



ارزیابی عملکرد لرزه ای ترانسفورماتورهای الکتریکی جداسازی شده تحت تحریکات پالس گونه

محمد محمودی، عباس قاسمی*، شهریار طاوسی تفرشی

دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵

کلمات کلیدی:

ترانسفورماتور الکتریکی
جداسازی سه بعدی
عملکرد لرزه‌ای
حرکات پالس گونه
منحنی های شکنندگی

خلاصه: صدمات وارده به ترانسفورماتورهای الکتریکی در زمین لرزه‌های قدرتمند گذشته، منجر به خسارات اقتصادی غیرقابل جبران و شدیدی شده است. ارزیابی عملکرد لرزه ای با بررسی آسیب وارده به کارکرد مناسب ترانسفورماتور، همراه است. در مطالعه حاضر سازه‌های ترانسفورماتور جداسازی شده به منظور ارزیابی متغیرهایی که بر عملکرد لرزه‌ای و ویژگی‌های دینامیکی ترانسفورماتور تأثیرگذار می‌باشند، مدل سازی و مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس مبانی احتمالاتی و پارامترهای کلیدی تأثیرگذار بر عملکرد لرزه‌ای ترانسفورماتورها، قابلیت پذیرش عملکرد لرزه‌ای سازه‌های ترانسفورماتور الکتریکی جداسازی شده برای طیف وسیعی از پارامترها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. جهت دستیابی به اهداف مورد نظر در این مطالعه، اثر حرکات پالس گونه نزدیک گسل در جهات افقی و قائم، ظرفیت جابه‌جایی سیستم جداسازی لرزه ای، حالت های حدی بوشینگ های الکتریکی و جزئیات طراحی سیستم جداسازی بر عملکرد لرزه‌ای لحاظ گردیدند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای سه بعدی در مقایسه با سیستم جداسازی لرزه‌ای افقی مؤثرتر عمل نموده و مقادیر PGA منجر به شکست را تا حداکثر ۸۰ درصد در حرکات پالس گونه حوزه نزدیک نسبت به جداسازی افقی، افزایش می‌دهند. بنابراین، عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای سه بعدی به ازای تمامی پارامترهای مورد مطالعه، بهبود یافته و احتمال شکست به حداقل تقلیل خواهد یافت.

۱- مقدمه

اتصال الکتریکی بین خطوط فشار قوی و ترانسفورماتور را ایجاد می‌کند [۹]. بوشینگ‌ها در برابر حرکات لرزه‌ای، آسیب‌پذیری بالایی دارند [۸ و ۷] بنابراین تلاش‌های زیادی در دانشگاه و صنعت برای گسترش ابزارهای پشتیبانی لرزه‌ای بوشینگ‌ها و ترانسفورماتورها انجام شده است [۱۳-۱۰ و ۸].

سیستم جداسازی توسعه یافته متشکل از جداسازهای آونگ اصطکاکی سه گانه (triple FP) برای ایجاد جداسازی افقی است که بر پایه تکیه‌گاه‌های متشکل از فنرهای فولادی مارپیچ، میراگرهای ویسکوز خطی و یک سیستم تلسکوپی برای حفظ حرکت تنها در جهت قائم در حین انتقال نیروی برشی و لنگر خمشی است که توسط جداسازهای آونگ اصطکاکی سه گانه، محدود شده است. سیستم جداسازی قائم مورد مطالعه، دارای فرکانس ۲ هرتز و نسبت میرایی ۰/۵۰ است. مطالعات پارامتریک تحلیلی ارائه شده در مقاله کیتایاما و کنستانینو برای انتخاب این پارامترها است. یک مدل در مقیاس بزرگ از یک ترانسفورماتور الکتریکی ساخته شد و روی میز لرزه با حرکات سه بعدی زمین در مقیاس زمان واقعی، مورد آزمایش قرار گرفت. داده‌های

ترانسفورماتورهای الکتریکی جزء اعضای اصلی شریان‌های حیاتی هستند. مشاهدات تجربی در زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که تجهیزات الکتریکی در برابر زلزله آسیب‌پذیر هستند و موارد مختلفی در سراسر جهان، دچار آسیب‌های شدیدی شده‌اند [۵-۱]. عدم تأمین برق در پی وقوع زلزله باعث کاهش امنیت و کیفیت زندگی عمومی و خسارات اقتصادی می‌شود. خسارات اقتصادی آنی تخمین زده شده در زلزله‌هایی مانند کوشیرو اوکی ژاپن در سال ۱۹۹۳، نورث ریج ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۹۴، کوبه ژاپن در سال ۱۹۹۵، قوجالی ترکیه در سال ۱۹۹۹ و چی چی تایوان در سال ۱۹۹۹، در محدوده صدها میلیون دلار برای هر حادثه بوده و منجر به قطع برق شده است [۷ و ۶].

سیستم‌های برق قدرت شامل ایستگاه‌های تولید، خطوط انتقال و خطوط توزیع است. ترانسفورماتورهای الکتریکی به منظور افزایش و کاهش ولتاژ در بین این اعضا قرار گرفته‌اند [۸]. عضو کلیدی ترانسفورماتور الکتریکی، بوشینگ فشار قوی است که در بالای ترانسفورماتور نصب می‌شود و

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: abb.ghasemi@iauctb.ac.ir



گذشته است [۲۵-۲۸].

مطالعه حاضر، محدودیت‌های مطالعات گذشته با در نظر گرفتن تحلیل‌های مربوط به حرکات پالس‌گونه نزدیک گسل را بررسی می‌نماید و تحریکات پالس‌گونه نزدیک گسل را بر روی احتمال شکست ترانسفورماتور ارزیابی می‌کند. در انجام تحلیل‌ها، از ترانسفورماتورهایی با وزن‌های مختلف و پوشینگ‌هایی با فرکانس نصب متفاوت در حالات جداسازی شده و جداسازی نشده، استفاده شده است. همچنین شتاب در مرکز جرم پوشینگ و در موقعیت‌های مختلف، از جمله پایه ثابت، جداسازی افقی و سیستم جداسازی لرزه‌ای سه بعدی تحت حرکات پالس‌گونه نزدیک گسل مقایسه می‌شود. در نوع جداسازی نشده، مدل ترانسفورماتور دارای میرایی ذاتی بحرانی ۳ درصد در تمامی حالات است. در مدل تحلیلی با افزودن المان‌های میراگر ویسکوز انتقالی و چرخشی در مکان‌های انتخابی، میرایی اعمال گردید. همچنین نتایج تحلیلی عملکرد ترانسفورماتورهای جداسازی نشده با ترانسفورماتورهای جداسازی شده فقط در جهت افقی و همچنین با ترانسفورماتور با سیستم جداسازی لرزه‌ای سه بعدی دارای حرکت گهواره‌ای با در نظر گرفتن حرکات پالس‌گونه نزدیک گسل، مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفتند.

یکی از مهم‌ترین اهداف این مطالعه، ایجاد منحنی‌های شکنندگی تحت حرکات پالس‌گونه حوزه نزدیک و مقایسه نتایج با حرکات حوزه دور در سازه‌های جداسازی شده و فاقد جداسازی است. در تمام موارد، منحنی‌های شکنندگی تحت حالات جداسازی شده و جداسازی نشده، با یکدیگر مقایسه گردیده تا اثر جداسازی لرزه‌ای در حالت‌های مختلف بر احتمال شکست، بررسی شود. در نهایت، تحلیل دینامیکی افزایشی با استفاده از حرکات پالس‌گونه نزدیک گسل برای سه نمونه پوشینگ نصب شده و سه نمونه مختلف ترانسفورماتور با ظرفیت‌های جابه‌جایی ($D_{capacity}$) متفاوت، انجام می‌شود و تأثیر حرکات نزدیک گسل با ویژگی‌های پالس‌گونه بر روی ظرفیت جابه‌جایی سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- اصول ارزیابی عملکرد شکست ترانسفورماتورهای جداسازی شده

ارزیابی عملکرد شکست مبتنی بر دستورالعمل و راهکارهای ارائه شده در FEMA P695 است. راهکارهای مذکور به انجام تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) و یافتن شکست اجزای اصلی از طریق شبیه‌سازی لرزه‌ای، وابسته است [۳۵-۳۹].

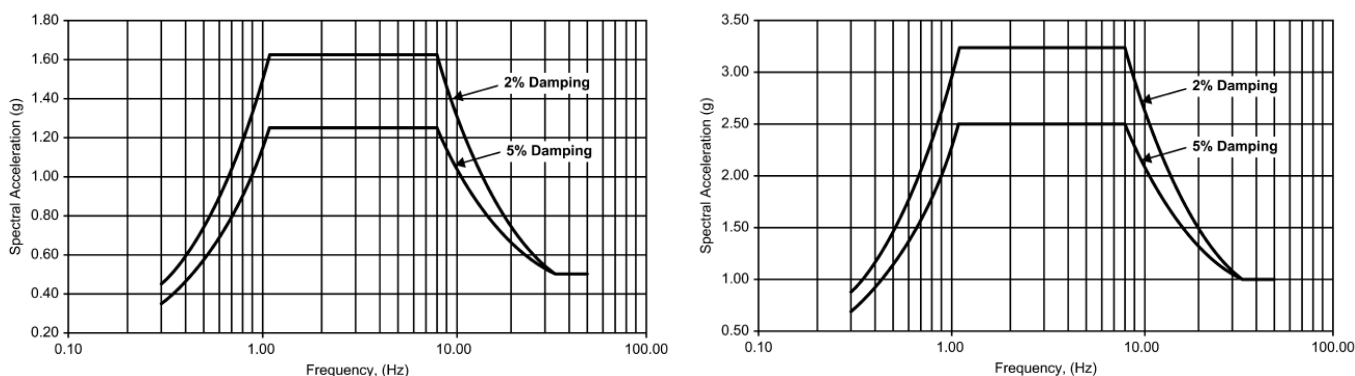
آزمایشگاهی به دست آمده، جداسازی لرزه‌ای مؤثر در تمام جهات را برای اکثر حرکات نشان داد. همچنین از این داده‌ها برای اعتبارسنجی مدل‌های تحلیلی برای پیش‌بینی تاریخچه پاسخ ترانسفورماتور جداسازی شده استفاده شد [۱۴].

در مطالعه فوق، دو نوع سیستم جداسازی، مورد بررسی قرار گرفتند. نوع اول که اجازه حرکت گهواره‌ای آزاد ترانسفورماتور جداسازی شده را می‌دهد و نوع دوم که حرکت گهواره‌ای را محدود می‌نماید.

مطالعات گذشته در مورد عملکرد لرزه‌ای ترانسفورماتورهای الکتریکی نشان داد که جداسازی افقی می‌تواند عملکرد لرزه‌ای را از نظر کاهش شتاب افقی و جابه‌جایی مربوطه پوشینگ‌ها و بدنه ترانسفورماتور بهبود دهد [۱۷-۱۵، ۱۲، ۱۱ و ۸]. با این حال، در مطالعات مذکور تأثیر حرکات قائم زلزله بر پاسخ‌ها منظور نگردید و به این موضوع اشاره داشتند که حرکت قائم زمین از طریق سیستم جداسازی افقی با اعمال ضرایب تشدید به سازه منتقل می‌شود و کاهش شاخص عملکرد لرزه‌ای را به شکست پوشینگ یا شکست خود ترانسفورماتور، مرتبط نمی‌کردند.

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ترانسفورماتورهای قدرت الکتریکی جداسازی شده در مطالعات قبلی [۱۸ و ۱۴] که بر مبنای FEMA P695 [۱۹] استوار است، با محدودیت‌هایی همراه بوده است. این مطالعات فقط حرکات حوزه دور را در نظر می‌گرفتند، در حالی که در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ترانسفورماتور، اثرات نزدیک گسل و حرکات پالس‌گونه [۲۰] نیز باید در نظر گرفته شود. غالباً حرکات نزدیک گسل، منتج به ظرفیت‌های جابه‌جایی بزرگ‌تری در سیستم جداسازی خواهد شد [۲۱] و بنابراین ممکن است ارزیابی عملکرد شکست را تحت تأثیر قرار دهد [۲۳ و ۲۲].

در مطالعه انجام شده توسط کیتایاما و همکاران [۱۸] جهت ارزیابی عملکرد ترانسفورماتورها، از تحلیل دینامیکی افزایشی [۲۴] با در نظر گرفتن حرکات قائم زمین استفاده شد. در مطالعه مذکور، تجزیه و تحلیل تاریخچه پاسخ غیرخطی برای هر مجموعه از حرکات مقیاس شده انجام شد و تعداد دفعاتی که ترانسفورماتور به یک حالت حدی مشخص می‌رسد، محاسبه گردید. نتایج برای ایجاد منحنی‌های شکنندگی عملکردی بر اساس رویه مندرج در FEMA P695 مورد استفاده قرار گرفتند. مدل عددی ترانسفورماتورهای تحلیل شده بر اساس اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های تجهیزات ترانسفورماتورهای الکتریکی است [۵]. حالات حدی مورد استفاده برای توصیف شکست و عدم عملکرد مناسب ترانسفورماتورها بر اساس اطلاعات مربوط به عملکرد تجهیزات الکتریکی در زلزله‌های



شکل ۱. طیف‌های پاسخ مورد نیاز [۳۶]: (الف) سطح عملکرد بالا (سمت راست) (ب) سطح عملکرد متوسط (سمت چپ)

Fig. 1. Required response spectra [36]: High performance level(right), Moderate performance level(left)

(PGA)، مشخص می‌شود. شکست ترانسفورماتور زمانی رخ خواهد داد که یکی از سه مود شکست که در زیر بیان گردیده، زودتر اتفاق بیفتد. در مود اول بر اساس کالیبراسیون داده‌های تجربی مدل، شتاب در جهت عرضی بوشینگ به 1g یا 2g (وابسته به حالت حدی اصلی بوشینگ) و یا در جهت طولی بوشینگ به 5g برسد.

حالات حدی مذکور بر اساس مشاهدات میدانی در زلزله‌های گذشته است [۲۸ و ۲۷] و در برخی مطالعات گذشته نیز مورد بررسی آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی، قرار گرفته است [۳ و ۲]. نتایج حاصل از آزمایش بوشینگ‌های 230 kv با پایه غیرصلب نشان داد که در بوشینگ بدون مقاوم‌سازی در شتاب هدف 1.4g، نشت روغن و در شتاب 2g، لغزش بوشینگ رخ می‌دهد [۳]. یکی از موضوعات مورد بررسی در تحقیقات انجام گرفته توسط محققین، مطالعه اثر تشدید کنندگی بدنه ترانسفورماتور و ضریب تشدید مربوطه است. تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده است که چنانچه نحوه استقرار بوشینگ بر روی ترانسفورماتور به دلیل انعطاف‌پذیری ورق بدنه ترانسفورماتور و یا اجزای اتصال غیرصلب باشد، پاسخ‌های لرزه‌ای بوشینگ تشدید شده و خرابی‌هایی که در حالت استقرار صلب رخ نمی‌داد، با استقرار غیرصلب به وقوع خواهد پیوست [۳۷]. استاندارد IEEE Std 693(2018) توصیه می‌کند، مقدار ضریب تشدید ناشی از بدنه ترانسفورماتور به میزان ۲ در نظر گرفته شود و آزمایش میز لرزان بر روی بوشینگ‌ها به دلیل حساسیت اتصال فلنج به بوشینگ، در سطح عملکرد (دو برابر سطح ارزیابی) انجام شود [۳۶].

روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)، برای به دست آوردن داده‌هایی در مورد تعداد شکست‌ها برای هر سطح از شدت لرزه‌ای در نظر گرفته شده است. شدت حرکت زمین برحسب حداکثر شتاب زمین (PGA) و یا بر اساس متغیرهای مورد استفاده در استاندارد IEEE Std 693(2018) [۳۶]، اندازه‌گیری می‌شود.

