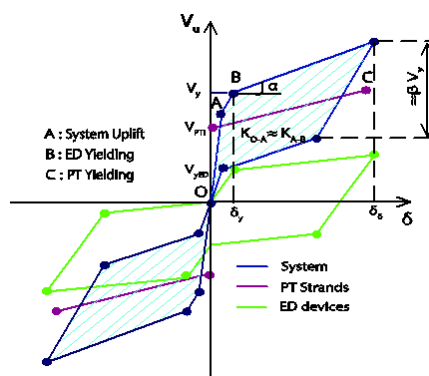
\*Corresponding author: Abdolreza S. Moghadam

Email address: moghadam@iiees.ac.ir

## ۱- مقدمه

در زلزله حوزه نزدیک انرژی زیادی بدلیل وجود یک پالس بزرگ در ابتدای تاریخچه‌ی پاسخ سرعت آزاد می‌گردد [۲،۱]. در نتیجه این موضوع، تقاضاهای لرزه‌ای قابل توجهی به سازه‌های نزدیک به گسل اعمال می‌گردد. در سازه‌های متعارف انرژی لرزه‌ای ورودی از طریق تغییرشکل غیرخطی المان‌ها اصلی سازه اتلاف می‌شود که گاهی منجر به ایجاد آسیب شدید در سازه می‌شود. در سال‌های اخیر سیستم‌های نوین برگشت‌پذیر معرفی شده‌اند که با ویژگی‌هایی نظیر برکنش و برگشت‌پذیری کنترل‌شده قابلیت تمرکز خسارت و کاهش آسیب لرزه‌ای را دارند. مفاهیم این نوع از سیستم‌ها برای اولین بار توسط هازنر [۳] معرفی شده است و در حال حاضر در انواع سازه‌های بتنی [۶،۴] و فولادی [۷-۹] و چوبی [۱۰] مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۱ منحنی رفتاری سیستم‌های برگشت‌پذیر را در معرض یک سیکل بارگذاری چرخه‌ای نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، رفتار این سیستم پرچمی شکل است که حاصل از ترکیب رفتار کابل‌های پس‌کشیده (PT) و میراگر (ED) قابل تعویض است. کابل‌ها نیروی بازگرداننده و میراگر قابلیت تمرکز خسارت را از طریق مکانیسم‌هایی نظیر اصطکاک [۱۱،۱۲]، تسلیم [۱۳،۱۴] و یا ویسکوزیته [۱۵] فراهم می‌آورد. مطابق شکل ۱، رفتار سیستم از سه شاخه اصلی تشکیل شده است. شاخه اول رفتار الاستیک خطی است که در زمان برکنش سیستم به انتهای خود می‌رسد (نقطه A) و در ادامه تا تسلیم میراگر ادامه پیدا می‌کند (نقطه B). تسلیم کابل شروع شاخه سخت‌شونده با نسبت  $\alpha$  است. مقادیر سختی اولیه (KOA) و سختی بعد از تسلیم (KAB) ناشی از کابل به یکدیگر نزدیک می‌باشد. در مرحله باربرداری، سیستم مرکزگرا از طریق چرخه‌های هیستریسیس، انرژی لرزه‌ای ورودی را مستهلک می‌کند. همانطور که شکل ۱ نشان می‌دهد، میزان اتلاف انرژی سیستم مرکزگرا ( $\beta$ ) برحسب نسبت مقدار تسلیم سیستم قابل تعریف است.

هدف اصلی از این مطالعه محاسبه نسبت تغییرمکان غیرالاستیک و طیف تغییرمکان با مقاومت ثابت برای سیستم‌های برگشت‌پذیر تحت زلزله‌های نزدیک به گسل پالس‌گونه است. بدین منظور، در بخش‌های بعدی این مقاله، ابتدا ادبیات فنی مرتبط با این پارامتر معرفی می‌شود. سپس سیستم‌های مورد مطالعه معرفی و با انجام تحلیل دینامیکی سیستم‌ها در معرض رکوردهای دور از گسل و نزدیک به گسل پالس‌مانند، نتایج از جنبه‌های مختلف ارزیابی می‌گردد. در انتها، براساس نتایج حاصل از مطالعات آماری، روابطی جدید برای تعیین طیف میانگین سیستم‌های برگشت‌پذیر استخراج می‌گردد.



شکل ۱: پاسخ چرخه‌ای ایده‌آل پرچمی شکل سیستم برگشت‌پذیر و اجزای آن

## ۲- نسبت تغییرمکان غیرالاستیک

در دستورالعمل‌های طراحی مبتنی بر تغییرمکان [۱۶]، برای تخمین تغییرمکان غیرالاستیک هدف سازه از ضریب  $C_1$  استفاده می‌شود. این ضریب یک رابطه تقریبی برای برآورد نسبت تغییرمکان غیرالاستیک با مقاومت ثابت  $R$  (CR) سیستم یک‌درجه آزادی با رفتار دوخطی است. ضریب مقاومت جانبی  $R$  برابر با نسبت سطح مقاومت نیاز ( $MS_d$ ) به مقاومت تسلیم سیستم ( $F_y$ ) است. نسبت  $C_1$  برابر با

نسبت تغییرمکان غیرالاستیک سیستم یک درجه آزادی با مقاومت ثابت  $R$  ( $\Delta_i$ ) به حداکثر تغییرمکان الاستیک طیفی ( $S_d$ ) سیستم یک درجه آزادی است [۱۷]:

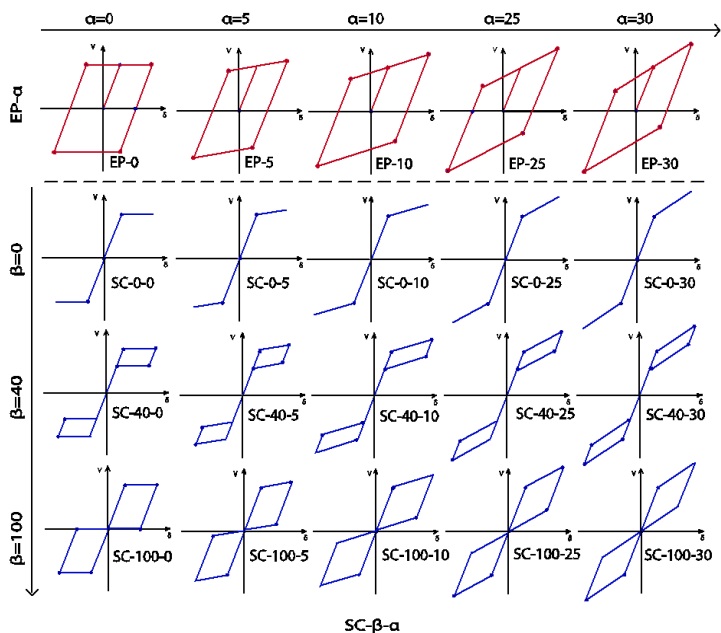
$$R = \frac{m.S_d}{F_y} \quad (1)$$

$$C_R = \frac{\Delta_i}{S_d} \quad (2)$$

در سال‌های اخیر مطالعه‌های محدودی برای تعیین  $C_R$  سیستم‌های مرکزگرا انجام شده است. کیرستوپولس و همکاران [۱۸] به مطالعه تاثیر پارامترهای موثر بر منحنی رفتاری و تغییرمکان با نسبت شکل‌پذیری ثابت سیستم یک درجه آزادی پرچم شکل پرداختند. سئو و ساسه [۱۹] تاثیر پارامترهای ضریب کاهش مقاومت، سخت‌شوندگی و ظرفیت اتلاف انرژی سیستم پرچمی شکل را تحت زلزله‌های دور از گسل بررسی کرد. تاثیر ضرایب اتلاف انرژی و کاهش مقاومت بر سیستم تا حدی برگشت‌پذیر پرچمی شکل نیز توسط اترتون همکاران [۲۰] مورد مطالعه قرار گرفت. در این مقاله به منظور گسترش مطالعات پیشین، به تعیین و ارائه معادلاتی برای نسبت  $C_R$  سیستم‌های مرکزگرا در معرض رکوردهای دور و نزدیک گسل می‌پردازد.

### ۳- مدل‌های رفتاری هیسترتیک مرکزگرای مورد مطالعه

رفتار هیسترتیک سیستم‌های مرکزگرا با استفاده از دو پارامتر نسبت سخت‌شدگی ( $\alpha$ ) و نسبت اتلاف انرژی ( $\beta$ ) بیان می‌شود (شکل ۱). در این مقاله سیستم‌های مرکزگرا با  $SC-\beta-\alpha$  و سیستم‌های دو خطی با  $EP-\alpha$  نام‌گذاری شده‌اند (شکل ۲). محدوده در نظر گرفته شده برای  $\alpha$  بین ۰ تا ۳۰ درصد و  $\beta$  بین ۰ تا ۱۰۰ درصد می‌باشد. مدل‌های مرکزگرا بدون ظرفیت اتلاف انرژی ( $\beta = 0$ ) مشخصه سیستم‌های بدون میراگر و مدل‌های رفتاری با حداکثر میرایی ( $\beta = 100\%$ ) مشابه با سیستم دوخطی دارای پینچینگ زیاد می‌باشد. برای هر یک از این منحنی‌های رفتاری، ۶۰ مدل یک درجه آزادی با دوره تناوب‌های ۰٫۱ تا ۳ ثانیه و نسبت مقاومت‌های ۲ تا ۷ در نرم افزار اپنسیز [۲۱] مدل شدند. برای مدلسازی رفتار پرچمی شکل سیستم‌های مرکزگرا از المان با طول صفر با مصالح SelfCentering و برای سیستم‌های متعارف از مصالح ElasticPP استفاده شده است.



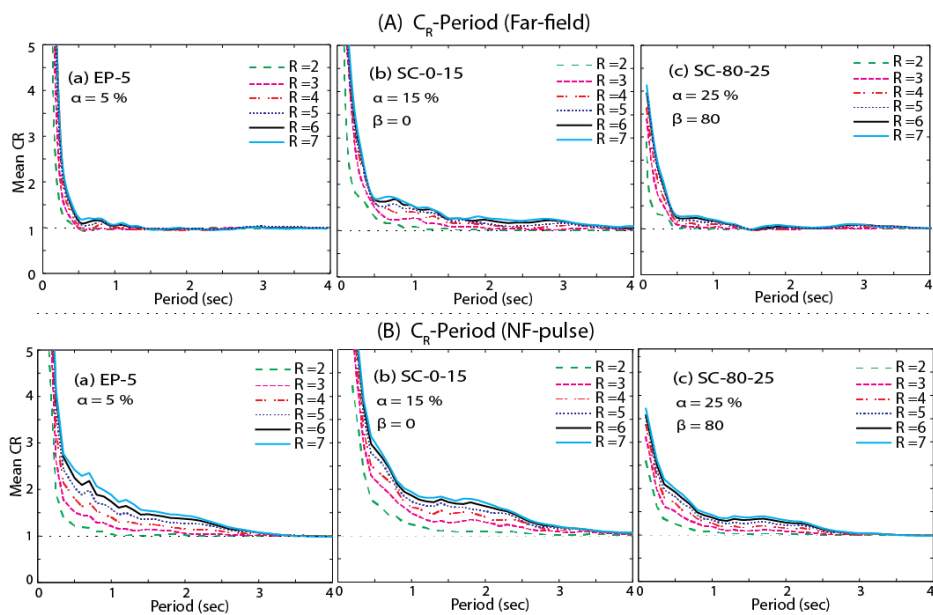
شکل ۲: منحنی نیرو تغییرمکان مدل‌های دوخطی و برگشت‌پذیر

