



# Journal of Structural and Construction Engineering

[www.jsce.ir](http://www.jsce.ir)



## Influence of Dynamic Interaction Between Interconnected Electrical Substation Equipment on Seismic Response

Amir Ghahremani Baghmisheh<sup>1</sup>, Homayoon E. Estekanchi<sup>2\*</sup>

1- Master, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2 -Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

### ABSTRACT

*Effects of dynamic interaction between substation equipment in multi-connected systems on seismic response have been investigated. Also, influence of record to record and intensity variability on interaction results is studied. Three dimensional models of four vulnerable types of equipment including surge arrester, current transformer, circuit breaker and disconnect switch are developed and verified. Six different systems of equipment connected through rigid bus bars comprising of two, three and four equipment are considered. Incremental dynamic analysis is carried out on models using three-component records. Ratio of maximum responses in connected condition to those in unconnected condition has been utilized as interaction measure. Considering more than two-connected equipment and using three dimensional models are novelties of this paper. Importance of considering more than two-connected equipment has been demonstrated. It is found that for equipment in which contribution of higher modes on responses are notable, variation of ground motion features such as frequency content have more effect on interaction results than equipment in which natural frequency is dominant on responses. It is concluded that variability of record has more significant influence on interaction results than variation of seismic intensity.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 12 February 2019

**Revise Date:** 14 March 2020

**Accept Date:** 02 April 2020

### Keywords:

*Electrical substation*

*Interconnected equipment*

*Dynamic interaction*

*Incremental dynamic analysis*

*Seismic response*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.171843.1784>

\*Corresponding author: Homayoon Estekanchi

Email address: [stkanchi@sharif.edu](mailto:stkanchi@sharif.edu)

## تأثیرات اندرکنش دینامیکی بین تجهیزات متصل پست‌های برق بر پاسخ لرزه‌ای

امیر قهرمانی باغمیشه<sup>۱</sup>، همایون استکانچی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### چکیده

تأثیرات اندرکنش دینامیکی بین تجهیزات پست‌های برق در سیستم‌های چند تجهیزه متصل بر پاسخ لرزه‌ای بررسی شده است. همچنین تأثیرات تغییر پذیری رکورد و تغییرات شدت لرزه‌ای بر نتایج اندرکنش مطالعه شده است. مدل‌های سه بعدی برای چهار تجهیز آسیب-پذیر پست‌های برق شامل برق گیر، ترانس جریان، کلید قدرت و سکسیونر توسعه و صحت سنجی شده است. شش سیستم مختلف از تجهیزات متصل توسط المان‌های هادی صلب شامل سیستم‌های دو، سه و چهار تجهیزه در نظر گرفته شده‌اند. تحلیل دینامیکی افزایشی با استفاده از رکوردهای سه مولفه‌ای بر روی مدل‌ها انجام شده است. سپس نسبت ماکزیمم پاسخ‌ها در شرایط متصل به ماکزیمم پاسخ‌ها در شرایط غیر متصل برای ارزیابی اثرات اندرکنش استفاده شده است. در نظر گرفتن بیش از دو تجهیز متصل و استفاده از مدل‌های سه بعدی از نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد. اهمیت در نظر گرفتن بیش از دو تجهیز متصل در مطالعات اندرکنش نشان داده شده است. نتیجه شده که تغییرات مشخصات حرکت زمین مانند محتوای فرکانسی تأثیر بیشتری بر نتایج اندرکنش تجهیزاتی داشته که مشارکت مودهای بالاتر بر پاسخ آن‌ها قابل توجه است. بعلاوه نتیجه شده که تغییر پذیری رکورد نسبت به تغییرات شدت لرزه‌ای تأثیر بیشتری بر میزان تقلیل یا تشدید پاسخ‌ها به دلیل وجود اثرات اندرکنش دارد.

کلمات کلیدی: پست‌های برق، تجهیزات متصل، اندرکنش دینامیکی، تحلیل دینامیکی افزایشی، پاسخ لرزه‌ای.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.171843.1784
۱۳۹۷/۱۱/۲۳	۱۳۹۸/۱۲/۲۴	۱۳۹۹/۰۱/۱۴	۱۳۹۹/۰۱/۱۴	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2020.171843.1784
*نویسنده مسئول:		همایون استکانچی			
پست الکترونیکی:		stkanchi@sharif.edu			

## ۱- مقدمه

پست‌های برق، به عنوان گره‌های شبکه انتقال برق، یکی از شریان‌های حیاتی محسوب می‌شوند که حفظ قابلیت خدمت رسانی آن‌ها پس از زلزله‌های شدید از اهمیت بالایی برخوردار است. از دست رفتن عملکرد برق رسانی پست در اثر زلزله می‌تواند باعث ایجاد اختلال در عملکرد سایر شریان‌های حیاتی، مانند شبکه آبرسانی، شود. بعلاوه، خسارت‌های مالی مستقیم ناشی از زلزله در پست‌های برق معمولاً مقادیر قابل توجهی است. در زلزله سال ۱۹۷۹ فرناندو، ارزش تجهیزات یکی از پست‌های برق ۷۶ میلیون دلار تخمین زده شده بود. خسارت مستقیم ناشی از زلزله حدود ۵۰ درصد این مقدار بوده است [1].

پست‌های برق از تجهیزات متنوعی تشکیل می‌شوند. از این بین می‌توان به برق‌گیر<sup>۱</sup> (SA)، ترانس جریان<sup>۲</sup> (CT)، کلید قدرت<sup>۳</sup> (CB) و سکسیونر<sup>۴</sup> (DS) اشاره کرد. اکثر تجهیزات از مقره‌های<sup>۵</sup> سرامیکی لاغر با جرم متمرکز در بالای آن‌ها تشکیل می‌شوند که آسیب پذیری آن‌ها را در برابر نیروهای زلزله افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، وجود المان‌های هادی باعث انتقال نیرو بین تجهیزات و تغییر رفتار آن‌ها می‌شود.

اتصال بین تجهیزات از طریق المان‌های هادی صلب<sup>۶</sup> یا کابل‌های انعطاف پذیر برقرار می‌شود. المان‌های هادی صلب شامل میله آلومینیومی و اتصال دهنده انعطاف پذیر در یک انتهای آن می‌باشند. دو نوع رایج اتصال دهنده شامل اتصال دهنده تسمه‌ای انعطاف پذیر<sup>۷</sup> (FSC) و لغزنده شینه<sup>۸</sup> (BS) می‌باشد. اگرچه اتصال دهنده‌ها برای اثرات ناشی از انبساط حرارتی طراحی می‌شوند، قابلیت انعطاف پذیری و استهلاک انرژی آن‌ها باعث کاهش اثرات شدید اندرکنش بین تجهیزات در اثر تحریک‌های اعمالی نسبت به حالت بدون وجود اتصال دهنده‌ها می‌شود. از طرف دیگر فراگذشت ظرفیت جابجایی اتصال دهنده‌ها ممکن است باعث ایجاد نیروی ضربه‌ای شدید به تجهیزات و افزایش شدید اثرات اندرکنش شود. کابل‌ها به عنوان نوع دیگری از المان‌های هادی بسته به لقی آن‌ها ممکن است باعث افزایش یا کاهش پاسخ تجهیزات شوند. بنابراین تجهیزات متصل یک سیستم دینامیکی پیچیده می‌باشد.

کفایت سنجی لرزه‌ای تجهیزات با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه معمولاً بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش صورت می‌گیرد [2]، [3]، [4] و [5]. دلیل این موضوع تنوع زیاد تجهیزات متصل و المان‌های هادی در پست‌ها می‌باشد. بعلاوه انجام آزمایش میز لرزه بر روی چندین تجهیز متصل به هم به دلایل محدودیت‌های آزمایشگاهی و مالی عملی نمی‌باشد. اگرچه روش‌های جدیدی همانند شبیه سازی ترکیبی<sup>۹</sup> برای انجام آزمایش روی تجهیزات متصل توسعه داده شده که نیاز به فضای آزمایشگاهی کمتری دارد [6]، اما انجام چنین آزمایش‌هایی مستلزم امکانات آزمایشگاهی هوشمند می‌باشد که به راحتی در دسترس نمی‌باشد. بنابراین مدل‌های عددی صحیح می‌توانند جهت ارزیابی تاثیرات اندرکنش بین تجهیزات بر پاسخ‌ها و شکنندگی استفاده شوند.

در اواخر دهه ۱۹۹۰ مرکز تحقیقات صلح آمیز زلزله (PEER) با همکاری مرکز گاز و برق آمریکا (PG&E) پروژه‌ای جهت ارزیابی اثرات اندرکنش بین تجهیزات و ارائه راهنمایی برای کاهش این اثرات شروع کرد. ابتدا در کیورگیان و همکاران [7] به صورت تحلیلی اندرکنش بین دو تجهیز را بررسی کردند. تجهیزات را با سیستم‌های تک درجه آزادی و المان‌های هادی صلب را با سیستم فنر-میراگر-جرم خطی مدل کردند. به منظور ارزیابی تاثیر پارامترهای سیستم بر اندرکنش، مطالعه پارامتریک گسترده‌ای انجام گرفت. سپس یک مطالعه آزمایشگاهی جهت تولید داده‌های صحت سنجی برای تحلیل‌های عددی در دانشگاه سن دیگو کالیفرنیا (UCSD) انجام گرفت [8]. در آن مطالعه تست‌های چرخه‌ای بر روی سه نمونه اتصال دهنده FSC و یک نمونه اتصال دهنده BS انجام شد. همچنین انجام آزمایش میز لرزه بر روی پنج جفت تجهیزات متصل به وسیله المان‌های هادی صلب بخش دیگری از مطالعه [8] بوده است. در ادامه پروژه PEER،

