

M. J. Hamidia *

Assistant Professor,
Department of Civil, Water
and Environmental
Engineering, Shahid Beheshti
University.

e-mail: m_hamidia@sbu.ac.ir

F. Toozandejani

Department of Civil, Water
and Environmental
engineering, Shahid Beheshti
University.

e-mail:
f.toozandejani@mail.sbu.ac.ir

A. Mahdavian

Associate Professor,
Department of Civil, Water
and Environmental
Engineering, Shahid Beheshti
University.

e-mail: A_mahdavian@sbu.ac.ir

Evaluation of ASCE7 Simplified Procedure For Estimating Maximum Seismic Displacement of Structures with Friction Pendulum Isolators under Near-Field Earthquakes

Seismic base isolation is a practical solution to reduce the seismic demand on civil infrastructures. In this paper, the maximum displacements of friction pendulum isolators resulting from simplified method prescribed by ASCE7-16 are compared with the results from nonlinear response history dynamic analyses for near-field pulse-like and non-pulse-like earthquakes. The maximum displacements of the friction pendulum isolators with four different coefficients of friction and four effective radii have been determined using simplified methods prescribed by ASCE7-16. Nonlinear response history dynamic analyses are then performed for the 16 aforementioned cases using OpenSees under seven near-field pulse-like earthquake records and seven near-field non-pulse-like earthquake. Adjustment factors are finally developed for the simplified method of ASCE7-16 to update the predictions. The results show that the values predicted by the code are less than the values obtained from nonlinear time history analysis. In addition, the adjustment factors obtained for pulse-like near-field motions are larger than adjustment factors for non-pulse-like near-field motions.

Keywords: Seismic Isolation, ASCE7-16, Friction Pendulum Isolator, Simplified Method, Nearfield Ground Motion, Pulse-like Earthquake.

* Corresponding author

ارزیابی روش آیین‌نامه ASCE7 برای تعیین جابه‌جایی بیشینه سازه با جداگرهای آونگی اصطکاکی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

امروزه سازه‌های زیادی در نزدیکی گسل با استفاده از جداساز لرزه‌ای احداث می‌گردند. در این مقاله، تخمین روش‌های ساده‌سازی شده آیین‌نامه ASCE7-16 برای جابه‌جایی حداکثر سازه‌های جداسازی شده توسط جداساز آونگی اصطکاکی مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی برای زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه و غیرپالس‌گونه مقایسه گردیده است. این بررسی برای خاک نوع دو و در منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد شهر تهران صورت گرفته است. برای بررسی این موضوع، در ابتدا طبق روابط ساده‌سازی شده آیین‌نامه، ظرفیت جابه‌جایی ۱۶ جداساز آونگی اصطکاکی با چهار شعاع مؤثر و چهار ضریب اصطکاک مختلف محاسبه شده است. سپس با انتخاب هفت شتابنگاشت زلزله حوزه نزدیک پالس‌گونه و هفت شتابنگاشت زلزله حوزه نزدیک غیرپالس‌گونه با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی، ظرفیت جابه‌جایی برای جداسازهای آونگی اصطکاکی تعیین شده است. تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی سازه با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان انجام می‌شود. در نرم‌افزار OpenSees جداساز به عنوان یک المان با طول صفر دوبعدی با دو گره که گره پایین مقید شده است، مدل می‌شود. سپس هر شتابنگاشت به جداساز اعمال می‌شود و جابه‌جایی حاصل از هر شتابنگاشت ثبت می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که روابط ساده‌سازی شده آیین‌نامه برای تعیین ظرفیت حداکثر جداساز آونگی اصطکاکی در زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی، مقدار کمتری را نشان می‌دهند. در نتیجه نیاز به طراحی مجدد جهت کاهش جابه‌جایی حداکثر به میزان مجاز آیین‌نامه‌ای می‌باشد. نسبت جابه‌جایی حداکثر حاصل از روش‌های ساده‌سازی شده آیین‌نامه‌ای برای زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه برابر ۲/۲ و این نسبت برای زلزله‌های حوزه نزدیک غیرپالس‌گونه مقدار ۲ دارد و به صورت محافظه‌کارانه برای تمام زلزله‌های حوزه نزدیک می‌توان ۲/۲ در نظر گرفت.

واژگان کلیدی: جداسازی لرزه‌ای، جداساز آونگی اصطکاکی، حوزه نزدیک، پالس‌گونه، غیرپالس‌گونه، روش‌های ساده‌سازی شده آیین‌نامه‌ای.

محمدجواد حمیدیا*

استادیار گروه مهندسی سازه و زلزله،
دانشکده مهندسی عمران، آب و
محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی،
تهران.

پست الکترونیک:

m_hamidia@sbu.ac.ir

فاطمه توزندجانی

کارشناس ارشد زلزله، دانشکده
مهندسی عمران، آب و محیط
زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

پست الکترونیک:

f.toozandejani@mail.sbu.ac.ir

عباس مهدویان

دانشیار، گروه مهندسی سازه و زلزله،
دانشکده مهندسی عمران، آب و
محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی،
تهران.

پست الکترونیک:

a_mahdavian@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

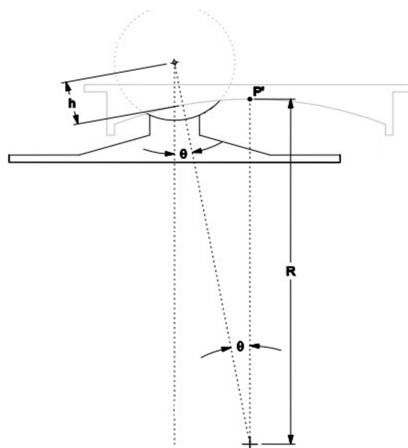
اساس جداسازهای آونگی اصطکاکی شامل ساختاری متشکل از صفحات مقعر و لغزنده‌های داخلی می‌باشد، که با چیدمان گوناگون کنار هم قرار گرفته‌اند. در زمینه تشریح رفتار مکانیکی و مدل‌سازی جداساز آونگی اصطکاکی، تحقیقات متعددی انجام شده است. رفتار مکانیکی جداساز آونگی اصطکاکی تک‌قوسی، در

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۵

DOI: 10.22091/cer.2021.7377.1300 شناسه دیجیتال

شعاع مؤثر، فاصله بین مرکز خمیدگی سطح مقعر و نقطه محوری لغزنده است که برای موارد رایج، که نقطه محوری خارج از مرز سطح کروی است، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- پارامترهای هندسی جداساز آونگی اصطکاکی