#### ۴- تحلیل‌های دینامیکی و ارزیابی آماری نتایج

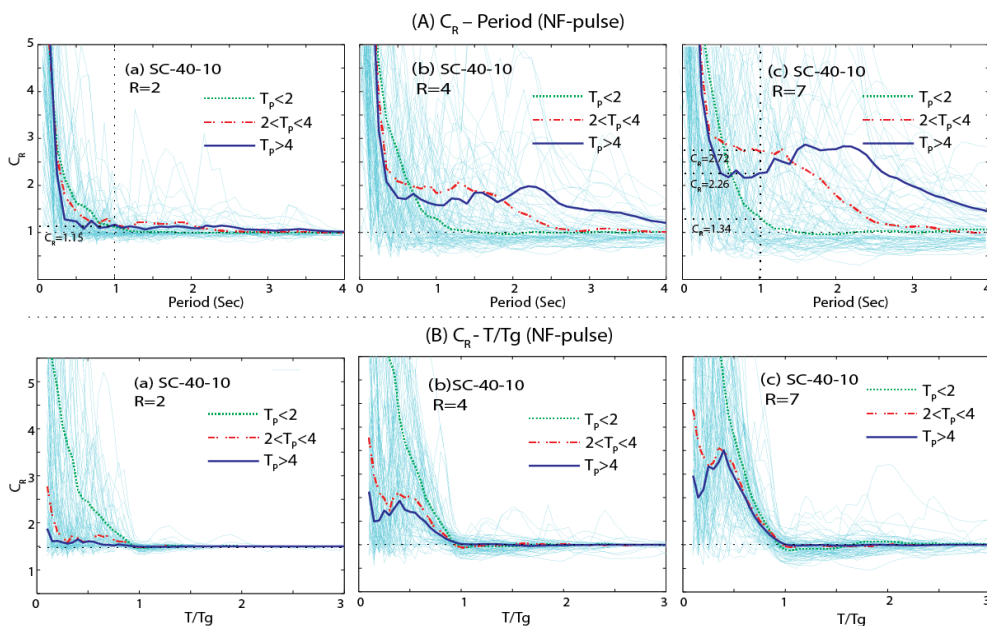
تحلیل‌های دینامیکی برای محاسبه نسبت  $C_R$  سیستم‌های مرکزگرا و دو خطی به ترتیب با استفاده از ۴۴ و ۹۱ رکورد دور از گسل و نزدیک به گسل پالس‌گونه به ترتیب برگرفته شده از FEMA P695 [۲۲] و مطالعه بیکر [۲] انجام می‌شود. رکوردهای دور از گسل به ترتیب دارای PGA,  $M_w$  و PGV بزرگتر از ۰٫۲g، ۶٫۵ و ۱۵ سانتی متر بر ثانیه می‌باشند. در مطالعه بیکر رکوردهای نزدیک گسل و دوره تناوب پالس آن‌ها با تحلیل موجک شناسایی شده است، که در آن دوره تناوب حاصل بزرگترین ضریب موجک بدست آمده از تبدیل موجک تاریخچه سرعت است. به منظور فرموله نمودن نسبت تغییرمکان غیرالاستیک،  $C_R$ ، برای سیستم‌های مرکزگرا و بررسی تاثیر پارامترهای لرزه‌ای و مدل‌سازی بر آن ۱۹۰۰۰۰۰ تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی انجام می‌شود. شکل ۳ مقایسه‌ای از طیف میانگین  $C_R$  مقیاس‌نشده برای سیستم‌های مرکزگرا و دو خطی در معرض زلزله‌های دور از گسل (شکل ۳-الف) و نزدیک گسل پالس‌مانند (شکل ۳-ب) را نشان می‌دهد. هر نقطه از این طیف میانگین نسبت تغییرمکان غیرالاستیک سیستم با مقاومت ثابت  $R$  می‌باشد. روند تغییر طیف‌ها نشان می‌دهد که نسبت تغییرمکان غیرالاستیک با تابع نمایی کاهش می‌یابد و با افزایش دوره تناوب به مقدار ۱ همگرا می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر  $C_R$  برای سیستم‌ها با دوره تناوب کوتاه به دوره ارتعاش سیستم بستگی دارد؛ لیکن در محدوده دوره تناوب بلند، مستقل از نوع زلزله، مقادیر  $C_R$  متناسب با تغییرمکان سیستم الاستیک متناظر تغییر می‌کند. از طرفی مقدار میانگین طیف‌های مقیاس‌نشده برای سیستم‌های الاستوپلاستیک و مرکزگرا با کاهش ضریب مقاومت کاهش می‌یابد که بیانگر کاهش حداکثر پاسخ جابه‌جایی غیرالاستیک سیستم با افزایش مقاومت جانبی است. علاوه بر این بدلیل ماهیت پالس‌گونه رکوردها نزدیک گسل، پراکندگی مقادیر در طیف‌های مقیاس‌نشده در معرض رکوردهای دور از گسل (شکل ۳-الف) کمتر از مقادیر متناظر در رکوردهای نزدیک گسل (شکل ۳-ب) می‌باشد.

#### ۴-۱- تاثیر ویژگی‌های لرزه‌ای بر نسبت تغییرمکان غیرالاستیک

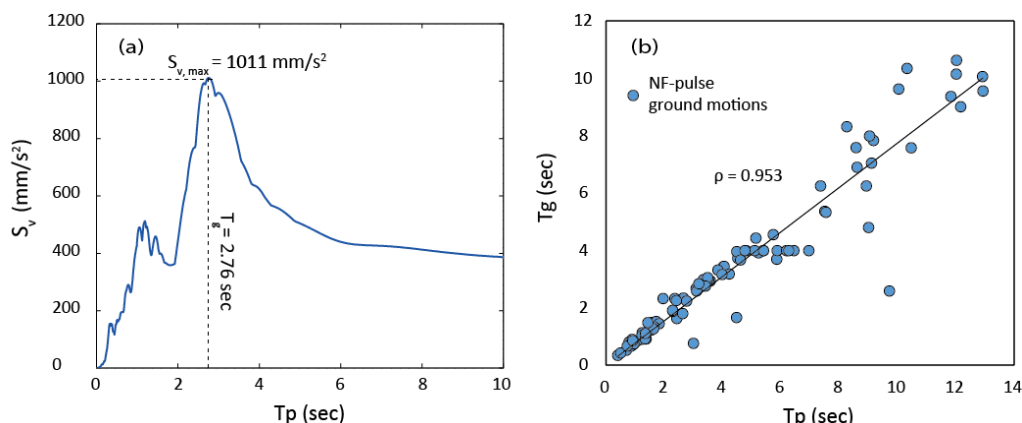
**تاثیر دوره تناوب پالس:** علوی و کراوینکلر [۲۳] نشان دادند که رفتار دینامیکی سازه‌های به شدت به دوره تناوب پالس سرعت ( $T_p$ ) وابسته است. دوره تناوب پالس مجموعه رکوردهای نزدیک گسل مورد مطالعه، محاسبه شده با روش تحلیل موجک، در محدوده ۰٫۴-۱۲٫۹ ثانیه قرار دارد. شکل ۴ مقایسه‌ای از تاثیر مقدار  $T_p$  بر طیف‌های مقیاس‌شده و نشده را برای سیستم‌های ۱۰-۴۰-SC دارای سه سطح مقاومت ۲، ۴ و ۷ را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه اثر دوره تناوب پالس، پاسخ سیستم‌ها در معرض ۹۱ رکورد پالس‌مانند همراه با پاسخ متوسط سیستم‌ها در معرض سه گروه از رکوردها با دوره تناوب  $T_p$  متفاوت (خطوط سبز، قرمز و آبی رنگ) رسم شده است. گروه اول شامل ۳۸ رکورد با  $T_p < 2s$  و گروه دوم دارای ۲۸ رکورد با  $2s < T_p < 4s$  و دیگری متشکل ۲۵ رکورد با  $T_p > 4s$  است. با توجه به شکل ۴-الف تاثیر محدوده  $T_p$  بر پراکندگی طیف‌های مقیاس‌نشده به‌ویژه بر میانگین پاسخ سیستم‌ها در معرض رکوردها با  $T_p > 2s$  قابل ملاحظه است. همچنین، پراکندگی نسبت تغییرمکان غیرالاستیک با افزایش مقدار مقاومت سیستم افزایش یافته است. به عنوان مثال، میانگین نسبت  $C_R$  برای سیستم ۱۰-۴۰-SC با نسبت مقاومت برابر ۷ و دوره تناوب ۱ ثانیه (شکل ۴-الف-III) به ترتیب برای سه مجموعه رکورد در نظر گرفته شده برابر با ۱٫۳۵، ۲٫۷۲ و ۲٫۲۶ است، در حالی‌که برای سیستم‌های مشابه با نسبت مقاومت برابر ۲ (شکل ۴-الف-I) حدود برابر با ۱٫۱۵ است. مشاهده دیگر، تشدید موضعی در نسبت تغییرمکان غیرالاستیک سیستم‌های مرکزگرا با مقاومت کم تحت رکوردهای نزدیک گسل است. به عنوان مثال، در طیف میانگین سیستم‌های ۱۰-۴۰-SC با نسبت مقاومت برابر ۷ و  $T_p > 4s$  (شکل ۴-الف-III)، به طور نسبی نسبت  $C_R$  در حدود دوره تناوب ۲ ثانیه دارای مقادیر بزرگی است. بنابراین، استفاده از طیف میانگین برای سیستم‌های مرکزگرا با مقاومت کم در معرض رکوردها با  $T_p < 2s$  بدلیل پراکندگی پاسخ در مقادیر طیف مقیاس‌نشده از قابلیت اعتماد کمتری نسبت به سیستم‌ها با مقاومت بالا تحت رکوردها با  $T_p > 2s$  برخوردار است. در نتیجه، تاثیر دوره تناوب پالس بر نسبت تغییرمکان غیرالاستیک طیف‌های مقیاس‌نشده سیستم‌های مرکزگرا قابل ملاحظه‌ای است.



شکل ۳: میانگین طیف‌های مقیاس‌نشده نسبت تغییر مکان غیرالاستیک،  $C_R$ ، برای سیستم‌های (I) EP-۵ و (II) SC-۰-۱۵ و (III) SC-۸۰-۲۵ در معرض رکوردهای (الف) دور از گسل و (ب) نزدیک گسل پالس ماند



شکل ۴: تاثیر بازه دوره تناوب پالس بر طیف میانگین  $C_R$  (الف) مقیاس‌نشده و (ب) مقیاس‌شده برای سیستم‌های SC-۴۰-۱۰ دارای مقاومت ۴.۲ و ۷



شکل ۵: (الف) دوره تناوب غالب ارتعاش،  $T_g$ ، زلزله ۱۹۹۹ حوزه نزدیک گسل چی-چی تایوان (ایستگاه TAP۰۰۳). (ب) همبستگی بین مقادیر  $T_p$  و  $T_g$  برای مجموعه رکوردهای مورد مطالعه

### طیف‌های مقیاس شده به دوره تناوب غالب طیف سرعت: همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، مقدار پراکندگی

رکورد به رکورد در طیف‌های مقیاس نشده سیستم مرکزگرا زیاد می‌باشد. رویز-گارسیا و میراندا نشان دادند که بهترین پارامتر برای کاهش مقدار پراکندگی رکورد به رکورد موجود در طیف  $C_R$ ، نرمالایز نمودن آن به دوره تناوب غالب زلزله‌ها ( $T_g$ ) است. این پارامتر برابر با دوره تناوب نظیر بیشترین مقدار سرعت طیفی سیستم الاستیک یک درجه آزادی با میرایی ۵ درصد است. در مثال نشان داده شده در شکل ۵-الف دوره تناوب غالب ارتعاش،  $T_g$ ، برای زلزله ۱۹۹۹ چی-چی تایوان (ایستگاه TAP۰۰۳) برابر با ۲٫۷۶ است. مقدار  $T_g$  برای زلزله‌های نزدیک گسل پالس‌گونه و دور از گسل مورد مطالعه به ترتیب در محدوده ۰٫۳۵-۱۰٫۶۳ و ۰٫۴۶-۹٫۲۸ قرار دارد. مطالعه محققان نشان می‌دهد که دوره تناوب غالب ارتعاش،  $T_g$ ، زلزله‌های نزدیک گسل با مقادیر دوره تناوب پالس همبسته است. این نتیجه برای مجموعه رکوردهای در نظر گرفته شده نیز برقرار است (شکل ۵-ب). همانطور که در شکل ۵-ب مشاهده می‌شود، ارتباطی خطی بین مقادیر  $T_p$  و  $T_g$  بویژه برای دوره تناوب‌های بزرگتر از ۷ ثانیه وجود دارد. نسبت  $T/T_g$  به جای دوره تناوب اصلی ارتعاش برای کاهش پراکندگی رکورد به رکورد پاسخ سیستم‌های یک درجه آزادی مختلف در معرض رکوردهای نزدیک گسل در تعدادی از تحقیقات اخیر (به عنوان مثال [۲۴]) استفاده شده است. شکل ۴-ب متوسط طیف مقیاس شده سیستم SC-۴-۱۰-۱۰ در معرض سه مجموعه رکورد نزدیک گسل در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با مقیاس نمودن به دوره تناوب غالب  $T_g$ ، تاثیر محدوده دوره تناوب پالس بر طیف مقیاس شده (شکل ۴-ب) سیستم مرکزگرا نسبت به طیف‌های مقیاس نشده  $C_R$  (شکل ۴-الف) به ویژه برای سیستم‌های با دوره تناوب متوسط و بلند کاهش یافته است. این موضوع را می‌توان به کاهش پراکندگی رکورد به رکورد در طیف‌های مقیاس شده نسبت داد.