در استاندارد IEEE Std 693(2018) که مربوط به مجموعه الزامات مورد نیاز برای طراحی لرزه‌ای تجهیزات فشار قوی پست‌های انتقال نیرو است، سه سطح ارزیابی لرزه‌ای بالا، متوسط و پایین تعریف شده است. هدف این استاندارد آن است که تجهیزات ارزیابی شده در یک سطح مشخص پس از وقوع زلزله‌ای متناظر با دو برابر زلزله به کار رفته در ارزیابی تجهیز قادر به تداوم کارایی خود باشند. این سطح زلزله را سطح عملکرد تجهیز می‌نامیم. سطح عملکرد بالا برای زلزله‌های با شتاب اوج تا 1g، سطح عملکرد متوسط برای زلزله‌های با شتاب اوج تا 0.5g و سطح عملکرد پایین برای زلزله‌های با شتاب اوج تا 0.1g تعریف می‌گردد. طیف‌های پاسخ مورد نیاز در سطوح عملکرد بالا و متوسط در شکل ۱ نشان داده شده است. طیف‌های مربوطه در جهت قائم از نظر شکل مشابه طیف‌های افقی هستند، اما در دامنه با ضریب ۰/۸ مقیاس می‌شوند.

تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)، برای مجموعه‌ای از حرکات انجام می‌شود که هر کدام شامل حرکات افقی و قائم است که در ابتدا شامل رکوردهای اصلی زلزله هستند و شدت آن‌ها به تدریج افزایش می‌یابد. تحت تحلیل دینامیکی افزایشی، نسبت اصلی حداکثر شتاب قائم به حداکثر شتاب افقی حفظ گردیده و معیار اندازه‌گیری شدت با مقدار حداکثر شتاب زمین

تجمعی نرمال توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$F_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (1)$$

که در آن μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر است. در تحلیل شکنندگی، مقادیر $(PGA)_F$ و β محاسبه می‌شوند [۳۸-۴۰]، به نحوی که $(PGA)_F$ ، اندازه‌گیری شدت PGA است که حداقل ۵۰٪ از تحلیل‌ها دچار شکست شده باشد (مقداری از PGA است که احتمال شکست برای آن ۰/۵۰ است) و ضریب پراکنندگی (β)، به عنوان انحراف استاندارد لگاریتم طبیعی مقادیر PGA است که باعث شکست ترانسفورماتور یا شکست پوشینگ و یا شکست سیستم جداسازی می‌شود. لازم به ذکر است که تعداد تحلیل‌ها بر اساس میزان افزایش PGA در هر گام زمانی تعیین می‌شود. شایان ذکر است که تعداد حرکات زمین منظور شده در این مطالعه، ۴۰ عدد است. منحنی‌های شکنندگی تحلیلی (تابع توزیع تجمعی یا CDF)، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$CDF(x) = \int_0^x \frac{1}{s\beta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln s - \ln PGA_F)^2}{2\beta^2}\right] ds \quad (2)$$

منحنی‌های شکنندگی اطلاعاتی را در مورد احتمال شکست برای سطوح خاصی از شدت زلزله که توسط PGA اندازه‌گیری می‌شود، ارائه می‌دهد. اطلاعات مذکور که از تحلیل‌های دینامیکی متعدد به دست آمده است، در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ترانسفورماتور، بسیار مفید خواهد بود.

۳- مدل‌سازی ترانسفورماتورهای جداسازی شده به منظور ارزیابی شکست

۳-۱- مدل‌سازی پوشینگ

در این بخش به مدل‌سازی پوشینگ جهت ارزیابی شکست ترانسفورماتور پرداخته خواهد شد. پوشینگ‌ها، جزء اصلی ترانسفورماتورهای الکتریکی هستند که آسیب یا شکست پوشینگ به عنوان شکست ترانسفورماتور در نظر گرفته می‌شود [۴۱]. این مدل از نتایج آزمون کنگ [۴۲] و فهد [۴۳] استفاده می‌کند که مشخصات پوشینگ‌های نصب شده در شرایط مختلف را

در زلزله‌های حوزه نزدیک که مقادیر حداکثر شتاب قائم بالایی دارند، اثرات تشدید کننده بدنه ترانسفورماتور و اتصالات غیرصلب، سبب افزایش چندین برابری شتاب قائم در مرکز جرم بخش بالایی پوشینگ می‌گردد. بررسی‌های آزمایشگاهی پوشینگ‌های 230kv و 550kv [۳ و ۲] و مشاهدات میدانی در زلزله‌های گذشته [۲۸-۲۵] نشان داده است که چنانچه شتاب در مرکز جرم بخش بالایی پوشینگ در جهت طولی به حدود 5g برسد، بلند شدگی پوشینگ از روی فلنج رخ می‌دهد که یکی از حالات اصلی شکست پوشینگ است.

در مود دوم، جابه‌جایی جانبی جداسازها از ظرفیت جابه‌جایی جانبی سیستم جداساز افقی بیشتر خواهد شد. مود سوم شکست در حالتی است که در سیستم جداسازی قائم، کشش ایجاد گردد. هر کدام از سه مورد مذکور که زودتر اتفاق بیفتد، به عنوان عامل شکست در نظر گرفته می‌شود. منحنی‌های شکنندگی احتمال شکست را در مقابل حداکثر شتاب زمین (PGA) نشان می‌دهند که در آن احتمال شکست در هر سطح از PGA، به وسیله تعداد تحلیل‌های منجر به شکست تقسیم بر تعداد کل تحلیل‌ها، مشخص می‌شود [۳۸ و ۳۷].

حداکثر شتاب زمین (PGA)، به عنوان معیار شدت لرزه‌ای در مقیاس‌سازی حرکات مورد استفاده در تحلیل دینامیکی افزایشی برای ساخت منحنی‌های شکنندگی انتخاب گردید. توجه داشته باشید که منحنی‌های شکنندگی ارائه شده در این تحقیق، بر اساس استفاده از PGA به عنوان معیار شدت است و دلایل انتخاب PGA به عنوان معیار اندازه‌گیری شدت عبارت‌اند از:

- ۱) معیار اندازه‌گیری شدت حرکت زمین است که معمولاً در تجزیه و تحلیل شکنندگی تجهیزات الکتریکی استفاده می‌شود [۳۸ و ۳۷].
- ۲) هنگامی که سیستم تحلیل شده، دارای دو حالت مختلف ارتعاش در دو فرکانس بسیار متفاوت در جهات افقی و قائم باشد، استفاده از PGA در تجزیه و تحلیل منحنی‌های شکنندگی، مفیدتر است.
- ۳) نتایج منحنی‌های شکنندگی در هر مکانی قابل استفاده است و فقط به PGA بستگی دارد.

برای تولید منحنی شکنندگی باید یک توزیع برای پارامترهای تقاضای مهندسی که از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی به دست می‌آید در نظر گرفت، که معمولاً برای این امر از توزیع نرمال استفاده می‌شود. برای به دست آوردن مقدار احتمال یک توزیع نرمال از مساحت سطح زیر منحنی توزیع نرمال موسوم به تابع توزیع تجمعی نرمال استفاده می‌کنند. تابع توزیع

جدول ۱. مشخصات بوشینگ‌های آزمایش شده توسط کنگ و فهد [۴۲ و ۴۳]

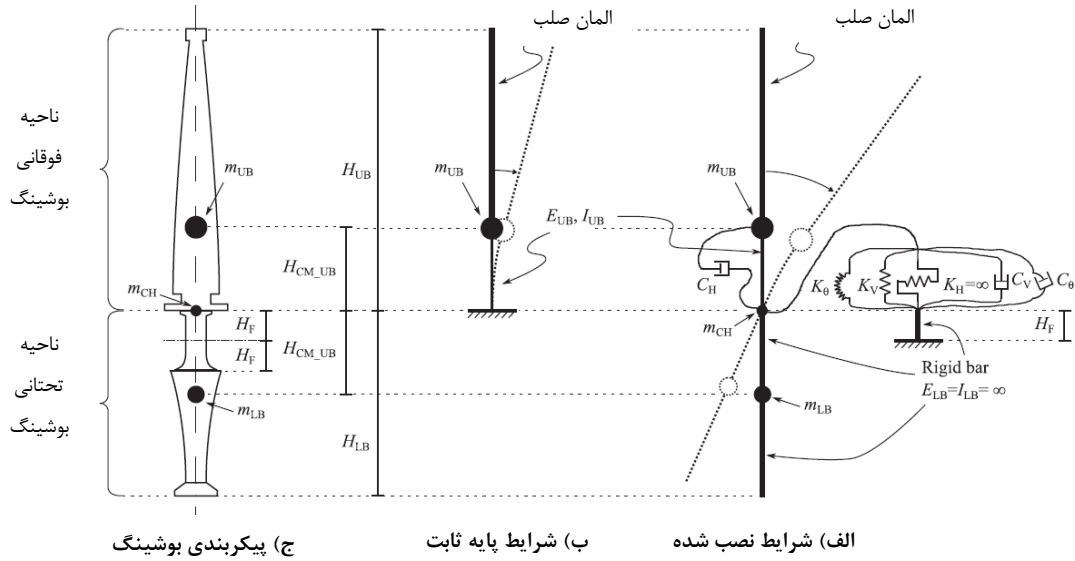
Table 1. Characteristics of the tested bushing by Kong and Fahad [42,43]

شرح	واحد	بوشینگ شماره ۳	بوشینگ شماره ۶	بوشینگ شماره ۸
ظرفیت ولتاژ	kV	550	196/230	550
ارتفاع کل	meter	6.22	3.85	6.48
طول قسمت بالایی بوشینگ: H_{UB}	meter	4.95	2.32	4.83
طول قسمت پایینی بوشینگ: H_{LB}	meter	1.27	1.52	1.65
وزن کل	kN	12.5	12.5	9.7
وزن قسمت بالایی بوشینگ: $m_{UB.g}$	kN	9.59	9.59	6.98
فاصله فلنج تا مرکز ثقل قسمت بالایی بوشینگ: H_{CM_UB}	meter	2.23	2.23	2.16
وزن قسمت پایینی بوشینگ: $m_{LB.g}$	kN	2.46	2.46	2.27
فاصله فلنج تا مرکز ثقل قسمت پایینی بوشینگ: H_{CM_LB}	meter	1.5	1.5	0.99
وزن صفحه اتصال: $m_{CH.g}$	kN	0.44	0.44	0.44
وزن بر واحد طول	kN/m	1.95	0.86	1.43
نصف ضخامت صفحه اتصال: H_F	meter	0.29	0.34	0.29
فرکانس ثابت: f_{FIX}	Hz	9.36	21	9.35
فرکانس نصب شده: f_{AI}	Hz	4.25	11.3	7/70
جنس عایق	-	پرسلانی	پرسلانی	پرسلانی

بوشینگ به دو قسمت بالایی و پایینی تقسیم می‌شود که به یک صفحه متصل می‌شوند. این صفحه با ضخامت $2H_F$ در شکل ۲ نشان داده شده است. سایر پارامترهای هندسی عبارت‌اند از: H_{UB} : طول قسمت بالایی بوشینگ، H_{LB} : طول قسمت پایینی بوشینگ، H_{CM_UB} : فاصله فلنج تا مرکز ثقل قسمت بالایی بوشینگ، H_{CM_LB} : فاصله فلنج تا مرکز ثقل قسمت پایینی بوشینگ، m_{UB} : جرم قسمت بالایی بوشینگ، m_{LB} : جرم قسمت پایینی بوشینگ و m_{CH} : جرم صفحه اتصال است. میرایی بحرانی معادل با ۳ درصد در هر مود ارتعاش در نظر گرفته می‌شود. این مقدار با استفاده از مشاهدات میدانی در مطالعات قبلی [۲۵-۲۸] به دست آمده است. با توجه به هندسه بوشینگ، مقادیر فرکانس‌ها برای حالت پایه ثابت (f_{FIX}) و حالت نصب شده (f_{AI}) به ترتیب در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. این مشخصات در ساخت مدل تحلیلی شکل ۱ موثر بوده و طبق مراحل زیر به دست آمده است [۱۸]:

مورد آزمایش قرار دادند. به طور خاص، فرکانس چرخشی و قائم بوشینگ باید در شرایط نصب شده آن‌ها در نظر گرفته شود و اثرات انعطاف‌پذیری ورق نگهدارنده نیز مدنظر قرار گیرد.

نتایج آزمایشگاهی کنگ و فهد مربوط به چندین بوشینگ شامل ویژگی‌های هندسی، جرم‌ها و فرکانس‌های ارتعاش آزاد در شرایط پایه ثابت (f_{FIX}) و در شرایط متصل به صفحه انعطاف‌پذیر (فرکانس نصب شده، (f_{AI})) است. جدول ۱ اطلاعاتی را در مورد مشخصات سه بوشینگ مختلف نشان می‌دهد. میرایی بحرانی معادل با ۳ درصد در هر مود ارتعاش در نظر گرفته می‌شود. این مقدار با استفاده از مشاهدات میدانی در مطالعات قبلی [۴۴] به دست آمده است. با توجه به هندسه بوشینگ، مقادیر فرکانس‌ها در شرایط پایه ثابت (f_{FIX}) و شرایط نصب شده (f_{AI}) به ترتیب در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲. مدل های بوشینگ [۱۴]: (الف) شرایط نصب شده (ب) شرایط پایه ثابت (ج) پیکربندی بوشینگ

Fig. 2. Bushing models [14]: (a) as-installed condition; (b) fixed condition; (c) definition of bushing

فرکانس زاویه‌ای ω_θ در محل اتصال بوشینگ به بدنه ترانسفورماتور با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega_\theta = \sqrt{\frac{K_\theta}{I}} \quad (7)$$

که در آن I ممان اینرسی بوشینگ است.

ثابت میرایی در مود چرخشی کامل C_θ با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$C_\theta = 2I \cdot \beta_\theta \cdot \omega_\theta \quad (8)$$

که در آن β_θ نسبت میرایی در حالت چرخشی کامل است:

ثابت میرایی خطی افقی C_H با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_H = 4\pi\beta_H m_{UB} f_{Fix} \quad (9)$$

که در آن β_H نسبت میرایی در حالت کاملاً افقی است (مقدار ۰/۰۳ استفاده می‌شود).

ممان اینرسی I_{UB} با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{Fix} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3E_{UB}I_{UB}}{H_{CM_UB}^3 m_{UB}}} \quad (3)$$

سختی قائم K_V با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

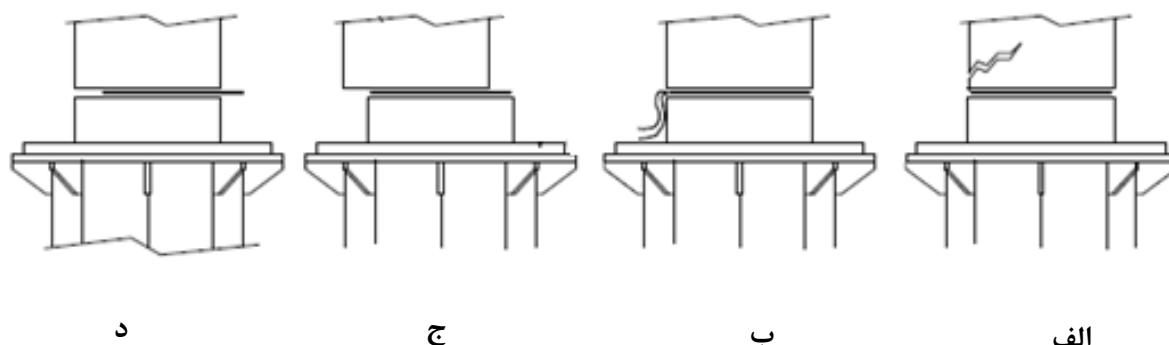
$$K_V = (2\pi f_V)^2 \cdot (m_{UB} + m_{CH} + m_{LB}) \quad (4)$$

ثابت میرایی ویسکوز خطی در جهت قائم C_V با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_V = 4\pi m_V \cdot \beta_V \cdot f_V \quad (5)$$

جرم مؤثر در جهت قائم است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$m_V = m_{UB} + m_{CH} + m_{LB} \quad (6)$$



شکل ۳. حالت های اصلی شکست پوشینگ های پرسیلانی [۴۲]

Fig. 3. Main failure modes of porcelain bushings [42]

۳-۲- شکست ترانسفورماتور

شکست ترانسفورماتور می تواند به طرق مختلفی رخ دهد. مطالعات گذشته نشان داده است که شکست پوشینگ، مهم ترین عامل شکست ترانسفورماتور است. حالت های اصلی شکست پوشینگ در شکل ۳ بر اساس مشاهدات در زمین لرزه های گذشته نشان داده شده است که شامل حالات (الف) شکست بخش پرسیلانی، (ب) نشت روغن، (ج) لغزش بخش پرسیلانی و (د) بیرون زدگی واشر است [۴۲].