در شکل ۲، مقادیر R و h نشان داده شده‌اند. شعاع مؤثر برابر است با:

$$R_e = R + h \quad (1)$$

برای مواردی که نقطه محوری در داخل مرز سطح کروی قرار دارد و کمتر رایج است، شعاع مؤثر برابر است با:

$$R_e = R - h \quad (2)$$

همچنین، برای مورد نشان داده شده در شکل ۲ ظرفیت جابه‌جایی واقعی جداساز توسط روابط زیر تعیین می‌شود:

$$d^* = \frac{R_e}{R} d = \frac{R+h}{R} d \quad (3)$$

که d (ظرفیت جابه‌جایی اسمی) برابر است با:

$$d = \frac{(D_c - D_s)}{2} \quad (4)$$

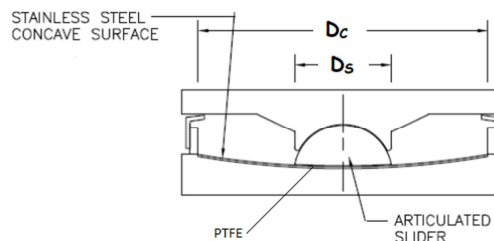
به طور کلی، ارتفاع h در مقایسه با شعاع کوچک است به طوری که $R \approx R_e$ و $d^* \approx d$ بر این اساس، این تفاوت تقریباً در محاسبات اولیه نادیده گرفته می‌شود.

در این پژوهش، مطابق با پیشنهاد MCEER11-0004 صفحات مقعر با شعاع مؤثر (R_e) ۲/۳، ۳/۲، ۴/۱ و

ابتدا توسط زایاس^۱ و همکاران در سال ۱۹۸۹ تشریح شد [۱]. فنز و کونستانینو^۲ در سال ۲۰۰۷، مدل‌سازی عددی این نوع سیستم جداسازی را تشریح نمودند [۲]. آنها همچنین در سال ۲۰۰۸ یک مدل عددی برای جداساز آونگی اصطکاکی سه‌گانه و دوگانه ارائه دادند که زمینه تحقیق را برای بسیاری از محققین فراهم نمود [۳]. همچنین آزمایش‌های میز لرزان نیز برای راستی‌آزمایی مدل‌سازی انجام شده است [۴]. محاسبه شعاع مؤثر R_e براساس تحقیقات ترنر^۳ در سال ۲۰۰۷ می‌باشد [۵]. میزان جابه‌جایی حداکثر جداسازها ناشی از زلزله‌های حوزه نزدیک در تحقیقات فراوانی، بیش از میزان جابه‌جایی حداکثر تحت زلزله‌های حوزه دور ذکر شده است. برای اطلاعات بیشتر در مورد مکانیسم و نحوه عملکرد جداسازهای لرزه‌ای می‌توان به مراجع [۱-۶] مراجعه نمود.

۲- تشریح پارامترهای عملکردی جداساز آونگی اصطکاکی

جداساز آونگی اصطکاکی دارای دو پارامتر مهم (شعاع مؤثر و ضریب اصطکاک) است [۶]. شکل ۱ برشی از یک جداساز آونگی اصطکاکی تک قوسی می‌باشد که مقادیر D_s قطر لغزنده و D_c قطر سطح مقعر در آن نشان داده شده است. مصالح سازنده از نوع تفلون^۴ و فولاد ضد زنگ^۵ می‌باشند.



شکل ۱- برشی از جداساز آونگی اصطکاکی تک قوسی

- 1- Zayas
- 2- Fenz and Constantinou
- 3- Turner
- 4- PTFE
- 5- Stainless Steel

۴- اهداف پژوهش

ضوابط آیین‌نامه ASCE7 برای طرح سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای مبتنی بر روش ساده‌سازی شده پیش گفته در بخش ۳ می‌باشد. این ضوابط همانگونه که اشاره شد، براساس نظریه میرایی معادل وُشک‌سانی چرخه بارگذاری- باربرداری می‌باشند و نیازمند بررسی تطابق با تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌زمانی غیرخطی، براساس ساختگاه و خطر لرزه‌ای می‌باشند. کنستانتینو^۷ و همکاران پیش از این در سال ۲۰۱۱ به بررسی این موضوع برای پل‌های جداسازی شده لرزه‌ای توسط میراگر آونگی- اصطکاکی برای ایالت کالیفرنیا پرداختند [۶]. در این پژوهش، برای نخستین بار، اثر پالس‌گونگی بر دقت روش ساده‌سازی شده آیین‌نامه ASCE7 برای زلزله‌های حوزه‌نزدیک و در تطابق با خطر لرزه‌ای تعریف شده برای مناطق نزدیک گسل توسط استاندارد ۲۸۰۰ بررسی گردیده است. شایان ذکر است، روش‌های ساده‌سازی شده برای تعیین واکنش لرزه‌ای سازه‌های غیر جداسازی‌شده پیش از این توسط نویسندگان این مقاله در مقالات متعدد مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳-۸].

۵- تعیین ظرفیت جداسازهای در نظر گرفته

شده

همانگونه که در بخش ۳ آورده شد، برای انجام تحلیل به روش ساده‌سازی شده آیین‌نامه ابتدا یک مقدار جابه‌جایی فرض می‌شود و سپس محاسبات تکرار شونده طبق روابط آیین‌نامه انجام می‌شود. این فرآیند تکرار می‌شود تا مقادیر جابه‌جایی فرض شده و جابه‌جایی حاصل همگرا شوند.

در جدول زیر مقادیر جابه‌جایی پس از تکرار و همگرایی برای ضرایب اصطکاک مختلف قرار داده شده است. جدول ۱، نتایج حاصل از روش ساده‌سازی‌شده

۶/۲ متر در نظر گرفته شده‌اند [۶]. مقادیر ضریب اصطکاک (μ) نیز با توجه به مقادیر رایج در طراحی ۳، ۶، ۱۰ و ۱۵ درصد انتخاب شده‌اند. محاسبات برای این چهار شعاع مؤثر و چهار ضریب اصطکاک که مجموعاً ۱۶ حالت می‌شود انجام می‌گردد.

۳- روش آیین‌نامه ASCE7 برای تخمین جابه‌جایی حداکثر

مطابق با روابط ۱۷/۵-۱ و ۱۷/۵-۲ و جدول ۱-۱ ۱۷/۵ فصل ۱۷ آیین‌نامه ASCE7-16 محاسبه پرپود مؤثر، میرایی مؤثر وُشک‌سانی^۶ سیستم و میزان جابه‌جایی حداکثر توسط معادلات (۵) تا (۸) برحسب شعاع مؤثر R_e ، ضریب اصطکاک μ و جابه‌جایی D_D بیان می‌شوند [۷]:

$$T_{\text{eff}} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{\frac{\mu g}{D_D} + \frac{g}{R_e}}} \quad (5)$$

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\mu}{\mu + D_D} \right) \quad (6)$$

همچنین فرض می‌گردد سازه جداسازی شده بر روی خاک تیپ ۲ در منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد شهر تهران قرار دارد.

$$S_a(T, B) = \frac{S_a(T, 5\%)}{B} \quad (7)$$

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} \times S_a \quad (8)$$

برای انجام تحلیل به روش ساده‌سازی شده آیین‌نامه ابتدا یک مقدار جابه‌جایی فرض می‌شود، سپس با توجه به روابط (۵) تا (۸) و با استفاده از شتاب طیفی در پرپود مدنظر، جابه‌جایی طیفی محاسبه می‌گردد. این فرآیند تکرار می‌شود تا مقدار جابه‌جایی فرض شده و جابه‌جایی حاصل از رابطه (۸) همگرا شوند.