### تاثیر بزرگای و فاصله مرکز تا ساختمان زلزله: ویژگی‌های لرزه‌ای از جمله فاصله مرکز زلزله تا ساختمان و هندسه چشمه بر

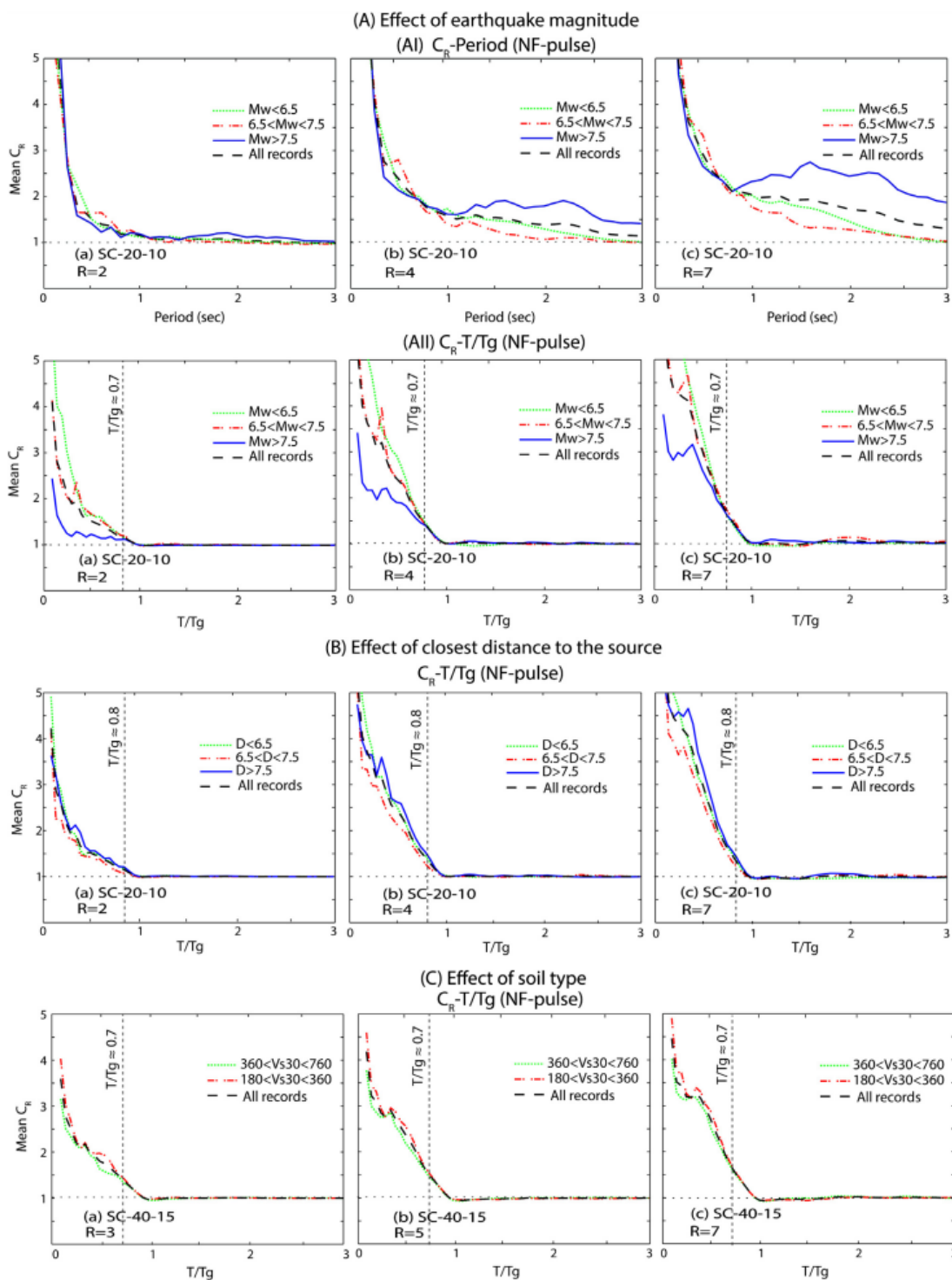
مشخصات پالس موجود در تاریخچه پاسخ سرعت زلزله‌های نزدیک گسل موثر است. مقادیر فاصله رومرکزی (Epi. D)، نزدیکترین فاصله تا صفحه گسلش (Clst. D) و بزرگای گشتاوری ( $M_w$ ) مجموعه رکوردهای نزدیک گسل مورد مطالعه به ترتیب در محدوده ۰٫۴۷-۱۵۱٫۶۵ کیلومتر، ۰٫۰۷-۱۰۲٫۳۹ کیلومتر و ۴-۷٫۶ قرار دارند. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، به منظور بررسی تاثیر این پارامترها بر نسبت تغییرمکان غیرالاستیک سیستم‌های مرکزگرا، طیف‌ها برای سه مجموعه رکوردهای نزدیک گسل پالس‌گونه (خطوط رنگی) همراه با متوسط طیف تمام زلزله‌ها (خطوط خط چین سیاه) با یکدیگر مقایسه شدند. شکل ۶-الف تأثیر محدوده مقادیر بزرگا ( $M_w < 6.5$ )،  $6.5 < M_w < 7.5$  و  $M_w > 7.5$ ) را بر روی طیف‌های مقیاس نشده (شکل ۶-الف-I) و مقیاس شده (شکل ۶-الف-II) سیستم‌های SC-۲۰-۱۰ با ضرایب کاهش مقاومت ۲، ۴ و ۷ نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۶-الف-I مشاهده می‌شود، پارامتر بزرگا به طور مستقیم بر مقادیر و شکل طیف پاسخ سیستم‌ها، بویژه بر سیستم‌ها با مقاوت بزرگتر ( $R = 2$  و  $4$ )، موثر است؛ لیکن تاثیر آن بر طیف‌های مقیاس شده به ویژه

برای  $T/T_g > 0.7$  قابل چشم پوشی است (شکل ۶-الف-II). بنابراین می توان نتیجه گرفت که مقیاس نمودن طیف های سیستم های مرکزگرا به  $T_g$  به طور غیرمستقیم وابستگی نسبت تغییر مکان غیرالاستیک سیستم را به پارامتر  $M_w$  کاهش می دهد. این موضوع ارتباط شدید بین بزرگای گشتاوری با دوره تناوب پالس در زلزله های حوزه نزدیک پالس گونه را تایید می کند [۲۵]. به طور مشابه، تاثیر کم پارامتر نزدیکترین فاصله تا صفحه گسلش (Clst. D) بر طیف های مقیاس شده در شکل ۶-ب قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می شود، میانگین طیف های سیستم های مرکزگرا در معرض رکوردها با نزدیکترین فاصله تا ساختگاه بسیار مشابه با میانگین طیف ها است. تاثیر کم بزرگای و فاصله زلزله بر طیف های مقیاس شده به  $T_g$  و یا  $T_p$  برای سیستم های مقاوم جانبی دیگر نیز توسط برخی از محققان [۲۶] گزارش شده است.

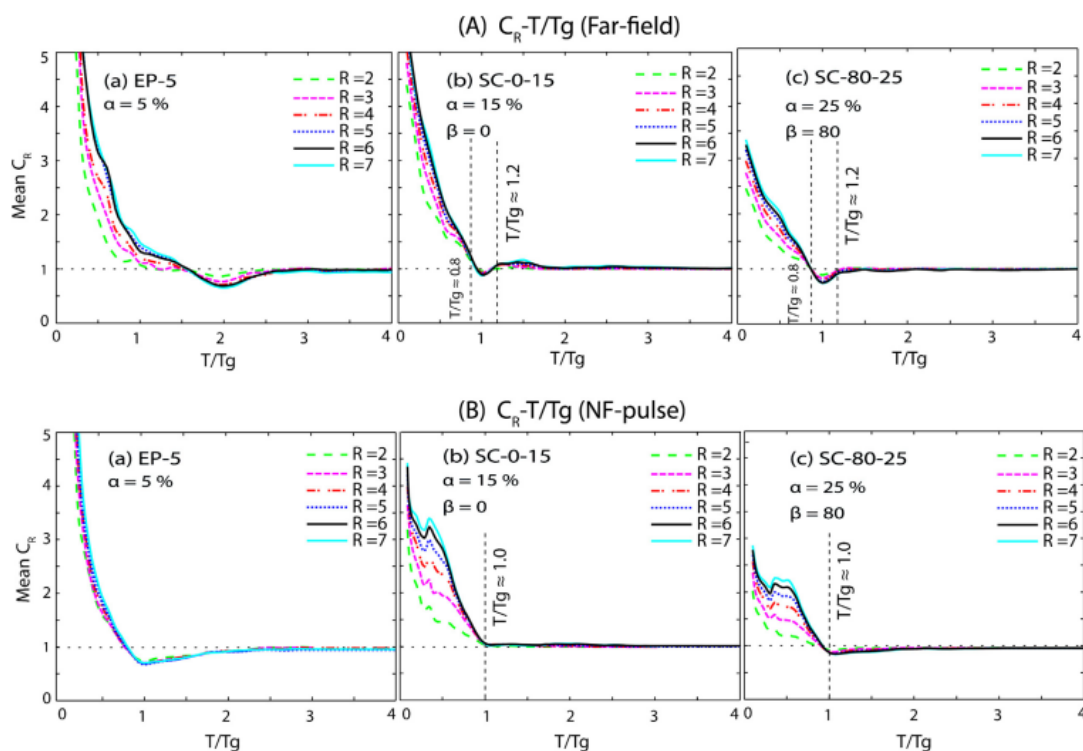
**تاثیر محل ساختگاه زلزله:** در این بخش تاثیر نوع محل ساختگاه، به عنوان یکی دیگر از پارامترهای کلیدی موثر در زمین لرزه، بر طیف های مقیاس شده بررسی می شود (شکل ۶-ج). متوسط زمانی سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متر ( $V_{s30}$ ) معمولاً برای تعیین نوع خاک ساختگاه استفاده می شود [۲۷]. بر حسب مقادیر  $V_{s30}$ ، ساختگاه رکوردهای نزدیک گسل مورد مطالعه به گروه های 'C' ( $360 < V_{s30} < 760$ ) و 'D' ( $180 < V_{s30} < 360$ ) متعلق است. شکل ۶-ج تاثیر محل ساختگاه رکوردهای نزدیک گسل را بر طیف سیستم های ۱۵-۴۰-SC با نسبت مقاومت برابر ۳، ۵ و ۷ نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، تاثیر این گروه ها بر طیف های مقیاس شده عملاً قابل اغماض است. همچنین، طیف مجموعه رکوردهای طبقه بندی شده از روندی مشابه با طیف میانگین تمام رکوردها پیروی می کند و تنها مقداری تفاوت در نسبت های کم  $T/T_g < 0.7$  مشاهده می شود.

**تاثیر نوع زلزله:** شکل های ۳ و ۸ نمونه هایی از طیف های مقیاس شده بری سیستم های ۱۵-۰-SC و ۸۰-۲۵-SC و EP-۵ در معرض رکوردهای دور از گسل (شکل های ۳-الف و ۸-الف) و نزدیک گسل پالس مانند (شکل های ۳-ب و ۸-ب) را نشان می دهد. برخلاف میانگین طیف های مقیاس نشده (شکل ۳)، نوسان های موضعی در شکل طیف های مقیاس نشده برای هر دو نوع زلزله در نظر گرفته شده مشاهده می شود. به طور مثال، شکل طیفی طیف های مقیاس شده سیستم های ۱۵-۰-SC تحت زلزله های دور از گسل در محدوده  $0.8 < T/T_g < 1.2$  (شکل ۸-الف-I) محدب است و در محدوده  $T/T_g < 1$  (شکل ۸-الف-II) مقعر است. علاوه بر این، شکل ۷ نشان می دهد که پراکندگی در پاسخ جابجایی غیرخطی سیستم های مرکزگرا تحت رکوردهای دور از گسل نسبت به رکوردهای نزدیک گسل کمتر است. بنابراین، روال کلی کاهشی در طیف های مقیاس نشده مدل های مرکزگرا در معرض رکوردهای نزدیک گسل به طور قابل ملاحظه ای نسبت به پاسخ سیستم ها تحت رکوردهای دور از گسل متفاوت است. به منظور مقایسه اثر نوع زلزله بر متوسط طیف های مقیاس شده و مقیاس نشده، متوسط طیف های مقیاس نشده (شکل ۳) و مقیاس شده (شکل ۷) برای سیستم های ۱۵-۰-SC و ۸۰-۲۵-SC و EP-۵ با ضرایب کاهش مقاومت ۲ تا ۷ در شکل ۸ ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می شود، برخلاف طیف های مقیاس شده سیستم EP-۵ (شکل ۸-ب-I)، نسبت  $C_R$  برای طیف های مقیاس نشده برای هر دو مدل الاستوپلاستیک و مرکزگرا تحت زلزله های حوزه نزدیک گسل پالس گونه (شکل ۹-الف)، بدلیل دوره تناوب پالس سرعت، از رکوردهای دور از گسل به ویژه در محدوده دوره تناوب های کم و متوسط بیشتر است. همانطور که در شکل های ۸-ب-II و ۸-ج-II مشاهده می شود، اگرچه شکل طیفی متوسط طیف های مقیاس شده برای سیستم های مرکزگرا تحت رکوردهای دور و نزدیک گسل تا حدی متفاوت هستند، بدلیل مقیاس نمودن طیف  $C_R$  به دوره تناوب غالب ارتعاش، نسبت  $C_R$  آن ها بدون توجه به نوع زلزله، بویژه در محدوده  $T/T_g < 0.7$  مشابه یکدیگر هستند.