۳-۳- مدل سازی ترانسفورماتور

مدل های ترانسفورماتور با جرم های متمرکز در شکل ۴ نشان داده شده است. هر مدل نشان دهنده نیمی از یک ترانسفورماتور است این مدل شامل یک پوشینگ است که با زاویه شیب θ برابر با صفر (پوشینگ قائم) یا ۲۰ درجه (پوشینگ شیب دار) مدل شده است. ارتفاع و طول (یا عرض) ترانسفورماتور به ترتیب با H_T و L_T تعریف می شود. جرم بدنه ترانسفورماتور (به استثنای پوشینگ ها) m_T است و در دو مکان به صورت متمرکز در نظر گرفته می شود. لازم به ذکر است که H_T ، ارتفاع مرکز جرم بدنه ترانسفورماتور است.

شکل ۵ ترانسفورماتور جداسازی شده فقط در جهت افقی در و نکوور را نشان می دهد. سیستم جداسازی متشکل از تکیه گاه های آونگ اصطکاکی سه گانه است که فقط جداسازی افقی را ارائه می دهد. فرض می شود که ترانسفورماتور دارای سه پوشینگ شیب دار با فرکانس های نصب شده ۴/۳، ۷/۷ و ۱۱/۳ است که محدوده وسیعی را نشان می دهد و شکل ۶

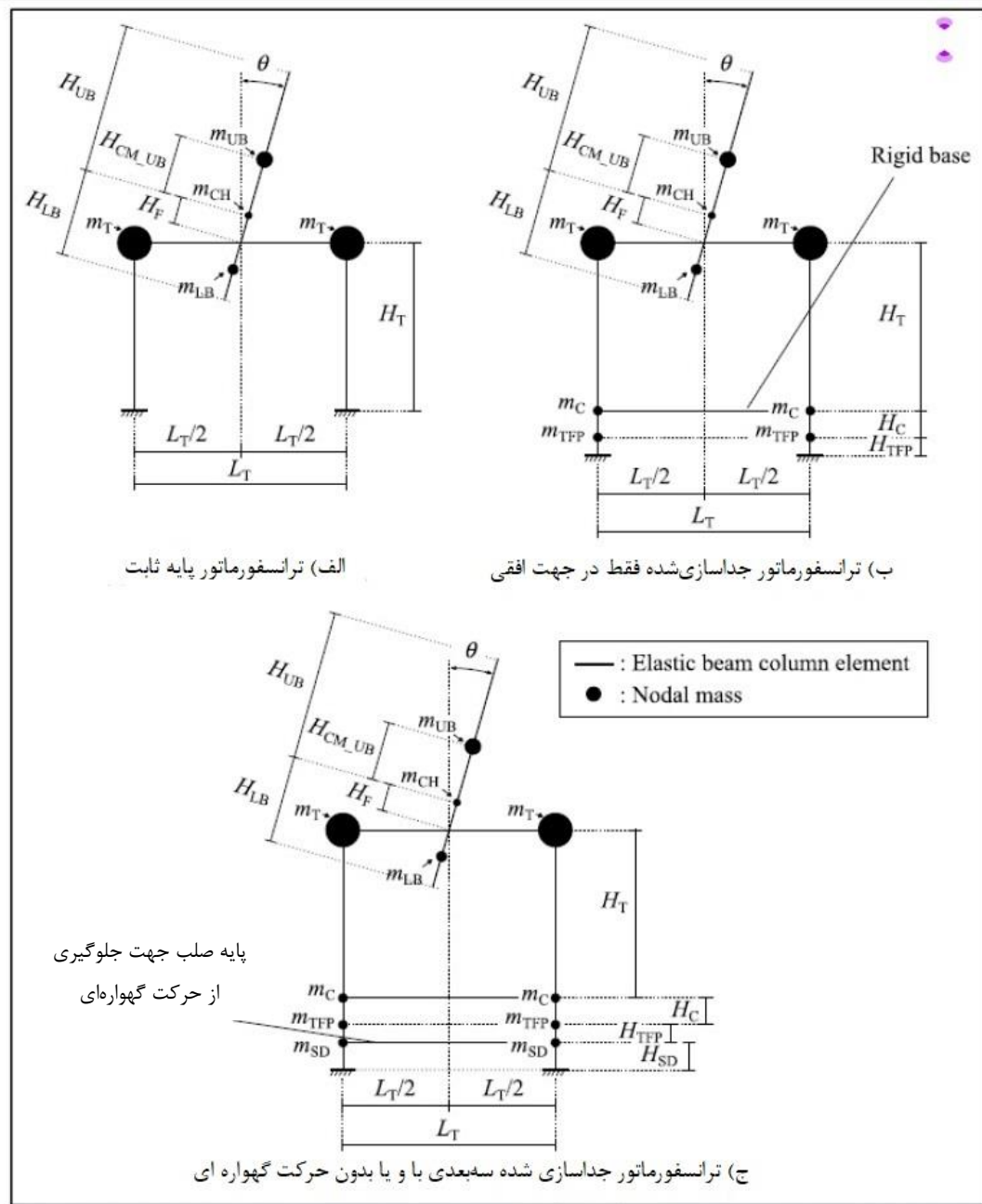
جهت طولی و عرضی ترانسفورماتور جداسازی شده لرزه ای سه بعدی با حرکت گهواره ای را نشان می دهد. این سیستم را جداسازی لرزه ای سه بعدی می نامند که عملکرد لرزه ای آن، تشریح می گردد.

۴- تشریح سیستم جداسازی لرزه ای و مدل سازی در برنامه OpenSEES

۴-۱- جداساز آونگ اصطکاکی سه گانه

یک سیستم جداسازی سه بعدی از تکیه گاه های آونگ اصطکاکی سه گانه، برای ایجاد جداسازی در جهت افقی تشکیل شده است. هنگامی که از یک سیستم جداسازی شده سه بعدی استفاده می شود، جداسازهای آونگ اصطکاکی سه گانه توسط واحد فنر-میراگر پشتیبانی می شوند تا درجاتی از جداسازی قائم را فراهم کنند. دستگاه های فنر-میراگر فقط برای حرکت در جهت قائم طراحی شده اند که در برابر چرخش و جابه جایی جانبی مقاومت می کند که منجر به انتقال نیروی برشی و لنگر واژگونی توسط تکیه گاه بالایی آن می شود. شکل ۷، مقطع نمونه جداساز آونگ اصطکاکی سه گانه در نظر گرفته شده در این تحقیق را برای ترانسفورماتورهایی با وزن ۱۴۲۳، ۱۸۶۸ و ۲۳۱۳ کیلو نیوتن را نشان می دهد.

رفتار تکیه گاه های آونگ اصطکاکی سه گانه در مطالعه فنز و کنستانتینو [۴۵] تعریف شده است و شرح جزئیات بیشتر، شامل ویژگی های نهایی آن ها در مطالعه سارلیس و کنستانتینو [۴۶] ارائه شده است.



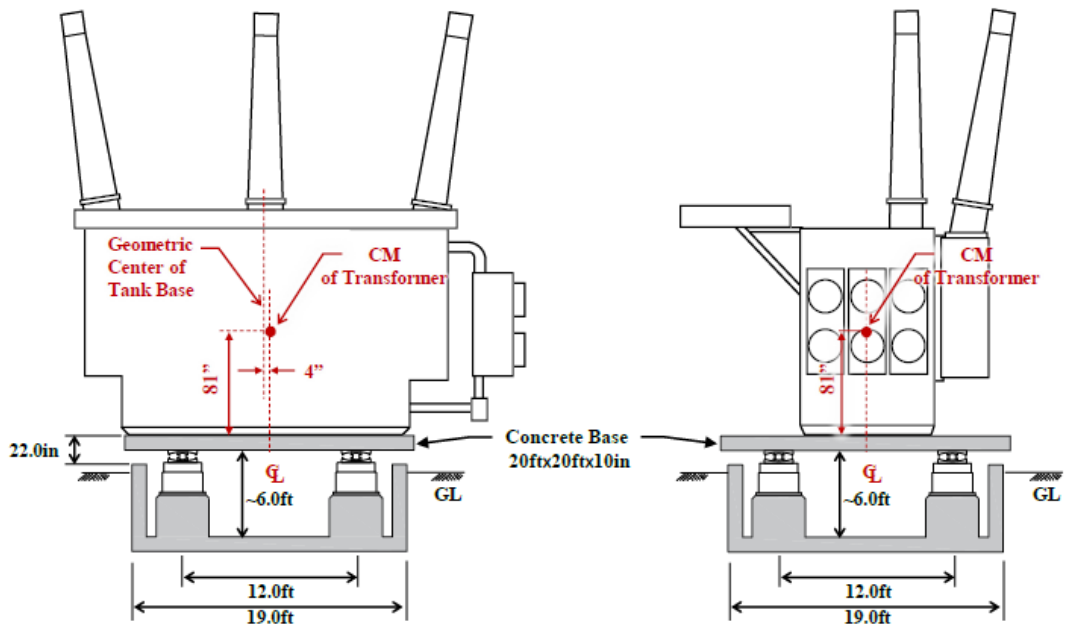
شکل ۴. مدل ترانسفورماتور به همراه پوشینگ در شرایط [۱۴]: (الف) پایه ثابت (ب) جداسازی شده فقط در جهت افقی (ج) جداسازی شده سه بعدی با و یا بدون حرکت گهواره ای

Fig.4. Two-dimensional transformer models [14]: (a) fixed base; (b) horizontal-only isolated; (c) 3D isolated with or without free rocking



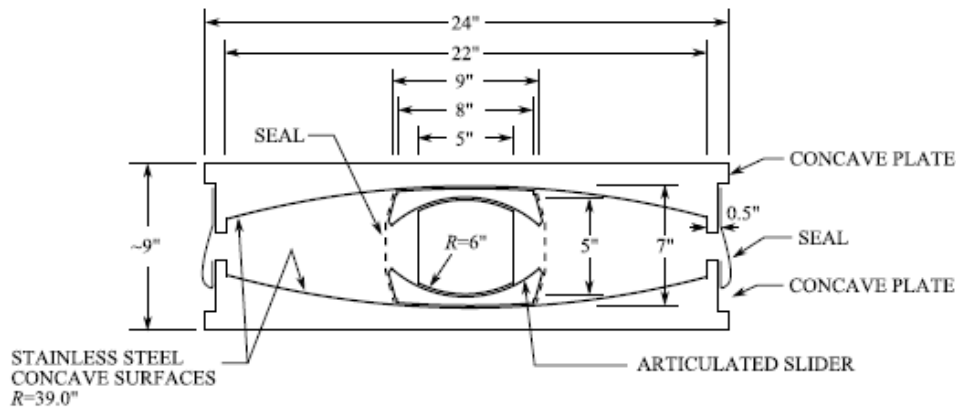
شکل ۵. ترانسفورماتور جداسازی شده فقط در جهت افقی در ونکوور [۳۹]

Fig. 5. Horizontal-only isolated transformer in Vancouver [39]



شکل ۶. ترانسفورماتور جداسازی شده لرزه‌ای سه بعدی با حرکت گهواره‌ای [۴۰]

Fig. 6. 3D seismically isolated transformer with free rocking[40]



شکل ۷. مقطع کوچک‌ترین سایز جداساز آونگ اصطکاکی سه گانه بدون نگهدارنده داخلی [۴۶]

Fig. 7. Section and plan views of the smallest size without inner restrainer [46]

سازنده میراگر، کنترل می‌شود. توجه داشته باشید که فنرها دارای ظرفیت جابه‌جایی مازاد بوده که در این مرحله مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. در حالت کشش، دستگاه در زمان رسیدن به حد ۱۲۷ میلی‌متر، به وضعیت ضربه رسیده که متناظر با ظرفیت جابه‌جایی میراگر است. پس از آن، دستگاه تا زمانی که به ظرفیت نیروی نهایی میراگر در کشش برسد، سختی بالایی از خود نشان می‌دهد. این حد نیرو به طراحی میراگر بستگی دارد و معمولاً بیش از دو برابر حداکثر نیروی میرایی است. برای این دستگاه، حد کشش حدود ۸۹۰ کیلونیوتن است. با این حال، جداسازهای آونگ اصطکاکی سه گانه موجود در بالای واحدهای فنر-میراگر ویسکوز، هیچ ظرفیت کششی ندارند، بنابراین واحدهای فنر-میراگر نباید در کشش از کار بیفتند. توجه داشته باشید که این دستگاه دارای یک سیستم تلسکوپی است که به عنوان یک پین برشی عمل می‌کند و همچنین از چرخش جلوگیری می‌کند. به طور واقع‌بینانه، امکان ایجاد زاویه دوران ناچیز تا ۰/۱ درجه میسر است. همچنین فنرهای مارپیچ دستگاه، دارای پین‌های داخلی هستند که طول فنر موجود برای تغییر شکل برشی را محدود نموده تا سختی برشی و سختی پیچشی افزایش یابند. به دلیل اینکه حرکات پیچشی زمین و انتقال تصادفی گشتاور از جداساز آونگ اصطکاکی سه گانه بالایی، باعث پیچش فنرها و بزرگنمایی زاویه پیچش به دلیل نیروهای فشاری زیاد در فنرها می‌شود، لذا سختی‌های یاد شده، مورد نیاز خواهند بود.

۴-۲- تشریح دستگاه فنر-میراگر

دستگاه فنر-میراگر برای ترانسفورماتورهای الکتریکی با وزن کل ۱۴۲۳، ۱۸۶۸ و ۲۳۱۳ کیلونیوتن، طراحی شده است که این وزن شامل وزن بدنه ترانسفورماتور و بوشینگ‌ها، وزن جداسازهای آونگ اصطکاکی سه گانه و وزن دال نگهدارنده ترانسفورماتورها است.