7- Constantinou

6- Viscous

آیین‌نامه برای تعیین ظرفیت جداسازها با ضرایب اصطکاک و شعاع مؤثر مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تعیین ظرفیت جابه‌جایی جداساز برای ضرایب اصطکاک مختلف

R_e (cm)	T (sec)	T_{eff} (sec)	β_{eff}	B	A (g)	D_D فرض	S_d (g)	D_D (cm)
$\mu=0.03$								
۲۳۰	۳/۰۳	۲/۷۸	۰/۱	۱/۲۳۸	۰/۳۵	۳۵	۰/۱۸۵	۳۶
۳۲۰	۳/۵۷	۳/۲۳	۰/۱۱۷	۱/۲۹۱	۰/۳۵	۴۲	۰/۱۶۲	۴۲
۴۱۰	۴/۰۴	۳/۶۲	۰/۱۲۷	۱/۳۲۲	۰/۳۵	۴۸	۰/۱۳۲	۴۸
۶۲۰	۵	۴/۳۲	۰/۱۶۲	۱/۴۲۴	۰/۳۵	۵۴	۰/۱۲۱	۵۶
$\mu=0.06$								
۲۳۰	۳/۰۳	۲/۳۸	۰/۲۴۵	۱/۶۱	۰/۳۵	۲۲	۰/۱۵۷	۲۲
۳۲۰	۳/۵۷	۲/۷	۰/۲۷۳	۱/۶۶۵	۰/۳۵	۲۵	۰/۱۴	۲۵
۴۱۰	۴/۰۴	۳/۹۶	۰/۲۹۶	۱/۷۰	۰/۳۵	۲۸	۰/۱۲۹	۲۸
۶۲۰	۵	۳/۵	۰/۳	۱/۷۱۱	۰/۳۵	۳۵	۰/۱۱۶	۳۵
$\mu=0.10$								
۲۳۰	۳/۰۳	۱/۹۵	۰/۳	۱/۷۱۱	۰/۳۵	۱۶	۰/۱۶۹	۱۶
۳۲۰	۳/۵۷	۲/۲	۰/۳	۱/۷۱۱	۰/۳۵	۱۹	۰/۱۵۵	۱۹
۴۱۰	۴/۰۴	۲/۳۲	۰/۳	۱/۷۱۱	۰/۳۵	۲۰	۰/۱۵۰	۲۰
۶۲۰	۵	۲/۶۵	۰/۳	۱/۷۱۱	۰/۳۵	۲۴	۰/۱۳۸	۲۴
$\mu=0.15$								
۲۳۰	۳/۰۳	۱/۵۵	۰/۳	۱/۷۱۱	۰/۳۵	۱۵	۰/۱۹۹	۱۶
۳۲۰	۳/۵۷	۱/۷۰	۰/۳	۱/۷۱۱	۰/۳۵	۱۸	۰/۱۸۶	۱۹
۴۱۰	۴/۰۴	۱/۹۰	۰/۳	۱/۷۱۱	۰/۳۵	۱۹	۰/۱۳۲	۲۰
۶۲۰	۵	۲	۰/۳	۱/۷۱۱	۰/۳۵	۲۵	۰/۱۲۱	۲۴

غیرپالس‌گونه انتخاب شده‌اند. مشخصات این زلزله‌ها در جدول ۲ آمده است.

۱-۶- انتخاب و مقیاس شتابنگاشت‌ها

در این مقاله، فرض گردیده سازه در منطقه با خطر لرزه‌ای خیلی زیاد در ایران بنا شده است. بنابراین نسبت شتاب مبنای طرح برابر ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است خاک ساختگاه مورد نظر مطابق با استاندارد ۲۸۰۰، خاک نوع دو می‌باشد [۱۵]. روش مقیاس شتابنگاشت‌ها مطابق با آیین‌نامه 7-ASCE می‌باشد. برای انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه‌زمانی، هریک از هفت شتابنگاشت انتخاب شده به 1g مقیاس می‌شوند سپس برای شتابنگاشت مقیاس شده طیف میانگین رسم می‌شود (شکل ۳). ضریب مقیاس بگونه‌ای

۶- تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی

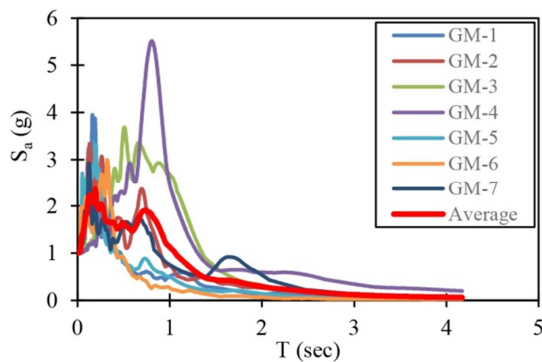
در این روش، تحلیل دینامیکی سازه با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان انجام می‌شود. شتابنگاشت‌های مورد استفاده در این مقاله با استفاده از سایت PEER حوزه نزدیک (فاصله تا مرکز کمتر از ۱۰ کیلومتر) انتخاب شده‌اند [۱۴]. همچنین برای ساختگاه با خاک نوع دو (سرعت موج برشی ۴۰۰-۷۶۰ m/s) و برای زلزله طرح (DBE^A) (با محدوده بزرگای ۳-۵) در نظر گرفته شده‌اند. هفت شتابنگاشت زلزله حوزه نزدیک پالس‌گونه و هفت شتابنگاشت زلزله حوزه نزدیک

⁸- Design Base Earthquake

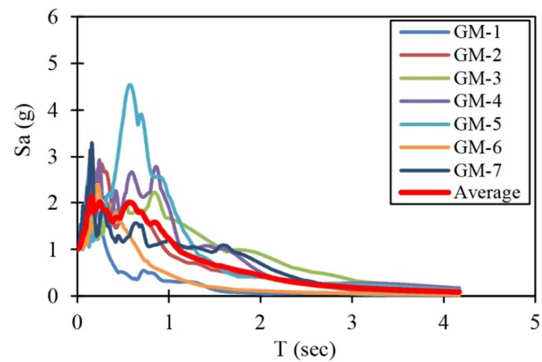
انتخاب می‌شود که در بازه ۰/۲ تا ۱/۵ برابر پریرود مؤثر سیستم جداسازی لرزه‌ای، طیف میانگین حاصل بالاتر از ۸۰ درصد طیف استاندارد قرار بگیرد. ضریب حاصل در ضریب مقیاس هریک از شتابنگاشت‌ها ضرب می‌شود و به عنوان ضریب مقیاس نهایی برای انجام تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۲- مشخصات زلزله‌های انتخاب شده.