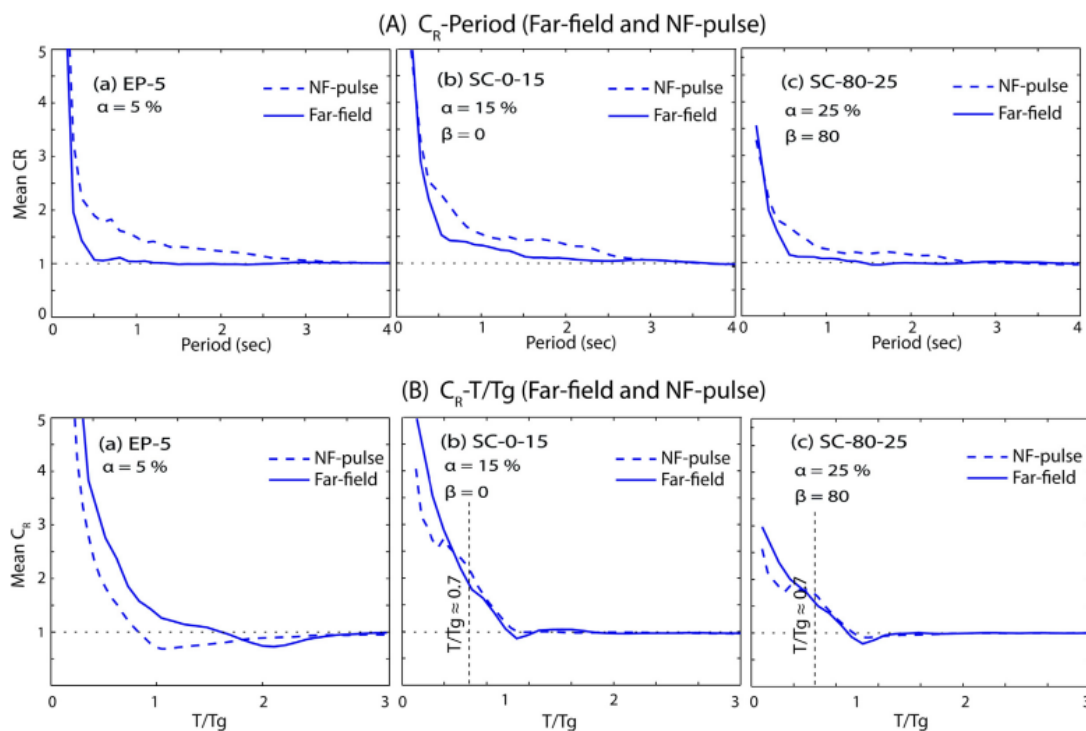




شکل ۶: تأثیر (الف) محدوده بزرگای زلزله، (ب) فاصله سایت از محل گسلش و (ج) نوع ساختمان بر میانه طیف مقیاس شده



شکل ۷: تأثیر نوع زلزله بر طیف مقیاس شده سیستم‌های (I) EP-۵، (II) SC-۰-۱۵ و (III) SC-۸۰-۲۵ با مقاومت‌های ۲ تا ۷ در معرض زلزله‌های (الف) دور از گسل و (ب) نزدیکی گسل پالس‌گونه

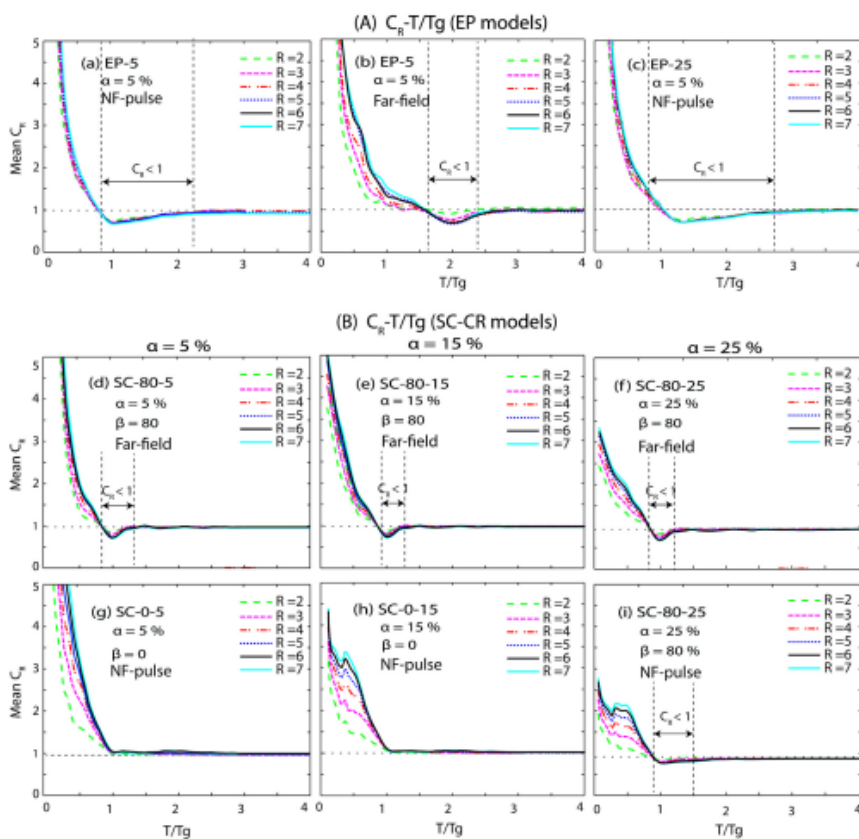


شکل ۸: تأثیر نوع زلزله بر متوسط (الف) طیف‌های مقیاس نشده و (ب) مقیاس شده سیستم‌های (I) EP-۵، (II) SC-۰-۱۵ و (III) SC-۸۰-۲۵ (متوسط نسبت CR برای سیستم‌ها با مقاومت‌های ۲ تا ۷)

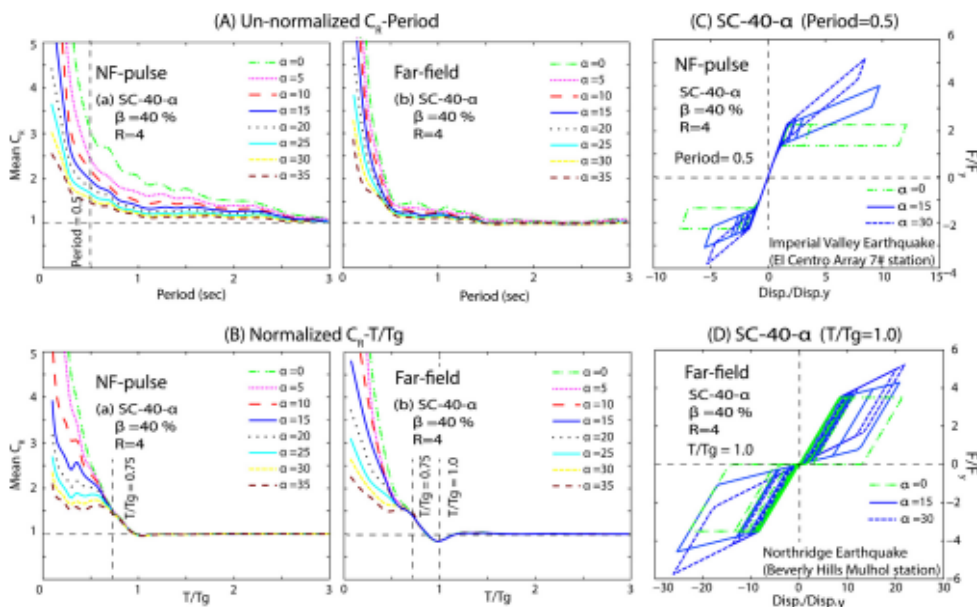
## ۴-۲- تاثیر مشخصات مدل سازی

ضرایب کاهش مقاومت ( $R$ )، سخت‌شوندگی پس از تسلیم ( $\alpha$ ) و اتلاف انرژی ( $\beta$ ) پارامترهای کلیدی برای مدل‌سازی سیستم‌های مرکزگرا هستند. تاثیر این پارامترها بر روی نمونه‌های از طیف‌های مقیاس‌شده برای سیستم‌های الاستوپلاستیک (EP-۵ و EP-۲۵) و مرکزگرا (SC-۰-۵ و SC-۸۰-۱۵ و SC-۸۰-۲۵) در معرض زلزله‌های دور و نزدیک گسل در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، به طور کلی طیف‌های مقیاس‌شده برای هر دو نوع سیستم الاستوپلاستیک و مرکزگرا در نسبت‌های کم و متوسط  $T/T_g$  به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد؛ لیکن برای مقادیر بزرگ  $T/T_g$  با کاهش مقدار نسبت مقاومت به مقدار ثابت ۱ همگرا می‌شود. برای مدل‌های الاستوپلاستیک، شکل ۹-الف نشان می‌دهد که شکل طیفی طیف‌های مقیاس‌نشده، برای ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای مدل‌سازی ( $\alpha$ ،  $\beta$  و  $R$ )، به سه محدوده طیفی مجزا قابل تفکیک است. برای مثال، طیف سیستم EP-۵ در معرض رکوردهای نزدیک گسل (شکل ۹-الف-I) به سه بازه طیفی  $0.8 < T/T_g < 2.2$ ،  $2.2 < T/T_g < 8$  و  $T/T_g > 8$  تقسیم شده است، که در آن مقدار طیف در نسبت‌های بزرگ  $T/T_g$  به ۱ همگرا می‌شود و برای مقادیر کم  $T/T_g$  به طور قابل ملاحظه‌ای مقادیر افزایش می‌یابد. در محدوده میانی ( $2.2 < T/T_g < 8$ )، طیف‌ها مقدارهایی کمتر از ۱ را دارد که در این محدوده جابه‌جایی غیرالاستیک کمتر از جابه‌جایی الاستیک سیستم است. برای سیستم‌های مرکزگرا، همانطور که در شکل ۹-ب نشان داده شده است، شکل طیفی سیستم مرکزگرا در معرض رکورد دور از گسل (شکل ۹-ب-IV تا ۱۰-ب-VII) همانند سیستم الاستوپلاستیک به سه منطقه طیفی تقسیم می‌شود، در حالی که در معرض رکوردهای نزدیک گسل، برای تمامی موارد مشابه سیستم الاستوپلاستیک نمی‌باشد. همانطور که شکل ۹-الف نشان داده شده است، طیف‌های مقیاس‌شده سیستم‌ها با قابلیت اتلاف انرژی کم و متوسط در معرض رکوردهای نزدیک گسل را می‌توان به دو منطقه طیفی تقسیم نمود. در حالی که برای سیستم‌ها با مقادیر  $\beta$  بزرگتر، سه منطقه طیفی متفاوت قابل شناسایی است (شکل ۹-ب). به طور مثال، طیف مقیاس‌شده سیستم‌های SC-۰-۱۵ (بدون قابلیت اتلاف انرژی،  $\beta=0$ ) به دو بازه طیفی، شامل محدوده نسبت‌های  $T/T_g$  مساوی و بزرگتر از ۱، و سیستم‌های SC-۸۰-۲۵ ( $\beta=80$ ) به سه منطقه طیفی تفکیک شده است.