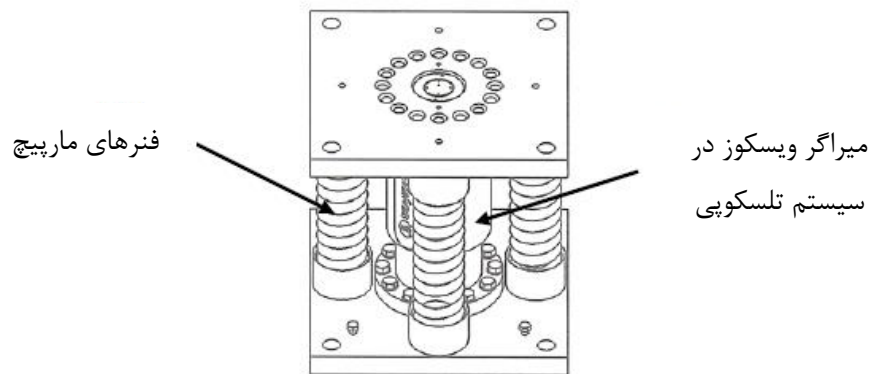
حداکثر بار استاتیکی در هر جداساز معادل با ۵۷۸/۳ کیلونیوتن در نظر گرفته شده است. عملکرد اصلی واحد جداساز قائم، تحمل وزن و ایجاد فرکانس در جهت قائم معادل با ۲ هرتز با نسبت میرایی بحرانی متناظر معادل با ۰/۵۰ است که بار کل تحمل شده معادل با ۱۸۶۸ کیلونیوتن است. فرکانس و نسبت میرایی برای وزن ترانسفورماتور معادل با ۱۴۲۳ کیلونیوتن به ترتیب برابر با ۲/۳ هرتز و ۰/۵۶ و برای وزن ترانسفورماتور معادل با ۲۳۱۳ کیلونیوتن به ترتیب معادل با ۱/۸ هرتز و ۰/۴۴ خواهد بود. جدول ۲ پارامترهای طراحی مربوط به یکی از این دستگاه‌ها را نشان می‌دهد. پارامترهای طراحی بر اساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی در تحقیقات گذشته، به دست آمده است [۴۰]. دستگاه دارای ضریب اطمینان قابل‌توجهی (ضریب بیشتر از ۲) برای محدوده مشخصی از نیرو و گشتاور است.

طرح سه بعدی دستگاه، در شکل ۸ ارائه شده است. در زمان فشرده شدن دستگاه فنر-میراگر، ظرفیت جابه‌جایی نهایی، زمانی استفاده می‌شود که جابه‌جایی به حد ۱۲۷ میلی‌متر برسد و سپس دستگاه سختی بسیار بالایی با ظرفیت نیروی نامحدود نشان می‌دهد. محدودیت ۱۲۷ میلی‌متری توسط

جدول ۲. پارامترهای طراحی دستگاه فنر-میراگر [۴۰]

Table 2. Parameters of spring-damper device [40]

578.3	kN	بار استاتیکی
76	mm	جابه‌جایی استاتیکی
7/7	kN/mm	سختی
0.6	kN-sec/mm	ثابت میرایی (میرایی ویسکوز خطی)
±45	mm	جابه‌جایی دینامیکی
121	mm	جابه‌جایی کل
127	mm	ظرفیت ضربه
+76	mm	ظرفیت جابه‌جایی (از وضعیت جابه‌جایی ۷۶- میلی‌متر، علامت + کشش، علامت - فشار). زمانی که نیروی استاتیکی تغییر کند، حدود جابه‌جایی نیز تغییر می‌یابد.
-51	mm	
0.1	درجه	حداکثر چرخش مجاز صفحه بالایی نسبت به صفحه پایینی
0	درجه	چرخش پیچشی مجاز

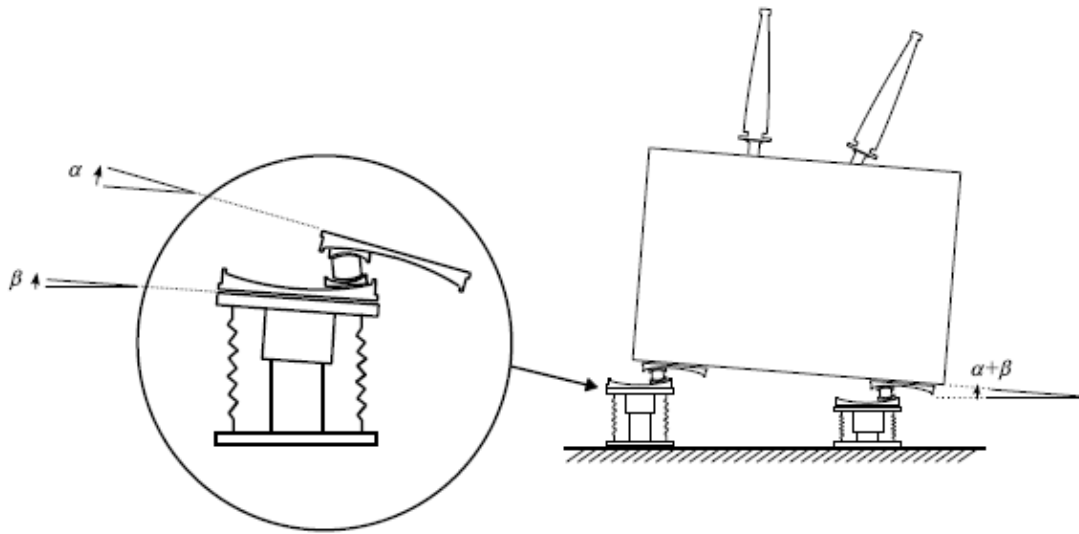


شکل ۸. طرح سه بعدی دستگاه فنر-میراگر [۳۹]

Fig. 8. Schematic of the spring-viscous damper device [39]

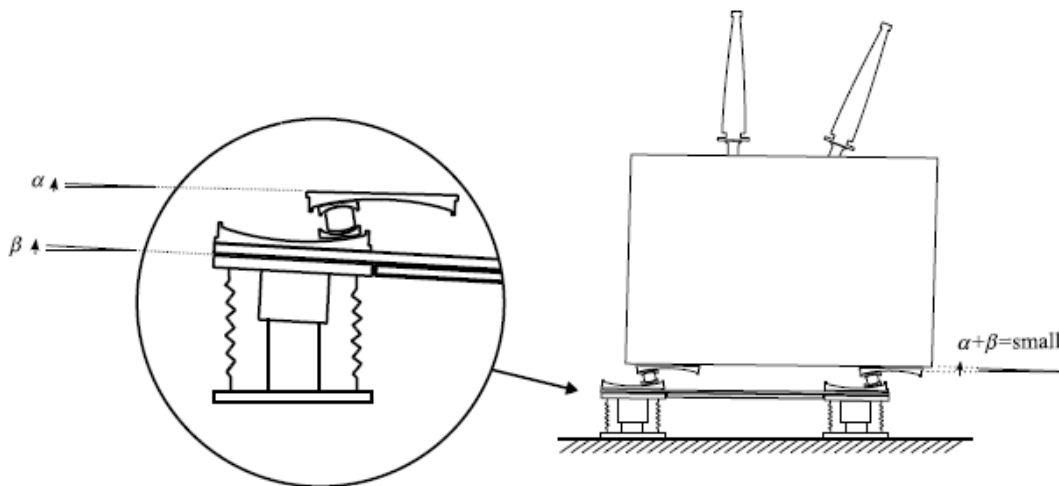
محدود شده است. معمولاً زاویه β کوچک و محدود به $0/1$ درجه است. صفحه بالایی جداسازهای آونگ اصطکاکی سه گانه برای چرخش آزاد است، زیرا جداسازهای آونگ اصطکاکی سه گانه هیچ مقاومتی در برابر حرکت گهواره‌ای ندارند. این موضوع به دلیل فراهم شدن حرکت نسبی قائم توسط واحد فنر-میراگر در هر تکیه‌گاه امکان‌پذیر خواهد بود. زاویه گهواره‌ای α با توجه به قابلیت واحد فنر-میراگر در کنترل حرکت قائم، محدود خواهد شد.

شکل‌های ۹ و ۱۰ دو روش نصب مشتمل بر حرکت گهواره‌ای آزاد و حرکت گهواره‌ای محدود شده را نشان می‌دهند. در شکل ۹، ترانسفورماتور جداسازی شده توسط چهار جداساز آونگ اصطکاکی سه گانه پشتیبانی می‌شود که در مجموع توسط چهار دستگاه فنر-میراگر قائم پشتیبانی می‌گردند. صفحه مقعر پایین جداسازهای آونگ اصطکاکی سه گانه اجازه چرخش با زاویه β را دارد که توسط سیستم تلسکوپی واحد فنر-میراگر



شکل ۹. روش نصب که اجازه حرکت گهواره‌ای آزادانه را می‌دهد [۱۴]

Fig. 9. Installation method that freely allows rocking [14]



شکل ۱۰. روش نصب که حرکت گهواره‌ای را محدود می‌نماید [۱۴]

Fig. 10. Installation method that restrains rocking [14]

جدول ۳. پارامترهای مدل ترانسفورماتور جداسازی شده سه بعدی [۱۸]

Table 3. Properties of 3D isolated transformer model [18]

2.06 (m)	ارتفاع ترانسفورماتور: H_T
2.79 (m)	طول (عرض) ترانسفورماتور: L_T
0.15 (m)	ارتفاع دال بتنی: H_C
0.12 (m)	ارتفاع جداساز آونگ اصطکاکی سه گانه: $H_{TRIPLE FP}$
0.38 (m)	ارتفاع دستگاه فنر-میراگر: H_{SD}
0 or 20 (degrees)	زاویه بوشینگ شیب دار: H_{SD}
31741, 43077, 54412 (kg)	جرم متمرکز بدنه ترانسفورماتور: m_T
4534 (kg)	جرم متمرکز دال بتنی: m_C
317 (kg)	جرم متمرکز جداساز آونگ اصطکاکی سه گانه: $m_{TRIPLE FP}$
227 (kg)	جرم متمرکز دستگاه فنر-میراگر: m_{SD}
1423, 1868, 2313 (kN)	وزن کل سازه: $W_T + W_C = (m_T + m_C). g$

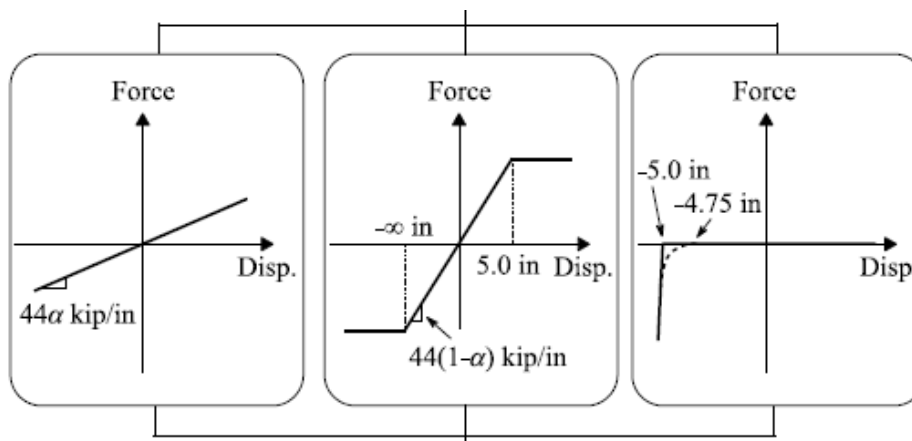
۳-۴ مدل پیشنهادی برای شبیه‌سازی رفتار نهایی سیستم جداسازی لرزه‌ای سه بعدی در برنامه OpenSEES [۴۷]

۳-۴-۱- خصوصیات مدل ترانسفورماتور

المان‌های تیر-ستون الاستیک که قاب ترانسفورماتور را نشان می‌دهد، با سختی بالا تعیین می‌شوند. المان‌های انعطاف‌پذیر مطابق شکل ۲، نشان دهنده برخی قسمت‌های بوشینگ هستند. المان‌های مذکور در OpenS-EES با المان تیر-ستون الاستیک^۱ و با رفتار خطی مدل می‌شوند. مدل‌های نشان داده شده در شکل ۴، مدل‌های قابی با جرم‌های متمرکز هستند. هر مدل بیانگر نیمی از یک ترانسفورماتور است. جرم بدنه ترانسفورماتور (به استثنای بوشینگ) $2m_T$ است و در دو مکان بالای تکیه‌گاه‌ها به صورت متمرکز در نظر گرفته می‌شود. برای ترانسفورماتور جداسازی شده، جرم اضافی وجود دارد که نشان دهنده یک دال بتنی است که ترانسفورماتور را در بالای جداسازها نگه می‌دارد. این جرم برابر با $2m_C$ است و در دو مکان در بالای تکیه‌گاه‌ها قرار می‌گیرد. جرم‌های متمرکز کوچک برای نشان دادن جرم جداسازهای آونگ اصطکاکی سه گانه، ($m_{triple FP}$) و جرم واحدهای فنر-میراگر (m_{SD}) در مکان‌های جداساز تعبیه می‌شوند. در جدول ۳ پارامترهای مورد نیاز به اختصار ارائه شده است.

بر اساس محدودیت‌های ذکر شده در جدول ۳، ظرفیت جابه‌جایی قائم ۵۱ میلی‌متر به سمت پایین و ۷۶ میلی‌متر به سمت بالا (از وضعیت جابه‌جایی ۷۶- میلی‌متر به ازای بار استاتیکی ۵۷۸/۳ کیلونیوتن) است. بیشترین ظرفیت جابه‌جایی توسط میانگین حرکت قائم چهار تکیه‌گاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع، جابه‌جایی قائم نسبی بین هر دو تکیه‌گاه کمتر از ۵۱ میلی‌متر خواهد بود. به ازای حداقل فاصله بین تکیه‌گاهی معادل ۲/۸ متر، حداکثر مقدار زاویه حرکت گهواره‌ای α ، تقریباً ۱ درجه خواهد بود؛ بنابراین، زاویه کل چرخش $\alpha + \beta$ کمتر از ۱/۱ درجه است. این امر منجر به جابه‌جایی و شتاب مازاد در بخش‌هایی از ترانسفورماتور که دورتر از سیستم جداسازی قرار دارند، می‌شود.

چنانچه یک سیستم با سختی بالا بین تکیه‌گاه‌ها نصب گردد، حرکت گهواره‌ای محدود می‌شود و زاویه α تقریباً صفر خواهد شد. این موضوع برای یک صفحه سخت که بین صفحه مقعر آونگ اصطکاکی سه گانه پایین و صفحه بالایی سیستم فنر-میراگر قائم قرار می‌گیرد، صادق است که در شکل ۱۰ ارائه شده است. جابه‌جایی جداسازهای قائم یکسان است و در این حالت، چرخش کل معادل $\alpha + \beta$ است و به سختی سیستم اتصال بستگی دارد. به طور دقیق، می‌توان چرخش مذکور را تا ۰/۱ درجه کاهش داد، لیکن جهت دستیابی به این امر به یک پایه فوق‌العاده سخت نیاز است.



شکل ۱۱. اتصال المان‌های موازی جهت ارائه رفتار نهایی فنرها [۱۴]

Fig. 11. Elements connected in parallel to represent the ultimate behavior of springs[14]

۳-۳-۴ مدل شبیه‌سازی رفتار نهایی واحد فنر-میراگر در این مدل از سه المان تک‌محور برای نشان دادن رفتار فنر در برنامه OpenSEES مشتمل بر مصالح تک‌محور الاستیک، مصالح با رفتار پلاستیک کامل و مصالح گپ با رفتار کاملاً پلاستیک استفاده می‌شود و با رفتار غیرخطی مدل می‌شوند. مصالح یاد شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است و رابطه نیرو-تغییر مکان برای المان فنر در شکل ۱۱ ارائه شده است. شایان ذکر است که سختی کششی فنرها در صورت تجاوز از حد جابه‌جایی ۱۲۷ میلی‌متر، بسیار پایین در نظر گرفته می‌شود. (α برابر سختی واقعی است که معادل ۰/۰۰۱ منظور می‌شود).