ردیف شتابنگاشت	نام زلزله	سال	ایستگاه	فاصله تا مرکز (km)	سرعت موج برشی (m/sec)	بزرگای زلزله (M)
حوزه نزدیک پالس گونه						
۱	Morgan Hill	1984	Gilroy Array	۹/۸۵	۶۶۳	۶/۱۹
۲	San Salvador	1986	Geotech Investig Center	۲/۱۴	۴۸۹	۵/۸
۳	San Salvador	1986	National Geographical Inst	۳/۷	۴۵۵	۵/۸
۴	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHI 074	۶/۰۲	۵۵۳	۶/۲
۵	Parkfield	2004	Slack Canyon	۱/۶	۶۴۸	۶
۶	Parkfield	2004	Parkfield Cholame	۳/۳	۴۱۰	۶
۷	L'Aquila, Italy	2009	L'Aquila Parking	۵/۳	۷۱۰	۶/۳
حوزه نزدیک غیرپالس گونه						
۱	Coalinga	1983	Sulphur Baths	۹/۷۵	۶۱۷	۵/۷۷
۲	Whittier	1987	Pasadena - CIT Athenaeum	۴/۱۸	۴۱۵	۵/۹۹
۳	Chi-Chi	1999	TCU084	۸/۵۵	۶۵۵	۵/۹۰
۴	Chi-Chi	1999	TCU084	۹/۸	۶۷۱	۶/۲۰
۵	Parkfield	2004	Parkfield - JACK CANYON	۹/۴۶	۵۷۶	۶
۶	Parkfield	2004	Parkfield - UPSAR 11	۹/۴۱	۴۶۶	۶
۷	L'Aquila Italy	2009	L'Aquila - Parking	۵/۰۷	۷۱۷	۵/۶



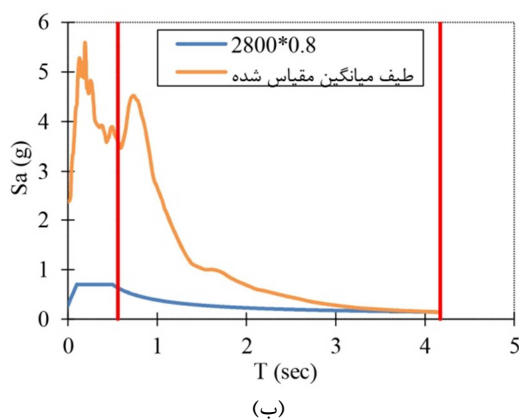
(ب)



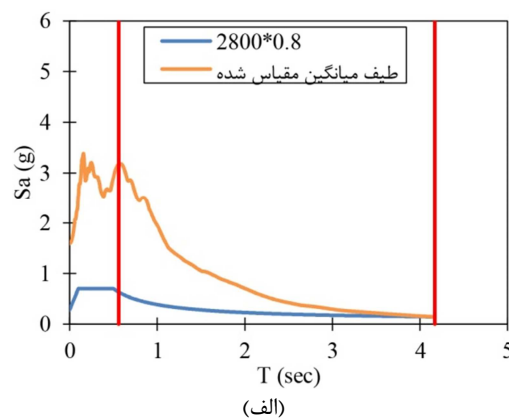
(الف)

شکل ۳- طیف میانگین حاصل از ۷ شتابنگاشت حوزه نزدیک (الف) پالس گونه و (ب) غیرپالس گونه

برای شتاب نگاشت‌های مربوط به زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه و مطابق شکل ۴-ب برای شتاب نگاشت‌های مربوط به زلزله‌های حوزه نزدیک غیرپالس‌گونه می‌باشد. جدول ۳ نیز ضرایب نرمال سازی و مقیاس نمودن را برای زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه و غیرپالس‌گونه نشان می‌دهد.



هریک از ۷ شتابنگاشت مقیاس‌شده به همراه ضریب مقیاس نهایی در نرم افزار OpenSees به جداساز اعمال می‌شوند. به عنوان نمونه، برای شعاع مؤثر ۲/۳ m و ضریب اصطکاک ۰/۰۳، مقایسه طیف مقیاس‌شده با ۸۰٪ طیف استاندارد زلزله طرح در بازه ۰/۲ تا ۱/۵ برابر پیرو مؤثر سیستم جداسازی لرزه‌ای، مطابق شکل ۴-الف



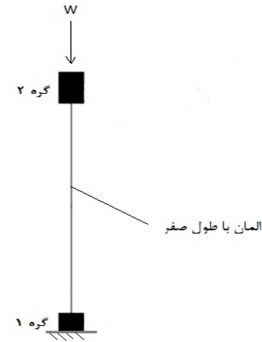
شکل ۴- طیف میانگین مقیاس‌شده زلزله‌های حوزه نزدیک (الف) پالس‌گونه و (ب) غیرپالس‌گونه برای جداساز با شعاع مؤثر ۲/۳ متر و ضریب اصطکاک ۰/۰۳

جدول ۳- تعیین ضریب مقیاس نهایی برای جداساز با شعاع مؤثر ۲/۳m و $R_e = 2/3$ و ضریب اصطکاک $\mu = 0/03$

ضریب مقیاس نهایی	ضریب مقیاس رکورد	ضریب نرمال سازی طیف	ردیف شتابنگاشت
زلزله حوزه نزدیک پالس‌گونه			
۳/۹	۲/۴۶	۱/۵۹	۱
۲/۲۶	۱/۴۲	۱/۵۹	۲
۳/۹۵	۲/۴۷	۱/۵۹	۳
۵/۴۴	۳/۱۰	۱/۵۹	۴
۷/۶۰	۴/۷۵	۱/۵۹	۵
۲/۷۸	۱/۷۴	۱/۵۹	۶
۴/۷۶	۲/۹۷	۱/۵۹	۷
زلزله حوزه نزدیک غیرپالس‌گونه			
۱۹/۱۵	۸/۰۶	۲/۳۷	۱
۱۳/۸۲	۵/۸۲	۲/۳۷	۲
۲۷/۸۶	۱۱/۷۴	۲/۳۷	۳
۱۷/۱۰	۷/۲۰	۲/۳۷	۴
۱۶/۲۰	۶/۸۲	۲/۳۷	۵
۱۰/۲۷	۴/۲۰	۲/۳۷	۶
۲۸/۴۷	۱۰/۹۸	۲/۳۷	۷

۲-۶- تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

در نرم افزار OpenSees جداساز مطابق شکل ۵ به عنوان یک المان با طول صفر به صورت دوبعدی با دوگره که یکی مقید شده است، مدل می‌شود.