1-Surge arrester

2-Current transformer

3-Circuit breaker

4-Disconnect switch

5-Insulators

6 Rigid bus conductor

7 Flexible strap connector

8 Bus slider

9 Real time hybrid simulation (RTHB)

در کیورگیان و همکاران [9] با استفاده از روش المان محدود با جزئیات، مدل اتصال دهنده خطی را به نوع غیر خطی توسعه دادند. آنها همچنین یک مدل ریاضی برای رفتار هیستریزس FSC با تطبیق نتایج تحلیل با آزمایش [8] ارائه دادند. تاثیرات انعطاف پذیری و استهلاک انرژی FSC بر نتایج اندرکنش با مطالعه پارامتریک ارزیابی شد. ذکر این نکته قابل توجه است که صرفاً دو رکورد زلزله در آن مطالعه استفاده شد. در سال ۲۰۰۴، تست‌های چرخه‌ای شبه استاتیکی بر روی دو نمونه اتصال دهنده بهبود یافته توسط [10] انجام گرفت. بعلاوه، آزمایش میز لرزه بر روی تجهیزات متصل توسط اتصال دهنده‌های بهبود یافته انجام گرفت. پس از آن، سانگ و همکاران [11] مدل‌های ریاضی برای بیان رفتار غیر خطی اتصال دهنده‌های آزمایش شده در مطالعه‌های [8] و [10] توسعه دادند. نهایتاً، داستوس و در کیورگیان [12] یک روند برای طراحی لرزه‌ای تجهیزات پیشنهاد دادند که در آن اثرات اندرکنش با یک سری روابط ساده شده در نظر گرفته شده است. علاوه از پروژه PEER، رویکردهای متنوعی برای طراحی لرزه‌ای المان‌های هادی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش توسعه داده شده است [13,14].

ارزیابی اثرات اندرکنش در پروژه‌های تحلیلی PEER شامل محدودیت‌هایی است که عبارتند از: (۱) اثرات مودهای بالاتر بر پاسخ-های سازه به دلیل استفاده از سیستم‌های تک درجه آزادی برای مدل‌سازی تجهیزات در نظر گرفته نشده است، (۲) فقط دو تجهیز متصل به هم مطالعه شده و اثرات اتصال بیش از دو تجهیز بررسی نشده است، (۳) تعداد محدودی رکورد زلزله و صرفاً یک مولفه افقی آن‌ها در ارزیابی اثرات اندرکنش استفاده شده است. در مطالعه [15] محدودیت دو تجهیز متصل برای تجهیزات متصل با کابل رفع شده است.

با توجه به کاستی‌های ذکر شده در مطالعات قبلی، اهداف مطالعه حاضر شامل بررسی تاثیرات اندرکنش دینامیکی بر پاسخ تجهیزات با استفاده از مدل‌های سه بعدی، زمانی که بیش از دو تجهیز به یکدیگر متصل می‌باشند و بررسی تاثیرات تغییرپذیری رکورد و شدت زلزله بر نتایج اندرکنش می‌باشد.

در بخش ۲، ابتدا روش انجام تحقیق شرح داده شده است، سپس در بخش ۳، نحوه مدل‌سازی تجهیزات در شرایط خود-ایستا و متصل به تجهیزات دیگر ارائه و صحت پاسخ غیرخطی سیستم تجهیزات متصل بررسی شده است. در بخش ۴، به انتخاب و مقیاس‌سازی رکوردهای زلزله برای انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی پرداخته شده است. نتایج اندرکنش دینامیکی و بحث روی نتایج در بخش ۵ ارائه شده است. نهایتاً بخش ۶ به ارائه جمع‌بندی و نتایج عمده حاصل اختصاص داده شده است.

## ۲- روش تحقیق

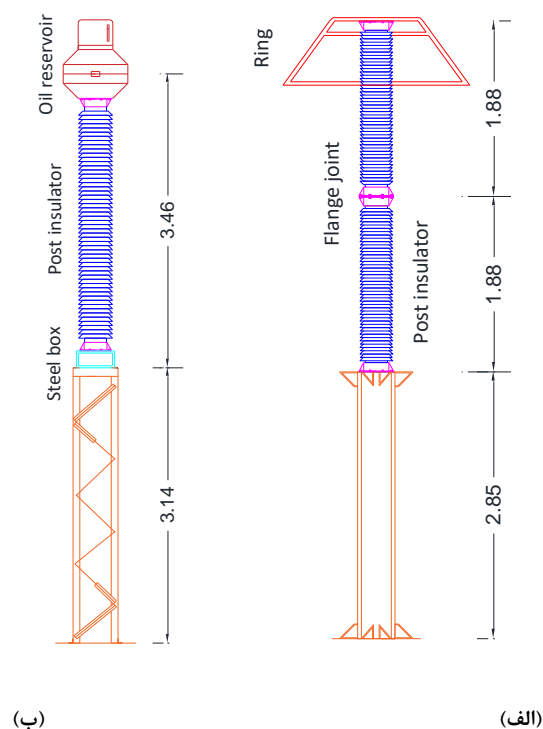
با توجه به اهداف پژوهش، مدل‌های سه بعدی برای تجهیزات ۴۰۰ کیلوولت به همراه سازه نگهدارنده آن‌ها توسعه داده شده است. برق‌گیر، ترانس جریان، کلید قدرت و سکسیونر تجهیزات مورد بررسی در این مطالعه می‌باشند که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. اطلاعات لازم برای مدل‌سازی تجهیزات از شرکت برق منطقه‌ای تهران تامین شده است. برای صحت سنجی تجهیزات در شرایط خود-ایستا، نتایج تحلیل مودال با فرکانس‌های گزارش شده توسط شرکت سازنده و یا آزمایش‌های انجام گرفته بر روی تجهیزات مشابه مقایسه شده است. سپس یک مدل غیرخطی برای بیان رفتار اتصال دهنده BS توسعه داده شده است. به منظور صحت سنجی مدل غیرخطی مربوط به اتصال دهنده از آزمایش چرخه‌ای انجام شده در مطالعات پیشین استفاده شده است. شش سیستم مختلف از تجهیزات که توسط المان‌های هادی صلب به یکدیگر متصل شده‌اند در نظر گرفته شده است. از بین این شش سیستم، سه سیستم به صورت دو تجهیزه، دو سیستم به صورت سه تجهیزه و یک سیستم به صورت چهار تجهیزه می‌باشد. در نظر گرفتن تعداد مختلف تجهیزات متصل در سیستم‌های مورد بررسی، امکان بررسی حساسیت نتایج اندرکنش بر تعداد تجهیز را فراهم می‌کند.

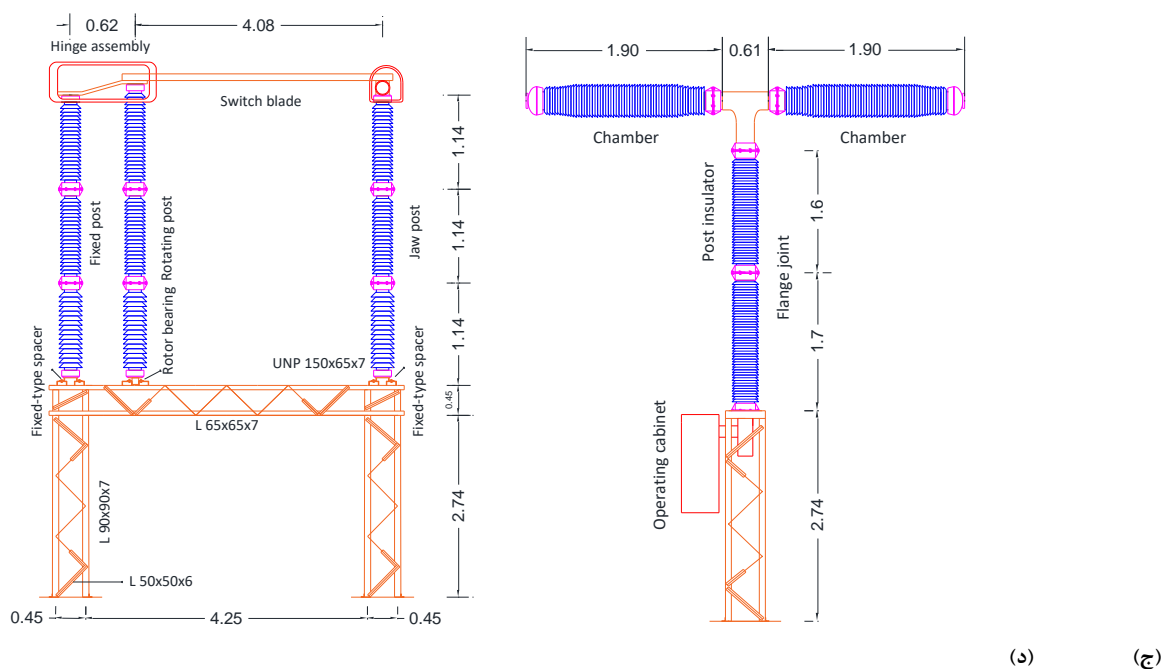
برای بررسی اثرات اندرکنش، رکوردهای سه مولفه‌ای دور از گسل ارائه شده در FEMA695 انتخاب و به سطوح شدت لرزه‌ای افزایش یافته مقیاس شده‌اند. بیشینه شتاب زمین (PGA) به عنوان معیار شدت در نظر گرفته شده و رکوردها از 0.1g تا 1.5g با گام 0.1g مقیاس شده‌اند. تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) با استفاده از رکوردهای مقیاس شده بر روی تجهیزات خود-ایستا و سیستم‌های متصل تجهیزات انجام شده است. بیشینه تنش در پای مقره‌های سرامیکی تجهیزات و بیشینه جابجایی در نقطه اوج تجهیزات به عنوان پارامترهای

پاسخ انتخاب شده‌اند. دلیل انتخاب این پارامترها ارتباط آن‌ها با خرابی‌های مشاهده شده در زلزله‌های گذشته می‌باشد. نهایتاً نسبت پاسخ در شرایط متصل به پاسخ در شرایط خود-ایستا به عنوان معیار ارزیابی اثرات اندرکنش انتخاب شده است. با رسم نسبت‌های پاسخ در برابر PGA به تفسیر نتایج پرداخته شده است.