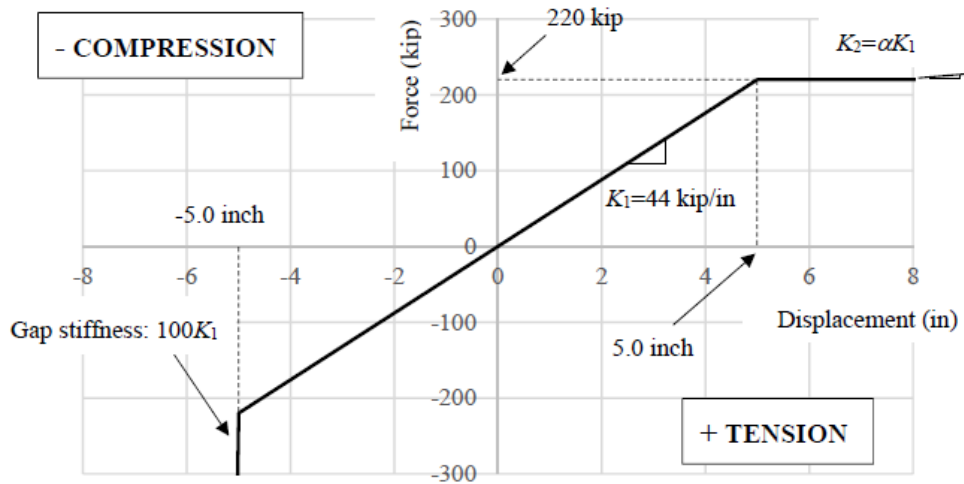
مدل نشان داده شده در شکل ۱۱، رفتار فنرها را به تنهایی نشان می‌دهد. در مجموعه فنر-میراگر، فنرها تنها قادر خواهند بود تحت فشار حداکثر تا ۱۲۷ میلی‌متر نسبت به موقعیت اولیه، تغییر شکل دهند. در حالت کششی و بدون در نظر گرفتن میراگر، همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، فنر می‌تواند تغییر شکل دهد؛ اما در واقعیت، توسط میراگر محدود می‌شود. بنابراین فنرها نمی‌توانند تحت نیروی کششی قرار گیرند، زیرا نیرو به میراگر منتقل گردیده که به ظرفیت نهایی جابه‌جایی خود رسیده و در برابر تغییر شکل با سختی بسیار بالا مقاومت می‌کند. با این حال، حد ضربه فنرها در کشش به دلیل اعتبار فیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و تا حد ضربه ۱۲۷ میلی‌متر (۵ اینچ)، عمل می‌نماید.

المان با طول صفر^۱ که در بخش الف شکل ۲ در محل اتصال فلنج به بخش بالایی پوشینگ قرار گرفته است و به وسیله فنر و میراگر در جهات افقی، قائم و چرخشی نشان داده شده، به صورت غیرخطی تعریف شده است. المان غیرخطی مذکور، پس از کرنش 5 mm در شاخه خطی، وارد رفتار غیرخطی می‌شود. کرنش مذکور با استفاده از نتایج آزمایشگاهی در مورد پوشینگ‌های kv 230 و kv 550 که پس از کرنش مذکور، دچار پارگی واشر، لغزش پرسلان و نشت روغن شده‌اند، به دست آمده است [۲ و ۳].

۳-۳-۴ مدل شبیه‌سازی رفتار نهایی تکیه‌گاه‌های آونگ اصطکاکی سه گانه (triple FP)

راهکار پیشنهادی در این مطالعه مبتنی بر اصلاح مدل ارائه شده توسط فنز و کنستانتینو [۴۵] است که رفتار نهایی آونگ اصطکاکی سه گانه شبیه‌سازی می‌گردد. در مدل پیشنهادی، هر واحد (FP1) تا (FP3) شامل المان تکیه‌گاه FP، المان MinMax و مصالح گپ^۲ با رفتار پلاستیک کامل به همراه المان لینک دو گرهی است و با رفتار غیرخطی مدل می‌شوند. شایان ذکر است که روش طراحی جداساز آونگ اصطکاکی سه گانه، در تحقیق مک ویتی^۳ و کنستانتینو [۴۸]، ارائه شده است.

- 1 Zero length element
- 2 Gap material
- 3 McVitty



شکل ۱۲. رابطه نیرو-تغییر مکان ایجاد شده توسط المان فنر [۱۸]

Fig. 12. Force-displacement relation produced by the spring element [18]

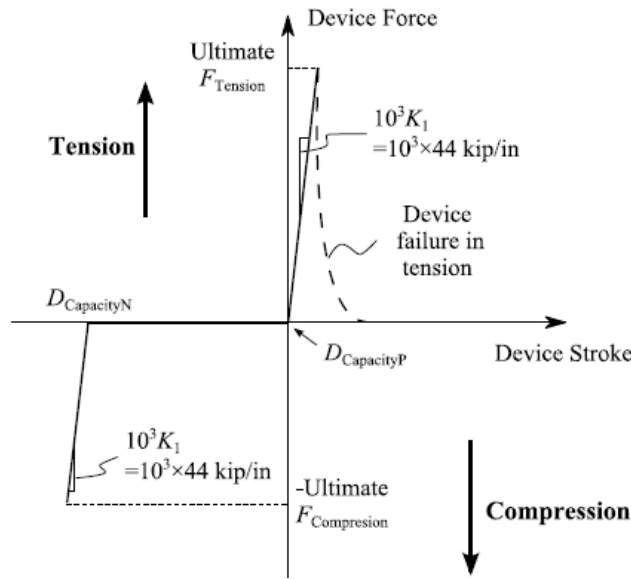
جدول ۴. پارامترهای میراگر ویسکوز [۱۴]

Table 4. Parameters for viscous damper [14]

0 (mm)	ظرفیت جابه‌جایی در جهت مثبت ($D_{CapacityP}$)
127 (mm)	ظرفیت جابه‌جایی در جهت منفی ($D_{CapacityN}$)
بی‌نهایت	نیروی نهایی در فشار ($Ultimate F_{Compression}$)
890 (kN)	نیروی نهایی در کشش ($Ultimate F_{Tension}$)

شکست دستگاه به گونه‌ای مدل‌سازی شده است که وقتی نیروی دستگاه به مقدار نهایی می‌رسد ($Ultimate F_{Tension}$)، نیرو به طور ناگهانی حذف نگردد، بلکه به تدریج در هر گام زمانی به میزان ۱۰٪ مقدار مرحله قبل، کاهش یابد. شایان ذکر است که چنانچه المان میراگر در کشش از کار بیفتد و از المان ترکیبی فنر-میراگر حذف شود، المان میراگر عمل می‌نماید، لیکن از لحاظ عملکردی تنها المان فنر در این وضعیت دارای کارکرد مناسب خواهد بود.

میراگر ویسکوز در برنامه OpenSEES با یک المان ماده تک محوری جدید توسعه یافته به نام ULTdamper نشان داده شده است. منحنی پیکربندی المان مذکور و پارامترهای کلیدی مدل به همراه رابطه نیرو و ظرفیت ضربه در فشار و کشش، در شکل ۱۳ نشان داده شده و مقادیر پارامترها نیز در جدول ۴ ارائه شده است. از دیدگاه توصیفی، رفتار کششی پس از شکست به گونه‌ای باید منظور گردد که اولاً از نظر فیزیکی معنادار باشد و ثانیاً از ناپایداری عددی در برنامه تحلیلی جلوگیری گردد. رفتار



شکل ۱۳. رفتار نهایی المان میراگر ویسکوز [۱۸]

Fig. 13. Ultimate behavior of viscous damper element [18]

شکست گسل و تغییر مکان‌های دائمی احتمالی زمین در نتیجه لغزش گسل بستگی دارد. برجسته‌ترین ویژگی‌های نزدیک گسل، پالس‌هایی است که توسط اثر جهت‌پذیری و اثر جابه‌جایی ماندگار (اثر پرتابی) ایجاد می‌گردند. این زمین‌لرزه‌های پالسی غالباً شامل یک پالس مجزا در تاریخچه‌های زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان و غالباً در تاریخچه زمانی سرعت است. زلزله‌های نزدیک گسل، دارای پالس سرعت با دوره تناوب بلند ذاتی بوده و رکوردهای مربوط به آن‌ها دارای اثر جهت‌پذیری رو به جلو است.

این حالت زمانی روی می‌دهد که سرعت انتشار گسل با سرعت موج برشی نزدیک است. تغییر شکل وابسته این سرعت موج برشی در جهت عمود بر گسل برای گسل‌های امتداد لغز بزرگ‌تر است. همچنین وجود پالس مشهود در رکورد شتاب باعث می‌شود که بین مقادیر انرژی نسبی و مطلق در پریودهای کوتاه و بلند اختلاف به وجود آید. در پریودهای میانی تفاوت بین دو نوع انرژی قابل چشم‌پوشی است اما در پریودهای بلند انرژی نسبی عموماً بزرگ‌تر از انرژی مطلق است. چنین نتیجه‌گیری برای رکوردهای مختلف با اثرات جهت‌پذیری که در رکورد شتاب آن‌ها پالس مشهود قابل رویت است، دیده می‌شود [۵۰].

۵- انتخاب و مقیاس‌سازی حرکات برای انجام تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)

ارزیابی مقاومت در برابر شکست، مستلزم انجام تحلیل دینامیکی افزایشی است که برای ارزیابی احتمال شکست برای مجموعه خاصی از حرکات، از دستورالعمل FEMA P695 استفاده می‌شود. در حالی که دستورالعمل FEMA P695 فقط شامل اجزای افقی حرکات است، تجزیه و تحلیل مورد استفاده در این مطالعه، به مؤلفه قائم نیز نیاز دارد. این امر در ارزیابی عملکرد سیستم جداسازی لرزه‌ای سه بعدی ضروری است. حرکات افقی حوزه دور از مجموعه حرکات استفاده شده در FEMA P695 و مؤلفه قائم حرکات مربوطه از پایگاه داده‌های زلزله‌نگاری PEER [۴۹] انتخاب و مورد بهره‌برداری قرار گرفتند. جدول ۵ اطلاعات حرکات مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

۶- ارزیابی تحریکات پالس‌گونه نزدیک گسل

ویژگی‌های خاص زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل به طور مستقیم به مکانیسم شکست، جهت گسیختگی نسبت به ساختگاه، جهت لغزش

جدول ۵. حرکات حوزه دور مورد استفاده در تحلیل دینامیکی [۲۱ و ۱۹ و ۱۴]

Table 5. Far-field ground motions used in dynamic analysis [14,19,21]

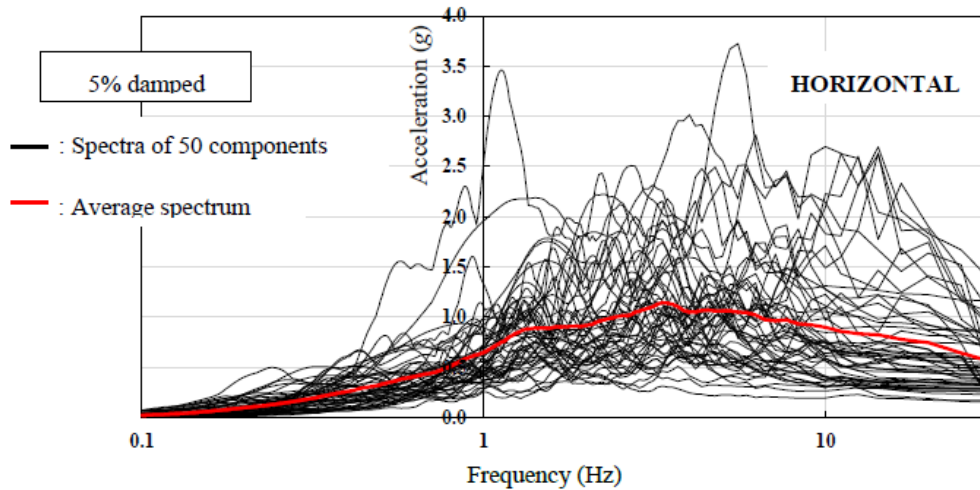
نام زلزله	نام ایستگاه ثبت کننده	مقادیر در دو جهت افقی و سپس در جهت قائم، نشان داده شده است. واحد بر حسب
		g PGA
Northridge	Beverly Hills - Mulhol	0.42, 0.52, 0.32
Northridge	Canyon Country WLC	0.41, 0.48, 0.30
Duzce, Turkey	Bolu	0.73, 0.82, 0.20
Hector Mine	Hector	0.27, 0.34, 0.15
Imperial Valley	Delta	0.24, 0/35, 0.14
Imperial Valley	El Centro Array #11	0.36, 0.38, 0.38
Kobe, Japan	Nishi-Akashi	0.51, 0.50, 0.39
Kobe, Japan	Shin-Osaka	0.24, 0.21, 0.06
Kocaeli, Turkey	Duzce	0.31, 0.36, 0.21
Kocaeli, Turkey	Arcelik	0.22, 0.15, 0.08
Landers	Yarmo Fire Station	0.24, 0.15, 0.14
Landers	Coolwater	0.28, 0.42, 0.18
Loma Prieta	Capitola	0.53, 0.44, 0.56
Loma Prieta	Gilroy Array #3	0.56, 0.34, 0.34
Manjil, Iran	Abbar	0.51, 0.50, 0.54
Superstition Hills	El Centro Imp. Co	0.36, 0.26, 0.13
Chi-Chi, Taiwan	CHY101	0.35, 0.44, 0.17
Chi-Chi Taiwan	TCU045	0.47, 0.51, 0.36
San Fernando	LA - Hollywood Stor	0.21, 0.17, 0.16
Friuli- Italy	Tolmezzo	0.35, 0.31, 0.28

گرفتن اثرات جهت گسیختگی بر دامنه و مدت زمان استهلاک حرکت زمین پیشنهاد کردند. هوانگ و همکاران^[۵۳] حداکثر تقاضای طیف لرزه‌ای را در ناحیه نزدیک گسل ارزیابی کردند.

برخی از موقعیت‌های مکانی در نظر گرفته شده، واجد شرایط طبقه‌بندی در مجاورت گسل‌های فعال با ویژگی‌های پالس‌گونه هستند که نزدیک‌ترین گسل در فاصله ۱ تا ۴ کیلومتری واقع شده است. برای این مکان‌ها، نتایج تحلیل شکنندگی باید با انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی با استفاده از حرکات با ویژگی‌های نزدیک گسل ارزیابی شود. FEMA P695 مجموعه‌ای از این حرکات شامل ۲۸ رکورد دو مؤلفه‌ای (۵۶ مؤلفه افقی مجزا) را برای استفاده در این موارد ارائه کرد. جدول ۶، زیرمجموعه‌ای از ۱۳ مورد از این رکوردها را نشان می‌دهد که مؤلفه حرکت قائم زمین برای آن‌ها موجود بوده است.

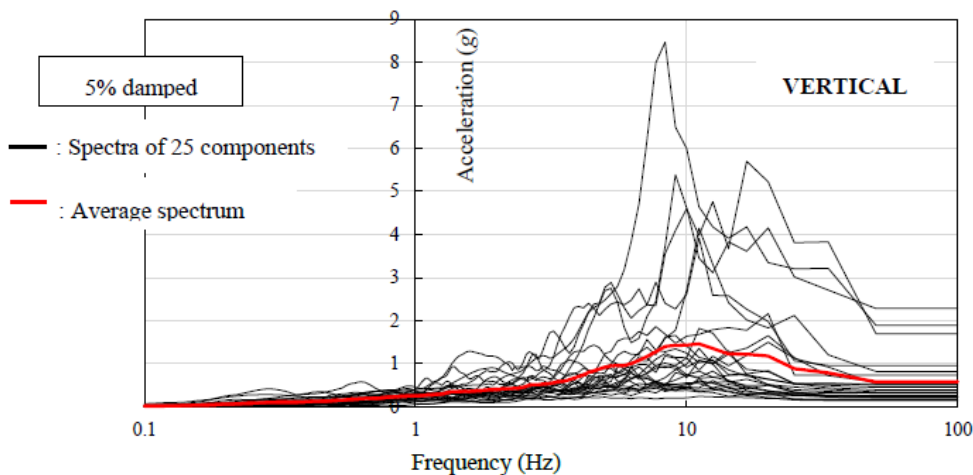
ویژگی‌های زلزله‌های حوزه نزدیک ممکن است به طور قابل‌توجهی بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها و سازه‌ها واقع در نزدیکی گسل‌ها تأثیر بگذارد. در بسیاری از موارد، اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده منجر به وقوع حرکات پالس‌گونه در مکان‌هایی می‌شود که در جهت انتشار امواج لرزه‌ای قرار دارند. این پدیده در مقایسه با سیگنال‌های ثبت شده غیرپالس‌گونه، آسیب‌های ساختاری شدیدتری ایجاد می‌کند که ضرورت تلاش بیشتر برای بررسی ویژگی‌های سیگنال پالس‌گونه را برجسته می‌سازد. این چالش برای کشورهایی که شهرهایی با سازه‌های قدیمی در نزدیکی گسل‌های بسیار فعال دارند، اهمیت بیشتری دارد [۵۱].