**تاثیر نسبت سخت‌شوندگی:** در این بخش به منظور بررسی تاثیر نسبت سخت‌شوندگی ( $\alpha$ ) بر طیف مقیاس‌نشده  $C_R$  و مقیاس‌شده، پارامترهای مدل‌سازی  $R$  و  $\beta$  ثابت در نظر گرفته می‌شود. شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب تاثیر پارامتر نسبت سخت‌شوندگی را بر طیف نمونه‌ای از سیستم‌های مرکزگرا با مقدار ثابت  $R$  برابر ۴،  $\beta$  برابر ۴۰ و مقادیر مختلف  $\alpha$  (۰ تا ۳۵ درصد) نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، تاثیر مقادیر  $\alpha$  بر روی مقادیر تغییرمکان غیرالاستیک طیف‌های مقیاس‌شده متفاوت از طیف‌های مقیاس‌نشده است. مطابق شکل ۱۰-الف، نسبت‌های جابه‌جایی غیرالاستیک برای طیف‌های مقیاس‌شده به طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش مقادیر  $\alpha$  کاهش می‌یابد، در حالی که نسبت  $C_R$  طیف‌های مقیاس‌شده برای نسبت‌های بزرگ  $T/T_g > 0.75$  به مقادیر  $\alpha$  بستگی ندارد (شکل ۱۰-ب). این نتایج در پاسخ چرخه‌ای سه نمونه از سیستم‌های SC-۴۰- $\alpha$  با سخت‌شوندگی  $\alpha$  برابر ۰، ۱۵ و ۳۰ در معرض رکورد نزدیک گسل پالس‌گونه ۱۹۷۹ Imperial Valley (ایستگاه El Centro Array #7) و دور از گسل زلزله ۱۹۹۵ نورث‌ریج (ایستگاه Beverly Hills Mulhol station) در شکل‌های ۱۰-ج و ۱۰-د نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۰-ج مشاهده می‌شود، حداکثر مقادیر جابه‌جایی غیرالاستیک سیستم‌های SC-۴۰- $\alpha$  با دوره تناوب ۰.۵ ثانیه در معرض رکورد نزدیک گسل با کاهش سخت‌شوندگی افزایش یافته است، در حالی مقادیر آن برای تمام سیستم‌های SC-۴۰- $\alpha$  با  $T/T_g$  برابر ۱ بدون توجه به مقادیر سخت‌شوندگی  $\alpha$  به مقادیر یکسانی میل می‌کند (شکل ۱۰-د). علاوه بر این، شکل ۱۰-الف-I و الف-II نشان می‌دهد که تاثیر پارامتر نسبت سخت‌شوندگی بر کاهش نسبت  $C_R$  در طیف‌های مقیاس‌نشده سیستم‌های مرکزگرا در معرض رکوردهای نزدیک گسل (شکل ۱۰-الف) بیشتر از مقادیر محاسبه شده برای رکوردهای دور از گسل است (شکل ۱۰-ب).

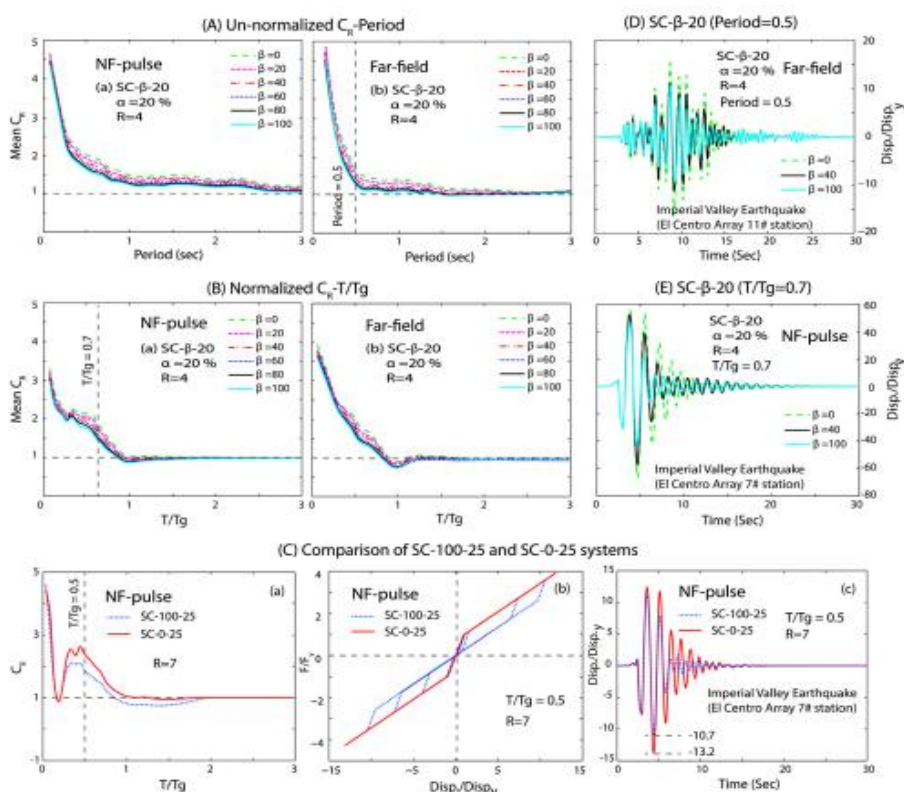


شکل ۹: تاثیر پارامترهای مدل سازی بر طیف مقیاس شده سیستم‌های (الف) الاستوپلاستیک و مرکزگرا در معرض رکوردهای دور و نزدیک گسل پالس‌مانند



شکل ۱۰: تاثیر نسبت سخت‌شوندگی بر (الف) طیف‌های مقیاس‌نشده و (ب) مقیاس‌شده سیستم‌های مرکزگرا با  $R$  برابر ۴ در معرض (ا) رکوردهای دور از گسل و (ب) نزدیک گسل پالس‌مانند. تاثیر نسبت سخت‌شوندگی بر  $SC-40-\alpha$  با  $\alpha$  برابر با ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ دارای  $R$  برابر ۴ (ج) با دوره تناوب ۰.۵ ثانیه و (د)  $T/T_g$  برابر با ۱ به ترتیب در معرض رکورد نزدیک گسل ۱۹۷۹ Imperial Valley (ایستگاه #7 El CentroArray) و دور از گسل زلزله ۱۹۹۵ نورتریج (ایستگاه Beverly Hills Mulhol station)

تأثیر پارامتر اتلاف انرژی هیسترتیک: برای بررسی تأثیر اتلاف انرژی هیسترتیک ( $\beta$ ) بر نسبت تغییرمکان غیرالاستیک سیستم، مقادیر پارامترهای مدل سازی  $R$  و  $\alpha$  ثابت در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱۱ نمونه‌هایی از طیف مقیاس‌نشده و شده سیستم‌های مرکزگرا  $SC-\beta-20$  با  $R=4$ ،  $\alpha=20\%$  درصد و مقادیر  $\beta$  بین ۰ تا ۱۰۰ درصد را در معرض رکوردهای دور از گسل و نزدیک گسل نشان می‌دهد. همانطور که مشهود است، نسبت‌های  $C_R$  برای طیف‌های مقیاس‌شده و مقیاس‌نشده برای هر دو نوع از زلزله‌ها با افزایش مقادیر  $\beta$  کاهش می‌یابد. برای ارزیابی دقیق‌تر اثر این پارامتر در سیستم‌های مرکزگرا، تاریخچه پاسخ جابجایی برای نمونه‌هایی از سیستم  $SC-\beta-20$  با  $\beta$  برابر با ۰، ۴۰ و ۱۰۰ درصد با دوره تناوب برابر ۰.۵ ثانیه و  $T/T_g$  برابر ۰.۷ در معرض رکوردهای دور و نزدیک گسل از زلزله Imperial Valley در شکل‌های ۱۱-ج و ۱۱-د به ترتیب نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نسبت تغییرمکان غیرالاستیک سیستم‌هایی مرکزگرا به طور یکنواخت با افزایش مقادیر  $\beta$  بدون در نظرگیری نوع زلزله کاهش می‌یابد. در مثالی دیگر، به منظور مقایسه سیستم‌های مرکزگرای بدون و حداکثر میرایی با یکدیگر، تقاضای جابجایی غیرالاستیک سیستم  $SC-0-25$  و  $SC-100-25$  با نسبت مقاومت برابر ۷ در شکل ۱۱-ج نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۱-ج-I مشاهده می‌شود، نسبت‌ها برای سیستم با میرایی حداکثر ( $SC-100-25$ ) به طور قابل ملاحظه‌ای به ویژه در محدوده  $2 < T/T_g < 3$  بیشتر از مدل بدون میرایی است. شکل‌های ۱۱-ج-II و ۱۱-ج-III تاریخچه پاسخ جابجایی و هیسترتیک برای هر دو سیستم  $SC-0-25$  و  $SC-100-25$  با نسبت مقاومت برابر ۷ و  $T/T_g$  برابر با ۰.۵ را نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر تأثیر پارامتر اتلاف انرژی هیسترتیک در کاهش تقاضای جابجایی غیرالاستیک است.



شکل ۱۱: تأثیر نسبت  $\beta$  بر (الف) طیف‌های مقیاس‌نشده و (ب) مقیاس‌شده سیستم‌های مرکزگرا در معرض (I) رکوردهای دور از گسل و (II) نزدیک گسل پالس‌مانند. (ج) مقایسه تقاضای جابجایی غیرالاستیک سیستم مرکزگرا بدون میرایی و با میرایی زیاد دارای  $R$  برابر ۷ در معرض رکورد نزدیک گسل Imperial Valley ۱۹۷۹ (ایستگاه #7 El CentroArray). تأثیر  $\beta$  بر سیستم‌های  $SC-\beta-20$  با  $R$  برابر ۴ و دوره تناوب ۰.۵ ثانیه در معرض رکورد دور از گسل زلزله Imperial Valley ۱۹۷۹ ۱۹۹۵ (ایستگاه #7 El CentroArray). (د) تأثیر  $\beta$  بر سیستم‌های  $SC-\beta-20$  با  $R$  برابر ۴ و  $T/T_g$  برابر ۱ در معرض رکورد نزدیک گسل Imperial Valley ۱۹۷۹ (ایستگاه El CentroArray #7)

## ۵- توابع پیشنهادی و صحت سنجی

در روش‌های مبتنی بر عملکرد از مقادیر نسبت  $C_R$  برای پیش‌بینی جابجایی هدف سازه‌ها استفاده می‌شود. به طور مثال، استاندارد ASCE 41-06 [۲۸] از این ضریب  $C_R$  سازگار شده با آیین‌نامه یعنی ضریب  $C_1$  برای سیستم‌های الاستوپلاستیک برای برآورد جابجایی هدف بام ساختمان‌ها برای شرایط سایت خاک‌های مختلف ( $\alpha_s$ ) استفاده می‌شود:

$$C_1 = 1 + (R - 1) \left[ \frac{1}{\alpha_s T^2} \right] \quad (۳)$$

رویز-گارسیا برای افزایش دقت معادله (۳)، معادله (۴) را به منظور برآورد نسبت  $C_R$  برای سیستم‌های با و بدون زوال در معرض زلزله‌های نزدیک به گسل پیشنهاد کرد:

$$C_R = 1 + \theta_1 \left( \frac{T_g}{T} \right)^2 (R - 1) + \theta_2 \left( \frac{T_g}{T} \right) \exp \left\{ \theta_3 \left[ \ln \left( \frac{T}{T_g} - 0.08 \right)^2 \right] \right\} \quad (۴)$$

همچنین، شکل دیگری از معادله (۳) برای سیستم الاستیک دوخطی در معرض زلزله‌های نزدیک به گسل پالس‌مانند توسط ایرولینو و همکاران با معادله ۵ ارائه شده است:

$$C_R = 1 + \theta_1 \left( \frac{T_p}{T} \right)^2 (R - 1) + \theta_2 \left( \frac{T_p}{T} \right) \exp \left\{ \theta_3 \left[ \ln \left( \frac{T}{T_p} - 0.08 \right) \right]^2 \right\} + \theta_4 \left( \frac{T_p}{T} \right) \exp \left\{ \theta_5 \left[ \ln \left( \frac{T}{T_p} + 0.5 + 0.02.R \right) \right]^2 \right\} \quad (۵)$$

شایان ذکر است که دو عبارت اول معادله‌های ۴ و ۵ مشابه با معادله ۳ است و باقی عبارت توابع تکمیل‌کننده برای پوشش اختلاف بین طیف  $C_R$  سیستم الاستوپلاستیک با سیستم‌های سازه‌ای دیگر است.