### ۳- مدل‌سازی و صحت‌سنجی

مقره‌های سرامیکی جزء مشترک تمام تجهیزات مورد بررسی در این مطالعه می‌باشد. مقره‌های سرامیکی به وسیله اتصالات فلنجی به یکدیگر و سایر قسمت‌های تجهیزات متصل می‌شوند. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی گذشته، سیستم مقره‌های سرامیکی به همراه اتصال فلنجی تا لحظه فروریزش رفتار خطی از خود نشان می‌دهند [5]، [3]. البته شکل پذیری اتصال فلنجی بعضاً باعث رفتار جزئی هیستریزس در برخی آزمایش‌های چرخه‌ای شده است. بنابراین مقره و اتصال فلنجی دارای شکل پذیری و سختی متفاوت می‌باشند. بعلاوه، هندسه لبه‌دار مقره‌ها و وجود ماده چسبنده بین مقره و اتصال فلنجی تعیین مشخصات سازه‌ای آن‌ها را پیچیده می‌کند. بنابراین در این پژوهش، از مطالعات آزمایشگاهی یا مدل‌های رگرسیون کالیبره شده بر اساس آزمایش جهت تعیین سختی خمشی معادل مقره‌ها و سختی دورانی اتصالات فلنجی بهره گرفته شده است.





شکل ۱: شکل شماتیک تجهیزات (الف) برق گیر، (ب) ترانس جریان، (ج) کلید قدرت و (د) سکسیونر.

به منظور تعیین سختی خمشی مقره‌ها و سختی دورانی اتصال فلنجی، مدل‌های رگرسیون پیشنهادی توسط [16] به کار گرفته شده است. این مدل‌ها بر اساس داده‌های ۱۲ آزمایش انجام شده روی سیستم‌های مقره به همراه اتصال فلنجی توسعه داده شده‌اند. بعلاوه صحت روابط توسط آزمایش میز لرزه [2] نیز بررسی شده است. این روابط در زیر خلاصه شده‌اند [16].

سختی خمشی ستون سرامیکی لبه دار به صورت زیر می‌باشد.

$$EI_s = \lambda_s EI_{eq} \quad (1)$$

که در آن

$$\text{where } 0.215m < D_c < 0.7m \quad \lambda_s = 1.045 + 5 \times 10^{-3} D_c^{-2} \quad (2)$$

$$EI_{eq} = (1/64)\pi(D_c^4 - d^4)E_p \quad (3)$$

و سختی دورانی اتصال بالی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$K_c = \lambda_c D_c h_c / t_e \quad (4)$$

که در آن

$$\lambda_c = 5.25 \times 10^7 h_c \quad \text{where } 0.075m < h_c < 0.35m \quad (5)$$

$$\lambda_c = 6.54 \times 10^7 h_c \quad \text{where } h_c < 0.075m \quad (6)$$

که  $D_c$  و  $d$  به ترتیب قطر خارجی و داخلی مقره لبه دار می‌باشند.  $E_p$  نشان دهنده مدول الاستیسیته سرامیک می‌باشد. همچنین،  $h_c$  و  $t_e$  به ترتیب بیانگر ارتفاع و ضخامت چسبنده می‌باشند که سطح خارجی مقره را به اتصال فلنجی پیوند می‌دهند.

نرم افزار OpenSees جهت مدل سازی عددی و تحلیل دینامیکی تجهیزات استفاده شده است [17]. براساس سختی خمشی و قطر بیرونی مقره ( $D_c$ )، سطح مقطع معادل لوله ای برای هریک از ستون های سرامیکی به دست آمده و از المان تیر ستون الاستیک برای مدل سازی استفاده شده است. اتصالات فلنجی با استفاده از فنرهای خطی با طول صفر مدل سازی شده اند. جرم هر یک از مقره ها به صورت گسترده یکنواخت در طول آن ها در نظر گرفته شده است. همچنین جرم های اضافی در بالا و پایین ستون های سرامیکی به صورت متمرکز مدل شده اند. سازه نگهدارنده تجهیزات ستون فولادی با مقطع لوله ای و یا سازه های مشبک فلزی با مقاطع نبشی می باشد. از المان DispBeamColumn با مقطع فایبر جهت مدل سازی سازه های نگهدارنده استفاده شده است.

مدل تحلیلی تجهیزات به همراه مقدار جرم متمرکز هر تجهیز در شکل ۲ نشان داده شده است. مدول الاستیسیته سرامیک برابر  $10.0E+10$  Pa، ارتفاع و ضخامت چسبنده اتصال فلنجی به مقره به ترتیب برابر 90mm و 7.5mm در نظر گرفته شده است. سایر مشخصات سازه ای تجهیزات شامل سختی دورانی اتصالات فلنجی، قطر داخلی و خارجی مقره ها، و وزن هر یک از واحدهای سرامیکی در جدول ۱ لیست شده است. مشخصات سازه نگهدارنده هر یک از تجهیزات در جدول ۲ ارائه شده است.

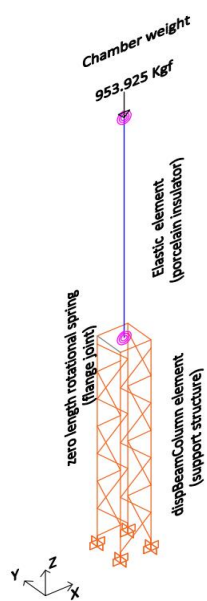
جدول ۱: مشخصات سازه ای تجهیزات.

Equipment	Position of porcelain unit	Flange joint stiffness (N m/rad)	Dc (m)	d (m)	Weight (kgf)
Surge arrester	Top	$13.55 \times 10^6$	0.37	0.353	258
	Bottom	$13.55 \times 10^6$	0.37	0.353	258
Current transformer	Top <sup>1</sup>	$24.19 (11.04) \times 10^6$	0.48	0.442	826.07
Circuit breaker	Top <sup>1</sup>	$5.51 (10.93) \times 10^6$	0.342	0.328	141.16
	Bottom <sup>1</sup>	$10.93 (13.61) \times 10^6$	0.348	0.333	158.29
	Left	$10.55 \times 10^6$	0.441	0.401	383.05
	Right	$10.55 \times 10^6$	0.441	0.401	383.05
Disconnect switch	Top	$1.85 \times 10^6$	0.172	0.117	$58.66^3$
	Middle	$1.85 \times 10^6$	0.197	0.13	$78.5^3$
	Bottom <sup>2</sup>	$0.39 (0.31) \times 10^6$	0.23	0.146	$108.28^3$

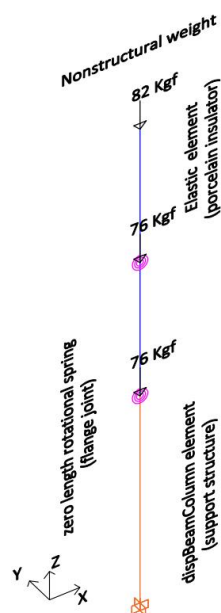
1- Flange stiffness at top of unit (flange stiffness at bottom of unit)

2- Flange stiffness of fix and jaw post (Flange stiffness of rotate post)

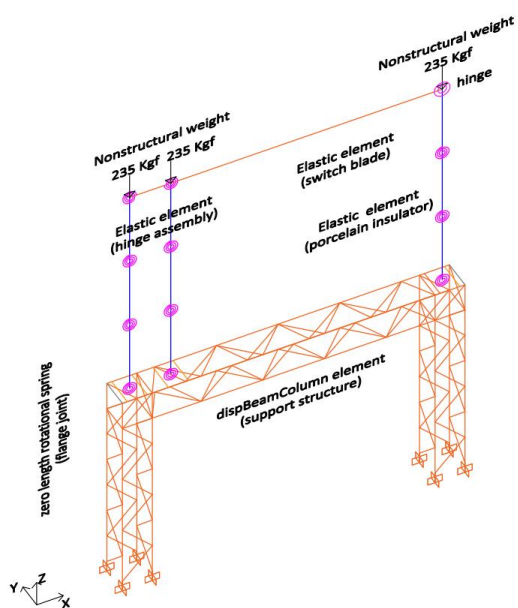
3- Values for one post are reported here



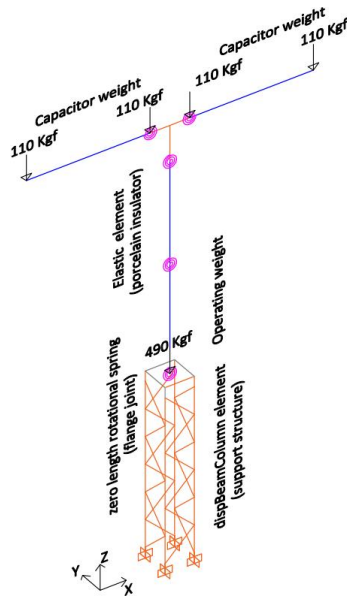
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲: مدل تحلیلی تجهیزات (الف) برق گیر، (ب) ترانس جریان، (ج) کلید قدرت و (د) سگسیونر.



جدول ۲: مشخصات سازه‌های نگهدارنده تجهیزات.