کارهای تحقیقاتی زیادی در مورد ویژگی‌ها و روش‌های مدل‌سازی حرکات پالس‌گونه از جنبه‌های مختلف انجام شده است. به عنوان یک کار اولیه، سامرویل و همکاران^[۵۲] یک روش اصلاحی را برای در نظر



شکل ۱۴. طیف پاسخ شتاب افقی ۲۵ حرکت انتخاب شده حوزه نزدیک (مجموعاً ۵۰ مؤلفه)

Fig. 14. Horizontal acceleration response spectra of selected 20 ground motions (total of 40 components)



شکل ۱۵. طیف پاسخ شتاب قائم ۲۵ حرکت انتخاب شده حوزه نزدیک (مجموعاً ۲۵ مؤلفه)

Fig. 15. Vertical acceleration response spectra of selected 20 ground motions (total of 20 components)

تحلیل دینامیکی غیرخطی با استفاده از حرکات نزدیک گسل برای سه مورد بوشینگ با فرکانس‌های نصب $\frac{4}{3}$ ، $\frac{7}{7}$ و $\frac{11}{3}$ هرتز در ترانسفورماتورهایی به وزن ۱۸۶۸، ۱۴۲۳ و ۲۳۱۳ کیلو نیوتن، دارای جداساز و فاقد جداسازهایی با ظرفیت جابه‌جایی ($D_{capacity}$) معادل با ۰.۴۵، ۰.۴ و ۰.۷۹۵ میلی‌متر انجام شد.

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب طیف پاسخ شتاب با میرایی ۰.۵٪ را برای حرکات افقی و قائم زمین را نشان می‌دهند. طیف افقی شامل ۵۰ طیف مؤلفه‌های عمود بر گسل و موازی گسل و طیف قائم شامل ۲۵ طیف از مؤلفه‌های عمود بر گسل است [۲۱]. طیف‌های میانگین نیز برای هر جهت نشان داده شده است. همه رکوردهای جدول ۶ حاوی چنین پالس‌هایی هستند.

جدول ۶. حرکات پالس گونه نزدیک گسل مورداستفاده در تحلیل دینامیکی افزایشی [۲۱ و ۱۹]

Table 6. Near-Fault pulse-like ground motions used in dynamic analysis [19,21]

نام زلزله		ایستگاه ثبت کننده		مقادیر در دو جهت افقی و سپس در جهت قائم نشان داده شده است.	
سال	نام	نام	PGA	PGV	
رکوردهای پالس گونه					
6.5	1979	Imperial Valley-06	El Centro Array #6	0.44, 0.40, 1.89	44.0, 25.5, 25.0
6.5	1979	Imperial Valley-06	El Centro Array #7	0.46, 0.34, 0.58	42.8, 17.5, 107
6.9	1980	Irpinia, Ital -01	Sturno	0.23, 0.31, 0.23	16.3, 17.9, 9.5
6.9	1989	Loma Prieta	Sarato - Aloha	0.36, 0.38, 0.40	21.9, 17.0, 11.0
6.7	1992	Erzican, Turk	Erzincan	0.49, 0.42, 0.23	37.4, 17.8, 6.5
7	1992	Cape Mendocino	Petrolia	0.61, 0.63, 0.17	32.2, 23.8, 8.0
7.3	1992	Landers	Lucerne	0.71, 0.79, 0.82	55.1, 20.8, 16.2
6.7	1994	Northridge-01	Rinaldi Receiving Sta	0.87, 0.42, 0.96	65.7, 24.6, 16.6
6.7	1994	Northridge-O I	Sylmar - Olive View	0.73, 0.60, 0.54	48.3, 21.4, 7.3
7.5	1999	Kocaeli, Turk	Istanbul	0.15, 0.22, 0.14	8.9, 11.7, 4.9
7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU065	0.82, 0.59, 0.26	50.2, 31.6, 27.3
7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU102	0.29, 0.17, 0.18	41.9, 30.5, 26.9
7.1	1999	Duzce, Turk	Duzce	0.36, 0.52, 0.35	24.5, 31.2, 7.9

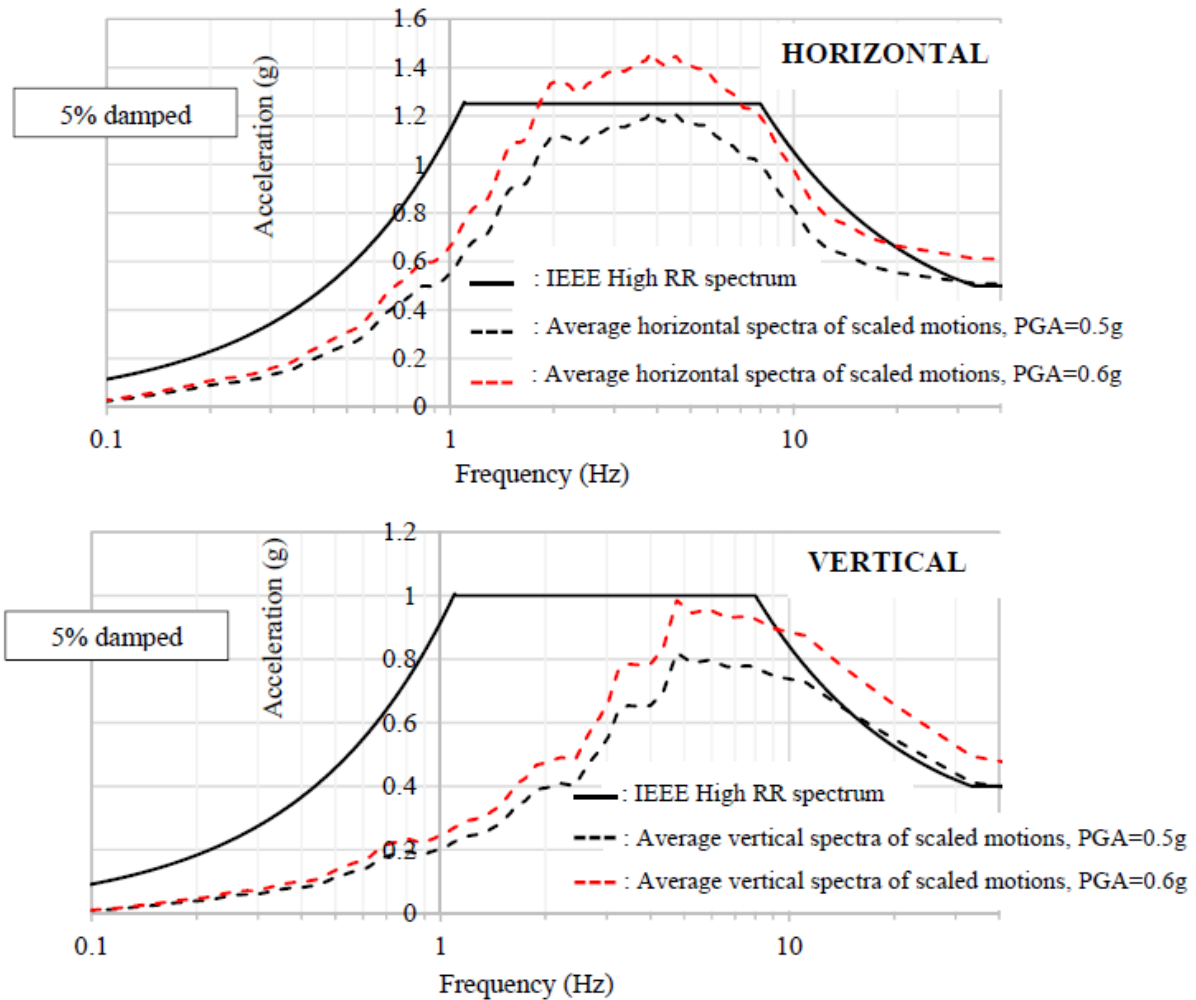
افقی و PGA برابر با 0.48g به جای 0.4g در جهت قائم به منظور مقیاس سازی حرکات زمین، مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است که مطابق استاندارد IEEE std 693، ضریب مقیاس حرکات قائم معادل با ۸۰ درصد ضریب مقیاس حرکات افقی است.

۷- نتایج تجزیه و تحلیل شکنندگی

تجزیه و تحلیل شکنندگی برای پوشینگ‌های جدول ۱، پارامترهای سیستم جداسازی جدول ۲ و مدل‌های ترانسفورماتور جدول ۳، انجام شد و نتایج برحسب منحنی‌های احتمال شکست در مقابل PGA، در منحنی‌های شکنندگی نشان داده شده است.

شکست ترانسفورماتور زمانی رخ می‌دهد که یکی از معیارهای زیر اتفاق بیفتد. هر معیاری که زودتر اتفاق بیفتد، به عنوان معیار شکست در نظر گرفته می‌شود [۱۸]:

شکل ۱۶، میانگین طیف حرکات انتخاب شده را هنگامی که PGA به 0.5g در جهت افقی و 0.4g در جهت قائم مقیاس شده باشند، با طیف‌های پاسخ مورد نیاز در سطح ارزیابی بالا بر اساس استاندارد IEEE std 693، مقایسه می‌نماید. ممکن است طیف میانگین افقی زیر طیف استاندارد IEEE std 693 قرار گیرد، اما دارای محدوده فرکانسی گسترده‌ای است که با طیف استاندارد IEEE std 693 سازگار است، در حالی که طیف میانگین قائم از طیف قائم استاندارد IEEE std 693 منحرف می‌شود. متوسط طیف قائم، محدوده باریک‌تر و مقادیر بالاتر فرکانس‌ها را نسبت به طیف افقی نشان می‌دهد که به درستی در طیف استاندارد IEEE std 693 نمایش داده نمی‌شود، بنابراین در این مقاله، استفاده از نتایج تجزیه و تحلیل شکنندگی برای PGA برابر با 0.6g در جهت افقی ممکن است نشان دهنده رفتار مناسب‌تری برای حرکات لرزه‌ای استاندارد IEEE std 693 باشد. شکل ۲۱، شامل طیف میانگین حرکات مقیاس شده نیز است، بنابراین می‌بایست PGA برابر با 0.6g به جای 0.5g در جهت

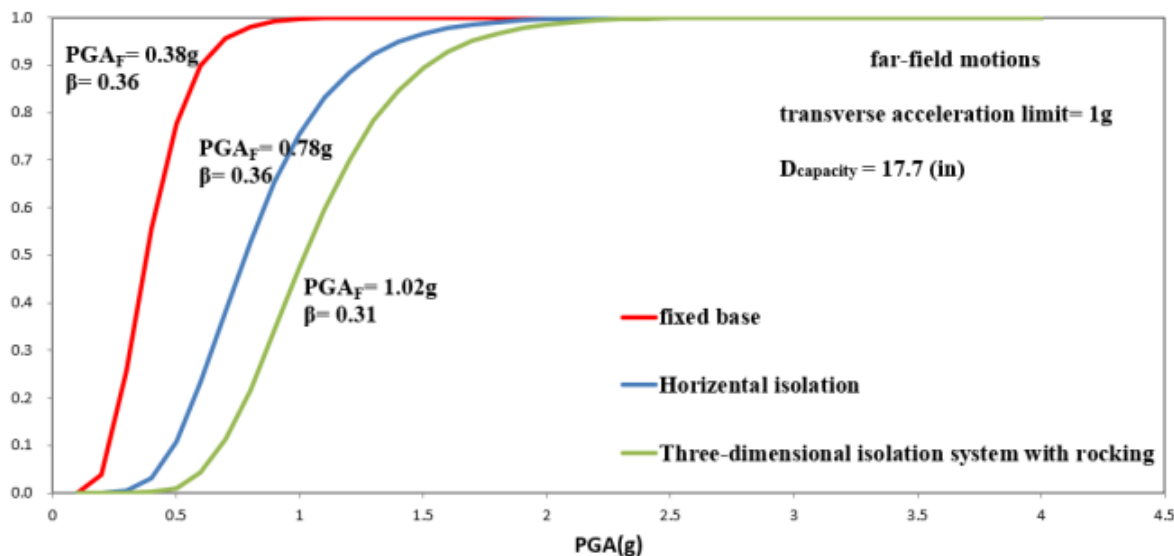


شکل ۱۶. مقایسه طیف‌های میانگین افقی و قائم با طیف‌های پاسخ مورد نیاز در سطح ارزیابی بالا مطابق استاندارد IEEE693 [۲۱]

Fig. 16. Comparison of horizontal and vertical average spectra to IEEE high required response spectra [21]

(۴) جابه‌جایی خالص آپلیفت در جداساز FP، بیش از ۵۱ میلی‌متر گردد یا (۵) تحلیل به دلیل ناپایداری عددی خاتمه یابد که این امر ممکن است به دلیل جابه‌جایی بیش از حد مجاز (که در این مطالعه برابر با ۱۲۷ میلی‌متر است) در سیستم جداسازی قائم فنر-میراگر و ایجاد ضربه در این سیستم، اتفاق بیفتد.

(۱) شتاب در مرکز جرم بوشینگ در جهت طولی به بیش از 5g برسد، یا (۲) شتاب در مرکز جرم بوشینگ در جهت عرضی به بیش از 1g یا 2g (دو حالت مختلف) برسد، یا (۳) جابه‌جایی افقی جداساز آونگ اصطکاکی سه گانه از حد ظرفیت نهایی ۴۵۰، ۷۰۴ و ۷۹۵ میلی‌متر (سه مورد مختلف) فراتر رود، یا



شکل ۱۷. منحنی های شکنندگی برای ترانسفورماتور ۱۸۶۸ کیلونیوتن با بوشینگ ۷/۷ هرتز (شماره ۸) با شیب ۲۰ درجه، ظرفیت جابه‌جایی نهایی جداساز برابر با ۴۵۰ میلی‌متر برای حرکات حوزه دور، حد شتاب عرضی برابر با ۱g

Fig. 17. Fragility curves for 1868 KN transformer with 7/7 Hz bushing (No. 8) inclined at 20 degrees, isolator ultimate displacement capacity of 450 mm for far-field motions, transverse acceleration limit = 1g

۷-۲- داده‌های شکنندگی برای تحریکات پالس‌گونه

تحلیل‌های دینامیکی افزایشی با استفاده از حرکات حوزه نزدیک برای بوشینگ‌ها و ترانسفورماتورهای ذکر شده در جداول ۱ و ۳ انجام شده است و مقادیر $(PGA)_F$ و β (ضریب پراکندگی) در شکل‌های ۱۹ الی ۲۲ نشان داده شده است. شکل‌های ۱۹ و ۲۰ منحنی‌های شکنندگی برای ترانسفورماتور ۱۸۶۸ کیلونیوتن با بوشینگ ۷/۷ هرتز (شماره ۸) با شیب ۲۰ درجه و با جداسازهای آونگ اصطکاکی سه گانه با ظرفیت جابه‌جایی ۴۵۰ میلی‌متر برای تحریکات پالس‌گونه حوزه نزدیک را نشان می‌دهند و حد شتاب عرضی به ترتیب برابر با 1g و 2g است.