**توابع  $C_R$  پیشنهادی برای مدل‌های مرکزگرا:** بر اساس نتایج تحلیل آماری در این مطالعه، شکل جدیدی از معادله  $C_R$  سازگار با معادلات قبلی، برای تخمین میانگین نسبت تغییرمکان غیرالاستیک سیستم‌های مرکزگرا در معرض زلزله‌های دور از گسل (معادله ۶) و نزدیک گسل پالس‌گونه (شکل ۶) به صورت پیشنهاد می‌شود:

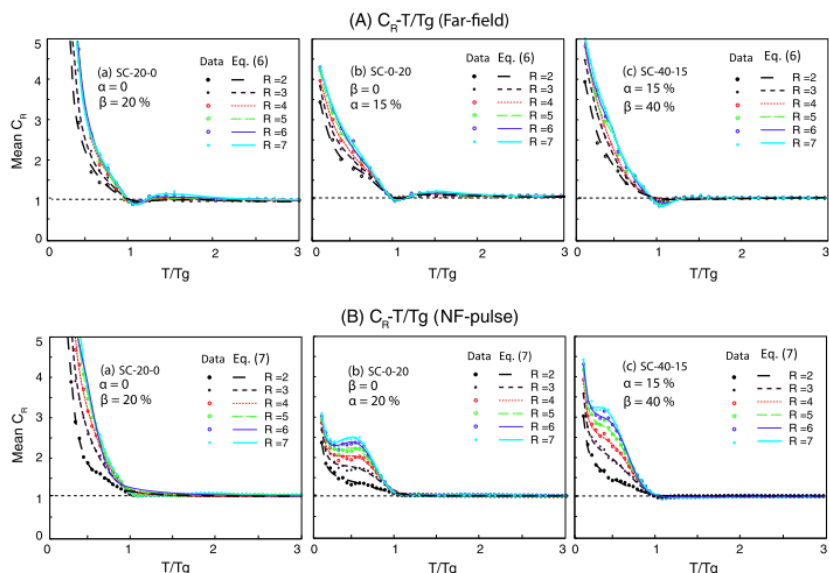
$$C_{R, far} = 1 + \theta_1 \left( \frac{T_g}{T} \right)^2 (R - 1) + \theta_2 \left( \frac{T_g}{T} \right) \exp \left\{ \theta_3 \ln \left( \frac{T}{T_g} - 0.02 \right)^2 \right\} + \theta_4 \left( \frac{T_g}{T} \right) \exp \left\{ \theta_5 \left[ \ln \left( \frac{T}{T_g} + 0.5 + 0.02.R \right) \right]^2 \right\} \quad (۶)$$

$$C_{R, NF-pulse} = 1 + \theta_1 \left( \frac{T_g}{T} \right)^2 (R - 1) + \theta_2 \left\{ -\theta_5 \left( \frac{T_g}{T} \right) + \exp \left[ -\theta_2 \left( \frac{T}{T_g} \right) + \theta_3 \left( \frac{T}{T_g} \right)^2 - \theta_4 \left( \frac{T}{T_g} \right)^3 \right] \right\} \quad (۷)$$

که در آن  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$  و  $\theta_6$  ضرایب ثابتی است که تابعی از پارامترهای مدل‌سازی است (پیوست الف مشاهده شود). معادله پیشنهادی ۶ مشابه معادله ۵ است. این رابطه قابلیت تخمین طیف مقیاس‌شده سیستم مرکزگرا در معرض رکوردهای دور از گسل را دارد. دو عبارت اول معادله پیشنهادی برای زلزله‌های نزدیک گسل (معادله ۷) نیز شکلی نمایی مشابه معادله ۴ دارد و عبارت سوم با استفاده از روش برازش دو مرحله‌ای معرفی شده در پیوست الف بدست آمده است. مقادیر دقیق ضرایب برازش ( $\theta_5 - \theta_1$ ) برای هر دو معادله پیشنهادی با استفاده از تحلیل رگرسیون غیرخطی حداقل مربعات با استفاده از الگوریتم لونبرگ مارکوارت (LMA) [۲۹] محاسبه شده است. معادلات تقریبی برای ضرایب برازش نیز در پیوست الف ارائه شده است. شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب میانگین نسبت  $C_R$  برای نمونه‌هایی از سیستم‌های مرکزگرا

(SC-۴۰-۱۵، SC-۰۰-۲۰ و SC-۲۰-۰۰) دارای مقادیر نسبت مقاومت برابر با ۲ تا ۷ در معرض رکوردهای نزدیک گسل را نشان می‌دهد، که در آن‌ها طیف‌های مقیاس شده با معادلات پیشنهادی ۶ و ۷ به ترتیب برازش شده است. مقادیر ثابت ضرایب برازش برای این مثال‌ها در جدول ۱ آمده است.

همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، توابع پیشنهادی می‌تواند به دقت نسبت  $C_R$  را برای طیف‌های مقیاس شده در معرض رکوردهای دور و نزدیک گسل برآورد نماید.



شکل ۱۲: برازش منحنی طیف‌های مقیاس شده برای سیستم‌های (I)، (II) و (III) در معرض رکوردهای (الف) دور از گسل و (ب) نزدیک به گسل محاسبه شده با معادلات (۶) و (۷) دول ۱: جدول ۱: جججج

جدول ۱: مقادیر ثابت ضرایب برازش محاسبه شده برای نمونه سیستم‌های مورد مطالعه در معرض رکوردهای دور از گسل و نزدیک به گسل

	R=۲	R=۳	R=۴	R=۵	R=۶	R=۷	R=۲	R=۳	R=۴	R=۵	R=۶	R=۷
	SC-۲۰-۰۰ (دور از گسل)						SC-۰۰-۲۰ (دور از گسل)					
$\theta_1$	۰,۲۸۵	۰,۱۸۴	۰,۱۷۰	۰,۱۲۷	۰,۱۱۰	۰,۰۷۵	۰,۰۰۴	۰,۰۰۱	-۰,۰۰۲	-۰,۰۰۳	-۰,۰۰۴	-۰,۰۰۵
$\theta_2$	-۰,۱۵	-۰,۲۶۷	-۰,۰۴	-۰,۳۷۵	-۰,۳۷۵	-۰,۴۸	-۰,۲۳	-۰,۲۹	-۰,۳۴۹	-۰,۴۱۴	-۰,۴۶	-۰,۵۲
$\theta_3$	-۲۵	-۲۲,۲۶	-۲۴	-۲۶	-۲۶	-۲۵,۵۸	-۲۱,۴۲	-۲۹,۳	-۲۶,۱۷	-۲۱,۱۲	-۱۹,۷	-۱۷,۰۲
$\theta_4$	-۰,۱۴	-۰,۱۴	-۰,۰۲	-۰,۰۲۲	-۰,۰۲۲	-۰,۰۴	۰,۳۶۳	۰,۴۶۹	۰,۵۵۳	۰,۶۲۱	۰,۶۷۳	۰,۷۲۳
$\theta_5$	-۰,۰۱۳	-۰,۰۰۸	-۰,۰۰۸	-۰,۰۲۶۵	-۰,۰۲۶۵	۰,۱۸۵	-۳,۱۲	-۳,۲۳۱	-۲,۹۸۸	-۲,۵۵	-۲,۲۰۱	-۱,۸۰۳
	SC-۲۰-۰۰ (نزدیک به گسل)						SC-۰۰-۲۰ (نزدیک به گسل)					
$\theta_1$	۰,۲۱۱	۰,۱۱۱	۰,۰۷۶	۰,۰۶۷	۰,۰۵۶	۰,۰۴۵	۰,۰۱۱	۰,۰۰۶	۰,۰۰۴	۰,۰۰۳	۰,۰۰۲	۰,۰۰۳
$\theta_2$	۰	۱,۸۰۶	۴,۱۲۲	۰	۰	۰	۰,۶۲۵	۰,۹۲۴	۱,۱۴۴	۱,۲۹۶	۱,۴۴	۰
$\theta_3$	۶۱,۶۴	۲,۲۱۲	۷,۴۴۸	۱,۱۰۳	۱,۰۹۷	۲۶,۸	۰	۳,۹۱۶	۵,۹۷۹	۷,۳۸۸	۸,۲۹۴	۸,۰۲
$\theta_4$	۶۴,۴۴	۵,۵۷۹	۸,۲۲۳	۱۰,۲۳	۱۱,۶۴	۲,۲۴	۱,۶۶	۵,۲۴۱	۷,۰۵۱۷	۹,۱۹۸	۱۰,۲۹	۱۱,۷۵
$\theta_5$	۳۳۷۲	۰,۰۷۹	۰,۰۳۵	۰,۵۳۶	۰,۵۱۳	۵۱,۸۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰,۵۹۴



توابع پیشنهادی سازگار با آیین نامه برای سیستم های مرکزگرا: استاندارد ASCE 41-06 برای بهسازی لرزه ای ساختمان های

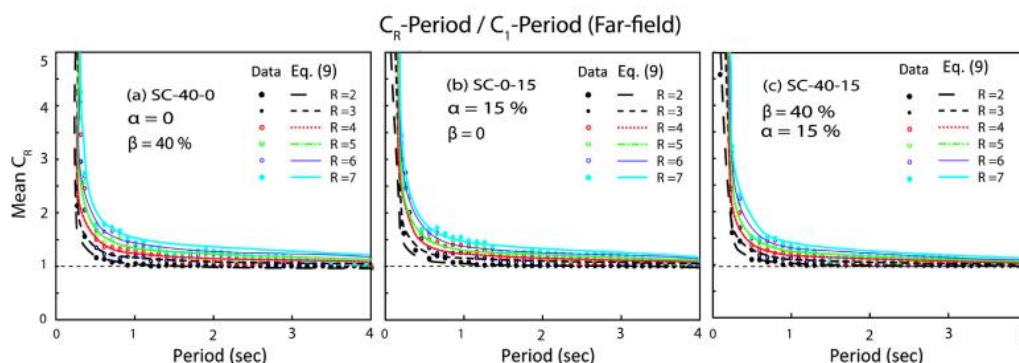
موجود در معرض رکوردهای دور از گسل، رابطه ی سازگار با آیین نامه برای نسبت  $C_R$  (ضریب  $C_1$ ) بر حسب دوره تناوب ساختمان  $T$  به صورت زیر ارائه داده است:

$$C_1 = \begin{cases} 1.0 + (R-1) \left[ \frac{1}{0.04\alpha_s} \right] & T \leq 0.2s \\ 1.0 + (R-1) \left[ \frac{1}{\alpha_s T^2} \right] & 0.2s < T \leq 1.0s \\ 1.0 & T > 1.0s \end{cases} \quad (8)$$

که در آن  $\alpha_s$  ضریب نوع خاک است که برای گروه A یا B برابر ۱۳۰ و برای گروه C برابر با ۹۰ و برای گروه های E، D و F برابر با ۶۰ است. در بخش قبل، روابط  $C_R$  برای تخمین دقیق نسبت جابه جایی غیرالاستیک سیستم های مرکزگرا برای زلزله های نزدیک گسل بر حسب نسبت های  $T/T_g$  ارائه شده است. شکل سازگار با آیین نامه  $C_R$  (ضریب  $C_1$ ) برای مدل های مرکزگرا در معرض زلزله های دور از گسل با استفاده از روش برازش دو مرحله ای (معرفی شده در پیوست ب) بر حسب پارامتر  $T$  استخراج شده است. معادله ۹ ضریب  $C_1$  پیشنهادی برای سیستم های مرکزگرا را نشان می دهد که قابلیت کاربرد در نسل آتی آیین نامه های ارزیابی و طراحی را دارد.

$$C_1 = \begin{cases} \left( 1.0 + (R-1) \left[ \frac{1}{0.01\alpha_s} \right] \right) (\theta_1 0.1^{10\theta_2}) & T \leq 0.1s \\ \left( 1.0 + (R-1) \left[ \frac{1}{\alpha_s T^2} \right] \right) \left( \theta_1 T^{\frac{\theta_2}{T}} - 0.0045RT \times \ln(T+1) \right) & 0.1s < T \leq 4.0s \\ 1.0 & T > 4.0s \end{cases} \quad (9)$$

به طوریکه،  $\theta_1$  و  $\theta_2$  ضرایبی ثابت هستند. مقادیر دقیق این ضرایب با استفاده از تحلیل رگرسیون حداقل مربعات محاسبه و معادلات تقریبی آنها بر حسب پارامترهای مدل سازی در پیوست ب ارائه شده است. شکل ۱۳ تیپها بدست آمده با معادله پیشنهادی برای ضریب  $C_1$  همراه با مقادیر تحلیلی نسبت  $C_R$  برای سیستم های SC-40-0، SC-0-15 و SC-40-15 را در معرض رکوردهای دور از گسل نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، معادلات پیشنهادی تخمینی منطقی از نسبت  $C_R$  برای مدل های مرکزگرا ارائه می دهد.