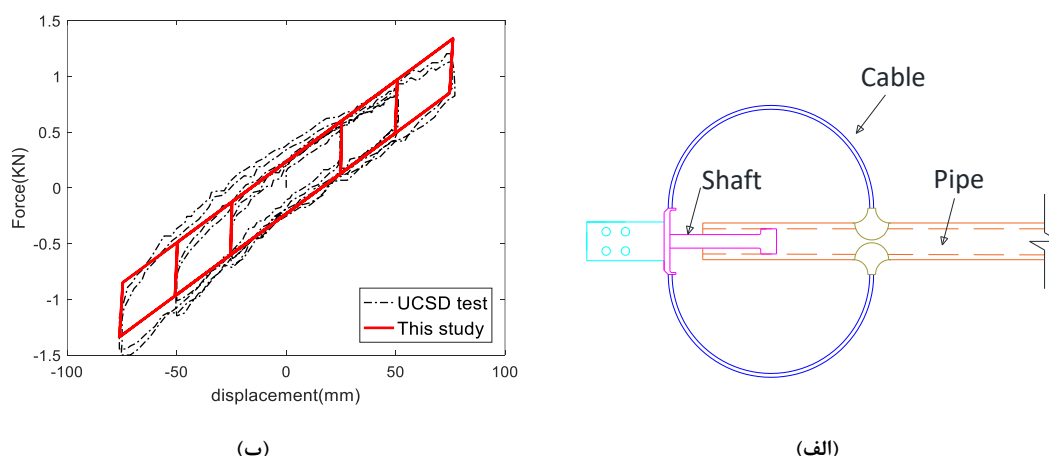
Equipment item	Column section	Beam section	Brace section	Height	Young 's modulus
Surge arrester	C400x10	----	----	2.85 m	$2 \times 10^5$ MPa
Current transformer	L80x80x8	L100x100x10	L50x50x5	3.14 m	$2 \times 10^5$ MPa
Circuit breaker	L80x80x8	L100x100x10	L50x50x5	2.74 m	$2 \times 10^5$ MPa
Disconnect switch	L90x90x7	L65x65x7	L50x50x6	3.18 m	$2 \times 10^5$ MPa

در این مطالعه از المان‌های هادی صلب به همراه اتصال دهنده BS جهت اتصال تجهیزات به یکدیگر استفاده شده است. اتصال دهنده BS که در شکل ۳ (الف) نشان داده شده است، شامل یک شفت و دو جفت کابل خمیده می‌باشد که به انتهای لوله آلومینیومی جوش شده‌اند. در صورتی که دو تجهیز به سمت یکدیگر حرکت کنند، شفت داخل لوله آلومینیومی می‌لغزد و نیروی اصطکاک ایجاد می‌شود. همچنین در دو کابل متصل به بالا و پایین اتصال دهنده نیروی مقاوم الاستیک ایجاد می‌شود. بنابراین ترکیبی از رفتار الاستیک و اصطکاک کولومب قابلیت انعطاف پذیری و استهلاک انرژی را برای BS تامین می‌کند. با رد شدن از حد جابجایی BS در فشار، لوله آلومینیومی با تجهیز برخورد کرده و اتصال دهنده انعطاف پذیری خود را از دست می‌دهد. از طرف دیگر، با رد شدن از حد کششی، شفت از داخل لوله آلومینیومی بیرون می‌آید. این حدود در آزمایش [8] برابر  $\pm 8.89$  cm اندازه گیری شده است.

برای تعیین رفتار هیستریزس اتصال دهنده، از نتایج آزمایش چرخه‌ای انجام شده در مطالعه [8] استفاده شده است. همانطور که در شکل ۳ (ب) مشاهده می‌شود رفتار چرخه‌ای دو خطی در طی آزمایش برای نمونه تست شده نتیجه شده است. نیرو و جابجایی اولیه برای شروع لغزش به ترتیب 240N و 0.0203cm تخمین زده شده و سختی پس از لغزش که از طریق شکل پذیری کابل‌ها ایجاد می‌شود برابر 15N/mm اندازه گیری شده است. بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده در تست، مصالح steel01 در یک فنر محوری برای مدل‌سازی اتصال دهنده BS استفاده شده است. شکل ۳ (ب) تطابق مناسب مدل تحلیلی با نتایج آزمایش را نشان می‌دهد. این نکته قابل ذکر است که مدل استفاده شده تمام اثرات غیرخطی هندسی و مصالح را در نظر می‌گیرد، زیرا چرخه‌های هیستریزس آن بر اساس نتایج آزمایش تنظیم شده‌اند.

پروسه صحت‌سنجی برای تجهیزات در شرایط خود ایستا و متصل به تجهیزات دیگر متفاوت می‌باشد. به دلیل اینکه رفتار تجهیزات در حالت خود ایستا خطی می‌باشد، از آزمایش‌های تعیین فرکانس و یا اطلاعات مهیا شده توسط شرکت سازنده درباره فرکانس تجهیزات جهت صحت‌سنجی استفاده شده است. از طرف دیگر، به دلیل رفتار غیر خطی سیستم تجهیزات متصل، از آزمایش‌های میز لرزه موجود در ادبیات فنی بر روی دو تجهیز متصل جهت صحت‌سنجی پاسخ سیستم‌های متصل استفاده شده است.

برق گیر مورد بررسی در این مطالعه تا حدودی مشابه برق گیر تست شده در مطالعه [2] می‌باشد. بنابراین ابتدا نمونه تست شده در آن مطالعه مدل‌سازی و صحت‌سنجی شده و سپس تغییرات لازم بر روی آن انجام گرفته است. فرکانس مدل تحلیلی و نمونه تست شده به ترتیب برابر 2.2Hz و 2Hz به دست آمده است. برای صحت‌سنجی مدل ترانس جریان از اطلاعات فرکانسی مهیا شده توسط شرکت سازنده برای حالت بدون سازه نگهدارنده استفاده شده است. سختی باکس فلزی زیر ترانس جریان به نحوی تنظیم شده تا فرکانس تحلیلی با فرکانس گزارش شده توسط شرکت سازنده یعنی 3.8Hz، یکسان به دست آید. تجهیز کلید قدرت مورد مطالعه تقریباً مشابه نمونه مطالعه شده در مطالعه [18] می‌باشد. فرکانس مود اول کلید قدرت برابر 2.07Hz می‌باشد که تقریباً با فرکانس 2.38Hz مطالعه [18] سازگار می‌باشد. این تفاوت می‌تواند مرتبط با تفاوت در پیکربندی دو تجهیز مقایسه شده باشد. بر اساس اطلاعات نویسندگان، مطالعه‌ای که در آن جزئیات کامل آزمایش بر روی سکسیونر ۴۰۰ کیلوولت گزارش شده باشد در ادبیات فنی موجود نمی‌باشد. به همین دلیل در این مطالعه ابتدا سکسیونر ۲۳۰ کیلوولت آزمایش شده در [4] مدل‌سازی و صحت‌سنجی شده سپس تغییرات لازم روی مدل انجام شده است. جزئیات مدل‌سازی و صحت‌سنجی در مطالعه باغ‌میشه و استکانچی [19] ارائه شده است.

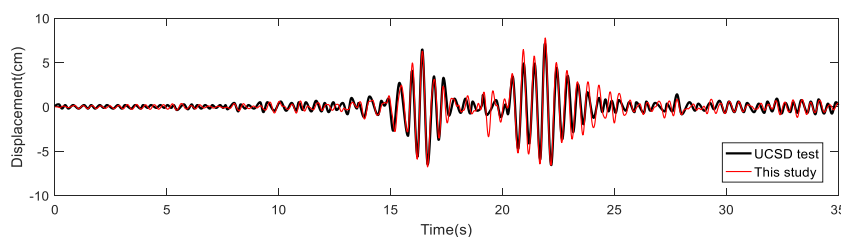


شکل ۳: (الف) نمایی از اتصال دهنده BS، (ب) مقایسه بین چرخه‌های هیستریزس به دست آمده از آزمایش در مطالعه [8] با مدل عددی در مطالعه حاضر.

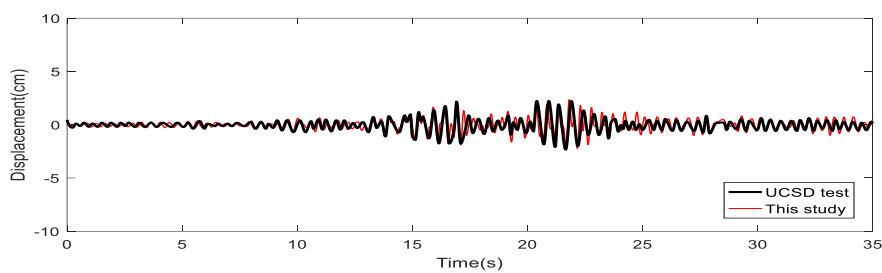
برای صحت سنجی پاسخ غیر خطی تجهیزات متصل از آزمایشات میز لرزه تک محوری که در دانشگاه UCSD [8] روی دو تجهیز متصل انجام شده، استفاده شده است. در آزمایش مذکور به جای خود تجهیزات از ستون‌های فولادی با مقطع باکس و جرم متمرکز در بالای ستون جهت شبیه سازی تجهیزات استفاده شده و اتصال بین آن‌ها با میله‌های آلومینیومی به همراه لغزنده BS تامین شده است. یک جفت از پنج جفت آزمایش شده در آن مطالعه که فرکانس طبیعی تجهیزات آن مشابه فرکانس طبیعی دو تجهیز مورد استفاده در این پژوهش، یعنی CB و CT، می‌باشد، انتخاب و مدل سازی شده است. سیستم مورد نظر تحت تحریک رکورد اصلاح شده طبس قرار گرفته است. پاسخ جابجایی نقاط اوج تجهیزات با مقادیر به دست آمده از آزمایش در شکل ۴ مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تاریخچه‌های جابجایی از تطابق مناسبی برخوردار می‌باشند.

آزمایش‌های میز لرزه بر روی تجهیزات متصل در مطالعه [8] تا قبل از رسیدن به حد جابجایی BS ادامه یافته است. همچنین بر اساس اطلاعات نویسنده، مطالعه المان محدود با جزئیاتی که تاثیرات این فراگذشت را کمی سازی کرده باشد، در ادبیات فنی وجود ندارد. بنابراین به عنوان یک فرض ساده کننده، نیروهای ضربه‌ای حاصل از رد شدن ظرفیت جابجایی BS در مدل سازی در نظر گرفته نشده است.