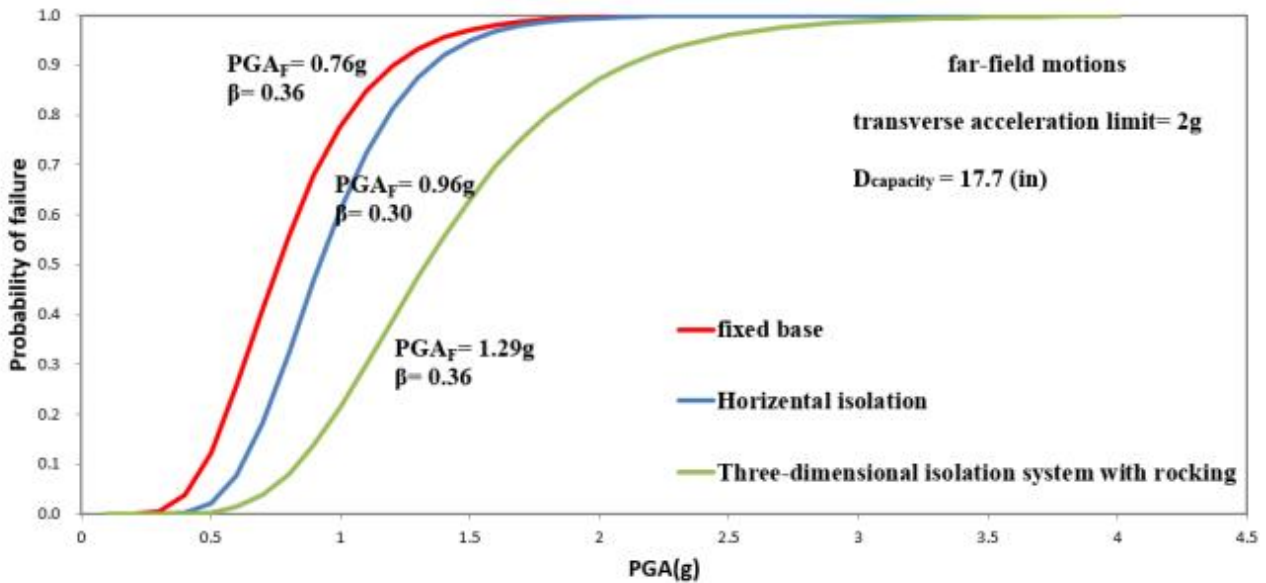
۷-۲-۱- اثر حرکات پالس‌گونه نزدیک گسل

مقایسه منحنی‌های شکنندگی حرکات حوزه دور و حرکات پالس‌گونه نزدیک گسل به وضوح نشان می‌دهد که مقادیر $(PGA)_F$ در تحریکات پالس‌گونه به شدت کاهش می‌یابد و بنابراین شکست ترانسفورماتور و

۷-۱- داده‌های شکنندگی برای حرکات حوزه دور

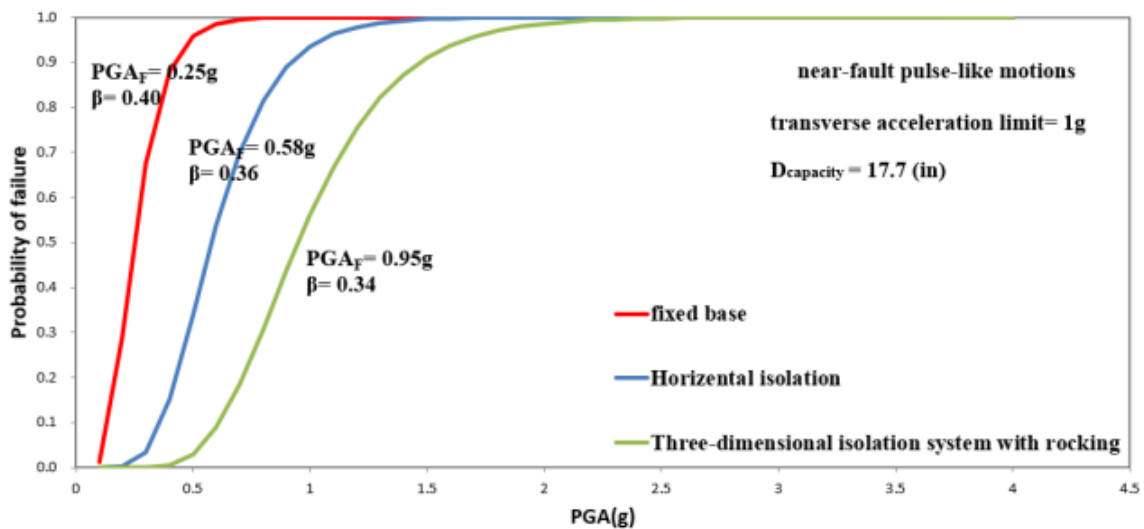
تحلیل‌های دینامیکی افزایشی با استفاده از حرکات حوزه دور برای بوشینگ‌ها و ترانسفورماتورهای فهرست شده در جداول ۱ و ۳ انجام شده و مقادیر $(PGA)_F$ و β (ضریب پراکندگی) در اشکال ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

شکل‌های ۱۷ و ۱۸، منحنی‌های شکنندگی را برای ترانسفورماتور ۱۸۶۸ کیلونیوتن با بوشینگ ۷/۷ هرتز (شماره ۸) با شیب ۲۰ درجه و با جداسازهای آونگ اصطکاکی سه گانه با ظرفیت جابه‌جایی ۴۵۰ میلی‌متر برای حرکات حوزه دور نشان می‌دهند و حد شتاب عرضی به ترتیب برابر با 1g و 2g است. مقایسه منحنی‌های شکنندگی در اشکال ۱۷ و ۱۸ نشان می‌دهند که استفاده از یک سیستم جداسازی سه بعدی با حرکت گهواره‌ای، مقادیر $(PGA)_F$ را تا حداکثر ۳۵ درصد در مقایسه با جداسازی شده افقی در حرکات حوزه دور افزایش می‌دهد.



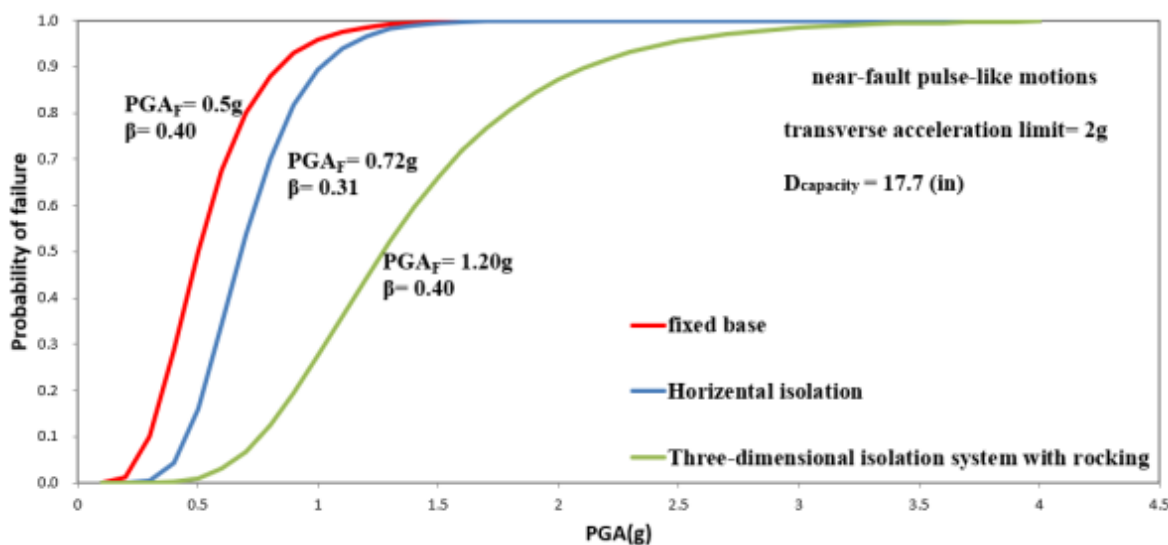
شکل ۱۸. منحنی‌های شکنندگی برای ترانسفورماتور ۱۸۶۸ کیلونیوتن با پوشینگ ۷/۷ هرتز (شماره ۸) با شیب ۲۰ درجه، ظرفیت جابه‌جایی نهایی جداساز برابر با ۴۵۰ میلی‌متر برای حرکات حوزه دور، حد شتاب عرضی برابر با ۲g

Fig. 18. Fragility curves for 1868 KN transformer with 7/7 Hz bushing (No. 8) inclined at 20 degrees, isolator ultimate displacement capacity of 450 mm for far-field motions, transverse acceleration limit = 2g



شکل ۱۹. منحنی‌های شکنندگی برای ترانسفورماتور ۱۸۶۸ کیلونیوتن با پوشینگ ۷/۷ هرتز (شماره ۸) با شیب ۲۰ درجه، ظرفیت جابه‌جایی نهایی جداساز ۴۵۰ میلی‌متر برای حرکات پالس گونه نزدیک گسل، حد شتاب عرضی برابر با 1g

Fig. 19. Fragility curves for 1868 KN transformer with 7/7 Hz bushing (No. 8) inclined at 20 degrees, isolator ultimate displacement capacity of 450 mm for near-fault pulse-like motions, transverse acceleration limit = 1g



شکل ۲۰. منحنی های شکنندگی برای ترانسفورماتور ۱۸۶۸ کیلونیوتن با پوشینگ ۷/۷ هرتز (شماره ۸) با شیب ۲۰ درجه، ظرفیت جابه‌جایی نهایی جداساز ۴۵۰ میلی‌متر برای حرکات پالس‌گونه نزدیک گسل، حد شتاب عرضی برابر با 2g

Fig. 20. Fragility curves for 1868 KN transformer with 7/7 Hz bushing (No. 8) inclined at 20 degrees, isolator ultimate displacement capacity of 450 mm for near-fault pulse-like motions, transverse acceleration limit = 2g

۸- خلاصه و نتیجه‌گیری

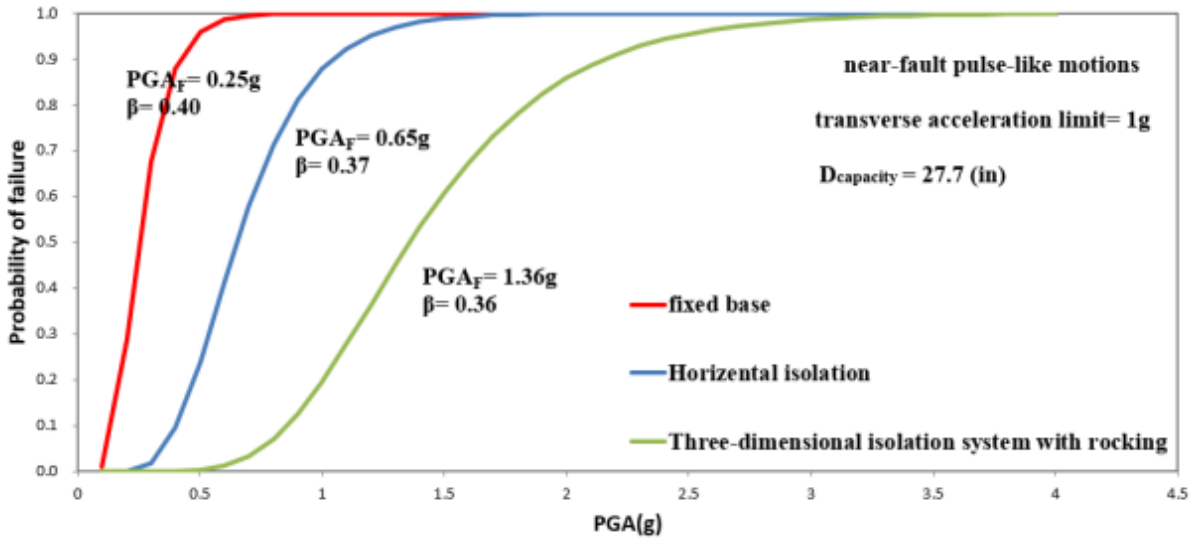
این مطالعه، تحلیلی از پاسخ ترانسفورماتورهای الکتریکی جداسازی شده لرزه‌ای را برای مقایسه عملکرد تجهیزات غیرجداسازی شده با تجهیزاتی که فقط در جهت افقی جداسازی شده‌اند یا توسط یک سیستم جداسازی لرزه‌ای سه بعدی، جداسازی شده است، ارائه می‌دهد. سیستم جداسازی شامل جداسازهای آونگ اصطکاکی سه گانه در جهت افقی و فنر و میراگرهای ویسکوز در جهت قائم است. عملکرد لرزه‌ای با محاسبه احتمال شکست به عنوان تابعی از شدت لرزه‌ای با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر اثرات حرکت لرزه‌ای افقی و قائم زمین، ظرفیت جابه‌جایی سیستم جداسازی لرزه‌ای در جهات افقی و قائم، حدود شتاب برای شکست پوشینگ‌های الکتریکی، حرکت گهواره‌ای یا عدم حرکت گهواره‌ای سازه جداسازی شده و فرکانس‌های نصب پوشینگ، ارزیابی شد.

نتایج حاصل از این مطالعه با توجه به اهداف تحقیق به شرح ذیل خواهد

بود:

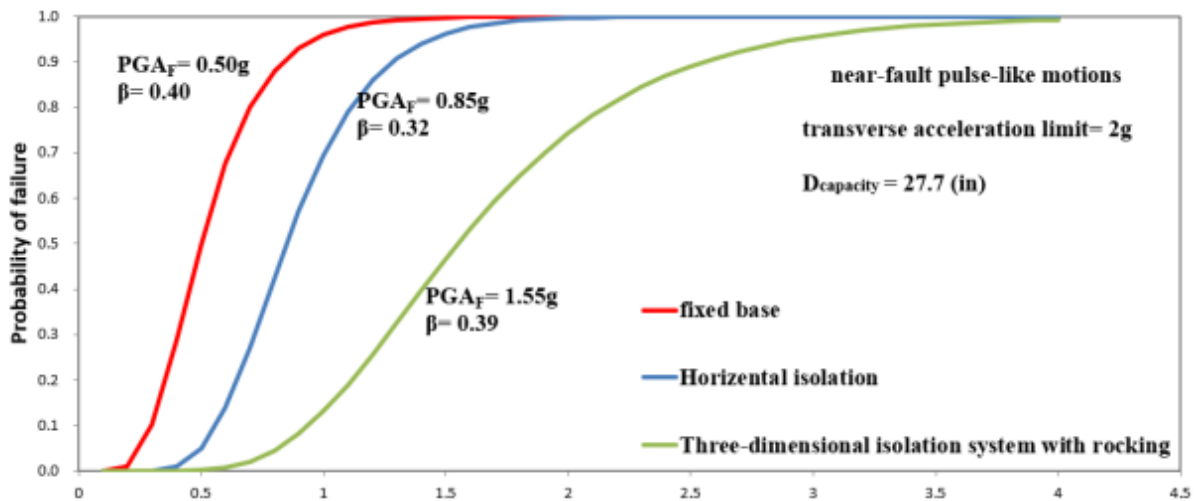
- ۱) سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای فقط در جهت افقی یا سیستم جداسازی لرزه‌ای سه بعدی در مقایسه با سیستم‌های فاقد جداسازی، احتمال شکست را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند.