شکل ۵- جداساز مدل شده در نرم افزار OpenSees

سپس هر شتابنگاشت به جداساز اعمال می‌شود و جابه‌جایی حاصل از هر تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

ثبت می‌شود. پس از انجام تحلیل برای جداساز تحت هریک از شتابنگاشت‌ها، میانگین مقادیر جابه‌جایی ثبت شده برای هفت شتابنگاشت پالس‌گونه و هفت شتابنگاشت غیرپالس‌گونه محاسبه می‌شود.

این فرایند برای ضریب اصطکاک ۰/۰۳، ۰/۰۶، ۰/۱ و ۰/۱۵ و شعاع ۲/۳، ۳/۲، ۴/۱ و ۶/۲ انجام می‌شود که نتایج آن برای زلزله‌های پالس‌گونه جدول ۴ و برای زلزله‌های غیرپالس‌گونه جدول ۵ می‌باشد. ستون انتهایی این جداول نسبت جابه‌جایی حداکثر را نشان می‌دهد که حاصل تقسیم جابه‌جایی حداکثر میانگین حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای هفت شتاب نگاشت در نظر گرفته شده، به جابه‌جایی حداکثر حاصل از روش ساده‌سازی شده آیین‌نامه موجود در جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۴- میانگین جابه‌جایی برای جداساز تحت زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه

R _e (cm)	D ₁ (cm)	D ₂ (cm)	D ₃ (cm)	D ₄ (cm)	D ₅ (cm)	D ₆ (cm)	D ₇ (cm)	جابه‌جایی میانگین (cm)	نسبت جابه‌جایی حداکثر
$\mu=0.03$									
۲۳۰	۷/۲	۵۰/۴	۱۱۴/۴	۸۷/۲	۸۲/۴	۱۶	۶۳/۲	۶۰/۴	۱/۷
۳۲۰	۹/۶	۵۱/۲	۱۴۷/۲	۱۴۰/۸	۱۱۶	۲۱/۶	۶۸	۷۹/۲	۱/۸۹
۴۱۰	۱۱/۲	۵۶	۱۶۸	۱۷۳/۶	۱۲۸/۸	۲۴/۸	۷۳/۶	۹۰/۸	۱/۸۸
۶۲۰	۱۵/۲	۶۶/۴	۱۶۳/۲	۱۵۸/۴	۱۴۷/۲	۳۱/۲	۸۲/۴	۹۴/۸	۱/۶۹
$\mu=0.06$									
۲۳۰	۷/۲	۳۲/۸	۸۶/۴	۵۷/۶	۴۸/۸	۹/۶	۴۶/۴	۴۱/۳	۱/۸۷
۳۲۰	۸	۳۹/۲	۱۰۷/۲	۹۸/۴	۷۴/۴	۱۲/۸	۵۶	۵۶/۶	۲/۲۳
۴۱۰	۸	۴۵/۶	۱۲۱/۶	۱۱۹/۲	۸۵/۶	۱۵/۲	۶۱/۶	۶۵/۳	۲/۳۲
۶۲۰	۸	۵۸/۴	۱۲۸/۸	۱۱۴/۴	۱۰۳/۲	۲۱/۶	۷۲	۷۲/۹	۲/۰۵
$\mu=0.10$									
۲۳۰	۴/۸	۲۶/۴	۵۴/۴	۳۲/۸	۲۶/۴	۴/۸	۳۳/۶	۲۵/۸	۱/۶۲
۳۲۰	۸	۳۲	۶۴/۸	۲۷/۲	۳۳/۶	۸	۴۴	۳۱/۳	۱/۶۷
۴۱۰	۸/۸	۳۴/۴	۶۸/۸	۵۶/۸	۳۹/۲	۸/۸	۴۶/۴	۳۷/۶	۱/۸۷
۶۲۰	۱۱/۲	۴۴/۸	۸۲/۴	۶۴	۵۴/۴	۱۰/۴	۵۶	۴۶/۲	۱/۹۲
$\mu=0.15$									
۲۳۰	۲/۴	۱۹/۲	۲۹/۶	۱۸/۴	۱۶/۸	۵/۶	۱۵/۲	۱۵/۳	۱/۲۹
۳۲۰	۲/۴	۲۳/۲	۳۶	۲۱/۶	۱۷/۶	۶/۴	۱۸/۴	۱۷/۹	۱/۳۴
۴۱۰	۳/۲	۲۶/۴	۴۱/۶	۲۶/۴	۲۲/۴	۶/۴	۲۵/۶	۲۱/۷	۱/۴۱
۶۲۰	۴	۲۸/۸	۴۴/۸	۳۵/۲	۲۷/۲	۶/۴	۳۲	۲۵/۵	۱/۵۴

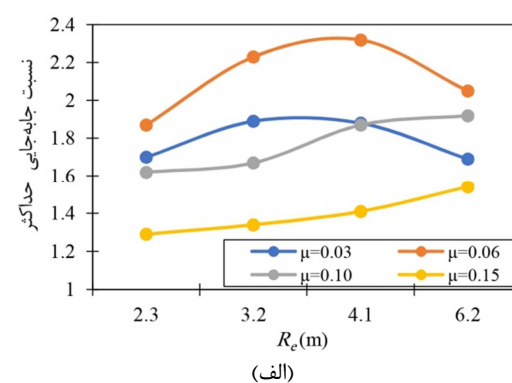
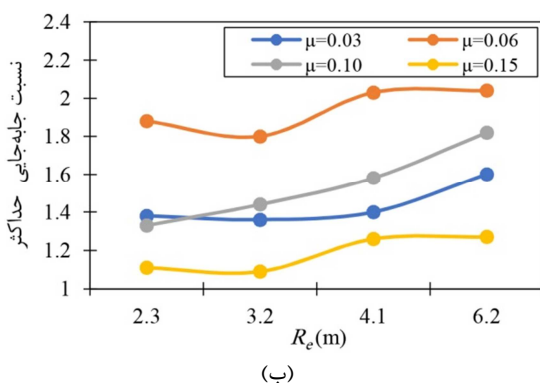
جدول ۵- میانگین جابه‌جایی برای جداساز تحت زلزله‌های حوزه نزدیک غیرپالس گونه