پس از صحت سنجی مدل تجهیزات در حالت خود-ایستا و در حالت دو تجهیز متصل به یکدیگر، سیستم‌های مختلفی از تجهیزات متصل در نظر گرفته شده است. سیستم‌های در نظر گرفته شده عبارتند از: (۱) برق گیر-ترانس جریان (SA-CT)، (۲) ترانس جریان-کلید قدرت (CT-CB)، (۳) کلید قدرت-سکسیونر (CB-DS)، (۴) برق گیر-ترانس جریان-کلید قدرت (SA-CT-CB)، (۵) ترانس جریان-کلید قدرت-سکسیونر (CT-CB-DS) و (۶) برق گیر-ترانس جریان-کلید قدرت-سکسیونر (SA-CT-CB-DS). مدل المان محدود سیستم شماره ۶ در شکل ۵ نشان داده شده است. فاصله بین تجهیزات و ترتیب اتصال تجهیزات بر اساس اطلاعات یکی از پست‌های برق تهران می‌باشد. نتایج حاصل از تحلیل مودال برای هر یک از سیستم‌های مذکور و شرایط خود ایستا تجهیزات در جدول ۳ لیست گردیده است.

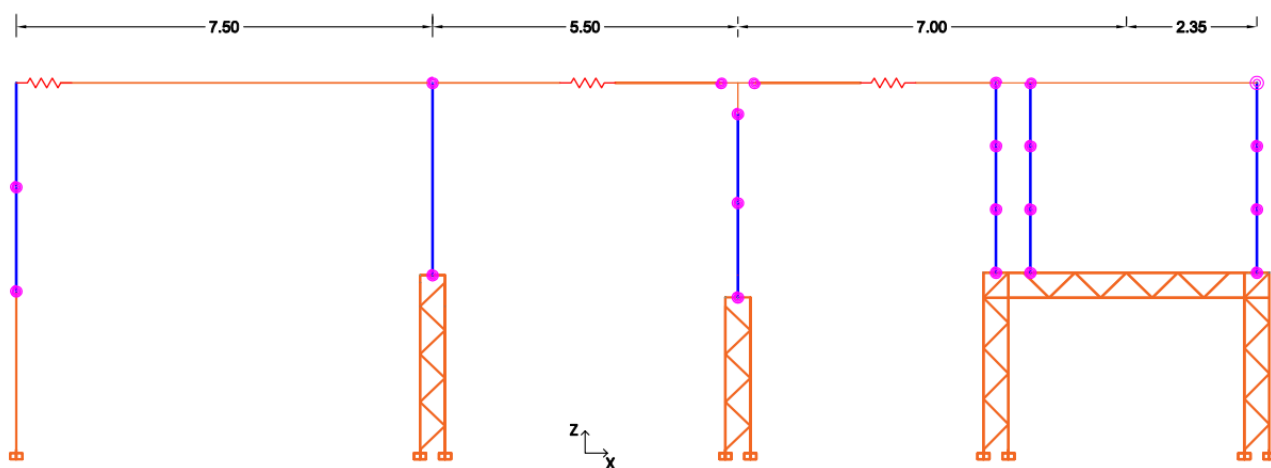


(الف)



(ب)

شکل ۴: مقایسه بین تاریخچه جابجایی آزمایش [8] با مدل عددی مطالعه حاضر برای تجهیز (الف) نرم و (ب) سخت در سیستم متصل.



شکل ۵: مدل عددی سیستم چهار تجهیز متصل.

جدول ۳: نتایج فرکانسی تحلیل مودال تجهیزات بر حسب Hz.

item	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
SA	4.45	4.45	19.85	19.85	43.2
CT	3.64	3.64	22.38	22.58	106.68
CB	2.02	2.32	3.54	6.58	14.63
DS	1.44	1.45	2.65	18.33	18.94
SA-CT	3.64	3.79	4.4	10.88	19.7
CT-CB	2.55	3.16	3.66	4.9	6.22
CB-DS	1.75	2.3	2.52	2.96	5.89
SA-CT-CB	2.55	3.26	3.66	4.39	4.91
CT-CB-DS	1.77	2.62	2.88	3.33	3.94
SA-CT-CB-DS	1.77	2.62	2.96	3.33	3.93

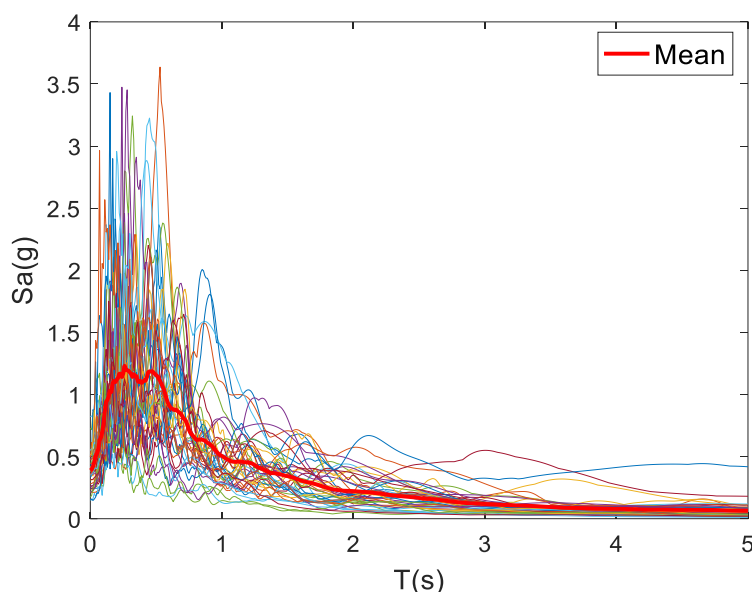
## ۴- تحلیل دینامیکی افزایشی

برای انجام تحلیل دینامیکی افزایشی یک مجموعه رکورد به صورت فزاینده به شدت‌های مختلف لرزه‌ای مقیاس شده و به سازه اعمال می‌شود [20]. در این مطالعه شتاب ماکزیمم زمین (PGA) به عنوان معیار شدت برای مقیاس سازی رکوردها استفاده شده است. دامنه یکی از مولفه‌های افقی هر رکورد با گام 0.1g تا 1.5g افزایش می‌یابد در حالی که مولفه‌های دیگر رکورد به گونه‌ای مقیاس می‌شوند که نسبت‌های ماکزیمم شتاب بین مولفه‌های رکورد برابر مقدار ثبت شده اصلی باشد.

مجموعه رکورد دور از گسل مرجع FEMAp695 [21] برای اعمال به تجهیزات مدل‌سازی شده انتخاب شده است. در این مرجع استفاده از این رکوردها برای تحلیل‌های IDA جهت تعیین منحنی‌های فروریزش سازه‌ها توصیه شده است. به دلیل ذات طره مانند مقره تجهیزات، مولفه قائم رکوردها نیز در نظر گرفته شده است. یکی از رکوردهای مجموعه که دارای مولفه قائم نبوده از مجموعه رکورد حذف و در مجموع ۲۱ رکورد سه مولفه‌ای استفاده شده است. مشخصات این رکوردها در جدول ۴ ارائه گردیده است. طیف شتاب الاستیک مولفه افقی رکوردها با میرایی ۲ درصد به همراه طیف میانگین در شکل ۶ نشان داده شده است. ذکر این نکته قابل توجه است که بررسی اثرات اندرکنش تحت رکوردهای نزدیک گسل موضوعی است که در مطالعات آتی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۴: مشخصات مجموعه رکورد دور از گسل FEMAp695.

No.	Event name	Year	Station	Magnitude	Distance (km)	NEHRP class	PGA (g)	PGV (cm/s)
1	Northridge	1994	Beverly Hills - Mulhol	6.7	9.4	D	0.52	63
2	Northridge	1994	Canyon Country-WLC	6.7	11.4	D	0.48	45
3	Duzce, Turkey	1999	Bolu	7.1	12	D	0.82	62
4	Hector Mine	1999	Hector	7.1	10.4	C	0.34	42
5	Imperial Valley	1979	Delta	6.5	22	D	0.35	33
6	Imperial Valley	1979	El Centro Array #11	6.5	12.5	D	0.38	42
7	Kobe, Japan	1995	Nishi-Akashi	6.9	7.1	C	0.51	37
8	Kobe, Japan	1995	Shin-Osaka	6.9	19.1	D	0.24	38
9	Kocaeli, Turkey	1999	Duzce	7.5	13.6	D	0.36	59
10	Kocaeli, Turkey	1999	Arcelik	7.5	10.6	C	0.22	40
11	Landers	1992	Yermo Fire Station	7.3	23.6	D	0.24	52
12	Landers	1992	Coolwater	7.3	19.7	D	0.42	42
13	Loma Prieta	1989	Capitola	6.9	8.7	D	0.53	35
14	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #3	6.9	12.2	D	0.56	45
15	Manjil, Iran	1990	Abbar	7.4	12.6	C	0.51	54
16	Superstition Hills	1987	El Centro Imp. Co.	6.5	18.2	D	0.36	46
17	Cape Mendocino	1992	Rio Dell Overpass	7	7.9	D	0.55	44
18	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	7.6	10	D	0.44	115
19	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU045	7.6	26	C	0.51	39
20	San Fernando	1971	LA - Hollywood Srdr	6.6	22.8	D	0.21	19
21	Friuli, Italy	1976	Tolmezzo	6.5	15	C	0.35	31