شکل ۱۳: نسبت های تحلیلی  $C_R$  و مبتنی بر آیین نامه  $C_1$  برای سیستم های (الف) SC-40-0، (ب) SC-0-15 و (ج) SC-40-15 در معرض زلزله های دور از گسل و برآورد شده با

معادله (۹)



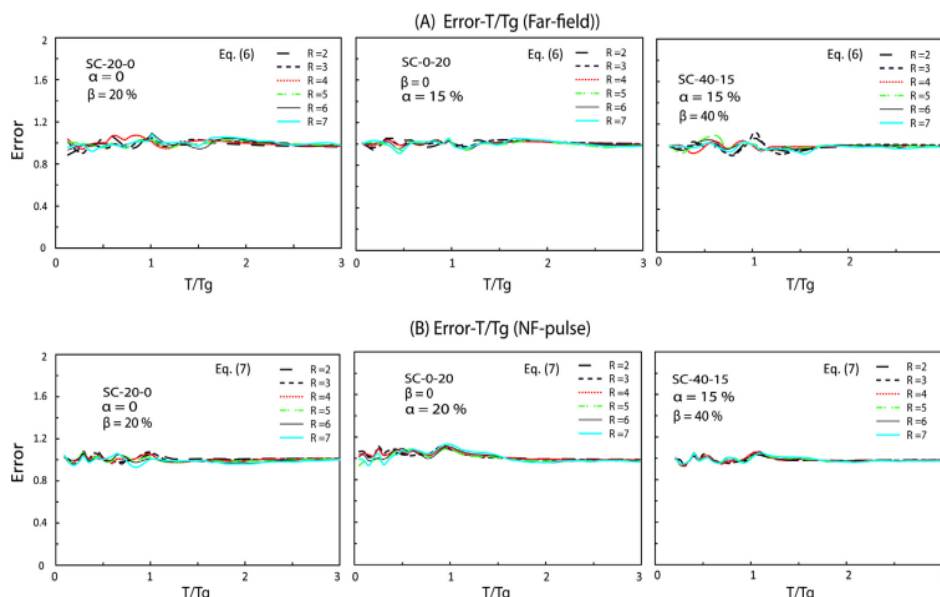
صحت سنجی معادلات پیشنهادی: دقت معادلات پیشنهادی ۶ و ۷ برای تخمین نسبت‌های تغییرمکان غیرالاستیک سیستم‌های مرکزگرا با پارامترهای مدل‌سازی  $R$ ،  $\alpha$  و  $\beta$  برای هر یک از نسبت‌های را می‌توان با معیار خطای زیر محاسبه نمود:

$$E_{T/T_g}(\alpha, \beta, R) = \left[ \frac{C_{R,pr}(\alpha, \beta, R)}{C_{R,ex}(\alpha, \beta, R)} \right]_{T/T_g} \quad (10)$$

که در آن  $C_{R,ex}$  و  $C_{R,pr}$  به ترتیب برابر با نسبت‌های پیش‌بینی شده برای نسبت  $C_R$  با روابط پیشنهادی (معادلات ۶ و ۷) و تحلیل دقیق تاریخچه زمانی برای هر مدل و در هر نسبت  $T/T_g$  است. مقادیر نزدیک ۱ برای این پارامتر بیانگر این است که فرمول‌های پیشنهادی از دقت خوبی در پیش‌بینی نسبت  $C_R$  برخوردار است، در حالی که مقادیر بیشتر و کمتر، تخمین‌هایی کمتر و بیشتر از نسبت‌های تغییرمکان غیرالاستیک است. معیار ضریب تشخیص مربع  $R^2$  نیز برای صحت‌سنجی مناسب بودن برازش در پیش‌بینی مقادیر توسط معادلات پیشنهادی برای مدل‌های مختلف مرکزگرا با مقادیر مشخص  $R$ ،  $\alpha$  و  $\beta$  در تمام محدوده نسبت‌های  $T/T_g$  استفاده شده است. این معیار با رابطه زیر تعیین شده است:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_i (C_{R,ex} - C_{R,pr})^2}{\sum_i (C_{R,ex} - \bar{y})^2} \quad (11)$$

که در آن  $SS_{res}$  و  $SS_{tot}$  به ترتیب برابر با مجموع مربعات کل و مجموع باقی مانده مربعات هستند.  $\bar{y}$  اشاره به متوسط مقدار نسبت  $C_R$  پیش‌بینی شده ( $C_{R,pr}$ ) دارد. مقدار معیار مربع  $R$  در بازه ۰ تا ۱ قرار دارد که مقادیر بیشتر نشان از برازش بهتر معادله دارد. شکل ۱۴ خطای نسبی معادلات ۶ و ۷ در پیش‌بینی نسبت  $C_R$  برای سیستم‌های SC-۰-۰-۲۰، SC-۰-۲۰-۰، SC-۰-۴۰-۱۵ و SC-۲۰-۰-۱۵ با نسبت مقاومت برابر ۲ تا ۷ در معرض رکوردهای دور و نزدیک گسل را دارد. همانطور که مشاهده می‌شود معادلات پیشنهادی تخمین‌های دقیقی از نسبت‌های تحلیل  $C_R$  دارد. معیار ضریب تشخیص مربع  $R$  برای مثال‌های در نظر گرفته شده (جدول ۲) نیز نزدیک به مقدار ۱ هستند که نشان از منطبق بودن مقادیر تخمینی با معادلات پیشنهادی بر نتایج تحلیل دارد. در نتیجه، مدل‌های آماری پیشنهادی قابلیت برآورد مناسب را داشته و برای پیش‌بینی نسبت  $C_R$  مناسب هستند.



شکل ۱۴: متوسط خطا در برازش طیف‌های (I) SC-۲۰-۰-۰، (II) SC-۰-۲۰-۰ و (III) SC-۰-۴۰-۱۵ در معرض زلزله‌های (الف) دور از گسل و (ب) نزدیک گسل برآورد شده با معادله‌های (۶) و (۷)

دول ۲: جدول ۲: جدول ۲: ججج جدول ۲: مقادیر ضریب تشخیص مربع R- برای نمونه سیستم‌های مورد مطالعه در معرض رکوردهای دور از گسل و نزدیک به گسل

Mean R <sub>r</sub> for all $\beta$ (۰, ۲۰, ۴۰, ۶۰, ۸۰, and ۱۰۰%)												
R=۲	R=۳	R=۴	R=۵	R=۶	R=۷	R=۲	R=۳	R=۴	R=۵	R=۶	R=۷	
دور از گسل						نزدیک گسل						
$\alpha=0$	۰,۹۹۸	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۷	۰,۹۹۹	۰,۹۹۷	۰,۹۹۷	۰,۹۹۹	۰,۹۹۷	۰,۹۹۸	۰,۹۹۷
$\alpha=5\%$	۰,۹۹۸	۰,۹۹۹	۰,۹۹۸	۰,۹۹۸	۰,۹۹۸	۰,۹۹۸	۰,۹۹۴	۰,۹۹۸	۰,۹۹۷	۰,۹۹۵	۰,۹۹۷	۰,۹۹۷
$\alpha=10\%$	۰,۹۹۷	۰,۹۹۷	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۷	۰,۹۹۲	۰,۹۹۷	۰,۹۹۹	۰,۹۹۸	۰,۹۹۸	۰,۹۸۴
$\alpha=15\%$	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۷	۰,۹۹۹	۰,۹۹۵	۰,۹۹۶	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۱
$\alpha=20\%$	۰,۹۹۹	۰,۹۹۸	۰,۹۹۹	۰,۹۹۸	۰,۹۹۹	۰,۹۹۸	۰,۹۹۵	۰,۹۹۵	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۸
$\alpha=25\%$	۰,۹۹۵	۰,۹۹۹	۰,۹۹۸	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۸	۰,۹۹۶	۰,۹۹۶	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۸
$\alpha=30\%$	۰,۹۹۷	۰,۹۹۸	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۸	۰,۹۹۹	۰,۹۹۷	۰,۹۴۲	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹
$\alpha=35\%$	۰,۹۹۸	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۷	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹	۰,۹۹۹

## ۶- خلاصه و نتایج

سازه‌های مرکزگرا با حرکت گهواره‌ای از جمله سیستم‌های نوین لرزه‌ای با قابلیت کاهش خسارت لرزه‌ای است. در این مقاله به مطالعه آماری و ارائه فرمول‌های محاسباتی برای تخمین نسبت جابجایی غیرالاستیک با مقاومت ثابت R (C<sub>R</sub>) برای سیستم‌های مرکزگرا در معرض زلزله‌های دور و نزدیک به گسل پرداخت. بدین منظور از طریق تحلیل آماری تاثیر پارامترهای لرزه‌ای و مدل‌سازی بر طیف C<sub>R</sub> بررسی شد. نتایج اصلی این تحقیق به شرح زیر است:

۱- مشاهده شد طیف‌های C<sub>R</sub> برای سیستم‌های مرکزگرا همانند سیستم با رفتار دو خطی روندی کاهشی دارد. این نسبت به صورت نمایی بدون توجه به نوع زلزله کاهش یافته و برای دوره تناوب‌های بلند و کوتاه به ترتیب به مقدار ۱ و مقادیر بزرگ همگرا شده است.

۲- نتایج تحلیل نشان داد که شکل طیف‌های مقیاس‌شده و مقیاس‌نشده سیستم‌های مرکزگرا به نوع زلزله اعمالی بستگی دارد. مشاهده شد در محدوده  $1 < T/T_g$ ، شکل طیف‌های مقیاس‌شده تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل به ترتیب محدب و مقعر است. علاوه بر این، پراکندگی طیف‌های مقیاس‌شده و نشده برای سیستم‌های مرکزگرا در معرض زلزله‌های نزدیک گسل پالس‌گونه به طور نسبی از نسبت مقادیر آن در زلزله‌های دور از گسل بزرگتر است.

۳- نتایج حاکی از آن است که طیف‌های C<sub>R</sub> سیستم‌های مرکزگرا به طور قابل توجهی به محدوده دوره تناوب پالس سرعت (T<sub>p</sub>) بستگی دارد. تخمین نسبت C<sub>R</sub> برای سیستم‌ها با مقاومت کم در معرض رکوردها  $T_p > 2s$ ، بدلیل افزایش قابل ملاحظه پراکندگی پاسخ از قابلیت اعتماد کمتری نسبت به نتایج برای سیستم‌ها با مقاومت بالاتر در معرض رکوردهای  $T_p < 2s$  برخوردار است.

۴- مشاهده شد که پراکندگی رکورد به رکورد پاسخ‌ها در اثر محدوده دوره تناوب پالس و بزرگای زلزله با مقیاس کردن طیف‌ها به T<sub>g</sub> کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته است. نشان داده شد که تاثیر M<sub>w</sub>، کمترین فاصله تا سطح گسلش و نوع ساختگاه بر طیف‌های مقیاس‌شده به ویژه برای سیستم‌ها با  $T/T_g > 0,7$ ،  $T/T_g < 1,5$  و  $T/T_g < 0,7$  به ترتیب تاثیر ناچیزی دارد.

۵- نتایج نشان داد که نسبت‌های C<sub>R</sub> سیستم مرکزگرا با افزایش نسبت سخت‌شوندگی (α) به ویژه در محدوده  $T/T_g < 0,75$  کاهش یافته است. این نسبت و پراکندگی آن با افزایش مقاومت جانبی سیستم مرکزگرا کاهش زیادی داشته است. علاوه بر این تاثیر نسبت α بر طیف‌های مقیاس‌نشده در معرض زلزله‌های نزدیک گسل نسبت به زلزله‌های دور از گسل مشهودتر است. همچنین نسبت C<sub>R</sub> برای سیستم‌ها با β برابر با ۱۰۰ درصد نسبت به سیستم‌های β برابر با ۰ به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. علاوه بر این، نسبت‌های C<sub>R</sub>

سیستم‌ها با  $\alpha$  و  $\beta$  برابر با ۰ دارای بیشترین مقدار  $C_R$  است، در حالی که سیستم‌های مرکزگرا با میرایی زیاد کمترین مقدار نسبت تغییر مکان غیرالاستیک را دارد.

۶- دو فرمول بر حسب پارامترهای مدل‌سازی ( $\alpha$ ،  $\beta$  و  $R$ ) و نسبت  $T/T_g$  برای تخمین میانگین طیف‌های مقیاس شده سیستم‌های مرکزگرا در معرض رکوردهای دور از گسل و نزدیک گسل پالسونگه با روش برازش دو مرحله‌ای پیشنهاد گردید. نشان داده شد که این روابط قابلیت پیش‌بینی دقیق طیف‌های تغییر مکان غیرالاستیک سیستم‌های مرکزگرا را دارد. علاوه بر این، رابطه‌ای سازگار با آیین‌نامه برای تخمین جابجایی هدف سازه‌های مرکزگرا در معرض زلزله‌های دور از گسل پیشنهاد گردید.