R_e (cm)	D_1 (cm)	D_2 (cm)	D_3 (cm)	D_4 (cm)	D_5 (cm)	D_6 (cm)	D_7 (cm)	جابه‌جایی میانگین (cm)	نسبت جابه‌جایی حداکثر
$\mu=0.03$									
۲۳۰	۱۸/۴	۵۷/۶	۶۲/۴	۱۱۲	۱۶/۸	۸	۷۰/۴	۴۹/۳۷	۱/۳۸
۳۲۰	۲۸	۵۴/۴	۶۰/۸	۱۴۸	۲۰/۸	۹/۶	۷۷/۶	۵۷/۰۳	۱/۳۶
۴۱۰	۳۰/۴	۵۷/۶	۷۱/۲	۱۹۲	۲۴/۸	۱۴	۲۰/۱۸	۶۷/۵۴	۱/۴
۶۲۰	۳۳/۶	۷۰/۴	۹۱/۲	۲۸۷/۲	۳۱/۲	۱۸/۴	۹۴/۴	۸۹/۴۹	۱/۶
$\mu=0.06$									
۲۳۰	۱۹/۸	۴۴	۴۷/۲	۱۰۸	۱۳/۶	۷/۲	۵۲	۴۱/۶	۱/۸۸
۳۲۰	۲۴/۸	۴۳/۲	۵۲/۸	۱۲۰	۱۴/۴	۸/۸	۵۶	۴۵/۷۱	۱/۸۰
۴۱۰	۲۸	۴۵/۶	۵۶	۱۸۶/۴	۱۶	۸/۸	۶۰	۵۷/۲۶	۲/۰۳
۶۲۰	۳۵/۲	۶۰/۸	۶۳/۲	۲۴۸/۸	۲۰/۸	۱۰/۴	۶۸/۸	۷۲/۵۶	۲/۰۴
$\mu=0.10$									
۲۳۰	۸/۸	۱۸/۴	۲۱/۶	۶۴	۷/۲	۳/۲	۲۶/۴	۲۱/۳۷	۱/۳۳
۳۲۰	۱۱/۲	۲۰	۳۲/۸	۸۲/۴	۹/۶	۵/۶	۲۷/۲	۲۶/۹۷	۱/۴۴
۴۱۰	۱۳/۶	۲۶/۴	۳۶	۱۰۰	۱۰/۴	۶/۴	۲۹/۶	۳۱/۷۶	۱/۵۸
۶۲۰	۱۸/۴	۳۲/۸	۴۵/۶	۱۵۲	۱۶	۶/۴	۳۶	۴۳/۸۹	۱/۸۲
$\mu=0.15$									
۲۳۰	۴/۸	۱۵/۲	۲۳/۲	۵۴/۴	۹/۶	۳/۲	۱۴/۴	۱۷/۸۲	۱/۱۱
۳۲۰	۶/۴	۱۹/۲	۲۵/۶	۶۲/۴	۹/۶	۴	۱۶	۲۰/۴۵	۱/۰۹
۴۱۰	۸/۸	۲۳/۲	۳۱/۲	۸۰	۱۰/۴	۴/۸	۱۹/۲	۲۵/۳۷	۱/۲۶
۶۲۰	۱۱/۲	۲۴/۸	۳۶/۸	۱۰۲/۴	۱۰/۴	۵/۶	۲۳/۲	۳۰/۶۰	۱/۲۷

پالس گونه و غیرپالس گونه ارائه می‌شود. رابطه بین نسبت جابه‌جایی حداکثر و شعاع مؤثر برای زلزله‌های پالس گونه و غیرپالس گونه برای ضرایب اصطکاک مختلف به ترتیب مطابق شکل ۶ می‌باشد.

۷- مقایسه نسبت جابه‌جایی حداکثر

در این بخش مقایسه مقدار جابه‌جایی حداکثر حاصل از روش‌های ساده‌سازی شده آیین‌نامه با جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحت زلزله‌های



شکل ۶- رابطه نسبت جابه‌جایی حداکثر و شعاع مؤثر در ضرایب اصطکاک ۰/۱۵ و ۰/۱، ۰/۰۶، ۰/۰۳، ۰/۰۱ (الف) پالس گونه و (ب) غیرپالس گونه

۸- بررسی اثر پالس‌گونگی

در این بخش نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی تحت زلزله‌های پالس‌گونه و غیرپالس‌گونه در شعاع مؤثر مختلف، مقایسه شده است. این مقایسه مطابق با شکل ۷ می‌باشد.

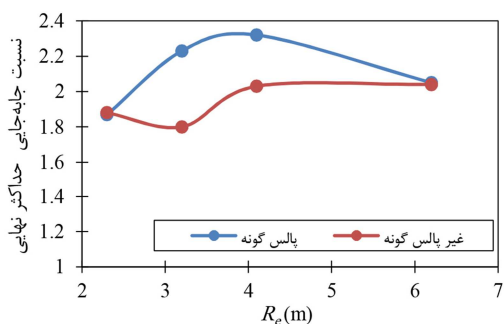
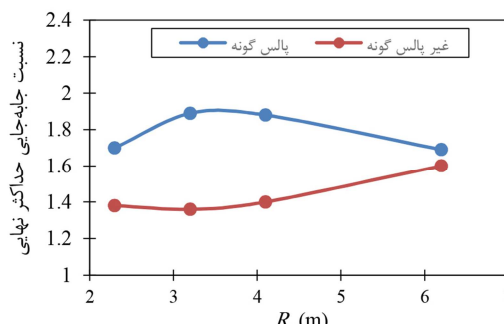
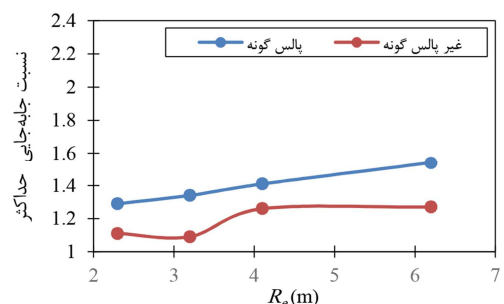
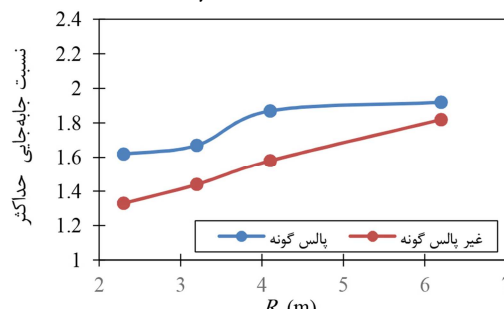
همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود با افزایش ضریب اصطکاک تا ۶ درصد نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی برای زلزله‌های پالس‌گونه افزایش می‌یابد و با افزایش ضریب اصطکاک بیشتر از ۶ درصد نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به جدول مشاهده می‌گردد با افزایش ضریب اصطکاک تا ۶ درصد نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی برای زلزله‌های غیرپالس‌گونه نیز افزایش می‌یابد و با افزایش ضریب اصطکاک بیشتر از ۶ درصد نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی کاهش می‌یابد. برای بررسی بیشتر اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار سازه‌های می‌توان به مراجع [۱۶ و ۱۷] مراجعه نمود.