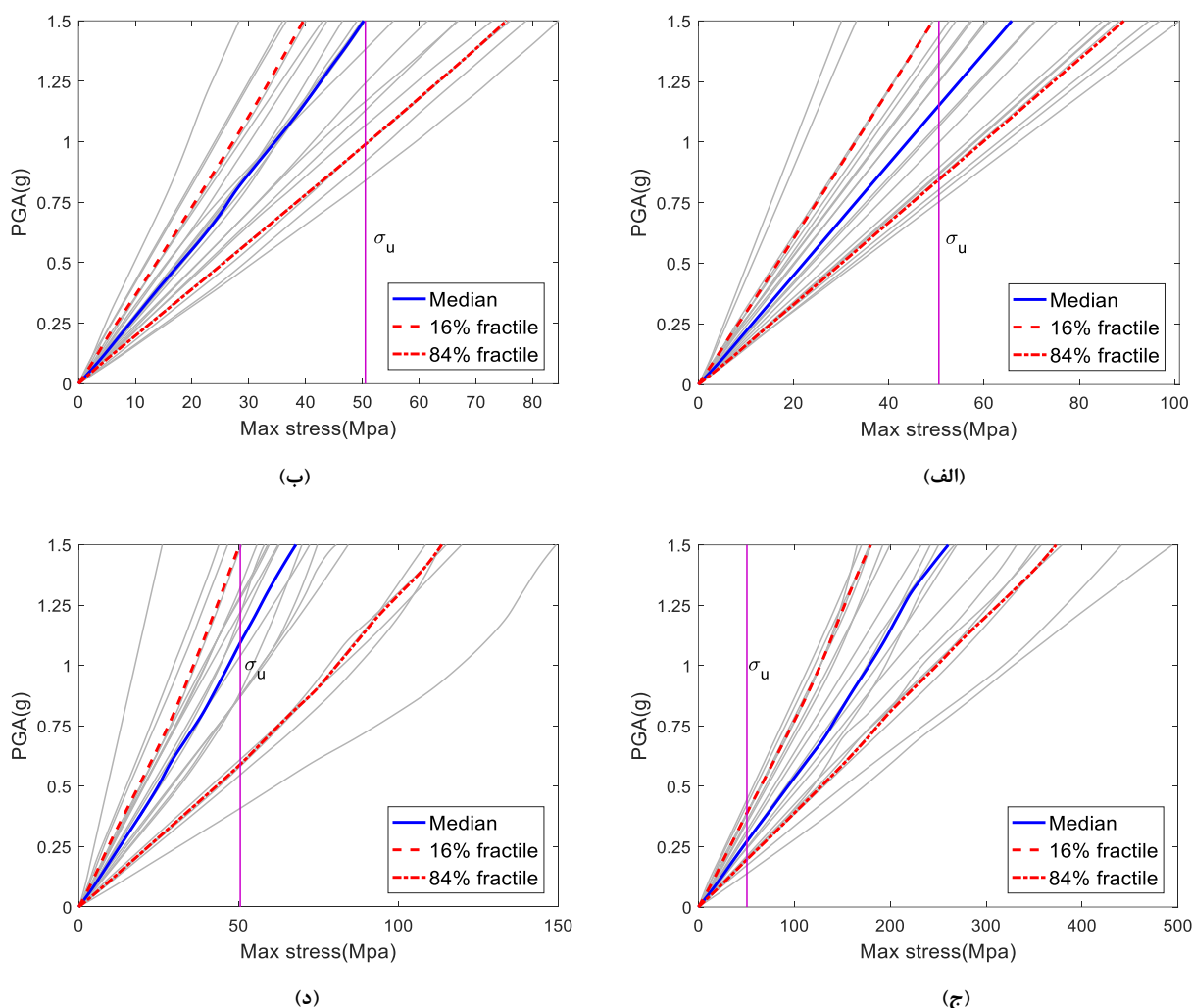
شکل ۶: طیف شتاب مولفه افقی مجموعه رکورد مورد استفاده با میرایی ۲ درصد.

تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیر خطی با روش انتگرال گیری در زمان نیومارک انجام شده است. از نرم رشد جابجایی با تلورانس  $1.0E-8$  و ماکزیمم تکرار ۱۰۰ به عنوان تست همگرایی استفاده شده است. نتیجه شده که این مقادیر تست منجر به همگرایی در تمام رکوردهای مورد استفاده می‌شود. براساس توصیه IEEE 693 [22] در تحلیل‌ها دو درصد میرایی از نوع رایلی برای تجهیزات فرض شده است.

## ۵- بحث بر روی نتایج

همانطور که در مطالعات قبلی ([3]، [2]، [23]، [24]) گزارش شده است، مود شکست رایج تجهیزات با تنش حاصل از لنگر خمشی در پای مقره‌های سرامیکی مرتبط بوده است. از طرف دیگر، اگر جابجایی نسبی بین دو تجهیز طی تحریک زلزله از ظرفیت جابجایی BS فراتر رود، اتصال دهنده انعطاف‌پذیری خود را از دست داده و ممکن است نیروهای بزرگی بین دو تجهیز منتقل شود. بنابراین تنش در پایین‌ترین نقطه مقره‌های سرامیکی و جابجایی در بالای آن‌ها به عنوان پارامترهای کلیدی پاسخ شناخته شده‌اند.

در شکل ۷ پاسخ ماکزیمم تنش در پای مقره هر یک از تجهیزات در سیستم چهار تجهیزه به صورت نسبتی از معیار شدت برای رکوردهای مورد استفاده نشان داده شده است. همچنین مقاومت نهایی سرامیک با مقاومت استاندارد (50.511Mpa) در این شکل نشان داده شده است. تحلیل‌ها تا بیشینه PGA در نظر گرفته شده ادامه یافته‌اند. پراکندگی نسبتاً پایین پاسخ تنش به شرط PGA نشان دهنده مناسب بودن شتاب بیشینه زمین به عنوان معیار شدت در تحلیل IDA می‌باشد.



شکل ۷: منحنی های IDA پاسخ ماکزیمم تنش سیستم چهار تجهیزه مربوط به تجهیز (الف) برق گیر، (ب) ترانس جریان، (ج) کلید قدرت و (د) سکسیونر.

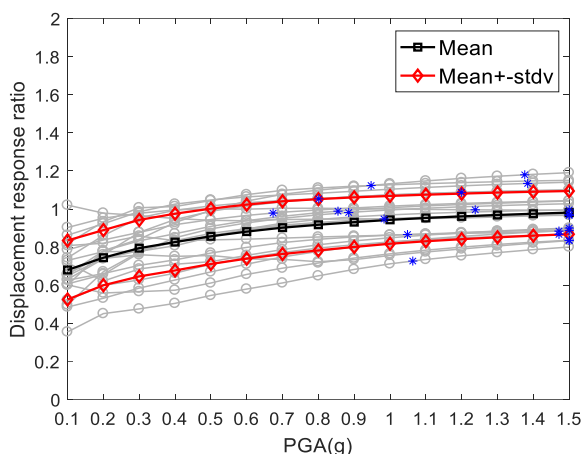
برای بررسی اثرات اندرکنش بر پاسخ، نسبت‌های پاسخ به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$R = \frac{\max |u(t)|}{\max |u_0(t)|} \quad (7)$$

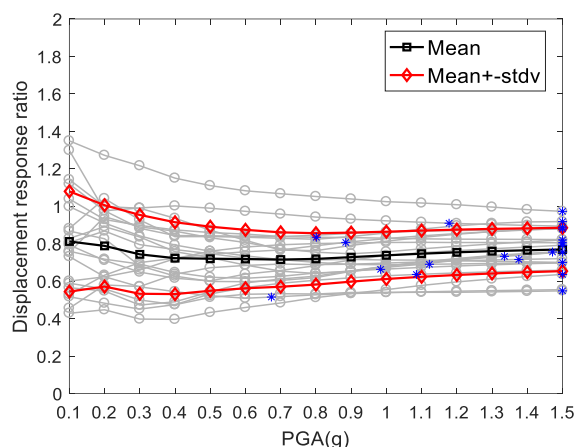
که در آن  $u(t)$  و  $u_0(t)$  به ترتیب پاسخ تجهیزات در شرایط خود-ایستا و متصل می‌باشند. نسب پاسخ برابر یک نشان می‌دهد که اندرکنش دینامیکی بین تجهیزات رخ نداده است، درحالی که مقادیر بزرگتر و کوچکتر از یک به ترتیب بیانگر تشدید و تقلیل پاسخ در اثر در نظر گرفتن المان‌های اتصال بین تجهیزات می‌باشند.

در سیستم ۴ تجهیزه، نسبت‌های پاسخ جابجایی هر تجهیز به صورت تابعی از شدت لرزه‌ای برای ۲۱ رکورد مورد استفاده در شکل ۸ نشان داده شده است. نقاط ستاره روی منحنی هریک از رکوردها بیانگر نقطه‌ای است که در آن جابجایی نسبی بین تجهیزات از ظرفیت BS فراتر رفته است. از این نقاط به بعد، با توجه به فرضیات مدل‌سازی اثرات ضربه ناشی از فراگذشت ظرفیت BS بر روی نسبت‌های پاسخ در نظر گرفته نشده است. مشاهده می‌شود به دلیل فرکانس پایین‌تر تجهیزات CB و DS نسبت به SA و CT، جابجایی این تجهیزات بزرگتر بوده و فراگذشت از ظرفیت BS در شدت‌های پایین تری رخ داده است. همچنین بر اساس کاتالوگ تجهیزات، نیروی مقاوم

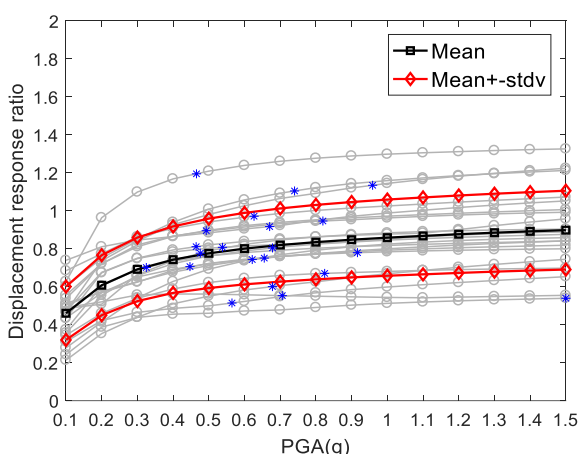
نهایی ترمینال پد که BS را به تجهیزات متصل می‌کند، تقریباً برابر 3000 N می‌باشد. با توجه به نمودار چرخه‌ای BS در شکل ۳ (ب) نیروی ایجاد شده در BS وقتی که به ظرفیت نهایی جابجایی خود می‌رسد کمتر از 1500 N می‌باشد. بنابراین فراگذشت ظرفیت جابجایی BS همواره زودتر از شکست ترمینال پد رخ داده است.