سیستم جداسازی زودتر اتفاق می‌افتد و منجر به کاهش مقادیر $(PGA)_F$ می‌گردد، بنابراین تحت تحریکات پالس‌گونه، افزایش ظرفیت جابه‌جایی جداساز آونگ اصطکاکی سه گانه ضروری است. تحلیل دینامیکی افزایشی با استفاده از یک سیستم جداسازی لرزه‌ای سه بعدی با ظرفیت جابه‌جایی آونگ اصطکاکی سه گانه برابر با ۷۰۴ میلی‌متر انجام شده است و منحنی‌های شکنندگی مربوطه در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است. افزایش ظرفیت جابه‌جایی آونگ اصطکاکی سه گانه تحت تحریکات پالس‌گونه تأثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد لرزه‌ای سیستم جداسازی لرزه‌ای سه بعدی با حرکت گهواره‌ای خواهد داشت. به عنوان یک نتیجه مهم، منحنی‌های شکنندگی در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان می‌دهند که استفاده از یک سیستم جداسازی سه بعدی با حرکت گهواره‌ای، مقادیر $(PGA)_F$ را تا حداکثر ۸۰ درصد در مقایسه با جداسازی شده افقی افزایش می‌دهد، بنابراین، زمانی که حد شتاب عرضی پوشینگ برابر با 2g است، استفاده از سیستم جداسازی سه بعدی با ظرفیت افقی بالاتر جداساز آونگ اصطکاکی سه گانه، در بهبود عملکرد لرزه‌ای ترانسفورماتور جداسازی شده بسیار مؤثر خواهد بود و احتمال شکست را کاهش می‌دهد.



شکل ۲۱. منحنی های شکنندگی برای ترانسفورماتور ۱۸۶۸ کیلونیوتن با پوشینگ ۷/۷ هرتز (شماره ۸) با شیب ۲۰ درجه، ظرفیت جابه جایی نهایی جداساز ۷۰۴ میلی متر برای حرکات پالس گونه نزدیک گسل، حد شتاب عرضی برابر با

Fig. 21. Fragility curves for 1868 KN transformer with 7/7 Hz bushing (No. 8) inclined at 20 degrees, isolator ultimate displacement capacity of 704 mm for near-fault pulse-like motions, transverse acceleration limit = 1g



شکل ۲۲. منحنی های شکنندگی برای ترانسفورماتور ۱۸۶۸ کیلونیوتن با پوشینگ ۷/۷ هرتز (شماره ۸) با شیب ۲۰ درجه، ظرفیت جابه جایی نهایی جداساز ۷۰۴ میلی متر برای حرکات پالس گونه نزدیک گسل، حد شتاب عرضی برابر با 2g

Fig. 22. Fragility curves for 1868 KN transformer with 7/7 Hz bushing (No. 8) inclined at 20 degrees, isolator ultimate displacement capacity of 704 mm for near-fault pulse-like motions, transverse acceleration limit = 2g

جداسازی افقی افزایش می‌دهد، بنابراین زمانی که حد شتاب عرضی بوشینگ برابر با $2g$ باشد، استفاده از سیستم جداسازی لرزه‌ای سه بعدی با ظرفیت جابه‌جایی افقی بالاتر جداساز آونگ اصطکاکی سه گانه، در بهبود عملکرد لرزه‌ای ترانسفورماتور جداسازی شده و کاهش احتمال شکست، تأثیر به‌سزایی خواهد داشت.

منابع

- [1] J. Wilcoski, S.J. Smith, Fragility Testing of a Power Transformer Bushing: Demonstration of CERL Equipment Fragility and Protection Procedure, DIANE Publishing, 1997.
- [2] A. Gilani, A. Whittaker, G. Fenves, E. Fujisaki, Seismic evaluation of 550 kV porcelain transformer bearings, PEER Report, 5 (1999).
- [3] A.S. Gilani, A.S. Whittaker, G.L. Fenves, Seismic evaluation and retrofit of 230-kV porcelain transformer bushings, Earthquake Spectra, 17(4) (2001) 597-616.
- [4] A. Filiatrault, H. Matt, Experimental seismic response of high-voltage transformer-bushing systems, Earthquake Spectra, 21(4) (2005) 1009-1025.
- [5] A.M. Reinhorn, K. Oikonomou, H. Roh, A. Schiff, J. Kempner, Modeling and seismic performance evaluation of high voltage transformers and bushings, MCEER, 2011.
- [6] Y. Shumuta, K. Ishida, J. Tohma, A method for seismic retrofit planning of substation components on the basis of the cost benefit analysis, Doboku Gakkai Ronbunshu, 1998(584) (1998) 215-228.
- [7] K. Oikonomou, H. Roh, A.M. Reinhorn, A. Schiff, L. Kempner, Seismic performance evaluation of high voltage transformer bushings, in: Structures Congress 2010, 2010, pp. 2724-2735.
- [8] K. Oikonomou, M.C. Constantinou, A.M. Reinhorn, L. Kempner Jr, Seismic isolation of high voltage electrical power transformers, MCEER Technical Report MCEER-16, 6 (2016).
- [9] A.S. Whittaker, G.L. Fenves, A.S. Gilani, Earthquake performance of porcelain transformer bushings,

(۲) با توجه به وقوع یک زلزله که معرف طیف مورد نیاز برای سطح ارزیابی بالا مطابق استاندارد IEEE 693 باشد (که در این مقاله با $PGA=0.6g$ تعریف شده است)، ترانسفورماتورهای فاقد جداسازی با پایه ثابت، احتمال شکست غیرقابل قبولی دارند. با اینکه احتمال شکست ترانسفورماتورهای جداسازی شده افقی کمتر می‌گردد، اما هنوز احتمال شکست بالایی در سطح ارزیابی بالا و علی‌الخصوص در حوزه نزدیک گسل، وجود خواهد داشت.

(۳) روش‌های ارزیابی عملکرد شرح داده شده در این مقاله، می‌تواند به منظور تصمیم‌گیری در مورد مزایای ارائه شده توسط هر یک از سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای بسته به محدودیت‌های تجهیزات حفاظت شده، مکان تجهیزات (مقدار PGA یا حرکات نزدیک گسل) و ویژگی‌های سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای، مورد استفاده قرار گیرد.

بر اساس نتایج جدید در این مقاله، سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای سه بعدی کمترین احتمال شکست را برای همه موارد و پارامترهای مختلف ترانسفورماتور و سیستم جداسازی و همه حرکات در نظر گرفته شده (حوزه دور و حوزه نزدیک)، ارائه می‌دهند. هنگامی که حد شتاب عرضی بوشینگ برابر با $2g$ باشد (که معمولاً در زلزله‌های با شدت بالا این معیار در نظر گرفته می‌شود)، جداسازی فقط مزایای ناچیزی نسبت به حالت غیر جداسازی شده، ارائه می‌دهد. با این حال، زمانی که حد شتاب عرضی بوشی‌نگ معادل با $1g$ باشد، جداسازی فقط مزایای مهمی نسبت به حالت فاقد جداسازی، در بر خواهد داشت.

به علاوه، این مقاله نمونه‌ای از نتایج را برای حرکات پالس‌گونه نزدیک گسل ارائه می‌کند. برای بررسی اثرات حرکات نزدیک گسل با ویژگی‌های پالس‌گونه، نتایج تحلیل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه منحنی‌های شکنندگی حرکات حوزه دور و حرکات پالس‌گونه نزدیک گسل به وضوح نشان می‌دهد که مقادیر $(PGA)_F$ در تحریکات پالس‌گونه به شدت کاهش می‌یابد و بنابراین شکست ترانسفورماتور و سیستم جداسازی زودتر اتفاق می‌افتد و منجر به کاهش مقادیر $(PGA)_F$ می‌گردد، بنابراین تحت تحریکات پالس‌گونه، افزایش ظرفیت جابه‌جایی جداساز آونگ اصطکاکی سه گانه ضروری است.

همچنین منحنی‌های شکنندگی نشان می‌دهند که استفاده از سیستم جداسازی لرزه‌ای سه بعدی با حرکت گهواره‌ای با حد شتاب عرضی بوشینگ برابر با $2g$ که معمولاً در زلزله‌های با شدت بالا به عنوان معیار شکست در نظر گرفته می‌شود، مقادیر $(PGA)_F$ تا حداکثر ۸۰ درصد نسبت به

- [19] A.T. Council, Quantification of building seismic performance factors, US Department of Homeland Security, FEMA, 2009.
- [20] A.S.o.C. Engineers, Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, in, American Society of Civil Engineers, 2017.
- [21] S. Kitayama, M.C. Constantinou, Performance evaluation of seismically isolated buildings near active faults, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51(5) (2022) 1017-1037.
- [22] S. Kitayama, M.C. Constantinou, Probabilistic seismic performance assessment of seismically isolated buildings designed by the procedures of ASCE/SEI 7 and other enhanced criteria, *Engineering Structures*, 179 (2019) 566-582.
- [23] H. Cilsalar, M.C. Constantinou, Behavior of a spherical deformable rolling seismic isolator for lightweight residential construction, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(7) (2019) 4321-4345.
- [24] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, Incremental dynamic analysis, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(3) (2002) 491-514.
- [25] T. Anagnos, Development of an electrical substation equipment performance database for evaluation of equipment fragilities, Citeseer, 1999.
- [26] L.K. Jr, J. Eidinger, J. Perez, A. Schiff, SEISMIC RISK OF A HIGH VOLTAGE ELECTRIC TRANSMISSION NETWORK.
- [27] Ostrom D. SERAII. Advancing mitigation technologies and disaster response for lifeline systems, ASCE, pp. 587–596, 2003.
- [28] D. Ostrom, Database of seismic parameters of equipment in substations. Report to pacific earthquake engineering research center, in, 2004.
- [29] M. Kumar, A.S. Whittaker, M.C. Constantinou, Characterizing friction in sliding isolation bearings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(9) (2015) 1409-1425.
- [30] C.B. Haselton, Assessing seismic collapse safety of modern reinforced concrete moment frame buildings, *Earthquake Spectra*, 20(1) (2004) 205-223.
- [10] H. Suzuki, T. Sugi, H. Kuwahara, N. Kaizu, Studies on aseismic isolation device for electric substation equipment, in: *Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier, 1987, pp. 347-357.
- [11] S. Ersoy, M. Ala Saadeghvaziri, G.-Y. Liu, S. Mau, Analytical and experimental seismic studies of transformers isolated with friction pendulum system and design aspects, *Earthquake Spectra*, 17(4) (2001) 569-595.
- [12] N. Murota, M.Q. Feng, G.Y. Liu, Earthquake simulator testing of base-isolated power transformers, *IEEE transactions on power delivery*, 21(3) (2006) 1291-1299.
- [13] M. Koliou, A. Filiatrault, A.M. Reinhorn, Seismic response of high-voltage transformer-bushing systems incorporating flexural stiffeners I: Numerical study, *Earthquake Spectra*, 29(4) (2013) 1335-1352.
- [14] S. Kitayama, D. Lee, M.C. Constantinou, L. Kempner Jr, Probabilistic seismic assessment of seismically isolated electrical transformers considering vertical isolation and vertical ground motion, *Engineering Structures*, 152 (2017) 888-900.
- [15] D. Zou, L. Zhao, C. He, Q. Xie, Seismic Performance of ± 800 kV Ultra-High Voltage Converter Transformer-Bushing System, in: *2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*, IEEE, 2021, pp. 1-4.
- [16] G.-L. Ma, Q. Xie, A. Whittaker, Seismic performance assessment of an ultra-high-voltage power transformer, *Earthquake Spectra*, 35(1) (2019) 423-445.
- [17] L. Shen, H. Li, Y. Duan, Y. Zhang, J. Wen, Q. Xie, Seismic Performance and Vulnerability Analysis of High Voltage Capacitor, in: *2021 Power System and Green Energy Conference (PSGEC)*, IEEE, 2021, pp. 604-609.
- [18] S. Kitayama, M.C. Constantinou, D. Lee, Procedures and results of assessment of seismic performance of seismically isolated electrical transformers with due consideration for vertical isolation and vertical ground motion effects, MCEER-16-0010 Report, (2016) 180.

- [39] D. Lee, M.C. Constantinou, Combined horizontal-vertical seismic isolation system for high-voltage-power transformers: development, testing and validation, *Bulletin of earthquake engineering*, 16(9) (2018) 4273-4296.
- [40] Lee D, Constantinou MC .Combined Horizontal-Vertical Seismic Isolation System For High-Voltage Power Transformers. MCEER-17-0007 2017; Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo,NY, (2017).
- [41] Y. Shumuta, Practical seismic upgrade strategy for substation equipment based on performance indices, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 36(2) (2007) 209-226.
- [42] D. Kong, Evaluation and protection of high voltage electrical equipment against severe shock and vibrations, State University of New York at Buffalo, 2010.
- [43] M. Fahad, Seismic evaluation and qualification of transformer bushings, State University of New York at Buffalo, 2013.
- [44] R. Villaverde, G.C. Pardoen, S. Carnalla, Ground motion amplification at flange level of bushings mounted on electric substation transformers, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30(5) (2001) 621-632.
- [45] D. Fenz, M. Constantinou, Development, Implementation, and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-spherical Sliding Bearings, Technical Report MCEER-08-0018, in, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State ..., 2008.
- [46] A. Sarlis, M. Constantinou, A. Reinhorn, Shake Table Testing of Triple Friction Pendulum Isolators under Extreme Conditions 13-0011. pdf, (2013).
- [47] F.T. McKenna, Object-oriented finite element programming: frameworks for analysis, algorithms and parallel computing, University of California, Berkeley, 1997.
- [48] W.J. McVitty, M.C. Constantinou, Property modification factors for seismic isolators: design guidance for buildings, MCEER report, (2015) 15-0005. Stanford University, 2006.
- [31] C.B. Haselton, A.B. Liel, B.S. Dean, J.H. Chou, G.G. Deierlein, Seismic collapse safety and behavior of modern reinforced concrete moment frame buildings, in: *Structural engineering research frontiers*, 2007, pp. 1-14.
- [32] C.B. Haselton, C.A. Goulet, J. Mitrani-Reiser, J.L. Beck, G.G. Deierlein, K.A. Porter, J.P. Stewart, E. Taciroglu, An assessment to benchmark the seismic performance of a code-conforming reinforced-concrete moment-frame building, *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, (2007/1) (2008).
- [33] A.B. Liel, C.B. Haselton, G.G. Deierlein, Seismic collapse safety of reinforced concrete buildings. II: Comparative assessment of nonductile and ductile moment frames, *Journal of Structural Engineering*, 137(3) (2011) 492-502.
- [34] D. Lignos, H. Krawinkler, Sidesway collapse of deteriorating structural systems under seismic excitations. Report No. TB 172, John A. Blume Earthquake Engineering Research Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, 72 (2009) 1-12.
- [35] R.A. Medina, H. Krawinkler, Influence of hysteretic behavior on the nonlinear response of frame structures, in: *13th world conference on earthquake engineering*, 2004.
- [36] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). "IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations, IEEE Standard 693." IEEE Power Engineering Society, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, NY,(2018).
- [37] M. Shinozuka, X. Dong, T. Chen, X. Jin, Seismic performance of electric transmission network under component failures, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 36(2) (2007) 227-244.
- [38] Kempner L. Jr. Eiding J. Perez J. Schiff A.. "Seismic Risk of High Voltage Electric Transmission Network." 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, April 18-22, San Francisco, CA, (2006).

- Plateau, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 134 (2020) 106164.
- [52] P.G. Somerville, Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse, Physics of the earth and planetary interiors, 137(1-4) (2003) 201-212.
- [53] Y.-N. Huang, A.S. Whittaker, N. Luco, Maximum spectral demands in the near-fault region, Earthquake Spectra, 24(1) (2008) 319-341.
- [49] PEER NGA WEST 2 <<http://ngawest2.berkeley.edu/>> [9 November 2015].
- [50] S. Abdonnabi Razavi, N. Siahpolo, M. Mahdavi Adeli, A New Empirical Correlation for Estimation of EBF Steel Frame Behavior Factor under Near-Fault Earthquakes Using the Genetic Algorithm, (2020).
- [51] A. Khansefid, Pulse-like ground motions: Statistical characteristics, and GMPE development for the Iranian

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mahmoudi, A. Ghasemi, Sh. Tavousi Tafreshi, Evaluation of the seismic performance of isolated electrical transformers under pulse-like excitations, Amirkabir J. Civil Eng., 54(10) (2023) 4007-4034.

DOI: [10.22060/ceej.2022.21271.7672](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21271.7672)