همان‌طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی برای زلزله‌های حوزه‌نزدیک پالس‌گونه در تمامی ضرایب اصطکاک و شعاع‌های مؤثر، بیشتر از نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی تحت زلزله‌های غیرپالس‌گونه می‌باشد.

با توجه به شکل ۶- الف با افزایش شعاع مؤثر تا ۴/۱ متر نسبت جابه‌جایی حداکثر برای زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه افزایش می‌یابد. سپس برای ضرایب اصطکاک کمتر و مساوی ۶ درصد کاهش یافته و برای ضریب اصطکاک ۱۰ و ۱۵ درصد همچنان افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۶- ب با افزایش شعاع مؤثر تا ۳ متر برای ضریب اصطکاک ۰/۰۳، ۰/۰۶ و ۰/۱۵ نسبت جابه‌جایی حداکثر برای زلزله‌های حوزه‌نزدیک غیرپالس‌گونه کاهش می‌یابد. سپس با افزایش شعاع، نسبت جابه‌جایی حداکثر افزایش می‌یابد. برای ضریب اصطکاک ۱۰ درصد با افزایش شعاع، نسبت جابه‌جایی حداکثر افزایش می‌یابد. با مقایسه نتایج حاصل از روش‌های ساده‌سازی شده آیین‌نامه و نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه‌زمانی یک نسبت نهایی برای هر جداساز در ضریب اصطکاک ثابت به صورت میانگین‌گیری از نسبت‌های جابه‌جایی حداکثر برای شعاع مؤثرهای در نظر گرفته شده حاصل شد. این نسبت برای زلزله‌های پالس‌گونه و غیرپالس‌گونه مطابق با جدول ۶ می‌باشد. این نسبت نشان می‌دهد که روابط ساده‌سازی شده آیین‌نامه برای تعیین ظرفیت حداکثر جداساز آونگی اصطکاکی در زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه و غیرپالس‌گونه نسبت به مقدار جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه‌زمانی مقادیر کمتری می‌دهند.

جدول ۶- تعیین نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی برای زلزله‌های مختلف

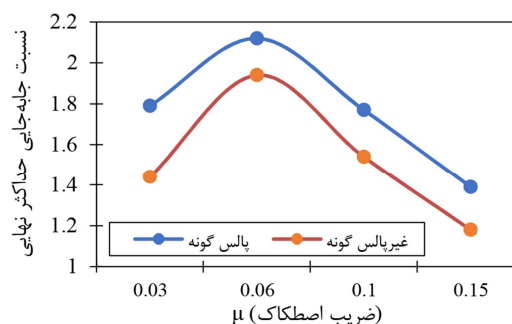
میانگین نسبت‌های جابه‌جایی حداکثر	μ
پالس‌گونه	
۱/۷۹	۰/۰۳
۲/۱۲	۰/۰۶
۱/۷۷	۰/۱۰
۱/۳۹	۰/۱۵
غیرپالس‌گونه	
۱/۴۴	۰/۰۳
۱/۹۴	۰/۰۶
۱/۵۴	۰/۱۰
۱/۱۸	۰/۱۵

 $\mu = 0.06$ (ب) $\mu = 0.03$ (د) $\mu = 0.15$ (ت) $\mu = 0.1$ (پ)

شکل ۷- مقایسه نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی تحت زلزله‌های پالس‌گونه و غیرپالس‌گونه در ضرایب اصطکاک مختلف

در این مقاله با معرفی رفتار جداساز آونگی اصطکاکی، پارامترهای اثرگذار بر عملکرد این جداساز و پاسخ روسازه تشریح گردیدند. سپس میزان جابه‌جایی حداکثر جداساز آونگی اصطکاکی حاصل از روش ساده‌سازی شده آیین‌نامه با جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی تحت زلزله‌های پالس‌گونه و غیرپالس‌گونه حوزه نزدیک، مقایسه گردید. در این راستا، ابتدا طبق روابط ساده‌سازی شده آیین‌نامه ASCE7-16 میزان جابه‌جایی حداکثر جداساز آونگی اصطکاکی برای چهار شعاع مؤثر (۲/۳، ۳/۲، ۴/۱، ۶/۲ متر) و چهار ضریب اصطکاک مختلف (۰.۳، ۰.۶، ۱.۰، ۱.۵ درصد)، در مجموع ۱۶ حالت، تعیین شد. با فرض یک مقدار جابه‌جایی و انجام یک فرآیند تکرار شونده مقادیر جابه‌جایی همگرا شده برای هر شعاع مؤثر و ضریب اصطکاک محاسبه شد. سپس هفت شتابنگاشت زلزله حوزه نزدیک پالس‌گونه و هفت شتابنگاشت زلزله حوزه نزدیک غیرپالس‌گونه برای ساختگاه با خاک تپ دو و مطابق زلزله طرح برای مناطق با خطر نسبی خیلی زیاد واقع در ایران مطابق تعریف استاندارد ۲۸۰۰ انتخاب شد.

در شکل ۸، نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی تحت زلزله‌های پالس‌گونه و غیر پالس‌گونه در ضرایب اصطکاک مختلف مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی برای زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه در تمامی ضرایب اصطکاک، بیشتر از نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی برای زلزله‌های حوزه نزدیک غیرپالس‌گونه می‌باشد.



شکل ۸- مقایسه نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی تحت زلزله‌های پالس‌گونه و غیرپالس‌گونه در ضرایب اصطکاک مختلف

۹- نتیجه گیری و جمع بندی

۳- به عنوان یک میزان محافظه‌کارانه می‌توان نسبت جابه‌جایی حداکثر $2/2$ برای جداسازهای آونگی اصطکاکی تحت زلزله‌های پالس‌گونه مستقل از ضریب اصطکاک و شعاع مؤثر در نظر گرفت.

۴- در حالت جداساز تحت زلزله‌های حوزه نزدیک غیرپالس‌گونه، با افزایش شعاع مؤثر تا $3/2$ متر برای ضریب اصطکاک ۳ درصد، ۶ درصد و ۱۵ درصد نسبت جابه‌جایی حداکثر کاهش می‌یابد. سپس با افزایش شعاع مؤثر، نسبت جابه‌جایی حداکثر افزایش می‌یابد. برای ضریب اصطکاک ۱۰ درصد با افزایش شعاع نسبت جابه‌جایی حداکثر افزایش می‌یابد. همچنین مشابه با حالت پالس‌گونه، با افزایش ضریب اصطکاک تا ۶ درصد نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی افزایش می‌یابد و با افزایش ضریب اصطکاک به بیشتر از ۶ درصد نسبت جابه‌جایی حداکثر نهایی کاهش می‌یابد.