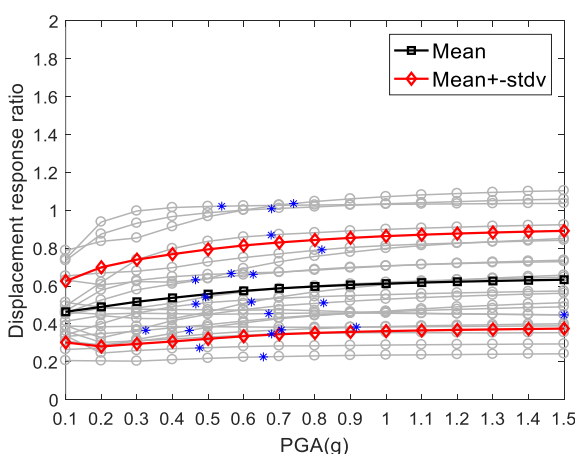
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸: نسبت‌های پاسخ جابجایی در سیستم SA-CT-CB-DS برای تجهیزات (الف) برق گیر (SA)، (ب) ترانس جریان (CT)، (ج) کلید قدرت (CB) و (د) سکسیونر (DS).

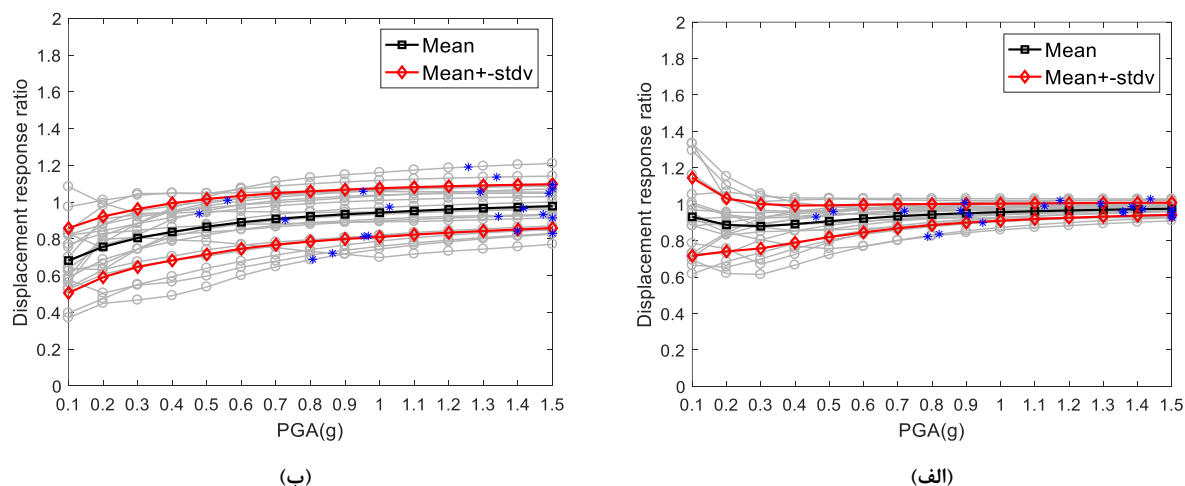
با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که برای هر تجهیز هر دو حالت تشدید و تقلیل پاسخ‌ها رخ داده است و نتایج اندرکنش به تغییر پذیری رکورد بسیار حساس است. برای مثال در شدت لرزه‌ای 0.1g نسبت‌های پاسخ جابجایی تجهیز برق گیر بین ۰/۴ تا ۱/۴ متغیر می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که مجموعه رکورد بزرگی برای تعیین نسبت پاسخ برای هر تجهیز نیاز می‌باشد. از این نسبت پاسخ بعداً می‌توان برای طراحی تجهیزات جدید استفاده کرد که در آن اثرات تجهیزات مجاور بدون نیاز به مدل‌سازی آن‌ها در نظر گرفته می‌شود.

در شکل ۸، با بررسی هر یک از رکوردها در شدت‌های مختلف نتیجه شده که تغییرات نسبت‌های پاسخ در شدت‌های پایین زیاد بوده ولی با افزایش شدت این تغییرات کمتر شده و نسبت‌های پاسخ به یک عدد خاص همگرا می‌شوند. در شدت‌های پایین که هنوز لغزش شفت اتفاق نیفتاده است، سختی المان اتصال زیاد بوده و به شدت بر نتایج اندرکنش تاثیر می‌گذارد. با افزایش شدت لرزه‌ای و شروع لغزش

شفت، اثرات غیر خطی شدن المان اتصال بر نتایج اندرکنش تاثیر می‌گذارد. با توجه به منحنی هیستریزس دو خطی BS در فصل قبل، سختی ثانویه پس از شروع اثرات غیر خطی تغییر نمی‌کند. به همین دلیل نسبت‌های پاسخ با افزایش شدت به یک عدد خاص همگرا می‌شوند. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت نسبت‌های پاسخ بیشتر به تغییر پذیری رکورد به رکورد حساس هستند تا تغییرات شدت لرزه‌ای.

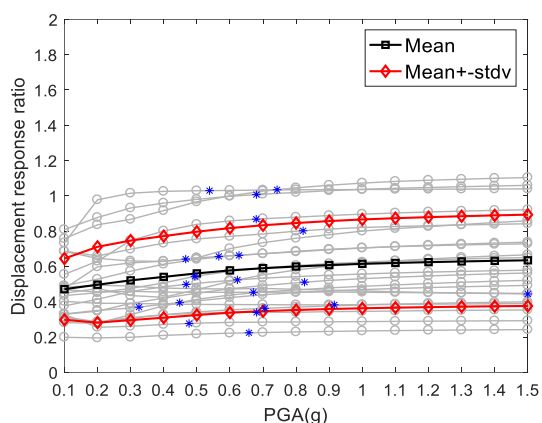
شکل ۹ نسبت‌های پاسخ جابجایی ترانس جریان را در سیستم دو تجهیزه SA-CT و سیستم سه تجهیزه SA-CT-CB نشان می‌دهد. اختلاف نتایج سیستم دو تجهیزه و سه تجهیزه نشان از اهمیت در نظر گرفتن بیش از دو تجهیز متصل در بررسی اثرات اندرکنش دارد. موردی که در اکثر مطالعات گذشته صرف نظر شده است.

در شکل ۱۰ نسبت‌های پاسخ جابجایی کلید قدرت در سیستم دو تجهیزه CB-DS با سیستم سه تجهیزه CT-CB-DS مقایسه شده است. در این شکل نیز اختلاف نتایج سیستم دو تجهیزه و سه تجهیزه مشهود است. مقایسه شکل ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که پراکندگی نسبت‌های پاسخ تجهیز کلید قدرت بزرگتر از تجهیز ترانس جریان می‌باشد. علی‌رغم جرم متمرکز سنگین در بالای هر دو این تجهیزات، خروج از مرکزیت جرم تجهیز کلید قدرت نسبت به ستون سرامیکی، باعث مشارکت مودهای بالاتر پاسخ مانند مود پیچشی بر پاسخ این تجهیز می‌شود. بنابراین مدل‌سازی سه بعدی تجهیزاتی مانند کلید قدرت در مطالعات اندرکنش حائز اهمیت می‌باشد.

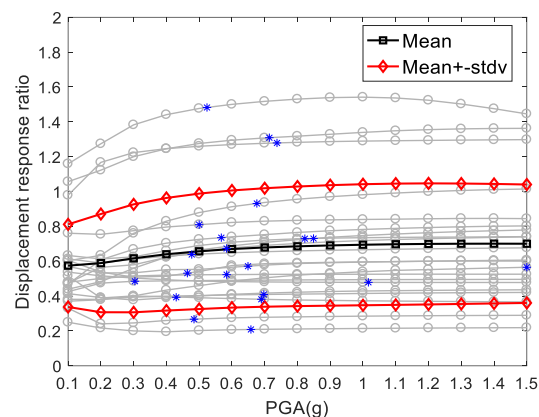


شکل ۹: نسبت‌های پاسخ جابجایی تجهیز ترانس جریان در سیستم‌های (الف) دو تجهیزه SA-CT و (ب) سه تجهیزه SA-CT-CB.