### پیوست الف:

فرمول‌های پیشنهادی برای سیستم‌های مرکزگرا با استفاده از روش برازش دو مرحله‌ای بدست آمده است. در مرحله اول روش، دو عبارت اولیه ( $C_{Ri}$ ) (معادله (الف-۱)) معادلات پیشنهادی (۶) و (۷) مشابه با معادله (۳) در نظر گرفته شد و برازش آزمایشی بر روی داده‌های تحلیلی ( $\bar{C}_R$ ) انجام گردید. سپس عبارت سوم توسط برازش معادلات (الف-۲) و (الف-۳) بر تفاوت داده‌های تحلیلی،  $\bar{C}_R$  و  $C_{Ri}$  برای پوشش تحذب طیف  $C_R$  در نسبت‌های کم  $T/T_g$  استخراج می‌شود:

$$C_{Ri} = 1 + \theta_1 \left(\frac{T_p}{T}\right)^2 \cdot (R-1) \quad (\text{الف-۱})$$

$$\varepsilon_{CR, far} = \bar{C}_R - C_{Ri} \approx \theta_2 \left(\frac{T_g}{T}\right) \exp\left\{\theta_3 \ln\left(\frac{T}{T_g} - 0.02\right)^2\right\} + \theta_4 \left(\frac{T_g}{T}\right) \exp\left\{\theta_5 \left[\ln\left(\frac{T}{T_g} + 0.5 + 0.02R\right)\right]^2\right\} \quad (\text{الف-۲})$$

$$\varepsilon_{CR, near} = \bar{C}_R - C_{Ri} \approx \theta_2 \left\{-\theta_5 \left(\frac{T_g}{T}\right) + \exp\left[-\theta_2 \left(\frac{T}{T_g}\right) + \theta_3 \left(\frac{T}{T_g}\right)^2 - \theta_4 \left(\frac{T}{T_g}\right)^3\right]\right\} \quad (\text{الف-۳})$$

شکل الف-۱ نمونه‌هایی از طیف‌های  $C_{Ri}$  و مقادیر  $\varepsilon_{CR, near}$  برای سیستم‌های ۲۵-۸۰-SC در معرض رکوردهای نزدیک گسل را نشان می‌دهد. اگرچه در برازش آزمایشی انجام شده برازش مناسبی، به ویژه در باز میانی  $T/T_g$  انجام نمی‌گیرد، در مرحله دوم برازش به طور مناطق دیگر را پوشش می‌دهد.

ضرایب برازش معادلات پیشنهادی برای سیستم مرکزگرا در معرض رکورد دور از گسل (معادله (۶)) و نزدیک گسل پالسونگه (معادله (۷)) توسط تحلیل رگرسیون غیرخطی حداقل مربعات بر حسب پارامترهای مدل‌سازی بدست آمده است:

۱. ضرایب برازش برای سیستم‌های مرکزگرا در معرض زلزله دور از گسل (معادله (۶)):

$$\theta_1 = ((0.276\beta - 0.289)R - 1.445\beta + 1.512)\alpha + (-0.043\beta + 0.0505)R + 0.221\beta - 0.262 \quad (\text{الف-۴})$$

$$\theta_2 = ((2.818\beta - 3.258)R - 12.384\beta + 15.621)\alpha + (-0.441\beta + 0.574)R + 1.793\beta - 3.095 \quad (\text{الف-۵})$$

$$\theta_3 = ((-110.294\beta + 90.726)R + 366.336\beta + -413.598)\alpha + (26.308\beta - 23.948)R - 69.868\beta + 77.978 \quad (\text{الف-۶})$$

$$\theta_4 = ((-3.058\beta + 2.939)R + 14.597\beta - 16.573)\alpha + (0.477\beta - 0.439)R - 2.338\beta - 3.229 \quad (\text{الف-۷})$$

$$\theta_5 = ((-2.765\beta + 12.544)R - 6.747\beta - 34.94)\alpha - (0.151\beta + 3.376)R + 4.089\beta + 6.95 \quad (\text{الف-۸})$$

ضرایب برازش برای سیستم‌های مرکزگرا در معرض زلزله نزدیک گسل (معادله (۶)):

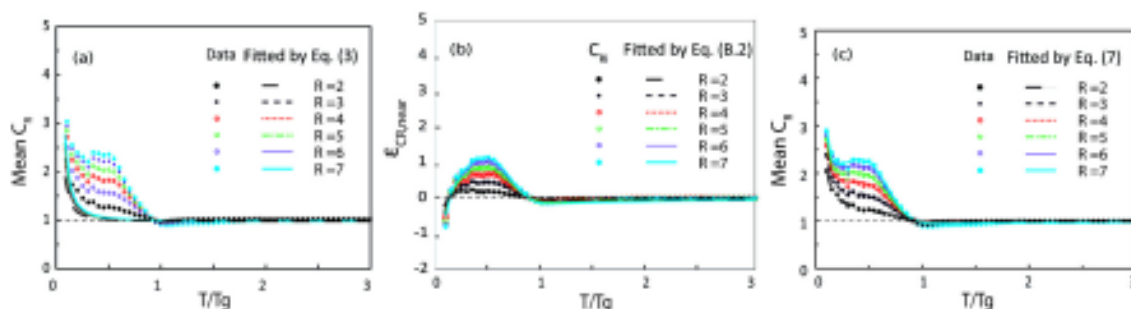
$$\theta_1 = ((0.0019\beta + 0.014)R - 0.026\beta - 0.075)\alpha - (0.00035\beta + 0.0054)R + 0.0078\beta + 0.031 \quad (\text{الف-۹})$$

$$\theta_2 = \left( -(0.81\beta + 3.47)R + 10.02\beta + 1.27 \right) \alpha + (0.36\beta + 1.1)R - 3.34\beta - 0.1 \quad (\text{الف-10})$$

$$\theta_3 = \left( -(0.14\beta + 7.74)R + 10.86\beta + 22.1 \right) \alpha + (-0.11\beta + 3.97)R - 3.6\beta - 7.7 \quad (\text{الف-11})$$

$$\theta_4 = \left( (2.05\beta - 7.75)R + 3.76\beta + 22.6 \right) \alpha + (-0.89\beta + 4.04)R - 0.15\beta - 6.5 \quad (\text{الف-12})$$

$$\theta_5 = \left( (0.18\beta + 0.042)R - 1.36\beta - 0.08 \right) \alpha - (0.065\beta + 0.0065)R + 0.58\beta - 0.018 \quad (\text{الف-13})$$



شکل الف-۱: برازش منحنی طیف مقیاس شده سیستم‌های ۲۵-۸۰-SC در معرض زلزله نزدیک گسل پالس گونه (الف) با استفاده از معادله (الف-۱) و (ج) معادله (۷)؛ (ب) مقادیر ECR برازش شده توسط معادله (الف-۳)

### پیوست ب:

ضریب  $C_1$  برای سیستم‌های مرکزگرا در معرض زلزله دور از گسل با استفاده از روش دو مرحله برآورد (۸) با اصلاح معادله (۸) برآورد می‌شود. در مرحله اول، نسبت  $C_R$  تحلیلی برای سیستم‌های مرکزگرا به مقادیر  $C_1$  به دست آمده از استاندارد ASCE-41-06 (معادله (۸)) تقسیم می‌گردد و پس از آن، ضریب اصلاح‌کننده (معادله (ب-۱)) و ضرایب ثابت  $(\theta_1$  و  $\theta_2)$  بر اساس تحلیل رگرسیون غیرخطی بدست می‌آید.

$$M_{C_1} = \begin{cases} \theta_1 0.1^{10\theta_2} & T \leq 0.1s \\ \theta_1 T^{\frac{\theta_2}{T}} - 0.0045RT \times \ln(T+1) & 0.1s < T \leq 4.0s \\ 1.0 & T > 4.0s \end{cases} \quad (\text{ب-1})$$

ضرایب برازش برای معادلات پیشنهادی برای سیستم‌های مرکزگرا در معرض زلزله دور از گسل (معادله ۹) با روش تحلیل رگرسیون غیرخطی حداقل مربعات بر حسب پارامترهای مدل‌سازی بدست آمده است:

$$\theta_1 = (-0.12\alpha + 0.075).R - 0.1\beta + 0.97 \quad (\text{ب-2})$$

$$\theta_2 = (-0.0007.R + 0.26).\alpha + 0.005.R - 0.075 \quad (\text{ب-3})$$

### مراجع

## مراجع

- [1] Somerville, PG. Smith, NF. Graves, RW. and Abrahamson, NA. (1997). *Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity*. Seismol Res Lett;68:199–222.
- [2] Baker, JW. *Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis*. (2007). Bull Seismol Soc Am;97:1486–501.
- [3] Housner, GW. *The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes*. (1963). Bull Seismol Soc Am;53:403–17.
- [4] Ajrab, JJ. Pekcan, G. and Mander, JB. (2004). *Rocking wall-frame structures with supplemental tendon systems*. J Struct Eng;130:895–903.
- [5] Holden, T, Restrepo, J, and Mander, JB. (2003). *Seismic performance of precast reinforced and prestressed concrete walls*. J Struct Eng;129(3):286–296
- [6] Kurama, Y. Sause, R. Pessiki, S. and Lu, L-W. (1999). *Lateral load behavior and seismic design of unbonded post-tensioned precast concrete walls*. ACI Struct J;96(4).
- [7] Eatherton, MR. Fahnestock, LA. and Miller, DJ. *Computational study of self-centering buckling-restrained braced frame seismic performance*. (2014). Earthq Eng Struct Dyn;43:1897–914.
- [8] Blebo, FC. and Roke, DA. (2015). *Seismic-resistant self-centering rocking core system*. Eng Struct;101:193-204.
- [9] Pollino M. (2015). *Seismic design for enhanced building performance using rocking steel braced frames*. Eng Struct;83:129-139.
- [10] Francesco, S. Palermo, A. and Pampanin, S. (2015). *Quasi-static cyclic testing of two-thirds scale unbonded posttensioned rocking dissipative timber walls*. J of Struct Eng;E4015005.
- [11] Roke, D. Sause, R. Ricles, JM. Seo, C-Y. and Lee, K-S. (2006). *Self-centering seismic-resistant steel concentrically-braced frames*. Proc. 8th US Natl. Conf. Earthq. Eng., San Francisco.
- [12] Roke, D. Sause, R. Ricles, JM. and Gonner, N. (2008). *Design concepts for damage-free seismic-resistant self-centering steel concentrically-braced frames*. Proc. 14th World Conf. Earthq. Eng., China.
- [13] Eatherton, MR. and Hajjar, JF. (2010). *Large-scale cyclic and hybrid simulation testing and development of a controlled-rocking steel building system with replaceable fuses*. Newmark Structural Engineering Laboratory. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [14] Ma, X. Borchers, E. Pena, A. Krawinkler, H. and Deierlein, G. (2010). *Design and behavior of steel shear plates with openings as energy-dissipating fuses*. John A. Blume Earthquake Engineering Center Technical Report.
- [15] Latham, DA. Reay, AM. Pampanin, S. (2013). *Kilmore Street Medical Centre: Application of an Advanced Flag-Shape Steel Rocking System*. Proc. 2013 NZSEE Conf., Wellington, New Zealand.
- [16] Applied Technology Council (ATC). (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Report no. ATC-40. Redw City.
- [17] Ruiz-García, J. and González, EJ. (2014). *Implementation of Displacement Coefficient method for seismic assessment of buildings built on soft soil sites*. Eng Struc; 59:1–12.
- [18] Christopoulos, C. Pampanin, S. Nigel, Priestley. (2003). *Performance-based seismic response of frame structures including residual deformations. Part I: Single-degree of freedom systems*. J Earthq Eng;7:119–47.
- [19] Seo, C-Y. and Sause, R. (2005). *Ductility demands on self-centering systems under earthquake loading*. ACI Struct ;102.
- [20] Eatherton, MR. and Hajjar, JF. (2011). *Residual drifts of self-centering systems including effects of ambient building resistance*. Earthq Spectr;27:719–44.
- [21] Mazzoni, S. McKenna, F. Scott, MH. and Fenves, GL. (2006). *OpenSees command language manual*. Pacific Earthq Eng Res (PEER) Cent.
- [22] Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency. (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Report no. FEMA P695. Redwood, CA.

- [23] Alavi, B. and Krawinkler, H. (2004). *Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions*. Earthq Eng Struct Dyn;33:687–706.
- [24] Málaga-Chuquitaype, C. and Elghazouli, AY. (2012). *Inelastic displacement demands in steel structures and their relationship with earthquake frequency content parameters*. Earthq Eng Struct Dyn;41:831–52.
- [25] Somerville, PG. (2003). *Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse*. Phys Earth Planet Inte;137(1):201-212.
- [26] Dimakopoulou, V. Fragiadakis, M. Spyrakos C. (2013). *Influence of modeling parameters on the response of degrading systems to near-field ground motions*. Eng Struct;53:10–24.
- [27] Dobry, R. and Borcherdt, RD. (2000). *New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions*. Earthq Spectra;16:41–67.
- [28] American Society of Civil Engineers (ASCE). (2007). *Seismic rehabilitation standards committee. Seismic rehabilitation of existing buildings*. ASCE/SEI 41-06. Reston, VA.
- [29] Bates, DM. and Watts, DG. (1988). *Nonlinear regression: iterative estimation and linear approximations, in Nonlinear Regression Analysis and Its Applications*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc; p. 32-66