۵- به عنوان یک میزان محافظه‌کارانه می‌توان ضریب ۲ برای جداسازهای آونگی اصطکاکی تحت زلزله‌های غیرپالس‌گونه در نظر گرفت.

۶- مقادیر نسبت جابه‌جایی حداکثر برای زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه در تمامی مقادیر ضرایب اصطکاک و شعاع مؤثر بیشتر از نسبت جابه‌جایی حداکثر زلزله‌های حوزه نزدیک غیر پالس‌گونه می‌باشد.

با وجود آن‌که ضرایب مقیاس شتاب نگاشت‌ها به گونه‌ای بوده است که منطبق بر زلزله طرح با دوره بازگشت تقریباً ۴۷۵ ساله باشند، روش توصیه شده آیین‌نامه‌ای مورد استفاده برای مقیاس کردن شتاب نگاشت‌ها تاثیر قابل توجهی بر نتایج دارد. در آخر، اضافه می‌گردد، از نتایج این پژوهش می‌توان در روند طراحی زیر ساخت‌های عمرانی با فرض روسازه صلب مانند پل‌ها استفاده نمود.

این شتابنگاشت‌ها طبق استاندارد ASCE-7 مقیاس شده و در نرم‌افزار OpenSees به جداساز اعمال شدند. در ادامه مقدار جابه‌جایی طبق روابط ساده‌سازی شده آیین‌نامه با جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه‌زمانی مقایسه شد تا تفاوت آنچه آیین‌نامه پیش‌بینی کرده‌است با آنچه در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی اتفاق می‌افتد برای زلزله‌های حوزه نزدیک مشاهده شود.

با انجام این مقایسه نتایج زیر حاصل شد:

۱- برای زلزله‌های پالس‌گونه و غیر پالس‌گونه حوزه نزدیک گسل روابط آیین‌نامه مقدار جابه‌جایی حداکثر کمتری را نسبت به مقدار جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی نشان می‌دهند.

۲- در حالت جداساز تحت زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه، با افزایش شعاع مؤثر تا $4/1$ متر، برای تمامی ضرایب اصطکاک نسبت جابه‌جایی حداکثر افزایش می‌یابد. سپس برای ضرایب اصطکاک کمتر و مساوی ۶ درصد نسبت جابه‌جایی حداکثر کاهش یافته و برای ضریب اصطکاک ۱۰ و ۱۵ درصد همچنان افزایش می‌یابد. همچنین برای تمامی شعاع‌های مؤثر، با افزایش ضریب اصطکاک تا ۶ درصد نسبت جابه‌جایی حداکثر افزایش می‌یابد. سپس با افزایش تا ۱۵ درصد نسبت جابه‌جایی حداکثر کاهش می‌یابد. در ضرایب اصطکاک کم، تجاوز نیرو در لحظات اولیه زلزله از میزان نیروی اصطکاکی مورد نیاز برای لغزش جداساز باعث افزایش زیاد پرورد سازه جداسازی شده می‌گردد و نیروی ناشی از زلزله کاهش می‌یابد. در ضرایب اصطکاک بالا نیز عملاً لغزش تا قبل از اثرات دفعی شتاب در زلزله‌های حوزه نزدیک لغزش رخ نمی‌دهد.

منابع

- [1] Zayas, V. A., Low, S. A., Bozzo, L., & Mahin, S. A. (1989). *Feasibility and performance studies on improving the earthquake resistance of new and existing buildings using the friction pendulum system*. Earthquake Engineering Research Center.
- [2] Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2007). Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis. *Earthquake Spectra*, 24(4), 1011-1028.
- [3] Fenz, D. M. (2008). *Development, implementation and verification of dynamic analysis models for multi-spherical sliding bearings*. State University of New York at Buffalo, MCEER Report 08-0018
- [4] Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2008). Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Experimental verification. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 37(2), 185-205.
- [5] Turner, W. (2007). Personal communication and unpublished engineering calculations. *Wilson EL. Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures*.
- [6] Constantinou, M. C., Kalpakidis, I., Filiatrault, A., Ecker Lay, R.A., (2011). "LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators." Technical Rep. No. MCEER-11-0004
- [7] American Society of Civil Engineers (ASCE) (2016) "Minimum design loads of buildings and other structures." ASCE/SEI 7-16, Reston, VA.
- [8] Hamida, M., Filiatrault, A., & Aref, A. (2015). Seismic collapse capacity-based evaluation and design of frame buildings with viscous dampers using pushover analysis. *Journal of Structural Engineering*, 141(6), 04014153.
- [9] Hamidia, M., Filiatrault, A., & Aref, A. (2014). Simplified seismic sidesway collapse analysis of frame buildings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 43(3), 429-448.
- [10] Hamidia, M., Filiatrault, A., & Aref, A. (2014). Simplified seismic sidesway collapse capacity-based evaluation and design of frame buildings with linear viscous dampers. *Journal of Earthquake Engineering*, 18(4), 528-552.
- [11] Hamidia, M., Filiatrault, A. and Aref J. A. 2014. Simplified Seismic Collapse Capacity-Based Evaluation and Design of Frame Buildings with and without Supplemental Damping Systems, Technical Report MCEER-14-0001, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY, 283 p
- [12] Hamidia, M., Shokrollahi, N., & Nasrolahi, M. (2021, August). Soil-structure interaction effects on the seismic collapse capacity of steel moment-resisting frame buildings. In *Structures* (Vol. 32, pp. 1331-1345). Elsevier.
- [13] Dolatshahi, K. M., Vafaei, A., Kildashti, K., & Hamidia, M. (2019). Displacement ratios for structures with material degradation and foundation uplift. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(9), 5133-5157.
- [14] Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/search>.
- [15] Standard No. 2800 (Ed.) (2014) Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (IS 2800-14). Building and Housing Research Centre, Tehran, Iran
- [16] Mohammadi Dehcheshmeh, E., & Broujerdian, V. (2021). Seismic Design Coefficients of Self-Centering Multiple Rocking Walls Subjected to Effect of Far and Near-Field Earthquakes. *Civil Infrastructure Researches*, 7(1 (In progress)), 17-36.
- [17] Shirvani Harandi, V., Meshkat-Dini, A., Massumi, A. (2019). Analytical comparison between seismic performance of middle-rise bundled tube and 3d moment frame structures, *Civil Infrastructure Researches*, 4 (2).