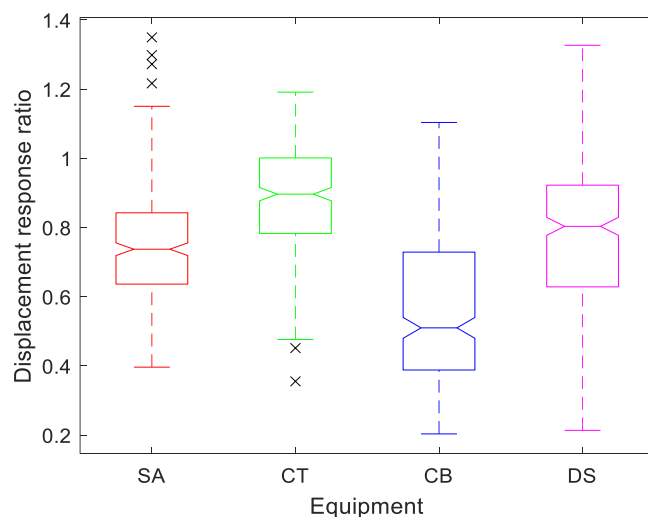
(ب)



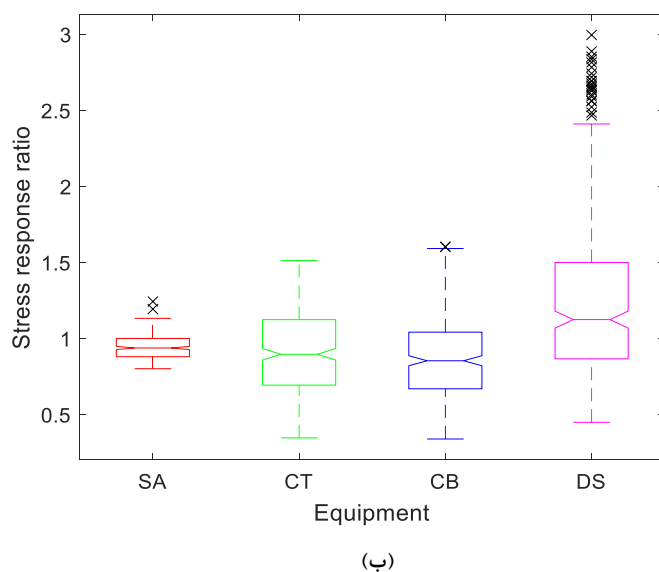
(الف)

شکل ۱۰: نسبت های پاسخ جابجایی تجهیز کلید قدرت در سیستم های (الف) دو تجهیز CB-DS و (ب) سه تجهیز CT-CB-DS.

به منظور پیدا کردن دید کلی از توزیع نسبت های پاسخ تجهیزات و مقایسه آن ها با یکدیگر نمودار جعبه ای نسبت های پاسخ جابجایی و تنش تجهیزات در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتیجه شده است که پراکندگی نتایج اندرکنش دو تجهیز CB و DS بیشتر از دو تجهیز دیگر می باشد. این نتیجه می تواند به دلیل تفاوت در پیکر بندی تجهیزات باشد که بر مشارکت موده های آن بر پاسخ تاثیر گذار است. برای دو تجهیز SA و CT با توجه به نوع پیکر بندی که به صورت یک ستون طره می باشد، مود اول بر پاسخها حاکم بوده، ولی برای دو تجهیز CB و DS با توجه به نوع پیکر بندی موده های بالاتر نیز می توانند بر پاسخ تاثیر گذار باشند.



(الف)



شکل ۱۱: نمودار جعبه‌ای نسبت‌های پاسخ (الف) جابجایی و (ب) تنش برای هر یک از تجهیزات.

## ۶- جمع بندی

در این مطالعه، پاسخ‌های لرزه‌ای تجهیزات پست‌های برق در شرایط اتصال به تجهیزات دیگر، زمانی که بیش از دو تجهیز به یکدیگر متصل باشند، نسبت به شرایط بدون اتصال تجهیزات، مقایسه شده است. برای مدل‌سازی تجهیزات از مدل‌های سه بعدی استفاده شده و تحلیل دینامیکی افزایشی با رکوردهای سه مولفه‌ای روی سیستم تجهیزات انجام شده است. نتایج اصلی عبارتند از:

- نسبت‌های پاسخ تجهیزات در سیستم متصل به غیر متصل عمیقاً به مشخصات تحریک ورودی بستگی دارد. برای مثال، پاسخ جابجایی برق گیر (SA) در اثر در نظر گرفتن اثرات اندرکنش زمانی که تحت رکورد چی چی تایوان (۱۹۹۹) قرار گرفته است، ۴۰ درصد افزایش نشان داده، در حالی که تحت رکورد زلزله نورث ریج آمریکا (۱۹۹۴) ۶۰ درصد کاهش در پاسخ مشاهده شده است.
- تغییرات نسبت‌های پاسخ در شدت‌های پایین زیاد بوده ولی با افزایش شدت این تغییرات کمتر شده است. سختی بالای اتصال دهنده در شدت‌های پایین دلیل این نتیجه بوده است.
- نتایج اندرکنش بین تجهیزات بیشتر به تغییر پذیری رکوردها حساس بوده تا تغییرات شدت لرزه‌ای
- تفاوت عمده نسبت‌های پاسخ یک تجهیز در سیستم دو تجهیزه در مقایسه با نسبت‌های پاسخ همان تجهیز در سیستم سه تجهیزه، اهمیت در نظر گرفتن بیش از دو تجهیز در مطالعات اندرکنش را نشان داده است.
- پراکندگی نسبت‌های پاسخ‌های تجهیزات CB و DS نسبت به تجهیزات SA و CT بیشتر بوده است. دلیل این امر می‌تواند تفاوت در پیکربندی این دو دسته تجهیز باشد. تجهیزات CB و DS بر خلاف SA و CT که پیکربندی طره ماندی دارند، دارای هندسه پیچیده‌تری هستند که باعث افزایش تاثیر مودهای بالاتر بر پاسخ آن‌ها می‌شود. بنابراین تغییرات ویژگی‌های حرکت زمین تاثیرات بیشتری بر تجهیزاتی دارد که مودهای بالاتر بر پاسخ آن‌ها حاکم می‌باشد.

## مراجع

- [1] Nuti C, Rasulo A, Vanzi I (2007). Seismic safety evaluation of electric power supply at urban level. *Earthq Eng Struct Dyn*;36:245–63.
- [2] Li S, Tsang HH, Cheng Y, Lu Z (2017). Considering seismic interaction effects in designing steel supporting structure for surge arrester. *J Constr Steel Res*;132:151–63. doi:10.1016/j.jcsr.2017.01.012.
- [3] Alessandri S, Giannini R, Paolacci F, Malena M. Seismic retrofitting of an HV circuit breaker using base isolation with wire ropes. Part 1: Preliminary tests and analyses (2015). *Eng Struct*;98:251–62.
- [4] Kong D (2010). *Evaluation and protection of high voltage electrical equipment against severe shock and vibrations*. Phd Diss Dep Civil, Struct Environ Eng State Univ New York Buffalo.
- [5] Takhirov S, Fenves G, Fujisaki E (2004). *Seismic Qualification and Fragility Testing of Line Break 550-kV Disconnect Switches*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Report 2004/08. PEER. Univ California, Berkeley.
- [6] Mosalam KM, Günay S TS (2016). Response evaluation of interconnected electrical substation equipment using real-time hybrid simulation on multiple shaking tables. *Earthq Eng Struct Dyn*;45:2389–404. doi:10.1002/eqe.
- [7] Der Kiureghian A, Sackman JL, Hong KJ (1999). *Interaction in Interconnected Electrical Substation Equipment Subjected to Earthquake Ground Motions*. PEER.
- [8] Filiatrault A KS (2000). Seismic interaction of interconnected electrical substation equipment. *J Struct Eng*;126:1140–9. doi:10.1016/S0950-1401(10)04009-7.
- [9] Der Kiureghian A, Hong K-J, Sackman JL (2000). *Further studies on seismic interaction in interconnected electrical substation equipment*. PEER.
- [10] Stearns C, Filiatrault A (2004). *Electrical Substation Equipment Interaction : Experimental Rigid Conductor Studies*. PEER.
- [11] Song J, Der Kiureghian K SJ (2004). *Seismic response and reliability of electrical substation equipment and systems*. (Doctoral Diss Univ California, Berkeley). doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [12] Dastous JB DKA (2010). *Application guide for the design of flexible and rigid bus connections between substation equipment subjected to earthquakes*. PEER.
- [13] Mohammadi RK, Nikfar F, Akrami V (2012). Estimation of required slack for conductors connecting substation equipment subjected to earthquake. *IEEE Trans Power Deliv*;27:709–17.
- [14] Dastous J-B, Pierre J-R (2007). Design methodology for flexible buswork between substation equipment subjected to earthquakes. *IEEE Trans Power Deliv*;22:1490–7.
- [15] Mohammadi RK, Tehrani AP (2014). An investigation on seismic behavior of three interconnected pieces of substation equipment. *IEEE Trans Power Deliv*;29:1613–20.
- [16] S. Li, H.H. Tsang, Y.F. Cheng ZCL (2017). Effects of sheds and cemented joints on seismic modelling of cylindrical porcelain electrical equipment in substations. *Earthquakes Struct*;12:55–65.
- [17] McKenna F, Fenves G, Filippou FC MS (2000). Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees).
- [18] Hatami M, Ghafory-Ashtiany M, Hosseini M (2004). Experimental and analytical study of a high voltage instrument transformer. *Proc. 13th World Conf. Earthq. Eng.* (13WCEE), Vancouver, Br. Colomb. Canada.
- [19] Baghmishah AG, Estekanchi HE (2019). Effects of rigid bus conductors on seismic fragility of electrical substation equipment. *Soil Dyn Earthq Eng*;125:105733.
- [20] Vamvatsikos D, Cornell CA (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthq Eng Struct Dyn*;31:491–514.
- [21] FEMA P695 (2009). *Quantification of building seismic performance factors*. Fed Emerg Manag Agency, Washington, DC doi:10.1016/j.compstruc.2009.08.001.
- [22] IEEE Standard 693 (2005). *IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations*. (Revision of IEEE 693-1985 & 1997).
- [23] Zareei SA, Hosseini M G-AM (2016). Seismic failure probability of a 400 kV power transformer using analytical fragility curves. *Eng Fail Anal*;70:273–89. doi:10.1016/j.engfailanal.2016.09.007.
- [24] Mohammadpour S HM (2017). Experimental system identification of a 63kV substation post insulator and developing its fragility curves by dynamic finite element analyses. *Earthq Spectra*;33:1149–72.